

ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITA' DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA
Sede di Forlì

Corso di Laurea in
INGEGNERIA MECCANICA
Classe L-9

ELABORATO FINALE DI LAUREA
in Macchine

CONFRONTO EMISSIONI INQUINANTI DI VEICOLI
EQUIPAGGIATI CON DIVERSI MOTOPROPULSORI

CANDIDATO
Riccardo Marino

RELATORE
Prof. Ing. Enrico Corti

Anno Accademico 2017/2018

Alla Mia Famiglia, Sole della mia vita
Alla Mia Fidanzata, la mia Stella più bella

INDICE

1. INTRODUZIONE

1.1	PANORAMICA E OBIETTIVO	7
1.2	EMISSIONI MOTORI COMBUSTIONE INTERNA	8
1.3	EVOLUZIONE DELLE NORMATIVE EUROPEE SULLE EMISSIONI	9
1.4	MOTOPROPULSORI ALTERNATIVI	11

2. METODOLOGIA

2.1	LIFE CYCLE ASSESSMENT	15
2.2	LIFE CYCLE ASSESSMENT SECONDO LA NORMA 14040	17
2.3	PRECISAZIONI SULL'USO DEL LCA	18

3. FATTORI RILEVANTI

3.1	PESO E DRIVING RANGE	21
3.2	CORRELAZIONE PESO - EMISSIONE DI PARTICOLATO	27
3.3	IMPATTO AMBIENTALE IN TERMINI DI TOSSICITÀ	31
3.4	INFLUENZA DI FATTORI ESTERNI SUL LIFE CYCLE ASSESSMENT	34
3.5	INFLUENZA DELLA FASE DI CARICA DELLE BATTERIE	40
3.6	INFLUENZA DEL MIX PRODUTTIVO	45

4. PROSPETTIVA FUTURA 54

5. CONCLUSIONI 58

6. BIBLIOGRAFIA 61

7. RINGRAZIAMENTI 66

1.INTRODUZIONE

1.1 PANORAMICA E OBIETTIVO

La società moderna dipende fortemente dai trasporti su strada, e negli ultimi decenni si è registrato un trend molto positivo nella loro crescita e diffusione.

Uno studio del “*World Business Council for Sustainable Development*” (2004), sostiene che il numero di autoveicoli crescerà ulteriormente passando dai 700 milioni attuali a 2 miliardi nel 2050.

Un aumento così rilevante è da tenere particolarmente in considerazione per i cambiamenti climatici e per la qualità dell’aria nei centri urbani; Uno studio condotto da “*Sims et al*” nel 2014, ha infatti rilevato che gli autoveicoli tradizionali (equipaggiati con motori diesel o benzina) contribuiscono a un 20% in termini di consumo di energia globale e di emissioni di gas serra (*GHG “Greenhouse Gases”*).

A causa delle normative antinquinamento sempre più stringenti in fase di omologazione (soprattutto Europee) i veicoli elettrici sono stati proposti come valida alternativa per la riduzione delle emissioni inquinanti.

Obiettivo di questa tesi è un confronto in termini di *Life Cycle Assessment* (LCA) fra le diverse soluzioni esistenti nel parco auto mondiale, soprattutto fra i motori tradizionali ed elettrici, sulla base di studi presenti in letteratura.

Si vuole evidenziare che, per quanto i veicoli elettrici abbiano emissioni “zero” allo scarico, l’esito del confronto con i motori tradizionali non è per niente scontato e che per un’analisi corretta bisogna considerare diversi parametri, fra cui le emissioni di GHG e il consumo di risorse energetiche durante l’intero ciclo di vita del veicolo.

Procedendo in questo modo si possono mettere in evidenza pregi e difetti dei veicoli elettrici, come:

- Una minore emissione in termini di CO₂, qualora l’energia elettrica provenga da una filiera rinnovabile e sostenibile;
- Un maggiore contributo in termini di emissioni tossiche, dovuto al ciclo di vita (produzione e smaltimento) delle batterie;

- Un maggiore contributo in termini di particolato, dovuto al maggiore peso dei veicoli elettrici.

1.2 EMISSIONI MOTORI A COMBUSTIONE INTERNA

I motori a combustione interna sono macchine motrici volumetriche che convertono in energia meccanica l'energia chimica contenuta in combustibili fossili (benzina, diesel e gas naturali come gpl e metano).

La sigla di riferimento per i veicoli che sono equipaggiati con motori termici è ICEVs "*Internal Combustion Engine Vehicles*".

I motori termici aspirano aria dall'atmosfera scaricandovi poi i prodotti della combustione che alterano la sua composizione naturale.

