

POLITECNICO DI TORINO

**Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Energetica e Nucleare
Dipartimento Energia (DENERG)**

Tesi di Laurea Magistrale

**Valutazione dell'impatto ambientale
della ricarica wireless per autoveicoli**



Relatore

Prof. Aldo Canova

Co-Relatori

Vincenzo Cirimele, Ph.D.

Paolo Lazzeroni, Ph.D.

Candidato

Daniele Farina

A.A. 2017/18

Indice

Sommario	3
Abstract	4
Introduzione	5
Capitolo 1: Tecnologia Wireless Power Transfer	11
1.1 <i>Evoluzione storica</i>	11
1.2 <i>Principi di funzionamento</i>	12
1.3 <i>Applicazione della tecnologia WPT ai veicoli elettrici</i>	13
1.4 <i>Metodi di ricarica wireless per veicoli elettrici</i>	15
1.5 <i>Principali progetti ed enti coinvolti</i>	17
1.6 <i>Vantaggi e svantaggi del sistema di ricarica WPT</i>	19
Capitolo 2: Inquinanti atmosferici ed emissioni	21
2.1 <i>Principali inquinanti ed effetti sulla salute umana e sull'ambiente</i>	21
2.2 <i>Altri inquinanti</i>	25
2.3 <i>Normativa italiana e limiti di legge</i>	27
Capitolo 3: Panorama del settore automobilistico italiano	30
3.1 <i>Suddivisione del parco auto in base alla tipologia di alimentazione</i>	30
3.2 <i>Quadro normativo</i>	31
3.3 <i>Veicolo medio equivalente in Italia</i>	33
Capitolo 4: Produzione di energia elettrica in Italia	37
4.1 <i>Share energetico nazionale</i>	37
4.1.1 <i>Produzione da fonti fossili</i>	38
4.1.2 <i>Produzione da fonti rinnovabili</i>	39
4.2 <i>Costo dell'energia elettrica</i>	41
4.3 <i>Previsioni future</i>	43

Capitolo 5: Le esternalità e i costi esterni dell'energia	46
5.1 <i>Stima dei costi esterni</i>	46
5.2 <i>EcoSenseLE</i>	48
5.3 <i>Analisi costi-benefici relativa alla modifica del parco auto</i>	50
5.4 <i>Analisi di sensitività</i>	52
Capitolo 6: Valutazione emissioni ed esternalità a livello europeo	55
6.1 <i>Francia</i>	58
6.2 <i>Germania</i>	59
6.3 <i>Polonia</i>	60
6.4 <i>Spagna</i>	61
6.5 <i>Svezia</i>	62
6.6 <i>Regno Unito</i>	63
6.7 <i>Quadro europeo</i>	64
Capitolo 7: Analisi economica relativa all'installazione del sistema WPT	66
7.1 <i>Ipotesi e modello di calcolo</i>	66
7.2 <i>Costo dell'infrastruttura</i>	69
7.3 <i>Fattibilità economica in Italia</i>	71
7.4 <i>Fattibilità economica in Europa</i>	75
Conclusioni	80
Appendice A: Evitate emissioni inquinanti in atmosfera	82
Riferimenti bibliografici	86

Sommario

La tecnologia Wireless Power Transfer (WPT) con il passare degli anni si sta sempre più affermando in svariati campi applicativi, in particolare per quanto riguarda la ricarica elettrica senza fili. In questo lavoro di tesi si focalizza l'attenzione sul settore dei trasporti, stimandone le potenzialità attuali e gli orizzonti futuri. La valutazione verte non solo sul profilo tecnologico, ma anche su quello economico-ambientale. A tal proposito vengono effettuate delle analisi riguardanti le esternalità e i costi esterni in materia di impatto ambientale, con tutti gli aspetti che ne conseguono.

L'obiettivo è quello di effettuare uno studio di fattibilità riguardante l'installazione di un sistema di ricarica wireless per veicoli elettrici nell'infrastruttura autostradale, analizzandone in primo luogo gli aspetti energetici e successivamente quelli di carattere monetario. Dal punto di vista energetico-ambientale si valuta l'effettiva riduzione, o aumento, di concentrazione delle sostanze inquinanti, a seguito di una parziale sostituzione dei veicoli con motore a combustione interna in favore di auto elettriche dotate di sistema di ricarica WPT. I parametri di confronto sono i costi esterni associati all'aumento di produzione di energia elettrica, giustificato dalla modifica del parco auto.

In ultimo, a valle di questa valutazione, vengono stimati i costi relativi alla costruzione, installazione e utilizzo dell'infrastruttura di ricarica, così da stabilire se un simile investimento può essere considerato giustificabile.

L'analisi è svolta non solo a livello nazionale, ma è estesa anche ai principali paesi europei, cercando di capire se e come la politica energetica interna di uno stato, connessa alla caratterizzazione del parco auto, possa o meno determinare la realizzabilità di tale progetto.

Abstract

The Wireless Power Transfer (WPT) technology in the last few years is emerging in a lot of application fields, especially concerning wireless electric charging. This thesis focuses on transport sector, estimating its current potential and future horizons. The evaluation deals not only with technological profile, but also with economic and environmental aspects. On this subject, several analyses are performed about externalities and external costs from the environmental impact point of view, and all the connected issues.

The aim is to perform a feasibility study regarding a wireless charging system installation, for Electric Vehicles (EV), into the motorway infrastructure, first analyzing energy aspects and monetary features subsequently. From the energy and environmental point of view, the effective reduction, or increase, of pollutants concentration is evaluated after performing a partial substitution of Internal Combustion Engine (ICE) vehicles, in favor of EVs powered by WPT charging system. The external costs associated to the increase of electrical energy production, due to the modification of the car fleet, are the main comparison parameter.

Lastly, downstream of this evaluation, all the costs related to construction, installation and utilization of charging infrastructure are estimated, so that the investment can be justified.

This analysis is carried out not only at a national level, but it is also extended to the main European countries, trying to understand if and how the internal energy policy of a single state, connected to the car fleet characterization, can or cannot determine the viability of this project.

Introduzione

I combustibili fossili tradizionali, quali carbone, gas naturale e petrolio, sin dalla prima rivoluzione industriale, hanno rivestito un ruolo determinante nella produzione di energia in ogni sua forma. In particolar modo una crescente dipendenza da questi ultimi si è osservata nel settore dei trasporti e nella generazione di calore ed energia elettrica. Ciò ha comportato, a livello mondiale, un evidente aumento del tasso di inquinamento, che può a lungo termine causare: peggioramento della qualità dell'aria, innalzamento di oltre 1 °C della temperatura media della superficie terrestre, incremento del fenomeno delle piogge acide, bioaccumulo negli organismi, eutrofizzazione delle acque, aumento dell'incidenza di malattie e tumori con conseguente riduzione dell'aspettativa di vita. Esistono numerose organizzazioni che hanno tra i vari obiettivi quello di monitorare i livelli di inquinamento ambientale causato dall'uomo, oltre che cercare di promuovere ed incentivare l'utilizzo di fonti rinnovabili; in Italia il principale ente pubblico di ricerca in materia è l'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale), istituito nel 2008 e sottoposto alla vigilanza del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare. L'ISPRA ha sede a Roma, coordina le diverse ARPA (Agenzie Regionali per la Protezione dell'Ambiente) e collabora con le principali istituzioni nazionali e internazionali attive nel campo della salvaguardia ambientale, in particolare con la EEA (European Environment Agency), l'agenzia europea dell'ambiente. Essa è un organismo dell'Unione europea, operativa dal 1994 e con sede centrale a Copenaghen, in Danimarca; comprende tutti i 28 stati membri dell'UE e anche l'Islanda, la Norvegia, il Liechtenstein, la Svizzera e la Turchia. Tra i vari accordi internazionali che mirano a limitare gli effetti negativi provocati dall'inquinamento atmosferico, uno dei più importanti è sicuramente la Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (in inglese United Nations Framework Convention on Climate Change, con l'acronimo UNFCCC). Esso è un trattato ambientale aperto alle firme nel corso della Conferenza delle Nazioni Unite sull'Ambiente e sullo Sviluppo, tenutasi nella città di Rio de Janeiro nel 1992 e nota anche come "Summit della Terra". La UNFCCC, a seguito della ratifica da parte dei paesi firmatari, obbligava i governi a raggiungere degli obiettivi non vincolanti per la riduzione delle concentrazioni in atmosfera dei gas serra di origine antropica, cercando dunque di limitare il fenomeno del surriscaldamento globale. Gli impegni e gli obiettivi più onerosi, nell'ambito della stabilizzazione delle emissioni inquinanti, ricadevano sui principali paesi industrializzati.

A partire dal 1995 in poi, ogni anno si svolge una Conferenza delle Parti (COP, Conference of the Parties) in una diversa metropoli del pianeta, al fine di valutare e implementare soluzioni che permettano di contrastare i cambiamenti climatici. Il noto Protocollo di Kyoto, primo trattato al mondo per la riduzione delle emissioni di gas a effetto serra, è stato redatto nel dicembre 1997, nel corso della COP-3 svoltasi in Giappone. Esso è entrato in vigore nel 2005, e la sua durata è stata estesa dal 2012 al 2020 con l'emendamento di Doha, proposto durante la COP-18 del 2012 in Qatar. Gli obiettivi relativi al secondo periodo del Protocollo di Kyoto sono ancora più stringenti per quanto riguarda il taglio delle emissioni di gas serra; soltanto 38 paesi sviluppati hanno aderito (il 20% circa delle nazioni), compresi i 28 stati membri dell'Unione europea, la quale si è impegnata ad abbassare le emissioni del 20% entro il 2020, rispetto ai valori del 1990. La COP-21 si è tenuta nella capitale francese dal 30 novembre all'11 dicembre 2015; in questa conferenza è stato sottoscritto l'accordo di Parigi, un trattato globale con l'obiettivo di contrastare i cambiamenti climatici. È stato firmato dai rappresentanti di 195 paesi di tutto il mondo ed è entrato in vigore a fine 2016, a seguito della ratifica da parte di 55 nazioni, ovvero la soglia minima prevista. L'accordo non è vincolante e, tra i vari impegni, prevede principalmente un piano d'azione che consenta di limitare il riscaldamento globale "ben al di sotto dei 2 °C", applicato a partire dal 2020. La XXIV Conferenza delle Parti dell'UNFCCC si è di recente tenuta a Katowice, in Polonia, dal 3 al 14 dicembre 2018.

Il settore dei trasporti contribuisce in maniera considerevole all'inquinamento atmosferico, specialmente nelle aree urbane e densamente popolate; in particolare, le percentuali di emissioni di gas serra attribuibili al trasporto veicolare sono generalmente comprese tra il 20% e il 30% sul totale, a seconda della nazione considerata [1]. Ciò è dovuto alla forte dipendenza dai combustibili fossili, principalmente dal petrolio, per l'alimentazione dei motori a combustione presenti nei veicoli per il trasporto su strada. Nonostante questo, globalmente negli ultimi anni sono aumentate le vendite relative alle autovetture elettriche, le quali rappresentano senza ombra di dubbio una valida alternativa in grado di contrastare l'aumento delle emissioni inquinanti ed il peggioramento della qualità dell'aria. Esse, infatti, presentano numerosi vantaggi se comparate alle classiche auto a benzina o diesel, tra cui: nessuna emissione di CO₂ o altri gas serra durante il funzionamento, riduzione dell'impatto ambientale complessivo (considerando l'intero ciclo di vita del mezzo), rumorosità assai contenuta con conseguente abbattimento dell'inquinamento sonoro, accesso alla maggior parte delle zone a traffico limitato, elevate efficienze di trasmissione, diminuzione dei costi relativi ad assicurazione, bollo, manutenzione e percorrenza. Allo stato attuale, però, i veicoli elettrici risultano essere

ancora poco diffusi sul mercato globale: secondo l'International Energy Agency (IEA, agenzia internazionale dell'energia), nel quinquennio 2013-2017 complessivamente le autovetture elettriche circolanti sono aumentate da 350.000 unità a 3,2 milioni circa, di cui oltre 1 milione vendute nel solo 2017 [2]. La mobilità elettrica dunque rappresenta meno dell'1% del totale ma, stando alle stime più attendibili, le previsioni di vendita sono destinate ad aumentare con una crescita esponenziale nel corso dei prossimi due decenni. Si ipotizza infatti che, entro il 2040, il 55% delle immatricolazioni di nuove autovetture e il 33% della flotta veicolare complessiva sarà costituita da auto elettriche o ibride. Al fine di poter perseguire tale obiettivo, bisogna necessariamente agire sotto differenti punti di vista:

- diminuire il prezzo di vendita delle batterie agli ioni di litio, riducendo di conseguenza l'esborso iniziale per l'acquisto della vettura;
- aumentare l'autonomia dei veicoli elettrici, in modo da renderli sempre più competitivi fino ad annullare la cosiddetta *range anxiety*;
- estendere e migliorare le infrastrutture dedicate, in particolar modo le colonnine pubbliche per la ricarica elettrica, possibilmente velocizzandone i tempi di carica.

Nel 2016 il governo norvegese ha annunciato che, dal 2025 in poi, tutti i veicoli prodotti e immessi sul mercato dovranno essere ad emissioni zero, vietando di fatto la vendita di auto a benzina o diesel all'interno della nazione; analogamente, la Germania intende bandire i motori a combustione interna entro il 2030. Recentemente Regno Unito, Francia e Italia hanno dichiarato di volerne interrompere la commercializzazione, fissando come anno limite il 2040.

La ricarica del pacco batterie che alimenta l'auto elettrica, tipicamente avviene mediante una connessione cablata tra la sorgente di alimentazione, cioè la colonnina di ricarica o la presa domestica standard, ed il carico, ovvero la batteria stessa della vettura. Negli ultimi anni, però, si è assistito allo sviluppo di una nuova tipologia di ricarica elettrica, più complessa ma al contempo più vantaggiosa sotto molti aspetti, chiamata Wireless Power Transfer (WPT), letteralmente traducibile in italiano come trasferimento di potenza senza fili. Essa rappresenta uno dei punti cardine di questo lavoro: l'obiettivo primario è quello di effettuare un'analisi costi-benefici della tecnologia, specialmente dal punto di vista dell'inquinamento atmosferico. Ne consegue che risulta di estremo interesse riuscire a valutare come e quanto lo share di produzione di energia elettrica influenzi la fattibilità ambientale, ed economica, di una potenziale introduzione del sistema di ricarica WPT all'interno dell'infrastruttura autostradale.

Il primo capitolo della tesi offre una breve panoramica della tecnologia Wireless Power Transfer, inizialmente sintetizzando la sua evoluzione a partire dai primi esperimenti effettuati ed i principi basilari che ne regolano il funzionamento, in particolar modo per quanto concerne l'applicazione alle vetture elettriche. Successivamente si descrivono le differenti tipologie di ricarica senza fili: stazionaria, statica e dinamica. Oltre a riportare i valori relativi a potenze, frequenze ed efficienze medie, si espone lo stato dell'arte dei sistemi WPT, focalizzando l'attenzione sui progressi compiuti dagli enti e dalle organizzazioni che si occupano della loro realizzazione, nonché sui più importanti progetti europei e internazionali in materia. Infine, sono riepilogati i principali pro e contro della suddetta tecnologia.

Nel capitolo 2 sono descritti nel dettaglio gli inquinanti primari e secondari, illustrandone in particolare: la formazione in atmosfera, gli effetti a breve e a lungo termine sulla salute dell'uomo e sull'ecosistema in generale. Nell'ultima sezione è riportata la tabella contenente i valori limite delle concentrazioni nell'aria ambiente di ciascuna sostanza nociva, previsti dalla più recente normativa applicata in Italia.

Il terzo capitolo contiene le informazioni relative alla composizione del parco auto in Italia, sia in termini di combustibili utilizzati per la propulsione dei mezzi, sia per quanto riguarda la classe ambientale di appartenenza. I dati inerenti alle differenti tipologie di alimentazione e categorie Euro sono successivamente utilizzati al fine di calcolare i fattori di emissione caratteristici di un veicolo medio equivalente, rappresentativo dell'intera flotta veicolare italiana. Esso presenta, per ciascuna sostanza inquinante, un determinato valore espresso in milligrammi o microgrammi al chilometro.

Il capitolo 4 tratta della produzione di energia elettrica in Italia, fornendo in primo luogo una panoramica sul mix nazionale ed i contributi percentuali di tutte le fonti energetiche, rinnovabili e non. Soltanto per le centrali termoelettriche alimentate mediante combustibili fossili, sono poi mostrati i grafici relativi ai fattori di emissione, questa volta riferiti al kWh elettrico, per ogni inquinante primario e secondario. In altre parole, si ipotizza che ciascun kWh prodotto dagli impianti di generazione a combustibili tradizionali emetta una quantità fissa di CO, NO_x, SO_x e così via. Successivamente viene effettuato un confronto per il prezzo medio di acquisto dell'energia elettrica, sia in funzione della fascia di consumo, sia in base alla nazione europea considerata; sono inoltre riportati i costi di generazione per le diverse fonti energetiche in €/MWh. L'ultimo paragrafo fornisce uno sguardo sulle previsioni, per il prossimo decennio, del fabbisogno di energia elettrica e della quota di produzione da fonti rinnovabili nel paese.

Nel capitolo 5 vengono spiegati i concetti di esternalità e di costi esterni in ambito energetico, per arrivare poi a descrivere le metodologie impiegate all'interno del progetto ExternE, il quale ha come scopo primario proprio la stima dei costi esterni legati alla produzione di energia elettrica. Nello specifico, è introdotto lo strumento di calcolo EcoSenseLE, in grado di quantificare i benefici o i danni derivanti dalla variazione dello stato di inquinamento atmosferico. Ne vengono illustrati: il funzionamento di base, i diversi passaggi da effettuare e il significato dei valori forniti in output. Sempre mediante il software si procede, per l'Italia, con l'analisi economico-ambientale relativa alla sostituzione di una certa percentuale del parco automobilistico, in favore dell'immissione su strada di veicoli elettrici ricaricati tramite il sistema WPT.

Lo stesso tipo di valutazione viene condotta, all'interno del capitolo 6, per altre sei nazioni appartenenti all'Unione europea, quali: Francia, Germania, Spagna, Svezia, Polonia e Regno Unito. Sono dapprima raffigurati gli andamenti grafici dei fattori di emissione medi, sia per quanto riguarda i veicoli che per le centrali di produzione elettrica, necessari per il calcolo delle esternalità in termini monetari. A seguire vi è un breve paragrafo, per ciascuno dei paesi di interesse, che riassume tutti i dati iniziali utili per il corretto svolgimento dell'analisi stessa, e che fornisce una visione d'insieme dei potenziali guadagni, costi e risparmi netti finali. Nella sezione conclusiva è presente una tabella riepilogativa delle differenze nette, ottenute per i sei stati europei considerati.

Nel settimo ed ultimo capitolo della tesi si considerano tutti i costi associati all'installazione di una infrastruttura di ricarica Wireless Power Transfer all'interno della rete autostradale già esistente. Inizialmente si espone il modello di calcolo utilizzato al fine di quantificare la potenza in kW richiesta da un veicolo generico, in funzione della velocità dello stesso, necessaria per poter alimentare il motore elettrico durante la marcia. Questo permette di individuare la condizione più gravosa per il sistema (*worst case scenario*), e conseguentemente dimensionarne i singoli componenti. Si effettua dunque la stima della spesa complessiva per la realizzazione dell'infrastruttura WPT, riferita al chilometro, tenendo conto di ciascuna voce di costo e valutando il peso percentuale delle differenti macrocategorie. Dopo aver ottenuto un determinato valore in milioni di €/km, si valuta la fattibilità economica nei singoli stati europei per tre diversi scenari di copertura della rete autostradale, con un orizzonte temporale pari a 25 anni. Tale valutazione tiene conto di molteplici aspetti riguardanti sia il settore automobilistico, sia quello relativo alla produzione di energia elettrica. Innanzitutto si ipotizza un possibile andamento di crescita, fino al 2040, dei veicoli elettrici e ibridi circolanti in Europa; in seguito

si valutano le previsioni di generazione elettrica da fonti rinnovabili nelle diverse nazioni. Dal calcolo dei costi complessivi e dei ricavi ottenuti mediante le esternalità associate all'evitato inquinamento, si possono infine determinare i chilometri di infrastruttura WPT potenzialmente realizzabili negli anni, e le loro relative percentuali sui chilometraggi totali di autostrade.

Capitolo 1

Tecnologia Wireless Power Transfer

1.1 Evoluzione storica

La trasmissione di energia elettrica senza fili, in inglese “Wireless Power Transfer” (WPT), deve la sua realizzazione allo studio dell’elettromagnetismo. In particolare, essa si basa sul principio dell’induzione elettromagnetica, scoperto e dimostrato dal fisico britannico Michael Faraday nel 1831, ossia il fenomeno attraverso il quale un campo magnetico variabile nel tempo, che interagisce con un circuito elettrico, è in grado di indurre una forza elettromotrice senza che vi sia alcun contatto elettrico tra la sorgente del campo magnetico e il circuito stesso.

Tale scoperta, unita alle leggi fondamentali che governano i campi elettrico e magnetico formulate da André-Marie Ampère e James Clerk Maxwell, ha permesso al fisico ed inventore serbo Nikola Tesla, tra la fine del XIX secolo e l’inizio del XX secolo, di realizzare esperimenti basati sulla trasmissione di energia senza conduttori.

L’intento era quello di favorire la distribuzione dell’energia elettrica ad alta tensione destinata all’illuminazione di strade ed abitazioni maggiormente isolate rispetto ai centri abitati delle città. Tesla, nel 1900, brevettò un sistema per la trasmissione wireless di energia elettrica a lunga distanza mediante l’utilizzo di induttori, attraverso il quale poté definire due parametri fondamentali del trasferimento induttivo:

- aumento della frequenza, al fine di migliorare la capacità di trasferimento di potenza;
- impiego di condensatori connessi alle bobine, per creare un sistema risonante e accrescere l’efficacia della trasmissione [3].

La prima reale applicazione della tecnologia “Inductive Power Transfer” (IPT) è stata sviluppata dall’ingegnere elettrico George Iljitch Babat, il quale nel 1943 costruì il primo prototipo di auto elettrica in grado di sfruttare questa tipologia di ricarica. Il sistema generava una corrente di centinaia di ampere, ad una frequenza pari a 50 kHz, ed una corrente indotta in grado di alimentare un motore da 2 kW, con un’efficienza complessiva del 4%.

Per la realizzazione di un sistema IPT completo per un veicolo elettrico in movimento, si dovette attendere gli anni '80, con la creazione del progetto PATH (Partners for Advanced Transit and Highways) in California, relativo ad un bus elettrico di piccola taglia. Il sistema era in grado di fornire una corrente massima di 2000 A alla frequenza di 400 Hz, con un air-gap (distanza suolo-veicolo) compreso tra 5 cm e 10 cm, generando una potenza di 200 kW. L'efficienza complessiva si aggirava intorno al 60% [4].

In Italia invece, a partire dal 2002, sono stati avviati due distinti progetti nelle città di Genova e Torino, inerentemente al trasporto pubblico, per la ricarica wireless statica di autobus elettrici; il rendimento medio, calcolato sulla base della quantità di energia trasferita dalla rete elettrica alla batteria del veicolo, è pari al 95%.

1.2 Principi di funzionamento

Il trasferimento wireless di energia avviene mediante prelievo di energia elettrica dalla rete, la quale viene poi trasferita ad un carico elettrico senza che vi sia alcun contatto fisico tra sorgente e ricevitore, sfruttando l'aria come mezzo di propagazione.

Per WPT si intende quell'insieme di sistemi in grado di trasferire energia elettrica senza fili, e si suddivide in diverse sottocategorie a seconda della tipologia di accoppiamento utilizzato: esso può essere infatti magnetico (induttivo), elettrico (capacitivo) o elettromagnetico, detto anche "collegamento in campo lontano" o *far-field*. Nello specifico, in questo lavoro di tesi, si intende focalizzare l'attenzione sulla particolare tecnologia IPT (Inductive Power Transfer), ovvero avente un accoppiamento di tipo induttivo che, nel caso di impiego per la ricarica di veicoli elettrici, è risonante per alte potenze [5].

Il principio di funzionamento di un accoppiamento induttivo si basa sull'utilizzo di un campo magnetico variabile nel tempo, generato da una corrente alternata che attraversa un avvolgimento e, concatenandosi con una seconda spira, induce in essa una forza elettromotrice, originando a sua volta una corrente alternata nel circuito secondario. Per circuito primario si intende il trasmettitore, mentre per secondario il ricevitore.

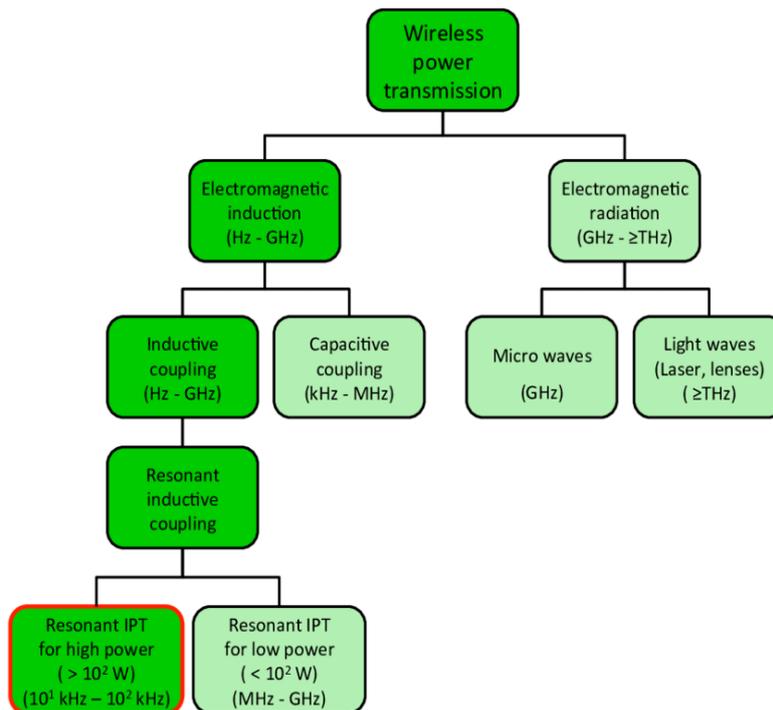


Fig. 1: Different technologies for wireless power transfer [3]

Al fine di determinare l'efficienza complessiva di tale tecnologia, i principali criteri di cui tener conto in fase di progettazione sono quattro:

- potenza trasmessa;
- geometria delle spire;
- parametri di accoppiamento;
- frequenza.

Alla base di questa tecnologia si riscontra un funzionamento simile a quello di un trasformatore, motivo per cui l'analisi di un sistema WPT induttivo si fonda sulla modellizzazione del trasformatore stesso [6].

1.3 Applicazione della tecnologia WPT ai veicoli elettrici

La configurazione standard per un sistema IPT magnetico risonante per la ricarica wireless di veicoli elettrici è composta da tre componenti principali, ciascuno dei quali regolato da un sistema di controllo al fine di garantire performance ottimali dell'apparato complessivo.

