

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale

Tesi di Laurea Magistrale

Elettrificazione del trasporto stradale:

analisi di scenari e trend evolutivi in Piemonte



Relatore:

Prof. Bruno Dalla Chiara

Correlatori:

Dott.ssa Sylvie Occelli (IRES Piemonte)

Dott. Simone Landini (IRES Piemonte)

Candidato:

Erica Tuveri

Anno accademico 2019/2020

Luglio 2020

Alla mia famiglia
Ai miei amici che sono una seconda famiglia
E a noi, i 3 amici così che giammai nessuno può trovar

Sommario

<i>Prefazione</i>	1
<i>Introduzione</i>	2
<i>CAPITOLO 1: I sei fattori chiave della sostenibilità del trasporto</i>	4
1.1 Consumo del suolo	4
1.2 Sviluppo tecnologico	5
1.3 Sicurezza della mobilità	6
1.4 Relazioni a “distanza”	6
1.5 Disponibilità delle risorse energetiche	7
1.6 Ambiente	8
<i>CAPITOLO 2: Elementi della mobilità elettrica</i>	13
2.1 Attori coinvolti	13
2.1.1 Consumatori.....	13
2.1.2 Produttori di auto	16
2.1.3 Governo e autorità	17
2.1.4 Fornitori di servizi	20
2.2 Veicoli elettrici	21
2.2.1 Veicoli ibridi serie	22
2.2.2 Veicoli ibridi parallelo	23
2.2.3 Ibridi a confronto	24
2.3 Infrastruttura di ricarica	26
2.3.1 Tecnologia	26
2.3.2 Tipologia di alimentazione	28
2.3.3 Diffusione	30
2.3.4 Ruolo dell’ente pubblico	33
2.4 Batterie	33
2.4.1 Caratteristiche della batteria	36
2.4.2 Costo	38
2.4.3 Produttori	39
<i>CAPITOLO 3: Obiettivi</i>	41
3.1 Obiettivi al 2030	42
3.1.1 Elementi dell’analisi	43
3.1.2 Affinamento dell’analisi	46
3.2 Obiettivo parco auto al 2050	51
3.3 Obiettivi al contorno	51
3.4 Stato dell’arte del sistema elettrico Piemontese e valutazione dell’impatto dei veicoli elettrici	52
<i>CAPITOLO 4: Analisi comparativa valori emissivi veicoli</i>	58

4.1	Analisi well to wheel	58
4.1.1	Elementi dell'analisi	59
4.1.2	Affinamento dell'analisi	62
4.2	Risultati.....	64
<i>CAPITOLO 5: Analisi economica.....</i>		68
5.1	Total cost of ownership.....	68
5.2	Analisi comparativa degli incentivi	75
5.2.1	Incentivi nulli.....	76
5.2.2	Incentivi bassi	76
5.2.3	Incentivi alti.....	77
<i>CAPITOLO 6: Analisi multicriteri per la diffusione delle infrastrutture di ricarica</i>		80
6.1	Analisi multicriteri.....	80
6.1.1	Alternative	81
6.1.2	Criteri.....	82
6.1.3	Pesi.....	85
6.1.4	Punteggi	88
6.2	Applicazione del metodo multicriteri Electre II	88
6.2.1	Fase 1	88
6.2.2	Fase 2.....	90
6.3	Conclusioni sull'analisi.....	94
<i>Conclusioni</i>		96
<i>Allegati</i>		98
Allegato 1.....		98
	Legenda	98
	Elaborazione dei dati.....	98
	Calcolo CO ₂	99
	Stima parco autovetture in Piemonte	101
	Stima del venduto in Piemonte	107
	Calcolo extra consumo elettrico.....	112
Allegato 2.....		114
	Matrice di decisione	114
	Fase 1	115
	Fase 2	116
<i>Riferimenti</i>		120
<i>Indice figure.....</i>		124
<i>Indice tabelle.....</i>		126

Prefazione

Attualmente una maggiore diffusione della trazione elettrica nel trasporto su strada, nella fattispecie in città, sembra essere una delle principali soluzioni per il soddisfacimento degli obiettivi posti in essere dai principali organi internazionali in tema di energia e clima. Tuttavia non è detto che sia così, anzi la trazione elettrica tout-court potrebbe aggravare gli effetti globali delle emissioni mentre la strada della “elettrificazione” dei motori tradizionali risulta più attuabile attraverso soluzioni ibride plug-in.

Il presente elaborato mira ad offrire una visione d’insieme della posizione della regione Piemonte nella transizione del proprio parco auto verso la mobilità elettrificata.

A partire da una stima del parco veicoli al 2030 basata su analisi di alcune fonti e di dati forniti dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, sono state condotte diverse comparazioni finalizzate a fornire un quadro più completo possibile della situazione piemontese. Un’attenta valutazione dei dati stimati ha permesso di mettere in luce le conseguenze dovute alla diffusione delle soluzioni plug-in (ibride ed elettriche) sul territorio piemontese. Nello specifico, sono stati paragonati i valori emissivi del parco auto regionale stimati al 2030 con gli obiettivi richiesti dalla Commissione europea, oltre che l’impatto della diffusione dei veicoli plug-in sul sistema elettrico piemontese. Veicoli ibridi ed elettrici plug-in e tradizionali a combustione interna sono stati poi confrontati sia dal punto di vista dell’impatto ambientale, attraverso un’analisi sulle emissioni, sia dal punto di vista economico, attraverso un’analisi sul costo di acquisto e mantenimento. Infine, attraverso un’analisi multicriteri, è stato fornito un supporto all’individuazione delle aree sulle quali concentrare lo sviluppo di un’infrastruttura di ricarica capillare al fine renderla adeguata alla crescita del mercato dell’elettrificazione, non necessariamente dell’elettrico puro.

Introduzione

La grande dipendenza della società moderna dal petrolio e l'allarmante incremento del suo consumo – a causa di una fortissima motorizzazione in atto, specie nell'Asia orientale, con una popolazione numericamente impressionante - nonché delle emissioni inquinanti causate dal relativo utilizzo hanno acceso numerosi dibattiti che si sono concretizzati in provvedimenti e restrizioni adottati a livello internazionale.

Uno dei settori principali a cui si fa riferimento è il settore dei trasporti che, insieme al settore industriale, contribuisce in maniera prevalente sia al consumo di petrolio, sia alla produzione di sostanze climalteranti. Per questo motivo, nonostante gli importanti traguardi raggiunti a livello di efficienza dei motori a combustione, è stato necessario adottare nuove soluzioni per la mobilità.

Pertanto, negli ultimi anni, l'auto ibrida, con un grado più o meno elevato di elettrificazione fino all'estremo dell'elettrica pura, si è affermata sempre di più nel mercato automobilistico. A dimostrazione della significativa crescita si può riflettere sul fatto che nel 2011 i modelli plug-in disponibili sul mercato fossero solo 4 contro i 72 acquistabili di inizio 2020. [1]

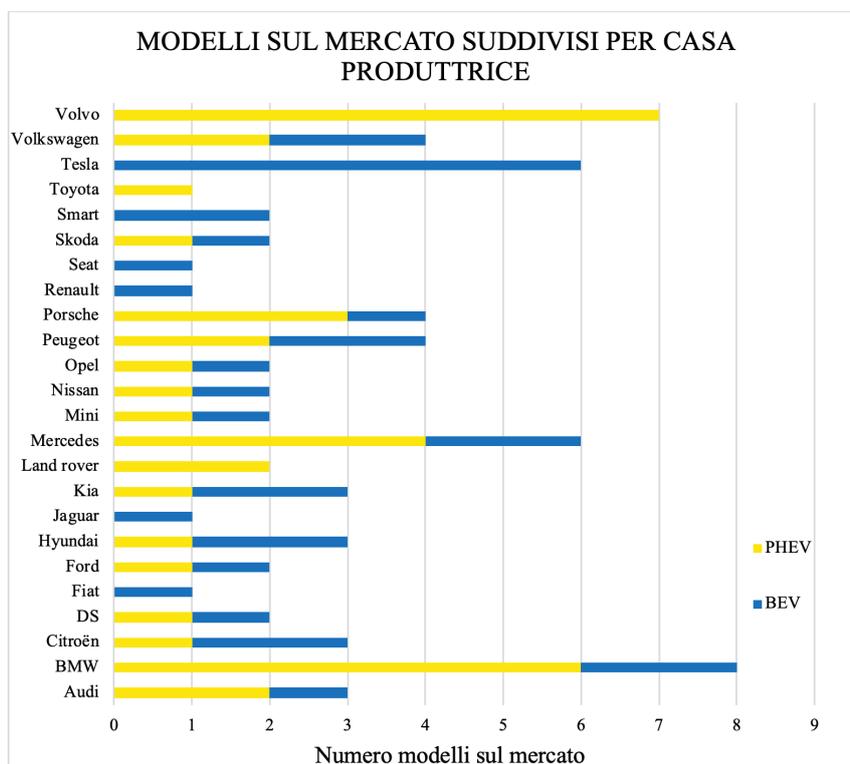


Figura 0.1: Modelli BEV e PHEV presenti sul mercato a Gennaio 2020 suddivisi tra le varie case automobilistiche

Un quadro più completo si può osservare dall'andamento delle vendite: complici le politiche incentivanti deliberate dal governo, nel 2019 in Italia sono stati immatricolati circa 33.700 veicoli plug-in, di cui il 75% ibridi, registrando una crescita di mercato pari al 43% rispetto al 2018. Focalizzandosi sui dati piemontesi invece, si rileva una crescita che rispecchia quella nazionale, con un incremento di circa il 42% delle immatricolazioni dei veicoli plug-in rispetto al 2018. [2]

Nonostante il mercato sia in continua crescita e i governi sostengano questa transizione con appositi provvedimenti, non poche critiche sono state mosse nei confronti di questa nuova soluzione tecnologica, specie se interamente elettrica. Le perplessità relative all'effettiva convenienza dal punto di vista ambientale, soprattutto legate alla produzione e allo smaltimento delle batterie, unitamente all'inadeguatezza della rete infrastrutturale, stanno frenando, almeno in parte, la diffusione dei veicoli elettrici puri, con una maggior propensione verso i veicoli ibridi, che invece ponderano i benefici delle due trazioni, messe in collaborazione con un unico *powertrain*.

In questo contesto, l'obiettivo finale di questo lavoro di tesi è analizzare l'evoluzione del settore dei trasporti piemontese, nell'ambito di veicoli passeggeri privati, in relazione alla mobilità elettrica. È quindi utile evidenziare gli scostamenti, se sono presenti, con gli obiettivi richiesti dalla Commissione europea al 2030 in termini di valori emissivi. Inoltre, è importante comprendere se tale evoluzione sarà sostenibile a livello di sistema elettrico e di infrastrutture di ricarica, oltre che vantaggiosa a livello ambientale ed economico.

CAPITOLO 1: I sei fattori chiave della sostenibilità del trasporto

Per sviluppare nuovi scenari che riguardano il mondo dei trasporti, è necessario analizzare le condizioni e i vincoli che, alla luce dell'evoluzione della società negli ultimi anni, influenzano la sostenibilità della crescita del settore.

In letteratura sono stati individuati 6 fattori chiave che caratterizzano la sostenibilità del trasporto: uso del suolo, sviluppo tecnologico, incidentalità, relazioni a "distanza", risorse energetiche, ambiente. [3]

Li richiamiamo brevemente nel seguito, tenendo presente che essi rappresentano correlati di un obiettivo più generale comune a tutti i paesi sviluppati, che mira a diminuire la dipendenza dal petrolio.

1.1 Consumo del suolo

Lo sviluppo del settore dei trasporti non può avvenire senza un'adeguata rete di infrastrutture, tuttavia il Piano regionale della Mobilità e dei Trasporti ha l'obiettivo di contenere il consumo di suolo destinato a questo scopo.

In Piemonte, il suolo utilizzato dalle infrastrutture di trasporto è pari al 7% della superficie regionale e rappresenta il 16,8% sul suolo consumato totale. [4]

Tabella 1.1: Suolo utilizzato da infrastrutture di trasporto nei bacini di trasporto del Piemonte, 2013

Area	% superficie infrastrutture
Torino	12,9%
Cuneo	21,3%
Alessandria-Asti	23,0%
Nord-Est	13,9%

Fonte 1: IRES Piemonte, 2019

Nella pianificazione è fondamentale tenere in considerazione che, attualmente, il mercato dell'auto si sta muovendo sempre più verso un'ottica sostenibile, investendo molto sulla soluzione tecnologica della trazione elettrificata. Questo, oltre ad avere un impatto sul settore dell'automotive, avrà delle conseguenze anche sulla rete di rifornimento dei vettori energetici utilizzati. Sarà dunque necessario prevedere un adeguamento dell'infrastruttura esistente al fine di creare una capillare rete di ricarica necessaria per la diffusione di questa nuova tecnologia.

1.2 Sviluppo tecnologico

Nel Libro bianco sui trasporti del 2011, la Commissione europea afferma che “Diventare indipendenti dal petrolio non sarà possibile affidandosi ad un’unica soluzione tecnologica. È necessario invece un nuovo concetto di mobilità basato su un insieme di nuove tecnologie e su comportamenti più ecologici” [5].

La tecnologia risulta lo strumento principale per permettere di raggiungere l’indipendenza, seppure graduale e parziale, dal petrolio. Attualmente le aziende automobilistiche si stanno impegnando per sviluppare architetture che prevedano un aumento dell’efficienza dei motori esistenti in combinazione con una riduzione delle emissioni, ma non basta. È necessario uno sviluppo del settore dei trasporti supportato dalla tecnologia al fine di renderlo sostenibile sia a livello ambientale che a livello economico. Nascono quindi i veicoli a trazione alternativa, sistemi ITS (*Intelligent Transport Systems*) per collegare veicoli ed infrastrutture e diverse forme di mobilità condivisa e alternativa.

A questo proposito negli ultimi anni ha preso una posizione rilevante nel settore della mobilità la “sharing mobility”.

“La Sharing mobility è un fenomeno socio-economico che investe il settore dei trasporti tanto dal lato della domanda quanto dall’offerta. Dal lato della domanda, la Sharing mobility consiste in una generale trasformazione del comportamento degli individui che tendono progressivamente a preferire l’accesso temporaneo ai servizi di mobilità piuttosto che utilizzare il proprio mezzo di trasporto. Dal lato dell’offerta, questo fenomeno consiste nell’affermazione e diffusione di servizi di mobilità che utilizzano le tecnologie digitali per facilitare la condivisione di veicoli e/o tragitti realizzando servizi scalabili, interattivi e più efficienti.” [6]

È necessario fare una distinzione tra i servizi posti in “Sharing”:

- Spostamento condiviso: i passeggeri condividono uno spostamento. Rientrano in questa categoria i servizi di carpooling come BlaBla Car o Uber.
- Mezzo condiviso: gli utenti aderenti al servizio condividono un mezzo di trasporto, ma non contemporaneamente. È un servizio di noleggio temporaneo. Rientrano in questa categoria servizi come Enjoy, Blue Torino, MiMoto o Circ, queste ultime tre rispettivamente auto, motorini e monopattini sono tutti a trazione elettrica.

In una società in cui si dimentica a casa il portafoglio ma non lo smartphone, anche il settore dei trasporti si è adeguato. Il concetto alla base è avere la mobilità al servizio delle persone, non il contrario e in questo modo la tecnologia si integra perfettamente con il settore dei trasporti.

L’idea nasce per contrastare le maggiori criticità riscontrate nell’utilizzo dei mezzi pubblici:

- Scomodità
- Incompatibilità di orari
- Mancanza di adeguati collegamenti

Sono quindi le persone a doversi adeguare ad orari, fermate, ecc.. Nella Sharing Mobility invece si ha il mezzo di trasporto che si vuole (monopattino, bicicletta, auto, ecc.), dove lo si vuole, all'orario che si vuole. Ovviamente sono necessarie caratteristiche del territorio e della società tali da permetterne l'implementazione.

1.3 Sicurezza della mobilità

Esistono diversi fattori che impattano sull'incidentalità stradale e tra questi figura sicuramente la crescita della mobilità motorizzata.

Uno degli obiettivi posti in essere dalla Commissione europea attraverso l'emanazione del Libro bianco sui trasporti è il raggiungimento delle “zero vittime” negli incidenti stradali entro il 2050, con un target intermedio di dimezzamento dei morti entro il 2020 rispetto ai valori del 2010. [5] Nel periodo 2010 – 2018 le vittime della strada sul territorio piemontese si sono ridotte di circa il 23,2 % [7], ponendo la regione in una posizione non in linea con il conseguimento dell'obiettivo.

Lo sfruttamento della tecnologia potrebbe essere un fattore chiave per incrementare la sicurezza stradale: utilizzare ad esempio i sistemi ITS potrebbe avere un determinante in termini di prevenzione di incidenti.

La regione è attiva già da diversi anni nel monitoraggio del fenomeno incidentale: è fondamentale concentrarsi sui controlli tecnici, elaborare strategie d'azione per interventi di emergenza, ma soprattutto puntare su formazione e educazione quali strumenti di prevenzione al fine di raggiungere gli obiettivi posti in essere dalla Commissione europea.

1.4 Relazioni a “distanza”

In un mondo in cui le distanze sono azzerate da tutto ciò che è fattibile sfruttando internet, gli spostamenti hanno assunto un ruolo diverso. È possibile vedere i propri cari senza spostarsi dal proprio divano o acquistare un bene prodotto dall'altra parte del pianeta dalla propria scrivania: tutto ciò ha messo in moto una catena che ha rivoluzionato non solo i trasporti, ma anche la logistica di tutto il mondo. Una naturale conseguenza è stata uno sviluppo in maniera esponenziale del settore dei trasporti, tanto da dover prevedere “l'ultimo miglio a emissioni zero” per ridurre gli impatti ambientali che l'incremento della logistica a livello urbano ha creato.

1.5 Disponibilità delle risorse energetiche

In Italia, la principale fonte energetica del settore dei trasporti è il petrolio, importato per il 92,5% dall' estero [8], seppure attraverso società anche nazionali che hanno quote o interessi diretti nel paese di origine. Nel 2000, rappresentava il 92% delle fonti energetiche del settore.

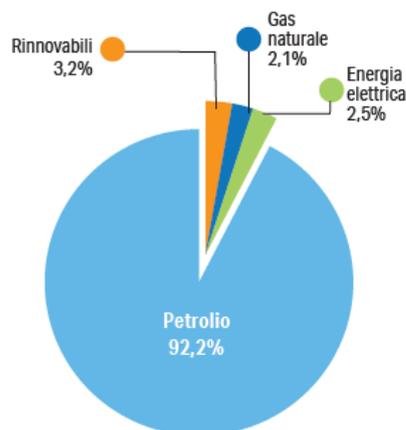


Figura 1.1: Fonti energetiche settore dei trasporti, Italia
Fonte 2: Unione petrolifera, 2019 [9]

È del tutto evidente, pertanto, che il settore è fortemente esposto ai cambiamenti che potrebbero prodursi qualora la materia prima si esaurisse e/o l'accesso alle fonti diventasse indisponibile per ragioni geo-politiche o commerciali.

Anche in Piemonte il petrolio è la prima fonte di energia, figura 1.2.

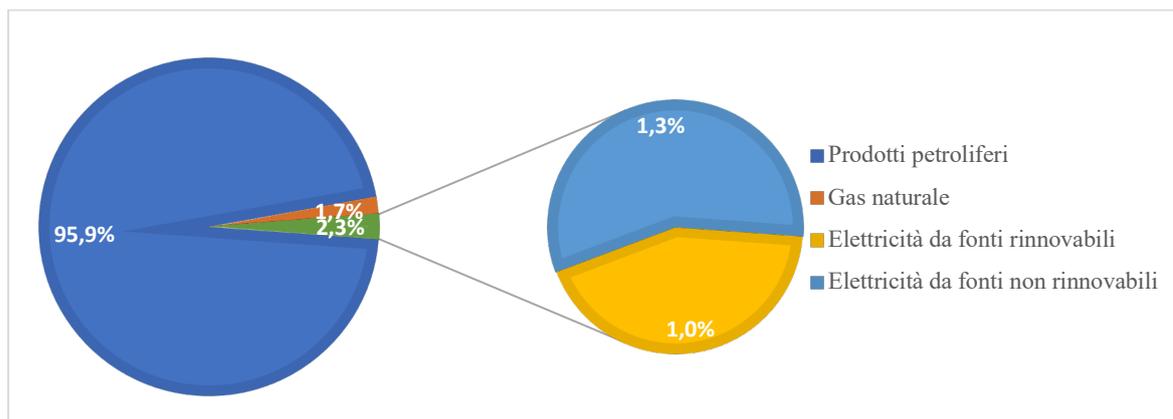


Figura 1.2: Fonti energia settore trasporti, Piemonte, 2014
Fonte 3: Elaborazione dell'autore su dati Piano energetico del Piemonte [10]

Sfruttando il mix energetico di produzione di energia elettrica nazionale messo a disposizione da GSE (Gestore Servizi Energetici) [10], assumendo che, una volta immessa sul mercato,

non sia più distinguibile il luogo di origine dell'energia elettrica, in combinazione con i dati relativi alle fonti di energia del settore dei trasporti utilizzati nel paragrafo precedente, è stato realizzato il grafico in figura 1.3:

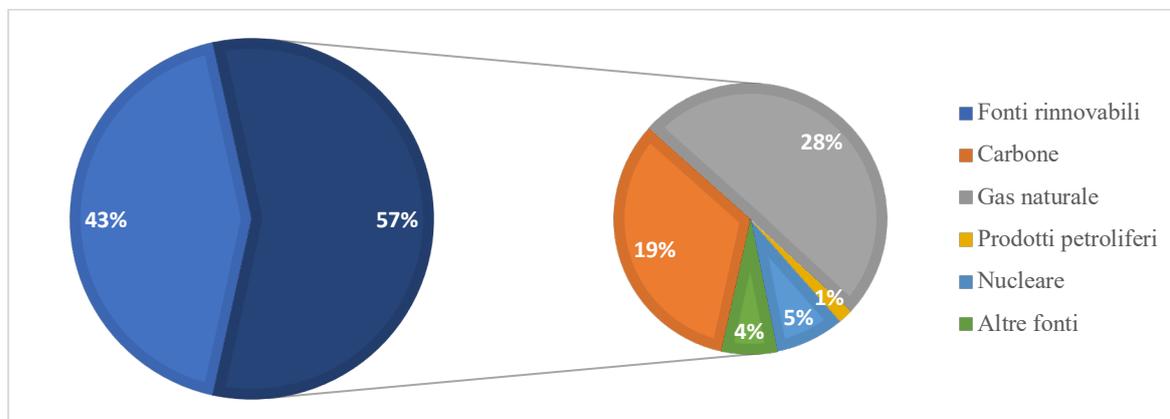


Figura 1.3: Fonti energia elettrica, Piemonte, 2014

Fonte 4: Elaborazione dell'autore su dati Unione petrolifera e piano energetico del Piemonte

Le fonti rinnovabili ricoprono un ruolo importante nella produzione di energia elettrica, tuttavia la parte preponderante (57%) risulta comunque avere origine da fonti non rinnovabili, causa di livelli di inquinamento molto maggiori. A questo proposito la Commissione europea ha emanato una direttiva che ha come oggetto la promozione dell'uso dell'energia rinnovabile [11]: “Il controllo del consumo di energia europeo e il maggiore ricorso all'energia da fonti rinnovabili, congiuntamente ai risparmi energetici e ad un aumento dell'efficienza energetica, costituiscono parti importanti del pacchetto di misure necessarie per ridurre le emissioni di gas a effetto serra” inoltre “nel dispacciamento degli impianti di produzione dell'elettricità, i gestori del sistema di trasmissione diano la priorità agli impianti di produzione che utilizzano le fonti energetiche rinnovabili nella misura consentita dal funzionamento sicuro del sistema elettrico nazionale e sulla base di criteri trasparenti e non discriminatori. Gli Stati membri assicurano che siano adottate appropriate misure operative relative al mercato e alla rete, affinché vi siano meno limitazioni possibili dell'elettricità prodotta dalle fonti rinnovabili.”.

L'utilizzo dell'energia elettrica si rivela quindi un'importante risorsa alternativa: risolve il problema della disponibilità, non è esauribile ed è accessibile ovunque. Sarà necessario però analizzare la rete di distribuzione elettrica per capire se effettivamente sia in grado di sostenere questa nuova modalità di utilizzo.

1.6 Ambiente

Dati alla mano, il settore dei trasporti è una delle principali cause dell'inquinamento atmosferico, tendenzialmente locale, e di contributo alle emissioni di anidride carbonica, a livello globale, a causa dell'elevato consumo di petrolio ed il contributo galoppante che ad

esso stanno dando da 20-30 anni aree del mondo come quella cinese: secondo la Commissione europea le automobili sono responsabili approssimativamente del 10% delle emissioni totali. [12]

È noto come la combustione derivante dall'uso del petrolio abbia impatti negativi: inquinamento, cambiamenti climatici e problemi di salute.

Nell'auto tradizionale, le emissioni di inquinanti sono prodotte dal funzionamento dei motori a combustione, che prevede la reazione di miscele di idrocarburi con l'aria, con la conseguente produzione di vapore acqueo, anidride carbonica e sostanze inquinanti (CO, HC, NO_x e PM).

In particolare, gli ossidi di azoto (NO_x) si formano in base alla temperatura che viene raggiunta durante la combustione. Il particolato (PM), invece, viene emesso a causa dell'imperfetta combustione del gasolio, dall'usura del battistrada o dai freni a disco. Questo significa che anche i veicoli a trazione puramente elettrica, seppure in maniera minore rispetto ai veicoli tradizionali, sono responsabili della sua produzione; tuttavia già l'affiancamento di un motore elettrico ad uno a combustione interna permette di contenere l'usura dei freni – oltre che spostarsi senza emissioni nella città – perché il rallentamento viene ottenuto attraverso il motore elettrico medesimo, recuperando peraltro energia a favore delle batterie.

Questi inquinanti hanno effetti dannosi per la salute umana: vengono associati principalmente a problemi riguardanti l'apparato respiratorio e cardiovascolare

Il Piemonte risulta essere un'area problematica a causa della sua conformazione geomorfologica. La presenza delle Alpi, infatti, fa da barriera ai venti e il PM e gli altri inquinanti tendono a ristagnare. Uno degli inquinanti su cui è stata posta maggiormente l'attenzione negli ultimi anni è il PM10: la figura 1,4 riporta la presenza di PM10 al 16 gennaio 2020.

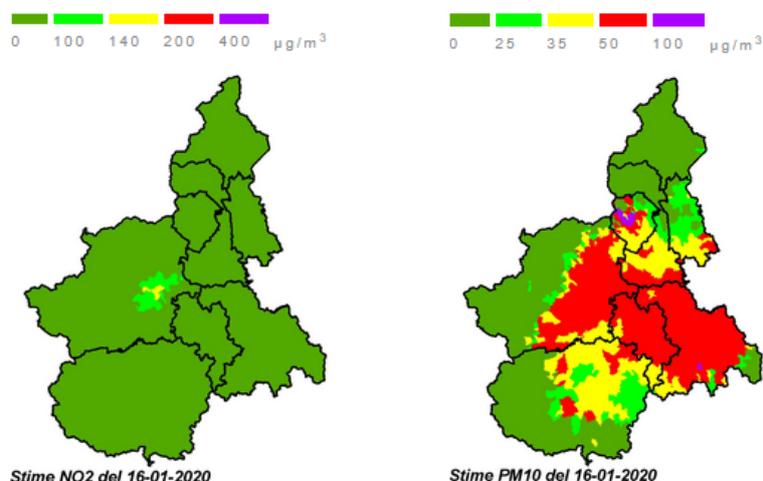


Figura 1.4 : Mappa degli inquinanti in Piemonte in data 16/01/2020 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
 Fonte 5: Sistema Piemote [13]

La mappa, ottenuta attraverso un sistema modellistico e dai dati osservati da stazioni del sistema regionale di rilevamento della qualità dell'aria, risulta molto significativa: come si può notare la zona metropolitana di Torino e la zona di Asti e Alessandria figurano come quelle con maggiori quantità di emissioni. Si tratta delle aree in cui i valori del traffico giornaliero medio sono più elevati, figura 1.5.

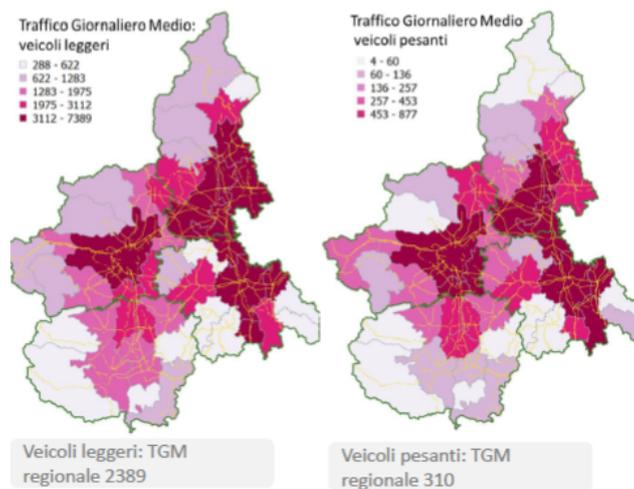


Figura 1.5: Traffico giornaliero in Piemonte
 Fonte 6: IRES Piemonte, 2019 [4]

Si noti che si trattano delle stesse aree in cui le amministrazioni tentano di ridurre gli inquinanti attraverso i blocchi del traffico.

Secondo Legambiente, a Torino spetta il primato di città più inquinata d' Italia negli ultimi 10 anni con un totale di 1086 giorni oltre i limiti, di cui 147 solo nell'ultimo anno (2019).[14]

Ovviamente il traffico non è l'unica causa di questi numeri: riscaldamenti domestici, industrie e strade sporche contribuiscono a questo record negativo.

A differenza degli altri inquinanti locali, la CO₂ non è un inquinante (se non ad elevatissime concentrazioni) né quindi direttamente responsabile di danni alla salute dell'uomo. Si tratta infatti di un gas normalmente presente in natura in conseguenza a numerosi processi biologici, ma il suo progressivo accumulo nell'atmosfera, dovuto in buona parte al settore dei trasporti, è causa di danni ambientali (contribuisce all'effetto serra).

A livello di veicolo le emissioni di CO₂ dipendono da [15]:

- consumo di combustibile: $m_{CO_2} = \frac{\rho_f}{0.0315} \times V$ [16], dove ρ_f è la densità del combustibile e V il consumo chilometrico del veicolo
- stile di guida: spazio percorso, tempo di utilizzo, velocità e accelerazione
- caratteristiche aerodinamiche e condizioni manutentive del veicolo
- resistenza specifica al moto r_0
- aderenza al suolo
- caratteristiche di tracciato (pendenze, curve)
- presenza e caratteristica di filtri per ridurre le emissioni

Il tutto va poi affiancato al livello di occupazione del veicolo medesimo.

Lo sviluppo di una cultura del rispetto dell'ambiente ha portato ad uno sviluppo tecnologico incentrato sulla diminuzione dei consumi e quindi delle emissioni inquinanti e dell'anidride carbonica.

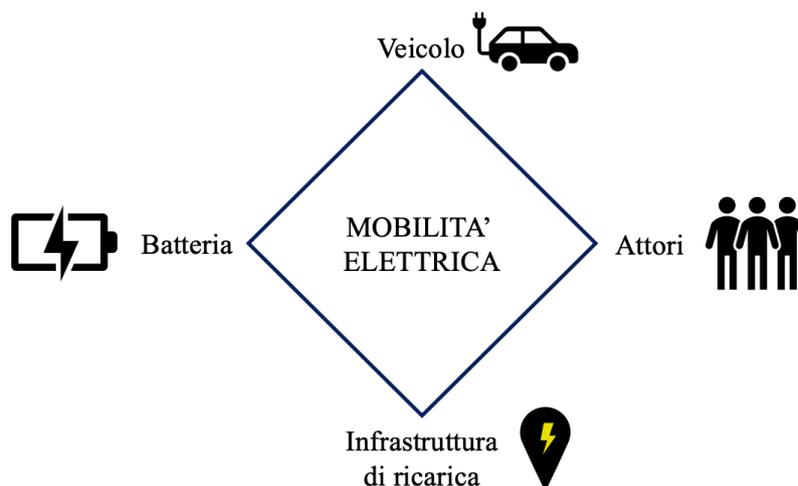
Secondo la Commissione europea “è necessaria una riduzione di almeno il 60% delle emissioni di gas serra rispetto ai livelli del 1990, entro il 2050”. Inoltre “il trasporto urbano è il responsabile di circa un quarto delle emissioni di CO₂ del settore dei trasporti”, quindi “la Commissione europea sosterrà l'impegno di ricerca necessario per conseguire l'obiettivo dell'ERTRAC di migliorare l'efficienza dei veicoli in modo da abbattere fino al 40% le emissioni di CO₂ delle autovetture per il nuovo parco veicoli nel 2020. [5]

Se tale obiettivo fosse raggiunto, il nuovo parco auto presenterebbe emissioni medie di 95 g CO₂/km”. Inoltre, sarà necessario “dimezzare entro il 2030 l'uso delle autovetture alimentate con carburanti tradizionali ed eliminarlo del tutto entro il 2050” e “conseguire nelle principali città un sistema di logistica urbana a zero emissioni entro il 2030” oltre a “ridurre i volumi di traffico grazie alla gestione della domanda e alla pianificazione territoriale, adottando misure per facilitare gli spostamenti a piedi, in bicicletta o con modalità alternative”. [5] L'utilizzo di fonti alternative potrebbe risolvere parte del problema, almeno a livello di centri urbani, permettendo raggiungere alcuni degli obiettivi del Libro bianco sui trasporti. È necessario però sottolineare che quota parte dell'energia elettrica attualmente prodotta in Italia è ottenuta

da derivati del petrolio (circa un terzo). Ciò significa che l'impatto ambientale totale non viene del tutto azzerato, ma delocalizzato in zone meno densamente popolate, risultando meno pericoloso per la salute umana. Non bisogna altresì dimenticare che la trazione elettrica sfrutta accumulatori elettrochimici, ad oggi difficili da smaltire, ma comunque soggetti a riutilizzo (*second life*) e, nel caso di alcuni materiali, riciclabili. Attualmente si sta infatti cercando di adottare economie circolari che permettono il riciclo dei principali materiali quali piombo e litio, ma sono ancora poco diffuse.

CAPITOLO 2: Elementi della mobilità elettrica

Questo capitolo contiene una panoramica di tutti gli elementi principali che caratterizzano la mobilità elettrica.



Una disamina di questi elementi è utile alla discussione dei capitoli successivi.

2.1 Attori coinvolti

Agli attori storicamente coinvolti nel settore dei trasporti, si affiancano nuove figure aventi interesse ad avere un ruolo nel nuovo mercato dell'auto elettrica e della mobilità.

2.1.1 Consumatori

Con il progresso tecnologico dei veicoli, anche il profilo dell'utilizzatore tipo ha subito un cambiamento, adattandosi alle nuove tecnologie e sviluppando nuovi bisogni. Numerosi studi hanno cercato di creare un identikit del tipo di consumatore facente parte del mercato dei veicoli elettrici. Secondo uno studio condotto da UNRAE [17], in Italia, il 72,4% delle immatricolazioni di veicoli elettrici a uso privato nell'anno 2018 è stato effettuato da uomini, un terzo dei quali apparteneva ad una fascia di età compresa tra i 46 e i 55 anni. La quota di mercato più significativa di acquisti è rappresentata dal Nord, anche se Roma risulta essere la prima città italiana per numero di immatricolazioni.

BOX 1: Popolazione piemontese

Se si considera la distribuzione della popolazione in Piemonte, dove la popolazione tra i 46 e i 55 anni rappresenta un'aliquota significativa, Figura 1, e se si ipotizza che questa abbia un comportamento d'acquisto analogo a quello rilevato nello studio UNRAE, è ragionevole ritenere che il Piemonte possa essere, potenzialmente, un mercato interessante per le auto elettriche.

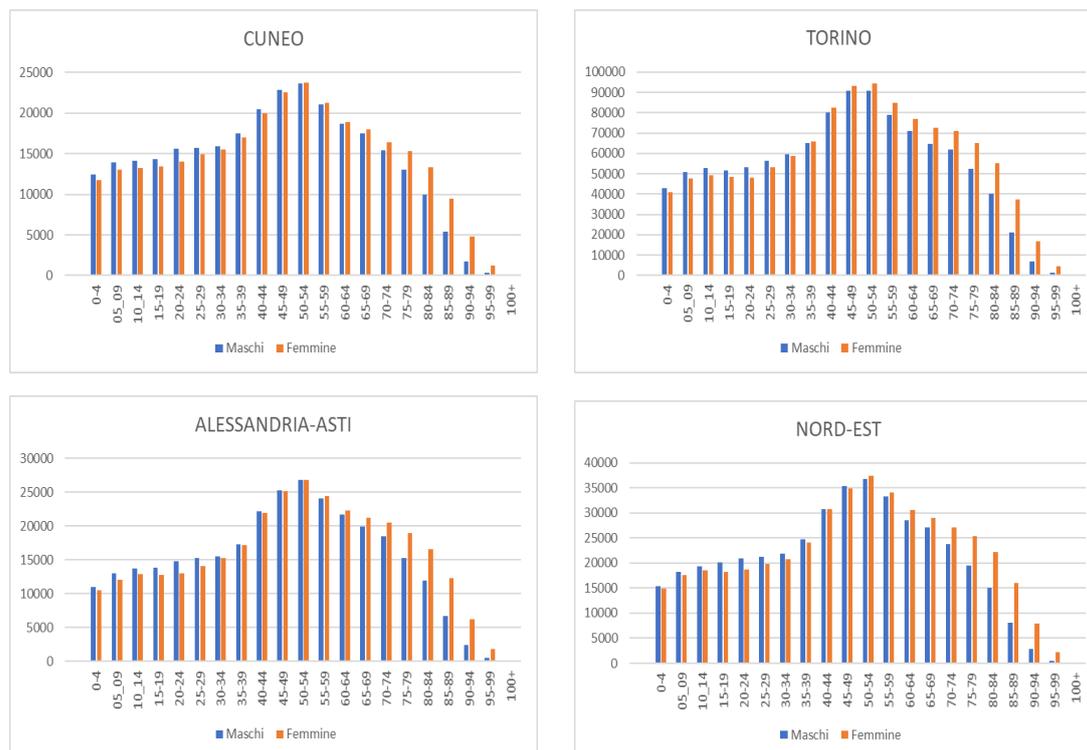


Figura 2.1: Distribuzione della popolazione per classi di età nei bacini di trasporto del Piemonte, 2019

Fonte 7: ISTAT, 2019 [18]

Altri studi [19][20], condotti in alcuni paesi del Nord Europa, pongono l'attenzione su altre variabili che aiutano a dettagliare maggiormente l'identità dell'acquirente tipo. Oltre al genere e all'età, anche il livello di istruzione, l'occupazione e la grandezza del nucleo familiare sono variabili da tenere in considerazione.