Gli inquinanti prodotti si possono sinteticamente dividere in:

1. Prodotti di *incompleta combustione* (ossido di carbonio CO, incombusti H_xC_y , perossidi, aldeidi, ecc.), tossici e capaci di produrre danni fisiologici;
2. Prodotti di *ossidazione completa* di impurezze presenti nel combustibile (come gli ossidi di zolfo) e/o nell'aria utilizzata nella combustione (ad esempio ossidi di azoto NO_x) che sono nocivi per ogni forma di vita animale e vegetale;
3. Prodotti di *ossidazione completa* che sono già presenti nell'atmosfera (anidride carbonica e vapore acqueo), che però contribuiscono alla modifica del bilancio tra l'energia assorbita e quella irradiata dalla terra (*effetto serra*).

Le emissioni di anidride carbonica, e in maniera molto minore il metano (pure avendo in GWP "*Global Warming Power*" circa venti volte superiore alla CO_2) contribuiscono ad alterare il clima e sono definite clima-alteranti GHG ("*Greenhouse Gases*"). A esse, per via delle miscele aria/combustibile più grasse contribuiscono più i motori benzina che i diesel.

Altrettanto pericolose per l'inquinamento soprattutto dei centri urbani sono le emissioni di PM "*Particulate Matter*" (particolato solido), particelle solide portate in

sospensione dai gas derivate dall'ossidazione incompleta del combustibile o da composti metallici ed additivi in esso presente.

Esse sono altamente cancerogene, responsabili dello smog-fotochimico e sono un ottimo vettore per trasportare altre sostanze cancerogene a livello di alveoli polmonari. Questo a causa delle loro ridotte dimensioni avendo diametro massimo di 2.5-10 μm ; sono infatti comunemente chiamate "polveri sottili" PM2.5 e PM10.

Il particolato è prodotto tipicamente nei motori a iniezione diretta soprattutto diesel per l'ambiente disomogeneo fra aria e combustibile che si viene a formare in camera di combustione.

1.3 EVOLUZIONE DELLE NORMATIVE EUROPEE SULLE EMISSIONI

A partire dall'1991 l'Unione Europea ha colpito sempre più duramente i motori a combustione tradizionali al fine di limitarne l'impatto ambientale. Come si vede dalle tabelle (**figura 1.1**) ma soprattutto dal grafico sottostante (**figura 1.2**), ad ogni stadio successivo della normativa sono stati operati dei tagli, spesso drastici, abbassando progressivamente i livelli di emissioni inquinanti limite.

Gli inquinanti a cui è stata rivolta maggiore attenzione attraverso la successione delle normative Euro sono gli ossidi di azoto (specie per i diesel) ed il particolato, soprattutto quello di dimensioni ultrafini generato dai motori benzina.

Si può notare come, mentre la normativa EURO V è stata emanata con l'obiettivo di ridurre soprattutto le emissioni di particolato, la normativa EURO VI si concentra in particolare sulla riduzione delle emissioni di NOx di oltre il 50% rispetto alla normativa precedente. Questo ha portato le case automobilistiche e le compagnie petrolifere ad un imponente lavoro di ricerca che ha permesso di immettere sul mercato via via nuovi motori e combustibili, capaci di ridurre le emissioni nocive.

Valori delle emissioni per i veicoli nuovi con motore diesel						
	validi a partire dal	CO (g/km)	HC (g/km)	NOx (g/km)	HC+NOx (g/km)	PM
Euro I	01/92	3,16	-	-	1,13	0,14
Euro II	01/96	1,00	0,15	0,55	0,70	0,08
Euro III	01/00	0,64	0,06	0,50	0,56	0,05
Euro IV	01/05	0,50	0,05	0,25	0,30	-
Euro V	09/09	0,50	0,05	0,18	0,23	0,005
Euro VI	08/14	0,50	0,09	0,08	0,17	0,005

Valori delle emissioni per i veicoli nuovi con motore a benzina						
	validi a partire dal	CO (g/km)	HC (g/km)	NOx (g/km)	HC+NOx (g/km)	PM
Euro I	12/92	2,72	-	-	0,97	-
Euro II	01/97	2,20	-	-	0,5	-
Euro III	01/00	2,30	0,20	0,15	-	-
Euro IV	01/05	1,00	0,10	0,08	-	-
Euro V	09/09	1,00	0,10	0,06	-	0,005*
Euro VI	08/14	1,00	0,10	0,06	-	0,005*

* con iniezione diretta

Figura 1.1. Tabelle valori emissioni inquinanti imposte dalle varie EURO I, II, III, IV, V, VI rispettivamente dei motori diesel e benzina.