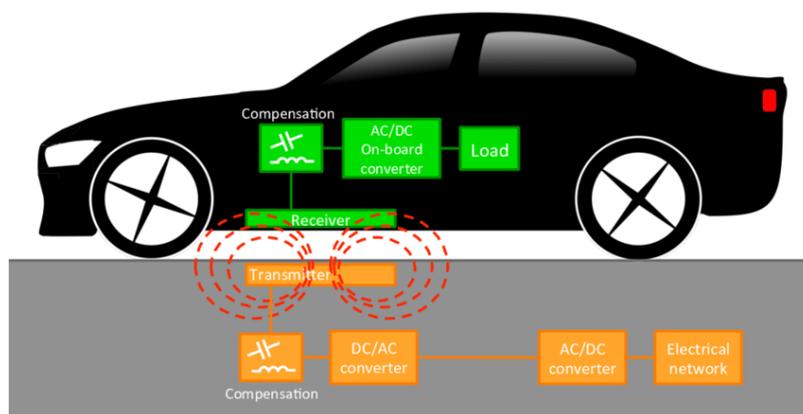


Fig. 2: Block diagram of an Inductive Power Transfer system for EVs [3]

Essi si suddividono in:

1. unità di alimentazione da rete elettrica;
2. unità di trasmissione (circuito primario);
3. unità di ricezione (circuito secondario).

La prima unità comprende un convertitore di potenza ed un inverter, i quali permettono di ottenere valori ottimali di frequenza, voltaggio e potenza della corrente elettrica, in modo da poter trasferire quest'ultima al circuito primario con le minori perdite possibili. In particolare, il range di frequenze è compreso tra 10 kHz e 100 kHz; tipicamente si assume 20 kHz come valore standard.

La seconda unità è fondamentalmente composta da due pad magneticamente accoppiati e caratterizzati da una propria induttanza e resistenza. In altre parole, l'unità di trasmissione non è altro che un trasformatore caratterizzato da una permeabilità magnetica del nucleo molto bassa, dal momento che il nucleo stesso è composto da aria. A seconda della loro funzione, è possibile distinguere le due bobine in trasmettitore e ricevitore; quest'ultimo è posto al di sotto del veicolo stesso, mentre il trasmettitore è generalmente collocato all'interno del manto stradale. Riguardo la trasmissione di energia, è sicuramente importante considerare come i vari fattori fisici, primo tra i quali la posizione reciproca tra i due pad, influenzano la potenza erogata. Nello specifico, i principali parametri da valutare sono il disallineamento orizzontale e l'air-gap (distanza in aria) tra trasmettitore e ricevitore, quest'ultimo tipicamente compreso tra 10 cm e 20 cm.

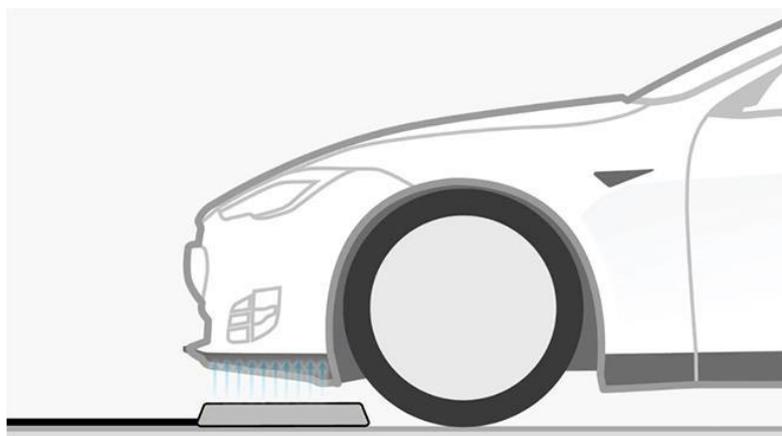


Fig. 3: Simple representation of wireless power transmission for EVs

La terza unità, interamente posta all'interno dell'autovettura, include un raddrizzatore di corrente e il pacco batterie. È importante notare che uno dei principali svantaggi è rappresentato dall'alto costo della batteria, nonché dal suo elevato peso, anche se proprio quest'ultimo viene ridotto notevolmente rispetto al caso di un veicolo elettrico tradizionale con sistema di ricarica standard [7].

1.4 Metodi di ricarica wireless per veicoli elettrici

La ricarica WPT per auto elettriche presenta numerosi vantaggi se comparata al classico metodo di ricarica il quale, mostrando svariate problematiche connesse a colonnine pubbliche o private, tempi e cablaggi, fatica a diffondersi adeguatamente sul mercato. Grazie ad un notevole sviluppo della tecnologia WPT, è stato possibile incrementare le distanze di trasferimento di potenza, passando da pochi millimetri a diversi centimetri; nonostante ciò, però, esistono ancora numerosi problemi legati alla commercializzazione di questo sistema di ricarica. Le principali difficoltà riguardano: il raggiungimento di efficienze di trasferimento di potenza accettabili, l'ottenimento di tolleranze più ampie relative al disallineamento tra trasmettitore e ricevitore, la risoluzione di problematiche associate alla sicurezza e alla salute delle persone, l'abbassamento degli elevati costi di installazione. Le due principali tipologie di ricarica sono: statica (*static IPT*) e dinamica (*dynamic IPT*).

La ricarica WPT statica rappresenta una valida alternativa alla normale ricarica elettrica; anche in questo caso, però, il veicolo necessita di essere parcheggiato durante tutta la fase di carica. I rendimenti calcolati in laboratorio per questo tipo di tecnologia sono sufficientemente alti, e si aggirano intorno al 90%, come visibile in tabella 1. Negli ultimi anni diverse aziende hanno investito in questo campo sviluppando e commercializzando progetti quali “PLUGLESS” di Evatran, “Qualcomm HaloIPT” di Qualcomm Co., “Leaf” di Nissan Motor Co. e “2014 Volt” di Chevrolet [8].

Institute	Power (kW)	Switching frequency (kHz)	Air-gap (mm)	Efficiency (%)	Year
University of Auckland	2	20	200	-	2011
	2-7	20	100-250	-	2013
	1	85	100	91.3 ^c	2015
UM-Dearborn	3.3	1000	150	95 ^b	2015
	6	95	150	95.3 ^b	2015
	7.7	79	200	96 ^b	2014
KAIST	5-15	20	150	-	2014
Utah State University	5	20	175-265	90 ^a	2012
Saitama University	3	50	200	90 ^b	2012
ETH Zurich	5	100	52	96.5 ^b	2015

a: AC grid to battery pack efficiency b: DC input to battery pack efficiency c: coil efficiency

Tab. 1: Summary of system parameters of selected stationary charging systems [9]

La ricarica WPT dinamica, al contrario, permette al veicolo di caricarsi in movimento, eliminando così la necessità di arrestarsi anche per diverse ore nelle apposite aree di ricarica; ciò porta ad una riduzione della capacità del pacco batterie, e quindi del suo volume e peso. Un’adeguata infrastruttura presente sul territorio in teoria permetterebbe, ai veicoli elettrici in grado di usufruire di tale tecnologia, di circolare in strada senza limiti di autonomia grazie a più frequenti ricariche effettuate in tempi ridotti. Di contro, se comparata alla ricarica statica, la tipologia dinamica presenta rendimenti di alcuni punti percentuali più bassi, come riportato in tabella 2.

Institute	Power (kW)	Switching frequency (kHz)	Air-gap (mm)	Efficiency (%)	Year
KAIST	3-25	20	10-200	72-83 ^a	2009
ORNL	1.5	23	100	75 ^b	2013
NCSU	0.3	100	170	77.82 ^b	2014

a: AC grid to battery pack efficiency b: DC input to battery pack efficiency

Tab. 2: Summary of system parameters of selected dynamic charging systems [9]

Un terzo possibile utilizzo del sistema IPT è quello stazionario, e rappresenta una soluzione intermedia tra le due sopra descritte. Tale tipologia di ricarica avviene quando l'auto, a motore acceso, si ferma per brevi soste (ad esempio nel caso di semaforo rosso) o, per quanto riguarda gli autobus, durante le varie fermate effettuate lungo il percorso stabilito. I rendimenti risultano sufficientemente alti, come nel caso del sistema statico, ad eccezione di alcune perdite connesse al disallineamento tra ricevitore e trasmettitore che si manifestano durante la fermata del veicolo.

1.5 Principali progetti ed enti coinvolti

Alcuni dei promotori che hanno reso possibile lo sviluppo della tecnologia WPT, per quanto concerne le aziende, sono Bombardier, Qualcomm e Conductix-Wampfler. Tra gli enti e le università maggiormente impegnate in questo settore non si può non citare il KAIST (Korea Advanced Institute of Science and Technology), che già dal 2009 ha realizzato diverse generazioni del progetto OLEV (On-line Electric Vehicle), mostrando particolare attenzione allo sviluppo di tecnologie di ricarica wireless per autobus elettrici. Anche l'ORNL (Oak Ridge National Laboratory) negli Stati Uniti d'America ha effettuato uno studio di fattibilità tecnologica riguardante la ricarica senza fili statica e dinamica.

Conductix-Wampfler ha per prima sviluppato e commercializzato su vasta scala il sistema IPT per il trasferimento induttivo di potenza senza contatto. Bombardier ha realizzato diverse soluzioni per la mobilità elettrica mediante IPT, allo scopo di offrire soluzioni commerciali per differenti tipologie di mezzi di trasporto; il progetto PRIMOVE, infatti, riguarda non solo autobus e tram, ma anche veicoli commerciali leggeri, camion ed autovetture private. Qualcomm, a seguito dell'acquisizione dell'azienda HaloIPT nel 2011, in collaborazione con

Renault ha realizzato la tecnologia per la ricarica wireless ad alta efficienza Halo WEVC (Wireless Electric Vehicle Charging) [10].

Il progetto europeo FABRIC (Feasibility analysis and development of on-road charging solutions for future electric vehicles), sviluppato tra il gennaio 2014 e il dicembre 2017 da 25 diverse organizzazioni provenienti da 9 paesi europei, ha avuto come principale obiettivo una dettagliata analisi di fattibilità della ricarica wireless dinamica per veicoli elettrici. Esso è stato in parte finanziato dall'Unione europea, e si è focalizzato sulla fattibilità tecnologica ed economica, oltre che sulla sostenibilità socio-ambientale della tecnologia in questione. A partire da settembre 2012 fino a maggio 2015 è stato realizzato il progetto eCo-FEV, acronimo di "efficient Cooperative infrastructure for Fully Electric Vehicles", il quale ha avuto come scopo primario la creazione di una piattaforma per la mobilità elettrica cooperativa. Tale piattaforma avrebbe permesso di favorire la diffusione dei veicoli elettrici grazie alla comunicazione in tempo reale tra le differenti infrastrutture quali strade, parcheggi e soste, trasporto pubblico, veicoli e sistemi di ricarica. La condivisione e il collegamento tra esse avrebbero permesso di rendere più semplice e completa la guida di un veicolo elettrico, assistendo l'utente attraverso servizi di gestione ottimale del sistema di ricarica, di fatto aumentando l'autonomia delle autovetture stesse. Nel 2013, in Spagna, la società di energia elettrica Endesa, insieme ad un consorzio composto da 4 imprese e 3 organismi accademici di ricerca, ha avviato il progetto VICTORIA (Vehicle Initiative Consortium for Transport Operation and Road Inductive Applications) per lo sviluppo di un sistema di ricarica senza l'utilizzo di cavi. Esso si propone di raddoppiare l'autonomia degli autobus elettrici nella città di Malaga, senza modificarne i tempi di operazione per la ricarica, combinando allo stesso tempo le tecnologie IPT statica e dinamica. Infine, da ottobre 2012 a marzo 2015, si è svolto il progetto europeo UNPLUGGED, il quale è stato composto da 17 partner differenti e ha compreso alcune tra le principali aziende del settore energetico (Enel, Endesa), automobilistico (Volvo, Continental) e dei trasporti (Transport for London), oltre a diverse società e centri di ricerca. Esso è nato con l'obiettivo di realizzare un'infrastruttura veloce e flessibile, in grado di ricaricare le batterie dei veicoli elettrici mediante un sistema IPT statico ad alta potenza; nello specifico, è stato progettato e costruito un sistema di ricarica wireless rapida fino a 50 kW, che ha consentito di completare l'80% della carica in meno di 30 minuti. UNPLUGGED inoltre ha indagato nel dettaglio riguardo l'effettivo impatto socio-economico, la fattibilità tecnologica, l'accettazione da parte del cliente, l'interoperabilità e la sicurezza di differenti soluzioni per la ricarica di veicoli elettrici [3].

Technology provider	Application	Power (kW)	Frequency (kHz)	Air-gap (mm)	Maximum efficiency (%)
IPT technology	Buses (static)	60	20	40	90 ^a
WAVE	Buses (static)	25-50	20	150-250	90 ^b
Bombardier (PRIMOVE)	Buses (static and dynamic)	200	N/A	N/A	N/A
KAIST (OLEV 3G)	Buses (dynamic)	200	20	100-200	74 ^b
Halo IPT	Cars (static and dynamic)	3.3-6.6-22	85	125-175	95 ^d
WiTricity	Cars (static)	3.6-7.7-11	N/A	100-150	94 ^a
Evatran (PLUGLESS)	Cars (static)	3.3	19.5	100	88.8 ^b
CIRCE/Endesa (UNPLUGGED)	Buses (static)	50	25	250	N/A
ORNL	Cars (dynamic)	2.2	23	100	75 ^c
Politecnico di Torino (POLITO CWD)	Light commercial vehicles and cars (dynamic)	20	85	100-250	91 ^c

a: info about measurement points n.a. b: AC grid to battery input c: AC/DC output to AC/DC on board output d: coil to coil

Tab. 3: Summary of system parameters of main IPT projects [3]

1.6 Vantaggi e svantaggi del sistema di ricarica WPT

I principali vantaggi della tecnologia di ricarica wireless, se comparata alla ricarica standard per auto elettriche, risultano essere:

- assenza di cavi necessari alla ricarica del veicolo;
- riduzione del peso e dell'ingombro del pacco batterie;
- minori consumi di energia elettrica dovuti al peso ridotto;
- bassi costi di manutenzione;
- tempi di ricarica inferiori;

- maggiore autonomia a parità di capacità della batteria;
- minore vulnerabilità del sistema a condizioni climatiche avverse;
- minori danni e rischi legati ad atti vandalici.

Al contrario, gli svantaggi principali sono i seguenti:

- elevati costi di installazione;
- efficienze mediamente più basse;
- maggiori complessità tecnologiche;
- difficoltà connesse alla costruzione e alla messa in opera delle infrastrutture;
- più campi elettromagnetici ad alta frequenza, potenzialmente dannosi per l'uomo;
- mancanza di normative e regolamentazioni specifiche del settore.

Capitolo 2

Inquinanti atmosferici ed emissioni

Tutti i processi di combustione, che siano finalizzati alla produzione di energia elettrica o calore, oppure relativi ai veicoli con motori a combustione interna (ICE, Internal Combustion Engine), o ancora quelli riguardanti le industrie in generale, danno luogo alla formazione e di conseguenza all'immissione nell'atmosfera terrestre di sostanze inquinanti. Esse, in base alla tipologia, al livello di concentrazione in ambiente e alla durata dell'esposizione, determinano un peggioramento più o meno grave della qualità dell'aria con danni a medio-lungo termine alla salute dell'uomo, agli altri organismi viventi e quindi all'ecosistema in generale, oltre che ai materiali. Com'è noto, i principali parametri che influiscono sulla quantità e sulla qualità degli inquinanti emessi sono: la chimica del fenomeno di combustione (natura del combustibile stesso e il rapporto con il comburente) e le condizioni fisiche del processo (temperatura, tempi di contatto, turbolenza e mescolamento, presenza di altre sostanze) [11].

2.1 Principali inquinanti ed effetti sulla salute umana e sull'ambiente

Le principali sostanze inquinanti di origine antropica sono le seguenti:

- i composti ossigenati del carbonio, ovvero il monossido di carbonio (CO) e l'anidride carbonica (CO₂);
- gli ossidi di zolfo, SO_x;
- gli ossidi di azoto, NO_x;
- il particolato atmosferico, particelle solide sospese a loro volta classificate in base alle dimensioni, noto generalmente come PM (Particulate Matter);
- i composti organici volatili non metanici, indicati con la sigla NMVOC (Non-Methane Volatile Organic Compounds), tra i quali in particolare il benzene (C₆H₆).

Il monossido di carbonio (CO) è un gas incolore, inodore, infiammabile e molto tossico; esso si forma a seguito della combustione incompleta, per difetto d'aria, di sostanze organiche. I quantitativi maggiori di CO sono presenti soprattutto nelle aree urbane, a causa

dell'inquinamento prodotto dai gas di scarico degli autoveicoli anche se, rispetto alla fine del secolo scorso, la quantità di monossido di carbonio emessa dalle autovetture è diminuita grazie al miglioramento dell'efficienza dei motori, all'impiego delle marmitte catalitiche e ai più stringenti vincoli imposti dalla normativa europea sul controllo delle emissioni. Il CO, una volta inalato, specialmente in luoghi chiusi o comunque aventi concentrazioni molto alte, si lega all'emoglobina contenuta nei globuli rossi formando un composto inattivo fisiologicamente che viene chiamato carbossiemoglobina, il quale rilascia più difficilmente ossigeno ai tessuti. Una concentrazione di CO in aria pari a 2000-4000 ppm (0,2%-0,4%) provoca la morte per asfissia in 15 minuti, a seguito della perdita di conoscenza; in presenza di una concentrazione di 1000 ppm si sopravvive per circa 90 minuti. Gli effetti sull'ambiente sono da ritenersi sostanzialmente trascurabili.

Per quanto riguarda l'anidride carbonica, o diossido di carbonio (CO₂), essa è globalmente riconosciuta quale il principale gas serra nell'atmosfera terrestre; in altre parole, rappresenta la causa primaria del noto fenomeno dell'effetto serra, il quale a sua volta contribuisce in maggior misura al riscaldamento globale. Sebbene essa sia parecchio dannosa per l'ecosistema, risulta essere molto meno tossica per gli esseri umani rispetto alle sopra indicate sostanze inquinanti, e di conseguenza potrà essere trascurata nelle successive valutazioni effettuate in questo lavoro.

Gli ossidi di zolfo presenti in atmosfera si distinguono in: anidride solforosa (SO₂) e anidride solforica (SO₃). Questi composti vengono spesso indicati con il termine comune SO_x, anche se il primo dei due è presente in concentrazioni maggiori rispetto al secondo. L'anidride solforosa o biossido di zolfo è un gas incolore, irritante, non infiammabile e molto solubile in acqua; esso deriva dall'ossidazione dello zolfo a seguito dei processi di combustione delle sostanze che contengono questo elemento sia come impurezza, sia come componente fondamentale. A sua volta dall'ossidazione dell'anidride solforosa si origina l'anidride solforica la quale, reagendo con l'acqua, forma l'acido solforico, sostanza in gran parte responsabile del fenomeno delle piogge acide. L'acidificazione delle precipitazioni porta a gravi danni ai bacini idrici e alla vegetazione, con la conseguente compromissione dell'equilibrio degli ecosistemi. Inoltre sui metalli, sui materiali da costruzione e sulle vernici si riscontrano degli effetti corrosivi non trascurabili. Per quanto riguarda i danni all'uomo, l'SO₂ è un forte irritante dell'apparato respiratorio e un'esposizione prolungata, anche a concentrazioni minime, può provocare bronchiti, asma, tracheiti, irritazioni della pelle, degli occhi e delle mucose. Già alla concentrazione di 0,3 ppm, l'anidride solforosa comincia a non essere più tollerabile per l'uomo.

Con ossidi di azoto (NO_x), si intende principalmente la somma di monossido di azoto (NO) e biossido di azoto (NO_2), anche se sono presenti prevalentemente nella forma NO e in maniera meno rilevante di NO_2 [11]. Il primo è un gas incolore e inodore, e viene prodotto in particolar modo nel corso dei processi di combustione ad alte temperature. La tossicità del monossido di azoto è limitata, di conseguenza la sua azione sull'uomo è relativamente trascurabile. Esso, una volta ossidato in atmosfera, origina il biossido di azoto, un gas tossico dall'elevato potere irritante, molto reattivo e corrosivo. La NO_2 è quattro volte più tossica dell'NO, e a concentrazioni di circa 13 ppm provoca irritazioni alle mucose degli occhi e del naso. Può inoltre contribuire all'insorgere di varie alterazioni delle funzioni polmonari, di bronchiti croniche, di asma ed enfisema polmonare. Gli effetti sull'ambiente e sulla vegetazione provocati dall'inquinamento di ossidi di azoto sono meno rilevanti se paragonati a quelli causati dal biossido di zolfo. Il meccanismo principale di aggressione è comunque costituito dall'acidificazione delle piogge, con il conseguente deterioramento di edifici ed opere d'arte. La principale fonte antropica degli ossidi di azoto è data dalle combustioni ad alta temperatura, come ad esempio quelle che avvengono nei motori a combustione interna.

Il particolato, indicato spesso con la sigla PM (Particulate Matter), è uno dei maggiori inquinanti presenti in atmosfera. Esso può essere costituito da differenti sostanze: sabbia, ceneri, polveri, fuliggine, sostanze vegetali, composti metallici, fibre tessili naturali e artificiali, sali e altro. Le particelle solide emesse dai processi di combustione possono derivare da ceneri, ovvero sostanze inorganiche incombustibili, oppure da particelle non combuste derivanti da fenomeni di combustione incompleta o di pirolisi. In relazione al diametro che caratterizza le particelle, rispettivamente $10\ \mu\text{m}$ e $2,5\ \mu\text{m}$, si distinguono le due grandi categorie di particolato: PM_{10} e $\text{PM}_{2.5}$. Anche il livello di impatto sulla salute dell'uomo è influenzato dalla tipologia e dalle dimensioni delle particelle, suddividendo le polveri in: inalabili, capaci di penetrare nel tratto superiore dell'apparato respiratorio, toraciche, ovvero quelle in grado di raggiungere i polmoni, e respirabili, in grado di penetrare nel tratto inferiore dell'apparato respiratorio (alveoli polmonari). Nei luoghi di lavoro più soggetti all'inquinamento da particolato, l'inalazione prolungata di queste particelle può provocare reazioni fibrose e necrosi dei tessuti che comportano una broncopolmonite cronica, accompagnata spesso da enfisema polmonare. Le polveri sospese, inoltre, favoriscono la formazione di nebbie e nuvole, provocando così una diminuzione della visibilità atmosferica e aggravando il fenomeno delle piogge acide. Il particolato di origine antropica è generalmente dovuto all'utilizzo di combustibili fossili, alle emissioni degli autoveicoli e all'usura di pneumatici e freni.

I composti organici volatili non metanici (NMVOC) comprendono una grossa varietà di differenti composti chimici; i più rilevanti risultano essere il benzene, il toluene, la formaldeide, il cicloesano e l'acetone. Questi composti rientrano tra i non metanici in quanto si tende ad escludere il CH₄ tra gli agenti inquinanti, poiché risulta avere un minor impatto sulla salute nel novero delle sostanze nocive presenti in atmosfera. Esso presenta però un elevato GWP (Global Warming Potential), ossia l'indice che esprime il contributo di un gas serra in rapporto all'effetto serra causato dalla CO₂, il cui valore di riferimento è pari a 1. Tra i NMVOC maggiormente presenti in ambiente, uno dei composti più dannosi è sicuramente il benzene (C₆H₆), composto base della classe degli idrocarburi aromatici. A temperatura ambiente esso si presenta come un liquido incolore in grado di evaporare molto rapidamente; è altamente infiammabile e, se inalato, fortemente cancerogeno per l'uomo. Gli effetti a breve termine agiscono sul sistema nervoso, mentre quelli a lungo termine possono colpire il midollo osseo e ridurre progressivamente le piastrine presenti nel sangue; a seguito di esposizioni variabili (da meno di 5 anni a più di 30) sono state riscontrate varie forme di leucemia. Circa l'80% delle emissioni di benzene proviene dai veicoli alimentati a benzina, mentre la restante parte deriva principalmente da industrie e raffinerie di petrolio [12].

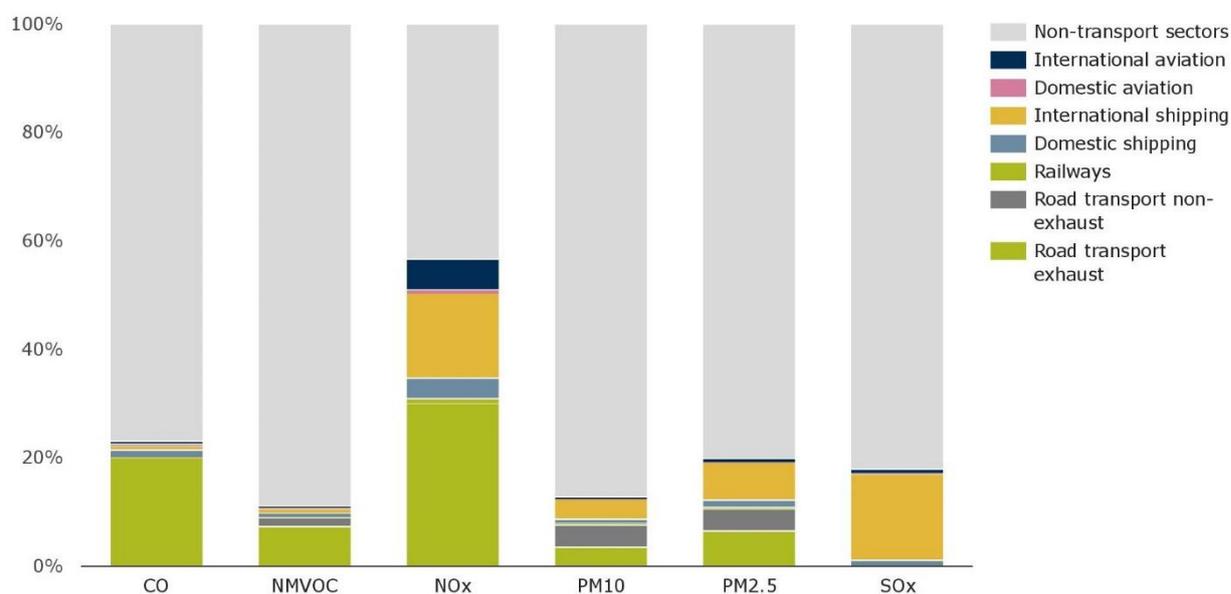


Fig. 4: Contribution of the transport sector to total emissions of the main air pollutants [13]

2.2 Altri inquinanti

Altre sostanze inquinanti presenti nell'ambiente in quantità minori, ma potenzialmente cancerogene o comunque dannose per la salute umana, sono:

- i metalli pesanti, nello specifico arsenico (As), cadmio (Cd), cromo (Cr), mercurio (Hg), nichel (Ni) e piombo (Pb);
- gli idrocarburi policiclici aromatici, noti anche con l'acronimo IPA o PAH (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons);
- i policlorobifenili (PCB);
- l'esaclorobenzene (HCB);
- le diossine.

Le ultime tre categorie fanno parte dei cosiddetti inquinanti organici persistenti o POP (Persistent Organic Pollutants), che comprendono anche: aldrin, dieldrin, endrin, clordano, diclorodifeniltricloroetano (DDT), eptacloro, mirex, toxafene e furano.

Per metalli pesanti si intendono quei metalli aventi una densità pari o superiore a $4,5 \text{ g/cm}^3$. Si tratta di componenti naturali della crosta terrestre non degradati dall'attività biologica e fotochimica, pertanto non smaltibili. Alcuni di questi sono stati classificati come cancerogeni dall'IARC (International Agency for Research on Cancer, l'agenzia internazionale per la ricerca sul cancro), e la loro tendenza ad accumularsi nei tessuti degli esseri viventi li rende dannosi sia per l'ambiente che per la salute umana. L'arsenico è in grado di irritare stomaco, intestino e polmoni, e di ridurre la produzione di globuli rossi e bianchi nel sangue. Può inoltre aumentare il rischio di cancro alla pelle, al fegato e al sistema linfatico. Il cromo e il cadmio possono arrecare danno ai reni. Il nichel agisce negativamente sull'apparato respiratorio, sul sistema immunitario e può inoltre causare allergie cutanee. Infine il piombo può essere assorbito dai polmoni ed entrare nel circolo sanguigno, distribuendosi in ossa, fegato, reni, muscoli e cervello, provocando i seguenti effetti collaterali: anemia, danni al sistema nervoso, riproduttivo, cardiovascolare, endocrino, gastro-intestinale e immunitario [14].