Benché le quote di mercato dell'auto elettrica non si differenzino in misura apprezzabile secondo il livello di istruzione, la propensione ad acquisire in futuro un'auto elettrica aumenta al crescere del grado di istruzione.

A livello occupazionale, la quota di mercato maggiore è legata ai lavoratori nel settore privato, seguiti a ruota dai lavoratori statali e da quelli facente parte del mondo accademico.

La dimensione del nucleo familiare è un'altra variabile da non trascurare: dalle analisi emerge che al crescere del numero di componenti della famiglia aumenta il numero di auto possedute ed aumenta il numero di quelle a trazione elettrica. Tale risultato potrebbe trovare fondamento in motivazioni di tipo puramente economico, essendo il costo di mantenimento di un veicolo a trazione elettrica ridotto rispetto a un veicolo a combustione, o di tipo sociale, in quanto, avendo la possibilità di scegliere un veicolo supplementare ipotizzando il possesso di più veicoli di cui almeno uno tradizionale, l'utente potrebbe preferire un veicolo elettrico.

BOX 2: Nuclei familiari in Piemonte

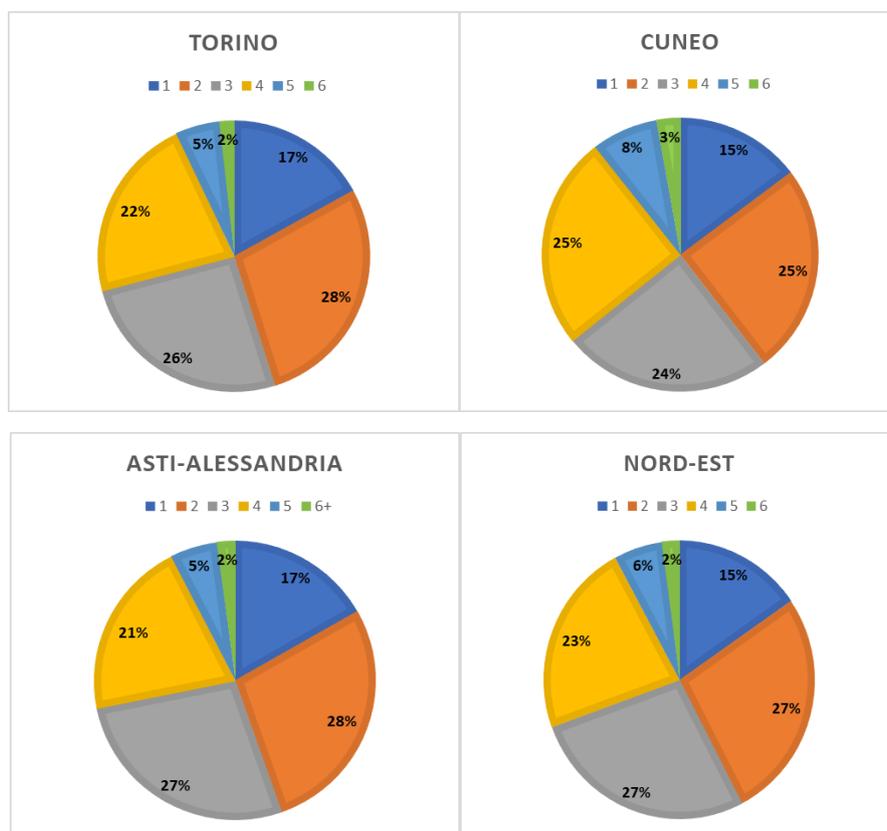


Figura 2.2: Distribuzione delle famiglie per numero di componenti nei bacini di trasporto del Piemonte, 2011

Fonte 8: ISTAT, 2011[18]

Analizzando nel dettaglio la situazione in Piemonte, come si può osservare dai grafici, la maggior parte dei nuclei familiari è formata da 2 o più componenti. Dall'elaborazione delle statistiche [2] si ricava che nella regione ogni 1,01 abitanti in possesso del documento di guida è presente un'auto. Si potrebbe quindi presumere che sia presente più di una vettura per ogni nucleo familiare, almeno una delle quali potrebbe ragionevolmente essere o diventare a trazione elettrica secondo le precedenti considerazioni.

Secondo uno studio effettuato dalla Artur D Little [20] su 8000 guidatori residenti nel Nord Europa (non necessariamente possessori di un veicolo elettrico), le ragioni principali che spingono all'acquisto di un veicolo a trazione elettrica sono le seguenti:

- 1- Contribuire al miglioramento climatico
- 2- Esistenza di incentivi per l'acquisto
- 3- Total cost of ownership inferiore rispetto a quello di un'auto tradizionale
- 4- Presentarsi come front runner (anticipare le tendenze)
- 5- Minori restrizioni nella circolazione, soprattutto nelle grandi città
- 6- Emozione della guida (soprattutto legate alla sensazione di novità e alle prestazioni scattanti che caratterizzano i veicoli elettrici)

A fronte di questi fattori positivi, ne esistono altri che ne frenano l'acquisto. Primo fra tutti è il costo iniziale. Sebbene gli acquirenti siano disposti a spendere fino al 32% in più rispetto a quanto spenderebbero per un'auto tradizionale, per circa il 51% degli intervistati, il prezzo iniziale rimane una barriera non facilmente sormontabile (barriera economica). Altri vincoli all'acquisto sono l'inadeguatezza della rete di ricarica (recharge anxiety) e l'autonomia limitata (range anxiety).

Costo, range anxiety e recharge anxiety sono aspetti che pesano molto in un confronto tra un veicolo a trazione elettrica pura e uno a combustione interna: potrebbero risultare meno significativi qualora il confronto tenesse in considerazione anche i veicoli ibridi plug-in, soprattutto in tema di ansia da autonomia e ricarica. Tali problematiche però restano tra quelle più significative nella valutazione dell'acquisto di un veicolo, pertanto l'argomento verrà ripreso successivamente.

2.1.2 Produttori di auto

I vincoli sulle emissioni posti dalla Commissione europea e le nuove esigenze da parte del mercato hanno spinto i produttori di auto a sviluppare soluzioni alternative per non perdere quote di mercato.

Negli ultimi venti anni, con un rapido incremento negli ultimi 5, le grandi case automobilistiche hanno effettuato ingenti investimenti per entrare in nuovi segmenti di mercato. Questo ha permesso negli anni di ottenere un'ampia gamma di modelli con performance migliori a costi minori.

In questa transizione l'auto elettrica è passata da prodotto di nicchia a prodotto di massa. Per favorirne la diffusione è stato quindi necessario stringere accordi con tutto l'ecosistema che si interfaccia con il settore. Secondo FCA "lo sviluppo efficace ed efficiente delle vetture elettriche non si ferma alla costruzione della vettura, ma punta alla creazione di un ecosistema attorno ad essa".[21]

Sono dunque stati presi accordi con Terna per la sperimentazione del V2G (Vehicle to grid) e con Enel X per trovare soluzioni di ricarica intelligenti presso stabilimenti e uffici di FCA.

Il vantaggio di introdurre tutte queste nuove tecnologie e sistemi ITS nei veicoli permette alle case automobilistiche di renderli più efficienti e più facilmente interconnessi, attraverso l'analisi dell'aria, informazioni sul traffico, monitoraggio dello stato di salute, introduzione di servizi da remoto, aumento della sicurezza attraverso dispositivi direttamente collegati con i soccorritori, supporto alla guida e alla ricarica, ecc., il tutto in tempo reale.

La vettura rimane però il punto focale e il passaggio a nuove tecnologie comporta una modifica della supply chain ad essa collegata. L'intera rete che lega i rapporti e gli scambi tra gli attori deve pertanto modificarsi: occorre trovare nuovi fornitori e stipulare nuovi accordi, definire nuove modalità per gestire i problemi di hold up, sincronizzare i sistemi informativi, gestire i controlli qualità, ecc.

2.1.3 Governo e autorità

L'intervento delle istituzioni risulta fondamentale per il conseguimento di uno sviluppo sostenibile del settore dei trasporti.

“L'innovazione e l'applicazione delle innovazioni devono essere sostenute da un adeguato quadro normativo” [5].

Negli ultimi anni, molti governi hanno deciso di mettere in pratica azioni concrete mirate a ridurre le emissioni e l'inquinamento dell'aria, aumentandone la qualità e riducendo il rischio di danni alla salute dei cittadini.

Attraverso il Libro Bianco sui trasporti del 2011 la Commissione europea indirizza gli stati membri ad attuare politiche per l'utilizzo di carburanti e sistemi di propulsione innovativi e sostenibili. In questo ambito rientra l'utilizzo dei veicoli elettrici in sostituzione ai veicoli a combustione interna.

Ogni stato membro ha il compito di emanare leggi che consentano il conseguimento degli obiettivi Comunitari. La diversità delle strutture amministrative e delle competenze esistenti nei paesi, tuttavia, non agevola la creazione di strategie comuni e rende difficile sviluppare un'infrastruttura omogenea.

Per favorire la diffusione dei veicoli elettrici il governo italiano ha previsto una serie di incentivi nella legge di bilancio 2019, art. 1 da comma 1031 a 1050, confermati e aggiornati in quella del 2020.

A. Incentivi diretti: contributi per l'acquisto

Per l'acquisto di vetture nuove di fabbrica appartenenti alla categoria M1, cioè per i veicoli con massimo 8 posti a sedere oltre a quello del conducente, immatricolate nel periodo tra il 1° marzo 2019 e il 31 dicembre 2021, eventualmente in contestualità alla consegna di un veicolo della stessa categoria omologato alle classi Euro 1,2,3 e 4 intestato al soggetto che ne fa richiesta, o ad uno dei familiari, da almeno 12 mesi:

Tabella 2.1: Contributi acquisto

Emissioni CO ₂ ¹ [g/km]	Contributo con rottamazione	Contributo senza rottamazione
0-20	6.000 €	4.000 €
21-70	2.500 €	1.500 €

I contributi, cumulabili con quelli eventualmente previsti dalle singole regioni di appartenenza, verranno corrisposti “mediante compensazione con il prezzo di acquisto”. [22]

B. Incentivi indiretti: imposta sulle emissioni (ecotassa)

Seguendo il principio “chi inquina paga”, un ulteriore incentivo all'acquisto di veicoli a basse emissioni è l'istituzione di “un'imposta parametrata al numero di grammi di biossido di carbonio emessi per chilometro eccedenti la soglia di 160 CO₂ g/km” [9]:

Tabella 2.2: Imposta su inquinamento

Emissioni CO ₂ ¹ [g/km]	Imposta
161-175	1.100 €
176-200	1.600 €
201-250	2.000 €
Superiore a 250	2.500 €

La Legge di bilancio 2020 fa riferimento alla legge del 2019: sono confermati gli stessi parametri necessari per ottenere la contribuzione, ma si amplia la tipologia dei beneficiari.

¹ Tutti i valori sono riferiti al ciclo NEDC: il ciclo NEDC (New European Driving Cycle) è il ciclo di guida utilizzato per la misurazione dei consumi di un veicolo. Non è più in vigore ed è stato sostituito dal ciclo WLTP che utilizza parametri diversi.

Lo Stato ha deciso di dare il buon esempio: in ottemperanza all'art. 1 comma 107, in occasione del rinnovo dei veicoli in dotazione, le pubbliche amministrazioni inserite nel conto economico consolidato della pubblica amministrazione sono tenute "all'acquisto o al noleggio, in misura non inferiore al 50%, di veicoli adibiti al trasporto su strada alimentati ad energia elettrica, ibrida o a idrogeno".[22] Inoltre, sono stati stanziati 3 milioni di euro destinati al rinnovo del parco veicolare delle imprese attive sul territorio italiano iscritte al Registro elettronico nazionale.

Oltre alle Leggi di bilancio, ogni regione ha emanato delle linee guida per la diffusione della mobilità elettrica; esse riguardano i criteri da seguire per creare un'infrastruttura di ricarica, l'obbligo di installazione di punti di ricarica nelle stazioni di rifornimento di nuova costruzione o in ristrutturazione, incentivi aggiuntivi, ecc.

La regione Piemonte, ad esempio, elargisce degli incentivi aggiuntivi rispetto a quelli previsti dalla Legge di bilancio 2019 che vanno dai 1500€ ai 6000€ a seconda delle emissioni di CO₂ e dalla contestuale rottamazione di un veicolo, ma i contributi sono destinati solo alle imprese. Tuttavia, per i veicoli a uso privato la regione prevede l'esenzione dalla tassa di bollo: totale, nel caso degli elettrici puri, o temporanea (5 anni), nel caso di un veicolo ibrido.[23] Entrambe le categorie di veicoli sono comunque sempre esenti dalle limitazioni di traffico eventualmente imposte.

Altre possibili misure per favorire la diffusione dei veicoli elettrici potrebbero riguardare: la gratuità del parcheggio, sgravi fiscali o assenza di pedaggi per i possessori di auto a emissioni ridotte, come avviene già in alcune zone d'Italia e stati europei, al fine di favorire l'espansione, senza però effettuare ingenti investimenti da parte delle autorità.

È opportuno ricordare come alla base di queste nuove regolamentazioni ci sia, oltre a una maggiore sensibilità ai cambiamenti climatici, un aspetto economico da non sottovalutare: l'aumento del prezzo del petrolio avvenuto in questi anni ha messo in luce i problemi che si stanno incontrando nello sfruttare questa risorsa energetica. Come si può osservare in figura 2.3, le regolamentazioni sono diventate sempre più stringenti all'aumentare del prezzo del greggio.

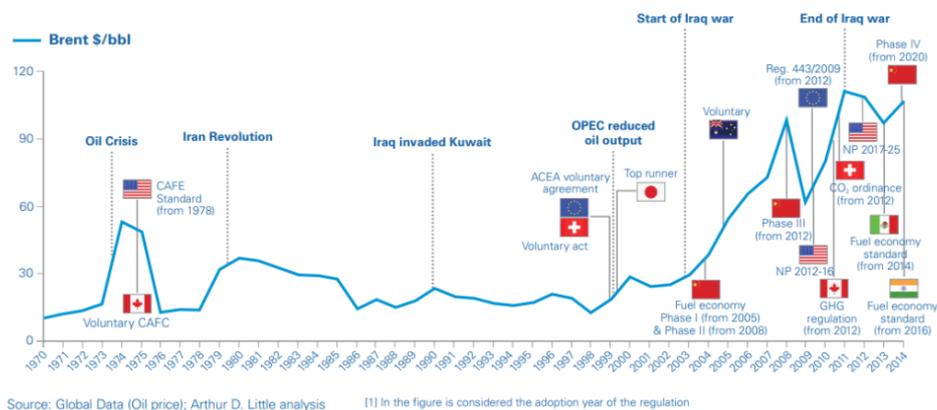


Figura 2.3: Relazione tra prezzo del petrolio ed emanazione delle regolamentazioni

Fonte 9: Artur D Little, 2014 [24]

2.1.4 Fornitori di servizi

Con l'avvento della trazione elettrica, muta la compagine dei fornitori nel settore automotive. Al fianco delle grandi compagnie petrolifere, che stanno modificando la loro mission al fine di adattarsi al cambiamento, troviamo i distributori di energia elettrica. Questi ultimi stanno adeguando le reti di distribuzione al fine di rispondere all'aumento del fabbisogno energetico richiesto dall'uso di questa nuova tecnologia.

Nascono nuove partnership attraverso le quali progettare nuove infrastrutture di ricarica e sviluppare nuove tecnologie che permettano di sfruttare i veicoli elettrici come accumulatori di energia, da restituire alla rete in caso di picchi di domanda (V2G).

Nella supply chain del veicolo sono entrati nuovi fornitori di componentistica non necessaria sulle auto a combustione: le batterie, i motori, i convertitori, l'elettronica di controllo, ecc.. Essa ha bisogno di nuove competenze per quanto riguarda l'assemblaggio e la manutenzione. Sarà quindi necessario prevedere adeguati percorsi di formazione per i meccanici e l'inserimento di nuove figure in campo lavorativo.

Negli anni a seguire, complice anche un aumento dei livelli di automazione nei processi produttivi del settore, diminuirà il numero degli addetti diretti nel settore dell'automotive, che però, grazie alla diffusione della trazione elettrica, verranno compensati in maniera più che positiva dagli addetti legati al settore dell'energia, della chimica e delle infrastrutture di ricarica.

Anche lo scenario di ricarica del vettore energetico si modifica completamente. Oltre a una rete pubblica analoga a quella dei distributori di benzina, si sta sviluppando una nuova rete potenzialmente ubiquitaria: chiunque può dotarsi di infrastrutture di ricarica, poiché meno invasive rispetto alle attuali pompe che necessitano di serbatoi e particolari misure di sicurezza. Luoghi come parcheggi pubblici o privati ad uso a terzi, hotel, supermercati e

luoghi di lavoro possono diventare parte dell'infrastruttura, installando gli opportuni punti di ricarica.

Andando nel dettaglio dei sistemi di ricarica dei veicoli elettrici si identificano 3 principali attori:

- Fornitori di tecnologia: effettuano ingenti investimenti in ricerca e sviluppo al fine di creare uno standard nella rete di ricarica
- Charger point operator (CPO): gestisce l'infrastruttura di ricarica dal punto di vista sia tecnico che operativo
- E-mobility provider (E-MP): vende il servizio ai clienti finali e permette l'accesso all'infrastruttura gestita dal CPO

2.2 Veicoli elettrici

Il veicolo elettrico a batteria converte l'energia accumulata in forma elettrochimica in energia elettrica, che a sua volta è convertita dai motori in energia meccanica utile al movimento.

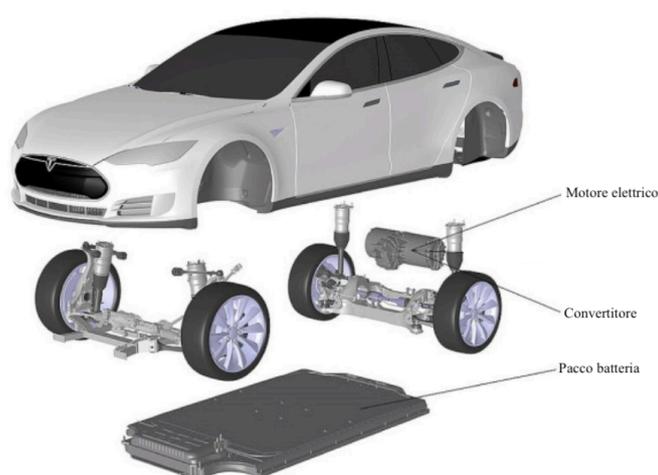


Figura 2.4: Schema veicolo elettrico

Fonte 10: Sicurauto.it [25]

In questo caso il motore termico viene sostituito da uno o più motori elettrici.

La funzione di accumulo di energia, in sostituzione del serbatoio, è svolta da una batteria, ricaricabile attraverso la connessione alla rete elettrica, mediante una presa, che può essere interna o esterna al veicolo, ed eventualmente attraverso i sistemi di frenata rigenerativa. Tali sistemi permettono di recuperare l'energia dispersa durante la frenata del veicolo reimmettendola nel sistema e ricaricando gli accumulatori.

Altro elemento fondamentale di un sistema di trazione elettrico, oltre alla batteria e al motore, è il convertitore che ha la funzione di regolare il flusso di energia tra accumulatore e motore elettrico.

Nonostante gli avanzamenti compiuti, il veicolo elettrico a batteria presenta una serie di inconvenienti: l'autonomia ridotta degli accumulatori, i lunghi tempi di ricarica, la necessità di andare in autoprotezione della batteria ad alte e basse temperature (con connessi dispendi energetici) e il costo elevato di queste nuove tecnologie hanno fatto nascere l'esigenza di soluzioni più flessibili.

Il loro superamento richiede soluzioni che sappiano combinare in modo flessibile i vantaggi del nuovo motore, con quelli di quello tradizionale, che ha cent'anni di storia e continua ad evolvere. I veicoli ibridi-elettrici hanno proprio questo obiettivo. Si sfrutta il maggior rendimento, le basse emissioni nel luogo di utilizzo e le ottime performance nei cicli urbani di un motore elettrico, in combinazione con una maggiore autonomia, minori tempi di rifornimento e ottime performance nei cicli extraurbani caratteristici dei sistemi di trazione tradizionali.

Da qui in avanti ci riferiremo ai veicoli ibridi-elettrici identificandoli semplicemente come ibridi.

I veicoli ibridi si distinguono in base al grado di ibridizzazione. Il grado di ibridizzazione è il rapporto tra la potenza massima del motore elettrico e la potenza massima complessiva installata sul veicolo.

$$I = \frac{P_{\max \text{ motore elettrico}}}{P_{\max \text{ Tot}}} \quad [2.1]$$

dove $P_{\max \text{ Tot}} = P_{\max \text{ motore elettrico}} + P_{\max \text{ motore termico}}$

I veicoli ibridi sono classificabili in ibridi serie e ibridi parallelo. La differenza principale sta nel fatto che, mentre per i primi la trazione è demandata esclusivamente al(ai) motore(i) elettrico(i), per i secondi la trazione è demandata principalmente al motore termico, mentre il(i) motore(i) elettrico(i) può o non avere alcuna funzione di trazione, o avere un impatto sulla trazione differente a seconda delle varie configurazioni che si analizzeranno in seguito.

2.2.1 Veicoli ibridi serie

Per quanto riguarda la tecnologia ibrido serie, che prevede un sistema di trazione elettrico, si identificano principalmente 2 diverse configurazioni, che differiscono in base alla quantità di energia elettrica immagazzinata in un accumulatore elettrochimico:

1. Range extender: L'autonomia degli accumulatori è ridotta rispetto a EV puro, in quanto è presente un motore termico che, oltre a sopperire all'alimentazione dei

sistemi di bordo, funge anche da sistema di generazione ausiliario. Il vantaggio sta nel downsizing del motore termico, che lavora in punti a potenza costante, permettendone un migliore rendimento.

2. Load follower: L'autonomia degli accumulatori è estremamente ridotta rispetto a EV puro, in quanto il motore termico funge da sistema di generazione per di fornire la potenza necessaria ai sistemi ausiliari e al sistema di trazione.

2.2.2 Veicoli ibridi parallelo

Gli ibridi parallelo invece prevedono una classificazione basata sul crescente impatto che la componente elettrica ha sul sistema di trazione termico:

1. Micro hybrid: veicolo termico con minimo apporto di coppia/potenza della componente elettrica e minimo immagazzinamento elettrico. La componente elettrica presente a bordo non ha funzione di trazione, ma permette di ridurre il consumo di carburante fino ad un massimo del 15%. È presente un motorino di avviamento in grado, oltre che di spegnere e riaccendere il motore al semaforo come i sistemi Start&Stop, anche di ricaricare la batteria assolvendo alle funzioni del normale alternatore. Così la batteria immagazzina più energia che in seguito può alimentare gli ausiliari, senza impattare sul carico del motore termico. Quando l'unità elettrica è abbinata ad una trasmissione automatica, il sistema può spegnere il motore termico prima che il veicolo si arresti del tutto, permettendo di avanzare negli ultimi pochi metri a una velocità non superiore agli 8-10 km/h a zero emissioni (coasting).

Mild hybrid: veicolo termico con medio apporto di coppia/potenza della componente elettrica e ridotto immagazzinamento elettrico. Si tratta di auto dotate di un motore elettrico che è in grado di trasferire potenza alle ruote per facilitare il movimento. Questi sistemi intervengono soltanto nelle fasi in cui il motore termico necessita di piena potenza, come ad esempio in accelerazione, riuscendo a contenere almeno in parte il consumo di carburante. I mild hybrid riescono a recuperare energia nelle fasi di rilascio dell'acceleratore e, alcuni, grazie al solo motore elettrico, possono mantenere l'andatura quando si viaggia a velocità costante, a patto che non si raggiungano velocità troppo elevate e che la batteria sia sufficientemente carica. In ogni caso, non possono viaggiare mai esclusivamente in modalità elettrica pura.

2. Full parallel hybrid: veicolo termico con elevato apporto di coppia/potenza della componente elettrica e importante immagazzinamento elettrico. A differenza dei veicoli mild hybrid, possono avanzare per brevi tratti in modalità esclusivamente elettrica. Le strategie di controllo del motore elettrico e di quello termico sono volte ad ottimizzare le prestazioni e l'efficienza dell'intero sistema di trazione.

3. Ibridi plug-in (PHEV): veicolo termico con elevato apporto di coppia/potenza della componente elettrica e piena capacità di immagazzinamento elettrico. È possibile la trazione in modalità elettrica pura; in questo caso il veicolo funziona esattamente come i veicoli BEV. In alcune situazioni però, ad esempio quando le batterie sono scariche, quando si necessita di maggior potenza in accelerazione o quando il carico dei sistemi ausiliari risulta elevato (es: livelli di climatizzazione elevati), interviene il motore termico. Questo tipo di veicolo permette di ricaricare le batterie direttamente da rete elettrica, e non solo tramite il recupero in frenata, massimizzando l'utilizzo del sistema di trazione elettrico.

2.2.3 Ibridi a confronto

Prendendo in considerazione tutti gli attuali modelli disponibili sul mercato in una versione sia ibrida benzina che solamente a benzina, è stata effettuata un'analisi comparativa al fine di comprendere meglio lo stato dell'arte del mercato attuale.

Le tre principali variabili utilizzate nel confronto sono il costo (prezzo di listino), i consumi e le emissioni rilevate per il modello ibrido e il suo "gemello" a benzina. Nello specifico:

- sono stati presi in considerazione solo i modelli base per semplicità di confrontabilità di prezzo di listino, senza ovviamente tenere in considerazione eventuali incentivi statali o promozioni;
- i dati relativi a consumi ed emissioni di anidride carbonica, fanno riferimento a quelli calcolati secondo il ciclo di prova WLTP², in particolare per un consumo misto. I dati sono stati reperiti sulla rivista "Quattroruote" [1] e dalle schede tecniche fornite sui siti delle case automobilistiche, ad eccezione di quelli riguardanti la categoria dei veicoli con tecnologia micro ibrida, ricavati dalla letteratura. È necessario sottolineare il fatto che i valori di emissioni dei veicoli plug-in non tengono conto di quelle derivanti dalla produzione dell'energia necessaria per la ricarica attraverso la rete elettrica.

Il grafico seguente riassume i risultati della comparazione tra i diversi tipi di veicoli ibridi e il veicolo di riferimento a benzina per un campione di 48 autovetture.

² Il ciclo WLTP (Worldwide Harmonised Light-Duty Vehicles Test Procedure) è il ciclo di guida utilizzato per la misurazione dei consumi di un veicolo. Permette di simulare condizioni di guida reali in laboratorio.

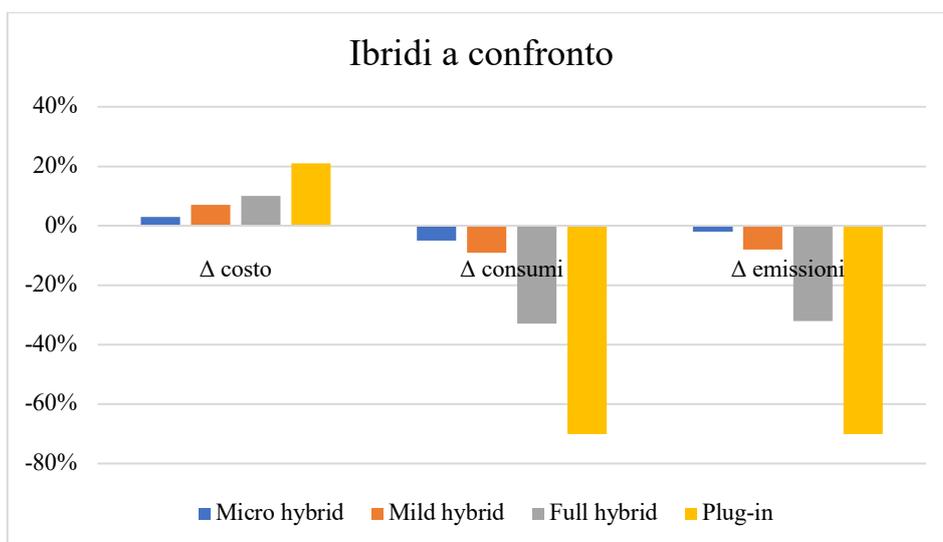


Figura 2.5: Grafico dei risultati dell'analisi di confronto del modello ibrido rispetto all'equivalente a benzina

Tabella 2.3: Valori di confronto tra il modello ibrido e l'equivalente a benzina

Tipologia ibrido	Δ costo	Δ consumi	Δ emissioni
Micro hybrid	3%	-5%	-2%
Mild hybrid	7%	-9%	-8%
Full hybrid	10%	-33%	-32%
Plug-in	21%	-70%	-70%

È evidente a colpo d'occhio come livelli più elevati di ibridizzazione siano associati a riduzioni maggiori sia dei consumi che delle emissioni. I veicoli plug-in hanno valori molto superiori a quelli degli altri, in conseguenza della maggiore autonomia a trazione elettrica. Si raggiunge in media il 70% di riduzione sia dei consumi che delle emissioni, circa il 40% in più rispetto ai veicoli full hybrid e addirittura circa il 60% rispetto alla tecnologia mild hybrid.

I veicoli mild hybrid e i full hybrid, a seconda dell'autonomia degli accumulatori, assistono in trazione il motore termico, limitando sia i consumi che le emissioni. Le tecnologie di Start & Stop, invece, permettono una riduzione dei consumi e delle emissioni limitate alle condizioni di guida del veicolo e al tipo di percorso.

Il rovescio della medaglia è rappresentato da un aumento di prezzo. A fronte di un aumento (medio) di prezzo del 21% per la tecnologia plug-in, in particolare, le riduzioni dei consumi e delle emissioni sarebbero dell'ordine del 70%.

La tecnologia non è però ancora abbastanza matura per permettere di effettuare economie di scala. L'acquirente, pertanto, si trova oggi di fronte a dover scegliere come bilanciare una spesa economica e una spesa nei confronti dell'ambiente.

2.3 Infrastruttura di ricarica

È necessario ora prendere in esame un altro elemento importante per la diffusione dei veicoli a trazione elettrica: l'infrastruttura di ricarica. È noto come l'assenza o l'insufficiente capillarità di una rete di ricarica ostacoli sia la penetrazione di questi veicoli sul mercato, sia la penetrazione dei consumatori ad acquistarli.

2.3.1 Tecnologia

Per un veicolo elettrico il punto di ricarica viene definito come “un'interfaccia in grado di caricare un veicolo elettrico alla volta o sostituire la batteria di un veicolo elettrico alla volta”. [26] I punti di ricarica si differenziano in base alla potenza erogata, alla tipologia di alimentazione, alla modalità di ricarica e al tipo di connettore.

In Italia, i punti di ricarica più diffusi sono di tipo privato, cioè quelli localizzati nelle abitazioni private degli utilizzatori che sfruttano i contratti di fornitura domestica in combinazione con l'utilizzo di dispositivi chiamati wallbox per la ricarica del veicolo. In alternativa sul territorio sono presenti punti di ricarica pubblici o privati ad accesso pubblico, cioè quelli localizzati in luoghi pubblici o accessibili al pubblico in determinati orari. In questi luoghi sono presenti colonnine di ricarica che, sfruttando gli standard mode 3 con prese di tipo 2, permettono di ricaricare il veicolo.

2.3.1.1 Potenza erogata

Per quanto riguarda la potenza erogata la direttiva europea del 2014 [26] distingue i punti di ricarica in:

- punto di ricarica di potenza standard: “un punto di ricarica che consente il trasferimento di energia elettrica a un veicolo elettrico di potenza pari o inferiore a 22 kW, esclusi i dispositivi di potenza pari o inferiore a 3,3 kW, che sono installati in abitazioni private o il cui scopo principale non è ricaricare veicoli elettrici, e che non sono accessibili al pubblico”
- punto di ricarica di potenza elevata: “un punto di ricarica che consente il trasferimento di energia elettrica a un veicolo elettrico di potenza superiore a 22 kW”

Nel Piano italiano delle infrastrutture di ricarica (PNire) del 2014 [27], le classi sono maggiormente dettagliate:

Per quanto riguarda il Piano nazionale infrastrutturale per la ricarica a cui fa riferimento l'Italia [27], le classi sono maggiormente dettagliate:

- Ricarica lenta (slow charging): un punto di ricarica che consente il trasferimento di energia elettrica a un veicolo elettrico di potenza pari o inferiore a 7 kW, solitamente 3,3 kW
- Ricarica accelerata (quick charging): un punto di ricarica che consente il trasferimento di energia elettrica a un veicolo elettrico di potenza superiore a 7 kW e inferiore a 22 kW
- Ricarica veloce (fast charging): un punto di ricarica che consente il trasferimento di energia elettrica a un veicolo elettrico di potenza superiore a 22 kW e inferiore a 50 kW
- Ricarica molto veloce (very fast charging): un punto di ricarica che consente il trasferimento di energia elettrica a un veicolo elettrico di potenza superiore a 50 kW

La definizione di ricarica “lenta” o “rapida” definisce la durata di tale attività. La regola di base è: maggiore è la potenza (di ricarica o quella accettata dal caricabatteria del veicolo), più breve sarà la durata del tempo necessario alla ricarica.

Tabella 2.4: Tempi di ricarica per una vettura di taglia media

Tipologia di ricarica		Potenza erogata	Autonomia reintegrata in		Tempo per integrare 10 km
			1h	15 min	
AC	Lenta	3,3 kW	13-15 km	3-5 km	40-45 min
	Rapida	22 kW	90-100 km	23-30 km	6-7 min
43 kW		Completa	50-60 km	3-4 min	
DC		50 kW	Completa	60-70 km	2-3 min

Fonte 11: CEI Magazine, 2017, [28]

La necessità di eseguire una ricarica rapida o una ricarica lenta dipende da diversi fattori. Il tempo a disposizione tra un utilizzo e l’altro, l’autonomia necessaria per affrontare il viaggio successivo, la differenza di costo tra le due opzioni di ricarica e la disponibilità della stazione di ricarica sono solo alcuni dei principali fattori che influenzano la scelta. Ad esempio, la ricarica lenta è solitamente utilizzata quando il veicolo può rimanere parcheggiato per un periodo di tempo relativamente lungo (durante la notte o la durata della giornata lavorativa). Al contrario la scelta ricadrà su una ricarica veloce quando gli intervalli di sosta sono brevi, ma occorre comunque effettuare una ricarica al fine di aumentare l’autonomia della vettura.

Ovviamente più l’accumulatore è grande, maggiore sarà l’autonomia della vettura ma anche la durata del tempo necessario a una carica completa.

Inoltre, è necessario sottolineare come non sempre i veicoli ibridi offrono la possibilità di effettuare una ricarica veloce a causa delle ridotte dimensioni delle batterie.

2.3.2 Tipologia di alimentazione

La ricarica può essere effettuata in corrente alternata (AC) o corrente continua (DC). Nel caso di utilizzo di un sistema di ricarica AC è necessario un convertitore AC/DC a bordo dell'autoveicolo, con conseguenze in termini di peso e complessità del sistema. Tuttavia, la maggior economicità di tale soluzione rispetto all'adozione di un caricatore esterno munito di convertitore, la rende comunque la soluzione più diffusa: solo 1/10 delle colonnine di ricarica presenti in Italia, di cui il 63% solo al Nord, presenta la ricarica in corrente continua.[29]

2.3.2.1 Modalità di ricarica

La Commissione elettrotecnica internazionale (IEC) ha definito 4 modi standard che riflettono i principali metodi di ricarica dei veicoli EV in base al tipo di corrente trasmessa al veicolo, tensione, presenza o meno di messa a terra e linee di controllo.

1. “Mode 1 – slow charging from a household-type socket-outlet”
È una modalità di ricarica lenta in cui il veicolo è collegato alla rete elettrica domestica mediante una normale presa. Il veicolo può essere ricaricato praticamente ovunque, ma possono riscontrarsi diversi problemi relativi alla sicurezza nell'utilizzo.
2. “Mode 2 – slow charging from a household-type socket-outlet with an in-cable protection device”
È una modalità di ricarica lenta in cui il veicolo è collegato alla rete elettrica mediante prese domestiche o industriali fino a 32A. A differenza del “Mode 1”, è presente un dispositivo di protezione, denominato in-cable control box (ICCB), integrato nel cavo.
3. “Mode 3 – slow or fast charging using a specific EV socket-outlet with control and protection function installed”
È una modalità di ricarica lenta o veloce in cui il veicolo è collegato alla rete elettrica mediante connettori specifici, oltre che ad un circuito dedicato. Il cavo utilizzato consente una comunicazione attiva tra veicolo e stazione di ricarica rendendo possibile la smart charging. Inoltre, il sistema di controllo e protezione è installato, oltre che sul cavo, anche sulla colonnina. Per questo motivo, dati gli elevati sistemi di sicurezza, è la modalità adottata per la ricarica pubblica.
4. “Mode 4 – fast charging using an external charger”
È una modalità di ricarica veloce in cui il veicolo è collegato alla rete elettrica mediante cavo fisso ad un apposito caricatore esterno, in cui sono presenti i dispositivi

di controllo, che ha la funzione di convertire la corrente alternata in corrente continua. Necessita di sistemi di sicurezza più avanzati rispetto alle altre modalità.

2.3.2.2 Tipologie di connettori

Come per le modalità di ricarica, anche per quanto riguarda i connettori la IEC ha definito degli standard:

1. TIPO 1: caricatore in AC, è posizionato solo a bordo del veicolo
2. TIPO 2: caricatore in AC, è posizionato sia a bordo del veicolo, sia sull' infrastruttura. Esiste la CCS Combo 2, una versione evoluta del connettore di Tipo 2, che permette sia la ricarica lenta in AC che quella veloce in DC.



Figura 2.6: Connettore Tipo 2 e CCS Combo2

Fonte 12: E-station, 2020, [30]

3. TIPO 3: caricatore in AC, è posizionato solo sull' infrastruttura. Esistono due diverse configurazioni: 3A, adatta ai veicoli leggeri, e 3C, adatta alle automobili, ma oggi in disuso.
4. TIPO 4 (CHAdEMO): caricatore in DC più diffuso al mondo. Viene utilizzato dalla maggior parte delle case automobilistiche. Consente la ricarica veloce.



Figura 2.7: Connettore CHAdEMO

Fonte 13: E-Station, 2020, [30]

In Europa lo standard adottato è “Mode 3” con presa “Tipo 2” in relazione alle colonnine in AC e “CHAdEMO” o “CCS Combo 2” per quelle in DC.