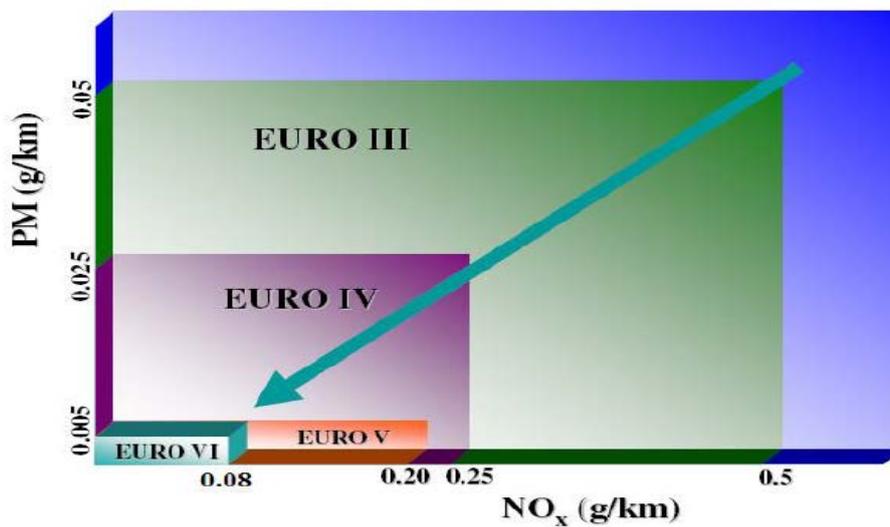


Figura1.2. Riduzione dei valori limite di NO_x e PM con le varie normative EURO III, IV, V, VI. Fonte [4].

1.4 MOTOPROPULSORI ALTERNATIVI

Le case automobilistiche spinte da politiche di decarbonizzazione e contenimento delle emissioni, e dalle sempre più stringenti norme antinquinanti per i cicli di omologazione dei veicoli, hanno investito risorse sempre più ingenti sulle possibili soluzioni alternative ai motori tradizionali.

I principali sistemi propulsivi “alternativi” su cui sono concentrate le ricerche delle case automobilistiche sono:

- elettrici
 1. motore elettrico generalmente trifase alimentato da una batteria a ioni di litio (il veicolo che ne dispone si definisce BEV *Battery Electric Vehicle*), vedi **figura 1.3**;
 2. motore elettrico alimentato con energia elettrica generata da celle a combustibile a sua volta alimentate da idrogeno e ossigeno, ed avente come prodotto finale acqua (il veicolo si definisce FCEV *Full Cell Electric Vehicle*), schema in **figura 1.4**;
- ibridi: insieme di un motore termico (benzina o diesel), uno o più motori elettrici e un sistema di batterie di accumulo.

Le auto ibride esistono in tre varianti:

- Full Hybrid: sono in grado di avanzare sfruttando il solo motore termico oppure solo il motore elettrico (per qualche chilometro) o ancora la combinazione di entrambi. Il motore elettrico interviene aiutando quello termico all'avviamento o in caso di necessità come in salita o fase di accelerazione, mentre in fase di rilascio o di frenata, ricarica il pacco batterie (**figura 1.5**).
- Plug-in Hybrid (PHEV): hanno le stesse caratteristiche delle precedenti, ma dispongono di una presa per la ricarica del pacco batterie tramite rete

elettrica (domestica o colonnina); hanno pacchi batteria di capacità maggiore e quindi maggiore autonomia a trazione puramente elettrica.

- Mild Hybrid: classico motore termico più motore elettrico di piccola taglia, hanno accumulatori più piccoli che consentono alla vettura di percorrere alcune centinaia di metri con la sola trazione elettrica. La sinergia delle fasi dei due motori è la stessa dei veicoli Full Hybrid (**figura 1.6**).

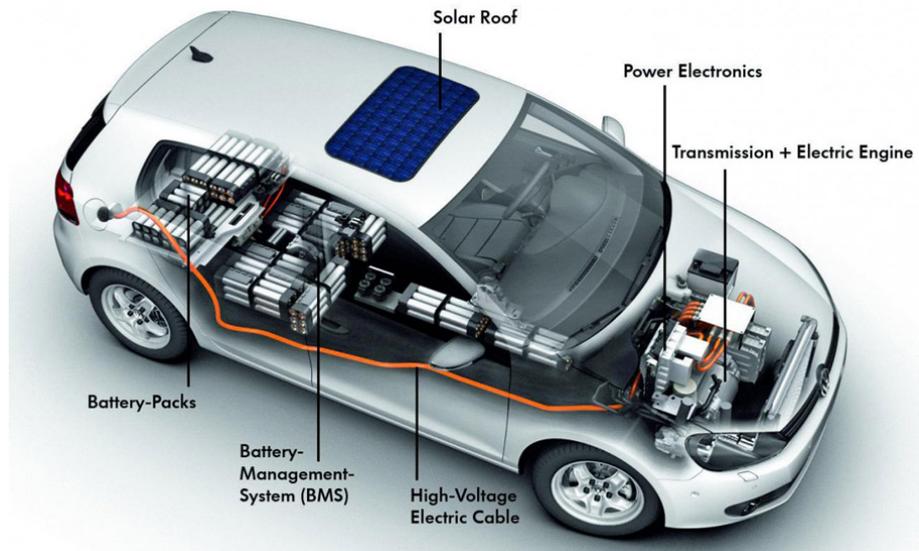


Figura 1.3. Battery Electric Vehicle.