Gli idrocarburi policiclici aromatici identificati in atmosfera e classificati sono più di cento, tra i quali i più dannosi risultano essere: benzo(a)pirene (BaP), antracene, acenaftene, acenaftilene, fluorene, fenantrene e pirene. Essi sono originati a seguito della combustione completa di materiale organico e dall'utilizzo di olio combustibile, gas, carbone e legno nella produzione di

energia. In particolare, le principali fonti di origine antropica sono: i veicoli, gli impianti termici, le centrali termoelettriche e gli inceneritori. Gli IPA presenti nell'aerosol urbano sono spesso associati alle polveri sottili (diametro minore di 2 μm) e quindi in grado di raggiungere gli alveoli polmonari, di conseguenza sangue e tessuti. Oltre ad essere agenti irritanti per naso, gola ed occhi, l'IARC ha classificato alcuni di essi, in particolare il BaP, come possibili o probabili cancerogeni per l'essere umano. Per quanto riguarda l'impatto ambientale, gli IPA contribuiscono al cosiddetto fenomeno dello "smog fotochimico", ovvero quel tipo di inquinamento dovuto alla formazione, tramite luce solare, di una miscela di inquinanti con potere fortemente ossidante [15].

I policlorobifenili (PCB) sono una classe di composti aromatici organici, prodotti a partire dagli anni '30 per vari usi commerciali e industriali. I PCB vengono ricavati a partire dal petrolio e dal catrame, dai quali si estrae il benzene che viene successivamente trasformato in bifenile ed infine clorurato a policlorobifenile. Essi sono composti chimici molto stabili, resistenti alla fotodegradazione, non ossidabili, non attaccano i metalli e sono poco solubili in acqua. Non sono infiammabili, si decompongono solo oltre i 1000°C, sono poco volatili e scarsamente biodegradabili. A causa della loro dimostrata tossicità, a partire dai primi anni '70, sono stati ritirati dal commercio e ne è stato vietato l'utilizzo. Nonostante ciò, essi sono ancora presenti in ambiente a causa delle loro particolari caratteristiche chimico-fisiche [16]. Nel 2013 i PCB sono stati riclassificati dall'IARC come cancerogeni certi; la loro tossicità si manifesta mediante disordini cutanei, danni epatici, disfunzioni endocrine e riproduttive.

L'esaclorobenzene (HCB) è un composto organico clorurato avente moderata volatilità, è insolubile in acqua e presenta elevati tempi di dimezzamento che ne comportano una lenta degradazione in ambiente. L'HCB è stato largamente utilizzato come sostanza fungicida ma, dagli anni '70 in poi, ne sono stati drasticamente ridotti la produzione e l'uso industriale, arrivando ad essere del tutto proibito su scala mondiale con la Convenzione di Stoccolma del 2001. L'esaclorobenzene è stata classificata come sostanza potenzialmente cancerogena per gli esseri umani, e diversi studi hanno evidenziato un aumento dell'incidenza di tumori al fegato, ai reni, ai polmoni e alla tiroide. Brevi esposizioni accidentali ad elevate dosi di HCB possono provocare porfiria cutanea tarda, intossicazione del fegato ed effetti neurologici [17].

Con il termine diossine si indica una classe di sostanze aventi caratteristiche chimiche, fisiche e tossicologiche comuni tra loro, nello specifico: insolubilità in acqua, resistenza alla degradazione chimica e biologica, termostabilità e alta liposolubilità. Proprio a causa di quest'ultima proprietà, i tempi di permanenza di tali sostanze nei tessuti e negli organi di animali ed esseri umani sono piuttosto prolungati. Le diossine, in generale, sono sottoprodotti inquinanti derivanti da una serie di processi chimici o di combustione, come ad esempio avviene negli inceneritori o nelle industrie chimiche, siderurgiche e metallurgiche. La principale fonte di esposizione umana alle diossine è rappresentata dall'assunzione di alimenti contaminati e, in modo più limitato, anche dall'ingestione o dall'inalazione di polvere, oltre che direttamente dal contatto con la pelle [18]. L'improvvisa e acuta esposizione ad elevati livelli di diossine può provocare gravi effetti sulla salute umana, tra i quali: malattie della pelle, in particolare la cloracne (forma persistente di acne), e alterazioni delle normali funzioni del fegato, dell'apparato endocrino e riproduttivo. Invece l'esposizione per lunghi periodi di tempo a dosi più basse di diossine è in grado di causare danni al sistema immunitario ed endocrino, oltre che determinare effetti negativi sullo sviluppo del feto, se essa avviene durante il periodo della gestazione.

La tetracloro-dibenzo-diossina, spesso indicata con l'acronimo TCDD, è una sostanza chimica estremamente tossica, nonché la più nota e dannosa tra le diossine. Essa è classificata come sicuramente cancerogena (gruppo 1) dall'IARC, ed è diventata tristemente famosa a seguito del disastro di Seveso del 1976. La TCDD è irritante per gli occhi, per la cute e per le vie respiratorie; può provocare effetti particolarmente nocivi sui sistemi cardiovascolare e linfatico, su stomaco e reni, e può colpire in forma tumorale gli organi genitali e il fegato [16].

2.3 Normativa italiana e limiti di legge

In Italia, la norma quadro in materia di controllo dell'inquinamento atmosferico è rappresentata dal D. Lgs. 155/2010 "Attuazione della direttiva 2008/50/CE relativa alla qualità dell'aria ambiente e per un'aria più pulita in Europa", il quale ha abrogato il decreto legislativo 351 del 1999 e ha definito i valori limite da non superare per alcune tra le principali sostanze inquinanti, oltre che le soglie di allarme e i valori obiettivo per altre [19]. Nella tabella 4 sono riportate le concentrazioni limite, imposte dalla normativa vigente, per le principali sostanze nocive descritte nelle sezioni precedenti.

Pollutant	Limit name	Statistical indicator	Value
SO₂	Warning treshold	Exceeding the threshold value for 3 consecutive hours	500 µg/m ³
	Hourly limit for human health protection	1-hour average	350 µg/m ³ not to be exceeded more than 24 times per year
	Daily limit for human health protection	24 hours average	125 µg/m ³ not to be exceeded more than 3 times per year
	Critical level for vegetation protection	Annual average	20 µg/m ³
NO_x	Critical level for vegetation protection	Annual average	30 µg/m ³
NO₂	Warning treshold	Exceeding the threshold value for 3 consecutive hours	400 µg/m ³
	Hourly limit for human health protection	1-hour average	200 µg/m ³ not to be exceeded more than 18 times per year
	Annual limit for human health protection	Annual average	40 µg/m ³
PM₁₀	Daily limit for human health protection	24 hours average	50 µg/m ³ not to be exceeded more than 35 times per year
	Annual limit for human health protection	Annual average	40 µg/m ³
PM_{2.5}	Annual limit for human health protection	Annual average	25 µg/m ³
CO	Limit for human health protection	Daily maximum of 8 hours moving average	10 mg/m ³
BaP	Target value	Annual average	1 ng/m ³

C₆H₆	Annual limit for human health protection	Annual average	5 µg/m ³
Ni	Target value	Annual average	20 ng/m ³
As	Target value	Annual average	6 ng/m ³
Cd	Target value	Annual average	5 ng/m ³
Pb	Annual limit for human health protection	Annual average	0.5 µg/m ³

Tab. 4: Limit values for human health and vegetation protection of main pollutants [19]

Capitolo 3

Panorama del settore automobilistico italiano

In Italia, al 2016, risultano essere presenti circa 37,9 milioni di autovetture circolanti, valore che non tiene conto di veicoli commerciali, autobus, motocicli, autocarri e così via. In questo lavoro di tesi si focalizza l'attenzione sul solo parco auto composto da veicoli privati, analizzandone la classificazione in base al tipo di alimentazione, ai consumi e alle emissioni prodotte, valutando infine un possibile scenario di impatto ambientale in cui si ha una riduzione delle auto con motore a combustione in favore di un corrispettivo aumento di veicoli elettrici.

3.1 Suddivisione del parco auto in base alla tipologia di alimentazione

Più del 90% del parco auto italiano è composto da veicoli alimentati a benzina o a gasolio: rispettivamente il 48,5% e il 42,9%. Escludendo le auto ibride ed elettriche, ancora poco diffuse sul mercato nazionale (meno dell'1% del totale), la restante parte è coperta da veicoli bi-fuel, ovvero benzina-GPL o benzina-metano.

Nella tabella 5 sono riportati in dettaglio tutti i valori relativi alla suddivisione per tipologia di alimentazione, per ciascuna classe Euro di appartenenza.

Fuel	Euro 0	Euro 1	Euro 2	Euro 3	Euro 4	Euro 5/6	TOTAL	%
Petrol	3.000.216	914.076	3.207.531	2.728.650	5.046.214	3.444.125	18.360.105	48,5
Petrol or LPG	211.890	67.018	175.987	116.324	944.951	694.843	2.211.368	5,8
Petrol or CNG	37.540	15.070	60.412	57.754	346.610	393.796	911.246	2,4
Diesel	585.712	203.250	1.088.462	3.229.806	5.428.509	5.724.472	16.260.625	42,9
Others	429	1	6	30	7.351	113.427	126.987	0,33
TOTAL	3.839.290	1.199.475	4.532.420	6.132.690	11.773.707	10.370.668	37.876.138	100

Tab. 5: Vehicles subdivision in Italy (2016) according to fuel source and Euro class [20]

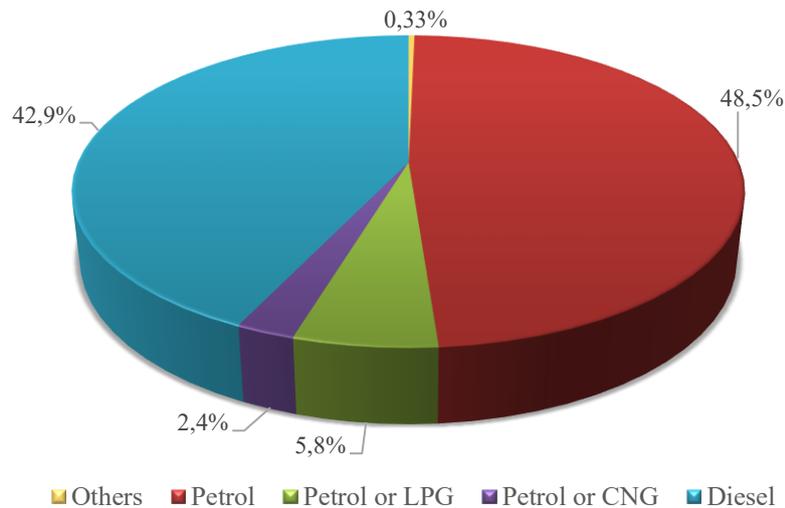


Fig. 5: Type of fuel subdivision [20]

Nonostante la forte dipendenza da combustibili fossili, i veicoli elettrici rappresentano sempre più una valida alternativa ad impatto ambientale assai contenuto. Hanno inoltre costi di manutenzione nettamente inferiori, bassi costi associati alla ricarica elettrica ed elevate efficienze di trasmissione. Essi, pur avendo svariati aspetti positivi, faticano ancora a diffondersi su larga scala a causa di alcuni svantaggi: limitata autonomia del veicolo, mancanza di adeguate infrastrutture di ricarica di pubblico accesso, tempi di ricarica generalmente lunghi, elevato costo e vita delle batterie relativamente contenuta [21].

3.2 Quadro normativo

Per normative Euro si intendono le classi ambientali, regolamentate dall'Unione europea, progressivamente introdotte nei diversi stati membri a partire dal 1992, relativamente al livello di inquinamento prodotto dai veicoli circolanti su strada. Le auto immatricolate prima di tale data sono identificate come Euro 0, e costituiscono quella classe di vetture non catalizzate a benzina e non ecodiesel; non sono inoltre soggetti ad alcun vincolo emissivo.

Attualmente le norme Euro sono sei.

- Euro 1: indica la classe di autovetture conformi alla Direttiva 91/441 CEE (Comunità Economica Europea) emanata nel luglio 1992. Attraverso quest'ultima, è stato

introdotto l'obbligo di utilizzo della marmitta catalitica, dell'alimentazione ad iniezione e della benzina senza piombo;

- Euro 2: la direttiva europea 94/12, emanata nel 1996, ha ridotto ulteriormente le emissioni inquinanti del 30% e del 55% rispettivamente di monossido di carbonio (CO) e della somma di idrocarburi incombusti e ossidi di azoto (HC + NO_x), rispetto alla norma Euro 1;
- Euro 3: tale classe ambientale comprende i veicoli conformi alla direttiva 98/69 del 2000. Essa ha introdotto il "Nuovo ciclo di guida europeo" (NEDC, New European Driving Cycle), utilizzato in Europa per la valutazione dei consumi di carburante e delle emissioni inquinanti. Ha inoltre implementato il sistema OBD (On-Board Diagnostics), in grado di segnalare eventuali guasti o malfunzionamenti che porterebbero ad aumenti dei livelli emissivi. In relazione alla classe Euro 2, le emissioni sono state ulteriormente ridotte del 30%, 40% e 40% rispettivamente per CO, HC e NO_x;
- Euro 4: indica i veicoli conformi alla direttiva 98/69B del gennaio 2005. Questa ha obbligato le case automobilistiche ad abbassare i livelli di emissione del 57% per la CO e del 47% per HC e NO_x rispetto all'Euro 3, mediante una migliore gestione del combustibile;
- Euro 5: standard emissivo approvato nel settembre 2009 riguardante la riduzione di NO_x del 25%, in relazione alla classe Euro precedente. Al contrario, non è stato in alcun modo modificato il limite riguardante le emissioni di CO;
- Euro 6: questa classe non ha modificato i limiti per le emissioni inquinanti dei veicoli alimentati a benzina, mentre ha imposto un'ulteriore riduzione per quelli alimentati a gasolio, inerentemente ai soli ossidi di azoto. Essa è in vigore dal settembre 2014, e comprende anche le vetture ibride ed elettriche [22].

Nella figura 6 è rappresentato lo scenario al 2016 del parco auto italiano, suddiviso in percentuali per ciascuna classe normativa Euro, evidenziando una netta prevalenza dei veicoli Euro 4.

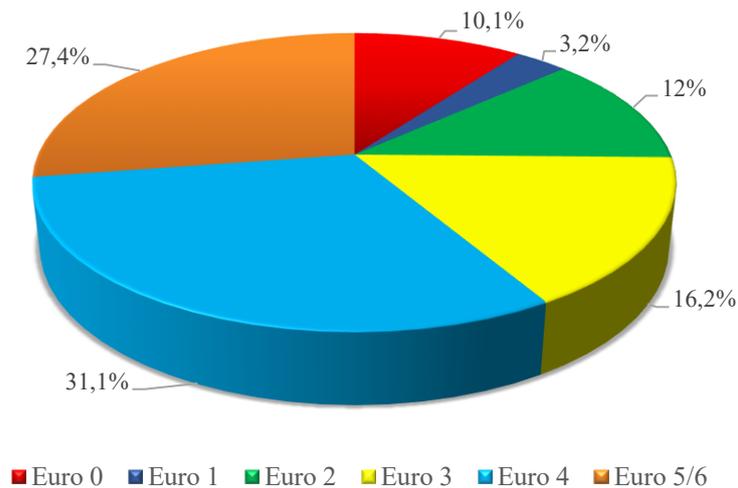


Fig. 6: Euro classes [20]

3.3 Veicolo medio equivalente in Italia

A seguito di queste ultime due classificazioni, è stato definito un veicolo medio equivalente, in grado di rappresentare una significativa unità campione dell'intero panorama automobilistico. Per effettuare questa analisi, è stata calcolata una media ponderata, per ciascuna sostanza nociva, basata sulle differenti classi emissive e tipologie di alimentazione. Nelle figure 7 e 8 sono rappresentati i valori in mg/km e in µg/km dei fattori di emissione, rispettivamente per gli inquinanti principali e secondari. Il calcolo di questi parametri è stato effettuato a partire dai valori presenti nella "Banca dati dei fattori di emissione medi per il parco circolante in Italia" dell'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale), considerando esclusivamente la categoria "passenger cars", ovvero le autovetture private [23]. Le percentuali relative alle differenti tipologie di alimentazione, riportate in tabella 5, sono state moltiplicate per i rispettivi fattori emissivi medi ed infine sommate tra di loro. Questo procedimento è stato svolto per ciascun composto nocivo; i valori relativi al monossido di carbonio, agli ossidi di azoto e ai composti organici volatili non metanici risultano essere i più elevati.

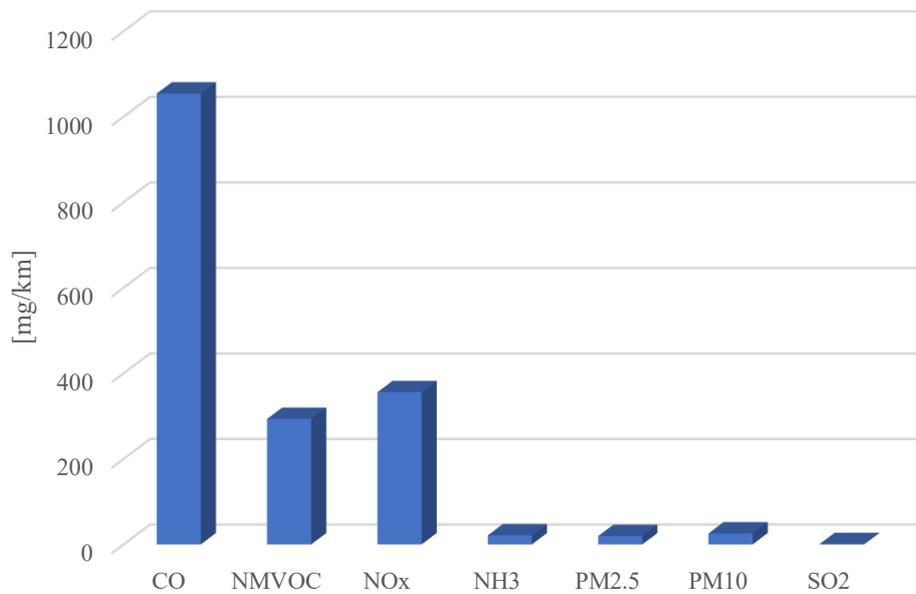


Fig. 7: Vehicles emission factors for main pollutants

Tra gli inquinanti secondari, i due più rilevanti dal punto di vista ambientale sono zinco (Zn) e rame (Cu), seguiti da piombo (Pb) e cromo (Cr), con valori di un ordine di grandezza inferiori. I restanti possono invece essere considerati trascurabili.

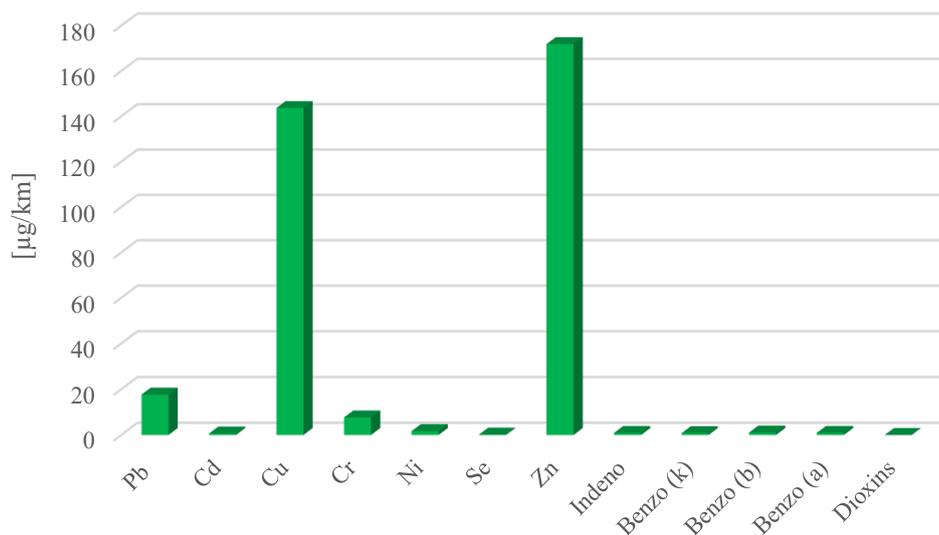


Fig. 8: Vehicles emission factors for secondary pollutants

Infine, in figura 9 sono riportati i valori delle emissioni di tutte le sostanze inquinanti, considerando i grammi immessi in atmosfera in un anno dal singolo veicolo medio equivalente. I dati ottenuti nelle figure 7 e 8 sono stati moltiplicati per il numero di chilometri mediamente percorsi dagli automobilisti italiani (11 125 km [24]), e ridotti di tre ordini di grandezza al fine di ottenere le emissioni in g/anno per un veicolo medio.

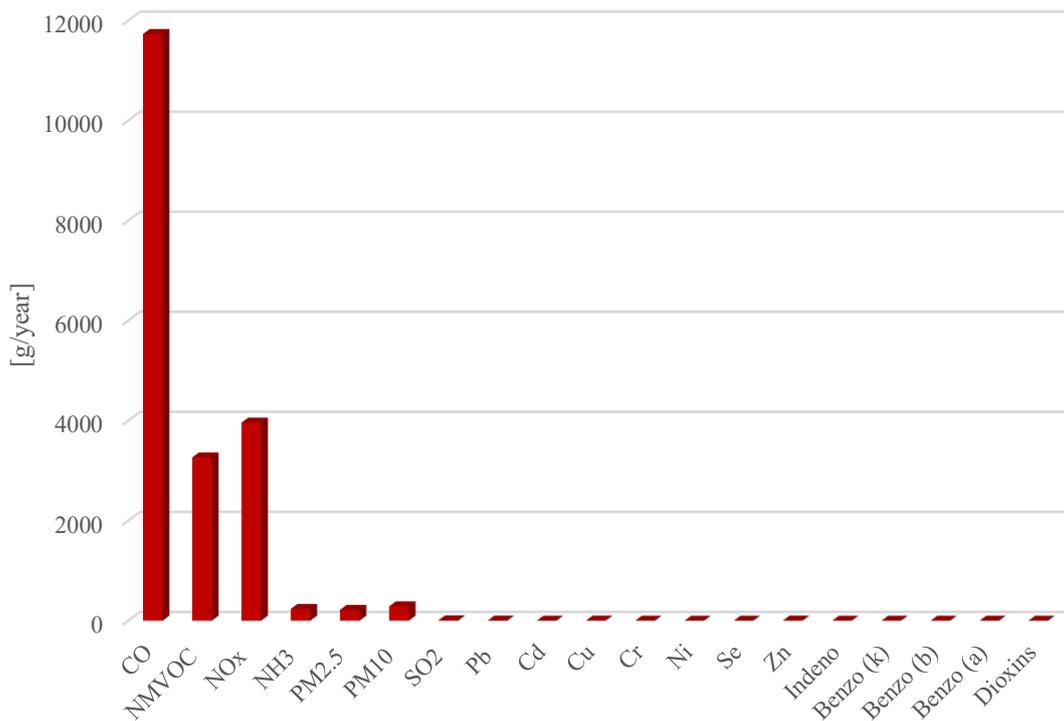


Fig. 9: Annual emissions for the average equivalent vehicle

Come accennato in precedenza, si sottolinea che in tutte le valutazioni è stata trascurata la quota di autovetture ibride, in quanto scarsamente presenti sul territorio nazionale (meno dell'1%), pertanto irrilevanti nel calcolo complessivo delle emissioni.

La metodologia utilizzata per il calcolo delle sostanze inquinanti immesse in atmosfera è basata sull'“Air pollutant emission inventory guidebook 2016”, pubblicato dall'EEA (European Environment Agency) nell'ambito del programma EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme) per il monitoraggio e la valutazione del trasporto a lunga distanza degli inquinanti atmosferici in Europa. Esso è un progetto scientifico a sua volta implementato all'interno della Convenzione sull'inquinamento atmosferico transfrontaliero a lunga distanza,

abbreviata con la sigla CLRTAP (Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution), dell'UNECE (United Nations Economic Commission for Europe), la Commissione economica per l'Europa delle Nazioni Unite. La metodologia è coerente con le linee guida dell'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) del 2006 per gli inventari delle emissioni dei gas a effetto serra, e utilizza il software COPERT versione 5.1.1, finanziato e sviluppato dall'agenzia europea dell'ambiente, in relazione alle attività dell'ETC/ACM (European Topic Centre for Air Pollution and Climate Change Mitigation). Il programma calcola le emissioni annue di inquinanti generate dal traffico stradale, considerando tre diverse condizioni di guida a seconda delle percorrenze medie nei tratti urbani, rurali e autostradali [22][23].

Capitolo 4

Produzione di energia elettrica in Italia

Secondo i dati elaborati da Terna, il fabbisogno di energia elettrica nazionale nell'anno 2016 è stato registrato pari a 314,3 TWh, di cui 277,3 TWh (88,2%) relativi alla produzione interna totale destinata al consumo, e i restanti 37 TWh importati dall'estero (11,8%). Per quanto riguarda i consumi, il settore più energivoro risulta essere quello industriale, tale da rappresentare il 41% della richiesta di energia elettrica complessiva; seguono, in ordine decrescente, i settori terziario (35%), domestico (22%) e infine agricolo (2%).

4.1 Share energetico nazionale

La produzione lorda di energia elettrica in Italia, nel 2016, ha raggiunto i 289,8 TWh: il 68,8% è stato coperto da centrali termoelettriche alimentate da combustibili fossili tradizionali e la restante parte, ovvero il 31,2%, da fonti energetiche rinnovabili. Nella figura 10 è rappresentata nel dettaglio la suddivisione della produzione per fonte.

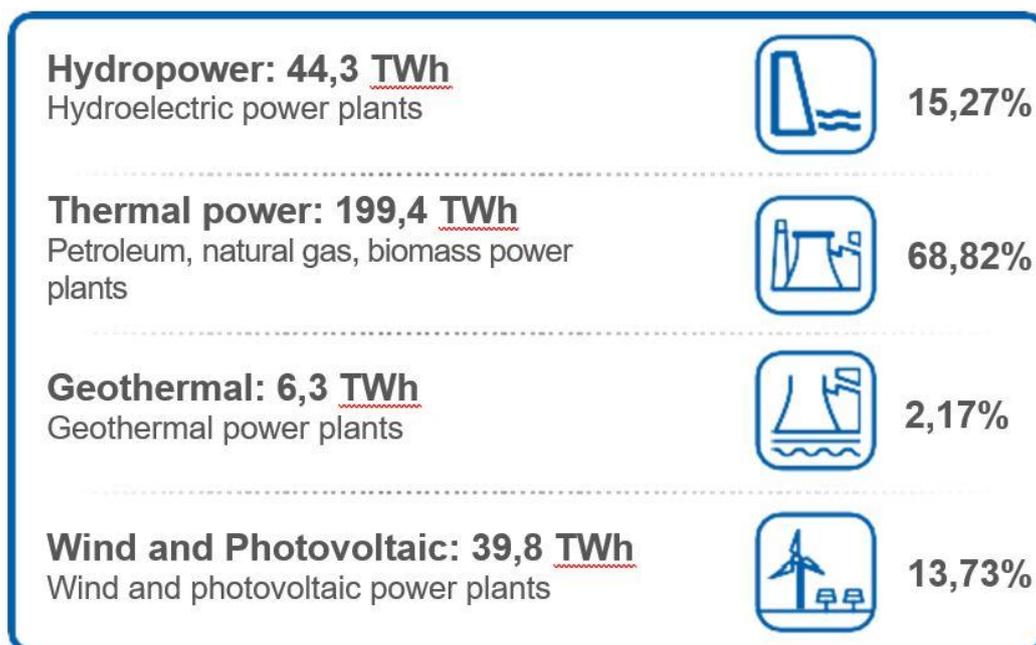


Fig. 10: Electrical energy gross production (Italy, 2016) [25]

4.1.1 Produzione da fonti fossili

Andando a considerare, relativamente alla produzione elettrica lorda, il solo comparto energetico fossile, il combustibile maggiormente utilizzato nelle centrali termoelettriche risulta essere il gas naturale. A partire dal 2009, però, ha inizio un netto calo della produzione da gas naturale, a seguito della crisi economica internazionale e del progressivo ingresso nel mercato delle FER (Fonti Energetiche Rinnovabili). La quota di energia elettrica generata da prodotti petroliferi ha invece subito un forte decremento sin dai primi anni 2000. In generale il trend di produzione dalle altre forme di combustibili fossili si è mantenuto pressoché invariato dal 2000 al 2016 [25].