Esistono anche altri tipi di caricatori che sfruttano i sistemi di trasferimento dell'energia elettrica senza contatto (STEESC) o Plugless. Questi dispositivi sfruttano il trasferimento di energia mediante campi magnetici: la batteria sul veicolo viene ricaricata senza nessun

collegamento via cavo. Vengono quindi eliminate alcune scomodità legate alla ricarica elettrica che prevede comportamenti a cui gli utilizzatori non sono abituati, rendendo molto più semplice il processo di ricarica. Oltre che al classico caricatore utilizzabile a veicolo fermo, questa tecnologia è stata implementata anche per la costruzione di tratti stradali che permettono di ricaricare i veicoli elettrici in movimento. Nel 2016, in Francia, è stato inaugurato il primo chilometro della Wattway, un tratto di autostrada che, attraverso celle fotovoltaiche e alla tecnologia di ricarica ad induzione, permette di ricaricare le vetture durante la marcia. [31]

Una via di mezzo tra i due sistemi di ricarica, conduttiva e induttiva, è il sistema di ricarica automatica conduttiva. L'applicazione di tale tecnologia è relativamente recente: solo nell'aprile del 2019 è stato immesso sul mercato Dazeplug, il primo caricatore autonomo conduttivo per veicoli elettrici. Si tratta di un dispositivo "composto da un sistema a terra - il caricatore - e da un sistema a bordo - modulo on-board - installato sotto il veicolo elettrico".[32] Il suo funzionamento è molto semplice: basta parcheggiare il veicolo sopra di esso e si conetterà in modo automatico. Questo strumento permette di sfruttare i benefici di entrambi i sistemi di ricarica: il maggior rendimento della ricarica conduttiva e la comodità della ricarica induttiva.

2.3.3 Diffusione

Dal punto di vista dell'accessibilità, l'infrastruttura di ricarica è suddivisibile in 3 classi:

- Pubblico: infrastruttura accessibile a tutti sempre
- Privato accessibile al pubblico: infrastruttura accessibile da tutti, ma con delle restrizioni definite
- Privato: infrastruttura accessibile solo a privati

Si stima che, in Italia, i punti di ricarica pubblica e privata accessibile al pubblico nel 2018 siano circa 8.200 [29] distribuiti sul territorio in maniera piuttosto disomogenea:

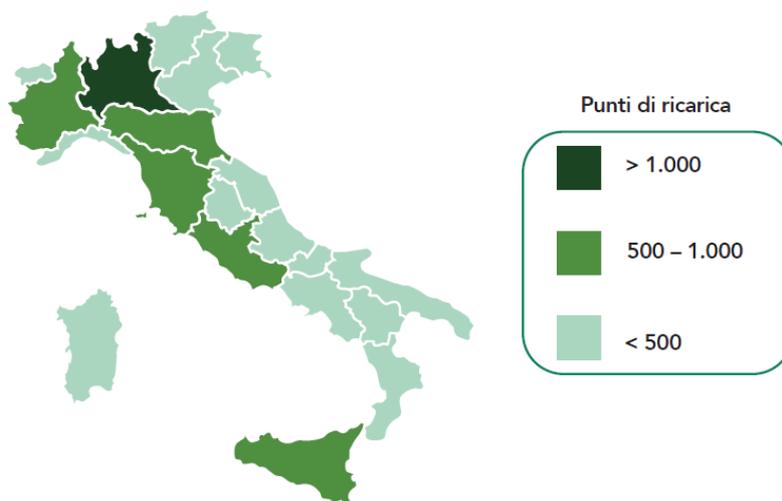


Figura 2.8: Distribuzione punti di ricarica pubblici e privati ad accesso pubblico nelle regioni, 2018
 Fonte 14: Osservatorio smar mobility, 2019 [29]

La Lombardia è la regione con il maggior numero di colonnine, seguita da Piemonte, Emilia-Romagna, Toscana, Lazio e Sicilia. La maggior parte delle stazioni di ricarica, circa il 75%, si trova in ambito urbano, coerentemente con i piani di sviluppo. Meno del 5% invece si trova nelle zone extraurbane, anche se la minor diffusione viene compensata con la maggior velocità di ricarica.[29]

La situazione in Piemonte è mostrata in figura 2.9:

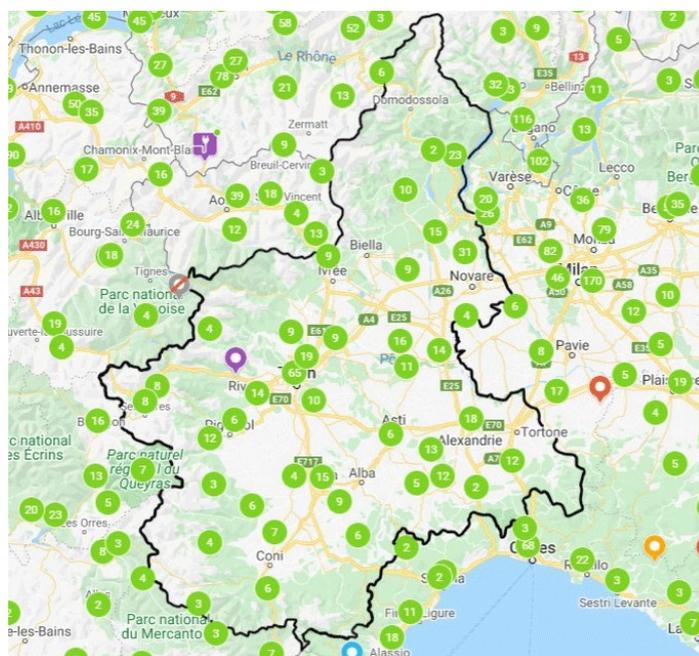


Figura 2.9: Mappa dei punti di ricarica in Piemonte, 2020
 Fonte 15: Chargemap.com, 2020 [33]

Affinché sia utilizzabile una stazione di ricarica deve garantire:

- Accesso non discriminatorio: è necessario garantire l'accesso a qualsiasi utente, anche a coloro privi di un contratto, nonché il pagamento attraverso le più comuni modalità.
- Interoperabilità: è definita come “la capacità di scambiare dati e di utilizzare tali dati all'interno del sistema ricevente” [34]. È quindi necessaria interoperabilità tra i soggetti che gestiscono l'infrastruttura (EMP e CPO) per permettere la realizzazione di un accesso non discriminatorio.

BOX 3: Interoperabilità

Il concetto di interoperabilità è alla base delle piattaforme di e-roaming. Infatti, esattamente come accade per le reti telefoniche, in presenza di roaming ogni utente ha la possibilità di accedere alle stazioni di ricarica della rete se registrato presso uno dei membri. Le più importanti reti di roaming (GIREVE, MOBI.E, ENEL, Hsubject ed e-clearing.net) hanno già fatto dei passi in questa direzione e stanno cooperando per implementare un inter-roaming che permetta di rendere ancora più semplice e accessibile la rete di ricarica europea.

Anche in Piemonte nel 2018 è stato elaborato un progetto che prevede la realizzazione di una Piattaforma unica regionale attraverso la quale verranno erogati servizi per la mobilità elettrica. [35]

Le modalità di identificazione e pagamento nell'infrastruttura pubblica o privata ad accesso pubblico sono leggermente più elaborate rispetto al caso privato. I tipici strumenti d'identificazione sono le chip card, l'utilizzo di app, sms o schermi posizionati direttamente sulla stazione di ricarica: nulla di eccessivamente complicato, ma che richiede un'autenticazione a priori.

Le tipologie di tariffazione in questo caso sono 4:

1. Gratuita
2. In base all'energia prelevata [€/kWh]
3. In base al tempo di sosta [€/min]
4. Abbonamenti periodici [€/periodo]

I metodi di pagamento, invece, sono molteplici: diretto con carte di credito o sistemi online, tramite sms attraverso la richiesta della fattura, dedicati alla mobilità elettrica o ancora basati su contratti. È disponibile, raramente, anche la possibilità del pagamento in contanti.

Accanto alla rete di infrastruttura pubblica, i punti per la ricarica privata hanno un ruolo tutt'altro che irrilevante. La loro presenza ha avuto un ruolo fondamentale nella fase iniziale

della diffusione della trazione elettrica: poter contare su una fonte a portata di mano, disponibile a tutti e a basso costo ne ha permesso lo sviluppo anche in mancanza di un'adeguata infrastruttura pubblica. Si stima che in Italia siano presenti tra gli 11k e i 13k punti di ricarica ad uso privato.[29]

Per quanto riguarda le modalità di accesso alla ricarica, le cose si semplificano: non è necessaria nessuna operazione di identificazione e, poiché la ricarica del veicolo è comparabile all'utilizzo di un normale elettrodomestico, il suo consumo è fatturato direttamente in bolletta. Il sistema migliore per la ricarica domestica risulta essere l'installazione di una wall-box che, rispetto ai classici caricatori mobili, permette una ricarica più veloce e non sottopone l'impianto elettrico a forti sollecitazioni. Non a caso rappresenta circa il 90% dei punti di ricarica privati.[29]

La wall-box è un dispositivo attraverso il quale è possibile ricaricare, tramite cavo, le batterie delle vetture a trazione elettrica. Rientra nella modalità di ricarica "Modo 1" ma, a differenza delle classiche prese domestiche, è in grado di sopportare potenze maggiori e trasferire energia in tempi minori, in tutta sicurezza. Inoltre, i dispositivi più moderni sono dotati di un'elettronica intelligente capace di regolarsi in base alle necessità della casa, in modo da limitare il flusso di energia inviato alla vettura nei momenti in cui il consumo è maggiore.

2.3.4 Ruolo dell'ente pubblico

Per creare un contesto capace di favorire la diffusione della mobilità elettrica, è importante che gli enti pubblici ai diversi livelli di governo agiscano in maniera coordinata. È quindi necessario che le autorità operino in modo da sviluppare un sistema di infrastrutture omogeneo su tutto il territorio nazionale, evitando il più possibile la formazione delle cosiddette "black area", ossia aree prive di infrastrutture. È quindi compito degli enti di governo stabilire delle regole e requisiti per la pianificazione e la realizzazione delle infrastrutture, stanziare risorse economiche e favorire tutte le azioni necessarie per accelerare l'espansione della rete della mobilità elettrica: per questo motivo è stato predisposto un Piano urbano di mobilità sostenibile. A tale scopo, nel capitolo 6, è presentata un'analisi finalizzata all'individuazione, all'interno del territorio piemontese, delle zone che necessitano una priorità nell'installazione delle infrastrutture.

2.4 Batterie

La batteria è uno dei principali componenti del veicolo elettrico, ma anche il suo principale punto debole.

Questo è dovuto al fatto che esistono ancora molti limiti relativi ad esempio all'autonomia, al peso, all'accuratezza del sistema di rilevamento dello stato di carica o alla vita utile attesa che ne compromettono l'impiego su grande scala.

La batteria ideale dovrebbe possedere i seguenti requisiti [36]:

1. Elevata densità energetica
2. Elevata potenza in uscita
3. Lunga vita utile
4. Elevata efficienza carica-scarica
5. Applicazioni sia a basse che ad alte temperature
6. Minima self-discharge
7. Buone caratteristiche di carico
8. Buone caratteristiche di conservazione della temperatura
9. Bassa resistenza interna
10. Nessun effetto memoria
11. Ricarica veloce
12. Elevato grado di sicurezza
13. Elevata affidabilità
14. Basso costo
15. Buona capacità di riciclo

Nonostante i progressi compiuti, il costo per soddisfare tutti questi requisiti è ancora troppo elevato perché le batterie entrino a pieno titolo nel mercato dei veicoli privati.

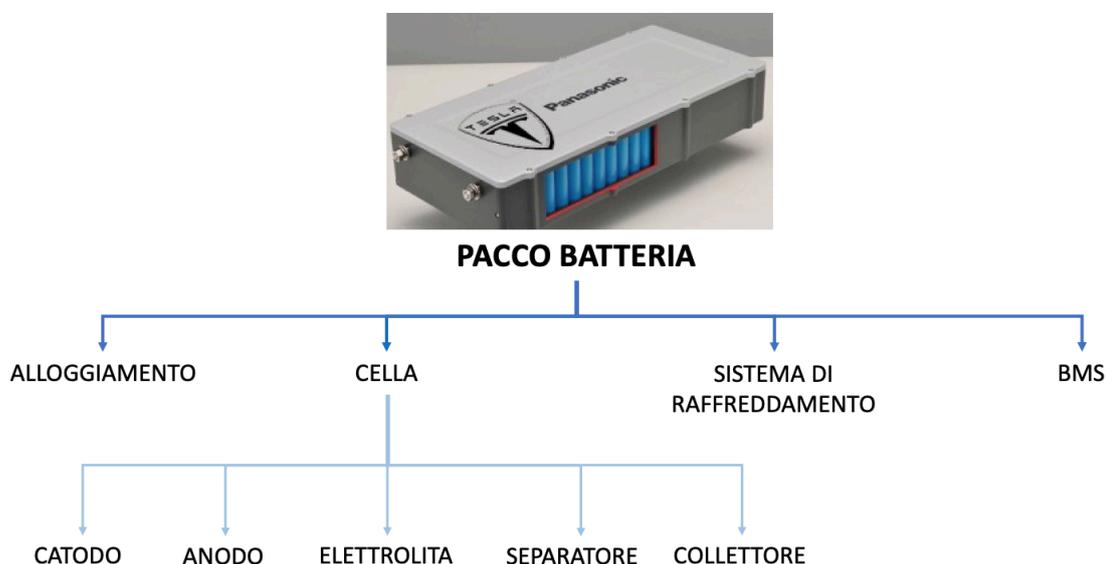


Figura 2.10: Composizione pacco batteria

Come si evince dalla figura 2.10, la batteria è un sistema piuttosto complesso formato da diversi componenti e sub componenti. L'elemento centrale è la cella elementare: l'anodo (elettrodo negativo) e il catodo (elettrodo positivo) sono immersi in un liquido elettrolita,

separati da una membrana e collegati alle estremità da un collettore che permette il flusso degli elettroni tra i due elettrodi. (La densità energetica aumenta ulteriormente se l'elettrolita si trova allo stato solido) La cella permette, attraverso una reazione elettrochimica di ossidoriduzione, di convertire energia chimica in energia elettrica in fase di scarica e viceversa in fase di carica.

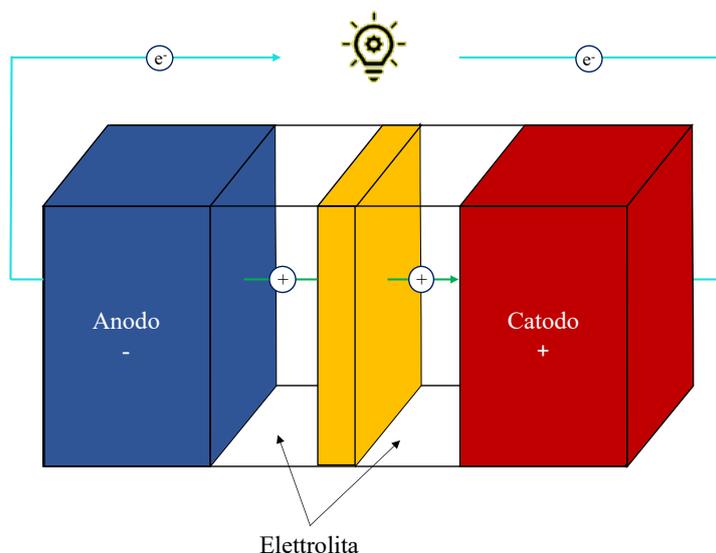


Figura 2.11: Schema cella in fase di scarica

A seconda degli elementi usati come elettrodi, la reazione chimica dà origine a diverse prestazioni. Le celle che utilizzano differenti composti di litio (ioni e polimeri di litio) sono ad oggi le più diffuse: questo elemento è leggero e cede facilmente gli elettroni. Rispetto alle batterie al nickel, ad esempio, quelle al litio hanno una tensione di cella tre volte superiore, una densità di energia doppia, una propensione alla auto scarica quattro volte inferiore e, fondamentale, non possiedono l'effetto memoria, cioè quell'effetto per il quale la batteria riconosce come limite inferiore la percentuale a cui è stata scaricata l'ultima volta, risultando scarica una volta raggiunto tale limite. [18] Inoltre, la batteria al litio risulta essere la più adatta per i veicoli elettrici e ibridi: seppur il litio sia un materiale da maneggiare con molta accortezza in quanto esplosivo, è al contempo non tossico, con ampia vita utile e molto riciclabile.

Esistono anche soluzioni prototipali che prevedono l'utilizzo di batterie elettrochimiche in combinazione con super condensatori oppure batterie metallo-aria, con alta densità energetica ma bassa vita utile, quindi ancora non utilizzabili per applicazioni pratiche.

La delicatezza della struttura chimica ha reso necessario sviluppare un sistema di gestione delle batterie (BMS, "Battery management system") per monitorare lo stato della batteria e la tensione nelle celle, in modo da prevenire sovraccarichi o sovrascariche e garantire

sicurezza e ottimizzazione delle prestazioni. Il sovraccarico, infatti, porta all'ossidazione elettrolitica e alla decomposizione, mentre la sovrascarica provoca cambiamenti strutturali del catodo, riducendo il ciclo di vita della batteria.

2.4.1 Caratteristiche della batteria

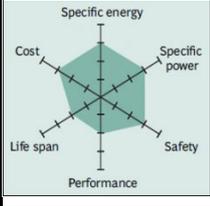
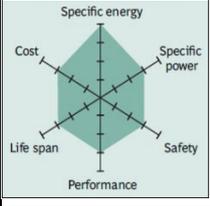
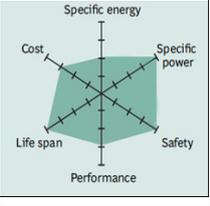
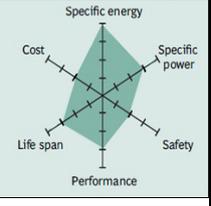
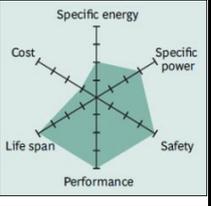
Per valutare le prestazioni di un accumulatore vanno considerati diversi parametri:

- Capacità: la sua misura in Ah (Ampere-ora) rappresenta il valore teorico dell'intensità di corrente elettrica (A) che la batteria è in grado di fornire per un processo di scarica della durata di un'ora; la capacità reale è legata all'intensità della corrente erogata: all'aumentare della corrente di scarica, l'energia effettivamente prelevabile dalla batteria prima che questa risulti scarica diminuisce.
- Energia specifica: espressa in Wh/kg (Watt-ora al chilogrammo), mette in relazione l'energia immagazzinata in una batteria con il suo peso; data una determinata richiesta di energia per un'applicazione specifica, una batteria è tanto più performante quanto più il suo peso risulta ridotto.
- Densità di potenza: espressa in W/kg (Watt al chilogrammo), ci dà un'idea della potenza e quindi della corrente erogabile in relazione al peso.
- Resistenza interna: espressa in $m\Omega$, è un parametro molto importante che caratterizza la bontà di una batteria; quanto più il suo valore è minore, tanto più può essere elevata l'intensità di scarica.
- Durata di vita: rappresenta il numero di cicli di carica e scarica che possono essere eseguiti da una batteria senza che la sua capacità si riduca drasticamente; la durata di vita è un parametro influenzato da numerosi fattori, come, per esempio, dalle correnti durante le fasi di scarica e carica; all'aumentare di esse il numero di cicli si riduce sensibilmente.

La struttura chimica degli accumulatori è alla base delle loro performance: diverse strutture chimiche possiedono diverse proprietà che influenzano i diversi parametri. Le tipologie di batterie più utilizzate per la trazione elettrica utilizzano tutte il litio.

La tabella che segue mostra le caratteristiche delle diverse tipologie di batteria a seconda della diversa chimica:

Tabella 2.5: Caratteristiche delle batterie secondo le loro caratteristiche chimiche

	LMO (LiMn ₂ O ₄)	NMC (LiNiMnCoO ₂)	LFP (LiFePO ₄)	NCA (LiNiCoAlO ₂)	LTO (Li ₂ TiO ₃)
Energia specifica (Wh/kg)	100-150	150-220	90-120	200-260	50-80
Durata di vita (cicli)	300-700	1000-2000	>2000	500	3000-7000
Temperatura critica (°C)	250	210	270	150	
Produttori	Samsung Sdi Lg Chem	Lg Chem		Panasonic (Tesla) Samsung Sdi	CATL Panasonic
					

Fonte 16: Battery University, 2019 [37]

Un parametro di rilievo nell'avanzamento tecnologico risulta essere l'energia specifica: per ottenere pacchi batteria sempre più leggeri e performanti, è necessario combinare gli elementi chimici in modo tale da immagazzinare più energia possibile, e quindi autonomia, contenendone il più possibile il volume e il peso. L'autonomia infatti è legata, oltre che alle caratteristiche del veicolo (peso, aerodinamicità, ecc.) e del motore (consumi, ecc.), anche a quelle della batteria (energia che, a parità di peso, aumenta all'aumentare dell'energia specifica):

$$Autonomia [km] = \frac{Energia\ batteria [Wh]}{Consumi [Wh/km]} \quad (2.1)$$

2.4.2 Costo

Tra il 2010 e il 2018, il costo dei pacchi batteria è sceso di un fattore 10.

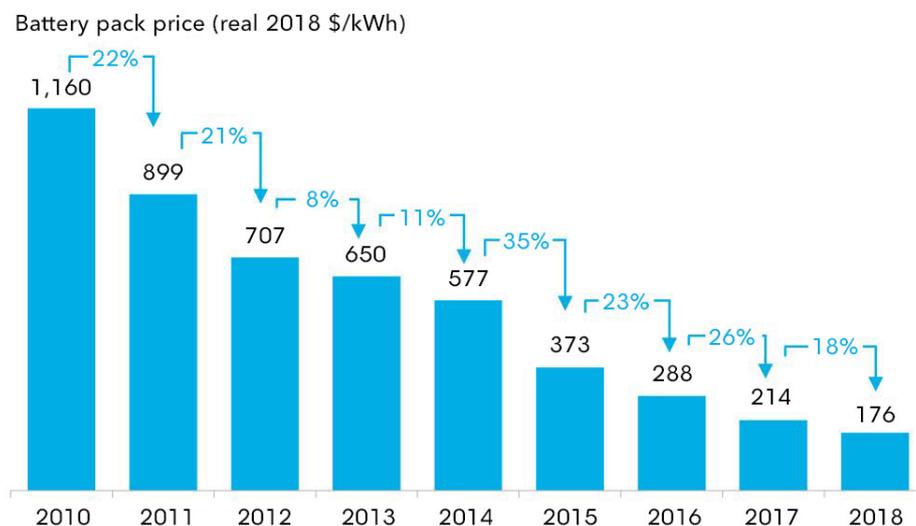


Figura 2.12: Andamento prezzo medio pacco batteria periodo 2010-2018

Fonte 17: BloombergNEF

In realtà il prezzo attuale dovrebbe aver raggiunto un valore pari a circa i 156 \$/kWh. [38] Tuttavia, il mercato risulta molto frammentato ed è difficile effettuare una stima precisa: si pensi ad esempio all’impatto sul prezzo dovuto all’economie di scala attuabili da Tesla, ma non dalla stragrande maggioranza degli altri competitor.

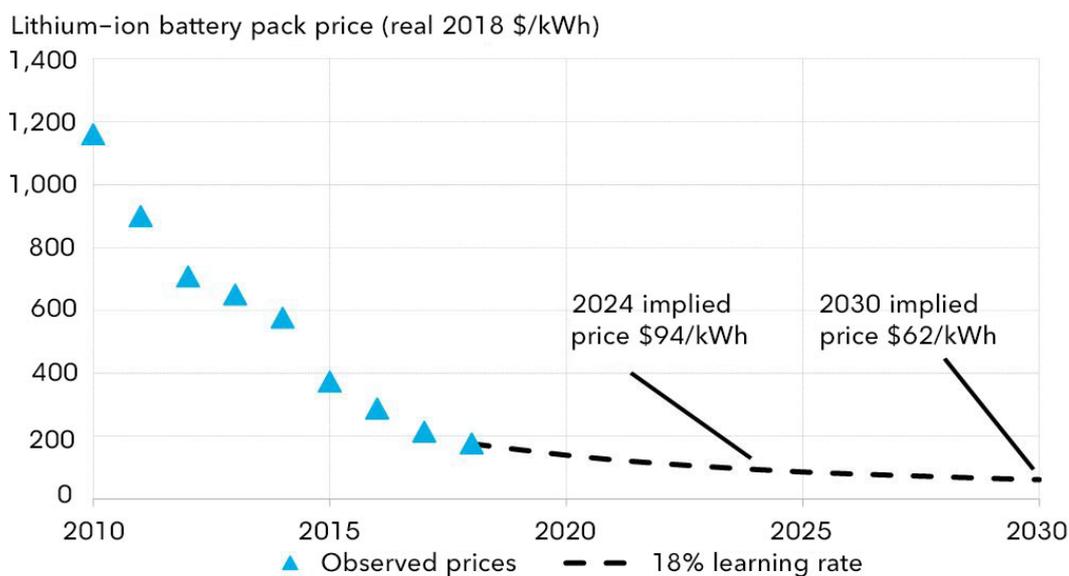


Figura 2.13: Previsione andamento prezzo medio pacco batteria

Fonte 18: BloombergNEF

Si prevede comunque di raggiungere un prezzo di 62 \$/kWh entro il 2030, un valore che permetterà all'auto elettrica di diventare realmente competitiva sul mercato. [38]

È necessario ricordare che il costo degli accumulatori è sensibile al prezzo delle materie prime, anche se attualmente in maniera relativamente contenuta. Materiali come Nichel e Cobalto, una volta dismessi, sono riutilizzabili attraverso il riciclo. Il Litio invece, dato il suo costo contenuto, non è economicamente conveniente da recuperare. Tuttavia, l'aumento della domanda sul mercato e la limitata offerta sul pianeta ne influenzeranno la quotazione futura.

2.4.3 Produttori

Analizzare il mercato delle batterie non è semplice, anche perché sono utilizzate anche in settori diversi da quelli dell'auto. I principali player in questo settore sono i seguenti: [39]

- LG CHEM: è un'azienda coreana produttrice soprattutto di dispositivi di largo consumo. In ambito automotive fornisce aziende come Chevrolet, Ford, Renault, Hyundai, Tesla, Volkswagen, Volvo e General Motors (27,9 GWh di batterie prodotte nel 2018)
- CATL: è un'azienda cinese produttrice di batteria per auto e sistemi di accumulo con impianti in Cina, Germania che sta valutando un'apertura di un impianto negli USA. In ambito automotive fornisce aziende come BMW, Volkswagen, Daimler, Volvo, Toyota e Honda (29,8 GWh di batterie prodotte nel 2018)
- BYD: è considerato il leader mondiale nella produzione di batterie per auto e autobus
- PANASONIC: è un'azienda giapponese che, nel settore dell'automotive, produce gli accumulatori secondo le specifiche di Tesla. Gli altri clienti principali sono Honda e Ford. Ha inoltre stipulato una joint venture con Toyota (45,7 GWh di batterie prodotte nel 2018)
- SAMSUNG Sdi: è un'azienda coreana con impianti in Cina, Ungheria e Corea del Sud. In ambito automotive fornisce a BMW, Volvo e Volkswagen (15,9 GWh di batterie prodotte nel 2018)
- SK Innovation: è un'azienda coreana che nasce come azienda di raffineria petrolifera con sedi in Cina, Ungheria e Usa. In ambito automotive fornisce a Volkswagen, Daimler, Ferrari, Land Rover, Kia e Jaguar (4,7 GWh di batterie prodotte nel 2018)

Questo elenco si presta a due considerazioni:

- 1) I principali player in questo settore hanno sede in 3 principali stati: Corea, Giappone e Cina. È evidente che l'Europa da questo punto di vista è fortemente in ritardo.
- 2) I costruttori di automobili dipendono strettamente dai produttori di batterie: poiché circa il 30% del costo di un'auto elettrica riguarda gli accumulatori, è necessario che essi inizino a produrle in proprio, in modo da ottenere maggiori margini di profitto. In questa direzione alcune aziende hanno iniziato a investire in questo campo:

Tabella 2.6: Investimenti per la produzione di batterie

Produttori di auto	Investimenti (Miliardi)
Volkswagen, Audi e Porsche	57 \$
Daimler	30 \$
Toyota	13,5 \$
Tesla	10 \$
BMW e Mini	4,5 \$

Fonte 19: Reuters Graphics, 2019 [40]

CAPITOLO 3: Obiettivi

Nel capitolo precedente è stata effettuata una disanima degli elementi importanti finalizzata ad una miglior comprensione del ragionamento alla base dell'elaborato.

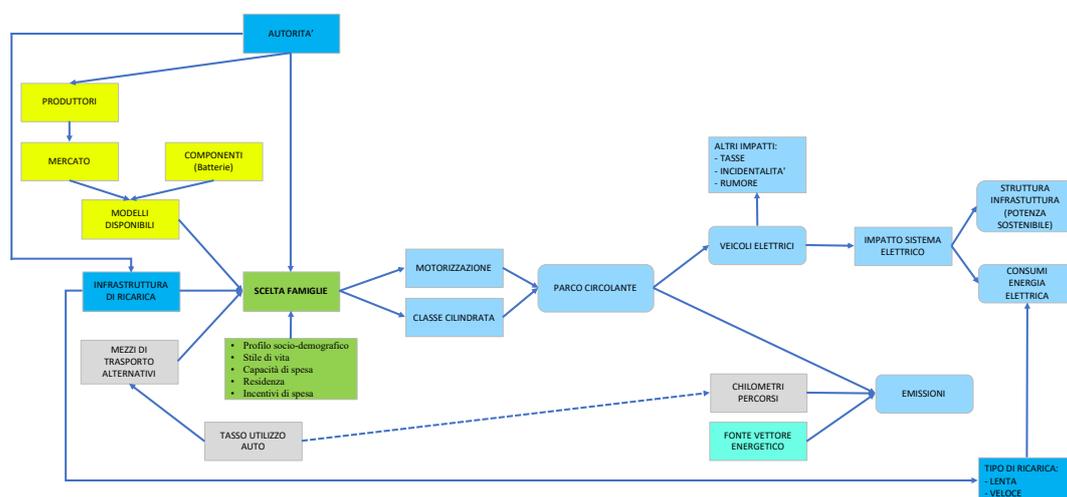


Figura 3.1: Schema logico

Lo schema presentato in figura 3.1 evidenzia come vi siano diverse relazioni tra gli attori e i componenti del sistema dei trasporti in oggetto, identificati con diverse gradazioni di colore, e le relative variabili. A partire dalle decisioni poste in essere dalle autorità (blu) in relazione a limiti sulle emissioni, limiti sulla circolazione e piani urbanistici per la realizzazione delle infrastrutture di ricarica, i produttori sono sempre più orientati a immettere sul mercato un numero sempre maggiore di modelli a basse emissioni, anche in relazione ai progressi tecnologici relativi alle batterie degli ultimi anni (giallo). Tale decisione influisce sulle scelte delle famiglie: in base ai modelli presenti sul mercato, alla capillarità della struttura di ricarica, all'efficienza della modalità di trasporto alternative e alle proprie caratteristiche sociali ed economiche, ogni individuo compie una scelta da cui poi deriva la composizione del parco auto circolante in Piemonte. Una volta effettuata la scelta, ciò che ne consegue sono esternalità positive o negative nei confronti del resto della società, in particolare in relazione all'impatto ambientale (azzurro). Infatti dal modello scelto dipendono le emissioni generate non solo nell'uso, ma anche nella produzione sia delle componenti che del vettore energetico utilizzato. In particolare, se si tratta poi di un veicolo elettrico gli impatti da considerare sono molteplici:

- livello economico (minori accise)
- minor tasso di incidentalità
- inquinamento acustico nullo (silenziosità del veicolo)
- sistema elettrico (aumento consumi e carichi sulla linea)

3.1 Obiettivi al 2030

Questo capitolo si propone di individuare la posizione della regione Piemonte rispetto agli obiettivi al 2030 previsti dalla Commissione europea nel Libro Bianco dei Trasporti.

Come già introdotto in precedenza nel capitolo 1, gli obiettivi principali definiti dalla Commissione europea sono [5]:

1. “Abbattere fino al 40% le emissioni di CO₂ delle autovetture per il nuovo parco veicoli nel 2020” rispetto ai valori del 1990
2. “abbattere fino al 37,5% le emissioni di CO₂ delle autovetture per il nuovo parco veicoli nel 2030 rispetto ai valori del 2020”
3. “Dimezzare entro il 2030 l’uso delle autovetture alimentate con carburanti tradizionali ed eliminarlo del tutto entro il 2050” rispetto ai valori del 1990

Ciò significa che entro il 2030 il parco auto immatricolabile dovrà avere valori delle emissioni medie pari al più a 71 g/km di CO₂ misurati utilizzando il ciclo WLTP³ (59 g/km di CO₂ se misurati con il ciclo NEDC).[41] Al 2020 tale limite è pari a 95 g/km di CO₂ (114 g/km di CO₂ se misurati con il ciclo WLTP): se si analizzano i valori raggiunti dai 13 principali produttori di auto operanti sul mercato europeo, ad oggi, nessuno lo rispetta. Solamente la Toyota, con un valor medio di emissioni pari a 95,1 g/km di CO₂, si avvicina molto all’obiettivo. Tutti gli altri saranno multati di 95€ per ogni grammo di eccedenza, per ogni veicolo venduto. Questa sanzione pertanto rischia di incidere in misura considerevole sui risultati operativi dei produttori.

In Italia, la Fiat presenta un valor medio di emissioni pari a 119,8 g/km di CO₂ a fronte dei 92,8 g/km di CO₂ che si era posto come target, anche se la joint venture con il gruppo PSA fa ben sperare per il raggiungimento degli obiettivi al 2030.

Per quanto riguarda il territorio piemontese, è stata effettuata una stima finalizzata a determinare i valori medi delle emissioni specifiche medie del venduto, ciclo WLTP, al 2030 sfruttando la composizione del venduto e i valori delle emissioni dei veicoli presenti sul mercato.

L’intervallo di analisi preso in considerazione è il decennio che intercorre tra il 2020 e il 2030.

³Bisogna far attenzione al ciclo di riferimento: dal 2018 il ciclo di omologazione utilizzato è il WLTP, considerato più realistico rispetto al ciclo NEDC fino ad allora utilizzato.

Per effettuare un'analisi il più completa possibile sono state prese in considerazione 3 variabili principali:

- Area del Piemonte
- Classe di cilindrata
- Alimentazione

Tabella 3.1: Variabili oggetto dell'analisi

Area	Classe cilindrata		Alimentazione
Asti-Alessandria (AA)	1	$X \leq 1000$	BENZINA
	2	$1000 < X \leq 1500$	GPL
Nord-Est (NE)	3	$1500 < X \leq 2000$	METANO
	4	$2000 < X \leq 2500$	HEV BENZINA
	5	$2500 < X \leq 3000$	PHEV BENZINA
	6	$X > 3000$	HEV DIESEL
Cuneo (CN)			PHEV DIESEL
Torino (TO)			DIESEL
			ELETTRICO

3.1.1 Elementi dell'analisi

Come accennato precedentemente la composizione del venduto e quindi del parco auto circolante piemontese dipende dalle scelte poste in essere dai consumatori. Di seguito il riferimento allo schema logico.

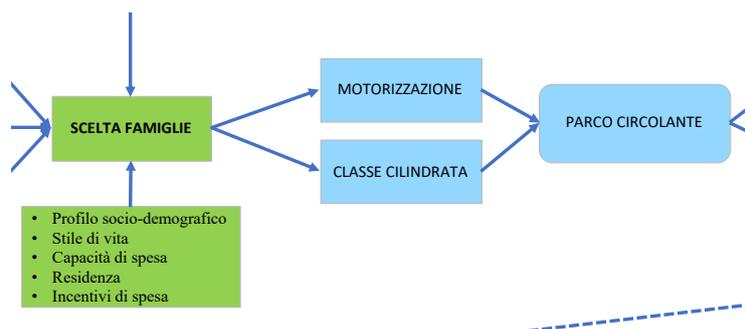


Figura 3.2: Riferimento allo schema logico della composizione del venduto

In questa analisi la composizione del venduto al 2018 è stata assunta pari a quella del parco auto nello stesso anno in valori percentuali.

VENDUTO 2018

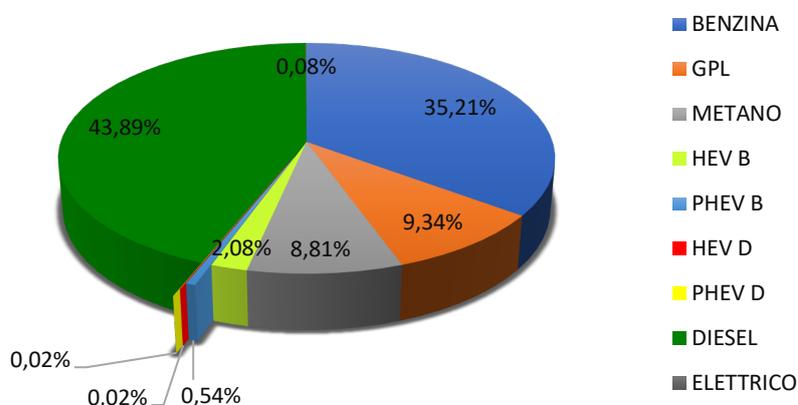


Figura 3.3: Composizione del venduto, Piemonte 2018

Fonte 20: Elaborazione database Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (2017) e dati ACI (2018)

La ripartizione del parco auto piemontese è stata ricavata dall'elaborazione dei dati presenti nel database messo a disposizione dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. Dal database generale sono state selezionate solo le autovetture ad uso privato circolanti nella regione e successivamente aggregate in base ad area, classe di cilindrata e tipo di alimentazione. Poiché i dati sono stati raccolti fino al 2017, per completezza sono stati aggiornati sfruttando i valori relativi alle immatricolazioni e dismissioni dei veicoli presenti sul sito dell'ACI. [2] Successivamente, a partire delle informazioni raccolte dallo studio della Fondazione Caracciolo in relazione alle analisi poste in essere da UNRAE [42] i cui valori sono riportati nella tabella K presente nell'allegato 1, è stato ricavato il trend di mercato utilizzato per stimare la composizione del venduto nell'intervallo di analisi considerato.

I risultati ottenuti sono stati riportati nelle tabelle H, I e J nell'allegato 1 e riassunti nella figura 3.4.