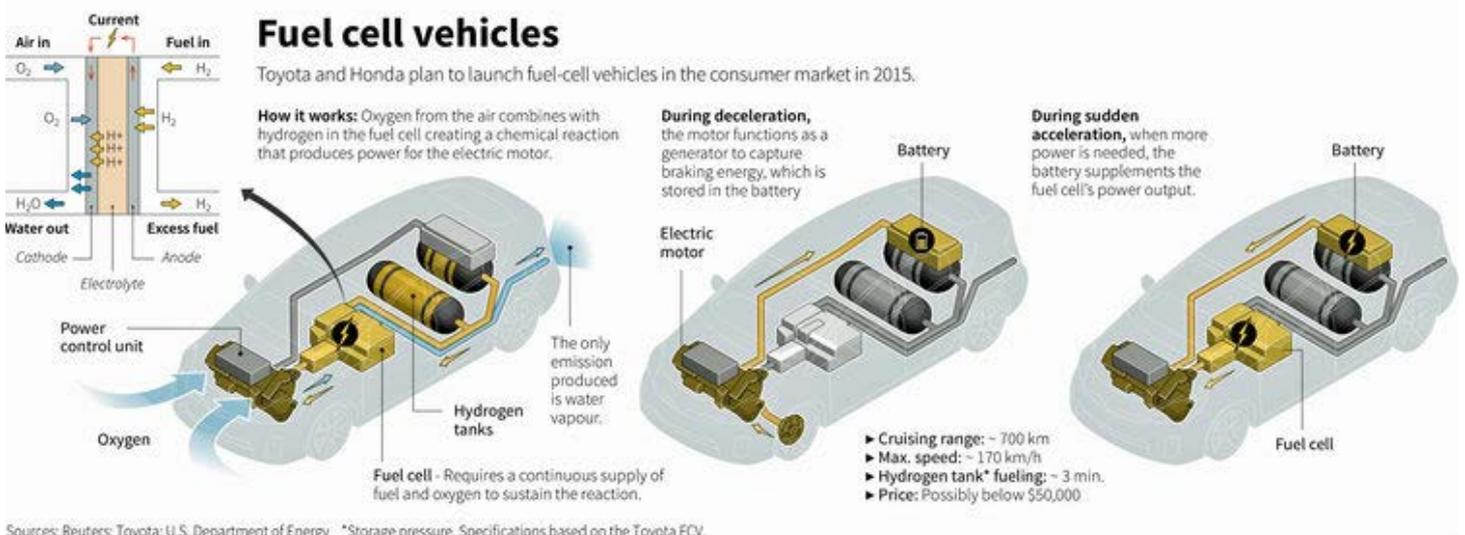


Figura 1.4. Schema funzionamento nelle diverse fasi di un Fuel cell vehicle.

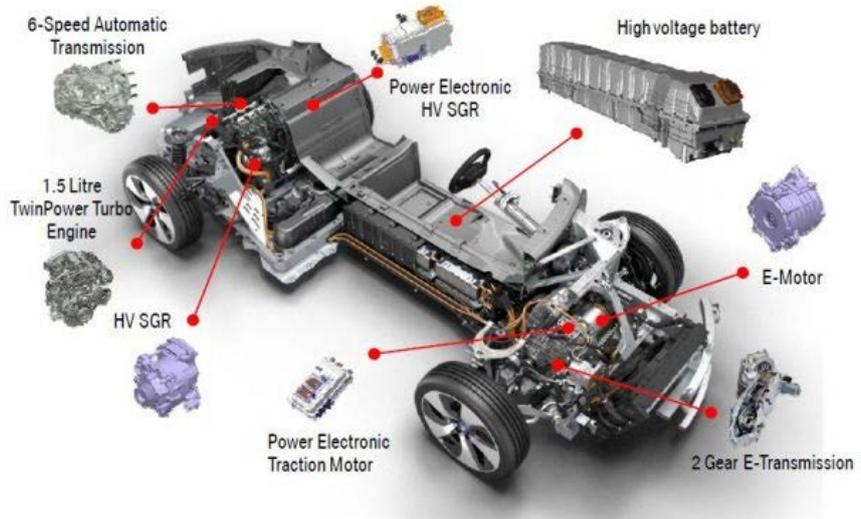


Figura 1.5. Schema semplificato di vettura ibrida elettrica plug-in PHEV.