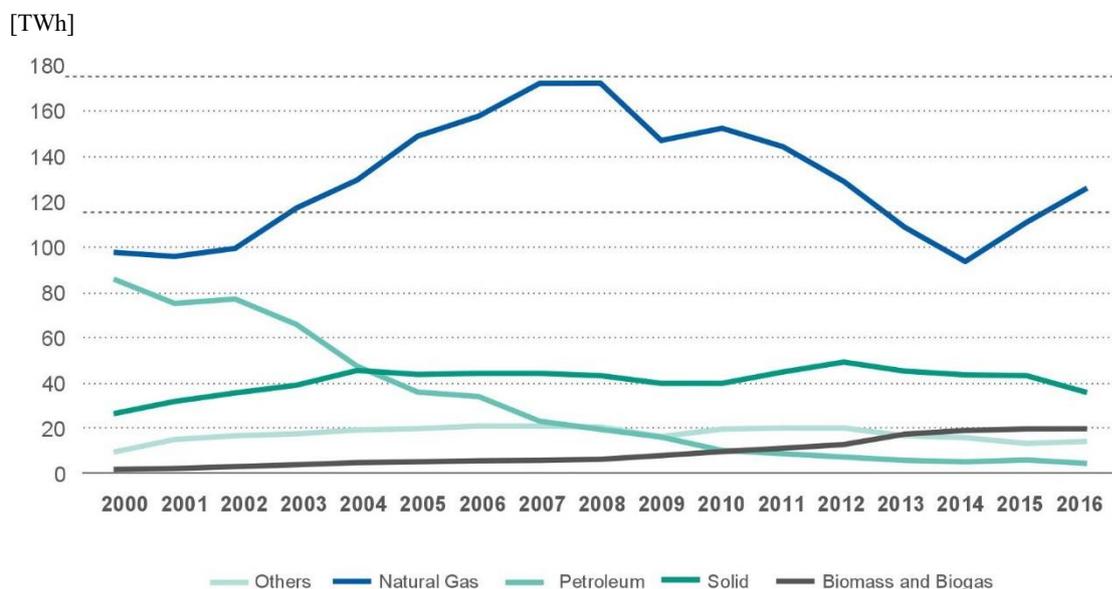


Fig. 11: Thermoelectrical production (TWh) from 2000 to 2016 in Italy, subdivided by fuel [25]

In figura 12 e in figura 13 sono riportati i dati relativi ai fattori di emissione medi, rispettivamente per gli inquinanti primari e secondari, calcolati per le sole centrali di produzione di energia elettrica e calore alimentate a combustibili fossili tradizionali. Sono stati ottenuti dividendo le emissioni annue di ciascuna sostanza nociva per la produzione lorda, in kWh, esclusivamente da impianti termoelettrici convenzionali. I valori più elevati si hanno per gli ossidi di azoto (NO_x), il monossido di carbonio (CO) e gli ossidi di zolfo (SO_x).

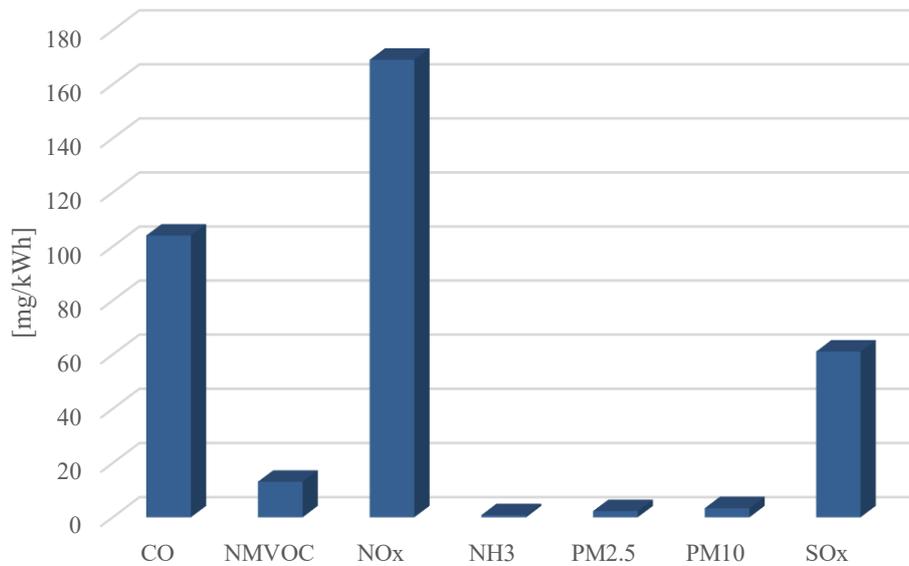


Fig. 12: Emission factors for main pollutants in electrical energy and heat production

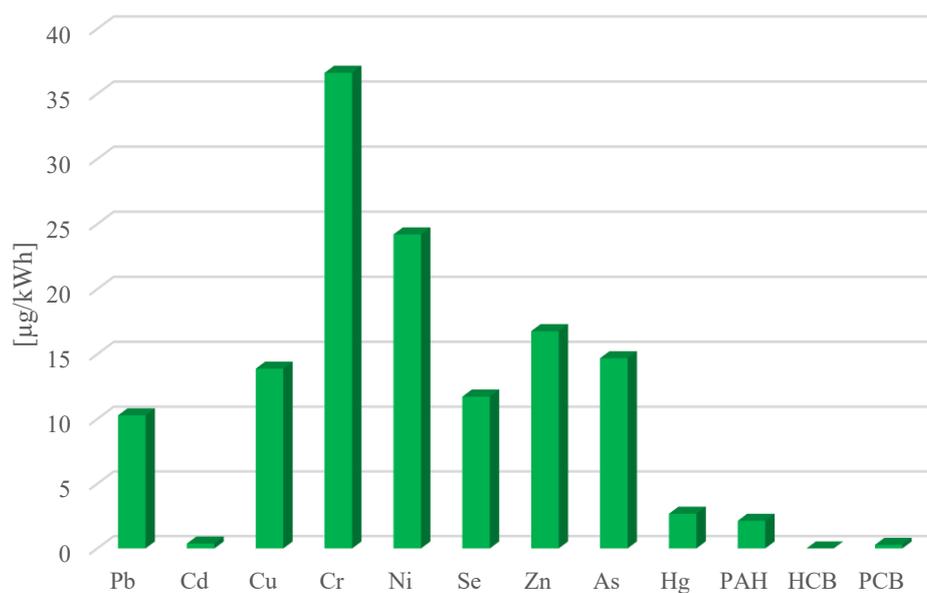


Fig. 13: Emission factors for secondary pollutants in electrical energy and heat production

4.1.2 Produzione da fonti rinnovabili

Riguardo la produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili, nell'ultimo decennio si è assistito ad una netta crescita nel settore. In particolare, le FER maggiormente in fase di crescita sono state: in primo luogo il fotovoltaico, che ha manifestato una forte espansione a partire dal

2010, seguito dall'eolico e dalle bioenergie. Il trend di produzione da centrali geotermiche invece si è mantenuto quasi del tutto costante negli anni; la fonte energetica che ha mostrato un andamento più altalenante è stata quella idroelettrica, anche se essa rappresenta comunque la principale sorgente di produzione di energia elettrica.

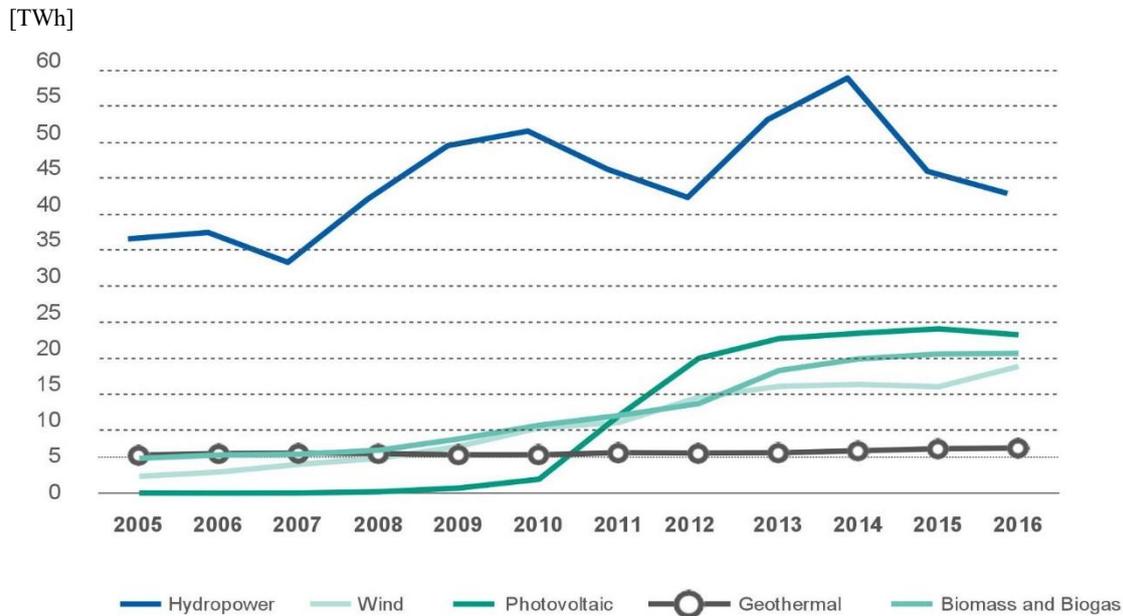


Fig. 14: Renewable energy sources production (TWh) from 2005 to 2016 in Italy [25]

Dal punto di vista dell'impatto ambientale, l'Unione europea, principalmente mediante la direttiva 2009/28/EC, ha definito il pacchetto Clima-Energia, conosciuto anche con il nome "Strategia 20-20-20". I tre grandi obiettivi da raggiungere entro il 2020 sono:

- riduzione delle emissioni di gas serra del 20% rispetto ai valori del 1990;
- riduzione dei consumi energetici del 20% incrementando l'efficienza energetica;
- copertura del 20% del fabbisogno energetico europeo mediante FER.

In particolare, la direttiva assegna all'Italia i due seguenti obiettivi:

- raggiungimento, entro il 2020, di una quota di consumi finali lordi (CFL) di energia coperta da FER di almeno il 17% nei settori elettrico, termico e dei trasporti;
- innalzamento, entro il 2020, della quota rinnovabile riguardante il settore dei trasporti al 10% o più [25][26].

La quota di produzione elettrica da fonti rinnovabili che spettava all'Italia (26,4%) per il 2020, è stata già ottenuta nel 2012, raggiungendo il 27,1% del consumo interno lordo.

4.2 Costo dell'energia elettrica

Il prezzo di acquisto dell'energia elettrica varia a seconda della categoria di consumo, sia per le utenze domestiche che per le industrie. I dati riportati nella tabella 6 fanno riferimento alla "Relazione annuale sullo stato dei servizi e sull'attività svolta" pubblicata dall' AEEGSI (Autorità per l'Energia Elettrica, il Gas e il Sistema Idrico). Essa compara i costi dell'energia per i principali paesi europei, evidenziando come i prezzi di acquisto in Italia siano nettamente superiori alla media dei 28 paesi dell'Unione europea, ad esclusione della fascia di consumo domestico più bassa [27].

User type	Annual consumption (MWh)	Italy (€/MWh)	France (€/MWh)	Germany (€/MWh)	United Kingdom (€/MWh)	Spain (€/MWh)	EU-28 (€/MWh)	Percentage difference (Italy-UE)/UE
Low domestic consumption	2,5	198	175	317	193	241	214	-7,48%
Medium domestic consumption	3,5	231	153	392	177	215	200	+15,5%
High domestic consumption	7	288	141	278	161	194	192	+50,0%
Small sized enterprise	100	233	131	217	160	184	176	+32,4%
Medium sized enterprise	500-2000	197	108	189	129	147	148	+33,1%
Energy-intensive industries	5000	176	94	170	128	129	132	+33,3%
Big energy-intensive industries	>20000	148	85	152	121	105	118	+25,4%

Tab. 6: Italian electricity prices compared to european average for different user categories [27]

Invece, relativamente ai costi di generazione delle diverse fonti energetiche, si fa riferimento al Levelized Cost of Electricity (LCOE), ovvero il prezzo a cui occorre vendere l'energia prodotta da un impianto affinché vengano coperti tutti i costi relativi a costruzione, esercizio e manutenzione, e si ottenga un ritorno sull'investimento iniziale (ROE, Return On Equity). I diversi range di valori di LCOE, in base alla fonte di produzione energetica, sono riportati nella tabella 7. Essi risultano essere nettamente più elevati per le FER, rispetto alle tradizionali fonti fossili; ciò è dovuto al fatto che la produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili sia spesso discontinua e soggetta a fattori esterni non controllabili. Le centrali alimentate a carbone e gas presentano invece valori inferiori, in quanto rappresentano tecnologie mature e maggiormente utilizzate per il soddisfacimento del fabbisogno elettrico nazionale.

Energy source	LCOE (€/MWh)	External costs (€/MWh)	Total cost (€/MWh)
Coal	53-65	50-70	103-135
Gas (CCGT)	70-86	20	90-106
Hydropower	60-380	negligible	60-380
Wind	102-152	negligible	102-152
Biomass	129-276	30-65	159-341
Incinerators	47-118	n.a.	-
Photovoltaic	150-329	2	152-331
Geothermal	51-144	n.a.	-

Tab. 7: Overall costs for different energy sources [27]

La formulazione semplificata per il calcolo del Levelized Cost of Electricity è la seguente:

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (1)$$

Nello specifico, si ha che:

- I_t è l'investimento complessivo nell'anno t ;
- M_t sono le spese relative al funzionamento e alla manutenzione nell'anno t ;
- F_t è il costo del combustibile nell'anno t ;
- E_t è la generazione di energia elettrica nell'anno t ;
- r è il tasso di sconto;
- n è la vita operativa del sistema, tipicamente assunta pari a 20 anni.

Questo parametro rappresenta, perciò, il rapporto tra la somma dei costi complessivamente sostenuti nell'intera vita dell'impianto e la somma di tutta l'energia elettrica prodotta nel corso degli anni.

Il costo medio di generazione dell'energia elettrica, pesato in funzione della copertura energetica sul totale, risulta essere compreso nell'intervallo 74-148 €/MWh.

L'Italia, a causa dell'elevato costo dell'elettricità in relazione agli altri stati europei, è il principale importatore di energia elettrica dall'estero, in particolare da Svizzera, Francia, Austria e Slovenia. Nell'ultimo decennio il saldo netto import/export si è attestato su valori variabili tra 40 e 50 TWh circa [27].

4.3 Previsioni future

Secondo le stime di Terna relative al prossimo decennio, la domanda totale futura di energia elettrica potrà evolvere in funzione di due possibili scenari. Il primo, denominato “scenario base”, stima una crescita del PIL (Prodotto Interno Lordo) dello 0,9%; il secondo, definito “scenario di sviluppo”, ipotizza invece un incremento del PIL dell'1,3%. Il tasso medio annuo di crescita della domanda è pari rispettivamente a 0,4% e 0,9%. In figura 15 è riportato il trend storico della domanda elettrica in Italia dal 2003 al 2016, e l'andamento previsto fino al 2026 mediante i due differenti scenari considerati.

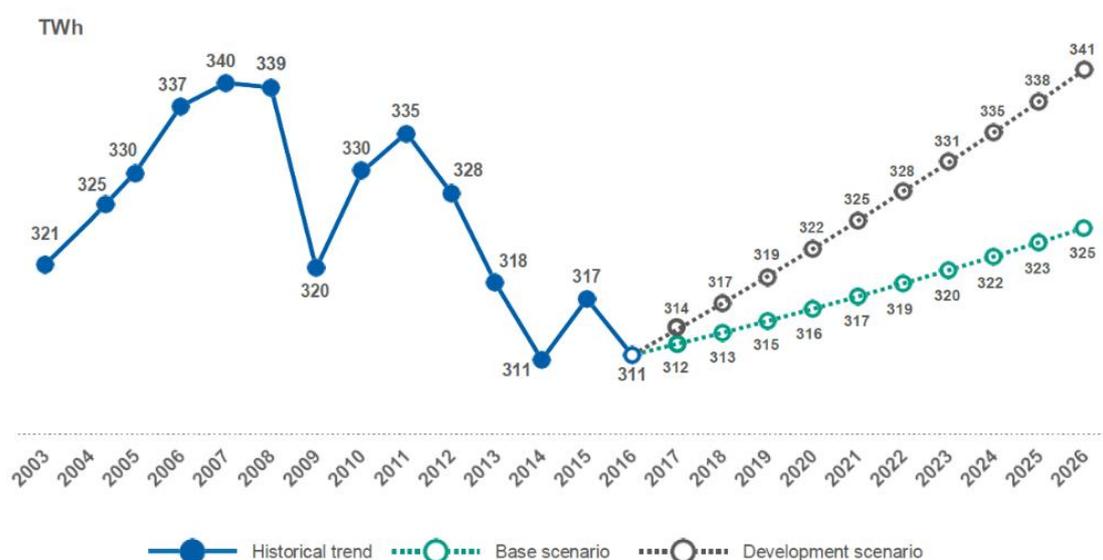


Fig. 15: Electrical energy demand (historical trend and future scenarios) [28]

Riguardo la quota di energia prodotta da fonti rinnovabili nel settore elettrico, al 2016 essa si è attestata intorno al 31%. Utilizzando i modelli del sistema energetico, elaborati dal GSE (Gestore dei Servizi Energetici), è stato possibile tracciare scenari tendenziali fino al 2030, arrivando a stimare per tale data una copertura da FER pari al 37,7% sul totale; questo valore risulta essere ben 17 punti percentuali al di sotto dell'obiettivo del 55% posto dalla SEN (Strategia Energetica Nazionale). La SEN è un documento redatto dal Ministero dello Sviluppo Economico e dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare; definisce un piano decennale che prefigge gli obiettivi energetici da perseguire a livello nazionale.

Nella tabella 8 sono riassunti i valori relativi alle previsioni della domanda totale di energia elettrica nel paese, rispettivamente per il 2020, il 2025 e il 2030. Sono inoltre riportate le percentuali di produzione da fonti rinnovabili sul totale, valutate sia considerando la tendenza in base allo stato attuale, sia in funzione dell'ambizioso traguardo del 55% al 2030 stabilito dalla Strategia Energetica Nazionale.

	2020		2025		2030	
Electrical energy demand - base scenario (TWh)	318		324		333	
Renewable energy sources coverage (TWh)	Trend	Target	Trend	Target	Trend	Target
	99 (31%)	120 (37,7%)	111 (34,3%)	138 (42,6%)	125 (37,7%)	184 (55%)

Tab. 8: Medium-term forecasts of electricity demand and RES supply in Italy

Infine, in figura 16 sono rappresentati gli andamenti della produzione elettrica da RES (anni 2000-2016), suddivisa nel dettaglio per ciascuna tipologia di fonte, e i trend previsti (fino al 2030) per il conseguimento dell'obiettivo SEN precedentemente citato. È possibile notare come i contributi più elevati siano attesi in particolar modo dall'energia generata da impianti fotovoltaici ed eolici, passando rispettivamente:

- da 22 TWh prodotti nel 2016 a 72 TWh nel 2030;
- da 18 TWh erogati nel 2016 a 40 TWh nel 2030 [29].

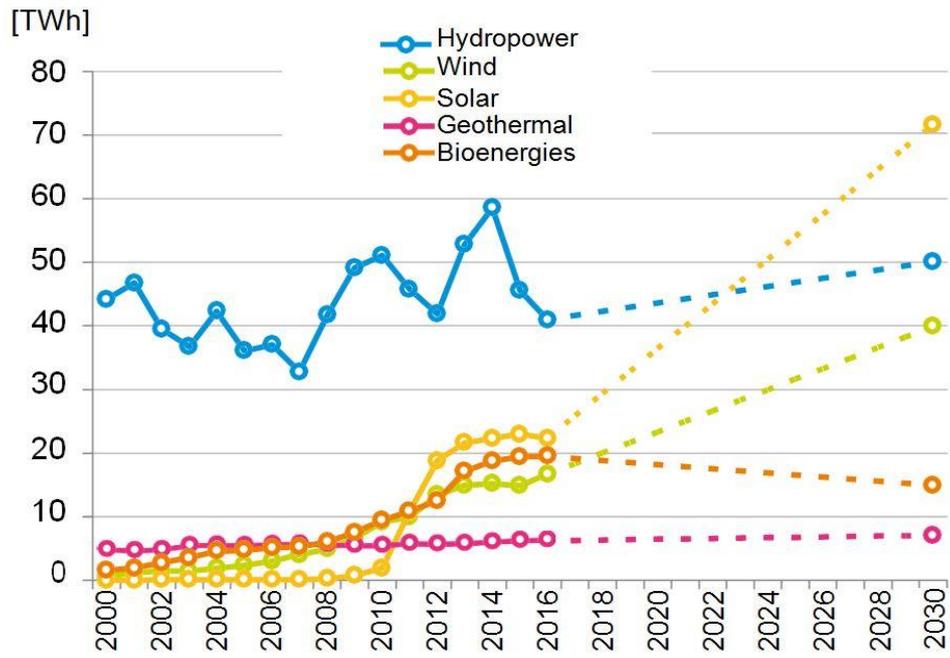


Fig. 16: Electrical energy production from each renewable source: 2030 SEN targets [29]

Capitolo 5

Le esternalità e i costi esterni dell'energia

Nel contesto ambientale, il concetto di esternalità e la conseguente quantificazione in termini di costi esterni è stato spesso trascurato in passato, mentre allo stato attuale riveste un importante ruolo nelle valutazioni di carattere energetico-ambientale, economico e sociale delle diverse tecnologie presenti sul mercato. Mediante il termine esternalità si identificano tutti quegli effetti (negativi o positivi) generati da un'attività di produzione o di consumo che ricadono, oltre che sul soggetto promotore, su un gruppo di persone o più in generale sull'intera collettività. È possibile definire differenti tipi di costi esterni: uno degli esempi più comuni è rappresentato dall'impatto ambientale sulla società causato dalle sostanze inquinanti emesse nell'ecosistema a seguito della produzione di energia elettrica o calore; tali costi non sono sostenuti direttamente dagli impianti di generazione, ma spesso ricadono su tutta la popolazione.

5.1 Stima dei costi esterni

Esistono vari modelli che quantificano, in termini di costi esterni, gli impatti e i danni provocati da attività produttive umane. Risulta necessario far notare, però, che essi non sono di facile applicazione e che presentano inevitabilmente numerose incertezze connesse alla complessa "monetizzazione" di beni quali danni alla salute umana e all'ambiente [11]. Tuttavia, la Commissione europea ha impostato una metodologia per la valutazione, in modo standardizzato, dei costi esterni associati alla produzione di energia elettrica; tale scopo è alla base della serie di progetti iniziati negli anni '90 e denominati spesso con il termine ExternE (External Costs of Energy).

Il metodo alla base del progetto ExternE è denominato Impact Pathway Approach (IPA); esso è un approccio di tipo *bottom-up*, nel quale i benefici e i costi ambientali sono stimati seguendo il percorso che valuta gli impatti fisici a partire dai cambiamenti nell'aria, nel suolo e nell'acqua provocati dalle sorgenti emissive. Tali mutamenti sono infine espressi in termini monetari.

Le quantità di sostanze inquinanti emesse dipendono da: localizzazione geografica della sorgente, condizioni metereologiche, tipo di combustibile utilizzato, efficienza dell'impianto e presenza di sistemi di abbattimento. Successivamente si utilizzano modelli di dispersione in atmosfera per determinare nel dettaglio il trasporto di inquinanti e identificarne le trasformazioni chimiche. Sulla base di questi valori di concentrazioni, si modellizzano i danni alla salute umana e all'ambiente usando le funzioni dose-danno, calcolate attraverso i dati relativi all'esposizione e alla concentrazione in ambiente. Tali modelli determinano in che modo varia il rateo di incidenza di malattie a seguito di un'alterazione della concentrazione di sostanze nocive in aria. Nell'ultimo step gli impatti fisici sono valutati in termini monetari, allo scopo di ottenere un valore finale complessivo di costi esterni [30][31].

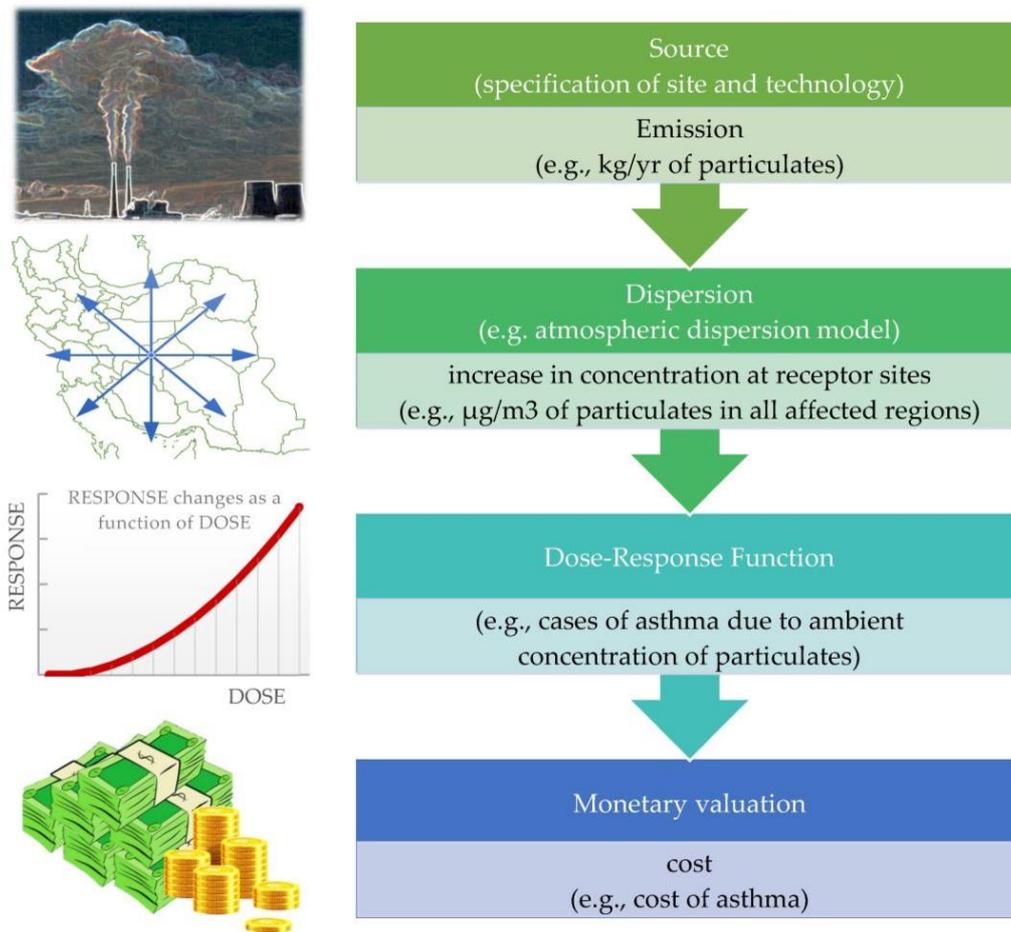


Fig. 17: Main Impact Pathway Approach steps for air pollution assessment [30]

5.2 *EcoSenseLE*

All'interno del progetto ExternE, come strumento di calcolo è stato sviluppato EcoSenseLE (Light Edition), in grado di fornire delle valutazioni, sotto il profilo economico, riguardo gli impatti sulla salute umana e sull'ambiente causati dall'inquinamento nei vari paesi europei. Il software richiede in input le quantità, espresse in tonnellate annue, di sostanze inquinanti immesse in atmosfera; le principali sono SO₂, NO_x, PM₁₀, PM_{2.5}, NMVOC e NH₃. Per ottenere delle stime più precise è necessario inserire anche i valori degli inquinanti secondari.