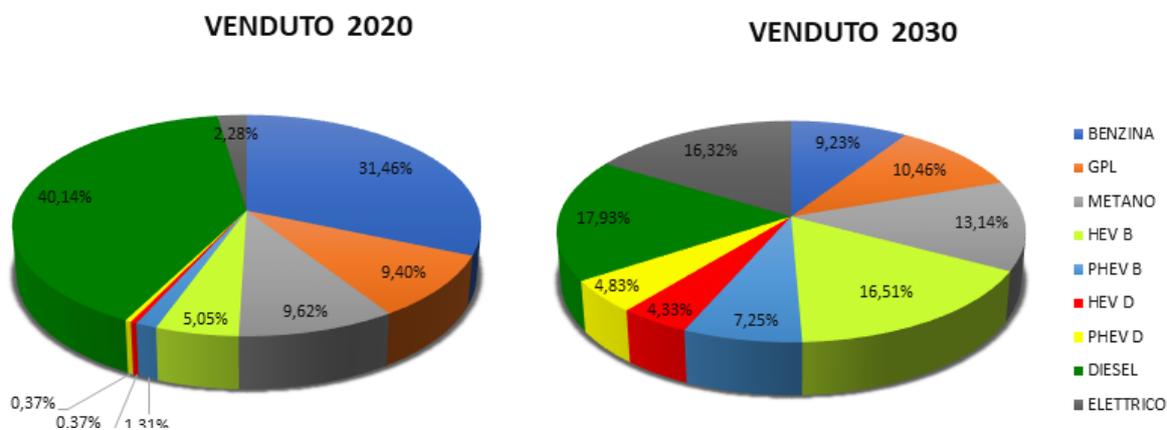


Figura 3.4: Stima composizione venduto, Piemonte, 2020 e 2030

Altro elemento fondamentale per l'analisi sono le emissioni di CO₂ dei veicoli presenti sul mercato. I dati sono stati ricavati dal "listino del nuovo" presente sulla rivista Quattroruote nel numero di Gennaio 2020 [1]: in linea con le elaborazioni precedenti i dati sono stati aggregati in base a classe di cilindrata e tipo di alimentazione. I dati sono stati riportati nella tabella C dell'allegato 1.

Facendo riferimento all'andamento dei dati relativi alle emissioni degli ultimi 20 anni, per stimare i valori al 2030, si è assunto un trend di riduzione pari all'1% annuo (1,2 % per quanto riguarda i motori diesel) al fine di tener conto dei progressi tecnologici finalizzati alla riduzione delle emissioni di CO₂ nel periodo di analisi preso in considerazione. [42] I dati ottenuti sono stati riportati nella tabella D dell'allegato 1.

A questo punto, combinando i dati della composizione del venduto percentuale e delle emissioni di CO₂ con un semplice calcolo matriciale e sommando i valori ricavati, si ottengono i risultati presenti in tabella 1.

Tabella 3.2: Emissioni di CO₂ medie stimate misurate con ciclo WLTP, Piemonte, 2020 e 2030

Area	CO ₂ 2020 [g/km]	CO ₂ 2030 [g/km]
AA	121,45	84
NE	121,09	83,75
CN	122,82	84,80
TO	120,50	83,47
TOTALE	121,07	83,77

I valori ottenuti al 2030 per le singole aree e la regione sono superiori al valore soglia 71 g/km di CO₂ previsto dalla Commissione europea. Anche i valori al 2020 superano il valore fissato di 114 g/km di CO₂. Questi valori, tuttavia, sono in linea con la media nazionale: applicando la stessa metodologia di calcolo a tutte le altre regioni d'Italia si ottiene una media nazionale pari a 119,35 g/km di CO₂ nel 2020 e 82,32 g/km di CO₂ nel 2030.

È necessario però ricordare che queste stime non dipendono solo dalla composizione del venduto e quindi dalle scelte dei consumatori, ma anche dai target, non raggiunti già nel 2020, da parte dei produttori di automobili.

Si tratta comunque di valori stimati che riflettono un trend che si basa su dati storici: non è detto che esso rifletta gli sforzi e gli avanzamenti tecnologici messi in atto dalle case automobilistiche.

3.1.2 Affinamento dell'analisi

La procedura di stima può essere affinata considerando la tipologia dei percorsi effettuati dalla popolazione piemontese.

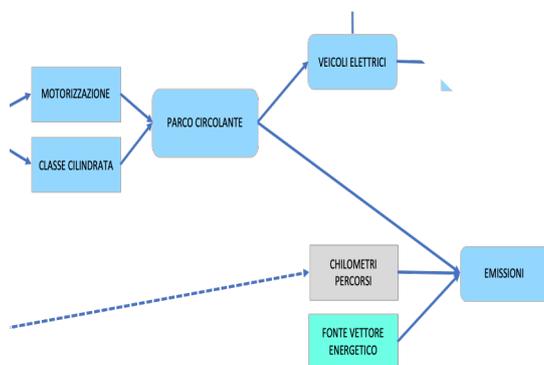


Figura 3.5: Riferimento allo schema logico del calcolo delle emissioni totali

Per prima cosa è necessario calcolare la consistenza e composizione del parco auto negli anni presi in considerazione.

La procedura è la stessa utilizzata per calcolare la consistenza al 2018: viene sommata la differenza tra il numero di immatricolazioni e dismissioni, supposta costante per l'intervallo d'analisi, ai dati dell'anno precedente. La ripartizione delle dismissioni segue la suddivisione per alimentazione indicata sul database dell'ACI, frazionata nelle classi di cilindrata in base ai dati presenti della tabella A dell'allegato 1. Per quanto riguarda il venduto, invece, si tiene conto dei valori calcolati in precedenza sfruttando il trend di mercato. (Tabella H e I dell'allegato 1)

Si ottengono quindi i dati riportati nelle tabelle E, F e G dell'allegato 1, sintetizzati nella figura 3.6 nella loro composizione percentuale.

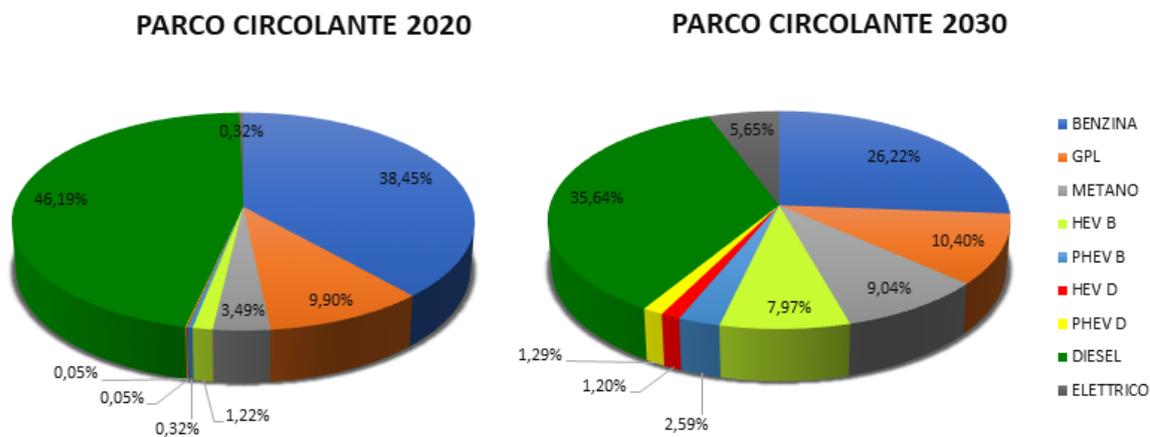


Figura 3.6: Stima composizione parco auto circolante, Piemonte, 2020 e 2030

Avendo a disposizione la composizione del parco auto, analogamente a quanto fatto in precedenza, è facilmente calcolabile attraverso una moltiplicazione tra matrici, facendo riferimento agli anni 2020 e 2030, il valore delle emissioni suddiviso per area, classe di cilindrata e tipo di alimentazione.

I valori calcolati però sono espressi in Mt/km: è necessario quindi combinarli con i dati relativi alle distanze percorse per ottenere una stima delle emissioni totali di CO₂ relative alle automobili ad uso privato.

L'analisi relativa alle distanze percorse è particolarmente complicata: l'assenza di rilevazioni precise e l'elevato numero di variabili da tenere in considerazione permette di effettuare solo ipotesi basate su assunzioni generiche.

Dal database ACI/PRA fornito dalla regione Piemonte sono stati ricavati i chilometri percorsi in un anno dai veicoli circolanti sul territorio, calcolati come differenza tra i chilometri percorsi tra una revisione e quella successiva. In particolare i valori utilizzati sono una media dei dati ottenuti prendendo in considerazione i chilometri percorsi negli anni in un determinato comune e dividendoli per la somma degli anni di utilizzo dei veicoli stessi. È stato quindi ricavato un valore medio regionale pari a 11.626 km, assunto come valore all'anno 2020.

Il database è stato poi elaborato tenendo conto sia dei valori medi di distanze percorse derivanti dalla letteratura (su percorsi urbani è pari a 4,6 km, mentre su percorsi extraurbani è pari a 11,9 km [15]), sia delle abitudini di spostamento della popolazione dei comuni del Piemonte sulla base dei dati forniti dall'ISTAT. [43]

Osservando il database si può notare che i comuni meno popolosi presentano un maggior numero di chilometri percorsi su media annuale.

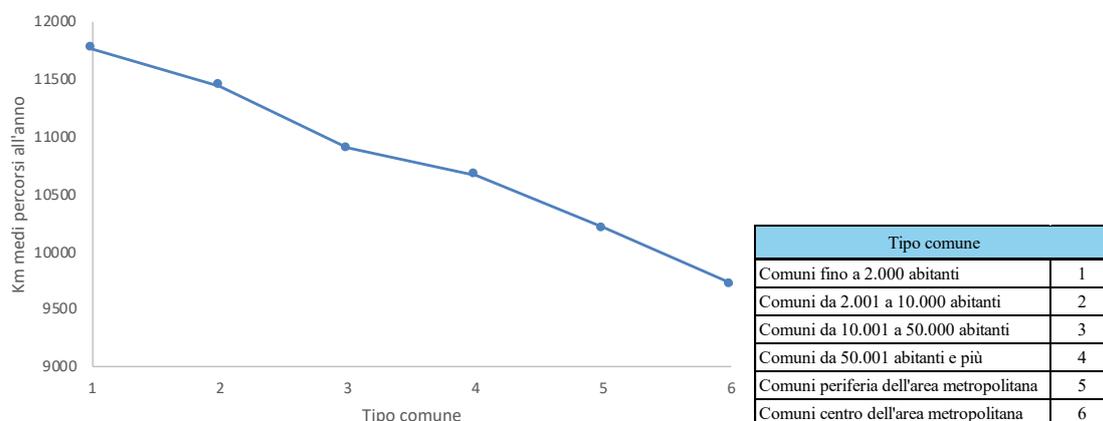


Figura 3.7: Relazione tra km percorsi e tipo comune

Questo potrebbe trovare una spiegazione nel fatto che, trattandosi di comuni meno urbanizzati e quindi avendo un indice di auto contenimento⁴ basso, sia necessario che la popolazione residente debba spostarsi più spesso o per distanze maggiori per raggiungere il punto di interesse. A supporto di questa considerazione si può osservare che i capoluoghi di provincia hanno una media di chilometri percorsi inferiore rispetto all'area di riferimento. Particolare attenzione va posta su Torino: il suo valor medio è tra i più bassi della regione. Essendo una città metropolitana, infatti, il tasso di urbanizzazione è molto alto e quindi gli spostamenti maggiori sono brevi e in ambito urbano. Ovviamente la cosa si ripercuote anche sul totale dei chilometri effettuati su percorsi urbani rispetto a quelli extraurbani.

Sulla base dei dati ISTAT, assumendo che gli spostamenti effettuati “nello stesso comune” siano gli spostamenti urbani mentre gli spostamenti effettuati “fuori dal comune” siano gli spostamenti extraurbani, sono stati ricavati i dati riportati nella tabella 3.3.

Tabella 3.3: Chilometri percorsi ogni 100 spostamenti in base al tipo di comune

Tipo comune	Chilometri percorsi ogni 100 spostamenti Urbani	Chilometri percorsi ogni 100 spostamenti Extra urbani
Comuni fino a 2.000 abitanti	139,84	808,01
Comuni da 2.001 a 10.000 abitanti	172,04	729,47
Comuni da 10.001 a 50.000 abitanti	231,84	577,15
Comuni da 50.001 abitanti e più	336,72	298,69
Comuni periferia dell'area metropolitana	175,26	716,38
Comuni centro dell'area metropolitana	395,60	155,89

Fonte 21: ISTAT, 2018

Con una semplice proporzione sono quindi stati calcolati i chilometri percorsi in ambito urbano ed extra urbano per ogni comune della regione, in base alla tipologia di appartenenza. Dai valori ottenuti è poi stata ricavata la media regionale: in media i chilometri percorsi in ambito urbano sono circa 1922 km all'anno, mentre in ambito extraurbano sono circa 9.704 km all'anno. Più della metà dei comuni piemontesi (837 su un totale di 1.181) presenta un numero di abitanti inferiore a 2000: non c'è quindi da stupirsi del fatto che la maggioranza degli spostamenti avvenga in ambito extraurbano.

⁴ AUTOCONTENIMENTO: “quota di flussi generati dall'area che rimane al suo interno”. È più alto nelle aree più urbanizzate

A questo punto, combinando i dati di emissione e i chilometri medi percorsi all'anno dal parco auto piemontese è stata ricavata una stima delle emissioni totali regionali.

Tabella 3.4: Mt di CO₂ emesse all'anno nelle diverse aree e nel Piemonte, 2020

CO ₂ Mt/anno			
2020	Urbano	Extraurbano	TOTALE
AA	0,10	0,51	0,61
NE	0,14	0,71	0,85
CN	0,09	0,48	0,57
TO	0,37	1,76	2,13
PIEMONTE	0,69	3,49	4,19

Tabella 3.5: Stima Mt di CO₂ emesse all'anno nelle diverse aree e nel Piemonte, 2030

CO ₂ Mt/anno			
2030	Urbano	Extraurbano	TOTALE
AA	0,12	0,63	0,75
NE	0,17	0,86	1,04
CN	0,12	0,58	0,70
TO	0,46	2,16	2,61
PIEMONTE	0,84	4,27	5,12

Qualora tutti i veicoli che circolano in ambito urbano, in cui le distanze brevi sono compatibili con l'autonomia dei veicoli plug-in, fossero a trazione elettrica, si otterrebbe una riduzione annua di circa 0,69 Mt delle emissioni nel 2020 e di 0,84 Mt nel 2030.

Si tenga presente che la riduzione stimata dipende dall'utilizzo di carburanti alternativi e non dalla variazione del tasso di utilizzo delle automobili: come già accennato nei capitoli precedenti, un importante fattore fondamentale per la riduzione delle emissioni è l'utilizzo di modalità di mobilità alternativa. Se si volesse invece tenere in considerazione il tasso di utilizzo delle auto, bisognerebbe agire sulla variabile relativa ai chilometri percorsi.

Presentiamo quindi ora 2 scenari alternativi relativi a variazioni di chilometri percorsi in base a 2 diversi trend:

1. Trend di riduzione "storico": si è fatto riferimento all'andamento dei chilometri percorsi in Piemonte degli ultimi 5 anni disponibili (2013-2018) [44]. I dati mostrano un trend di riduzione pari a circa 1,68% medio annuo, per lo più dovuto all'introduzione di diverse forme di mobilità alternativa. Si è quindi deciso di

applicare tale fattore ai dati ricavati nei capitoli precedenti e ricalcolare i valori emissivi annuali.

Tabella 3.6: Stima Mt di CO₂ emesse all'anno con trend di riduzione "storico" nelle diverse aree e nel Piemonte, 2030

CO ₂ Mt/anno			
2030	Urbano	Extraurbano	TOTALE
AA	0,10	0,53	0,63
NE	0,14	0,73	0,87
CN	0,10	0,49	0,59
TO	0,38	1,82	2,20
PIEMONTE	0,71	3,61	4,32

2. Trend di riduzione "equivalente": si è fatto riferimento ai valori del 2020 presenti in tabella 3. Poiché tra il 2020 e il 2030 il parco veicolare piemontese ha un incremento di circa il 49,48%, a parità di chilometri percorsi, nonostante valori emissivi per veicoli ridotti, le emissioni annue complessive aumentano. Per far sì che le emissioni non varino all'aumentare del parco veicolare, è necessario un trend di riduzione dei chilometri percorsi calcolato pari a 1,98% medio annuo.

Tabella 3.7: Stima Mt di CO₂ emesse all'anno con trend di riduzione "equivalente" nelle diverse aree e nel Piemonte, 2030

CO Mt/anno			
2030	Urbano	Extraurbano	TOTALE
AA	0,10	0,51	0,61
NE	0,14	0,71	0,85
CN	0,09	0,48	0,57
TO	0,37	1,77	2,14
PIEMONTE	0,69	3,5	4,19

In entrambi gli scenari i risultati evidenziano un'apprezzabile diminuzione delle emissioni, rispetto ai valori stimati al 2030, conseguibili con una riduzione della quota di uso dell'auto. Tuttavia, una più accurata analisi sulle distanze percorse sarebbe utile ad individuare i percorsi che potrebbero essere effettuati non più attraverso l'utilizzo di un veicolo a combustione, ma attraverso una mobilità a trazione elettrica o una mobilità alternativa. Tutto ciò che riguarda la mobilità sistematica (studio e lavoro) o le brevi distanze potrebbero essere percorse con mezzi meno inquinanti se questi fossero organizzati in modo tale da essere compatibili con le esigenze degli utilizzatori. La riduzione del tasso di utilizzo dell'auto, a trazione non elettrica, deve quindi essere compatibile con l'efficienza del trasporto pubblico e la presenza di modalità di mobilità alternative.

3.2 Obiettivo parco auto al 2050

I dati stimati al 2030 prevedono un numero pari a 2.643.866 veicoli alimentati con carburanti tradizionali, valore che si discosta molto dall'obiettivo fissato dalla commissione europea pari a 1.223.600 corrispondente al 50% del parco auto piemontese nel 1990 (circa 2.447.200 auto a uso privato). [2]

Secondo lo studio effettuato da T&E (Transport&Environment) [45], per raggiungere una decarbonizzazione completa al 2050, nel 2030 (o al più al 2035) tutte le auto vendute dovranno essere a emissioni zero. In questo caso la situazione del Piemonte, con un valore di veicoli elettrici venduti stimato al 2030 pari al 16,32% del totale, non può ritenersi in linea con il conseguimento dell'obiettivo.

3.3 Obiettivi al contorno

Come già accennato nei capitoli precedenti, la diffusione dei veicoli a trazione elettrica non riguarda esclusivamente il settore dell'autoveicolo. Per raggiungere gli obiettivi previsti dalla Commissione europea, occorre conseguire altri:

Tabella 3.8: Confronto stime valori obiettivi al 2030, Piemonte

	2020	2030
Numero veicoli	9.841	407.265
Punti di ricarica pubblica e privata ad accesso pubblico [29]	≈ 600	≈ 5800
Aumento consumi elettrici		2,6%
Quota energia da fonti rinnovabili	1%	7%

1. Punti di ricarica pubblica e privata ad accesso pubblico: dalla letteratura è emerso che per supportare la diffusione della mobilità elettrica, sarà necessario circa 1 punto di ricarica ogni 70 auto. [45]
2. Aumento consumi elettrici: come spiegato meglio in seguito, la diffusione dei veicoli a trazione elettrica ha un impatto sul sistema elettrico che è necessario considerare. Le ricariche infatti impatteranno per circa 632 GWh che corrisponde ad un aumento dei consumi del 2,6%.

3. Quota energia da fonti rinnovabili: nel 2018 la Commissione europea ha approvato la RED II, una modifica alla precedente RED (Renewable Energy Directive), attraverso la quale stabilisce come obiettivo un valore pari al 7% di quota di energia utilizzata nei trasporti prodotta da fonti rinnovabili al 2030. [46] Attualmente il Piemonte, come evidenziato nel capitolo 1, presenta una quota pari all'1%.

3.4 Stato dell'arte del sistema elettrico Piemontese e valutazione dell'impatto dei veicoli elettrici

Come anticipato nei paragrafi precedenti, un fattore importante da non trascurare è l'impatto che la diffusione dell'auto elettrica ha sul sistema energetico elettrico.

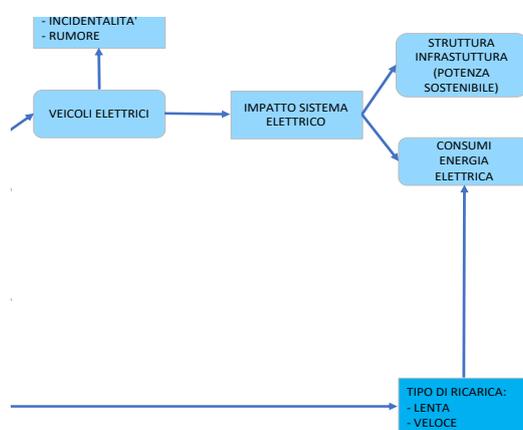


Figura 3.8: Riferimento allo schema logico dell'impatto del sistema elettrico

L'analisi che segue si basa sui dati del 2018, i più recenti disponibili. Essi non tengono conto degli interventi pianificati sul sistema elettrico regionale: Terna, gestore della rete di trasmissione italiana in alta tensione, è impegnato in un piano di sviluppo delle infrastrutture di rete sul territorio piemontese per cui ha effettuato un investimento di 415 milioni (225 milioni per interventi di sviluppo e 190 milioni per interventi di rinnovo e sicurezza).[47]

La situazione del sistema piemontese è sintetizzata nella tabella di figura 3.9:

GWh	Operatori del mercato elettrico	Autoproduttori	Piemonte
Produzione lorda			
- idroelettrica	8.368,8	49,3	8.418,1
- termoelettrica tradizionale	16.902,7	3.442,1	20.344,8
- geotermoelettrica	-	-	-
- eolica	29,1	-	29,1
- fotovoltaica	1.695,2	-	1.695,2
Totale produzione lorda	26.995,8	3.491,4	30.487,2
	-	-	-
Servizi ausiliari della Produzione	654,0	100,5	754,4
	=	=	=
Produzione netta			
- idroelettrica	8.265,6	48,4	8.314,1
- termoelettrica tradizionale	16.381,2	3.342,5	19.723,6
- geotermoelettrica	-	-	-
- eolica	28,7	-	28,7
- fotovoltaica	1.666,3	-	1.666,3
Totale produzione netta	26.341,9	3.390,9	29.732,8
	-	-	-
Energia destinata ai pompaggi	618,1	-	618,1
	=	=	=
Produzione destinata al consumo	25.723,8	3.390,9	29.114,7
	+	+	+
Cessioni degli Autoproduttori agli Operatori	+581,8	-581,8	-
	+	+	+
Saldo import/export con l'estero	+13.990,3	-	+13.990,3
	+	+	+
Saldo con le altre regioni	-17.284,7	-	-17.284,7
	=	=	=
Energia richiesta	23.011,2	2.809,1	25.820,3
	-	-	-
Perdite	1.394,5	19,8	1.414,3
	=	=	=
Consumi	Autoconsumo	763,8	3.553,2
	Mercato libero	18.158,1	18.158,1
	Mercato tutelato	2.694,7	2.694,7
	Totale Consumi	21.616,6	2.789,3

Figura 3.9: Bilancio energetico consumi regione Piemonte, 2018

Fonte 22: Statistiche regionali Terna, 2018 [48]

La maggior parte dell'energia è prodotta da fonti termiche (66,7%), mentre la restante parte da fonti rinnovabili, con una quota rilevante, grazie anche alla morfologia del territorio piemontese, proveniente dalle centrali idroelettriche (27,6%). Vale la pena focalizzarsi anche sul dato riguardante le importazioni ed esportazioni: vengono importati dall'estero circa 14

TWh e ceduti verso altre regioni circa 17,3 TWh. [48] Ciò significa che il Piemonte è oggi, non solo in grado di garantire una produzione di energia tale da soddisfare il fabbisogno interno, ma addirittura in grado di cedere alle altre regioni. Questo però non significa che non necessiti di importazioni dall'estero: l'energia elettrica non è facilmente accumulabile e questo può portare al bisogno di importazioni in momenti di deficit energetico. Non risulta però esserci nessun problema di reperibilità di extra energetici: è facilmente sfruttabile l'eccedenza energetica di stati come la Francia che solitamente viene venduta a prezzi vantaggiosi.

Il consumo energetico annuale piemontese è pari a 24,4 TWh, di cui quasi il 50% determinato da esigenze produttive dell'industria del territorio. L'aumento della mobilità elettrica non inciderebbe in misura significativa su tali valori. Per dimostrarlo, è stato effettuato un calcolo approssimativo al 2030 basato sulla seguente formulazione:

$$Extra\ consumo \left[\frac{GWh}{anno} \right] = \frac{Numero\ veicoli \times Energia\ batteria \times Numero\ ricariche\ all'anno}{Rendimento\ ricarica} \quad (3.1)$$

I dati utilizzati sono riportati in Tabella 5.

Tabella 3.9: Stima parco auto veicoli elettrici (BEV ePHEV) al 2030 e caratteristiche medie, Piemonte

Motorizzazione	Classe cilindrata	Numero veicoli	Energia batteria [kW]	Autonomia [km]	Numero ricariche
PHEV B	2	67.810	11,59	55	39
	3	36.733	11,86	54	37
	4	3.705	14,00	53	37
	5	2.019	15,36	55	38
	6	461	12,78	44	45
PHEV D	2	33.762	11,59	55	39
	3	18.288	12,30	54	36
	4	1.844	14,00	53	37
	5	1.005	15,36	55	38
	6	230	12,78	44	45
ELETTRICO		241.408	50,84	341	40

Per quanto riguarda la numerosità del parco auto si fa riferimento ai dati presenti nell'allegato 1, mentre energia della batteria e autonomia sono valori medi calcolati basandosi sui modelli plug-in (PHEV e BEV) attualmente presenti sul mercato. [1]

Per il calcolo del numero di ricariche si è tenuto conto dei chilometri medi percorsi all'anno sul territorio piemontese rapportato all'autonomia dei veicoli:

- Per quanto riguarda i veicoli ibridi plug-in (PHEV) si è assunto che l'utilizzo della trazione elettrica avvenga solo in ambito urbano per una maggior compatibilità tra autonomia e lunghezza delle distanze percorse, per un totale di 1.922 km medi all'anno
- Per quanto riguarda i veicoli elettrici puri (BEV) i km percorsi sono stati assunti pari alla media piemontese, cioè 11.626 km

I risultati sono riportati in tabella 3.10:

Tabella 3.10: Extra consumo annuale stimato al 2030 dovuto alla presenza di veicoli plug-in nelle aree del Piemonte

Alimentazione	Area	Extra consumo [GWh]	TOTALE
PHEV	AA	11,87	83,38
	NE	16,58	
	CN	11,43	
	TO	43,50	
BEV	AA	77,62	545,46
	NE	108,44	
	CN	74,69	
	TO	284,71	
	TOTALE	628,84	

Rapportato al valore del 2018 (24,4 TWh), il consumo aggiuntivo stimato di 628,84 GWh corrisponde ad un aumento dei consumi di circa il 2,6%, facilmente gestibili dalle centrali presenti sul territorio.

Posto che il sistema elettrico piemontese potrebbe essere in grado di soddisfare la domanda aggiuntiva di energia richiesta dall'aumento del numero di veicoli elettrici, è necessario capire se esso è in grado di garantire la potenza necessaria alla ricarica.

La situazione regionale della potenza erogata è dettagliata nella figura 3.10:

MW Tipologia di impianto	Potenza Efficiente Lorda			Potenza Efficiente Netta		
	Fonte rinnovabile	Fonte tradizionale	Totale	Fonte rinnovabile	Fonte tradizionale	Totale
Idrico	2.760,1	1.065,0	3.825,1	2.706,1	1.054,9	3.761,0
Termoelettrico	358,1	4.531,4	4.889,5	333,9	4.429,3	4.763,1
Celle a combustibile	0,2	-	0,2	0,2	-	0,2
Geotermoelettrico	-	-	-	-	-	-
Eolico	18,8	-	18,8	18,8	-	18,8
Fotovoltaico	1.605,1	-	1.605,1	1.605,1	-	1.605,1
Totale	4.742,1	5.596,4	10.338,7	4.664,1	5.484,2	10.148,3

Figura 3.10: Potenza degli impianti di produzione in Piemonte, 2018
Fonte 23: Statistiche regionali Piemonte, 2018 [48]

La potenza complessiva erogata dagli impianti di produzione è pari a 10,1 GW.

Analizziamo ora l'impatto che avrebbero i veicoli elettrici su questi dati. Utilizzando gli stessi dati dell'analisi precedente, la potenza richiesta viene calcolata nel seguente modo:

$$Potenza\ richiesta\ [GW] = \frac{Potenza\ di\ ricarica \times Numero\ veicoli}{Rendimento\ ricarica} \quad (3.2)$$

Presentiamo 2 scenari in cui viene fatta variare la variabile "potenza di ricarica":

- PESSIMISTICO: tutti i veicoli sono contemporaneamente collegati ad un punto di ricarica fast charge (45kW), il tempo di ricarica per utente è pari a circa 16 minuti

$$Potenza\ richiesta\ [GW] = \frac{45 \times 10^{-6} \times 407265}{0,9} = 20,36 [GW]$$

- OTTIMISTICO: tutti i veicoli sono contemporaneamente collegati ad un punto di ricarica slow charge (3.3 kW), il tempo di ricarica per utente è pari a circa 15 ore

$$Potenza\ richiesta\ [GW] = \frac{3,3 \times 10^{-6} \times 407265}{0,9} = 1,49 [GW]$$

Ovviamente gli scenari rappresentano due casi limite di un intervallo relativamente ampio di situazioni possibili. Si tenga comunque conto che l'assorbimento di potenza di un caricatore non è costante durante tutta la sua fase di impiego e che la contemporaneità di assorbimento di massima potenza di tutti i dispositivi in studio è altamente irrealistico e peggiorativo in quanto istantaneamente la potenza totale sarà minore della somma algebrica delle massime potenze richieste.

Lo scenario pessimistico è irrealistico sia dal punto di vista della realizzazione effettiva da parte di tutti gli utenti, sia dal punto di vista della potenza richiesta: è molto difficile che la

sola rete regionale copra un picco di potenza tale per un tempo minimo di 16 minuti di ricarica in fast charge (tempo medio necessario per caricare un veicolo PHEV). Lo scenario ottimistico, nonostante sia la preferibile per questioni di sovraccarico della linea, è altrettanto irrealistico poiché non sempre gli utenti hanno il tempo di far caricare l'auto per circa 15 ore consecutive (tempo medio necessario per caricare un veicolo BEV).

Il grafico seguente mostra come varia la potenza richiesta al variare del numero dei veicoli connessi in fast charge o in slow charge.

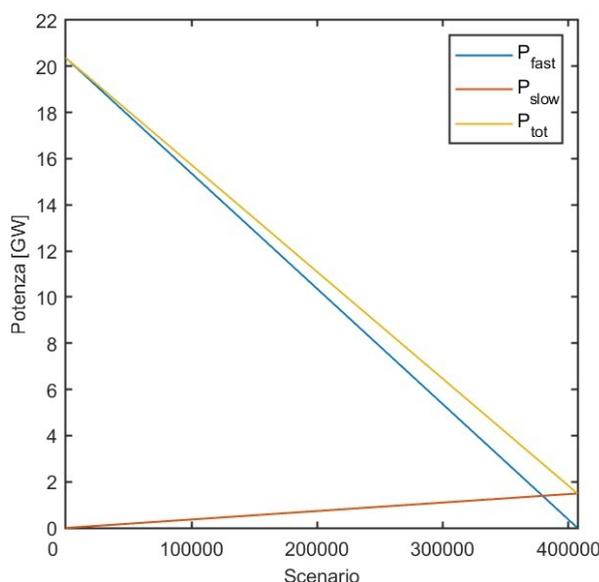


Figura 3.11: Grafico variazione potenza richiesta dallo scenario n. 0 (tutti i veicoli caricati in fast charge) allo scenario n. 407.264 (tutti i veicoli caricati in slow charge)

L'asse delle ascisse rappresenta gli "scenari": lo scenario 0 rappresenta il caso in cui tutti e 407.265 veicoli siano ricaricati in fast charge, lo scenario 1 rappresenta il caso in cui 407.264 veicoli sono ricaricati in fast charge e 1 in slow charge e così via fino ad arrivare allo scenario 407.265 in cui tutti i veicoli sono ricaricati in low charge.

Secondo il "Livre Vert" francese "La ricarica normale (3,3 kWh) è il tipo di ricarica comunemente privilegiata. Notoriamente si impone per i luoghi di sosta detti "principali", sui quali i veicoli ricaricabili stazionano durante le lunghe soste e possono assicurare la maggior parte della ricarica elettrica ($\approx 90/95$ % secondo le prime sperimentazioni). Gli altri tipi di ricarica (accelerata e rapida) sono delle ricariche di "comfort" o "extra", che giocano un ruolo importante per la diffusione del mercato per la loro funzione di "rassicurare" gli utilizzatori, ma devono costituire una minoranza o addirittura a uso eccezionale, per ragioni di costo e d'impatto ambientale."[49]

Prendendo in considerazione questi dati, la potenza richiesta oscillerebbe tra i 2,44 GW e 3,38 GW.

CAPITOLO 4: Analisi comparativa valori emissivi veicoli

4.1 Analisi well to wheel

La diffusione di tecnologie di propulsione differenti da quelle a combustione interna è stata favorita dalle direttive emanate dalla Commissione europea che esortano all'utilizzo di carburanti alternativi ai derivati da petrolio. Per valutare in maniera corretta le diverse opzioni, è indicato l'utilizzo dell'indice WTW (well to wheel). Come suggerito dal nome, tale indice tiene conto di tutto ciò che intercorre dal pozzo (weel) alle ruote (wheel) e ha come funzione principale quella di confrontare differenti tecnologie di propulsione e vettori energetici ottenuti da un'ampia gamma di fonti primarie.

Consiste nella combinazione di due sottoindici:

- WTT: considera l'ammontare di energia richiesta per rendere disponibile il carburante dalla fonte di energia primaria alla fornitura al serbatoio dell'auto. È solitamente espresso in $\frac{MJ_t}{MJ_f}$ dove MJ_t è la quantità totale di energia impiegata per rendere disponibile 1 MJ di combustibile e MJ_f è l'energia contenuta nel carburante immagazzinato nel serbatoio del veicolo
- TTW: considera l'ammontare di energia usata per spostare un mezzo di trasporto ad una certa distanza, la quale dipende dalla combinazione del carburante e dalla tecnologia di propulsione utilizzata. È necessario ricordare che in Europa dal 2018 per determinare i consumi viene utilizzato il ciclo di guida WLTP

$$WTW \left[\frac{MJ_t}{km} \right] = WTT \left[\frac{MJ_t}{MJ_f} \right] \times TTW \left[\frac{MJ_f}{km} \right] \quad (4.1)$$

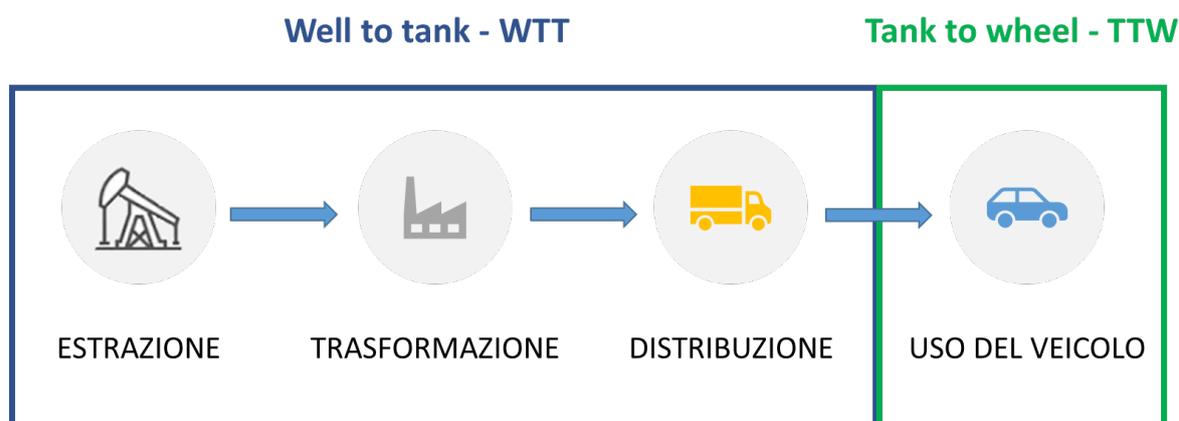


Figura 4.1: Rappresentazione ciclo WTW

4.1.1 Elementi dell'analisi

In questo elaborato viene utilizzata un'analisi analoga finalizzata al calcolo delle emissioni totali per effettuare un confronto tra veicoli ibridi ed elettrici plug-in e tradizionali a combustione interna. Il confronto è stato effettuato tenendo in considerazione i veicoli ibridi plug-in esclusivamente alimentati a benzina in relazione alla loro maggior presenza sul mercato rispetto a quelli alimentati a diesel.

L'analisi è stata effettuata prendendo in esame i dati attuali (2020) e quelli stimati al 2030. In particolare, sono state tenute in considerazione le seguenti variabili, molte delle quali già utilizzate nei capitoli precedenti:

- Emissioni medie di CO₂ per produrre e distribuire i vettori energetici: dato utilizzato per il calcolo delle emissioni delle fasi WTT
- Emissioni medie di CO₂ dei veicoli: dato utilizzato per il calcolo delle emissioni delle fasi TTW
- Consumi medi dei veicoli: dato utilizzato per il calcolo delle quantità di vettore energetico necessarie per il funzionamento del veicolo. Deriva da una combinazione ponderata sui chilometri percorsi in ambito urbano ed extraurbano rispettivamente dei consumi urbani ed extraurbani

Dai dati presenti in letteratura, in particolare sfruttando l'analisi effettuata dalla Commissione europea [50], è stata ricavata la seguente tabella:

Tabella 4.1: Emissioni CO₂ eq nelle fasi WTT suddivise per fonte energetica

Alimentazione	Fonte	Emissioni WTT [gCO ₂ eq/MJ _{final fuel}]	WTT [gCO ₂ eq /kWh _{final fuel}]	Composizione	Emissioni WTW
Benzina	Petrolio	15,4		100%	15,4 [gCO ₂ eq /MJ _{ff}]
Diesel	Petrolio	13,8		100%	13,8 [g CO ₂ eq /MJ _{ff}]
Elettrico	Petrolio	237,8	856	1,00%	417,99 [g CO ₂ eq /MJ _{ff}] 0 116,16 [g CO ₂ eq /kWh _{ff}]
Elettrico	Carbone	269	968	18,89%	
Elettrico	Gas naturale	141	508	28,56%	
Elettrico	Nucleare	4	16	4,64%	
Elettrico	Altre fonti	130	467	3,72%	
Elettrico	Rinnovabili	41	147	43,11%	

Fonte 24: Joint research center, 2014 [50]

I dati si riferiscono a MJ e kWh relativi ai consumi finali di vettore energetico: sono quindi calcolati tenendo conto delle perdite subite durante le varie fasi. Per quanto riguarda la produzione di energia elettrica, è stato considerato il mix energetico piemontese elaborato nel capitolo 1.

Sfruttando le tabelle C e D presenti nell'allegato 1, già utilizzate nel capitolo precedente, si dispone nelle emissioni medie dei veicoli, corrispondenti quindi alla fase TTW, suddivise per tipo di alimentazione e cilindrata.