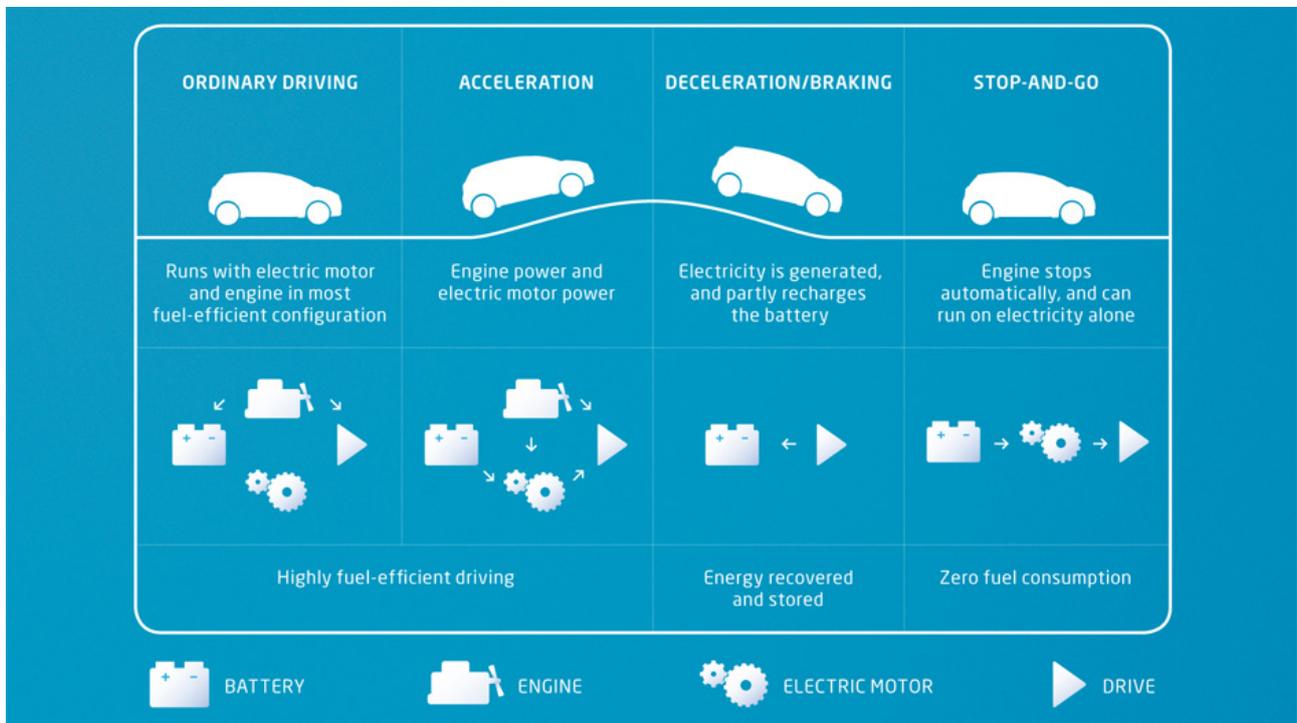


Figura 1.6. Rappresentazione sinergia fasi dei motori termici ed elettrici.

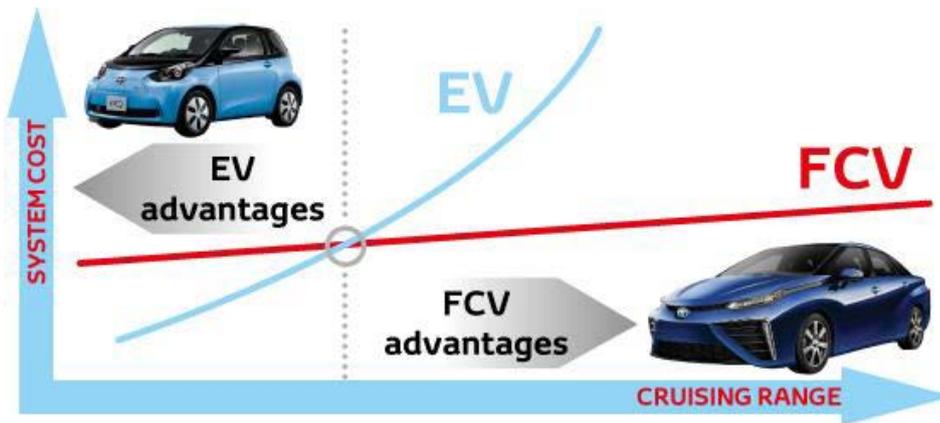


Figura 1.7. Campo di impiego dei veicoli FCV ed EV.

Sinteticamente le differenze fra BEVs e FCEVs si possono riassumere in:

- BEVs si prestano bene per uso urbano o extra-urbano-medio raggio, tuttavia modelli del segmento C di prossima introduzione dichiarano autonomie di marcia di circa 500 km
- FCEVs presentano un rapporto peso/potenza più favorevole, e autonomie di marcia maggiori, con costi competitivi rispetto ai BEV per veicoli di segmento C/D
- La maggiore autonomia dei FCEV rispetto ai BEV risiede innanzitutto nella maggiore densità energetica di H₂ rispetto alle batterie al Litio. La scala di densità energetica per tipo di combustibile, in **figura 1.8**, chiarisce la difficoltà di sostituzione dei combustibili liquidi nel sistema dei trasporti.