Nel primo step si definiscono le principali informazioni utili alla creazione di un “nuovo scenario”, scegliendo inizialmente fra tre diverse opzioni:

- emissioni addizionali;
- emissioni ridotte;
- emissioni da sorgente puntiforme.

La prima categoria permette di incrementare il livello di emissioni rispetto a uno scenario di riferimento, e di calcolarne i relativi danni. La seconda, invece, quantifica il risparmio monetario dovuto alla riduzione di emissioni su scala nazionale. Infine, la terza configurazione consente di calcolare l'impatto economico causato da una sorgente emissiva considerata puntiforme.

In secondo luogo si stabilisce la nazione per cui verrà effettuata l'analisi, e successivamente si seleziona il periodo al quale fare riferimento; nel caso di scenari presenti tutti i calcoli sono relativi al 2010, altrimenti si considera il 2020 quale anno di riferimento per gli scenari futuri. In quest'ultimo caso il programma utilizza un fattore incrementale per stimare una variazione del valore economico dei danni, e per considerare una potenziale crescita economica.

Dopo aver definito questi parametri, si inseriscono i valori in tonnellate annue delle sostanze inquinanti, distinguendo tra emissioni: ad alta quota, a bassa quota in ambiente rurale e a bassa quota in ambiente urbano. Tipicamente le ultime due opzioni si utilizzano nel caso di inquinamento dovuto al traffico veicolare.

Pollutant	High stack	Low release (rural)	Low release (urban)
NH3	<input type="text"/> t	<input type="text"/> t	<input type="text"/> t
NMVOG	<input type="text"/> t	<input type="text"/> t	<input type="text"/> t
NOx	<input type="text"/> t	<input type="text"/> t	<input type="text"/> t
PM10	<input type="text"/> t	<input type="text"/> t	<input type="text"/> t
PM25	<input type="text"/> t	<input type="text"/> t	<input type="text"/> t
SO2	<input type="text"/> t	<input type="text"/> t	<input type="text"/> t

Fig. 18: Emissions values of main airborne pollutants in EcoSenseLE [32]

In output viene fornito il costo totale relativo alle esternalità, suddiviso nelle seguenti voci: danni alla salute umana, impatti sulle coltivazioni e sui materiali, effetti sull'ecosistema. In particolare, per quanto riguarda la prima categoria, il software ripartisce a sua volta i danni in DALY (Disability-Adjusted Life Year) causati da mortalità e morbilità, oltre che assegnarne il corrispettivo valore monetario totale. I DALY rappresentano un indicatore dell'impatto globale di uno o più fattori di rischio, come ad esempio l'inquinamento atmosferico; essi vengono espressi come la somma degli anni di vita persi a causa di morbilità, mortalità e disabilità. Si calcolano combinando la ridotta aspettativa di vita e gli anni di vita persi a causa di una malattia o di una disabilità.

La somma di tutti i valori monetari corrisponde al costo totale o al risparmio complessivo, rispettivamente per lo scenario di emissioni addizionali o ridotte.

5.3 Analisi costi-benefici relativa alla modifica del parco auto

L'analisi di seguito riportata, effettuata con l'ausilio del programma EcoSenseLE, si svolge in diversi step. Nella fase preliminare, avendo precedentemente strutturato il veicolo medio equivalente, ci si è posto l'obiettivo di ridurre progressivamente il numero di autovetture con motore a combustione interna, calcolandone così i costi esterni evitati. Nel secondo stadio, invece, si immette su strada un equivalente numero di veicoli elettrici, per i quali si valutano i costi esterni associati alle emissioni inquinanti dovute alla produzione di energia elettrica necessaria ad alimentarli. È importante sottolineare che nella prima simulazione le emissioni si considerano distribuite su tutto il territorio nazionale, a causa del fatto che i veicoli circolanti sono uniformemente ripartiti. Al contrario, nella seconda, le emissioni si suppongono localizzate, dal momento che l'energia necessaria ad alimentare i veicoli elettrici è prodotta da centrali ipotizzate sorgenti puntiformi. La differenza dei valori ottenuti da queste due stime, se positiva, implica un risparmio netto finale mentre, se negativa, comporta un costo esterno complessivo tale da non giustificare a livello ambientale una simile manovra.

Dalle stime dei fattori di emissione e in base al numero di veicoli e chilometri medi percorsi, precedentemente ricavati e analizzati nei capitoli 3 e 4, si calcola la quantità di tonnellate annue di ciascun inquinante rimossa dall'ambiente a seguito di una progressiva riduzione (dal 10% al 50%) dei veicoli con motore a combustione interna. Una volta inseriti questi dati, il programma EcoSenseLE restituisce in output l'ammontare totale del risparmio in euro, attualizzati al 2020, derivante da questa rimozione. Successivamente, per poter valutare i consumi aggiuntivi dovuti all'immissione su strada della medesima quantità di auto elettriche, è necessario considerare il consumo medio, in kWh/km, calcolato tenendo conto delle dieci vetture più vendute in Europa. Il suddetto valore è pari a 0,15 kWh/km, ed è ipotizzato uguale per tutti i paesi europei di riferimento [24]. Per quanto riguarda invece il sistema WPT, si è assunto un rendimento pari all'80%, mediato tra le diverse efficienze calcolate nei vari progetti relativi ai sistemi di ricarica wireless dinamica per veicoli elettrici [3][9]. Per determinare la quantità di kWh annui richiesti, sono inoltre necessari: il rendimento della rete elettrica nazionale (pari al 93% nel caso dell'Italia), che tiene conto delle perdite di trasmissione e di distribuzione della rete, e il rendimento elettrico delle centrali, considerando quindi gli autoconsumi di quest'ultime [33]. Infine, ipotizzando un inquinamento trascurabile dovuto alla produzione di energia da fonti rinnovabili, si è moltiplicato il precedente valore in kWh per la percentuale di energia elettrica generata mediante combustibili tradizionali (68% per l'Italia) [34].

A valle dei calcoli effettuati mediante EcoSenseLE, si ottengono i valori di risparmio lordo, di costi totali e di risparmio netto, dato dalla differenza dei primi due, ottenuti per ciascuna percentuale sul totale di veicoli sostituiti. Questi sono di seguito riportati in tabella 9 e, per la differenza netta, in figura 19 ne viene mostrato l'andamento grafico in funzione della modifica del parco auto.

Vehicles substituted		Total savings (€)	Total costs (€)	NET DIFFERENCE (€)
10%	3.787.614	456.505.624	20.829.536	435.676.089
20%	7.575.228	913.019.818	41.669.256	871.350.562
30%	11.362.841	1.369.503.951	62.490.754	1.307.013.198
40%	15.150.455	1.826.011.694	83.318.664	1.742.693.030
50%	18.938.069	2.282.466.024	104.148.200	2.178.317.825

Tab. 9: Net saving deriving from vehicles substitution in Italy

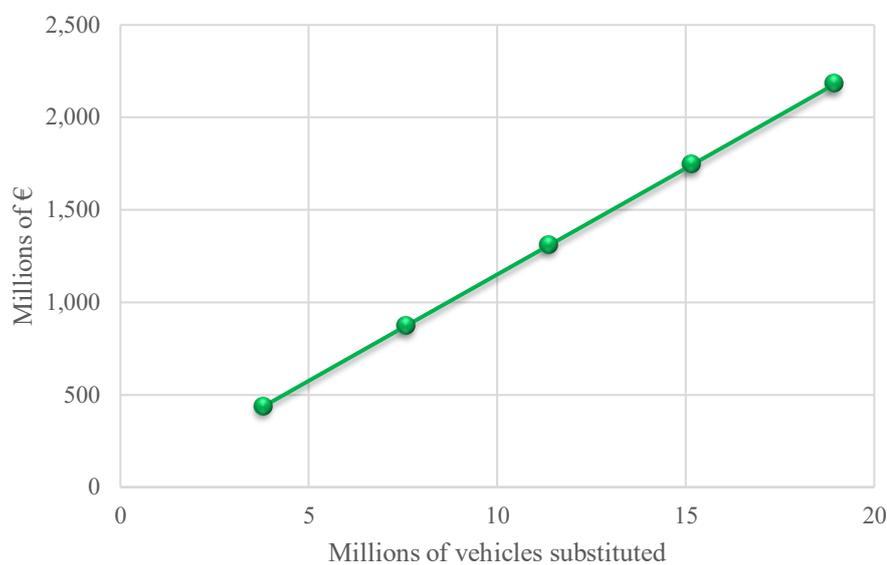


Fig. 19: Net saving trend in Italy

5.4 Analisi di sensitività

Al fine di effettuare uno studio più accurato per quanto riguarda il software EcoSenseLE, utilizzato per le diverse simulazioni, si conduce un'analisi di sensitività. Essa si sviluppa mediante una variazione percentuale dei fattori di emissione degli inquinanti, sia relativamente ai veicoli, sia alle centrali termoelettriche; tale modifica è pari al 25% e viene applicata di volta in volta a ciascun fattore emissivo, mantenendo costanti gli altri. Si ottiene, perciò, il valore percentuale dell'errore associato all'output economico finale, in funzione dell'oscillazione di ogni sostanza inquinante. Le variabili da considerare sono fondamentalmente due: la prima è la nazione europea scelta, per la quale il programma imposta dei valori di riferimento per ognuno degli inquinanti, mentre la seconda è il peso relativo di ciascun fattore di emissione sul totale.

25% Variation of Emission Factors - Vehicles	ΔCO (%)	ΔNMVOC (%)	ΔNO_x (%)	ΔNH_3 (%)	$\Delta\text{PM}_{2.5}$ (%)	ΔPM_{10} (%)	ΔSO_x (%)
Italy	0,11	1,33	15,89	0,86	2,66	0,19	0,02
France	0,05	0,12	21,75	0,26	2,61	0,10	0,04
Germany	0,11	0,37	21,78	1,34	1,20	0,06	0,04
Poland	0,29	0,58	20,17	1,00	2,68	0,16	-
Spain	0,05	0,07	19,23	0,18	1,96	0,12	0,03
Sweden	0,32	0,26	16,74	1,42	0,44	0,01	0,03
United Kingdom	0,12	0,19	18,90	0,80	2,03	0,12	0,17
AVERAGE	0,15	0,42	19,21	0,84	1,94	0,11	0,05

Tab. 10: Sensitivity analysis varying vehicles main emission factors

Tra tutte le sostanze nocive, per entrambe le categorie, gli scostamenti percentuali più elevati si ottengono per gli ossidi di azoto (NO_x), che dunque impattano maggiormente, relativamente agli inquinanti primari, sul valore economico complessivo restituito dal software. Nelle tabelle 10 e 11 sono riportati tutti i dati, relativi rispettivamente alla simulazione di sostituzione veicolare e di incremento di produzione elettrica; sempre per gli NO_x l'intervallo di valori varia tra il 15% e il 22% circa per la prima, e tra l'8% e il 16% per la seconda.

Secondi solo agli NO_x, in ordine di importanza per il calcolo dei risultati, gli ossidi di zolfo o SO_x sono tra i più rilevanti, esclusivamente per la generazione di energia da combustibili fossili; le percentuali oscillano tra l'1% e il 12% circa. Inerentemente alle autovetture, invece, i valori sono di molto inferiori all'1% per tutti i paesi, di conseguenza un eventuale errore pari al 25% sul calcolo degli SO_x può essere considerato trascurabile.

Infine, la tolleranza associata al PM_{2.5} incide prevalentemente nella simulazione relativa alle vetture, attestandosi in media intorno ai 2 punti percentuali.

25% Variation of Emission Factors - Plants	ΔCO (%)	ΔNMVOC (%)	ΔNO_x (%)	ΔNH₃ (%)	ΔPM_{2.5} (%)	ΔPM₁₀ (%)	ΔSO_x (%)
Italy	0,03	0,18	15,69	0,10	0,37	0,02	5,51
France	0,03	0,03	15,06	0,44	1,51	0,06	3,35
Germany	0,02	0,05	13,55	0,16	0,83	0,04	9,11
Poland	0,01	0,02	8,38	-	1,10	0,10	11,59
Spain	0,02	0,06	9,17	-	0,84	0,05	11,20
Sweden	0,04	0,12	8,23	0,26	0,87	0,03	1,63
United Kingdom	0,03	0,04	15,03	0,04	0,90	0,05	7,36
AVERAGE	0,02	0,07	12,16	0,14	0,92	0,05	7,11

Tab. 11: Sensitivity analysis varying plants main emission factors

La medesima procedura è stata poi applicata ai fattori di emissione secondari, i cui risultati sono riportati in tabella 12 e 13. Dai dati ottenuti si evince che quasi tutte le variazioni percentuali relative agli inquinanti secondari possono essere considerate trascurabili, fatta eccezione per lo zinco che nella maggior parte delle simulazioni risulta superiore all'1% sia per veicoli che per impianti. In pochi casi, invece, i valori di rame e mercurio si attestano intorno al punto percentuale.

25% Variation of Emission Factors - Vehicles	ΔPb (%)	ΔCd (%)	ΔCu (%)	ΔCr (%)	ΔNi (%)	ΔSe (%)	ΔZn (%)	ΔAs (%)	ΔHg (%)	ΔPAH (%)
Italy	0,042	0,008	1,875	0,032	0,010	-	1,894	-	0,013	0,052
France	-	-	0,005	0,002	-	-	0,015	-	0,027	0,048
Germany	-	-	0,004	0,002	0,001	-	0,018	-	0,034	0,045
Poland	-	-	-	-	-	-	0,013	-	-	0,059
Spain	0,307	0,011	0,035	0,011	0,007	-	2,153	-	0,037	0,789
Sweden	0,262	-	0,128	0,020	0,030	-	5,244	-	0,340	0,067
United Kingdom	0,013	0,009	0,049	0,012	0,008	-	2,502	-	0,058	0,017
AVERAGE	0,089	0,004	0,299	0,011	0,008	-	1,691	-	0,073	0,154

Tab. 12: Sensitivity analysis varying vehicles secondary emission factors

25% Variation of Emission Factors - Plants	ΔPb (%)	ΔCd (%)	ΔCu (%)	ΔCr (%)	ΔNi (%)	ΔSe (%)	ΔZn (%)	ΔAs (%)	ΔHg (%)	ΔPAH (%)
Italy	0,076	0,021	0,570	0,479	0,459	0,007	0,573	0,287	0,557	0,078
France	0,161	-	0,459	0,131	0,311	0,001	2,843	0,049	0,261	0,049
Germany	0,037	0,017	0,226	0,041	0,050	-	0,159	0,031	0,657	0,016
Poland	0,108	0,012	0,420	0,044	0,159	-	1,988	0,050	0,623	0,005
Spain	0,034	0,034	0,441	0,099	0,734	0,001	1,061	0,103	1,016	0,148
Sweden	0,286	0,324	1,249	0,265	0,586	-	10,552	-	2,134	0,399
United Kingdom	0,048	0,022	0,168	0,054	0,105	0,005	0,661	0,034	0,429	0,027
AVERAGE	0,107	0,061	0,505	0,159	0,343	0,002	2,548	0,079	0,811	0,103

Tab. 13: Sensitivity analysis varying plants secondary emission factors

Capitolo 6

Valutazione emissioni ed esternalità a livello europeo

A seguito dell'analisi effettuata, per l'Italia, riguardo i costi esterni e l'impatto ambientale derivante dalla modifica del parco auto nazionale e dalla produzione di energia elettrica da centrali a combustibile fossile, si riporta la medesima valutazione per i principali stati europei. L'obiettivo è quello di fornire un quadro europeo tale da permettere un confronto, in termini di esternalità, a seconda del diverso mix energetico nelle varie nazioni.

Sia per quanto riguarda le emissioni dovute al traffico veicolare che per quelle causate dalle centrali termoelettriche, la fonte dalla quale sono stati ricavati i dati è l'European Environmental Agency, la quale riporta nella sezione "Air pollutant emissions data viewer 1990-2016" tutti i valori di inquinanti, relativi al 2016, rispettivamente per le categorie "Road Transport: Passenger Cars" (1A3bi) e "Public Electricity and Heat Production" (1A1a) [35]. Tramite questi dati è stato possibile determinare i fattori di emissione per le suddette categorie, per i seguenti stati: Francia, Germania, Polonia, Spagna, Svezia e Regno Unito.

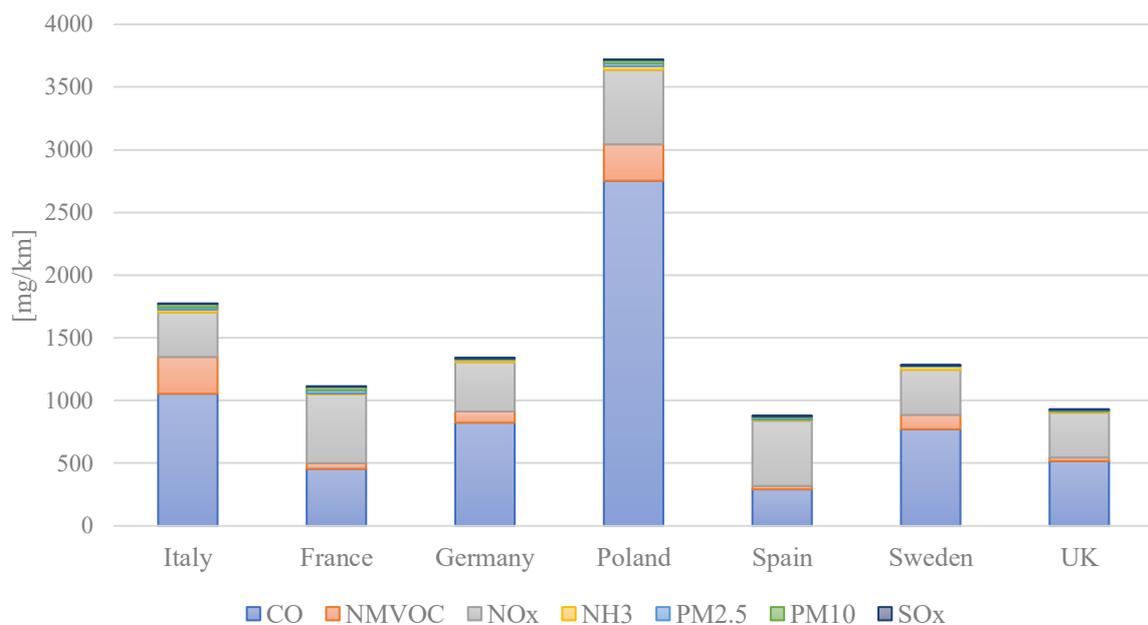


Fig. 20: Vehicles emission factors for main pollutants in Europe

Nella figura 20 sono riportati i valori dei fattori di emissione per gli inquinanti principali, riferiti al veicolo medio equivalente, per le varie nazioni; da questa si constata la netta prevalenza di CO e NO_x ed una presenza, seppur inferiore, di NMVOC.

In figura 21 vengono invece riportati i fattori di emissione per gli inquinanti secondari, mostrando una preponderanza di zinco e, solo per l'Italia, di rame.

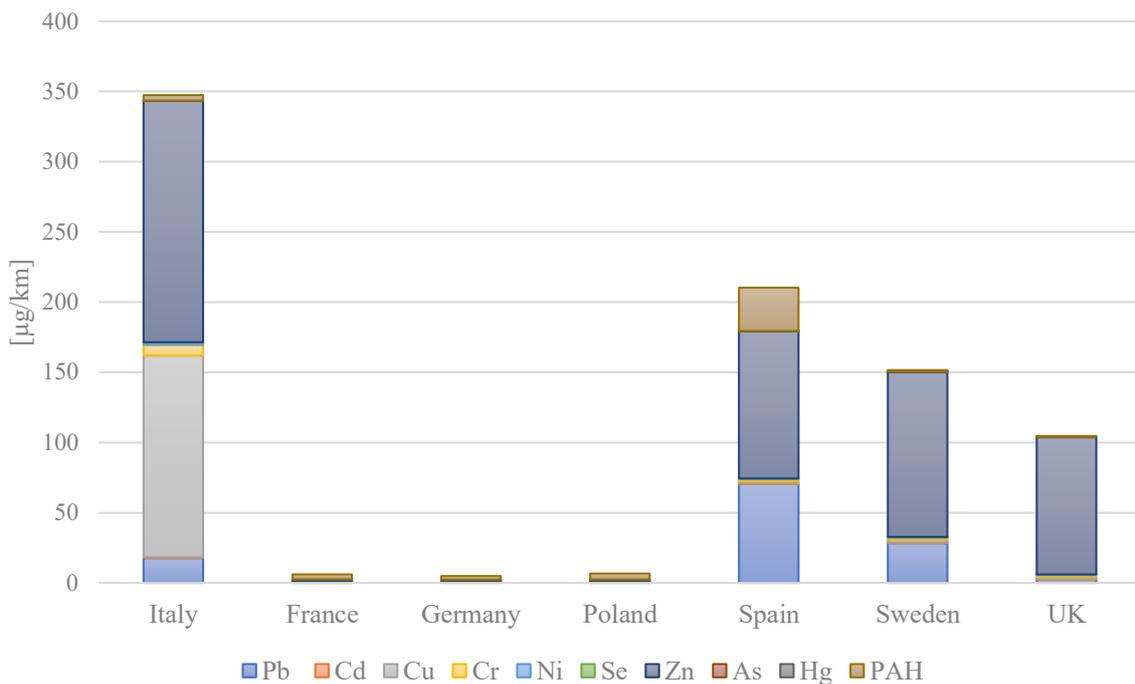


Fig. 21: Vehicles emission factors for secondary pollutants in Europe

Per quanto riguarda la produzione di energia elettrica da impianti alimentati con combustibili tradizionali, in figura 22 e 23 sono indicati i fattori emissivi suddivisi tra inquinanti primari e secondari, in questo caso riferiti non più al chilometro bensì al kWh_{el}. Tra i primari, quelli più impattanti sono sicuramente CO, NO_x e SO_x mentre, per quanto riguarda i secondari, lo zinco risulta essere l'inquinante predominante, seguito da rame e piombo.

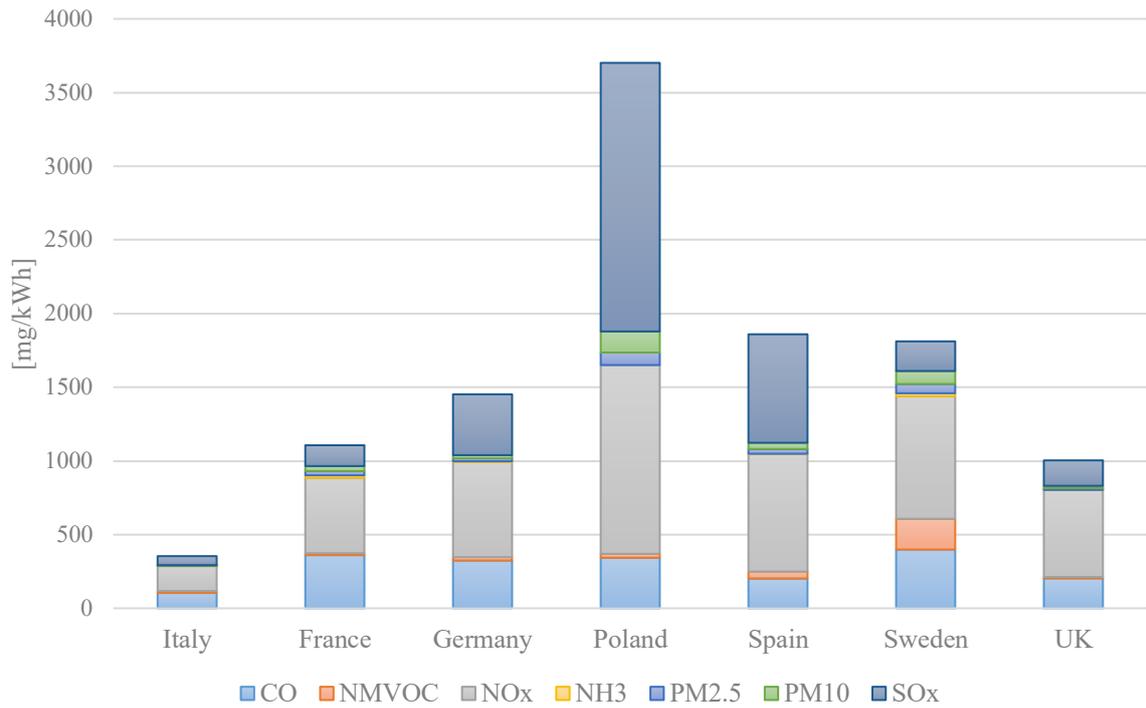


Fig. 22: Emission factors for main pollutants in electrical energy and heat production in Europe

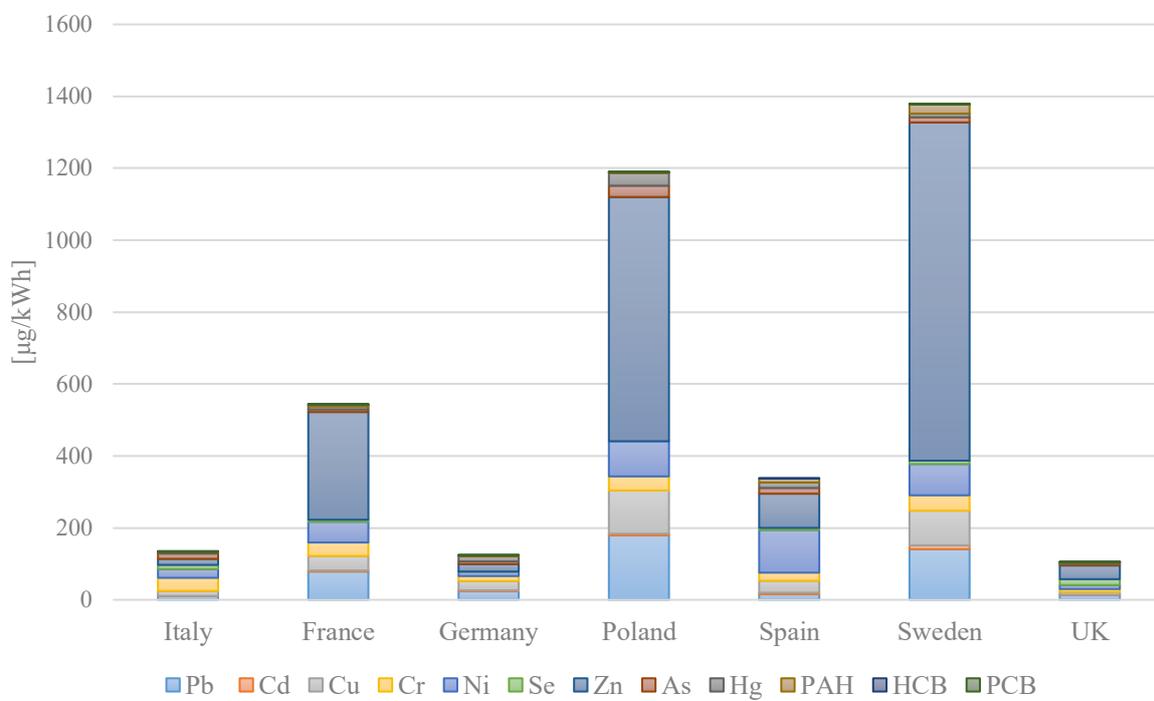


Fig. 23: Emission factors for secondary pollutants in electrical energy and heat production in Europe

6.1 Francia

Lo stesso tipo di analisi condotta per l'Italia viene effettuata per la Francia: al 2016 il numero di veicoli circolanti in tutta la nazione è di 31,9 milioni, con una percorrenza media di circa 13000 km; il 64,2% di essi è alimentato a gasolio, mentre il 34,5% a benzina [36][37][38].