Infine, dai consumi medi dei veicoli, sono state calcolate le quantità di vettore energetico necessarie per percorrere in media 11.626 km/anno, suddivisi in 1.922 km/anno su percorsi urbani e 9.704 km/anno su percorsi extraurbani, in riferimento ai valori ottenuti dalle analisi del capitolo precedente. In particolare, per quanto in relazione ai consumi dei veicoli ibridi plug-in è stata assunta una percorrenza in extraurbano sfruttando il motore termico e in urbano sfruttando quello elettrico.

Per quanto riguarda i carburanti derivanti dal petrolio, in questo caso benzina e diesel, poiché le emissioni WTT sono espresse in base a MJ di carburante finale, una volta calcolati i consumi totali è possibile ricavare i MJ_{ff} sfruttando la densità energetica (benzina = 34,6 MJ/l; diesel = 45,8 MJ/l):

$$MJ_{ff} = \text{Consumi totali}_{ff} [l] \times \text{Densità energetica} \left[\frac{MJ}{l} \right] \quad (4.2)$$

È necessario sottolineare che, sia le emissioni di CO₂ che i consumi di veicoli, sono valori medi che dipendono, oltre che dalle caratteristiche delle vetture, anche dallo stile di guida adottato.

Combinando tutti i dati raccolti, ipotizzando che il mix energetico non cambi nel tempo, si ottengono le tabelle 4.2 e 4.3. I valori al chilometro sono stati calcolati rapportando il valore totale ai chilometri di percorrenza media considerati (11.626 km).

Tabella 4.2: Emissioni di CO₂ eq. calcolate, Piemonte, 2020

Alimentazione	Classe cilindrata	Consumi		WTT		TTW		WTW	
		[kWh/km]	[l/km]	[Kg]	[g/km]	[Kg]	[g/km]	[Kg]	[g/km]
Elettrica		0,1545		834,37	71,71	0,00	0,00	834,37	71,71
Benzina	1		0,0451	280,48	24,04	1272,23	109,43	1552,71	133,47
Benzina	2		0,0511	318,00	27,23	1463,60	125,89	1781,60	153,12
Benzina	3		0,0630	392,46	33,59	1822,72	156,78	2215,18	190,37
Benzina	4		0,0717	446,58	38,20	2102,56	180,85	2549,15	219,05
Benzina	5		0,0817	508,69	43,53	2410,42	207,33	2919,11	250,86
Benzina	6		0,1029	642,40	54,86	3135,18	269,67	3777,59	324,53
PHEV B	2	0,21346	0,0475	417,11	35,88	430,98	37,07	659,96	72,95
PHEV B	3	0,22282	0,0581	479,40	41,24	510,27	43,89	754,46	85,13
PHEV B	4	0,26637	0,0651	550,60	47,36	410,75	35,33	634,75	82,69
PHEV B	5	0,28276	0,0749	614,14	52,82	647,68	55,71	911,08	108,53
PHEV B	6	0,2892	0,0908	701,78	60,36	939,38	80,80	1250,94	141,16
Diesel	2		0,0378	256,88	22,04	1210,15	125,89	1467,03	147,93
Diesel	3		0,0469	319,16	27,38	1493,94	156,78	1813,10	184,16
Diesel	4		0,0569	387,52	33,22	1857,72	180,85	2245,24	214,07
Diesel	5		0,0571	389,12	33,36	1880,74	207,33	2269,86	240,69
Diesel	6		0,1081	733,63	63,10	2658,87	269,67	3392,49	332,77

Tabella 4.3: Emissioni di CO₂ eq. calcolate, Piemonte, 2030

Alimentazione	Classe cilindrata	Consumi		WTT		TTW		WTW	
		[kWh/km]	[l/km]	[Kg]	[g/km]	[Kg]	[g/km]	[Kg]	[g/km]
Elettrica		0,1545		834,37	71,71	0,00	0,00	834,37	71,71
Benzina	1		0,0451	280,48	24,04	1150,58	98,97	1431,06	123,01
Benzina	2		0,0511	318,00	27,23	1323,65	113,85	1641,65	141,09
Benzina	3		0,0630	392,46	33,59	1648,44	141,79	2040,90	175,38
Benzina	4		0,0717	446,58	38,20	1901,52	163,56	2348,10	201,75
Benzina	5		0,0817	508,69	43,53	2179,94	187,51	2688,63	231,03
Benzina	6		0,1029	642,40	54,86	2835,40	243,88	3477,81	298,74
PHEV B	2	0,21346	0,0475	417,11	35,88	389,77	33,53	659,96	69,40
PHEV B	3	0,22282	0,0581	479,40	41,24	461,47	39,69	754,46	80,93
PHEV B	4	0,26637	0,0651	550,60	47,36	371,47	31,95	634,75	79,31
PHEV B	5	0,28276	0,0749	614,14	52,82	585,75	50,38	911,08	103,21
PHEV B	6	0,2892	0,0908	701,78	60,36	849,56	73,07	1250,94	133,44
Diesel	2		0,0378	256,88	22,04	1072,53	92,25	1329,41	114,30
Diesel	3		0,0469	319,16	27,38	1324,05	113,89	1643,20	141,27
Diesel	4		0,0569	387,52	33,22	1646,45	141,62	2033,98	174,84
Diesel	5		0,0571	389,12	33,36	1666,85	143,37	2055,97	176,73
Diesel	6		0,1081	733,63	63,10	2356,49	202,69	3090,12	265,79

Come si può notare dai risultati ottenuti, l'utilizzo dell'elettricità come fonte di trazione non risulta conveniente se si basa la scelta dell'alimentazione solamente in relazione alle emissioni che riguardano le fasi WTT. Il valore è addirittura simile o superiore ai valori delle cilindrata massime dei veicoli ICE. Questo trova una spiegazione nella composizione delle fonti da cui essa ha origine: la produzione derivante da carbone e gas naturale, che risulta circa il 47,5%, incide negativamente sul risultato finale.

Al contrario, se si osserva solo l'uso del veicolo, la trazione elettrica non produce emissioni.

L'elettricità risulta quindi un vettore "non inquinante" solo se deriva da fonti "pulite".

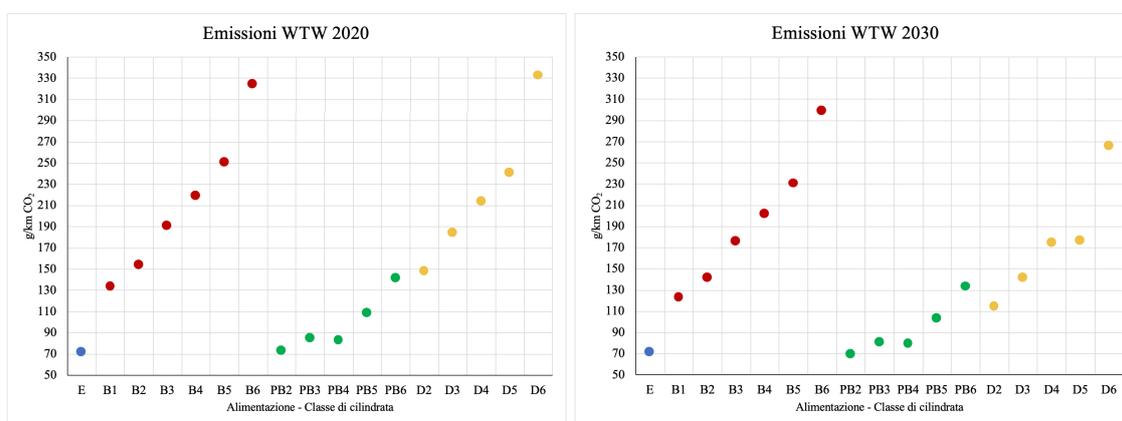


Figura 4.2: Emissioni CO₂ WTW a confronto in base ad alimentazione e cilindrata, Piemonte

4.1.2 Affinamento dell'analisi

Se ci limitassimo ad osservare i dati ottenuti tramite quest'analisi, potremmo affermare che l'utilizzo dei veicoli elettrici è di gran lunga più conveniente rispetto all'uso di un veicolo a combustione e che, modificando il mix energetico e orientandolo verso fonti rinnovabili, la differenza è facilmente incrementabile. Lo stesso si può affermare nel confronto tra il modello ibrido e l'elettrico puro, ma lo scostamento non è così marcato come per i veicoli tradizionali.

Tuttavia, è stato ritenuto necessario tenere in considerazione anche le emissioni relative ad altre due fasi: la produzione del veicolo e la produzione delle batterie utilizzate per i veicoli elettrici. Entrambe le variabili sono strettamente legate alla complessità del processo produttivo del veicolo e al mix energetico utilizzato in produzione, quindi i valori presentati in tabella 4.4 sono indicativi, ma utili per una migliore costruzione dell'analisi. In particolare i dati, calcolati utilizzando il mix energetico EU28, si riferiscono ad un veicolo a benzina di classe cilindrata 2 e ad un equivalente veicolo elettrico: sono poi stati considerati gli stessi valori sia per le diverse classi di cilindrata che per i veicoli diesel e ibridi, questi ultimi equiparati ai veicoli elettrici per la loro complessità, in assenza di dati in letteratura.[42]

Per quanto riguarda le emissioni relative alla produzione degli accumulatori, invece, è stato considerato un valore intermedio di 175 kg CO₂ eq/kWh batteria, ricavato da uno studio condotto da due ricercatrici svedesi su commissione della Swedish Energy Agency e dal Swedish Transport Administration [51]. Tale valore è stato a sua volta moltiplicato per il valor medio di energia accumulato nelle batterie dei veicoli presenti sul mercato, già considerato per calcoli precedenti, pari a 50,84 kWh per i veicoli elettrici puri e 13,18 kWh per i veicoli ibridi. In realtà la relazione tra dimensione dell'accumulatore e le emissioni dovute alla sua produzione non è lineare ma quasi, per lo più a causa dei componenti elettronici, ma per semplicità dei calcoli è stato ipotizzato che lo fosse. Inoltre, è bene ricordare che le batterie sono quasi esclusivamente prodotte in zone in cui il mix energetico non presenta una porzione rilevante di fonti rinnovabili e ciò si riflette in maniera negativa sui valori emissivi.

Tabella 4.4: Emissioni CO₂ eq per produzione veicolo e batteria

Alimentazione	Produzione veicolo [kg]	Batteria [kg]
Benzina	4.878	
Phev B	8.887	2.251
Diesel	4.878	
Elettrica	8.887	8.897

Fonte 25: IVL Swedish Environmental Research Institute, 2017, [51] e Fondazione Caracciolo, 2019, [42]

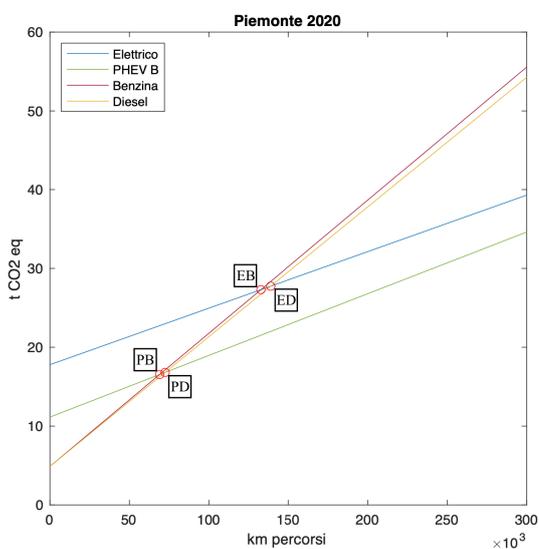
A questo punto, tenendo in considerazione le fasi che intercorrono dal pozzo alle ruote unitamente alla produzione sia del veicolo che della batteria utilizzata, sono stati creati dei grafici utili per confrontare le diverse alternative di trazione al variare dei chilometri percorsi. I valori di emissione sono stati ponderati in base alla composizione di cilindrata del parco auto piemontese, con riferimento alle tabelle F e G dell'allegato 1. La formula utilizzata è la seguente:

$$\begin{aligned}
 & \text{Emissioni Tot. di CO}_2 \text{ eq. [t]} \\
 & = \left(\sum_{i=1}^6 WTW_i \left[\frac{g}{km} \right] \times 10^{-6} \times km \text{ percorsi [km]} \right) + \text{Emissioni Produzione}_j \text{ [kg]} \times 10^{-3} \quad (4.3)
 \end{aligned}$$

Dove i = classe cilindrata e j= alimentazione

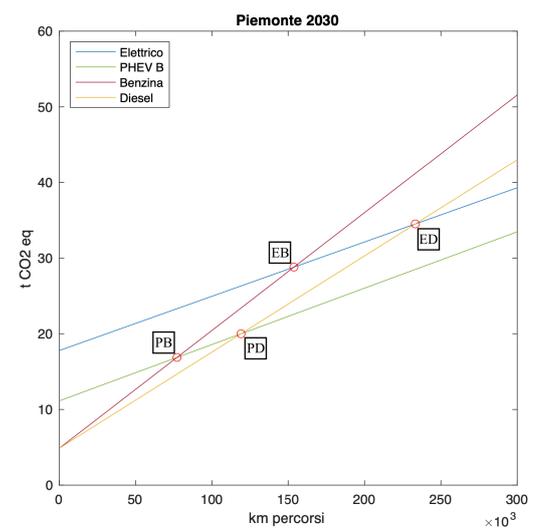
Per tutte le variabili considerate nell'analisi in riferimento all'equazione 4.3, i dati sono stati considerati costanti ad eccezione di quelli relativi alle emissioni del veicolo (TTW).

4.2 Risultati



BEP	km percorsi	t CO2 eq
Elettrico-Benzina	132.741	27.303
Elettrico-Diesel	138.901	27.744
Elettrico-PHEVB	1.016.687	90.689
PHEVB-Benzina	69.021	16.538
PHEVB-Diesel	72.467	16.808

Figura 4.3: Grafico confronto emissioni CO₂ eq in funzione dei km percorsi, Piemonte, 2020



BEP	km percorsi	t CO2 eq
Elettrico-Benzina	153.762	28.810
Elettrico-Diesel	233.263	34.511
Elettrico-PHEVB	2.432.665	192.228
PHEVB-Benzina	77.085	16.876
PHEVB-Diesel	119.011	19.997

Figura 4.4: Grafico confronto emissioni CO₂ eq in funzione dei km percorsi, Piemonte, 2030

Alla luce dei risultati ottenuti si può affermare che il veicolo ibrido plug-in a benzina risulta il più conveniente dal punto di vista delle emissioni. In particolare risulta sempre meno inquinante rispetto al veicolo elettrico, mentre il punto di pareggio delle emissioni risulta intorno ai 70k chilometri, corrispondenti a circa 6 anni di utilizzo, se confrontato con i veicoli tradizionali. Il discorso cambia parzialmente se si fa riferimento ai valori stimati al 2030: rimangono invariate le considerazioni fatte precedentemente sul confronto con i modelli elettrici, ma per quanto riguarda i veicoli tradizionali il punto di pareggio viene raggiunto a 77k chilometri (6,6 anni di utilizzo) se si fa riferimento ai modelli a benzina e 119k chilometri

(10,2 anni di utilizzo) per i modelli diesel, in relazione all'avanzamento tecnologico legato all'efficienza dei motori.

Se si confrontano il veicolo elettrico e quelli tradizionali, invece, il punto di pareggio delle emissioni risulta intorno ai 132,7k chilometri percorsi per quanto riguarda i veicoli a benzina e 138,9k per i diesel al 2020. Questo significa che in media dopo circa 11/12 anni di utilizzo, cioè a circa fine ciclo di vita di un'automobile, il bilancio di emissioni risulta a favore dei veicoli a trazione elettrica. Se si fa riferimento ai valori stimati al 2030 i risultati cambiano: se per i veicoli a benzina il confronto è ancora accettabile, per quanto riguarda i veicoli diesel il punto di pareggio sarebbe raggiunto ben oltre la vita utile media del veicolo.

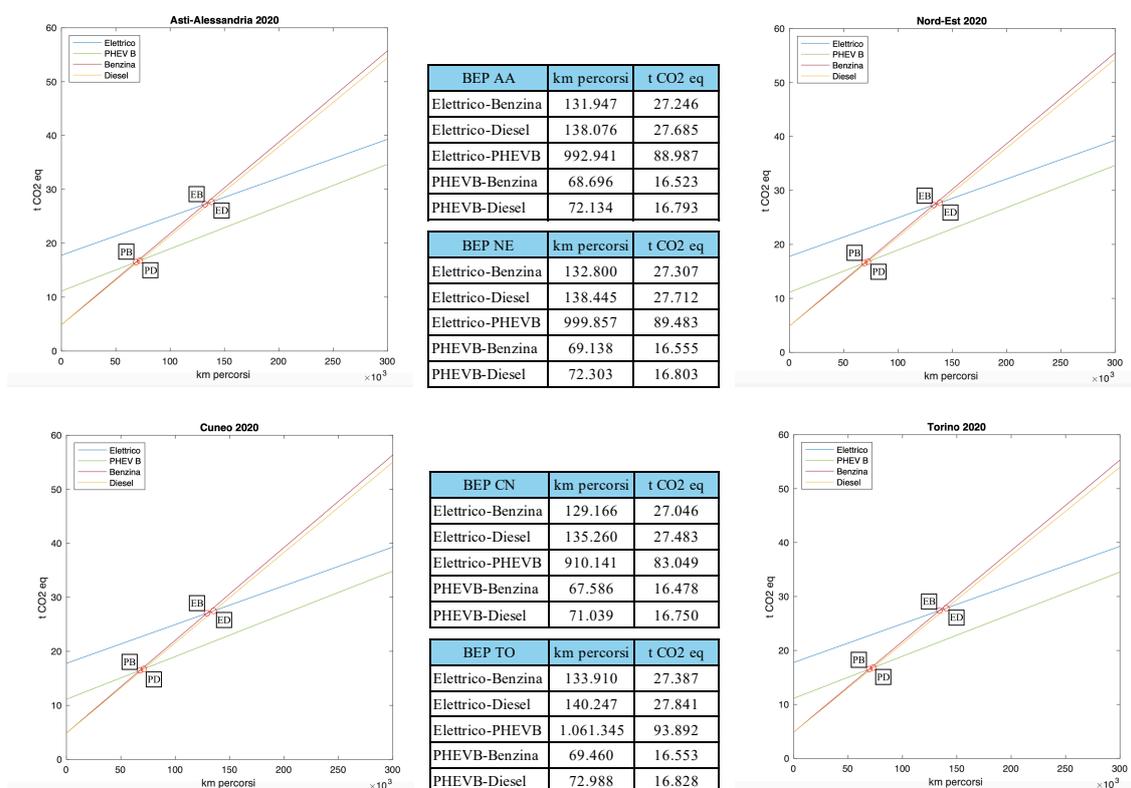


Figura 4.5: Grafici confronto emissioni CO₂ eq in funzione dei km percorsi, aree Piemonte, 2020

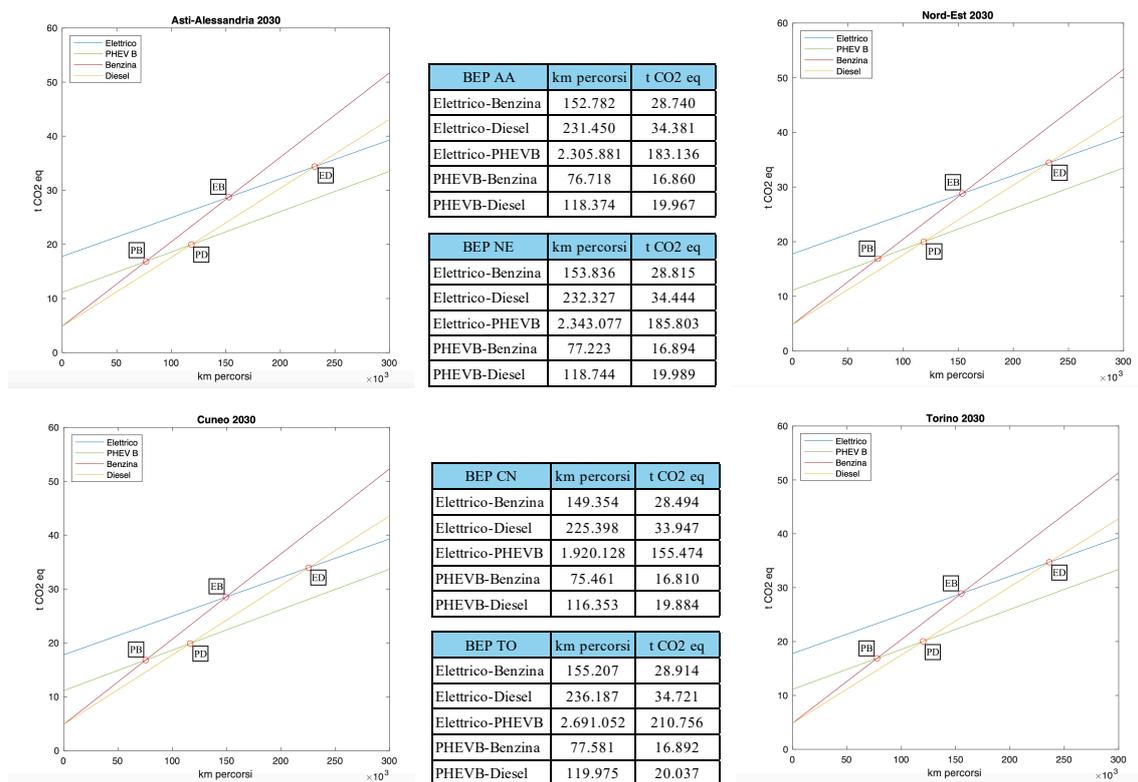


Figura 4.6: Grafici confronto emissioni CO₂ eq in funzione dei km percorsi, aree Piemonte, 2030

Un confronto dei dati indica che nell'area del cuneese il punto di pareggio, sia nel confronto con il veicolo ibrido, sia con il veicolo elettrico, viene raggiunto in tempi lievemente inferiori rispetto alle altre aree della regione. Questo perché in media il parco auto in quest'area ha il valore medio di emissione/km maggiore, in riferimento ai dati riportati in tabella 3.1. Tuttavia le differenze tra le diverse aree della regione sono modeste.

È necessario sottolineare che le due variabili prese in considerazione nei paragrafi precedenti (produzione del veicolo e della batteria) non sono sufficienti per definire l'analisi completa, in quanto sono state trascurate altre fasi difficili da elaborare, come ad esempio la produzione delle materie prime, lo smaltimento di veicoli e batterie o ancora il riciclo di quest'ultime. A questo proposito, secondo il già citato studio svedese [51], il riciclo degli accumulatori ha un saldo positivo sul bilancio delle emissioni di CO₂ equivalenti. La separazione dei componenti produce 2.494 g di CO₂ eq/kg di batteria, ma ci sarebbe un risparmio di 3.530 g di CO₂ eq/kg di batteria non emessi per la nuova produzione, per un totale di circa 1.035 g di CO₂ eq/kg di batteria netti in meno dovuti all'utilizzo di materiali riciclati. Il problema, come già accennato nel capitolo 2, risiede nel fatto che il riciclo degli accumulatori non è una pratica molto diffusa, soprattutto per i costi ridotti delle materie prime, e quindi difficilmente incorporabile nell'analisi eseguita.

Da questa analisi possiamo concludere che, se si considera il ciclo di vita completo del veicolo, o gran parte di esso, il veicolo ibrido plug-in ha il bilancio emissivo minore tra le tipologie di alimentazione messe a confronto. Il veicolo elettrico puro, seppur a emissioni zero nella fase di utilizzo, presenta un bilancio emissivo superiore, se confrontato con i veicoli tradizionali, per quasi l'intero intervallo di tempo di vita utile di un'automobile, a meno di un sostanziale utilizzo di fonti rinnovabili nella produzione dell'energia elettrica. Il mix energetico considerato, riportato nella tabella 4.1, risulta quindi essere un elemento chiave ai fini della definizione del combustibile alternativo: tanto più la quota di fonti rinnovabili è preponderante, tanto più è conveniente utilizzare l'elettricità come vettore energetico. Come già evidenziato nel capitolo 1, la Commissione europea ha emanato direttive al fine di favorire il maggiore sfruttamento delle fonti rinnovabili, ma lo stesso non si può dire di paesi come la Cina, dove vengono prodotte la quasi totalità delle batterie utilizzate. Se quindi si vorrà controllare anche questo aspetto, sarà necessario spostare la produzione in luoghi con mix energetici meno inquinanti, come ad esempio l'Europa. Tuttavia, indipendentemente dal mix energetico, nelle fasi di utilizzo il veicolo a trazione elettrica non produce emissioni. Questo è un importante aspetto da tenere in considerazione in ottica di una logistica a zero emissioni in ambito urbano. Si tenga però sempre a mente che la produzione del vettore energetico dipende dal mix energetico, di conseguenza l'origine da fonti non rinnovabili produce emissioni non trascurabili, seppur lontano dal luogo di utilizzo del veicolo.

In conclusione, l'utilizzo di un veicolo elettrico puro in alternativa ai veicoli tradizionali risulta conveniente dal punto di vista del bilancio delle emissioni se:

1. Si percorrono in media più di 133k o 139k chilometri a seconda di se si utilizza un'auto a motorizzata a benzina o diesel
2. Si utilizza un mix energetico per lo più derivante da fonti di energia rinnovabili per produrre energia, veicoli e batterie

CAPITOLO 5: Analisi economica

5.1 Total cost of ownership

Questo capitolo ha come obiettivo quello di integrare la valutazione delle possibili alternative attraverso considerazioni di natura economica.

I costi di utilizzo dell'auto privata incidono fortemente sul bilancio familiare: è stata calcolata una spesa media pari a 300€ per ogni veicolo, equivalente a circa il 15% dello stipendio medio percepito in Piemonte. Si tratta quindi di un fattore da non sottovalutare nel momento in cui si effettua un nuovo acquisto.

È stata quindi elaborata un'analisi comparativa del "Total cost of ownership"⁵ di un veicolo a trazione elettrica rispetto ad un veicolo a benzina equivalente in termini di motore ed allestimenti. Si è deciso di usare come modello di riferimento la Volkswagen Golf 8 in quanto, oltre alla motorizzazione a benzina ed elettrica, è presente sul mercato anche con equivalenti modelli ibridi mild hybrid e plug in.

Nella tabella seguente sono riportate le variabili dei veicoli prese in esame per effettuare il calcolo del costo totale di proprietà:

Tabella 5.1: Costo acquisto e mantenimento Golf 8 modello benzina, ibrido plug-in benzina e elettrico

	BENZINA	PHEV B	ELETTRICO
Modello	Golf 1.5 TSI EVO ACT Life	Golf GTE	e-Golf 136 CV
Prezzo chiavi in mano	27.100,00 €	32.520,00 € ⁶	32.950,00 €
Incentivi	- €	0 – 2.500 €	0 – 6.000 €
Costo infrastruttura di ricarica	- €	1.200,00 €	1.200,00 €
Costo carburante	1,54 €/l	1,32 ⁷ €	0,23 €/kWh
Manutenzione ⁸	294,00 €/anno	294,00 €/anno	80,50 €/anno
RCA	1.141,36 €/anno	1.005,94 €/anno	1.048,31 €/anno

⁵ Costo totale di proprietà o di possesso, è un metodo di valutazione di tutti i costi relativi al ciclo di vita di un bene

⁶ Prezzo calcolato sulla media di mercato rispetto ai veicoli benzina

⁷ Valore medio ponderato sui km percorsi a trazione elettrica o benzina

⁸ Valore medio calcolato in 10 anni

Bollo	208,98 €/anno	208,98 €/anno ⁹	- €/anno
Parcheggio blu	100,00 €/anno	- €	- €/anno
Accesso ZTL	66,00 €/anno	- €	- €

1. **PREZZO CHIAVI IN MANO:** “Il prezzo chiavi in mano si intende IVA 22% e messa su strada (€ 833,28) incluse, Imposta provinciale trascrizione esclusa” [52] Si riferisce al prezzo del modello base, senza variazioni di allestimento ecc., in data 06/05/20.
2. **INCENTIVI:** sono stati analizzati tre diversi scenari, riassunti nella tabella 5.2:

Tabella 5.2: Caratteristiche scenari

Scenario	Valore incentivo	Rottamazione
Incentivo nullo	- €	
Incentivo basso	1.500,00/4.000,00 €	NO
Incentivo alto	2.500,00/6.000,00 €	Sì

- A. Incentivo nullo: caso in cui non venga erogato nessun tipo di incentivo all’acquisto di un veicolo a trazione elettrica
 - B. Incentivo basso: caso in cui venga erogato il minimo valore di incentivo all’acquisto previsto dalla Legge di bilancio 2019 pari a 4.000 € o 1.500 €.[22] Come riportato nel capitolo 2, è l’incentivo corrisposto rispettivamente per l’acquisto di un veicolo con emissioni inferiori a 20 g/km o 70 g/km di CO₂ senza contestuale rottamazione di un veicolo fino alla classe euro 4
 - C. Incentivo alto: caso in cui venga erogato il massimo valore di incentivo all’acquisto previsto dalla Legge di bilancio 2019 pari a 6.000 € o 2.500 €.[22] A differenza del caso precedente, per avere diritto all’incentivo massimo è necessaria la contestuale rottamazione di un veicolo omologato alle classi euro fino alla 4
3. **COSTO INFRASTRUTTURA DI RICARICA:** Si riferisce al costo dell’acquisto e dell’installazione di una wall-box domestica.[53] Sono esclusi invece i costi relativi alla modifica della potenza contrattuale: nel caso si decida di aumentare la potenza contrattuale a 7 kW, sono però previsti degli incentivi dalla legge di bilancio 2019 mirati alla copertura del 50% in 10 anni sia delle spese di acquisto e installazione del

⁹ A partire dal 5° anno

caricatore, sia gli oneri di adeguamento contrattuale (per un massimo di 3000 € di spesa totale).

4. **COSTO VETTORE ENERGETICO:** Al momento della stesura di questo capitolo (inizio maggio 2020) il mercato del petrolio si trova in un momento particolare dovuto alla pandemia che ha colpito, senza alcuna eccezione, il nostro pianeta. È quindi stato considerato il prezzo di mercato al 02/03/20, pari a 1,54 €/l, derivante dalle rilevazioni del Ministero dello sviluppo economico, anche in concordanza con il periodo di rilevazione della fornitura di energia elettrica.[54] Per quanto riguarda la valutazione del costo dell'alimentazione del veicolo elettrico, esso è stato calcolato in base alle abitudini di ricarica emerse da interviste dirette a possessori di vetture elettriche [29] in combinazione con i costi medi dell'energia derivanti dalle offerte di mercato.

Tabella 5.3: Abitudini consumatori e tariffe ricarica pubblica

Tipologia	Tasso di utilizzo	Tariffa
Domestica	60%	0,25 €/kWh
Punti di interesse	25%	- €/kWh
Pubblica slow	10%	0,51 €/kWh
Pubblica fast	5%	0,53 €/kWh

Fonte 26: Elaborazione dati Smart mobility report, 2019 [29]

Il costo della ricarica domestica è stato ricavato dalla lettura di una bolletta derivante da un contratto di fornitura con potenza disponibile pari a 3,3 kW. Si tratta del costo medio unitario della fornitura nel periodo febbraio – marzo 2020.

Per quanto riguarda il costo della ricarica pubblica invece, è stata calcolata una media delle tariffe di alcuni fornitori presenti sul mercato e riportati nella seguente tabella:

Tabella 5.4: Tariffe ricarica pubblica, maggio 2020

Pubblica slow		Pubblica fast	
Duferco	0,46 €/kWh	Ionity	0,79 €/kWh
Enel x	0,45 €/kWh	Enel x	0,50 €/kWh
Route 220	0,61 €/kWh	Tesla supercharger	0,30 €/kWh

Fonte 27: Duferco, Enel x, Route 220, Ionity, Tesla [55-59]

Le tariffe riportate in tabella sono relative esclusivamente all'energia elettrica, applicate in assenza di una qualsiasi forma di abbonamento o aggiunta relativa al tempo di ricarica trascorso.

BOX 4: Componenti tariffe

BENZINA

- **ACCISA:** è una tassa imposta dallo Stato sulla vendita di determinati beni. Si calcola sulla quantità di prodotto e non sul prezzo: in Italia l'accisa sulla benzina è pari a 728,40€ ogni 1000 litri di benzina [54]
- **IVA:** l'aliquota IVA applicata alla vendita della benzina è pari al 22%
- **PREZZO INDUSTRIALE:** è la somma del costo della materia prima e del margine lordo. Il costo della materia prima è sottoposto alla quotazione Platts sul mercato internazionale: esprime il valore effettivo dei prodotti raffinati. Inoltre è fortemente influenzato dal cambio euro/dollaro. Il margine lordo invece è la differenza tra il prezzo finale e le altre componenti: è l'unico importo "modificabile" dall'operatore

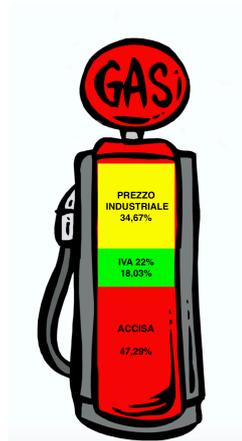


Figura 5.1: Componenti tariffa benzina, 1,54€/l, 02/03/2020

Continua...

Continua...

ELETTRICITA'

- **COSTO MATERIA PRIMA:** il costo della materia prima è stabilito dal fornitore che opera sul mercato libero
- **ONERI GENERALI DI SISTEMA:** sono oneri utili alla copertura di costi per attività di interesse generale per il sistema elettrico nazionale. [60]
- **ONERI PER SERVIZI DI RETE:** si riferiscono a tutti quei costi relativi al trasporto, alla distribuzione e alla gestione del contatore
- **ACCISA:** si tratta di un'imposta indiretta calcolata in base alla quantità di energia consumata, esattamente come nel caso della vendita della benzina. Varia da 0 a 0,0227 €/kWh se la fornitura è a uso domestico e tra 0,0125 e 0,0075 €/kWh se ha uso diverso (in cui rientra la ricarica pubblica), in base a determinati limiti di consumi [61]
- **IVA:** l'aliquota IVA applicata alla vendita dell'energia elettrica è pari al 10% se la fornitura è a uso domestico, 22% se ha uso diverso
- **COSTI INFRASTRUTTURA:** sono relativi solo alle tariffe della ricarica pubblica. Sono i costi relativi all'installazione e alla manutenzione della colonnina, nonché costi relativi alla gestione del servizio all'utente finale.



Figura 5.2: Componenti tariffa energia elettrica fornitura domestica, 0,254 €/kWh, febbraio-marzo 2020

Una componente rilevante sul prezzo della benzina sono sicuramente le imposte: coprono, in maniera variabile dal periodo di riferimento, circa il 65% del costo totale. Se si tiene conto che la stessa componente sulla tariffa elettrica per la ricarica domestica ha un impatto di solo il 14,29% circa, calcolato tra l'altro su un importo pari ad 1/6 (o 1/3 se ricarica pubblica), ne consegue che il ruolo dello Stato per il passaggio ad un vettore energetico alternativo risulta fondamentale.

BOX 5: Rifornamento

Quanto costa un pieno?

Tabella 5.5: Caratteristiche veicolo e ricarica benzina e elettrico

	Benzina	Elettrico
Costo rifornimento	77,00 €	8,23 €
Autonomia	935 [km]	300 [km]
Consumi ciclo misto	5,35 [l/100 km]	15,4 [kWh/100 km]
Serbatoio	50 L	35,8 kWh
Tempi di ricarica	10 min	da 17 h a 50 min circa

Basandosi sulle tariffe presentate un pieno per il modello benzina costa 77€, mentre per l'equivalente elettrico costa soli 8,23€. L'autonomia però è ben diversa: saranno necessari più di 3 ricariche piene per il modello elettrico per percorrere lo stesso numero di chilometri dell'equivalente a benzina, con tempi di ricarica decisamente più elevati.

Tabella 5.6: Confronto costo pieno (esclusa tariffa gratuita)

	300 [km]	935 [km]
Domestica	8,95 €	27,89 €
Pubblica slow	18,26 €	56,91 €
Pubblica fast	18,97 €	59,12 €
Benzina	24,71 €	77,00 €

Inoltre, è necessario precisare, come riporta Tesla sul suo sito, che per i veicoli elettrici “Il costo (della ricarica) può variare in base alla posizione e alla configurazione del veicolo, allo stato di usura e alle condizioni generali della batteria, allo stile di guida e alle modalità di utilizzo del veicolo, nonché alle condizioni ambientali e climatiche”.
[59]

5. **MANUTENZIONE:** Bisogna innanzi tutto sfatare il mito secondo cui le auto a trazione elettrica non necessitano di manutenzione: a differenza dei modelli a combustione interna non hanno il motore a scoppio o la trasmissione idraulica, ma condividono gran parte delle parti in movimento sottoposte ai controlli durante la manutenzione ordinaria. Il monte ore da dedicare alla manutenzione dei tre modelli è pressoché lo stesso, ma

nonostante ciò il tagliando per il modello a benzina, assunto equivalente a quello dell'ibrido per similitudini meccaniche, è decisamente più oneroso: la differenza di prezzo è dovuta all'ammontare dei ricambi da sostituire. Come si può notare dallo schema in figura 5.3 in cui vengono riportati i costi dei tagliandi standard nei primi 10 anni di vita del veicolo, questa differenza aumenta sostanzialmente negli anni in cui devono essere sostituiti pezzi importanti come le candele (4° e 7° anno) o la cinghia di distribuzione (6° anno).[62]

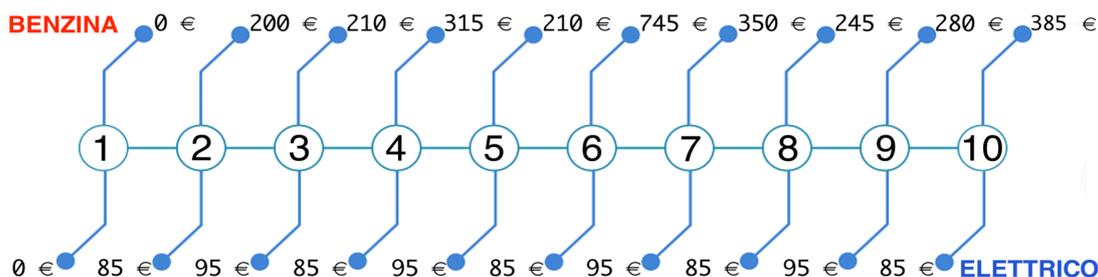


Figura 5.3: Costo manutenzione ordinaria negli anni

6. RCA: Per calcolare il premio assicurativo sono stati inseriti i seguenti dati che rispecchiano le condizioni dell'autore dell'elaborato:

Tabella 5.7: Dati inseriti per il calcolo del preventivo RCA

Il contraente è proprietario del veicolo	Sì
Il contraente beneficia di convenzioni ¹⁰	No
Il contraente ha una classe di merito ¹¹	No
Anno di nascita	1994
Cittadinanza	Italiana
Stato civile	Single
Titolo di studio	Laurea
Professione	Studente
Età conseguimento patente B	Tra i 18 e 20 anni
Località di residenza	Cuneo (CN)
Mese e anno di immatricolazione	Maggio 2020
Anno di acquisto	2020
Valore veicolo	Valore commerciale
Antifurto	Non satellitare

¹⁰ alcuni soggetti, come ad esempio il personale ATAC, dell'amministrazione penitenziaria o dell'aeronautica militare, sono soggetti ha convenzioni

¹¹ indica il livello di "sinistrosità" dell'assicurato

Uso abituale	Tragitto casa lavoro - Tempo libero
Km annui	10.000 - 20.000
Ricovero notturno	Box privato
Classe CU di assegnazione ¹²	14
Numero sinistri	0
Numero di anni assicurati	0

I preventivi sono stati calcolati sul sito di Zurich-connect.[63]

7. **BOLLO:** Come già anticipato nel capitolo 2, la regione Piemonte prevede l'esonero "a vita" dalla tassa automobilistica per i veicoli a trazione elettrica, limitata ai primi 5 anni di vita del veicolo per gli ibridi plug-in. Per quanto riguarda i veicoli a benzina invece, come previsto da disposizioni regionali, la tassa deve essere corrisposta in base alla potenza del veicolo (96 kW) e in base alla classe euro (6.d) a cui corrisponde la tariffa di 2,58 €/kW. [64]
8. **PARCHEGGIO BLU:** In molte zone d'Italia, tra cui il Piemonte, l'utilizzo di un veicolo a trazione elettrica totale o parziale comporta l'esonero del pagamento del parcheggio su strisce blu. Basandosi su dati derivanti dalla letteratura [29], è stato ipotizzato un risparmio pari a 100 €/anno.
9. **ACCESSO ZTL:** Come per i parcheggi su strisce blu, l'utilizzo di un veicolo a trazione elettrica totale o parziale comporta l'esonero del pagamento della tariffa di accesso alle zone ZTL. In questo caso, basandosi sia sui dati derivanti dalla letteratura che sulle tariffe medie applicate sul territorio torinese dall'azienda GTT, è stato considerato un risparmio pari a 66 €/anno.[65]

5.2 Analisi comparativa degli incentivi

Considerando un orizzonte temporale di 10 anni, in linea con la vita media di un veicolo in Italia, un chilometraggio medio annuale pari a 11.626 km e l'assenza di sostituzione della batteria nel periodo considerato, in linea con la durata della batteria dai dati presenti in letteratura, sono stati elaborati, come anticipato precedentemente, gli scenari presentati di seguito.