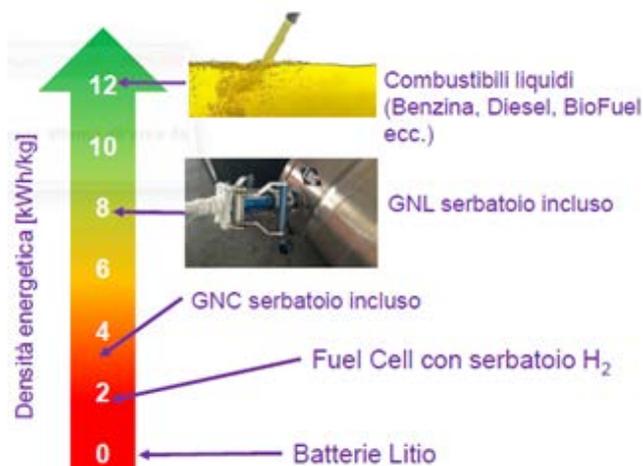


Figura 1.8. Scala densità energetica combustibili.

2. METODOLOGIA

2.1 LIFE CYCLE ASSESSMENT

Il “*Life Cycle Assessment*” (LCA) è uno degli strumenti più validi, e universalmente accettato, per condurre analisi sistematiche sull’impatto ambientale di vari prodotti considerandone i diversi stadi dell’intero ciclo di vita, come ad esempio le fasi di produzione, uso e smaltimento.

Si rivela ancora più utile per effettuare confronti sistematici su emissioni inquinanti fra prodotti tecnologicamente molto diversi tra loro.

Il procedimento per eseguire correttamente un LCA è standardizzato dall’*Organizzazione Internazionale della Standardizzazione* (ISO) e si possono trovare dei riferimenti nelle ISO 14040 - series (*United Nations Environment Programme, 2015*).

Un LCA completo per un veicolo deve considerare sia i processi diretti che quelli indiretti in termini di emissioni di CO₂ e/o consumo di risorse energetiche. Le emissioni di CO₂ dai gas di scarico di un motore a combustione interna o il consumo di elettricità “istantaneo” associato alla batteria di un veicolo elettrico sono da considerarsi processi diretti; viceversa sono considerate indirette le emissioni dovute al ciclo di vita del vettore energetico e del ciclo di produzione del veicolo (dall’estrazione delle materie prime allo smaltimento).

Quando alcuni dati sperimentali non fossero disponibili o misurabili, si può fare riferimento a delle stime presenti in alcuni database come *Greenhouse gases, Regulated Emissions, Energy use in Transportation* (GREET) e *EcolInvent*.

Nelle analisi di tipo LCA non sempre si considerano tutte le fasi dell’intero ciclo di vita del veicolo, soprattutto quando si vuole sottolineare un particolare aspetto.

Ad esempio, un’analisi di tipo WTW (“*Well To Wheel*”) “dal pozzo alla ruota” consente di concentrarsi sui processi che vanno dall’estrazione/produzione del combustibile/energia elettrica fino alla conversione in energia meccanica del veicolo guidato, trascurando invece le fasi di produzione e smaltimento del veicolo.

Un'analisi WTW rappresenta fedelmente l'intero ciclo di vita del veicolo quando sono trascurabili i contributi in termini di emissioni di GHG per la produzione/smaltimento del veicolo stesso, in quei contesti dove l'energia elettrica proviene maggiormente da fonti rinnovabili e sostenibili.

L'analisi WTW a sua volta può essere divisa in due fasi:

- 1) Analisi WTT (*Well to Tank*) "dal pozzo al serbatoio" studia i processi dall'estrazione/produzione di combustibili/energia elettrica fino all'immagazzinamento nel serbatoio/accumulatore di energia elettrica; comprende quindi l'intero ciclo di vita del combustibile, estrazione, produzione e distribuzione fino all'utente.
- 2) Analisi TTW (*Tank To Wheel*) "dal serbatoio alla ruota" si concentra sui processi di conversione dell'energia dal serbatoio alla conversione in energia meccanica del veicolo guidato; come affermato da *Nordelöf et al. (2014)* il TTW è importante specie per le emissioni dai gas di scarico per i veicoli ICEVs mentre trascurabile per veicoli elettrici BEVs.