Per quanto riguarda la rete elettrica, le perdite di trasmissione e di distribuzione su scala nazionale si attestano intorno al 6,4%, con un conseguente rendimento della rete stessa pari al 93,6% [33]. A differenza dell'Italia, vi è un'ingente produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili, in particolar modo da centrali nucleari, in grado di contribuire per il 72,1% alla produzione nazionale. La quota elettrica derivante da fonti fossili è di conseguenza molto bassa e pari al 10,2% [34].

Anche in questo caso, mediante l'utilizzo di EcoSenseLE, è possibile ottenere i dati, in termini monetari, relativi alle esternalità causate dall'immissione o dalla riduzione dei vari inquinanti in ambiente. Tutti i valori vengono successivamente riportati per ciascun grado di sostituzione del parco auto.

Vehicles substituted		Total savings (€)	Total costs (€)	NET DIFFERENCE (€)
10%	3.191.549	448.696.852	11.089.827	437.607.024
20%	6.383.099	897.451.636	22.143.321	875.308.315
30%	9.574.648	1.346.154.059	33.228.711	1.312.925.348
40%	12.766.197	1.794.845.426	44.289.628	1.750.555.799
50%	15.957.747	2.243.605.281	55.367.591	2.188.237.690

Tab. 14: Net saving deriving from vehicles substitution in France

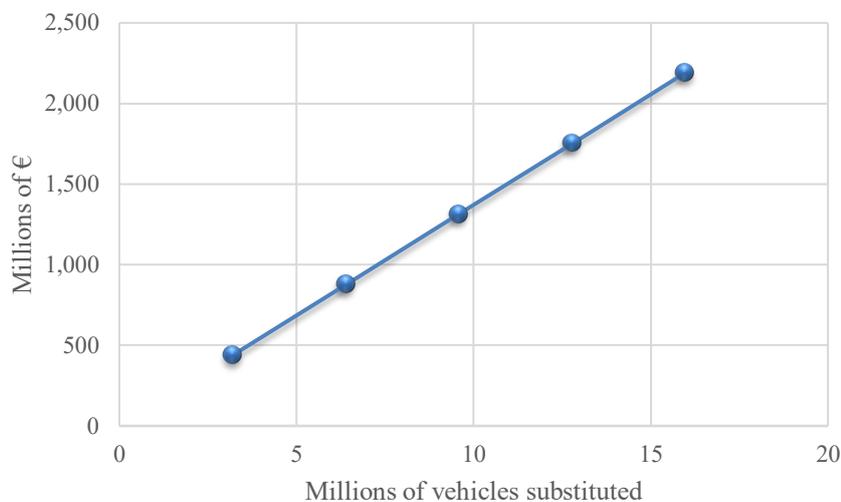


Fig. 24: Net saving trend in France

6.2 Germania

Analogamente ad Italia e Francia, anche per la Germania si svolge la stessa valutazione basata sul parco auto e sul mix energetico nazionale. La maggior parte delle auto, ovvero il 66,2%, è alimentata a benzina, mentre solo il 32,3% è alimentata a gasolio, per un ammontare complessivo di 45,1 milioni di autovetture private, con una percorrenza media pari a 14100 km [36][37][38].

Il rendimento della rete elettrica nazionale è pari al 96,2%, dovuto a delle perdite di trasmissione e di distribuzione di 3,8 punti percentuali [33]. Al contrario della Francia, la Germania risulta essere energeticamente più simile all'Italia, con una produzione da fonti fossili pari al 63,5% attestata al 2016. Un dato rilevante è rappresentato dall'eolico, in grado di coprire il 12,7% della produzione nazionale di elettricità [34].

A seguito delle due simulazioni relative alla modifica del parco auto, si sono ottenuti i rispettivi valori in euro di guadagno e di spesa in funzione della quantità di veicoli sostituiti.

Vehicles substituted		Total savings (€)	Total costs (€)	NET DIFFERENCE (€)
10%	4.507.121	525.180.759	132.323.733	392.857.026
20%	9.014.242	1.050.349.489	264.649.354	785.700.136
30%	13.521.363	1.575.599.356	396.963.939	1.178.635.417
40%	18.028.484	2.100.768.347	529.289.585	1.571.478.762
50%	22.535.605	2.625.952.668	661.613.305	1.964.339.363

Tab. 15: Net saving deriving from vehicles substitution in Germany

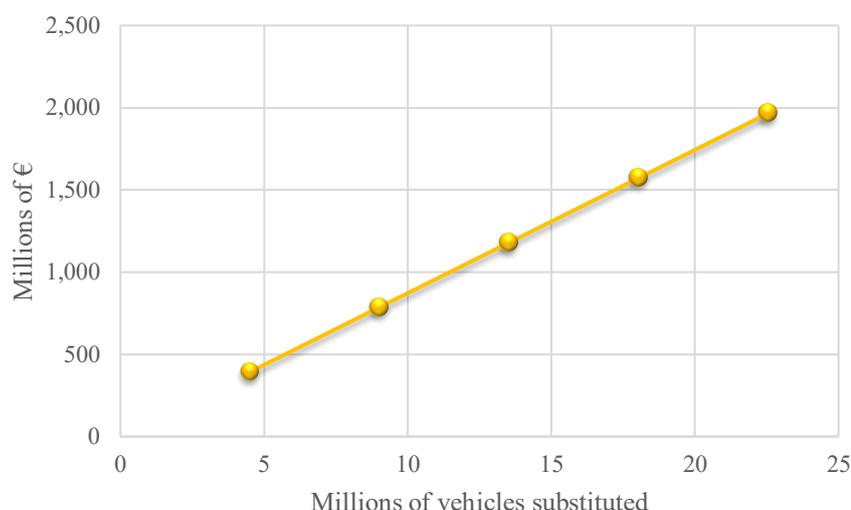


Fig. 25: Net saving trend in Germany

6.3 Polonia

Il parco macchine in Polonia è così composto: 20,7 milioni di veicoli circolanti al 2016, di cui il 55,1% alimentato a benzina, il 29,5% a gasolio e il restante 15,5% a metano o GPL; il numero medio di chilometri percorsi in un anno è di 6670 [36][37][38].

A causa delle perdite sulla rete elettrica nazionale, pari al 6,5%, il rendimento di quest'ultima risulta essere del 93,5% [33]. La produzione di energia elettrica si basa quasi totalmente sui combustibili tradizionali, infatti la percentuale di generazione da fonti fossili è del 90,1%; lo sfruttamento delle fonti rinnovabili, invece, risulta essere assai contenuto, soprattutto se paragonato alla media europea nettamente più elevata [34].

Nella tabella 16 sono mostrati i valori numerici in termini di entrate ed uscite economiche dovute alla potenziale sostituzione delle auto con motore a combustione interna in favore di quelle elettriche. Come pronosticabile, poiché le distanze medie e il numero di veicoli circolanti sono nettamente inferiori rispetto agli stati europei precedentemente considerati, le quantità totali di inquinanti emessi sono piuttosto contenuti, e di conseguenza anche i risparmi finali si attestano su valori di un ordine di grandezza più bassi.

Vehicles substituted		Total savings (€)	Total costs (€)	NET DIFFERENCE (€)
10%	2.072.342	142.528.811	100.124.500	42.404.311
20%	4.144.685	285.004.755	200.217.606	84.787.149
30%	6.217.027	427.539.526	300.339.482	127.200.044
40%	8.289.369	570.047.366	400.429.422	169.617.944
50%	10.361.712	712.544.280	500.551.254	211.993.026

Tab. 16: Net saving deriving from vehicles substitution in Poland

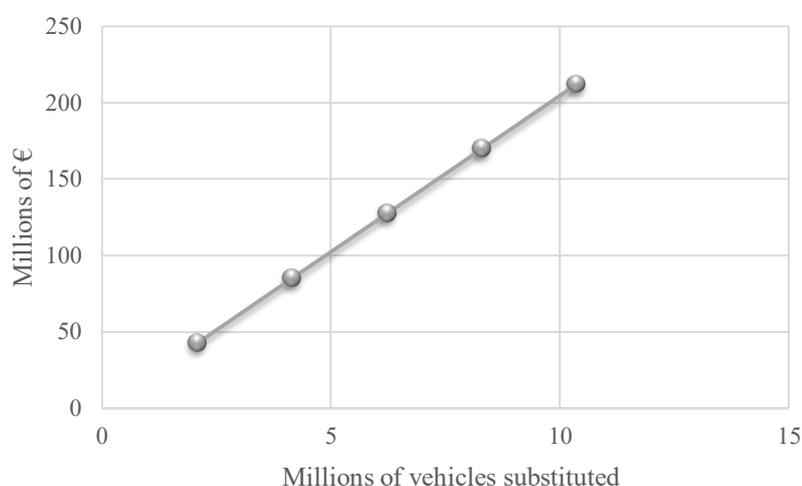


Fig. 26: Net saving trend in Poland

6.4 Spagna

In Spagna, al 2016, il numero di autovetture private circolanti è di 22,3 milioni, suddivise come segue: 59,7% di auto diesel e 40,1% auto a benzina. Il chilometraggio medio è pari a 12500 km annui [36][37][38].

Le perdite di trasmissione e distribuzione ammontano al 6,6%, conseguentemente ci si basa su una rete elettrica nazionale avente un rendimento del 93,4% [33]. Il 40,9% della produzione di energia elettrica deriva da centrali termoelettriche convenzionali, il 21,2% da centrali nucleari e il 18% da turbine eoliche [34].

Dai precedenti dati, dopo aver calcolato le variazioni di tonnellate annue di sostanze nocive in ambiente, si ottengono: i risparmi lordi totali, i costi complessivi e le differenze nette tra i due. A livello di risparmio economico, per la Spagna si ricavano valori intermedi tra quelli calcolati per la Polonia e quelli per Italia, Francia e Germania.

Vehicles substituted		Total savings (€)	Total costs (€)	NET DIFFERENCE (€)
10%	2.235.555	162.916.165	25.664.475	137.251.690
20%	4.471.110	325.785.633	51.336.629	274.449.004
30%	6.706.665	488.696.478	77.001.025	411.695.454
40%	8.942.220	651.624.607	102.677.598	548.947.009
50%	11.177.775	814.497.030	128.313.092	686.183.939

Tab. 17: Net saving deriving from vehicles substitution in Spain

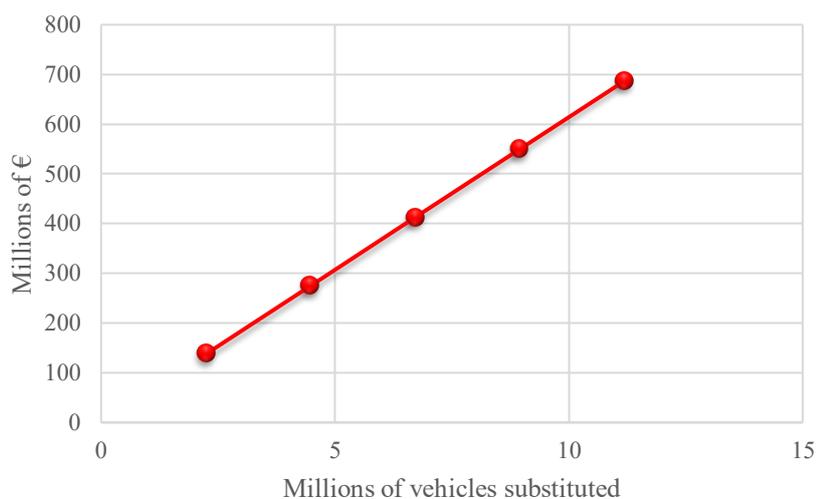


Fig. 27: Net saving trend in Spain

6.5 Svezia

La Svezia è caratterizzata da una flotta veicolare di 4,7 milioni di auto private con una percorrenza media di 14100 km l'anno, aggiornata al 2016. La suddivisione per tipologia di alimentazione è la seguente: 63,4% per quanto riguarda i veicoli a benzina e 29,6% per i diesel; solo il 7% è rappresentato dalle auto alimentate a metano o GPL [36][37][38].

Riguardo il rendimento della rete elettrica, ci si attesta sul valore di 95,2%, mostrando pertanto ridotte perdite sulle linee di trasmissione e distribuzione [33]. La Svezia presenta una distribuzione energetica molto differente dagli altri paesi presi in considerazione; le principali fonti di produzione di energia elettrica sono in assoluto l'idroelettrico (40,5%) e il nucleare (39,7%), seguite dall'eolico (10,1%) e dal termoelettrico convenzionale (9,6%) [34].

Nella tabella 18 sono riportati i valori corrispondenti agli output monetari generati dal software EcoSenseLE in seguito alla sostituzione dei veicoli tradizionali con auto elettriche. Infine, la figura 28 riporta il trend del risparmio netto in funzione del numero di vetture elettriche immesse al posto di quelle a combustibili fossili.

Vehicles substituted		Total savings (€)	Total costs (€)	NET DIFFERENCE (€)
10%	466.906	17.670.624	1.357.999	16.312.625
20%	933.813	35.412.664	2.757.480	32.655.184
30%	1.400.719	53.092.201	4.115.565	48.976.636
40%	1.867.625	70.826.676	5.472.747	65.353.929
50%	2.334.532	88.497.320	6.830.371	81.666.949

Tab. 18: Net saving deriving from vehicles substitution in Sweden

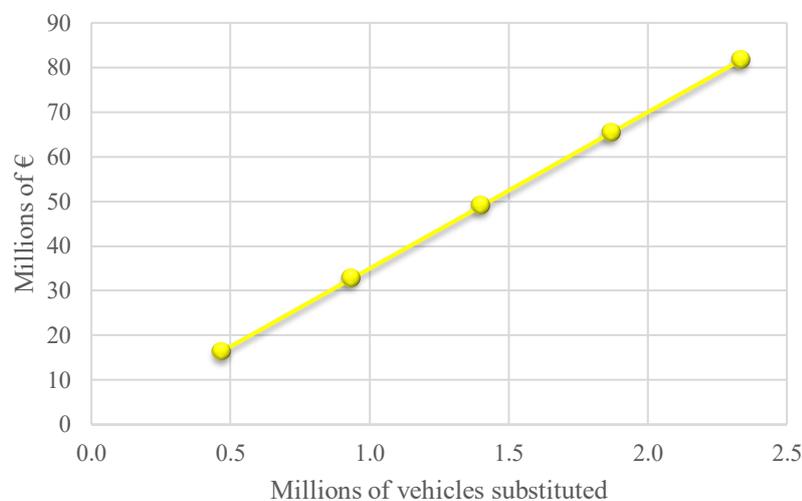


Fig. 28: Net saving trend in Sweden

6.6 Regno Unito

Il parco auto britannico è composto da 33,5 milioni di vetture: il 61,7% di esse è alimentato a benzina, mentre quasi tutta la restante parte (37,2%) è alimentata a gasolio. I chilometri medi percorsi ogni anno sono circa 13200 [36][37][38].

Il Regno Unito dispone di una rete elettrica nazionale avente un rendimento leggermente inferiore rispetto agli altri paesi europei finora visti: esso è infatti pari al 91,7%, evidenziando pertanto delle alte perdite di trasmissione e distribuzione, superiori agli 8 punti percentuali [33]. La produzione di energia elettrica è ripartita come segue: 62,6% da centrali termoelettriche, 20,1% da centrali nucleari e 11,5% dall'eolico; solo il 5,8% è coperto da fotovoltaico ed idroelettrico [34].

Come effettuato per le altre nazioni, anche per il Regno Unito sono state calcolate le tonnellate annue di inquinanti derivanti dai veicoli e dagli impianti di produzione, tramite le quali è stato poi possibile ricavare la differenza netta tra risparmi e costi, i cui dati finali sono riportati in tabella 19, e il cui andamento è mostrato in figura 29.

Vehicles substituted		Total savings (€)	Total costs (€)	NET DIFFERENCE (€)
10%	3.354.245	206.239.823	40.494.929	165.744.894
20%	6.708.490	412.480.982	80.996.067	331.484.915
30%	10.062.734	618.657.459	121.495.773	497.161.687
40%	13.416.979	824.898.795	161.997.711	662.901.084
50%	16.771.224	1.031.138.618	202.493.429	828.645.189

Tab. 19: Net saving deriving from vehicles substitution in UK

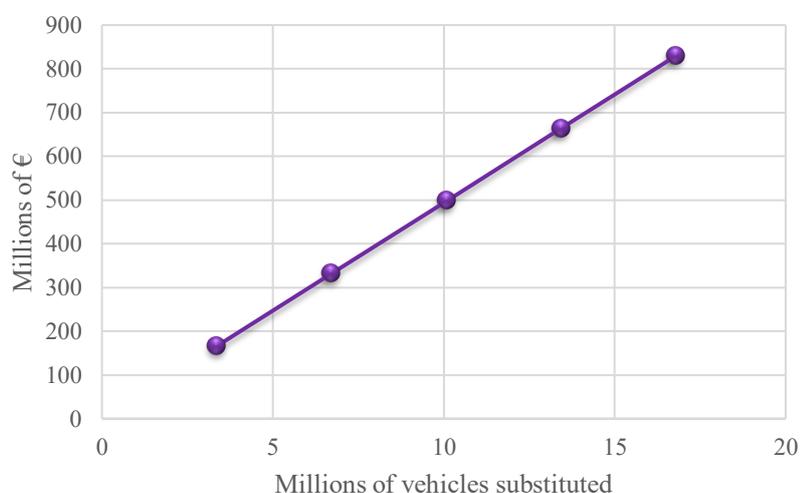


Fig. 29: Net saving trend in UK

6.7 Quadro europeo

Dopo aver effettuato la medesima tipologia di valutazioni per ciascuno dei principali stati europei, si intende ora analizzare nel complesso le principali differenze relative all'effettiva convenienza economica, in termini di esternalità, dovuta alla massiccia introduzione di veicoli elettrici su strada. In tabella 20 ed in figura 30 sono mostrati i valori e gli andamenti dei risparmi netti, messi a confronto per ogni nazione.

Vehicles Substituted	NET DIFFERENCE (Millions of €)						
	Italy	France	Germany	Poland	Spain	Sweden	United Kingdom
10%	435,68	437,61	392,86	42,40	137,25	16,31	165,74
20%	871,35	875,31	785,70	84,79	274,45	32,66	331,48
30%	1307,01	1312,93	1178,64	127,20	411,70	48,98	497,16
40%	1742,69	1750,56	1571,48	169,62	548,95	65,35	662,90
50%	2178,32	2188,24	1964,34	211,99	686,18	81,67	828,65

Tab.20: Net saving deriving from vehicles substitution in Europe

Come visibile dai dati soprastanti, Italia, Francia e Germania presentano valori finali molto simili tra loro: ciò è dovuto ad una caratterizzazione del parco auto e ad una percorrenza media pressoché analoghe. In particolar modo, questo tipo di investimento risulta maggiormente conveniente in Francia, dove per una sostituzione del 50% del parco auto si avrebbe un ritorno economico, dal punto di vista delle esternalità, superiore ai 2 miliardi di euro. Ciò è associato ad una politica energetica interna fortemente improntata sulle fonti rinnovabili, nello specifico sul nucleare: essa implica dei costi più bassi causati dalla minor immissione in ambiente di sostanze inquinanti, le quali verrebbero prodotte da centrali alimentate a combustibili fossili. Da un diverso punto di vista, anche per l'Italia tale investimento risulterebbe economicamente vantaggioso, dal momento che, rispetto alla Francia, i fattori di emissione per i veicoli presentano valori più elevati tali da comportare, a seguito della parziale sostituzione dei veicoli tradizionali con auto elettriche, notevoli risparmi conseguenti ad una forte riduzione dei livelli di inquinamento.

Per quanto riguarda la Germania, essa rappresenta la nazione europea con il più elevato numero di veicoli circolanti; conseguentemente i risparmi lordi legati alla riduzione delle auto a benzina e diesel sono molto elevati, compensati a loro volta dagli alti costi esterni causati dalla produzione di energia elettrica. A seguito della sostituzione del 50% dei veicoli tradizionali, anche per la Germania si ottiene un valore di differenza netta intorno ai 2 miliardi di euro.

Nonostante in Spagna siano presenti solo due terzi dei veicoli circolanti nel Regno Unito, in generale i risultati finali non si discostano di molto gli uni dagli altri. I due paesi mostrano inoltre valori intermedi tra quelli ricavati per Italia, Francia e Germania, e quelli ottenuti per Polonia e Svezia.

Per questi ultimi due stati, i margini di guadagno sono nettamente inferiori, se confrontati con i numeri di tutte le altre nazioni considerate. In particolare, nel caso di sostituzione della metà del parco auto, per la Polonia si ottengono valori ridotti di un ordine di grandezza (212 milioni di euro) rispetto ad Italia e Francia, mentre per la Svezia di due ordini di grandezza (82 milioni di euro).

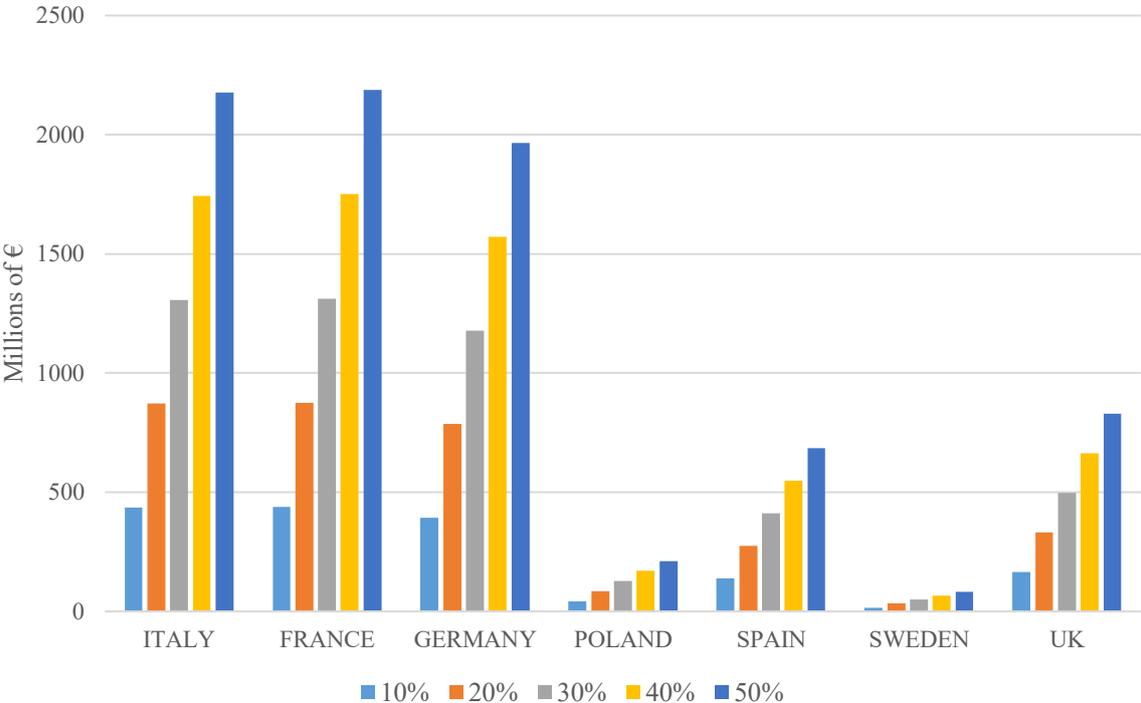


Fig. 30: Net saving trend in Europe depending on substituted vehicles percentage

Capitolo 7

Analisi economica relativa all'installazione del sistema WPT

L'obiettivo di quest'ultima fase è quello di fornire una stima dei costi di installazione di un'infrastruttura di ricarica WPT nell'intera rete autostradale, per ciascuna delle nazioni europee precedentemente considerate. Tale valutazione tiene conto non solo del costo della componentistica elettronica per il trasferimento di potenza, ma anche dei lavori da effettuare sul manto autostradale, quali: manodopera, materiali utilizzati, collegamenti alla rete elettrica, operazioni di perforazione ed altre voci di costo. Considerando di dover coprire il 25%, il 50% e il 75% della rete autostradale, in base ai valori di risparmio netto ottenuti in precedenza riguardo la parziale sostituzione del parco auto, si intende calcolare la fattibilità economica di tale investimento.

7.1 Ipotesi e modello di calcolo

In base alla velocità di percorrenza autostradale, che in media oscilla tra i 90 km/h e i 130 km/h, si è deciso di considerare questo intervallo come rappresentativo delle velocità medie, al fine di calcolare la potenza richiesta da ciascun veicolo per la ricarica dinamica. Pertanto, per far fronte a tale richiesta, è stato necessario ipotizzare una potenza installata del sistema costante e pari a 50 kW. Tra le ulteriori ipotesi di partenza, si è valutata la distanza di sicurezza minima per ciascuna velocità, necessaria per il calcolo del numero dei veicoli circolanti per chilometro, al fine di porsi nello scenario più sfavorevole possibile dal punto di vista dell'utilizzo dell'infrastruttura. Dovendo ottenere una copertura totale nei tratti autostradali in cui è presente il sistema WPT, si è stimato che il numero di bobine al chilometro debba essere pari a 500, aventi ciascuna una lunghezza di 2 metri.