Partendo dall'anno zero, in cui si tiene conto solo dei costi fissi iniziali, successivamente vengono sommati i costi derivanti dall'utilizzo del veicolo anno per anno.

¹² Classe CU di assegnazione (Bonus Malus): Se ti stai assicurando per la prima volta, la tua classe sarà la 14, altrimenti è pari alla classe di merito

5.2.1 Incentivi nulli

In questo scenario è stato ipotizzato che la variabile “incentivo d’acquisto” fosse nulla. L’assenza dell’incentivo d’acquisto a favore di un veicolo a trazione elettrica pura plug-in fa sì che il punto di pareggio del confronto del modello elettrico puro rispetto al modello equivalente a benzina sia raggiunto entro la fine del sesto anno di utilizzo, mentre rispetto ad un modello ibrido già entro il secondo anno. Questo comporta un risparmio rispettivamente di circa 5.200 € e 6.500 € nell’arco di 10 anni.

Al contrario, l’assenza dell’incentivo d’acquisto a favore di un veicolo ibrido fa sì che il punto di pareggio rispetto ad un veicolo equivalente a benzina non sia mai raggiunto nell’intervallo di tempo preso in analisi. Ne risulta un risparmio pari a 1.300 € nell’ utilizzo del veicolo a benzina, nell’arco di 10 anni.

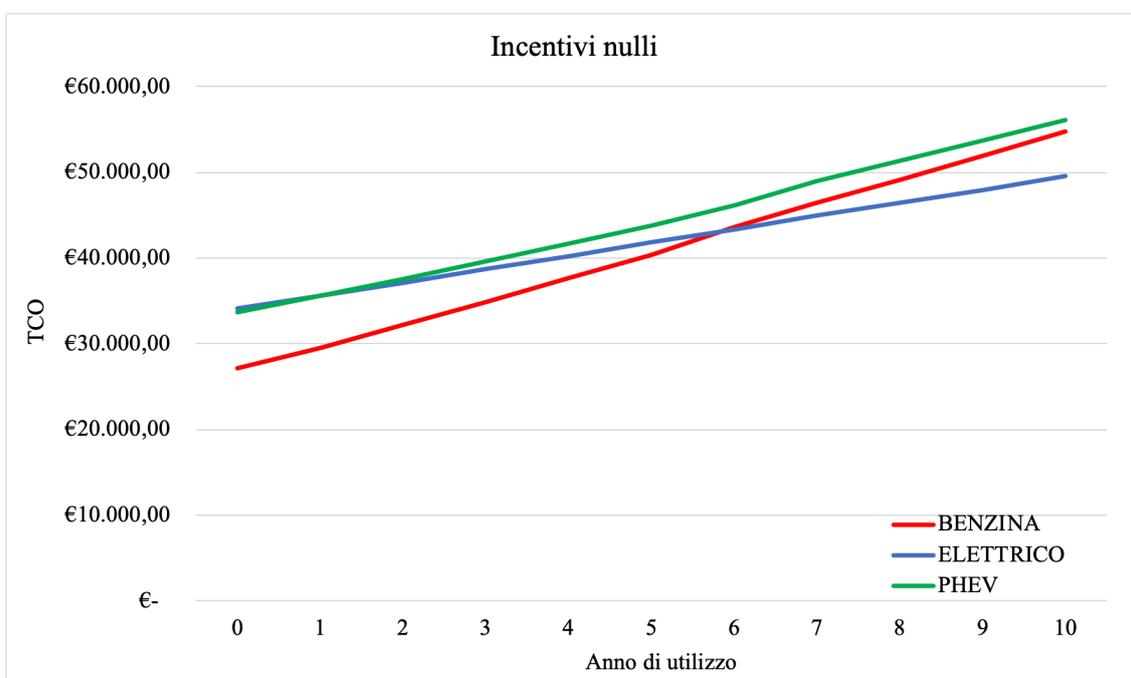


Figura 5.4: Grafico TCO scenario "Incentivi nulli"

5.2.2 Incentivi bassi

In questo scenario è stato ipotizzato che la variabile “incentivo acquisto” fosse pari a 4.000 € per il veicolo elettrico puro e 1.500 € per il veicolo ibrido. La presenza di tale incentivo fa sì che il punto di pareggio del confronto del modello elettrico puro venga raggiunto prima rispetto allo scenario in cui non vengano erogati incentivi: entro la fine del terzo anno di utilizzo per il modello a benzina e già al momento dell’acquisto per il modello ibrido.

Questo comporta un risparmio di circa 9.200 € e 9.100 € nell’arco di 10 anni.

Allo stesso modo si può osservare il raggiungimento del punto di pareggio alla fine del 10 anno di utilizzo nel confronto tra i modelli a benzina e ibrido, con un risparmio di circa 150 €.

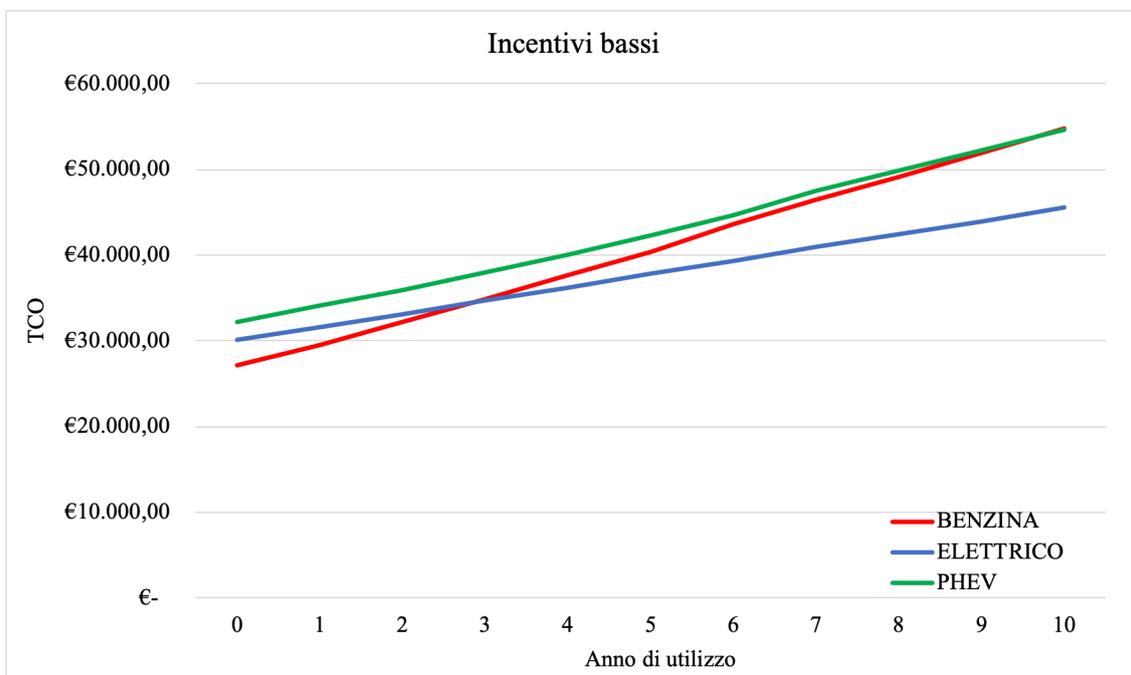


Figura 5.5: Grafico TCO scenario "Incentivi bassi"

5.2.3 Incentivi alti

In questo scenario è stato ipotizzato che la variabile “incentivo acquisto” fosse pari a 6000 € per il veicolo elettrico puro e 2.500 € per il veicolo ibrido. La presenza di tale incentivo fa sì che, come ci si poteva aspettare, il punto di pareggio venga raggiunto prima rispetto agli scenari considerati in precedenza: entro la fine del secondo anno di utilizzo nel confronto elettrico e benzina, con un risparmio di circa 11.200 €, e entro la fine del 7 anno del confronto tra ibrido e benzina, con un risparmio di circa 1.100 € nell’arco dei 10 anni. Aumenta invece la forbice tra ibrido e elettrico, generando un risparmio di circa 10.100 € in 10 anni di utilizzo.

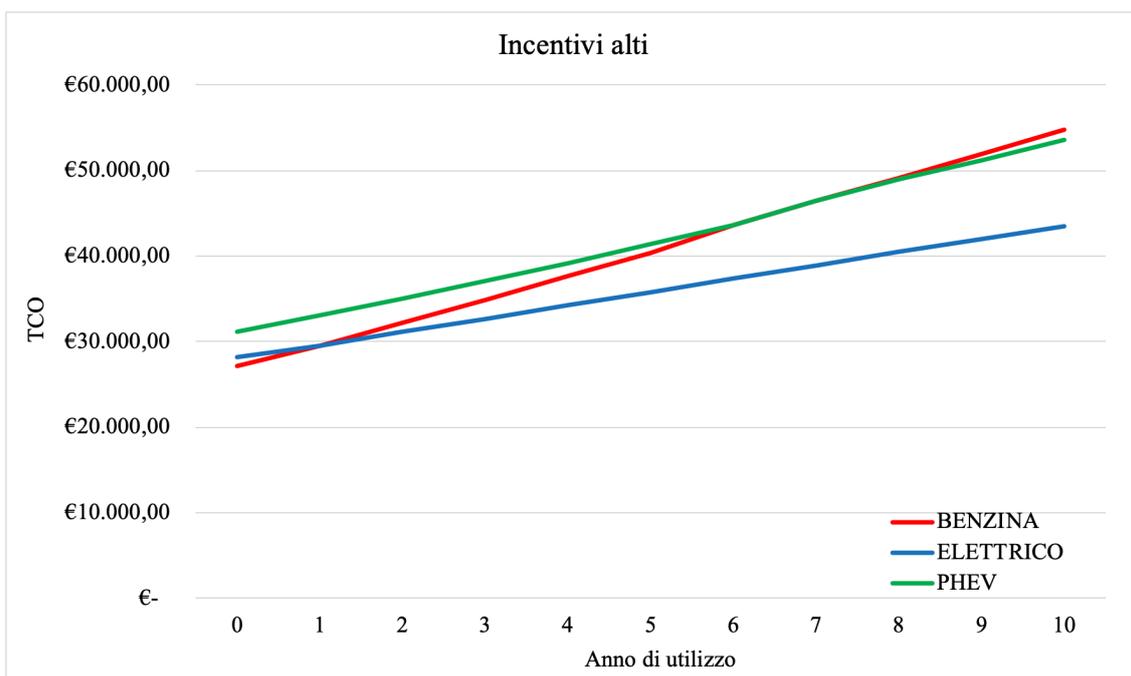


Figura 5.6: Grafico TCO scenario "Incentivi alti"

Per svolgere l'analisi è stata scelta come variabile di confronto "incentivi acquisto" in quanto considerata come quella più influente sui risultati finali.

Dal punto di vista dei consumatori il prezzo iniziale è forse la più importante barriera d'acquisto. La mitigazione attraverso degli incentivi permette di non escludere a priori i modelli a trazione elettrica, sempre più costosi rispetto all'equivalente a benzina.

Come si evince dall'analisi, maggiori sono gli incentivi erogati, minore è il tempo necessario perché si raggiunga il punto di pareggio e quindi maggiore è il risparmio derivante dall'utilizzo di una vettura a trazione elettrica nel tempo. Risulta quindi fondamentale il ruolo dello Stato o enti regionali nel mantenere o incrementare gli incentivi al fine di promuovere la trazione elettrica come alternativa ai motori a combustione.

L'analisi inoltre evidenzia un minor costo di mantenimento del modello elettrico puro rispetto al modello ibrido e a benzina, ostacolati da un elevato costo del carburante e di manutenzione.

Al di là dell'ammontare degli incentivi, ciò che si osserva è che minore è la differenza di prezzo iniziale tra i tre modelli, più velocemente si raggiungerà il punto di pareggio. D'altro canto, come affermato da Gorlier di FCA, "gli incentivi/disincentivi non sono il sistema adatto alla diffusione, in quanto tendono a creare una bolla iniziale" [22].

Tuttavia in questo periodo di transizione è ancora necessario il supporto da parte dello Stato, così com'è altrettanto importante raggiungere una maturità tecnologica tale da poter effettuare economie di scala al pari di quelle sfruttate nella produzione dei veicoli tradizionali in modo da poter riuscire a diminuire questo gap iniziale. Un ruolo principale sarà quindi ricoperto dai produttori di batterie, ad oggi il componente più costoso di un veicolo a trazione elettrica.

CAPITOLO 6: Analisi multicriteri per la diffusione delle infrastrutture di ricarica

Un aspetto fondamentale per la diffusione della tecnologia elettrica è un'adeguata pianificazione per la realizzazione dell'infrastruttura di ricarica.

Per spiegare meglio il concetto si fa riferimento alla pubblicità rilasciata a Gennaio 2020 dalla Smart per promuovere la nuova Smart elettrica: nella clip sono presenti due ragazzi derisi perché rimasti fermi in mezzo al nulla in un ambiente montano alla ricerca di una stazione di ricarica. [66] (<https://www.youtube.com/watch?v=NXjgcqxHb1U>)

Lo spot mette in evidenza i due principali problemi relativi all'utilizzo di un veicolo elettrico:

1. Il limite tecnologico delle batterie che si riflette sull'autonomia
2. La mancanza di una capillare rete di ricarica

Per questi motivi i due ragazzi di trovano in un luogo presumibilmente lontano dal luogo di partenza, alla ricerca di una stazione di ricarica in un luogo dove probabilmente la rete infrastrutturale è inesistente. Tali limitazioni sono ancora considerate accettabili in un momento di transazione tecnologica come quello attuale, ma si rivelerebbero un freno per la diffusione futura. Così come il progresso tecnologico, anche la creazione di una rete di ricarica capillare richiede investimenti in termini di tempo e denaro. In questa direzione si è ritenuto opportuno predisporre un protocollo di analisi con cui individuare le zone in cui effettuare gli interventi: gli investimenti disponibili non possono essere distribuiti in tutte le aree allo stesso modo poiché tale distribuzione dipende dall'intensità dei problemi rilevati.

Un valido supporto per la scelta delle aree è fornito dall'analisi multicriteri.

L'elaborato intende fornire un prototipo di analisi, eventualmente da approfondire successivamente.

6.1 Analisi multicriteri

L'analisi multicriteri (Multiple Criteria Decision Analysis, MCDA) è una metodologia orientata a supportare il decisore nel caso in cui si trovi a operare in un contesto caratterizzato da una molteplicità di criteri. La MCDA sfrutta tecniche che permettono di analizzare e confrontare nel loro insieme diverse alternative rispetto a diversi criteri valutativi. L'analisi tuttavia non fornisce soluzioni ottime, ma ha lo scopo di fornire un ordinamento complessivo delle alternative in modo da migliorare la qualità delle decisioni effettuando scelte più ponderate ed efficaci, definite come "scelte giustificate". Esistono diversi modelli decisionali, ognuno caratterizzato da determinate peculiarità che lo rendono più o meno adatto al contesto

di applicazione. Non esiste infatti un modello inequivocabilmente migliore rispetto ad altri o esaustivo nel valutare tutti gli aspetti di un problema decisionale.

Tuttavia, tutti i modelli decisionali sono definiti dai seguenti elementi:

- Obiettivo: rappresenta lo scopo dell'analisi
- Decisore/gruppo di decisori: sono i soggetti coinvolti nel processo di scelta, coloro che esprimono una valutazione sulle diverse alternative
- Criteri: sono gli strumenti utilizzati dai decisori per valutare le diverse alternative
- Pesi: esprimono l'importanza relativa di un criterio rispetto ad un altro
- Alternative: rappresentano l'oggetto della valutazione e della scelta
- Punteggi: sono gli elementi costituenti della matrice di decisione ed esprimono il valore dell'alternativa i -esima rispetto al criterio j -esimo

Per questo elaborato, sulla base delle caratteristiche dello studio da condurre, è stato selezionato il metodo multicriteri Electre II: fa parte della famiglia di metodi decisionali Electre (Elimination et Choix Traduisant la Réalité), formulati da Bernard Roy a partire dalla seconda metà degli anni 60 e offre un supporto alle decisioni basandosi sul concetto di "surclassamento".

Il metodo è stato ritenuto il più adatto al contesto di applicazione dell'analisi per 3 motivi:

1. Il problema in oggetto è composto da un numero limitato criteri ma numerose alternative, a cui si prestano bene i metodi Electre
2. Il metodo utilizza "veri-criteri" "quelli, cioè, in cui qualunque scarto di valutazione indica una preferenza in senso stretto" [67]
3. Il metodo permette di ottenere un ordinamento parziale o completo delle alternative

Prima di procedere all'applicazione del metodo decisionale è necessario definirne gli elementi costituenti.

6.1.1 Alternative

Nel modello in oggetto le diverse alternative sono state identificate nelle 47 zone di trasporto in cui è stato suddiviso il territorio piemontese [3], mostrate in figura 6.1. Le aree grigie corrispondono ai 21 ambiti urbani, in cui si concentrano i tre quarti della popolazione e dei flussi di mobilità della regione.

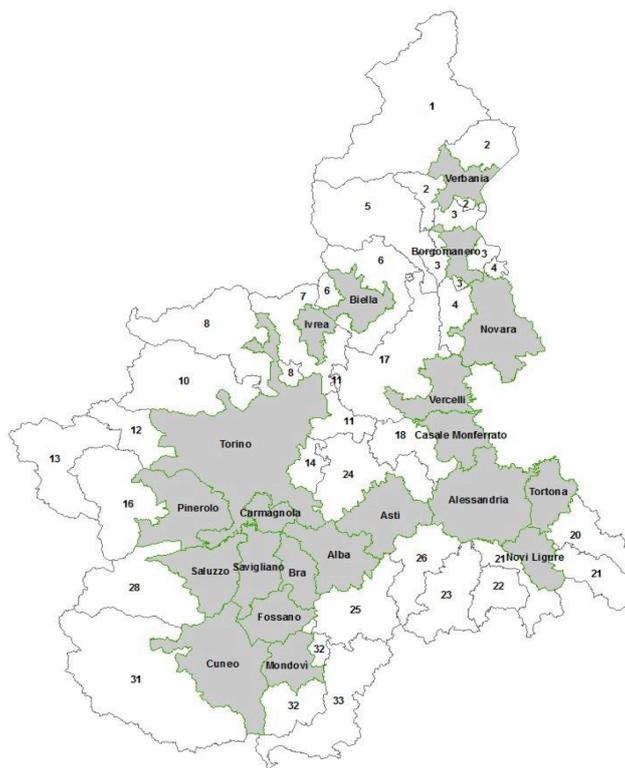


Figura 6.1: Cartina delle 47 zone di trasporto del Piemonte

La decisione di concentrare l'analisi sulle zone di trasporto nasce dall'esigenza di suddividere il territorio piemontese in aree abbastanza dettagliate da ottenere un adeguato grado di discriminazione nel confronto, ma in maniera non eccessiva per non appesantirne troppo lo studio. Si tratta quindi di una via intermedia tra l'analisi sulle aree del Piemonte a cui si è fatto riferimento nei capitoli precedenti, considerate troppo estese, e i comuni.

L'insieme delle alternative viene indentificato nei paragrafi successivi con A.

6.1.2 Criteri

I criteri riflettono i diversi punti di vista sotto i quali si confrontano le alternative. I criteri presi in considerazione in questo elaborato derivano dalle considerazioni fatte nei capitoli precedenti e sono stati pensati tenendo presente dei numerosi aspetti che caratterizzano il settore dei trasporti privato, anche in relazione a ciò che lo circonda, al fine di individuare le aree in cui lo sfruttamento eccessivo di tale mobilità a carburanti inquinanti ha conseguenze negative sull'intera società. Sono quindi stati selezionati 3 criteri principali, a loro volta suddivisi in attributi e sub attributi, allo scopo di individuare, tra le diverse zone del territorio piemontese, quelle in cui una mobilità a basse emissioni potrebbe portare a maggiori benefici ai fini del raggiungimento degli obiettivi al 2030.

Per miglior chiarezza viene presentato uno schema riassuntivo.

Tabella 6.1: Criteri di valutazione utilizzati nel modello

Criterio	Attributo	Sub-attributo
Ambientale	Quota PM10 (C1)	
	CO ₂ (C2)	
Sociale	Classe età 46-55 (C3)	
Trasporti	Flussi	Autocontenimento lavoro (C4)
		Autocontenimento scuola (C5)
		Autocontenimento sanità (C6)
		Spostamenti urbani (C7)
		Chilometri anno (C8)
	Parco veicoli	Numero auto Euro 0-3(C9)
		Quota uso auto (C10)
		Movicentro (C11)

6.1.2.1 Criterio ambientale

Come già sottolineato nei capitoli precedenti, il problema principale legato al settore dei trasporti è l'inquinamento derivante dall'uso massivo del petrolio. La mobilità a trazione elettrica ben si presta a contribuire all'abbattimento dei livelli di inquinamento atmosferico (se si tiene conto solo delle emissioni dovute all'utilizzo del veicolo) che oltre ad avere conseguenze sull'ambiente, ha effetti negativi anche sulla salute umana. E' quindi un aspetto importante da tenere in considerazione al fine di selezionare le zone in cui la situazione è più critica.

Una zona viene caratterizzata in base a 2 attributi:

- Quota PM10: percentuale di PM10 dovuta al trasporto su strada
- Quota CO₂: emissioni di CO₂ prodotte dal parco veicolare in base ai dati delle revisioni e del database del Ministero delle infrastrutture e dei trasporti

Ai fini dell'individuazione della zona in cui incentivare la diffusione dell'elettrico, sono preferibili le zone in cui questo valore è maggiore.

6.1.2.2 Criterio sociale

L'inquadramento demografico e socio-economico del territorio è un altro importante fattore da tenere in considerazione. In riferimento a quanto riportato nel capitolo 2, il profilo del consumatore tipo identifica la popolazione appartenete alla fascia di età compresa tra i 46 e i 55 anni come la più propensa ad utilizzare un veicolo elettrico.

È necessario quindi prendere in esame questo aspetto identificando la percentuale di popolazione che rientra in questa fascia, preferendo le zone in cui il valore è maggiore.

6.1.2.3 Criterio del trasporto

Questo criterio mira a racchiudere un quadro completo del settore dei trasporti privato. Viene suddiviso in 2 attributi:

1. Flussi: è ulteriormente suddiviso in sub-attributi che descrivono la mobilità privata all'interno della zona di interesse
 - a. Autocontenimento lavoro/studio/sanità: l'autocontenimento è definito come "quota di flussi generati dall'area che rimane al suo interno". Più è alto questo valore, maggiore è la quota dei flussi che rimane all'interno della zona: ciò significa che nel caso in cui si sviluppasse delle infrastrutture atte alla diffusione della mobilità elettrica, sarebbe più facile che la diffusione stessa ne incentivi l'uso.
 - b. Spostamenti urbani: gli spostamenti urbani sono numerosi ma brevi, quindi compatibili con l'uso dei veicoli elettrici
 - c. Km medi all'anno: un elevato chilometraggio annuale porta a elevati livelli di inquinamento se non percorsi con veicoli a basse emissioni
2. Parco veicoli: come per l'attributo relativo ai flussi, è ulteriormente suddiviso in sub-attributi che descrivono le caratteristiche del parco auto utili all'analisi
 - a. Numero auto euro 0-3: le auto appartenenti a queste classi euro sono quelle che hanno emissioni maggiori, non a caso sono quelle che ricevono incentivi maggiori se vengono rottamate in caso di acquisto di auto a basse emissioni
 - b. Quota uso dell'auto: il modo più efficace per diminuire i livelli di inquinamento è ridurre la quota di uso dell'auto. Sono infatti numerose le politiche finalizzate all'uso della mobilità alternativa: deve però esserci un buon livello di servizio di queste ultime. In caso contrario l'utilizzatore tenderà a continuare ad usare il mezzo privato: quindi sarà fondamentale che questo sia a basso impatto ambientale.
 - c. Movicentri: al fine di promuovere forme di trasporto più sostenibili la regione Piemonte ha realizzato dei poli di interscambio in corrispondenza dei noti più significativi delle reti di trasporto pubblico e privato. Tali luoghi risulterebbero quindi perfetti per l'installazione di colonnine di ricarica.

6.1.3 Pesì

È necessario definire i pesi dei criteri w_j al fine di tenere in considerazione dell'importanza relativa che il decisore attribuisce a ciascuno di esso. I valori che ogni peso assume può essere determinante per la decisione finale, in quanto le valutazioni delle alternative saranno più o meno amplificate rispetto ai criteri e alla loro importanza relativa.

Ciascun peso è espresso in termini percentuali, di conseguenza:

$$\sum_{j=1}^{11} w_j = 1$$

Al fine di rispecchiare un adeguato grado di affidabilità e coerenza delle reali volontà del decisore, è necessario l'utilizzo di uno strumento analitico che lo supporti nell'individuazione di tali valori numerici. Si è pertanto deciso di adottare il metodo dell'autovalore formulato da Saaty [68]. Tale metodo consente di calcolare i pesi a partire da una matrice detta "matrice dei confronti binari" i cui elementi a_{ij} esprimono il valore del confronto tra il criterio i e il criterio j . Tale valore viene scelto con l'ausilio della scala di Saaty presentata in tabella 6.2.

Tabella 6.2: Scala lineare di Saaty per la misurazione dell'importanza relativa tra i criteri

Intensità di dominanza a_{ij}	Descrizione
1	Indifferenza
3	Moderata preferenza
5	Forte preferenza
7	Preferenza molto forte
9	Estrema preferenza
2,4,6,8	Giudizi di preferenza intermedi
Reciproci	Per misurare il grado di dominanza di C_i su C_j

Fonte 28: *The analytic hierarchy process, 1980* [68]

La scala di Saaty permette quindi di convertire un giudizio espresso a parole in valori numerici. Nell'eseguire l'analisi riportata nell'elaborato ci si è immedesimati nel ruolo di decisore al fine di generare dei giudizi appropriati possibili. Tuttavia, un'analisi più approfondita potrebbe includere diversi soggetti esperti del settore che, attraverso un confronto preliminare, potrebbero generare dei giudizi più accurati. In questo scritto, ad

esempio, si è assunto che il decisore ritenga un valore di inquinamento elevato (C2) estremamente più importante rispetto alla presenza di un'elevata quota di popolazione nella classe di età compresa tra i 46 e 55 anni (C3). Di conseguenza è stata fissato $a_{2,3} = 9$. Invece, i criteri C4 e C5, relativi all'autocontenimento lavoro e scuola, sono stati considerati indifferenti tra loro, in quanto imputabili a due categorie di soggetti diversi. O ancora il criterio relativo all'uso dell'auto (C10) è giudicato piuttosto importante rispetto agli altri criteri. In conseguenza alle diverse considerazioni è stata elaborata la matrice dei confronti binari M riportata di seguito.

$$M = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} & 8 & 4 & 5 & 5 & 3 & 5 & 6 & 2 & 2 \\ 2 & 1 & 9 & 5 & 6 & 6 & 4 & 6 & 7 & 3 & 3 \\ \frac{1}{8} & \frac{1}{9} & 1 & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & \frac{1}{6} & \frac{1}{4} & \frac{1}{3} & \frac{1}{7} & \frac{1}{7} \\ \frac{1}{4} & \frac{1}{5} & 5 & 1 & 1 & 2 & \frac{1}{2} & 2 & 3 & \frac{1}{3} & \frac{1}{4} \\ \frac{1}{4} & \frac{1}{6} & 5 & 1 & 1 & 2 & \frac{1}{2} & 2 & 3 & \frac{1}{3} & \frac{1}{4} \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{6} & 3 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & \frac{1}{6} & \frac{1}{4} \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{4} & 6 & 2 & 2 & 3 & 1 & 3 & 4 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{6} & 4 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 3 & \frac{1}{3} & 1 & 2 & \frac{1}{4} & \frac{1}{4} \\ \frac{1}{6} & \frac{1}{7} & 3 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 2 & \frac{1}{4} & \frac{1}{2} & 1 & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{3} & 7 & 3 & 3 & 6 & 2 & 4 & 5 & 1 & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{3} & 7 & 4 & 4 & 4 & 2 & 4 & 5 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

La matrice è il risultato di 55 confronti binari, tenendo conto che è simmetrica rispetto alla diagonale ($a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$ e $a_{ii} = a_{jj} = 1$). Applicando il metodo di Saaty alla matrice si ottiene l'autovettore W i cui elementi corrispondono ai valori dei pesi dei rispettivi criteri:

$$W^T = [w_1; w_2; w_3; w_4; w_5; w_6; w_7; w_8; w_9; w_{10}; w_{11}] = [0,186; 0,261; 0,014; 0,052; 0,051; 0,027; 0,081; 0,039; 0,028; 0,121; 0,141]$$

In generale il criterio ambientale con C₂ (emissioni di CO₂) al primo posto con un valore pari a $w_2=0,261$, seguito a ruota da C₁ (quota di PM10) con $w_1=0,186$, risulta essere il criterio più importante. Meno importante ai fini della scelta risulta essere C₃ (classe di età 46-55).

Tabella 6.3: Classificazione dei criteri in base al peso calcolato con il metodo di Saaty

Posizione classifica	Criterio	Peso
1°	C2	0,261
2°	C1	0,186
3°	C11	0,141
4°	C10	0,121
5°	C7	0,081
6°	C4	0,052
7°	C5	0,051
8°	C8	0,039
9°	C9	0,028
10°	C6	0,027
11°	C3	0,014

Data la significativa influenza dei pesi dei criteri sulla decisione finale, è estremamente importante verificare che i giudizi espressi dal decisore siano adeguatamente coerenti/consistenti: in caso contrario sarà necessario rivedere i confronti. La misura di consistenza viene effettuata mediante il rapporto di consistenza RC:

$$RC = \frac{IC}{ICR} \quad [6.1]$$

Saaty stabilisce che i confronti binari possono definirsi coerenti se:

- $RC < 5\%$ per $n = 3$
- $RC < 9\%$ per $n = 4$
- $RC < 10\%$ per $n > 4$

Innanzitutto, è necessario calcolare l'indice di consistenza IC:

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} = \frac{11,5917 - 11}{10} = 0,05917 \quad [6.2]$$

Dove λ_{max} corrisponde all'autovalore massimo della matrice dei confronti M e n corrisponde alle grandezze messe a confronto, cioè il numero di criteri.

Si definisce poi l'indice di consistenza random ICR, il cui valore dipende da n in accordo con la tabella proposta da Saaty:

Tabella 6.4: Valore di ICR in funzione di n variabili prese in esame

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ICR	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,52

Fonte 29: *The analytic hierarchy process, 1980 [68]*

In riferimento all'equazione 6.1, $RC = 3,89\%$ che, essendo inferiore al 10%, indica un buon grado di coerenza dei giudizi espressi dal decisore.

Tuttavia è necessario evidenziare che i giudizi dei decisori, di conseguenza i valori dei pesi, sono strettamente legati al periodo storico in cui viene effettuata l'analisi: a livello economico, sociale o normativo il punto di vista dei decisori potrebbe variare in relazione al periodo di riferimento. Una diversa prioritizzazione dei criteri potrebbe attenuare o modificare la scala dei pesi, cosa che potrebbe far giungere a conclusioni differenti.

6.1.4 Punteggi

La matrice di decisione, i cui elementi esprimono i "punteggi" attribuiti all'alternativa i rispetto al criterio j , derivano da un database fornito da IRES Piemonte e da alcuni dati elaborati nei capitoli precedenti. Per ogni alternativa sono stati individuati i valori assunti in relazione ai criteri esaminati, da cui è stata ricavata la matrice riportata nell'allegato 2 (Tabella N).

Una volta definiti tutti gli elementi, si può passare all'applicazione del metodo multicriteri.

6.2 Applicazione del metodo multicriteri Electre II

6.2.1 Fase 1

Come già visto nei paragrafi precedenti, il metodo ELECTRE II si basa sul concetto di surclassamento. La modellizzazione del surclassamento avviene nella prima delle due fasi in cui è strutturato il metodo: per ogni coppia di alternative a surclassa a' ($a S a'$) quando sono soddisfatti sia i test di concordanza che di non discordanza.

Il test di concordanza misura il grado di concordanza dei diversi criteri. Per effettuare il test è necessario confrontare a coppie tutte le alternative, criterio per criterio. In particolare, in questa analisi, maggiore è il valore, "migliore" è l'alternativa.

Si ottengono quindi dei sottogruppi di criteri:

- J_+ è l'insieme dei criteri in accordo con l'affermazione a è migliore di a'

$$J_+(a, a') = \{j \in J: g_j(a) > g_j(a')\}$$

- J_+ è l'insieme dei criteri in accordo con l'affermazione a_i è uguale di a_j

$$J_=(a, a') = \{j \in J: g_j(a) = g_j(a')\}$$

- J_+ è l'insieme dei criteri in accordo con l'affermazione a_i è peggiore di a_j

$$J_-(a, a') = \{j \in J: g_j(a) < g_j(a')\}$$

Noti i pesi w_j associati a ciascun criterio, è possibile calcolare l'importanza relativa di ogni sottogruppo sommando i pesi dei singoli criteri:

- $P^+(a, a') = \sum_{j \in J_+} w_j$
- $P^=(a, a') = \sum_{j \in J_=} w_j$
- $P^-(a, a') = \sum_{j \in J_-} w_j$

Si può quindi procedere con il test di concordanza attraverso la verifica di due condizioni:

1. $c(a, a') = \frac{P^+(a, a') + P^=(a, a')}{P^-(a, a')} \geq c$
2. $\frac{P^+(a, a')}{P^-(a, a')} \geq 1$

Si definisce $c(a, a')$ l'indice di concordanza, mentre $c \in [0,1]$ indica la soglia di concordanza, sopra la quale si verifica la condizione. Solitamente, ed anche in questa analisi, si possono prendere in considerazione le soglie dette naturali:

- $c_f = \frac{3}{4}$ detta soglia forte
- $c_d = \frac{2}{3}$ detta soglia debole

L'analisi primaria si basa sulla soglia forte e, solo nel caso in cui non si riesca ad esprimere una relazione tra due alternative, si utilizza la soglia debole. [67]

Nel caso in cui entrambe le condizioni risultano verificate, si può affermare il surclassamento di un'alternativa rispetto ad un'altra.

Il test di non discordanza invece permette di verificare che, sui criteri appartenenti al sottogruppo J_- , non sia attivo un veto al surclassamento di a rispetto ad a' . Come per il test di concordanza, si procede attraverso la verifica di due condizioni:

1. $g_j(a) < e$
2. $g_j(a) \geq e'$

dove e ed e' indicano i limiti oltre i quali il veto diventa operativo. In questa analisi è stato ritenuto opportuno non inserire nessuna soglia di veto.

Il risultato della Fase 1 è presentato schematizzato sul grafo di surclassamento in figura 6.2.

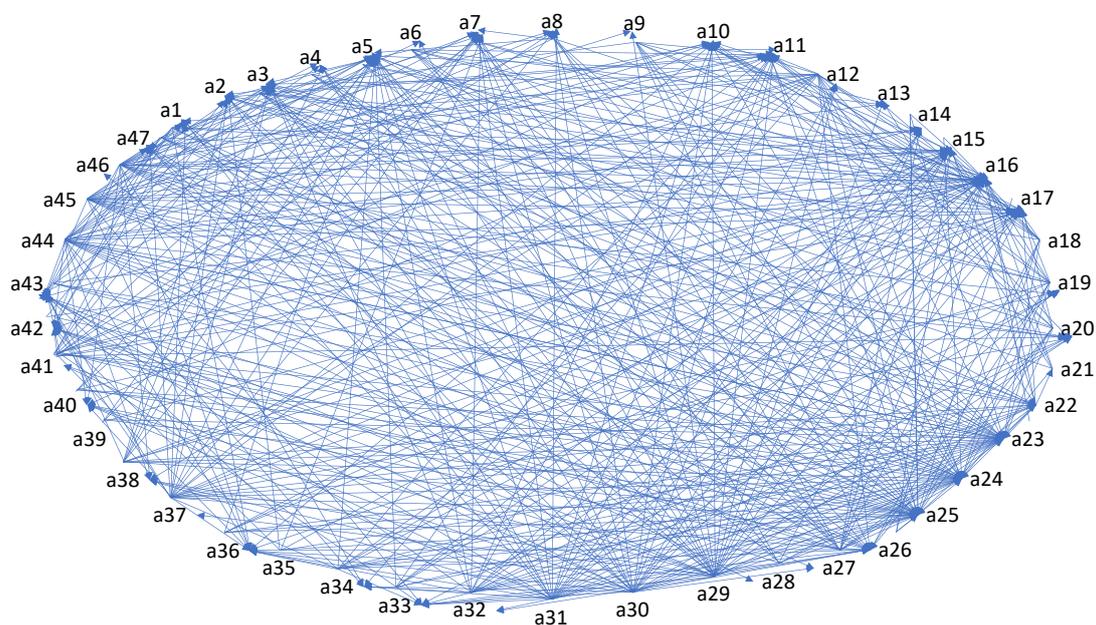


Figura 6.2: Grafo risultato della fase 1

Il grafo tuttavia non risulta di immediata interpretazione data la numerosità degli archi tra le diverse alternative. È stato quindi necessario, per agevolare l'interpretazione dei dati, creare la tabella O riportata nell'allegato 2.