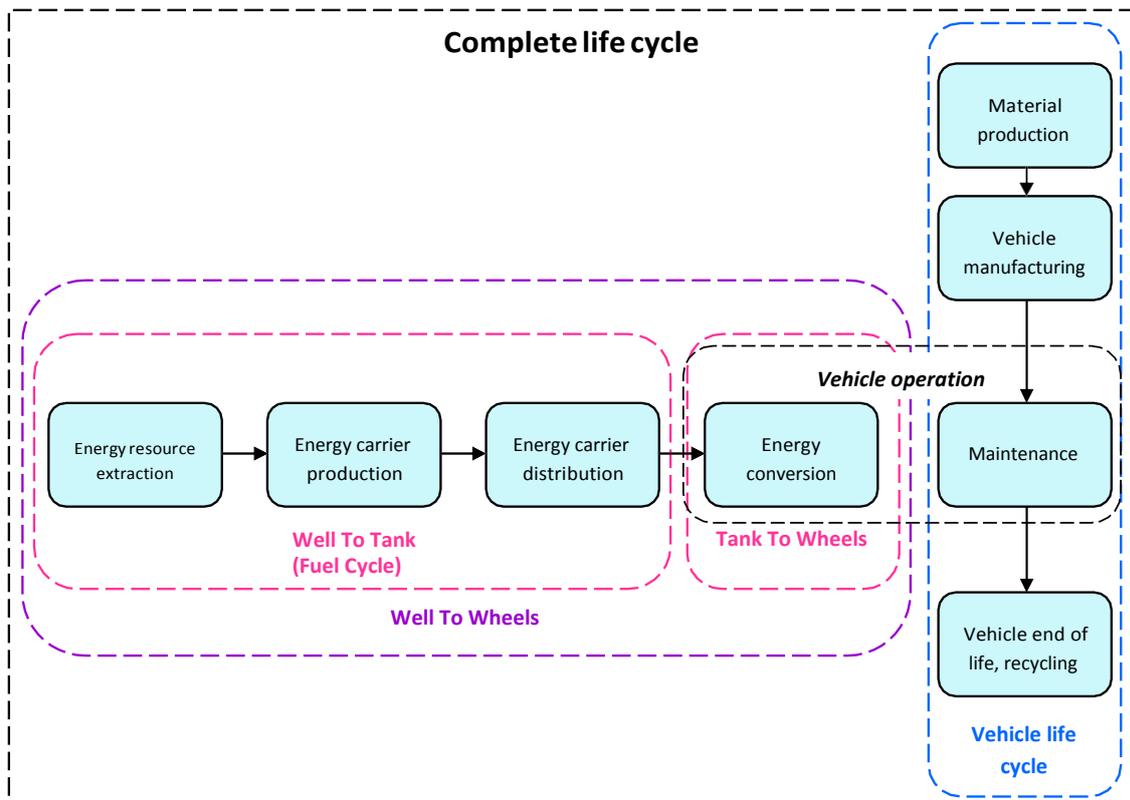


Figura 2.1. Schema semplificato Life Cycle Assessment di un autoveicolo. Sono messe in evidenza le diverse analisi WTW, WTT, TTW, la vita del veicolo (Vehicle Life) e la fase di uso (vehicle operation). La figura si basa su *Nordelöf et al. (2014)*.

Nella **figura 2.1** i box disposti in orizzontale rappresentano la catena del WTW mettendo in evidenza la filiera del vettore energetico nelle sue fasi di estrazione, produzione e distribuzione. Viceversa i box disposti in verticale mettono in evidenza le fasi del veicolo dalla produzione (estrazione di materie prime inclusa), manutenzione/riparazione, fino allo smaltimento.

2.2 LIFE CYCLE ASSESSMENT SECONDO LA NORMA 14040

La normativa di riferimento nel campo della valutazione LCA è la serie ISO 14040. Essa ha l'obiettivo di sistematizzare il processo di valutazione degli effetti che un prodotto può avere sull'ambiente nell'intero suo ciclo di vita.

Entrando più nel dettaglio la ISO 14040 standardizza la metodologia LCA suddividendola in quattro fasi principali:

1. Definizione degli obiettivi e dei confini del sistema (*“Goal and scope definition”*).
2. Redazione e analisi dell’inventario (*“Inventory analysis”*), ovvero la compilazione di un inventario completo dei flussi in ingresso (materiali, energia, risorse naturali) e in uscita (emissioni in aria, acqua e suolo, rifiuti) che siano significativi per il sistema definito.
3. Valutazione degli impatti ambientali (*“Life cycle impact assessment”*), cioè valutazione dei potenziali impatti ambientali diretti e indiretti, associati a questi input e output e della loro rilevanza.
4. Interpretazione dei risultati e analisi di miglioramento (*“Interpretation and improvement analysis”*), ossia l’analisi dei risultati delle due fasi precedenti e definizione delle possibili azioni di intervento.

Nella **figura 2.2** sono riportate schematicamente le quattro fasi descritte dalla norma ISO 14040.



Figura 2.2. Schematizzazione semplificata fasi LCA secondo norma ISO 14040.

2.3 PRECISAZIONI SULL'USO DEL LCA

Lo strumento LCA è molto utilizzato, nelle sue diverse forme e anche con modifiche parziali rispetto allo schema di riferimento per meglio adattarlo al caso di studio.