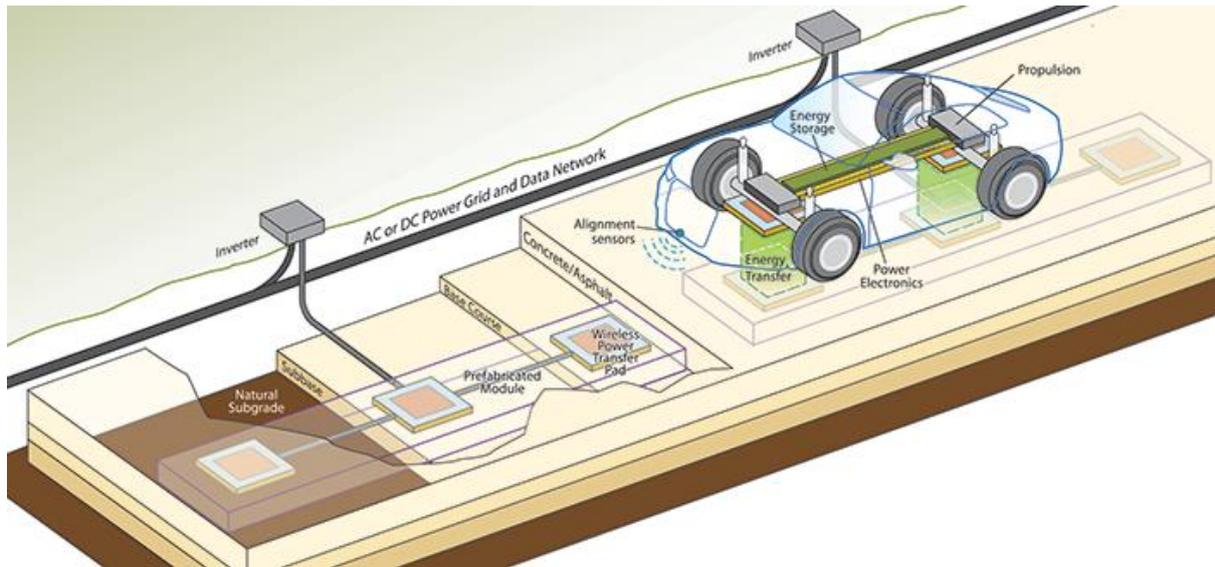


Fig. 31: Representation of WPT system main components [39]

Il modello di calcolo utilizzato per la potenza richiesta dal veicolo è basato sulla seguente formula:

$$P_{vehicle} = \frac{1}{\eta_{tr}} \left(mgC_r v + \frac{1}{2} \rho A_f C_x v^3 \right) \quad (2)$$

In essa si definiscono le seguenti grandezze:

- η_{tr} è il rendimento di trasmissione dell'auto, considerato costante e pari a 0,8;
- m è la massa del veicolo elettrico, il cui valore è mediamente 2000 kg;
- g è l'accelerazione gravitazionale (9,81 m/s²);
- C_r è il coefficiente di resistenza al rotolamento, ipotizzato pari a 0,008;
- v è la velocità del veicolo, unica variabile della funzione;
- ρ è la densità dell'aria (1,225 kg/m³);
- A_f è l'area frontale della vettura, considerata pari a 2,23 m²;
- C_x è il coefficiente di resistenza aerodinamica (0,4).

Utilizzando tale modello è possibile notare che la potenza necessaria ad alimentare il veicolo elettrico ha un andamento crescente in modo non lineare con l'aumento della velocità media del mezzo, come riportato nella figura 32 [3][24]. L'apporto determinato dalla potenza assorbita dagli ausiliari elettrici del mezzo (luci, autoradio, climatizzatore) è ipotizzato trascurabile.

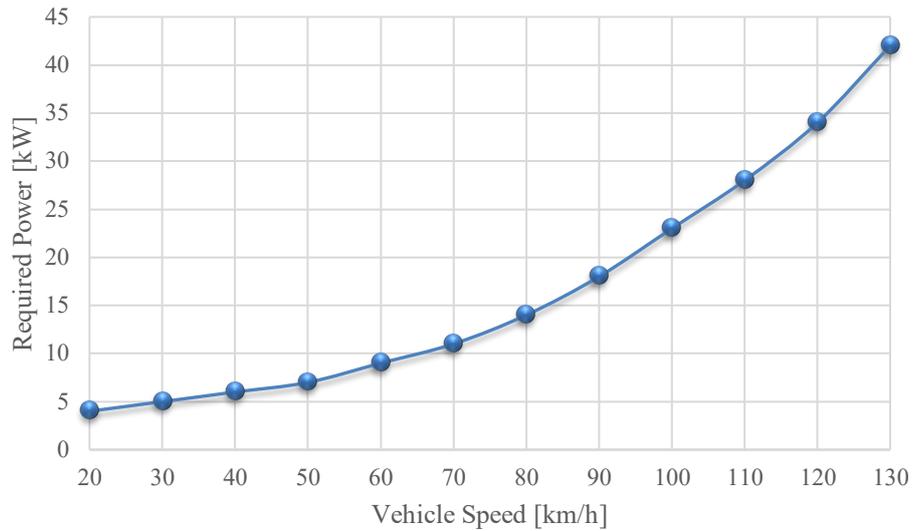


Fig. 32: Required power as a function of vehicle speed [3][24]

A seguito del calcolo della potenza richiesta da ciascun autoveicolo si è determinato, per ogni valore nel range di velocità compreso tra 90 km/h e 130 km/h, il coefficiente di contemporaneità k . Esso rappresenta il rapporto adimensionale tra l'effettiva potenza assorbita dall'insieme dei veicoli presenti in un chilometro e la potenza totale installata. Ciò permette di stimare la percentuale di utilizzo del sistema, con l'obiettivo di determinare la condizione più sfavorevole e di massimo carico. Il coefficiente di contemporaneità è dato da:

$$k = \frac{P_{vehicle} \cdot N_{vehicles}}{P_{coil} \cdot N_{coils}} \quad (3)$$

P_{coil} è la potenza di ciascuna bobina (costante e pari a 50 kW), $N_{vehicles}$ è il numero di veicoli elettrici e N_{coils} è la quantità di bobine posizionate al di sotto del manto stradale (fissata pari a 500), questi ultimi due riferiti al singolo chilometro. Nella tabella 21 sono riportati i valori numerici di ciascuna variabile utile per il calcolo del coefficiente k .

Vehicle Speed (km/h)	Requested Power (kW/EV)	Safe Distance (m)	Number of Vehicles (EVs/km)	Total Requested Power (kW/km)	Contemporaneity Factor k
90	18	81	12	222	0,0089
100	23	100	10	230	0,0092
110	28	121	8	231	0,0093
120	34	144	7	236	0,0094
130	42	169	6	249	0,0099

Tab. 21: Estimation of contemporaneity factor for different vehicle speed and requested power

Dai differenti coefficienti di contemporaneità, ottenuti per ciascuna velocità, si evince che, dal punto di vista del consumo elettrico, il caso peggiore si verifica quando la velocità del veicolo è massima e pari a 130 km/h. In tale condizione si ha un più elevato assorbimento di energia elettrica, nonostante il numero di auto circolanti sia inferiore rispetto agli altri scenari elencati.

7.2 Costo dell'infrastruttura

Come già introdotto all'inizio del capitolo, per la valutazione dei costi dell'infrastruttura WPT si è tenuto conto non solo della componentistica elettronica necessaria al funzionamento del sistema di ricarica, ma anche della spesa relativa alla manodopera per i lavori di fresatura, posizionamento dell'asfalto e trattamento della superficie stradale. Per quanto riguarda la parte elettrica, le voci di costo più rilevanti risultano essere gli inverter, i quali hanno la funzione di convertire la corrente in ingresso da continua ad alternata, ed i trasmettitori con i relativi condensatori, in grado di generare un campo magnetico per indurre una forza elettromotrice nel circuito secondario o ricevitore. Per calcolare i costi finali, si è assunto di installare un inverter per ogni bobina, stimate essere pari a 500 al chilometro; si è inoltre ipotizzato per gli inverter un costo pari a 15 €/kW. Relativamente ai trasmettitori, sono stati scelti dei componenti in grado di trasferire una potenza nominale di 50 kW con un costo di 250 € al singolo elemento. Infine è presente un trasformatore da media a bassa tensione ogni 1000 m di infrastruttura, con un costo di 12000 € [3][40][41].

Category	Task	Cost (€/km)	Category Cost (€/km)	%
Traffic Control	Median (Barrier)	33.823	34.795	3,1
	Signs	849		
	Cones	123		
Milling	Mill	3.191	38.204	3,4
	Haul milled material	34.623		
	Surface Grader	390		
Placing Concrete	PCC Material cost	213.020	220.878	19,6
	Portable Batch Plant	535		
	Pour/Transport Concrete	6.371		
	Paver	952		
Curing/Finishing	Surface Treatment	267.234	302.072	26,8
	Broom Finish	34.838		
Electronics and Grid Connection	DC cables	3.571	532.476	47,2
	Data and auxiliary supply cables and pipes	1.905		
	Manhole	5.000		
	Power and data connectors	10.000		
	Transmitter and comp. Capacitors	125.000		
	DC/AC converters	375.000		
	MV/LV transformer	12.000		
TOTAL		1.128.425	1.128.425	100

Tab. 22: WPT infrastructure single costs [3][40][41]

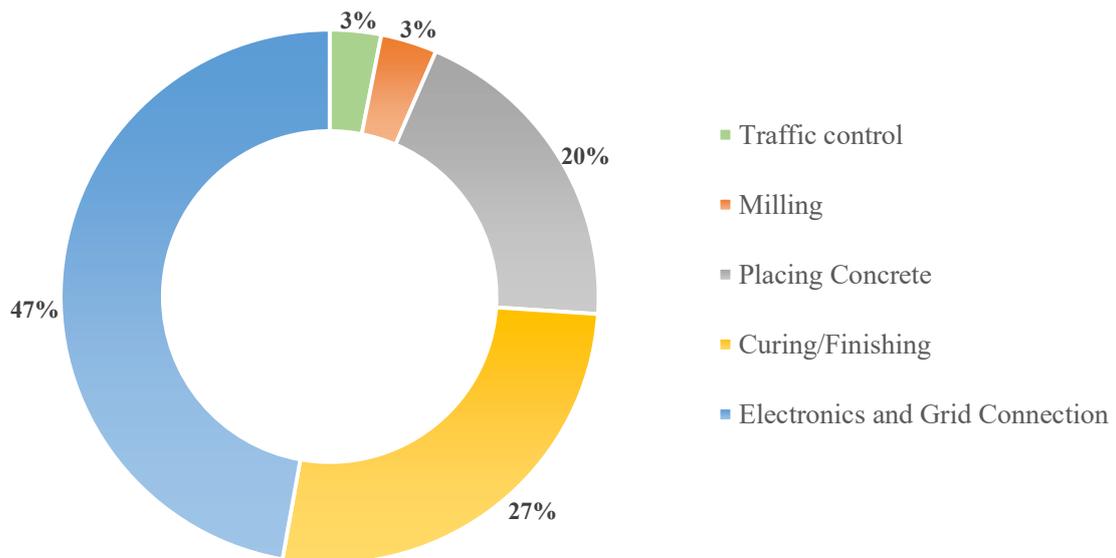


Fig. 33: Percentage subdivision of main cost categories for WPT system installation

Come visibile dalla figura 33, i costi maggiori sono attribuibili alla classe “Electronics and Grid Connection” (47% circa), in particolare per quanto riguarda le due sottocategorie precedentemente citate e descritte, ovvero inverter e trasmettitori. Segue, con il 27% circa dei costi totali, il gruppo “Curing/Finishing”, principalmente a causa del trattamento finale del manto stradale. Anche la categoria “Placing Concrete” non è irrilevante; essa, infatti, incide per il 20% sul costo complessivo dell’infrastruttura. Potenzialmente trascurabili risultano essere invece le due classi “Milling” e “Traffic Control”, entrambi influenti per il 3% circa.

7.3 Fattibilità economica in Italia

In quest’ultima fase dell’analisi, lo scopo è quello di valutare un possibile scenario, a livello nazionale, che si presenterebbe a seguito di una piena affermazione dei veicoli elettrici nel paese. Nello specifico, si è reso necessario effettuare una previsione futura relativamente al parco auto, valutando il potenziale trend di penetrazione sul mercato delle auto ibride ed elettriche. Si è assunto un orizzonte temporale pari a 25 anni, ovvero fino al 2040. Si è ipotizzato un andamento esponenziale del tasso di crescita dei veicoli elettrici, basandosi sulle stime della IEA e di Bloomberg NEF (New Energy Finance), che prevedono una percentuale pari al 34% per il 2040 [42].

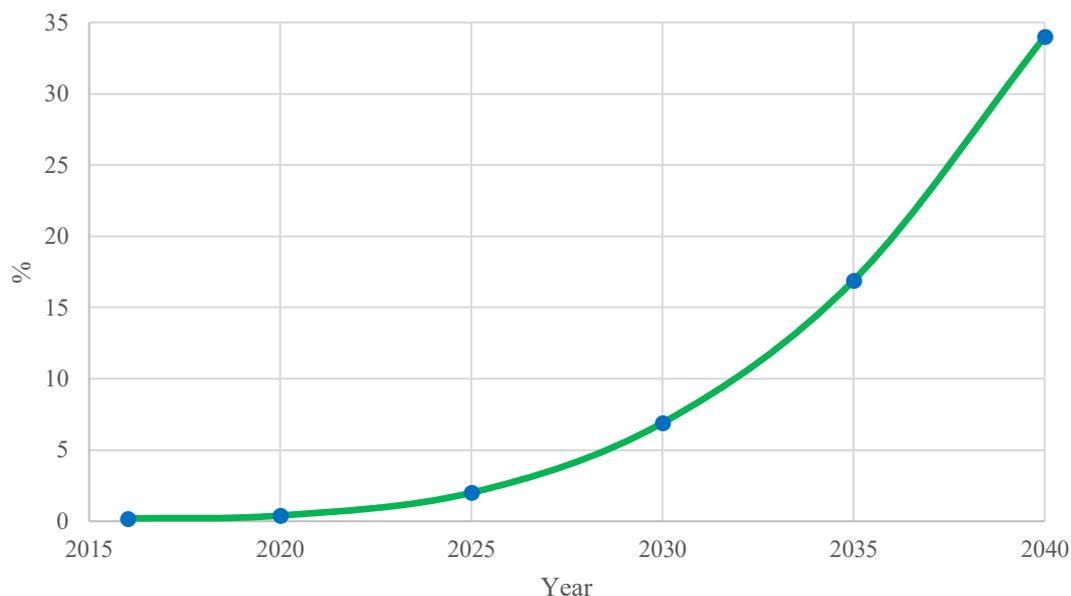


Fig. 34: EVs future trend in Europe

Per quanto riguarda i veicoli ibridi, l'andamento ipotizzato è pressoché simile a quello mostrato in figura 34, pertanto nuovamente esponenziale crescente, con una previsione al 2040 del 34% sul totale. Ne consegue che la presenza di autovetture alimentate a benzina e diesel si riduce progressivamente nel corso degli anni, evidenziando al 2040 un valore complessivo delle due tipologie pari al 31%.

Al fine di effettuare un'analisi più dettagliata, vengono presi in considerazione tre differenti scenari per la diffusione dell'infrastruttura WPT su scala nazionale:

- Scenario 1: copertura della rete autostradale pari al 25%;
- Scenario 2: copertura della rete autostradale pari al 50%;
- Scenario 3: copertura della rete autostradale pari al 75%.

Per tutti e tre gli scenari, si ipotizza una crescita lineare per quanto riguarda l'effettiva installazione in chilometri all'anno del sistema di ricarica, arrivando a coprire, al 2040, rispettivamente il 25%, 50% e 75% del manto autostradale. Il costo per la realizzazione di tale progetto è il medesimo calcolato alla fine del paragrafo precedente, ovvero 1,13 milioni di €/km, mantenuto costante negli anni. I tre scenari si basano sul numero di chilometri di autostrada complessivamente presenti in Italia, pari a 6700 km [43].

Per procedere con le valutazioni è necessario inoltre reperire delle stime sulla produzione di energia elettrica dalle diverse fonti, rinnovabili e non, per i prossimi 25 anni. Supponendo di conoscere la quantità di energia elettrica prodotta dalle singole fonti ed il fabbisogno energetico lordo complessivo, si calcola il trend di generazione elettrica da rinnovabili ogni 5 anni. Nell'immagine 35 quest'ultimo viene messo a confronto con l'andamento nel tempo della produzione da fonti fossili. I dati di riferimento sono estrapolati dal documento "EU Reference Scenario", redatto dalla Commissione europea nel 2016: esso, oltre ad analizzare i dati relativi alla generazione di energia nei vari stati europei, prende in considerazione anche il settore dei trasporti e le emissioni dei gas serra [44]. Come evidenzia lo stesso grafico, e come ampiamente pronosticabile, in una scala temporale che va dal 2016 al 2040 vi è un punto in cui la produzione elettrica da FER supera quella da fonti energetiche convenzionali.

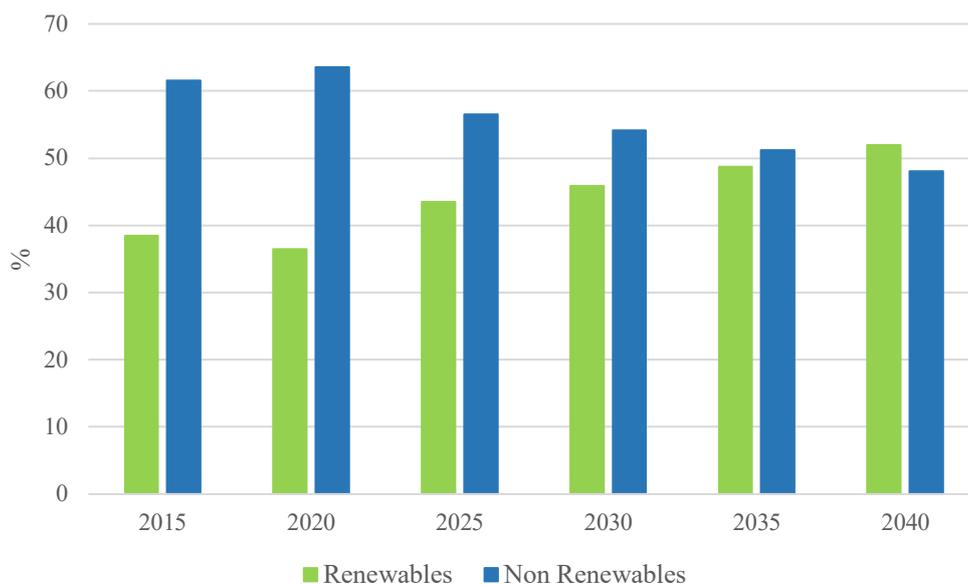


Fig. 35: Percentage of gross electricity production in Italy [44]

Facendo riferimento alla percentuale di auto elettriche e ibride circolanti sul territorio nazionale, è possibile determinare le differenze nette tra i risparmi derivanti dalle ridotte emissioni veicolari, in termini di esternalità, ed i relativi costi associati all'incremento di energia elettrica richiesta, necessaria ad alimentare i suddetti veicoli. Questa analisi tiene in considerazione sia la variazione temporale del parco automobilistico, sia l'evoluzione del mix energetico riferito agli impianti di produzione.

	2020	2025	2030	2035	2040
Vehicles savings (€)	12.782.157	87.649.080	271.164.341	582.501.176	1.171.393.431
Total costs for EVs (€)	544.978	3.324.049	9.846.503	20.030.783	37.765.512
Net difference (€)	12.237.180	84.325.031	261.317.837	562.470.393	1.133.627.919

Tab. 23: Economic analysis for vehicles substitution in Italy

I risparmi generati dalla sostituzione veicolare sono calcolati tenendo conto sia delle auto elettriche, sia di quelle ibride, alimentate da un motore a combustione interna e da uno elettrico. Esse, rispetto alla media delle auto convenzionali, incidono per il 60% a livello di emissioni inquinanti in atmosfera; di conseguenza, ciascuna autovettura ibrida comporterà un risparmio

economico dovuto al restante 40% di evitate emissioni in ambiente. Ovviamente i costi totali sono associati esclusivamente all'impatto ambientale causato dalle centrali alimentate a combustibili fossili: le percentuali prese in considerazione sono quelle precedentemente mostrate nella figura 35, relative alla categoria di fonti non rinnovabili. Per quanto riguarda le differenze nette ricavate nei vari quinquenni, è importante sottolineare che, al fine di ottenere dei valori in €/anno, gli introiti complessivi sono stati suddivisi nei cinque anni antecedenti (nel caso del 2020 solo per i precedenti quattro).

A seguito di ciò, si stima il numero di chilometri per i quali potenzialmente si potrebbe implementare il sistema di ricarica WPT, per i diversi scenari: tale chilometraggio varia di anno in anno in modo esponenziale crescente grazie alla progressiva affermazione dei veicoli elettrici sul mercato. Infine, si ricava la percentuale di copertura autostradale nei tre possibili scenari; questi calcoli evidenziano come, solo per il primo scenario (25% della rete autostradale), si riesce ad avere un ritorno completo dell'investimento entro l'orizzonte temporale stabilito. Al contrario, per gli altri due scenari, non è possibile coprire l'intero investimento mediante i ricavi derivanti dalle esternalità positive. Tutti e tre gli andamenti sono lineari a tratti e riportati in figura 36.

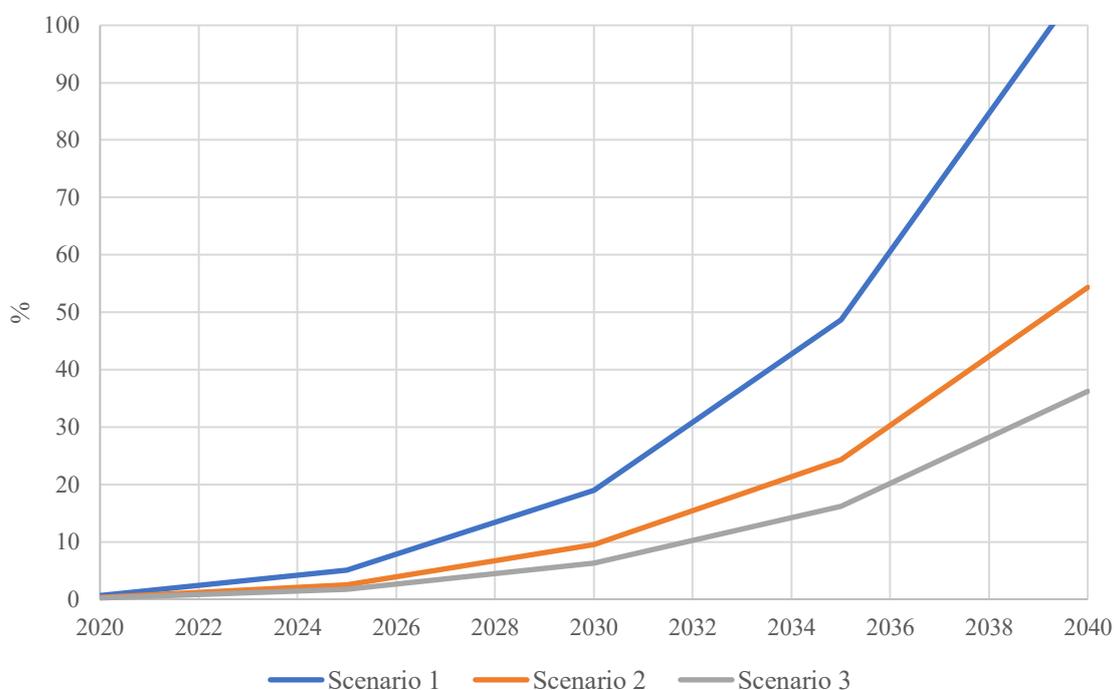


Fig. 36: Percentages of km coverage for three different scenarios

7.4 Fattibilità economica in Europa

L'analisi economica effettuata per l'Italia è a sua volta ampliata ai principali paesi europei già descritti nei capitoli precedenti. Le previsioni riguardanti l'aumento dei veicoli ibridi ed elettrici in circolazione sono le medesime per tutti gli stati considerati, pertanto pari a quelle riportate per l'Italia nella figura 34 all'inizio del paragrafo 7.3. Gli unici dati che di conseguenza risultano variare da nazione a nazione sono quelli relativi alle percentuali di veicoli a benzina, diesel e bi-fuel.

Anche il costo di installazione del sistema, in €/km, e i tre scenari di riferimento sono gli stessi di quelli valutati per l'Italia (copertura del 25%, 50% e 75%), pertanto non sono necessarie ulteriori ipotesi in questa fase. In tabella 24 sono esposti i chilometri totali di autostrade presenti in ciascun paese preso in considerazione.

	France	Germany	Poland	Spain	Sweden	United Kingdom
Total Highways (km)	11.400	12.800	2.600	16.200	1.800	6.000

Tab. 24: Highways kilometres by country

Le previsioni relative alla produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili, invece, variano a seconda della nazione presa in esame, per cui è necessario considerarne i differenti andamenti nel tempo. L'orizzonte temporale definito è nuovamente di 25 anni. Nella tabella 25 e nella figura 37 sono forniti rispettivamente i valori percentuali e gli andamenti previsti di energia elettrica generata da FER nei sei stati. Se nel caso dell'Italia non è presente alcuna produzione di energia da impianti nucleari, essa è invece rilevante per tutti gli altri paesi europei; la ridotta emissione di sostanze inquinanti durante il funzionamento permette di inserire, per questo tipo di analisi, anche il nucleare nel novero delle fonti rinnovabili. Come visibile dai dati ottenuti, Polonia e Germania risultano essere i paesi maggiormente dipendenti dai combustibili fossili infatti, per entrambi, gli indici di produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili, al 2040, si attestano su valori inferiori al 50%. Contrariamente a questi due, negli altri stati si stimano livelli di produzione da FER compresi tra il 63% ed il 95%, includendo sempre l'apporto fornito dagli impianti nucleari.

Renewable energy production (%)					
	2020	2025	2030	2035	2040
France	94,7	95,9	98,0	98,3	91,1
Germany	41,7	38,5	43,7	45,0	48,4
Poland	14,4	19,0	19,9	33,0	45,0
Spain	59,9	66,9	76,8	79,8	77,8
Sweden	94,7	92,9	93,2	91,2	95,4
United Kingdom	60,6	60,8	71,1	65,9	63,1

Tab. 25: Forecasts of energy production from renewable sources in Europe [44]

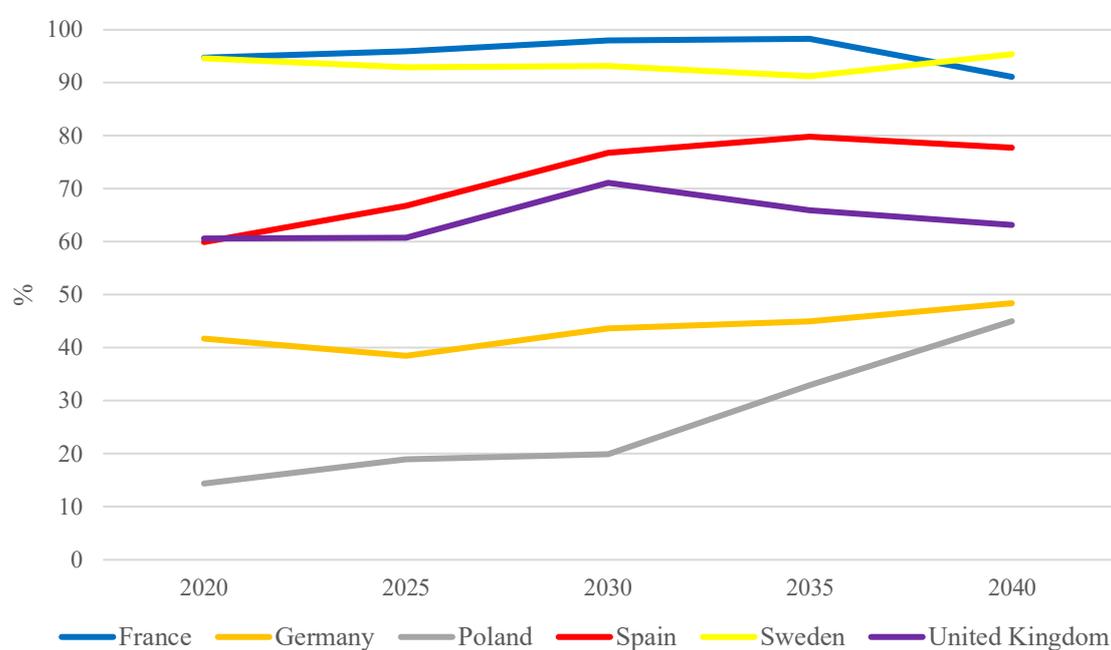


Fig. 37: Forecasts of energy production trends from renewable sources in Europe [44]

Una volta ottenute le varie percentuali sia del comparto automobilistico, sia del settore energetico, è possibile procedere allo step successivo, ovvero la determinazione delle differenze nette e la loro evoluzione fino al 2040. Gli stati che si distinguono per i maggiori guadagni sono in assoluto Francia e Germania, con introiti superiori al miliardo di euro per il quinquennio 2035-2040. Considerando lo stesso periodo, per Polonia, Spagna e Regno Unito, i ricavi sono di un ordine di grandezza inferiori, mentre per la Svezia la differenza netta ottenuta è di soli 45 milioni di euro circa. In tabella 26 sono riportati i valori esatti degli introiti in termini monetari, per i diversi archi temporali.