6.2.2 Fase 2

Una volta ottenuto il grafo di surclassamento dalla Fase 1 (figura 6.2), è possibile procedere con la Fase 2 del metodo.

Come prima cosa è necessario verificare che non siano presenti circuiti sul grafo. Un circuito è "una sequenza di archi orientati nello stesso verso il cui nodo iniziale coincide con il nodo finale. La presenza di un circuito può essere un'indicazione della scarsa capacità del modello a distinguere chiaramente le alternative". [67] Come si può notare, sia dalla figura 6.2 che nella tabella O dell'allegato, non sono presenti circuiti sul grafo risultante.

Successivamente il metodo prevede una classificazione dall'alto $P^+(A)$ e una classificazione dal basso $P^-(A)$, finalizzate ad un ordinamento completo delle alternative.

Al termine della procedura di classificazione dall'alto, riportata per esteso nell'allegato 2, si ottiene il seguente risultato:

$$\begin{aligned}
P^+(A) = & \{a_{30}, a_{44}\} > \{a_{28}, a_{29}, a_{31}, a_{35}\} > \{a_{18}, a_{39}, a_{46}\} > \{a_{45}\} > \{a_6, a_{41}\} \\
& > \{a_9, a_{12}, a_{27}\} > \{a_{37}\} > \{a_{14}, a_{32}, a_{40}\} > \{a_1, a_8, a_{34}, a_{38}\} \\
& > \{a_7, a_{20}, a_{22}, a_{47}\} > \{a_{19}, a_{42}\} > \{a_{33}, a_{36}\} > \{a_4, a_{43}\} > \{a_{21}\} \\
& > \{a_5, a_{10}\} > \{a_3\} > \{a_{13}, a_{23}, a_{26}\} > \{a_{11}, a_{15}\} > \{a_2, a_{16}\} > \{a_{17}, a_{24}\} \\
& > \{a_{25}\}
\end{aligned}$$

Analogamente, al termine della procedura di classificazione dal basso, anch'essa riportata nell'allegato 2, si ottiene il seguente risultato:

$$\begin{aligned}
P^-(A) = & \{a_{30}\} > \{a_{29}, a_{31}\} > \{a_{37}, a_{41}\} > \{a_{12}, a_{32}, a_{44}, a_{46}\} > \{a_{27}, a_{34}, a_{45}\} > \{a_{14}\} \\
& > \{a_1, a_6, a_{28}, a_{35}, a_{38}, a_{40}\} > \{a_8, a_{19}, a_{47}\} > \{a_{20}, a_{22}, a_{33}, a_{36}\} \\
& > \{a_4, a_7\} > \{a_{21}\} > \{a_9, a_{39}\} > \{a_{43}\} > \{a_5, a_{18}\} > \{a_3\} > \{a_{23}\} > \{a_{10}\} \\
& > \{a_{26}, a_{42}\} > \{a_{11}, a_{15}\} > \{a_2, a_{16}\} > \{a_{17}, a_{24}\} > \{a_{13}, a_{25}\}
\end{aligned}$$

Poiché i due ordinamenti non coincidono è necessario definire un preordine parziale finale sulla base delle seguenti regole [67]:

- un'azione del preordine finale non può essere posta prima di un'altra se non nel caso in cui essa è prima di quest'ultima in una delle due classificazioni oppure si trova nella stessa classe
- due azioni non possono essere ex æquo nel preordine finale se non nel caso in cui appartengono alla stessa classe in entrambe le classificazioni
- due azioni sono incomparabili nel preordine finale se l'una è prima dell'altra in una classificazione e la segue nell'altra

Si costruisce quindi un grafo di preordine finale in relazione alle classificazioni dall'alto e dal basso e alle regole sopraelencate, in grado di evidenziare le relazioni che intercorrono tra le diverse alternative. Una volta ottenuto il grafo è necessario organizzarlo tracciando verticalmente il cammino più lungo, cioè quello che passa per il maggior numero di alternative, e poi aggiungendo gli altri cammini lateralmente. I cammini laterali si formano nel momento in cui due alternative sono incomparabili. Il risultato finale è rappresentato nel grafo in figura 6.3. Esso evidenzia differenti cammini laterali, indice del fatto che data l'eterogeneità dei criteri utilizzati, le alternative possono risultare incomparabili tra loro.

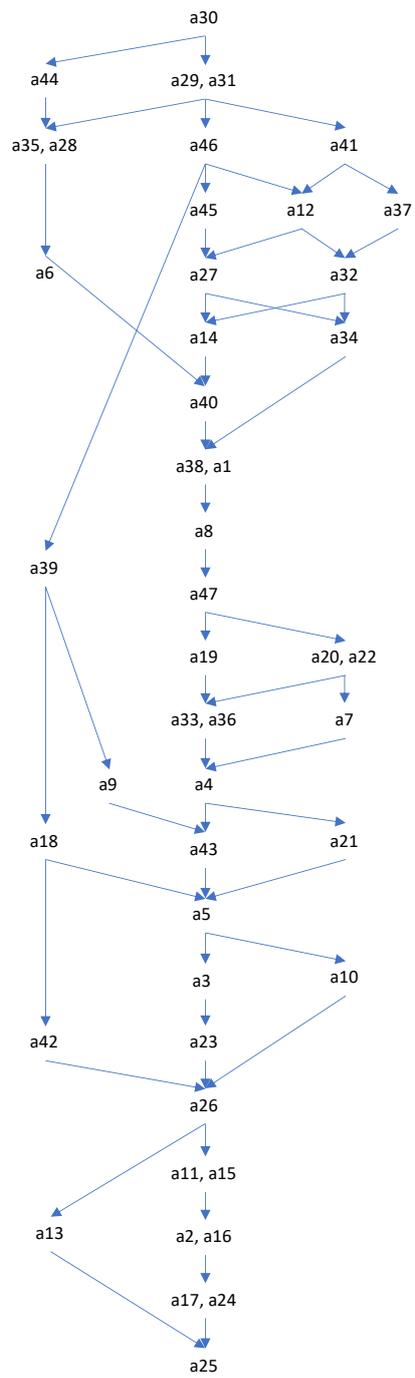


Figura 6.3: Grafo finale Fase 2

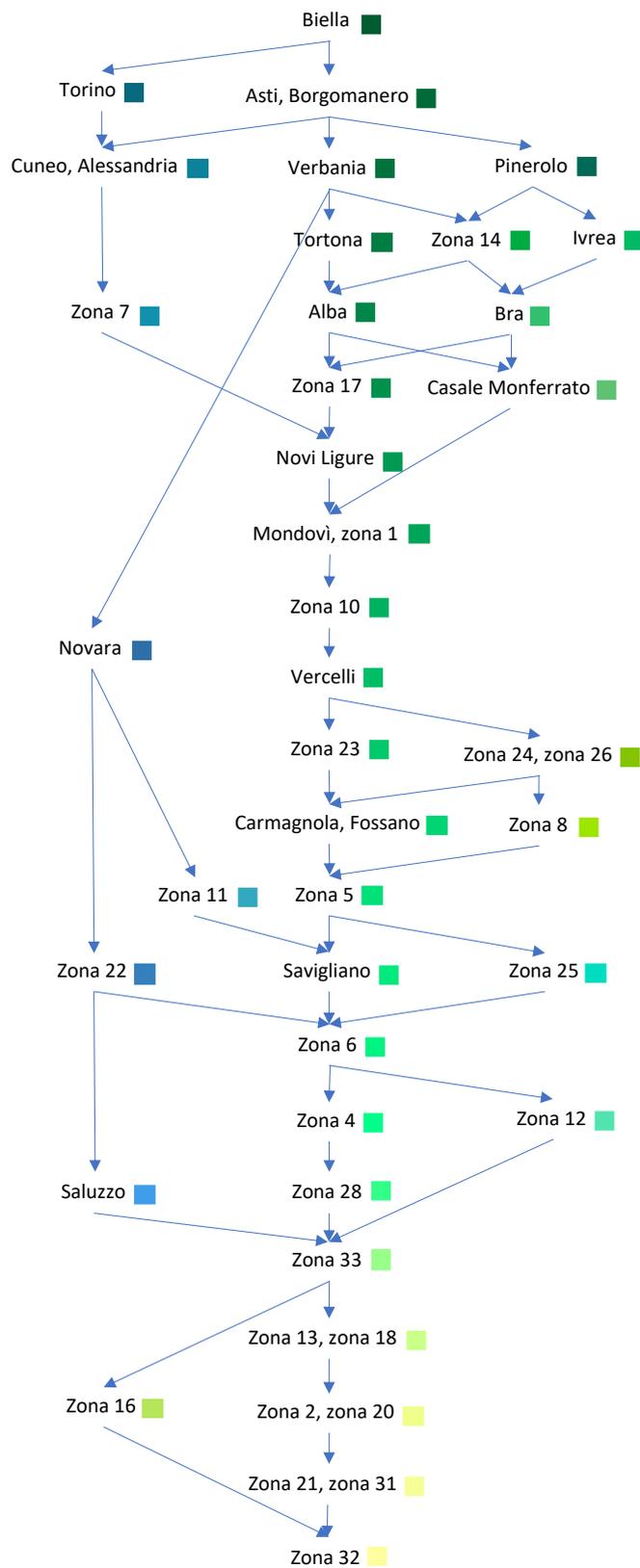


Figura 6.4: Grafo finale Fase 2 con etichette zone di trasporto e riferimento cromatico per cartina geografica

L'ordinamento ottenuto dal grafo è mappato nella figura 6.5 riportata di seguito.

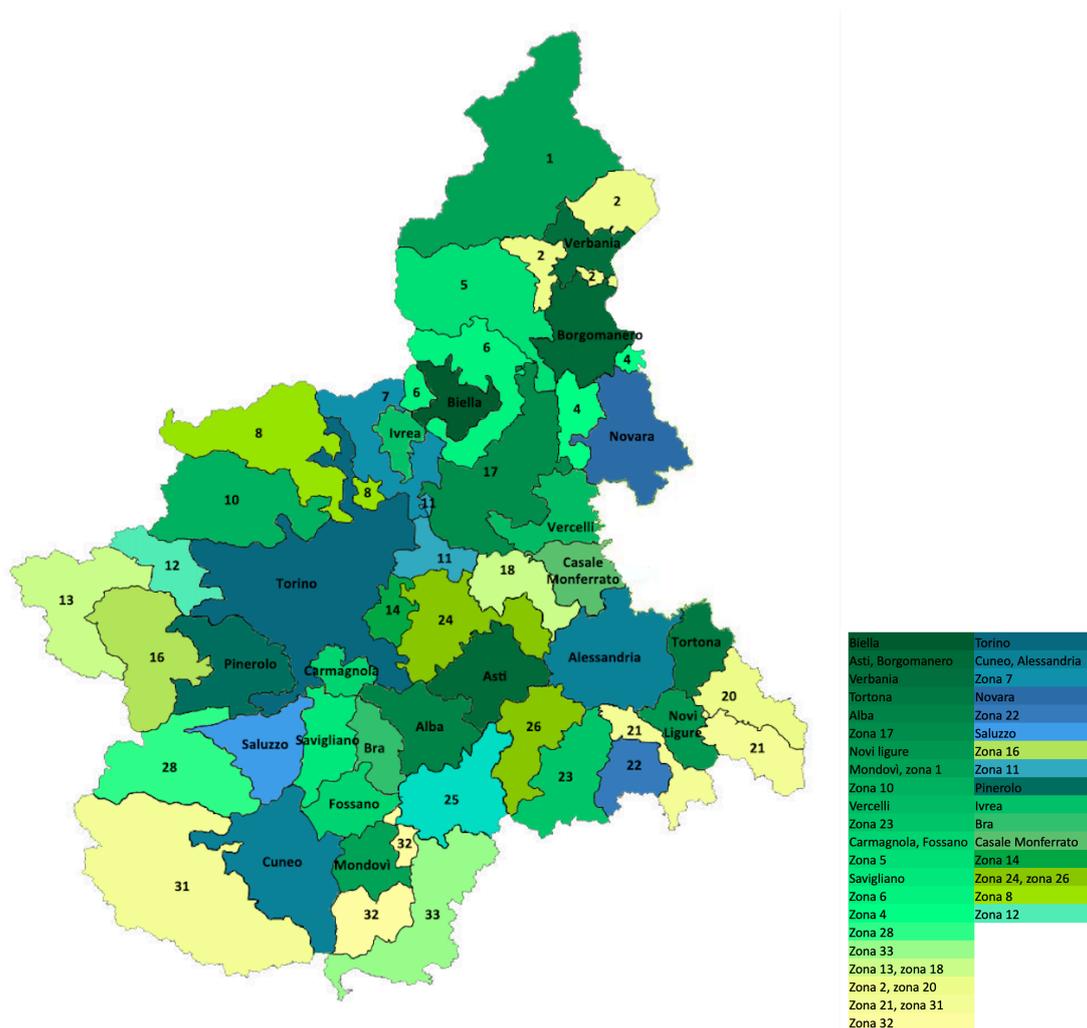


Figura 6.5: Cartina geografica rappresentate i risultati della Fase 2, in scuro le zone con priorità maggiore

La cartina è stata strutturata in modo tale da identificare le zone che occupano le posizioni alte in classifica con colorazioni scure, schiarite man mano che si raggiunge l'ultima posizione. Seguendo questo principio la zona di Biella presenta la colorazione più scura mentre la zona 32 la più chiara. I cammini laterali invece sono stati rappresentati graficamente variando la concentrazione di blu o di rosso rispetto al cammino principale (verde), ma mantenendo il grado di trasparenza.

6.3 Conclusioni sull'analisi

L'analisi multicriteri ha permesso di ottenere, almeno in parte, un ordinamento delle diverse alternative poste come oggetto di valutazione al decisore. Dall'analisi emerge una predisposizione da parte degli ambiti urbani ad ottenere i migliori benefici dalla diffusione di

una mobilità elettrica. La parte alta del grafo infatti è occupata per lo più dalle zone relative agli ambiti urbani, dove si concentrano la maggior parte della popolazione e flussi di mobilità. In particolare l'alternativa 30, corrispondente alla zona di trasporto di Biella (ambito urbano), risulta essere la zona da preferire rispetto alle altre 46. Tale zona è caratterizzata da elevati valori di agenti inquinanti, riducibili attraverso l'uso dell'elettricità come vettore energetico, oltre ad avere il più alto valore di quota di utilizzo di auto a livello regionale. Inoltre è una zona con elevato flusso di autocontenimento nonché di spostamenti urbani, tra i più alti in regione, indice di buona predisposizione all'utilizzo della trazione elettrica per le considerazioni fatte sull'autonomia nei paragrafi e capitoli precedenti. Biella è preferita, seppur di poco, ad altre zone come Torino, Asti e Borgomanero (ambiti urbani) che presentano valori elevati nei criteri ritenuti più importanti. Torino, ad esempio, presenta elevati valori di CO₂ emesse, dovute soprattutto all'ampio parco auto, e i più alti valori di autocontenimento regionali, dovuti alla numerosità dei servizi e punti di interesse presenti nell'area. Inoltre, la centralità dell'area metropolitana rispetto ai flussi regionali la rende un'area adatta a supportare la diffusione di una mobilità più sostenibile.

L'analisi inoltre mostra che le aree che si trovano al fondo del grafo, che corrispondono alle aree che possono usufruire di interventi di elettrificazione anche in tempi successivi, si trovano per lo più nelle zone di confine caratterizzate talvolta da ambienti montani.

Un'analisi più approfondita, invece, potrebbe essere condotta sulle aree periurbane. Si tratta di aree che presentano un certo livello di criticità legato a elevate quote di spostamenti con un basso livello di autocontenimento data la vicinanza con le zone urbane. Questo comporta elevati livelli di flussi legati agli spostamenti che nella maggior parte dei casi non sono sostenuti da un'adeguata rete di trasporti pubblici: tutto ciò si riflette su elevate quote di mobilità con l'utilizzo di auto private.

Conclusioni

Attraverso il presente lavoro di tesi sono state effettuate diverse valutazioni in merito alle stime del parco veicoli piemontese al 2030.

Tra gli obiettivi principali posti in essere dalla Commissione europea figura l'abbattimento delle emissioni per il nuovo parco veicoli, in particolare ad un valore pari a 114 g/km di CO₂ entro fine 2020 e a 71 g/km di CO₂ entro fine 2030. È stato calcolato che se si facesse riferimento al venduto del mercato piemontese tale valore sarebbe pari rispettivamente a 121 e 83 g/km di CO₂, oltre ai limiti previsti, ma in linea con la media nazionale.

Nonostante i veicoli a basse emissioni occupino una quota di mercato sempre maggiore, circa il 9,50% al 2030 contro lo 0,69% del parco attuale, il trend di crescita del parco circolante nel decennio preso in considerazione, ha evidenziato una necessità di intervento attraverso una riduzione del tasso di utilizzo del veicolo privato per contenere le emissioni di CO₂ totali. Poiché questa repentina crescita del parco auto non è legata esclusivamente ai modelli a basse emissioni, la regione risulta in una posizione piuttosto arretrata nel raggiungimento dell'obiettivo della completa decarbonizzazione al 2050.

Dal punto di vista del sistema elettrico, invece, il Piemonte si dimostra ben strutturato per sostenere l'incremento dei consumi di energia dovuti alle ricariche delle batterie presenti sui veicoli. Tuttavia i dati sullo sviluppo dell'infrastruttura di ricarica sono meno incoraggianti, ancora troppo poco presente sul territorio e non sufficiente a sostenere la diffusione dei veicoli plug-in. Per questo motivo è stata condotta un'analisi multicriteri con l'obiettivo di fornire un supporto utile per una pianificazione razionale di tale diffusione nel territorio piemontese che ha mostrato come i centri urbani, Biella in primis, risultino le aree più adatte per la creazione di un'adeguata rete infrastrutturale. L'analisi è stata condotta in una versione "prototipale" e possiede ampi margini di approfondimento: l'intervento di esperti del settore, così come l'analisi più approfondita su determinate aree come ad esempio le periurbane, potrebbero portare a risultati più specifici.

Dall'analisi comparativa sulle emissioni prodotte dei veicoli presi in esame, è stata evidenziata una netta convenienza del veicolo ibrido plug-in sia rispetto ai veicoli tradizionali, sia rispetto ai veicoli elettrici puri. Le elevate emissioni derivanti dalla produzione della batteria pongono i modelli elettrici in una posizione svantaggiosa, per cui il punto di pareggio è raggiunto solo per elevati chilometraggi, oltre ad una serie di altri vincoli di carattere pratico. I veicoli ibridi plug-in, invece, hanno il vantaggio di avere batterie di dimensioni ridotte (50-60 km di autonomia), la cui produzione non incide in maniera elevata sul bilancio emissivo finale come accade per i veicoli elettrici puri, che però permettono di sfruttare il motore elettrico a zero emissioni. Tuttavia lo studio evidenzia l'elevata dipendenza

dei risultati dal mix energetico utilizzato nella produzione del veicolo, della batteria e dei vettori energetici. Un mix derivante in quote maggiori da fonti rinnovabili renderebbe i bilanci emissivi dei veicoli plug-in più contenuti.

Il veicolo ibrido però risulta essere meno conveniente dal punto di vista economico. L'analisi economica infatti ha evidenziato una netta convenienza, più o meno marcata in base agli incentivi erogati, dei modelli elettrici puri in relazione ai bassi costi di mantenimento del veicolo.

In conclusione lo scopo principale dell'adozione dell'elettricità come vettore energetico è quello di ridurre le emissioni e decarbonizzare gradualmente il settore dei trasporti: tali obiettivi però possono essere raggiunti solo attraverso l'utilizzo di veicoli elettrici puri. Tuttavia questo richiede che la fonte di energia primaria sia rinnovabile, quindi a zero emissioni, requisito che attualmente non può essere garantito, oltre a tutti i vincoli in sé che un BEV comporta.

Per questo motivo l'impiego del veicolo ibrido plug-in sembra essere la miglior soluzione disponibile: ha bilanci emissivi inferiori rispetto alle altre alimentazioni, ha una batteria tale da permettere di effettuare spostamenti a zero emissioni e, non meno importante, non ha vincoli sull'autonomia.

L'ibrido plug-in non renderà la società indipendente dal petrolio, ma getterà delle solide basi per la strada verso l'elettrificazione molto diffusa (piccole batterie su tutti o gran parte dei veicoli).

Allegati

Allegato 1

Legenda

Area	Classe cilindrata		Alimentazione
Asti-Alessandria (AA)	1	$X \leq 1000$	BENZINA
	2	$1000 < X \leq 1500$	GPL
Nord-Est (NE)	3	$1500 < X \leq 2000$	METANO
	4	$2000 < X \leq 2500$	HEV BENZINA
	5	$2500 < X \leq 3000$	PHEV BENZINA
	6	$X > 3000$	HEV DIESEL
Cuneo (CN)			PHEV DIESEL
Torino (TO)			DIESEL
			ELETTRICO

Elaborazione dei dati

Dall'analisi del parco auto messo a disposizione dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, sono stati ricavati i seguenti dati:

Tabella A: Ripartizione parco auto in base alla classe di cilindrata, Piemonte, 2017

	1	2	3	4	5	6
AA	6,18%	53,96%	33,86%	3,63%	1,97%	0,40%
NE	8,06%	52,89%	33,18%	3,38%	2,04%	0,45%
CN	5,56%	49,93%	37,95%	4,05%	2,06%	0,45%
TO	5,94%	57,22%	31,73%	3,07%	1,64%	0,40%

Tabella B: Ripartizione parco auto in base a tipo di alimentazione, Piemonte, 2017

	BENZINA	GPL	METANO	HEV B	PHEV B	HEV D	PHEV D	DIESEL	ELETTRICO	TOTALE
AA	5,71%	1,40%	0,30%	0,07%	0,02%	0,00%	0,00%	6,73%	0,00%	14,23%
NE	7,97%	1,95%	0,42%	0,10%	0,03%	0,00%	0,00%	9,40%	0,00%	19,88%
CN	5,49%	1,34%	0,29%	0,07%	0,02%	0,00%	0,00%	6,47%	0,00%	13,69%
TO	20,93%	5,13%	1,09%	0,27%	0,07%	0,00%	0,00%	24,68%	0,01%	52,20%
TOTALE	40,11%	9,82%	2,10%	0,53%	0,14%	0,01%	0,01%	47,28%	0,02%	

Il database fornisce informazioni aggiornate fino alla fine dell'anno 2017, per questo motivo, sfruttando i dati relativi alle immatricolazioni e alle dismissioni dei veicoli forniti dall'ACI [2], sono stati calcolati i valori fino alla fine del 2018. La differenza tra immatricolazioni e dismissioni è stata supposta costante per il periodo in analisi.

Calcolo CO₂

È stato necessario calcolare le emissioni medie del venduto. Partendo dal listino del nuovo a Gennaio 2020 presente sulla rivista quattroruote (valori ciclo WLTP), sono state calcolate le emissioni medie suddivise per tipo di alimentazione e cilindrata:

Tabella C: Emissioni medie CO₂, Piemonte, 2020

2020		BENZINA	GPL	METANO	HEV B	PHEV B	HEV D	PHEV D	DIESEL	ELETTRICO
CO ₂ [g/km]	1	109,43	100,24	92,82	102,00	/	/	/	98,02	0,00
	2	125,89	129,51	101,85	121,00	37,07	119,43	34,93	104,09	0,00
	3	156,78	154,50	117,33	140,13	43,89	130,15	42,25	128,50	0,00
	4	180,85	160,42	136,23	108,68	35,33	103,66	33,80	159,79	0,00
	5	207,33	169,06	154,65	196,82	55,71	159,88	54,08	161,77	0,00
	6	269,67	232,00	187,79	175,86	80,80	204,00	81,12	228,70	0,00

Facendo riferimento all'andamento degli ultimi 20 anni, si è assunto un trend di riduzione pari all'1% annuo (1,2% per quanto riguarda i motori diesel) al fine di tener conto dei progressi tecnologici. Si sono dunque calcolati i valori al 2030:

Tabella D: Emissioni medie CO₂ stimate, Piemonte, 2030

2030		BENZINA	GPL	METANO	HEV B	PHEV B	HEV D	PHEV D	DIESEL	ELETTRICO
CO ₂ [g/km]	1	98,97	90,66	83,94	92,25	/	/	/	87	0,00
	2	113,85	117,13	92,11	109,43	33,53	106,00	31,00	92,25	0,00
	3	141,79	139,73	106,11	126,73	39,69	115,35	37,45	113,89	0,00
	4	163,56	145,08	123,21	98,29	31,95	92,00	30,00	141,62	0,00
	5	187,51	152,90	140,00	178,00	50,38	141,70	48,00	143,37	0,00
	6	243,88	210,00	170,00	159,04	73,07	180,80	72,00	202,69	0,00

Stima parco autovetture in Piemonte

Sfruttando i dati dalle tabelle A e B sono stati eseguiti degli accorpamenti per area del Piemonte, classe di cilindrata e solo successivamente per tipo di alimentazione. La tabella E mostra i risultati ottenuti:

Tabella E: Composizione parco auto suddiviso per aree, Piemonte, 2018

2018		BENZINA	GPL	METANO	HEV B	PHEV B	HEV D	PHEV D	DIESEL	ELETTRICO
AA	1	0,310%	0,082%	0,078%	0,018%	0,000%	0,000%	0,000%	0,386%	0,001%
	2	2,704%	0,717%	0,677%	0,160%	0,046%	0,002%	0,002%	3,371%	0,006%
	3	1,696%	0,450%	0,425%	0,100%	0,026%	0,001%	0,001%	2,115%	0,004%
	4	0,182%	0,048%	0,046%	0,011%	0,003%	0,000%	0,000%	0,227%	0,000%
	5	0,099%	0,026%	0,025%	0,006%	0,002%	0,000%	0,000%	0,123%	0,000%
	6	0,020%	0,005%	0,005%	0,001%	0,000%	0,000%	0,000%	0,025%	0,000%

2018		BENZINA	GPL	METANO	HEV B	PHEV B	HEV D	PHEV D	DIESEL	ELETTRICO
NE	1	0,564%	0,150%	0,141%	0,033%	0,000%	0,000%	0,000%	0,704%	0,001%
	2	3,702%	0,982%	0,927%	0,219%	0,065%	0,003%	0,003%	4,615%	0,009%
	3	2,322%	0,616%	0,581%	0,137%	0,036%	0,002%	0,002%	2,895%	0,006%
	4	0,237%	0,063%	0,059%	0,014%	0,004%	0,000%	0,000%	0,295%	0,001%
	5	0,143%	0,038%	0,036%	0,008%	0,002%	0,000%	0,000%	0,178%	0,000%
	6	0,032%	0,008%	0,008%	0,002%	0,001%	0,000%	0,000%	0,040%	0,000%

2018		BENZINA	GPL	METANO	HEV B	PHEV B	HEV D	PHEV D	DIESEL	ELETTRICO
CN	1	0,268%	0,071%	0,067%	0,016%	0,000%	0,000%	0,000%	0,334%	0,001%
	2	2,407%	0,638%	0,603%	0,142%	0,041%	0,002%	0,002%	3,001%	0,006%
	3	1,830%	0,485%	0,458%	0,108%	0,028%	0,001%	0,001%	2,281%	0,004%
	4	0,195%	0,052%	0,049%	0,012%	0,003%	0,000%	0,000%	0,243%	0,001%
	5	0,100%	0,026%	0,025%	0,006%	0,002%	0,000%	0,000%	0,124%	0,000%
	6	0,022%	0,006%	0,005%	0,001%	0,000%	0,000%	0,000%	0,027%	0,000%

2018		BENZINA	GPL	METANO	HEV B	PHEV B	HEV D	PHEV D	DIESEL	ELETTRICO
TO	1	1,091%	0,289%	0,273%	0,064%	0,000%	0,000%	0,000%	1,360%	0,003%
	2	10,516%	2,789%	2,632%	0,621%	0,178%	0,008%	0,008%	13,111%	0,025%
	3	5,831%	1,546%	1,460%	0,345%	0,089%	0,004%	0,004%	7,270%	0,014%
	4	0,565%	0,150%	0,141%	0,033%	0,009%	0,000%	0,000%	0,704%	0,001%
	5	0,301%	0,080%	0,075%	0,018%	0,005%	0,000%	0,000%	0,376%	0,001%
	6	0,073%	0,019%	0,018%	0,004%	0,001%	0,000%	0,000%	0,091%	0,000%

Le tabelle F e G sono state ricavate dall'elaborazione sia dei dati del venduto descritto in seguito, sia dei dati delle rottamazioni.

Tabella F: Stima composizione parco auto suddiviso per aree, Piemonte, 2020

2020		BENZINA	GPL	METANO	HEV B	PHEV B	HEV D	PHEV D	DIESEL	ELETTRICO
AA	1	0,338%	0,087%	0,031%	0,011%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,003%
	2	2,952%	0,760%	0,268%	0,094%	0,027%	0,004%	0,004%	3,945%	0,025%
	3	1,852%	0,477%	0,168%	0,059%	0,015%	0,003%	0,003%	2,225%	0,015%
	4	0,199%	0,051%	0,018%	0,006%	0,002%	0,000%	0,000%	0,239%	0,002%
	5	0,108%	0,028%	0,010%	0,003%	0,001%	0,000%	0,000%	0,130%	0,001%
	6	0,022%	0,006%	0,002%	0,001%	0,000%	0,000%	0,000%	0,026%	0,000%

2020		BENZINA	GPL	METANO	HEV B	PHEV B	HEV D	PHEV D	DIESEL	ELETTRICO
NE	1	0,616%	0,159%	0,056%	0,020%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,005%
	2	4,043%	1,041%	0,367%	0,129%	0,038%	0,007%	0,007%	5,587%	0,034%
	3	2,536%	0,653%	0,231%	0,081%	0,021%	0,004%	0,004%	3,046%	0,021%
	4	0,258%	0,067%	0,023%	0,008%	0,002%	0,000%	0,000%	0,310%	0,002%
	5	0,156%	0,040%	0,014%	0,005%	0,001%	0,000%	0,000%	0,187%	0,001%
	6	0,035%	0,009%	0,003%	0,001%	0,000%	0,000%	0,000%	0,042%	0,000%

2020		BENZINA	GPL	METANO	HEV B	PHEV B	HEV D	PHEV D	DIESEL	ELETTRICO
CN	1	0,292%	0,075%	0,027%	0,009%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,002%
	2	2,629%	0,677%	0,239%	0,084%	0,024%	0,004%	0,004%	3,502%	0,022%
	3	1,998%	0,515%	0,182%	0,064%	0,016%	0,003%	0,003%	2,400%	0,017%
	4	0,213%	0,055%	0,019%	0,007%	0,002%	0,000%	0,000%	0,256%	0,002%
	5	0,109%	0,028%	0,010%	0,003%	0,001%	0,000%	0,000%	0,130%	0,001%
	6	0,024%	0,006%	0,002%	0,001%	0,000%	0,000%	0,000%	0,028%	0,000%

2020		BENZINA	GPL	METANO	HEV B	PHEV B	HEV D	PHEV D	DIESEL	ELETTRICO
TO	1	1,091%	0,289%	0,273%	0,064%	0,000%	0,001%	0,001%	0,000%	0,003%
	2	10,516%	2,789%	2,632%	0,621%	0,178%	0,007%	0,007%	15,201%	0,025%
	3	5,831%	1,546%	1,460%	0,345%	0,089%	0,004%	0,004%	7,270%	0,014%
	4	0,565%	0,150%	0,141%	0,033%	0,009%	0,000%	0,000%	0,704%	0,001%
	5	0,301%	0,080%	0,075%	0,018%	0,005%	0,000%	0,000%	0,376%	0,001%
	6	0,073%	0,019%	0,018%	0,004%	0,001%	0,000%	0,000%	0,091%	0,000%

Tabella G: Stima composizione parco auto suddiviso per aree, Piemonte, 2030

2030		BENZINA	GPL	METANO	HEV B	PHEV B	HEV D	PHEV D	DIESEL	ELETTRICO
AA	1	0,231%	0,092%	0,080%	0,070%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,050%
	2	2,013%	0,799%	0,694%	0,612%	0,222%	0,103%	0,103%	3,046%	0,434%
	3	1,263%	0,501%	0,436%	0,384%	0,125%	0,058%	0,062%	1,717%	0,272%
	4	0,135%	0,054%	0,047%	0,041%	0,013%	0,006%	0,007%	0,184%	0,029%
	5	0,074%	0,029%	0,025%	0,022%	0,007%	0,003%	0,004%	0,100%	0,016%
	6	0,015%	0,006%	0,005%	0,005%	0,001%	0,001%	0,001%	0,020%	0,003%

2030		BENZINA	GPL	METANO	HEV B	PHEV B	HEV D	PHEV D	DIESEL	ELETTRICO
NE	1	0,420%	0,167%	0,145%	0,128%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,091%
	2	2,757%	1,093%	0,950%	0,838%	0,314%	0,145%	0,145%	4,314%	0,594%
	3	1,729%	0,686%	0,596%	0,525%	0,171%	0,079%	0,085%	2,351%	0,373%
	4	0,176%	0,070%	0,061%	0,054%	0,017%	0,008%	0,009%	0,239%	0,038%
	5	0,106%	0,042%	0,037%	0,032%	0,010%	0,005%	0,005%	0,144%	0,023%
	6	0,024%	0,009%	0,008%	0,007%	0,002%	0,001%	0,001%	0,032%	0,005%

2030		BENZINA	GPL	METANO	HEV B	PHEV B	HEV D	PHEV D	DIESEL	ELETTRICO
CN	1	0,199%	0,079%	0,069%	0,061%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,043%
	2	1,793%	0,711%	0,618%	0,545%	0,197%	0,091%	0,098%	2,704%	0,386%
	3	1,363%	0,540%	0,470%	0,414%	0,135%	0,062%	0,067%	1,853%	0,294%
	4	0,145%	0,058%	0,050%	0,044%	0,014%	0,007%	0,007%	0,198%	0,031%
	5	0,074%	0,029%	0,026%	0,023%	0,007%	0,003%	0,004%	0,101%	0,016%
	6	0,016%	0,006%	0,006%	0,005%	0,002%	0,001%	0,001%	0,022%	0,003%

2030		BENZINA	GPL	METANO	HEV B	PHEV B	HEV D	PHEV D	DIESEL	ELETTRICO
TO	1	0,812%	0,322%	0,280%	0,247%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,175%
	2	7,831%	3,106%	2,700%	2,380%	0,854%	0,396%	0,396%	11,753%	1,687%
	3	4,343%	1,722%	1,497%	1,319%	0,429%	0,199%	0,214%	5,904%	0,936%
	4	0,420%	0,167%	0,145%	0,128%	0,042%	0,019%	0,021%	0,572%	0,091%
	5	0,224%	0,089%	0,077%	0,068%	0,022%	0,010%	0,011%	0,305%	0,048%
	6	0,054%	0,022%	0,019%	0,017%	0,005%	0,002%	0,003%	0,074%	0,012%

Stima del venduto in Piemonte

La composizione del venduto al 2018 è stata assunta pari a quella del parco auto nello stesso anno in valori percentuali. Successivamente, a partire dai dati elaborati nello studio della Fondazione Caracciolo sulla base delle analisi poste in essere da UNRAE, è stata calcolata la composizione del venduto al 2020 e al 2030:

Tabella H: Stima composizione venduto autovetture, Piemonte, 2020

2020		BENZINA	GPL	METANO	HEV B	PHEV B	HEV D	PHEV D	DIESEL	ELETTRICO
AA	1	0,280%	0,080%	0,080%	0,040%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,020%
	2	2,410%	0,720%	0,740%	0,390%	0,110%	0,030%	0,030%	3,430%	0,180%
	3	1,510%	0,450%	0,460%	0,240%	0,060%	0,020%	0,020%	1,930%	0,110%
	4	0,160%	0,050%	0,050%	0,030%	0,010%	0,000%	0,000%	0,210%	0,010%
	5	0,090%	0,030%	0,030%	0,010%	0,000%	0,000%	0,000%	0,110%	0,010%
	6	0,020%	0,010%	0,010%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,020%	0,000%

2020		BENZINA	GPL	METANO	HEV B	PHEV B	HEV D	PHEV D	DIESEL	ELETTRICO
NE	1	0,500%	0,150%	0,150%	0,080%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,040%
	2	3,310%	0,990%	1,010%	0,530%	0,160%	0,040%	0,040%	4,860%	0,240%
	3	2,070%	0,620%	0,630%	0,330%	0,090%	0,020%	0,020%	2,650%	0,150%
	4	0,210%	0,060%	0,060%	0,030%	0,010%	0,000%	0,000%	0,270%	0,020%
	5	0,130%	0,040%	0,040%	0,020%	0,010%	0,000%	0,000%	0,160%	0,010%
	6	0,030%	0,010%	0,010%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,040%	0,000%

2020		BENZINA	GPL	METANO	HEV B	PHEV B	HEV D	PHEV D	DIESEL	ELETTRICO
CN	1	0,240%	0,070%	0,070%	0,040%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,020%
	2	2,150%	0,640%	0,660%	0,350%	0,100%	0,030%	0,030%	3,050%	0,160%
	3	1,630%	0,490%	0,500%	0,260%	0,070%	0,020%	0,020%	2,090%	0,120%
	4	0,170%	0,050%	0,050%	0,030%	0,010%	0,000%	0,000%	0,220%	0,010%
	5	0,090%	0,030%	0,030%	0,010%	0,000%	0,000%	0,000%	0,110%	0,010%
	6	0,020%	0,010%	0,010%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,020%	0,000%

2020		BENZINA	GPL	METANO	HEV B	PHEV B	HEV D	PHEV D	DIESEL	ELETTRICO
TO	1	0,970%	0,290%	0,300%	0,160%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,070%
	2	9,390%	2,810%	2,870%	1,510%	0,430%	0,120%	0,120%	13,230%	0,680%
	3	5,210%	1,560%	1,590%	0,840%	0,220%	0,060%	0,060%	6,650%	0,380%
	4	0,500%	0,150%	0,150%	0,080%	0,020%	0,010%	0,010%	0,640%	0,040%
	5	0,270%	0,080%	0,080%	0,040%	0,010%	0,000%	0,000%	0,340%	0,020%
	6	0,070%	0,020%	0,020%	0,010%	0,000%	0,000%	0,000%	0,080%	0,000%

Tabella I: Stima composizione vendite autovetture, Piemonte, 2030

2030		BENZINA	GPL	METANO	HEV B	PHEV B	HEV D	PHEV D	DIESEL	ELETTRICO
AA	1	0,080%	0,090%	0,120%	0,150%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,140%
	2	0,710%	0,800%	1,010%	1,270%	0,620%	0,370%	0,410%	1,530%	1,250%
	3	0,440%	0,500%	0,630%	0,790%	0,350%	0,210%	0,230%	0,860%	0,780%
	4	0,050%	0,050%	0,070%	0,090%	0,040%	0,020%	0,020%	0,090%	0,080%
	5	0,030%	0,030%	0,040%	0,050%	0,020%	0,010%	0,010%	0,050%	0,050%
	6	0,010%	0,010%	0,010%	0,010%	0,000%	0,000%	0,000%	0,010%	0,010%

2030		BENZINA	GPL	METANO	HEV B	PHEV B	HEV D	PHEV D	DIESEL	ELETTRICO
NE	1	0,150%	0,170%	0,210%	0,260%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,260%
	2	0,970%	1,100%	1,380%	1,730%	0,880%	0,520%	0,580%	2,170%	1,710%
	3	0,610%	0,690%	0,860%	1,090%	0,480%	0,290%	0,320%	1,180%	1,070%
	4	0,060%	0,070%	0,090%	0,110%	0,050%	0,030%	0,030%	0,120%	0,110%
	5	0,040%	0,040%	0,050%	0,070%	0,030%	0,020%	0,020%	0,070%	0,070%
	6	0,010%	0,010%	0,010%	0,010%	0,010%	0,000%	0,000%	0,020%	0,010%

2030		BENZINA	GPL	METANO	HEV B	PHEV B	HEV D	PHEV D	DIESEL	ELETTRICO
CN	1	0,070%	0,080%	0,100%	0,130%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,120%
	2	0,630%	0,710%	0,900%	1,130%	0,550%	0,330%	0,370%	1,360%	1,110%
	3	0,480%	0,540%	0,680%	0,860%	0,380%	0,220%	0,250%	0,930%	0,850%
	4	0,050%	0,060%	0,070%	0,090%	0,040%	0,020%	0,030%	0,100%	0,090%
	5	0,030%	0,030%	0,040%	0,050%	0,020%	0,010%	0,010%	0,050%	0,050%
	6	0,010%	0,010%	0,010%	0,010%	0,000%	0,000%	0,000%	0,010%	0,010%

2030		BENZINA	GPL	METANO	HEV B	PHEV B	HEV D	PHEV D	DIESEL	ELETTRICO
TO	1	0,290%	0,320%	0,410%	0,510%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,500%
	2	2,750%	3,120%	3,920%	4,920%	2,380%	1,430%	1,590%	5,900%	4,860%
	3	1,530%	1,730%	2,170%	2,730%	1,200%	0,720%	0,800%	2,960%	2,700%
	4	0,150%	0,170%	0,210%	0,260%	0,120%	0,070%	0,080%	0,290%	0,260%
	5	0,080%	0,090%	0,110%	0,140%	0,060%	0,040%	0,040%	0,150%	0,140%
	6	0,020%	0,020%	0,030%	0,030%	0,020%	0,010%	0,010%	0,040%	0,030%

Riassunti nella seguente tabella solo in base al tipo di alimentazione:

Tabella J: Stima venduto suddiviso per aree e tipologia di alimentazione, Piemonte, 2030

	BENZINA	GPL	METANO	HEV B	PHEV B	ID	PHEV D	DIESEL	ELETTRICO
AA	1,31%	1,49%	1,87%	2,35%	1,03%	0,62%	0,69%	2,55%	2,32%
NE	1,83%	2,07%	2,61%	3,28%	1,44%	0,86%	0,96%	3,56%	3,24%
CN	1,26%	1,43%	1,80%	2,26%	0,99%	0,59%	0,66%	2,45%	2,23%
TO	4,81%	5,45%	6,84%	8,60%	3,78%	2,26%	2,52%	9,34%	8,50%
TOTALE	9,21%	10,44%	13,11%	16,48%	7,24%	4,32%	4,82%	17,89%	16,28%

Tabella K: Valori stimati di venduto e parco auto, Piemonte, 2030

ALIMENTAZIONE	VENDUTO	PARCO AUTO
BENZINA	23.192	1.120.524
GPL	26.283	444.427
METANO	33.024	386.312
HEV B	41.505	340.473
PHEV B	18.232	110.729
HEV D	10.889	51.350
PHEV D	12.149	55.127
DIESEL	45.067	1.523.342
ELETTRICO	41.009	241.409
TOTALE	251.350	4.273.692

Le analisi effettuate da UNRAE prevedevano, nello scenario programmato, i valori riportati nella tabella L da cui è stato ricavato il trend del mercato che, opportunamente elaborato sui dati regionali, ha portato ai risultati precedentemente calcolati.

Tabella L: Ripartizione per motorizzazione del venduto "Scenario programmato"

MOTORIZZAZIONE	2018	2025	2030
BENZINA	43,5%	30,5%	17,5%
GPL	6,5%	7,0%	7,5%
METANO	1,9%	5,0%	6,0%
HEV B	3,1%	13,5%	17,5%
PHEV B	0,8%	3,5%	7,4%
HEV D	0,3%	1,5%	4,6%
PHEV D	0,3%	1,5%	4,9%
DIESEL	43,5%	30,5%	17,5%
ELETTRICO	0,3%	8,0%	16,5%

Fonte 30:Fondazione Caracciolo su dati UNRAE

Calcolo extra consumo elettrico

Per quanto riguarda il calcolo dell'extra consumo dovuto alla diffusione dei veicoli a trazione elettrica, si è fatto riferimento al parco auto stimato al 2030. Di seguito vengono riportati i risultati suddivisi in base a provincia e cilindrata per quanto riguarda i veicoli ibridi plug-in.

Tabella M: Extra consumo stimato dei veicoli ibridi plug-in suddiviso per area e per cilindrata, Piemonte, 2030

AA 2030	PHEV B		PHEV D	
	Numero veicoli	Extra consumo [GWh/anno]	Numero veicoli	Extra consumo [GWh/anno]
2	9.477	4,75	4.718	2,36
3	5.335	2,60	2.656	1,31
4	572	0,33	285	0,16
5	311	0,20	154	0,10
6	63	0,04	31	0,02
TOTALE	15.758	7,92	7.844	3,95

NE 2030	PHEV B		PHEV D	
	Numero veicoli	Extra consumo [GWh/anno]	Numero veicoli	Extra consumo [GWh/anno]
2	13.418	6,72	6.681	3,34
3	7.304	3,56	3.636	1,79
4	744	0,43	370	0,21
5	448	0,29	223	0,14
6	100	0,06	50	0,03
TOTALE	22.014	11,06	10.960	5,52

CN 2030	PHEV B		PHEV D	
	Numero veicoli	Extra consumo [GWh/anno]	Numero veicoli	Extra consumo [GWh/anno]
2	8.412	4,21	4.188	2,10
3	5.755	2,81	2.865	1,41
4	614	0,35	306	0,18
5	313	0,20	156	0,10
6	68	0,04	34	0,02
TOTALE	15.162	7,62	7.549	3,81

TO 2030	PHEV B		PHEV D	
	Numero veicoli	Extra consumo [GWh/anno]	Numero veicoli	Extra consumo [GWh/anno]
2	36.503	18,29	18.174	9,11
3	18.339	8,94	9.131	4,49
4	1.775	1,02	883	0,51
5	947	0,61	472	0,31
6	230	0,15	115	0,07
TOTALE	57.794	29,01	28.775	14,49

Allegato 2

Matrice di decisione

Ogni alternativa assume un valore diverso in base al criterio a cui si sta facendo riferimento.

I valori sono stati ricavati da un database fornito da IRES Piemonte.

Tabella N: Matrice di decisione modello multicriteri

Zona di trasporto	Criteri										
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11
1	17,28	52.881.438.272,54	0,16	65,33	89,41	79,76	33,71	11.408,29	29,37	64,30	0
2	30,63	9.739.431.719,64	0,17	47,13	0,00	2,60	33,68	10.987,25	31,95	59,06	0
4	18,39	25.987.728.614,46	0,16	35,91	7,26	4,54	34,42	11.496,34	33,05	66,80	0
5	11,99	32.376.790.132,39	0,17	60,15	79,43	69,38	40,39	11.001,38	33,87	69,74	0
6	9,46	28.239.273.958,21	0,17	32,08	25,68	1,76	38,17	11.154,70	36,08	75,90	0
7	28,75	40.208.380.356,98	0,16	28,55	5,38	5,31	33,49	11.838,53	38,72	71,01	0
8	6,26	45.277.881.329,73	0,16	43,61	23,67	14,31	34,28	11.330,74	36,41	70,37	1
10	12,00	56.605.661.382,07	0,17	35,95	66,73	68,99	39,77	10.798,15	35,33	71,32	0
11	33,26	28.988.770.626,17	0,17	18,92	0,00	0,00	33,74	12.168,17	36,34	70,38	0
12	19,45	20.533.238.026,07	0,16	33,59	69,53	51,90	34,64	11.371,80	38,41	63,48	0
13	17,80	12.688.328.240,11	0,18	69,55	62,69	5,13	33,71	11.267,31	36,22	59,30	0
14	20,90	63.043.267.779,55	0,17	36,75	47,35	57,45	46,66	10.959,48	31,39	69,85	1
16	27,00	10.413.624.099,40	0,18	17,90	0,00	8,85	30,40	11.085,47	42,75	66,50	0
17	12,44	63.237.156.782,51	0,16	36,26	18,93	17,02	35,13	11.722,51	37,58	64,97	0
18	12,53	18.224.442.424,99	0,17	30,13	0,00	1,52	30,40	12.322,55	38,65	72,74	0
20	0,00	12.799.072.603,80	0,16	20,84	0,00	0,00	31,71	12.173,86	36,12	69,70	0
21	13,16	8.417.667.083,42	0,17	19,63	0,00	0,00	33,81	11.130,12	35,40	69,44	0
22	39,51	21.605.399.463,13	0,17	42,87	62,27	38,33	39,73	11.068,92	38,61	70,15	0
23	24,22	37.484.943.301,70	0,16	51,99	82,95	52,00	40,21	11.192,45	40,05	63,60	0
24	19,48	39.404.296.881,45	0,17	34,75	11,84	0,67	38,62	11.958,13	38,44	70,29	0
25	47,67	32.085.756.729,47	0,16	47,49	5,10	4,79	32,73	11.650,00	35,28	62,50	0
26	13,16	37.786.690.717,04	0,16	58,37	54,13	29,42	40,79	11.727,19	40,31	67,43	1
28	5,76	21.029.581.270,82	0,16	27,31	0,00	0,31	34,69	11.568,49	40,49	65,33	0
31	11,26	11.658.100.452,63	0,16	37,50	0,00	0,00	30,40	11.687,65	38,27	58,45	0
32	0,00	6.162.542.209,91	0,15	35,22	6,42	0,00	32,77	11.821,24	40,78	66,87	0
33	17,39	19.317.254.060,27	0,15	47,92	43,74	61,50	33,38	11.868,04	40,00	64,46	0
Alba	11,87	87.754.590.007,31	0,16	70,49	82,22	75,98	40,82	11.369,77	30,28	68,58	1
Alessandria	11,60	131.051.340.384,11	0,17	58,16	82,51	74,79	58,98	11.260,89	33,21	64,23	1
Asti	33,30	112.217.394.884,22	0,16	56,44	86,48	82,45	57,15	11.128,81	37,65	66,82	1
Biella	23,68	124.329.123.515,01	0,17	68,83	90,88	90,93	41,53	10.461,68	35,61	75,39	1
Borgomanero	25,34	118.939.130.934,69	0,17	59,97	69,91	79,28	39,51	11.322,74	32,98	72,40	0
Bra	25,28	48.303.544.107,80	0,16	45,49	63,64	67,28	44,39	11.295,36	33,41	68,31	1
Carmagnola	22,11	36.231.828.243,52	0,16	34,58	62,25	55,40	45,56	11.220,63	34,41	63,13	0
Casale Monferrato	18,13	43.142.131.213,93	0,17	57,23	89,22	61,66	43,85	10.957,95	33,40	67,90	0
Cuneo	7,37	139.769.785.342,54	0,16	67,43	92,23	85,00	52,13	11.293,01	33,81	62,68	1
Fossano	17,01	35.527.966.762,62	0,17	58,72	63,58	43,47	45,58	11.516,74	31,55	62,24	1
Ivrea	26,85	60.527.501.711,26	0,16	49,86	86,37	83,73	40,06	11.129,29	36,97	67,77	1
Mondovi	15,40	47.086.899.392,40	0,15	50,82	85,46	72,80	42,07	11.624,12	35,96	69,73	1
Novara	10,20	167.259.645.082,19	0,16	57,35	95,64	82,35	58,26	10.781,54	31,49	61,63	0
Novi Ligure	12,21	51.029.898.013,03	0,16	52,98	88,84	77,00	42,44	10.911,80	34,71	67,66	1
Pinerolo	24,10	107.117.118.362,45	0,16	49,94	86,29	69,26	40,75	11.282,25	35,85	65,03	1
Saluzzo	3,59	52.370.279.393,84	0,16	61,38	80,39	55,94	40,42	11.648,17	34,20	62,65	0
Savigliano	11,88	41.470.218.649,92	0,16	40,70	51,08	71,42	42,53	11.362,95	31,49	56,13	0
Torino	20,07	1.384.151.083.514,98	0,16	78,97	91,74	93,05	64,53	10.216,93	30,85	57,18	1
Tortona	39,44	41.564.978.221,26	0,17	54,53	90,32	57,04	42,64	11.505,88	34,01	68,00	1
Verbania	20,48	74.250.698.780,92	0,17	67,43	93,58	86,46	43,31	10.798,50	30,76	68,01	1
Vercelli	12,16	52.829.122.714,63	0,16	52,93	91,21	80,36	45,54	10.547,84	33,72	63,19	0

Fase 2

Classificazione dall'alto $P^+(A)$

L'algoritmo da seguire è il seguente:

1. $A_i = A$ con $i = 1$
2. Identificare l'insieme D_i^+ degli elementi di A_i non surclassati utilizzando la soglia forte
3. Identificare, all'interno dell'insieme D_i^+ al passo 2, gli elementi non surclassati utilizzando la soglia debole
4. Gli elementi identificati al passo 3 dovranno essere attribuiti alla classe C_i^+
5. Se $A_i - C_i^+ \neq \emptyset$ allora $A_{i+1} = A_i - C_i^+$ e tornare al passo 2; altrimenti STOP

In particolare, applicando l'algoritmo a questa analisi si ottengono le seguenti classi:

$$1. D_1^+ = \{a_{18}, a_{29}, a_{30}, a_{31}, a_{35}, a_{39}, a_{44}, a_{45}\}$$
$$C_1^+ = \{a_{30}, a_{44}\}$$

$$2. D_2^+ = \{a_{18}, a_{28}, a_{29}, a_{31}, a_{35}, a_{39}, a_{45}, a_{46}\}$$
$$C_2^+ = \{a_{28}, a_{29}, a_{31}, a_{35}\}$$

$$3. D_3^+ = \{a_{18}, a_{27}, a_{37}, a_{39}, a_{41}, a_{45}, a_{46}\}$$
$$C_3^+ = \{a_{18}, a_{39}, a_{46}\}$$

$$4. D_4^+ = \{a_{27}, a_{37}, a_{41}, a_{45}\}$$
$$C_4^+ = \{a_{45}\}$$

$$5. D_5^+ = \{a_6, a_9, a_{27}, a_{37}, a_{41}\}$$
$$C_5^+ = \{a_6, a_{41}\}$$

$$6. D_6^+ = \{a_9, a_{12}, a_{27}, a_{37}\}$$
$$C_6^+ = \{a_9, a_{12}, a_{27}\}$$

$$7. D_7^+ = \{a_{14}, a_{37}, a_{38}\}$$
$$C_7^+ = \{a_{37}\}$$

$$8. D_8^+ = \{a_1, a_8, a_{14}, a_{32}, a_{38}, a_{40}\}$$
$$C_8^+ = \{a_{14}, a_{32}, a_{40}\}$$

$$9. D_9^+ = \{a_1, a_8, a_{19}, a_{20}, a_{34}, a_{36}, a_{38}\}$$
$$C_9^+ = \{a_1, a_8, a_{34}, a_{38}\}$$

$$10. D_{10}^+ = \{a_7, a_{19}, a_{20}, a_{22}, a_{36}, a_{47}\}$$

- $$C_{10}^+ = \{a_7, a_{20}, a_{22}, a_{47}\}$$
11. $D_{11}^+ = \{a_4, a_{19}, a_{36}, a_{42}, a_{43}\}$
 $C_{11}^+ = \{a_{19}, a_{42}\}$
12. $D_{12}^+ = \{a_4, a_{10}, a_{21}, a_{33}, a_{36}, a_{43}\}$
 $C_{12}^+ = \{a_{33}, a_{36}\}$
13. $D_{13}^+ = \{a_4, a_{10}, a_{21}, a_{43}\}$
 $C_{13}^+ = \{a_4, a_{43}\}$
14. $D_{14}^+ = \{a_3, a_5, a_{10}, a_{21}\}$
 $C_{14}^+ = \{a_{21}\}$
15. $D_{15}^+ = \{a_3, a_5, a_{10}, a_{13}\}$
 $C_{15}^+ = \{a_5, a_{10}\}$
16. $D_{16}^+ = \{a_3, a_{13}\}$
 $C_{16}^+ = \{a_3\}$
17. $D_{17}^+ = \{a_{11}, a_{13}, a_{23}, a_{26}\}$
 $C_{17}^+ = \{a_{13}, a_{23}, a_{26}\}$
18. $D_{18}^+ = \{a_{11}, a_{15}\}$
 $C_{18}^+ = \{a_{11}, a_{15}\}$
19. $D_{19}^+ = \{a_2, a_{16}, a_{17}, a_{24}\}$
 $C_{19}^+ = \{a_2, a_{16}\}$
20. $D_{20}^+ = \{a_{17}, a_{24}, a_{25}\}$
 $C_{20}^+ = \{a_{17}, a_{24}\}$
21. $D_{21}^+ = \{a_{25}\}$
 $C_{21}^+ = \{a_{25}\}$

Classificazione dal basso $P^-(A)$

L'algoritmo da seguire è il seguente:

1. $A_i = A$ con $i = 1$
2. Identificare l'insieme D_i^- degli elementi di A_i non in grado di surclassare con la soglia forte gli altri elementi
3. Identificare, all'interno dell'insieme D_i^- al passo 2, gli elementi non in grado di surclassare, neanche debolmente, gli altri elementi

4. Gli elementi identificati al passo 3 dovranno essere attribuiti alla classe C_i^-
 5. Se $A_i - C_i^- \neq \emptyset$ allora $A_{i+1} = A_i - C_i^-$ e tornare al passo 2; altrimenti STOP
- In particolare, applicando l'algoritmo a questa analisi si ottengono le seguenti classi:

1. $D_1^- = \{a_{13}, a_{24}, a_{25}\}$
 $C_1^- = \{a_{13}, a_{25}\}$
2. $D_2^- = \{a_2, a_{16}, a_{17}, a_{24}\}$
 $C_2^- = \{a_{17}, a_{24}\}$
3. $D_3^- = \{a_2, a_{16}\}$
 $C_3^- = \{a_2, a_{16}\}$
4. $D_4^- = \{a_{11}, a_{15}, a_{23}, a_{42}\}$
 $C_4^- = \{a_{11}, a_{15}\}$
5. $D_5^- = \{a_{10}, a_{23}, a_{26}, a_{42}\}$
 $C_5^- = \{a_{26}, a_{42}\}$
6. $D_6^- = \{a_{10}, a_{23}\}$
 $C_6^- = \{a_{10}\}$
7. $D_7^- = \{a_{23}\}$
 $C_7^- = \{a_{23}\}$
8. $D_8^- = \{a_3, a_5, a_7, a_{18}, a_{21}\}$
 $C_8^- = \{a_3\}$
9. $D_9^- = \{a_5, a_7, a_9, a_{18}, a_{21}\}$
 $C_9^- = \{a_5, a_{18}\}$
10. $D_{10}^- = \{a_4, a_7, a_9, a_{21}, a_{33}, a_{36}, a_{43}\}$
 $C_{10}^- = \{a_{43}\}$
11. $D_{11}^- = \{a_4, a_7, a_8, a_9, a_{21}, a_{33}, a_{34}, a_{36}, a_{39}, a_{47}\}$
 $C_{11}^- = \{a_9, a_{39}\}$
12. $D_{12}^- = \{a_4, a_7, a_8, a_{21}, a_{33}, a_{34}, a_{36}, a_{47}\}$
 $C_{12}^- = \{a_{21}\}$
13. $D_{13}^- = \{a_4, a_7, a_8, a_{22}, a_{33}, a_{34}, a_{36}, a_{47}\}$
 $C_{13}^- = \{a_4, a_7\}$
14. $D_{14}^- = \{a_8, a_{20}, a_{22}, a_{33}, a_{34}, a_{36}, a_{40}, a_{47}\}$

- $$C_{14}^- = \{a_{20}, a_{22}, a_{33}, a_{36}\}$$
15. $D_{15}^- = \{a_8, a_{19}, a_{28}, a_{34}, a_{35}, a_{38}, a_{40}\}$
 $C_{15}^- = \{a_8, a_{19}, a_{47}\}$
16. $D_{16}^- = \{a_1, a_6, a_{14}, a_{28}, a_{34}, a_{35}, a_{38}, a_{40}\}$
 $C_{16}^- = \{a_1, a_6, a_{28}, a_{35}, a_{38}, a_{40}\}$
17. $D_{17}^- = \{a_{14}, a_{34}, a_{45}\}$
 $C_{17}^- = \{a_{14}\}$
18. $D_{18}^- = \{a_{27}, a_{34}, a_{45}\}$
 $C_{18}^- = \{a_{27}, a_{34}, a_{45}\}$
19. $D_{19}^- = \{a_{12}, a_{32}, a_{44}, a_{46}\}$
 $C_{19}^- = \{a_{12}, a_{32}, a_{44}, a_{46}\}$
20. $D_{20}^- = \{a_{31}, a_{37}, a_{41}\}$
 $C_{20}^- = \{a_{37}, a_{41}\}$
21. $D_{21}^- = \{a_{29}, a_{31}\}$
 $C_{21}^- = \{a_{29}, a_{31}\}$
22. $D_{22}^- = \{a_{30}\}$
 $C_{22}^- = \{a_{30}\}$

Riferimenti

- [1] “Listino nuovo” in Quattroruote, Gennaio 2020
- [2] ACI, “Annuario statistico”, 2018, 2019 e 2020
- [3] B. Dalla Chiara, M. Pellicelli, “Sustainable road transport from the energy and modern society points of view: Perspectives for the automotive industry and production”, Journal of Cleaner Production, 2016, p. 1283-1301
- [4] S. Landini, S. Occelli, A. Sciullo, “I profili di mobilità dei bacini di trasporto”, IRES Piemonte, 2019
- [5] Commissione europea, “Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a competitive and resource efficient transport system”, 28/03/2011
- [6] Osservatorio nazionale sharing mobility, “3° rapporto nazionale sulla sharing mobility”, 2018
- [7] ISTAT, “Incidenti stradali in Piemonte e Valle d’Aosta”, 21/11/2019
- [8] Ministero dello sviluppo economico, “Relazione annuale energetica nazionale”, 2018
- [9] Unione petrolifera, “Relazione annuale”, 2019
- [10] GSE, “Mix iniziale nazionale”, 2018
- [11] Direttiva del parlamento e del consiglio europeo 2009/28/CE
- [12] F. Del Pero, M. Delegu, M. Pierini, “Life cycle assessment in the automotive sector: a comparative case study of internal combustion engine and electric car”, 2018
- [13] Sistema Piemonte,
http://www.sistemapiemonte.it/ambiente/srqa/consultadati.shtml?tipo=S¶metro=POL_PM10&dd=16&mm=01&yyyy=2020 , 2020
- [14] Legambiente, <https://www.legambiente.it/emergenza-smog-i-nuovi-dati-di-malaria-il-report-di-legambiente-sull'inquinamento-atmosferico-in-citta/>, 23/01/2020
- [15] B. Dalla Chiara, dispense corso “Sistemi di trasporto e logistica esterna”, Politecnico di Torino, 2019
- [16] F. Millo, dispense corso “Propulsione dei veicoli elettrici e ibridi”, Politecnico di Torino
- [17] UNRAE, “L’analisi UNRAE sugli acquisti di auto elettriche”, 17/09/2019
- [18] ISTAT, “Popolazione residente al 1° gennaio”, 2011 e 2019
- [19] B. K. Sovacool, J. Kester, L. Noel, G. Zarazua de Rubens, “The demographics of decarbonizing transport: The influence of gender, education, occupation, age, and household size on electric mobility preferences in the Nordic region”, Global Environmental Change, 2018, p. 86-100
- [20] C. Stella, M. Koza, “Electric vehicles and electric utilities: a clear opportunity with many shapes”, Arthur D. Little, 2017

- [21] G. Caretto, Start magazine, <https://www.startmag.it/emobility/fca-autoelettrica-enelx-terna/>, 2019
- [22] L. 30 Dicembre 2018, n. 145
- [23] L. regionale 30 Dicembre 2015, n. 31
- [24] F. Arena, L. Mezzana, “The automotive CO₂ emission challenge”, Artur D. Little, 2014
- [25] N. Angi, “*Le auto cambieranno e i loro componenti anche: cosa faranno i fornitori?*”, Sicurauto, <https://www.sicurauto.it/ricambi-e-accessori/tecnica-e-manutenzione/le-auto-cambieranno-e-i-loro-componenti-anche-cosa-faranno-i-fornitori/>
- [26] Direttiva del parlamento e Consiglio europeo 2014/94/UE
- [27] L. 7 agosto 2012, n. 134 (PNire)
- [28] “*Tempi di ricarica per una vettura di taglia media*”, CEI Magazine, <https://ceimagazine.ceinorme.it/ceifocus/la-ricarica-dei-veicoli-elettrici-interoperabilita-sicurezza/>, 2017
- [29] Osservatorio smart mobility, “*Smart mobility report*”, 2019
- [30] “*Guida alla ricarica*”, e-Station, <https://www.e-station.it/guida-alla-ricarica.html>, 2020
- [31] A. Ginori, “*Al via in Normandia la prima autostrada fotovoltaica*”, la Repubblica, https://www.repubblica.it/ambiente/2016/12/22/news/al_via_in_normandia_la_prima_autostrada_fotovoltaica-154666587/, 22/12/2016
- [32] Daze technology, <https://www.dazetechnology.com/it/dazeplug/>
- [33] Chargemap, <https://fr.chargemap.com/map>, 18/03/2020
- [34] IEEE, <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6690487/keywords#keywords>
- [35] D.G.R. 12 Ottobre 2018, n. 33-7698
- [36] A. Affanni, A. Bellini, G. Franceschini, P. Guglielmi, C. Tassoni, “*Battery Choice and Management for New-Generation Electric Vehicles*”
- [37] Cadex Electronic inc., “*BU-205: Types of Lithium-ion*”, https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion, 2019
- [38] L. Goldie-Scot, “*A Behind the Scenes Take on Lithium-ion Battery Prices*”, BloomergNEF, <https://about.bnef.com/blog/behind-scenes-take-lithium-ion-battery-prices/>, 2019
- [39] G. Croce, “*Batterie per auto elettriche: chi le produce*”, La Gazzetta dello sport, <https://www.gazzetta.it/motori/la-mia-auto/04-12-2019/batterie-auto-elettriche-chi-le-produce-3501617629754.shtml>, 04/12/2019
- [40] P. Lienert, C. Chan, “*A Reuters analysis of 29 global automakers found that they are investing at least \$300 billion in electric vehicles, with more than 45 percent of that earmarked for China*”, Reuters graphics, <https://graphics.reuters.com/AUTOS-INVESTMENT-ELECTRIC/010081ZB3HD/index.html>, 2019

- [41] M. Schweilk, “CO2 emissions are increasing. Carmakers must act”, PA Consulting, 2020
- [42] Aci, ENEA, CNR-DIITET e Fondazione Caracciolo, “Per una transazione energetica eco-razionale della mobilità automobilistica”, 2019
- [43] ISTAT, “Spostamenti quotidiani e nuove forme di mobilità”, 2017
- [44] Osservatorio Unipolsai, “Comunicato stampa annuale”, <http://www.unipolsai.com/it/innovazione-e-offerta/osservatorio-unipolsai>, 2014-2019
- [45] T. Earl, “Road map to decarbonising European cars”, Transport & Environment, 2018
- [46] Direttiva della Commissione europea 2018/2001/EU
- [47] F. Marzullo, “Gli sviluppi delle infrastrutture di rete sul territorio della regione Piemonte”, Regione Piemonte, 2020
- [48] Terna s.p.a., “Statistiche regionali 2018”, 2019
- [49] L. Nègre, “Livre Vert sur les infrastructures de recharge ouvertes au public pour les véhicules « décarbonés »”, Ministère de l'Ecologie, du Développement durable, des Transports et du Logement, 2011
- [50] Joint reserch center, “Well to Wheels Report version 4.a, Appendix 2”, Commissione europea, 2014
- [51] M. Romare, L. Dahllöf , “The life cycle energy consumption and greenhouse gas emission from lithium-ion batteries – A study with focus on current technology and batteries for light-duty vehicles”, Swedish Energy Agency, Swedish Transport Administration, 2017
- [52] Volkswagen, <https://www.volkswagen.it/it.html>
- [53] Wallbox, <https://wallbox.com>
- [54] Ministero dello sviluppo economico, “Prezzi medi settimanali dei carburanti e combustibili. Rilevazione del 02/03/2020”, https://dgsaie.mise.gov.it/prezzi_carburanti_settimanali.php, 02/03/2020
- [55] Duferco, <https://dufercoenergia.com/e-mobility/>
- [56] Enel x, <https://www.enelx.com/it/it/mobilita-elettrica/prodotti/privati/app-juicepass>
- [57] Route 220, <https://nextcharge.network/#network>
- [58] Ioity, <https://ionity.eu/en/where-and-how.html>
- [59] Tesla, https://www.tesla.com/it_it
- [60] ARERA, “Prezzi dei servizi di ricarica per veicoli elettrici e sistema tariffario dell'energia elettrica”, 2018
- [61] F. Masci, “Accise ed IVA: le imposte in bolletta luce”, Selectra, 2019
- [62] “Volkswagen eGolf vs Volkswagen Golf: quanto costa la manutenzione?”, Sicurauto, https://www.sicurauto.it/news/auto-elettriche-ibride/volkswagen-egolf-vs-volkswagen-golf-quanto-costa-la-manutenzione/?refresh_ce_cp, 2019
- [63] Zurich Connect, <https://www.zurich-connect.it>, 13/05/2020
- [64] L. Regionale 23/09/2003, n.23

- [65] Gruppo Torinese Trasporti (GTT), <http://www.gtt.to.it/cms/ztl/permessi-di-circolazione-ztl>, 13/05/2020
- [66] Pubblicità Smart Youtube, <https://www.youtube.com/watch?v=NXjgcqxHb1U>
- [67] M. F. Norese, “*Metodi e modelli per il supporto alle decisioni*” dispense integrative corso di “Ricerca operativa”, Politecnico di Torino, 2002
- [68] T. L. Saaty, “*The Analytic Hierarchy Process*”, McGraw-Hill, New York, 1980

Indice figure

Figura 0.1: Modelli BEV e PHEV presenti sul mercato a Gennaio 2020 suddivisi tra le varie case automobilistiche.....	2
Figura 1.1: Fonti energetiche settore dei trasporti, Italia.....	7
Figura 1.2: Fonti energia settore trasporti, Piemonte, 2014	7
Figura 1.3: Fonti energia elettrica, Piemonte, 2014	8
Figura 1.4 : Mappa degli inquinanti in Piemonte in data 16/01/2020 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$].....	10
Figura 1.5: Traffico giornaliero in Piemonte.....	10
Figura 2.1:Distribuzione della popolazione per classi di età nei bacini di trasporto del Piemonte, 2019	14
Figura 2.2: Distribuzione delle famiglie per numero di componenti nei bacini di trasporto del Piemonte, 2011	15
Figura 2.3:Relazione tra prezzo del petrolio ed emanazione delle regolamentazioni	20
Figura 2.4: Schema veicolo elettrico	21
Figura 2.5: Grafico dei risultati dell'analisi di confronto del modello ibrido rispetto all'equivalente a benzina	25
Figura 2.6: Connettore Tipo 2 e CCS Combo2	29
Figura 2.7:C onnettore CHAdeMO	29
Figura 2.8: Distribuzione punti di ricarica pubblici e privati ad accesso pubblico nelle regioni, 2018.....	31
Figura 2.9: Mappa dei punti di ricarica in Piemonte, 2020	31
Figura 2.10: Composizione pacco batteria	34
Figura 2.11: Schema cella in fase di scarica.....	35
Figura 2.12: Andamento prezzo medio pacco batteria periodo 2010-2018	38
Figura 2.13: Previsione andamento prezzo medio pacco batteria	38
Figura 3.1: Schema logico	41
Figura 3.2: Riferimento allo schema logico della composizione del venduto	43
Figura 3.3: Composizione del venduto, Piemonte 2018.....	44
Figura 3.4: Stima composizione venduto, Piemonte, 2020 e 2030	44
Figura 3.5: Riferimento allo schema logico del calcolo delle emissioni totali	46
Figura 3.6: Stima composizione parco auto circolante, Piemonte, 2020 e 2030.....	46
Figura 3.7: Relazione tra km percorsi e tipo comune.....	47
Figura 3.8: Riferimento allo schema logico dell'impatto del sistema elettrico	52
Figura 3.9: Bilancio energetico consumi regione Piemonte, 2018.....	53
Figura 3.10: Potenza degli impianti di produzione in Piemonte, 2018	56
Figura 3.11:Grafico variazione potenza richiesta dallo scenario n. O (tutti i veicoli caricati in fast charge) allo scenario n. 407.264 (tutti i veicoli caricati in slow charge).....	57
Figura 4.1: Rappresentazione ciclo WTW	58
Figura 4.2: Emissioni CO ₂ WTW a confronto in base ad alimentazione e cilindrata, Piemonte	62
Figura 4.3: Grafico confronto emissioni CO ₂ eq in funzione dei km percorsi, Piemonte, 2020	64
Figura 4.4: Grafico confronto emissioni CO ₂ eq in funzione dei km percorsi, Piemonte, 2030	64
Figura 4.5: Grafici confronto emissioni CO ₂ eq in funzione dei km percorsi, aree Piemonte, 2020	65

Figura 4.6: Grafici confronto emissioni CO ₂ eq in funzione dei km percorsi, aree Piemonte, 2030	66
Figura 5.1: Componenti tariffa benzina, 1,54€/l, 02/03/2020	71
Figura 5.2: Componenti tariffa energia elettrica fornitura domestica, 0,254 €/kWh, febbraio-marzo 2020	72
Figura 5.3: Costo manutenzione ordinaria negli anni	74
Figura 5.4: Grafico TCO scenario "Incentivi nulli"	76
Figura 5.5: Grafico TCO scenario "Incentivi bassi"	77
Figura 5.6: Grafico TCO scenario "Incentivi alti"	78
Figura 6.1: Cartina delle 47 zone di trasporto del Piemonte	82
Figura 6.2: Grafo risultato della fase 1	90
Figura 6.3: Grafo finale Fase 2	92
Figura 6.4: Grafo finale Fase 2 con etichette zone di trasporto e riferimento cromatico per cartina geografica	93
Figura 6.5: Cartina geografica rappresentate i risultati della Fase 2, in scuro le zone con priorità maggiore	94

Indice tabelle

Tabella 1.1: Suolo utilizzato da infrastrutture di trasporto nei bacini di trasporto del Piemonte, 2013	4
Tabella 2.1: Contributi acquisto	18
Tabella 2.2: Imposta su inquinamento.....	18
Tabella 2.3: Valori di confronto tra il modello ibrido e l'equivalente a benzina	25
Tabella 2.4: Tempi di ricarica per una vettura di taglia media.....	27
Tabella 2.5: Caratteristiche delle batterie secondo le loro caratteristiche chimiche	37
Tabella 2.6: Investimenti per la produzione di batterie	40
Tabella 3.1: Variabili oggetto dell'analisi.....	43
Tabella 3.2: Emissioni di CO ₂ medie stimate misurate con ciclo WLTP, Piemonte, 2020 e 2030	45
Tabella 3.3: Chilometri percorsi ogni 100 spostamenti in base al tipo di comune	48
Tabella 3.4: Mt di CO ₂ emesse all'anno nelle diverse aree e nel Piemonte, 2020.....	49
Tabella 3.5: Stima Mt di CO ₂ emesse all'anno nelle diverse aree e nel Piemonte, 2030	49
Tabella 3.6: Stima Mt di CO ₂ emesse all'anno con trend di riduzione "storico" nelle diverse aree e nel Piemonte, 2030.....	50
Tabella 3.7: Stima Mt di CO ₂ emesse all'anno con trend di riduzione "equivalente" nelle diverse aree e nel Piemonte, 2030	50
Tabella 3.8: Confronto stime valori obiettivi al 2030, Piemonte	51
Tabella 3.9: Stima parco auto veicoli elettrici (BEV ePHEV) al 2030 e caratteristiche medie, Piemonte	54
Tabella 3.10: Extra consumo annuale stimato al 2030 dovuto alla presenza di veicoli plug-in nelle aree del Piemonte.....	55
Tabella 4.1: Emissioni CO ₂ eq nelle fasi WTT suddivise per fonte energetica	59
Tabella 4.2: Emissioni di CO ₂ eq. calcolate, Piemonte, 2020	61
Tabella 4.3: Emissioni di CO ₂ eq. calcolate, Piemonte, 2030	61
Tabella 4.4: Emissioni CO ₂ eq per produzione veicolo e batteria.....	63
Tabella 5.1: Costo acquisto e mantenimento Golf 8 modello benzina, ibrido plug-in benzina e elettrico	68
Tabella 5.2: Caratteristiche scenari	69
Tabella 5.3: Abitudini consumatori e tariffe ricarica pubblica.....	70
Tabella 5.4: Tariffe ricarica pubblica, maggio 2020	70
Tabella 5.5: Caratteristiche veicolo e ricarica benzina e elettrico	73
Tabella 5.6: Confronto costo pieno (esclusa tariffa gratuita)	73
Tabella 5.7: Dati inseriti per il calcolo del preventivo RCA.....	74
Tabella 6.1: Criteri di valutazione utilizzati nel modello	83
Tabella 6.2: Scala lineare di Saaty per la misurazione dell'importanza relativa tra i criteri	85
Tabella 6.3: Classificazione dei criteri in base al peso calcolato con il metodo di Saaty	87
Tabella 6.4: Valore di ICR in funzione di n variabili prese in esame	88