Net differences (€)					
	2020	2025	2030	2035	2040
France	12.539.432	86.022.527	266.327.580	572.182.794	1.147.641.905
Germany	11.527.306	77.853.689	246.898.625	533.557.445	1.090.027.915
Poland	461.429	4.472.251	14.594.949	55.915.517	158.004.662
Spain	4.138.378	28.877.709	91.565.608	198.166.315	396.496.728
Sweden	491.795	3.365.450	10.415.848	22.324.691	45.106.307
United Kingdom	5.118.179	35.114.874	112.293.203	237.275.299	472.855.970

Tab. 26: Monetary net differences in Europe

Dalle quantità in milioni di euro ottenute, è ora possibile definire un quadro generale per i tre differenti scenari anche a livello europeo. Come visibile dalla figura 38, lo scenario 1, ovvero quello con una copertura del 25%, risulta essere il più ottimistico e di conseguenza il più favorevole dal punto di vista economico. Con i soli contributi generati dalle esternalità positive, per Francia, Germania e Regno Unito si riesce a recuperare più della metà dell'investimento relativo al sistema WPT nell'arco dei 25 anni. Ciò è dovuto al fatto che, per questi tre stati, il numero complessivo di auto è molto più alto rispetto alla media europea, di conseguenza una massiccia introduzione di veicoli elettrici sul mercato risulterebbe maggiormente vantaggiosa in relazione ai benefit ambientali. Nonostante anche la Spagna sia caratterizzata da un'elevata quantità di mezzi circolanti su strada, allo stesso tempo presenta una vastissima rete autostradale (la più estesa in Europa), motivo per cui l'esborso relativo all'infrastruttura di ricarica risulta nettamente più oneroso. La Svezia mostra un andamento pressoché analogo a quello ottenuto per la Spagna, ma per motivazioni differenti: è infatti caratterizzata da un numero molto più esiguo sia di veicoli che di chilometri autostradali. Questi due dati, connessi ad una politica energetica interna già molto improntata sul rinnovabile, fanno sì che non vi sia un pieno ritorno economico nell'arco temporale prestabilito. La Polonia, infine, nei vari scenari si colloca in una posizione intermedia, con 20 milioni di veicoli percorrenti in media 6700 km l'anno; la sua produzione di energia elettrica, però, è poco rivolta alle fonti rinnovabili e ciò ne determina un ridotto vantaggio in termini di inquinamento ambientale e conseguentemente anche dal lato economico.

Gli scenari 2 e 3 mostrano invece degli andamenti più livellati verso il basso. Questi trend sono giustificabili in quanto, dovendo implementare il sistema in una percentuale maggiore di rete autostradale, i costi totali di installazione ne risentono in negativo.

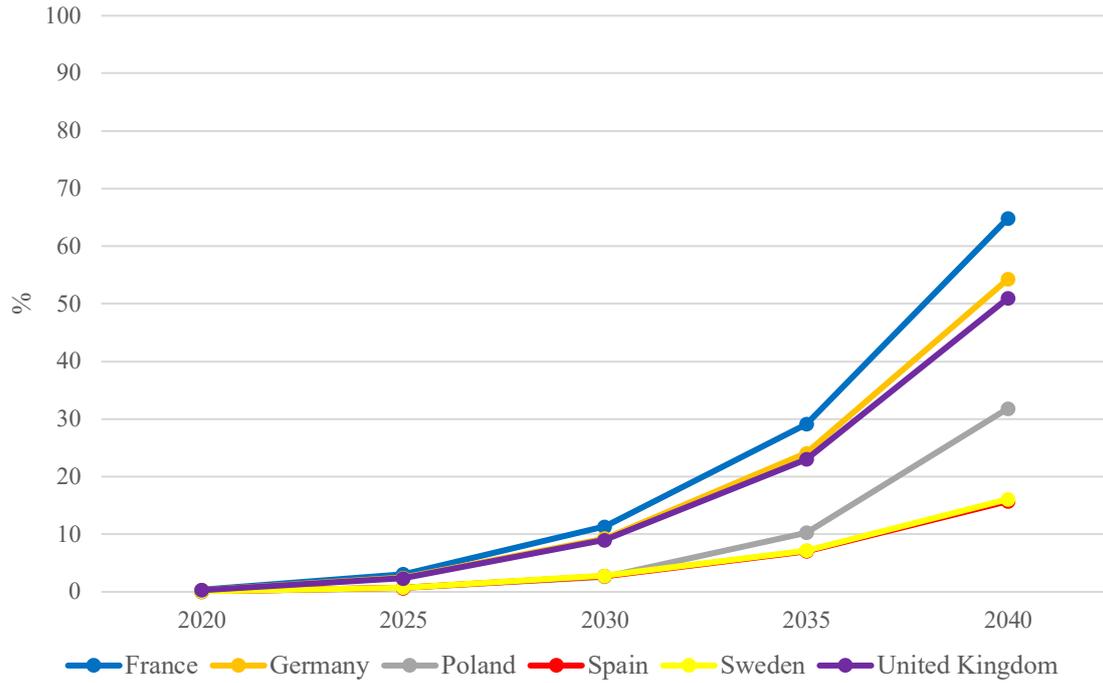


Fig. 38: Percentages of WPT coverage with respect to total highways of Scenario 1

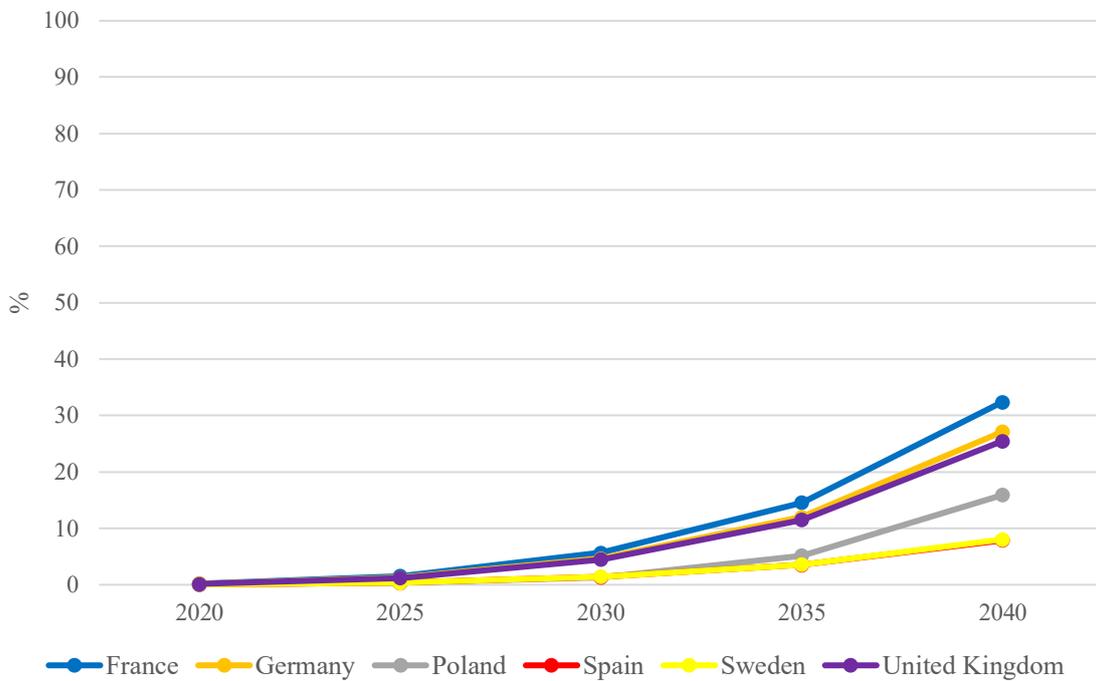


Fig. 39: Percentages of WPT coverage with respect to total highways of Scenario 2

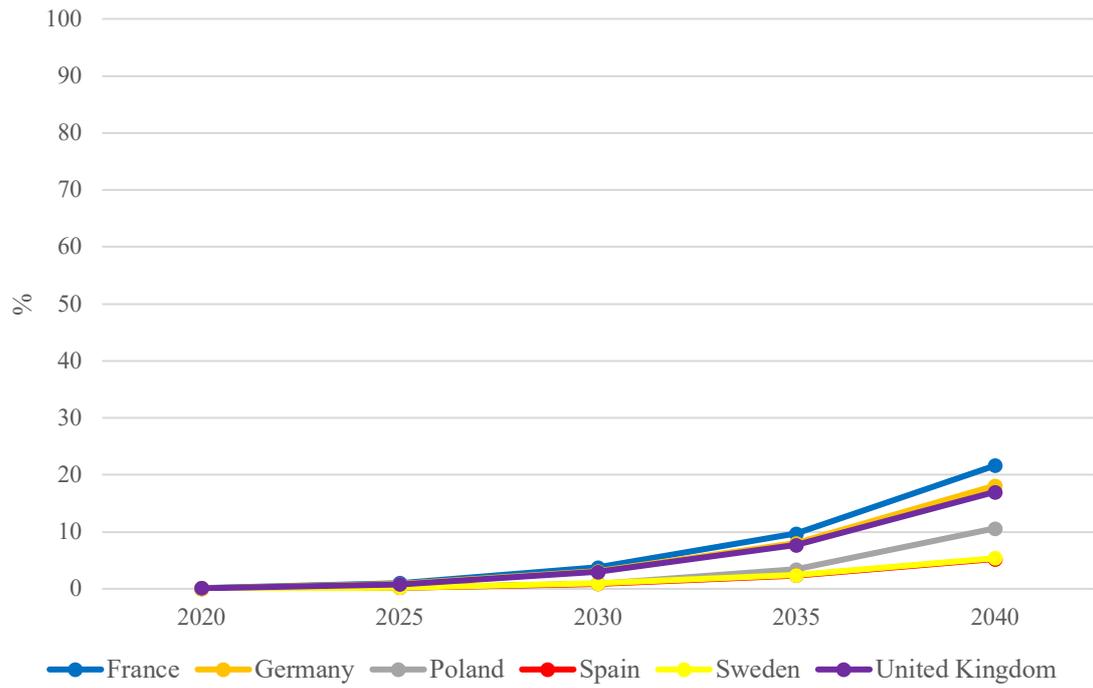


Fig. 40: Percentages of WPT coverage with respect to total highways of Scenario 3

Conclusioni

Con questo lavoro, si è cercato di mettere in luce i potenziali benefici ambientali ed economici derivanti da una parziale riduzione dei veicoli convenzionali attualmente circolanti, a favore dell'introduzione di auto ibride ed elettriche. È stato al contempo valutato l'aumento della produzione di energia elettrica necessario per l'alimentazione di queste ultime, ed il conseguente incremento di sostanze nocive immesse in ambiente. Questa fase preliminare è stata svolta al fine di verificare la fattibilità economica relativa all'installazione di un sistema di ricarica wireless sulla rete autostradale, in Italia e negli altri principali paesi europei. Al fine di svolgere un'analisi più accurata, sono state fatte delle previsioni relative ai trend di crescita nel mercato dei veicoli ibridi ed elettrici; per ipotesi si è stabilito un andamento esponenziale crescente nel tempo, limitando lo studio al 2040. Non sono stati presi in considerazione tutti gli aspetti monetari connessi a potenziali guadagni, utili al sostentamento del progetto (incentivi europei, proventi associati all'utilizzo di energia elettrica per l'alimentazione delle auto), ma solamente quelli legati alle esternalità positive generate dal mancato inquinamento.

L'obiettivo della tesi è stato quello di valutare se sia possibile ottenere il ritorno economico dell'investimento, nell'arco di 25 anni, oltre che in Italia, anche in Francia, Germania, Polonia, Spagna, Svezia e Regno Unito. In questo modo è stato possibile fornire un quadro completo di condizioni riguardanti sia la caratterizzazione del parco auto, sia la generazione di energia elettrica da fonti rinnovabili. Pertanto, i risultati ottenuti si sono rivelati alquanto differenti a seconda della nazione considerata, ma in linea di massima comunque incoraggianti dal punto di vista economico-ambientale. In generale, nell'orizzonte temporale considerato e soltanto mediante i ricavi generati dalle ridotte esternalità, non si riesce a coprire l'intero investimento relativo all'implementazione del sistema WPT per il 25% della rete totale. Ovviamente si verificano condizioni ulteriormente gravose nel momento in cui si ipotizza di estendere la copertura al 50% e al 75%. Il primo scenario risulta perciò il più facilmente attuabile nel medio termine, essendo in grado di garantire una percentuale di completamento del progetto più elevata, se confrontato con le altre due opzioni. Nello specifico, dalla figura 36 si evince che, per l'Italia, è possibile coprire interamente il 25% del manto autostradale con il sistema Wireless Power Transfer, riprendendo l'intero investimento tra il 2038 e il 2040. Al contrario, per gli altri due casi, non si ha un pieno rientro della spesa complessiva nell'arco temporale analizzato; nel secondo scenario si arriva a realizzare il 54% circa del chilometraggio prefissato,

mentre nel terzo soltanto il 36%. Nonostante ciò, gli ultimi due scenari non sono da escludere totalmente nel caso in cui si volesse estendere la loro realizzazione considerando un lasso di tempo più ampio.

Negli altri paesi europei la situazione si prospetta sostanzialmente diversa: nella situazione più favorevole, ovvero lo scenario 1, in Francia è possibile ottenere una copertura del 65% di quanto pronosticato, mentre in Germania e Regno Unito si arriva rispettivamente al 54% e al 51%. Segue la Polonia, per la quale si ottiene una percentuale pari al 32%, e infine Svezia e Spagna, attestandosi intorno al 16%. Per gli scenari 2 e 3 i valori percentuali ottenuti per ciascuna nazione sono proporzionalmente scalati rispetto a quelli ricavati per lo scenario 1, e rispettivamente pari alla metà e ad un terzo di questi ultimi.

Un concetto importante evidenziato all'interno di questa tesi è l'imprescindibilità del settore della mobilità elettrica da quello della generazione da fonti rinnovabili; affinché la piena affermazione dei veicoli elettrici sia giustificabile dal punto di vista dei benefici ambientali, è necessario che, parallelamente, vi sia un importante incremento nell'ambito delle energie rinnovabili, riducendo così la dipendenza dai combustibili fossili e le conseguenti emissioni inquinanti.

All'interno di questo contesto, in futuro, un fattore determinante potrebbe essere proprio la rapida evoluzione e commercializzazione del sistema di ricarica dinamica WPT, in grado di contribuire ad una adozione, su larga scala, delle vetture elettriche nel settore dei trasporti, sia privato che pubblico. Nonostante si tratti di una tecnologia relativamente recente e quindi ancora non del tutto matura, le sue potenzialità sono assai vaste, specialmente nell'ottica della riduzione del peso delle batterie e dell'aumento della limitata autonomia dei veicoli elettrici.

Appendice A: Evitate emissioni inquinanti in atmosfera

Nelle seguenti tabelle sono riportati tutti i valori esatti relativi alle evitate emissioni di inquinanti primari, generate dai veicoli con motore a combustione interna, per tutti i paesi europei di interesse, in tonnellate annue. Essi sono stati utilizzati per il calcolo dei risparmi complessivi (*total savings*), ottenuti in seguito alla graduale rimozione delle auto alimentate a combustibili fossili, nei capitoli 5 e 6.

ITALY							
Vehicles removed	CO (t/year)	NMVOC (t/year)	NO _x (t/year)	NH ₃ (t/year)	PM _{2.5} (t/year)	PM ₁₀ (t/year)	SO _x (t/year)
10%	44.426	12.358	14.997	885	813	1.081	24
20%	88.852	24.716	29.995	1.770	1.626	2.162	49
30%	133.278	37.074	44.992	2.655	2.440	3.244	73
40%	177.704	49.432	59.990	3.540	3.253	4.325	98
50%	222.130	61.790	74.987	4.424	4.066	5.406	122

Tab. A.1: Avoided emissions (t/year) in Italy due to removed ICE vehicles

FRANCE							
Vehicles removed	CO (t/year)	NMVOC (t/year)	NO _x (t/year)	NH ₃ (t/year)	PM _{2.5} (t/year)	PM ₁₀ (t/year)	SO _x (t/year)
10%	18.893	1.893	22.693	336	1.099	1.099	48
20%	37.786	3.786	45.387	671	2.198	2.198	96
30%	56.678	5.679	68.080	1.007	3.297	3.297	144
40%	75.571	7.572	90.773	1.342	4.396	4.396	192
50%	94.464	9.465	113.466	1.678	5.495	5.495	239

Tab. A.2: Avoided emissions (t/year) in France due to removed ICE vehicles

GERMANY							
Vehicles removed	CO (t/year)	NMVOC (t/year)	NO_x (t/year)	NH₃ (t/year)	PM_{2.5} (t/year)	PM₁₀ (t/year)	SO_x (t/year)
10%	52.383	5.680	24.986	1.147	378	378	52
20%	104.766	11.360	49.972	2.293	755	755	104
30%	157.149	17.040	74.959	3.440	1.133	1.133	156
40%	209.532	22.720	99.945	4.586	1.511	1.511	208
50%	261.915	28.401	124.931	5.733	1.889	1.889	260

Tab. A.3: Avoided emissions (t/year) in Germany due to removed ICE vehicles

POLAND							
Vehicles removed	CO (t/year)	NMVOC (t/year)	NO_x (t/year)	NH₃ (t/year)	PM_{2.5} (t/year)	PM₁₀ (t/year)	SO_x (t/year)
10%	38.061	4.010	8.215	408	339	339	-
20%	76.122	8.021	16.431	817	678	678	-
30%	114.183	12.031	24.646	1.225	1.016	1.016	-
40%	152.244	16.042	32.861	1.633	1.355	1.355	-
50%	190.305	20.052	41.076	2.042	1.694	1.694	-

Tab. A.4: Avoided emissions (t/year) in Poland due to removed ICE vehicles

SPAIN							
Vehicles removed	CO (t/year)	NMVOC (t/year)	NO_x (t/year)	NH₃ (t/year)	PM_{2.5} (t/year)	PM₁₀ (t/year)	SO_x (t/year)
10%	8.169	761	14.566	223	396	396	24
20%	16.338	1.523	29.133	446	792	792	48
30%	24.507	2.284	43.699	669	1.188	1.188	73
40%	32.676	3.046	58.265	891	1.584	1.584	97
50%	40.846	3.807	72.832	1.114	1.980	1.980	121

Tab. A.5: Avoided emissions (t/year) in Spain due to removed ICE vehicles

SWEDEN							
Vehicles removed	CO (t/year)	NMVOC (t/year)	NO_x (t/year)	NH₃ (t/year)	PM_{2.5} (t/year)	PM₁₀ (t/year)	SO_x (t/year)
10%	5.077	755	2.367	182	23	23	5
20%	10.155	1.510	4.734	364	46	46	10
30%	15.232	2.265	7.102	547	69	69	15
40%	20.309	3.019	9.469	729	92	92	19
50%	25.386	3.774	11.836	911	115	115	24

Tab. A.6: Avoided emissions (t/year) in Sweden due to removed ICE vehicles

UNITED KINGDOM							
Vehicles removed	CO (t/year)	NM VOC (t/year)	NO_x (t/year)	NH₃ (t/year)	PM_{2.5} (t/year)	PM₁₀ (t/year)	SO_x (t/year)
10%	22.851	1.269	15.764	430	311	311	109
20%	45.702	2.537	31.529	860	623	623	218
30%	68.553	3.806	47.293	1.290	934	934	328
40%	91.403	5.074	63.058	1.720	1.246	1.246	437
50%	114.254	6.343	78.822	2.150	1.557	1.557	546

Tab. A.7: Avoided emissions (t/year) in United Kingdom due to removed ICE vehicles

Riferimenti bibliografici

- [1] M. Zambrini, “Il peso del settore dei trasporti sui cambiamenti climatici e le prospettive di contenimento delle emissioni: gli scenari internazionali ed europei”, Convegno Trasporti e Cambiamenti Climatici, Società Italiana di Politica dei Trasporti (SIPOTRA), 2016.
- [2] International Energy Agency (IEA), “Global EV Outlook 2018: Towards Cross-modal Electrification”, 2017.
- [3] V. Cirimele, M. Diana, F. Freschi, M. Mitolo, “Inductive power transfer for automotive applications: state-of-the-art and future trends”, IEEE Transactions on Industry Application, 2018.
- [4] S.E. Shladover et al., “Path at 20-history and major milestones”, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 8, no. 4, 2007.
- [5] E. Gazzola, “Analisi della risonanza in due diverse topologie di compensazione per un caricabatterie wireless”, Università degli Studi di Padova, 2018.
- [6] C. Rondena, “Tecnologie per il Wireless Power Transfer: stato dell’arte e prospettive future”, Politecnico di Milano, 2016.
- [7] M. Pedretti, I. Simonini, “Design and Analysis of an IPT Wireless System for Electric Vehicles”, Politecnico di Milano, 2017.
- [8] D.M. Vilathgamuwa, J.P.K. Sampath, “Plug-In Electric Vehicles in Smart Grids”, cap. 2 “Wireless Power Transfer (WPT) for Electric Vehicles (EVs) - Present and Future Trends”, 2015.
- [9] Z. Bi et al., “A review of wireless power transfer for electric vehicles: Prospects to enhance sustainable mobility”, Applied Energy, 2016.

- [10] A. Frizzarin, “Dimensionamento di un sistema WPT per veicoli elettrici commerciali”, Università degli Studi di Padova, 2016.
- [11] P. Mancarella, A. Canova, G. Chicco, G. Genon, “Cogenerazione distribuita a gas naturale –Modelli e tecniche per valutazioni energetiche, ambientali ed economiche”, FrancoAngeli, Milano, 2009.
- [12] “Ministero dell’Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (MATTM)”, <http://www.minambiente.it/pagina/gli-inquinanti>.
- [13] “European Environment Agency (EEA) Website”, <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/transport-emissions-of-air-pollutants-8/transport-emissions-of-air-pollutants-5>.
- [14] “Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale Valle d’Aosta (ARPA Valle d’Aosta)”, <http://www.arpa.vda.it/it/aria/1-inquinamento-atmosferico/2534-i-metalli-pesanti>.
- [15] “Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale Umbria (ARPA Umbria)”, <https://www.arpa.umbria.it/monitoraggi/aria/contenuto.aspx?idpagina=14>.
- [16] Agenzia per la Protezione dell’Ambiente e per i servizi Tecnici (APAT), “Diossine Furani e PCB”, Ministero della Salute, 2006.
- [17] R. De Lauretis, M. Pantaleoni, E. Taurino, “Emissioni in atmosfera di PCB e HCB in Italia dal 1990 al 2006”, Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA), 2009.
- [18] “Istituto Superiore di Sanità (ISS)”, <https://www.issalute.it/index.php/la-salute-dalla-a-alla-z-menu/d/diossine#fonti-di-esposizione-e-livelli-nell%E2%80%99uomo>.
- [19] D.Lgs. 13 agosto 2010, n. 155, in materia di “Qualità dell’aria ambiente”.
- [20] “Automobile Club d’Italia (ACI)”, <http://www.aci.it/laci/studi-e-ricerche/dati-e-statistiche/annuario-statistico/annuario-statistico-2017.html>.

- [21] F. Deflorio et al., “Modeling and analysis of wireless “Charge While Driving” operations for fully electric vehicles”, Transportation Research Procedia, 2014.
- [22] L. Ntziachristos, Z. Samaras, “Road Transport 2016 – July 2017”, EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016, 2017.
- [23] “Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA)”, Banca dati dei fattori di emissione medi per il parco circolante in Italia, <http://www.sinanet.isprambiente.it/it/sia-ispra/fetransp>.
- [24] D. De Lillas, “Valutazione dell’impatto ambientale della ricarica wireless per autoveicoli”, Politecnico di Torino, 2018.
- [25] “Analisi dei dati elettrici 2016”, Terna S.p.a e gruppo Terna, 2016.
- [26] “Fonti rinnovabili in Italia e in Europa – Verso gli obiettivi al 2020”, Gestore dei Servizi Energetici (GSE), 2018.
- [27] “Energia elettrica, anatomia dei costi”, Ricerca sul Sistema Energetico (RSE), 2016.
- [28] “Scenari della domanda elettrica in Italia”, Terna S.p.a. e gruppo Terna, 2016.
- [29] L. Benedetti, “Piano Energia e Clima 2018”, Gestore dei Servizi Energetici (GSE), 2018.
- [30] M. Jorli et al., “Estimating Human Health Impacts and Costs Due to Iranian Fossil Fuel Power Plant Emissions through the Impact Pathway Approach”, Energies, 2017.
- [31] “ExternE - External Costs of Energy”, http://www.externe.info/externe_d7.
- [32] “EcoSenseLE (Light Edition)”, Welcome to EcoSenseLE for Europe, <http://ecoweb.ier.uni-stuttgart.de/EcoSenseLE/current/model/welcome.php>.

- [33] “The World Bank”, Electric power transmission and distribution losses, <https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.LOSS.ZS>
- [34] “Eurostat (European Statistical Office)”, Electricity generation statistics – first results, https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity_generation_statistics_%E2%80%93_first_results#Production_of_electricity.
- [35] “European Environment Agency (EEA)”, Air pollutant emissions data viewer, <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/dashboards/air-pollutant-emissions-data-viewer-1>.
- [36] “European Automobile Manufacturers Association (ACEA)”, Vehicles in use – Europe 2017, <https://www.acea.be/statistics/article/vehicles-in-use-europe-2017>.
- [37] “Odyssee-Mure”, Change in distance travelled by car, <http://www.odyssee-mure.eu/publications/efficiency-by-sector/transport/distance-travelled-by-car.html>
- [38] “European Automobile Manufacturers Association (ACEA)”, Passenger car fleet by fuel type, <https://www.acea.be/statistics/article/Passenger-Car-Fleet-by-Fuel-Type>.
- [39] C. Fleming, “Wireless electric car charging tested for in-motion vehicles”, Sustainable Electrified Transportation Center (SELECT), 2014.
- [40] B. Limb et al., “Economic Viability and Environmental Impact of In-Motion Wireless Power Transfer”, IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2018.
- [41] R. De Doncker, “Power electronic technologies for flexible DC distribution grids”, International Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014 – ECCE ASIA), 2014.
- [42] Bloomberg NEF, “Electric Vehicle Outlook 2018”, <https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook/>.

[43] NationMaster, “Motorway length: Countries Compared”,
<https://www.nationmaster.com/country-info/stats/Transport/Road/Motorway-length>.

[44] Commissione europea, “EU Reference Scenario 2016 - Energy, transport and GHG emissions: trends to 2050”, 2016.