Nella letteratura vi sono diversi e numerosi esempi di confronti tramite LCA di emissioni e/o consumo di risorse energetiche di diverse tipologie di autoveicoli, e spesso sono discordanti o con risultati che possono differire, nei peggiori casi, anche di ordini di grandezza. Si trovano inoltre *papers*, come quello di *Peters et al. (2017)*, che nascono dal tentativo di confrontare e armonizzare i diversi risultati ottenuti, mettendo in evidenza i fattori che hanno portato a evidenti divergenze.

Si deve PRECISARE, infatti, che un'analisi di tipo LCA non è mai UNIVOCA perché dipende fortemente dalle assunzioni fatte, dalla reperibilità dei dati, e dalle semplificazioni e stime su aspetti poco chiari o complessi. Queste ipotesi di base e metodologie scelte, a cascata, vanno a influenzare molti aspetti del LCA e in particolar modo i risultati.

Questo deve comportare una maggiore attenzione soprattutto nella fase di scelta dello scopo e del campo di studio in esame, in modo da modellare opportunamente il problema e avere risultati più robusti e più coerenti possibili con l'oggetto di studio.

Per esempio non tutti gli autori presenti in letteratura annoverano nelle loro analisi i veicoli ibridi; alcuni perché essendocene di diverse tipologie e con diversi gradi di ibridazione renderebbero troppo complessa l'analisi, altri sostengono invece che se il grado di ibridazione è piccolo, il loro LCA è indistinguibile da quello dei veicoli tradizionali; per lo stesso motivo molti autori come *Linda Ager et al.* non distinguono, all'interno della categoria motori tradizionali, i motori diesel dai benzina.

Sempre a riguardo della fase di uso alcuni autori come *Hawkins et al.* trascurano il contributo dell'energia elettrica per la ricarica dei pacchi batteria, altri invece come *Patricia Egede et al.* propongono non solo di considerarla, ma precisano di non usare l'energia elettrica media bensì la sua quota marginale.

Un altro punto di dibattito è il range della distanza percorsa da considerare, infatti mentre i veicoli tradizionali percorrono tranquillamente circa 200 mila Km, per i veicoli elettrici la batteria è garantita per 100 mila Km; alcuni autori considerano questa garanzia come il numero minimo di chilometri che la batteria riesce a fornire, e quindi considerano range anche maggiori, altri invece rispettano il dato fornito dalla casa automobilistica. In ogni caso è importante fissare bene il driving range perché con esso di solito si mitigano gli effetti negativi delle vetture elettriche in termini di impatto ambientale dovuti alla fase di produzione del veicolo stesso.

Analizzando la fase di uso, i diversi autori prendono in considerazione fonti di natura differente per stimare i consumi al chilometro sia dei veicoli tradizionali, che di quelli elettrici; alcuni autori come *Victor R.J.H. Timmers et al.* fanno riferimento a dati tratti dal ciclo di omologazione (NEDC "New European Driving cycle") altri invece cercano dati più aderenti alla realtà e provenienti da simulazioni di cicli di guida reali, considerando ausiliari inseriti e condizioni ambientali come *Hongrui Ma et al. (2012)*.

Anche la modellazione delle batterie è una questione critica e controversa, iniziando dal fatto che alcuni autori considerano solo le batterie a ioni di litio di tipo NMC (con

catodo in ossido di Nickel-Manganese-Cobalto) altri solo le LiFePO_4 (catodo in fosfato di ferro) e altri ancora entrambe.

Per valutare, inoltre, l'energia da spendere per realizzare le batterie, si trovano altre discrepanze; alcuni autori considerano l'energia per unità di batteria, altri per unità di cella o modulo della batteria, altri ancora come *Peters et al. (2017)* hanno proposto, per omogeneizzare i risultati, di normalizzare rispetto al peso. Si parla in tal caso di energia spesa per chilo di batteria.

Tutti questi esempi mostrano sia l'esigenza di definire esattamente scopo e obiettivo, che la difficoltà di fare confronti usando diversi articoli in letteratura.

A tale scopo si deve cercare il più possibile di confrontare fra loro articoli omogenei in ipotesi e campo di studio.

3.FATTORI RILEVANTI

3.1 INFLUENZA DEL PESO E DEL DRIVING RANGE CONSIDERATO

I diversi autori che si sono dedicati allo studio dell'impatto ambientale dei veicoli elettrici e tradizionali, sono giunti univocamente alla conclusione che gli elementi che penalizzano in maniera significativa le prestazioni dei veicoli elettrici sono:

- Il peso
- la fase di produzione delle batterie.

Per quanto riguarda il peso, uno studio di *Victor R.J.H. Timmers et al* (2016), ha dimostrato che, in media, i veicoli elettrici sono il 24% più pesanti dei veicoli tradizionali a parità di segmento, come si può vedere in **figura 3.1**.

EV	ICEV	Mass in running order EV (kg)	Mass in running order ICEV (kg)	Weight difference (kg)	Weight difference (%)
Ford focus electric	Ford focus	1719	1500	+219	+14.6
Honda fit EV	Honda fit	1550	1215	+335	+27.6
Fiat 500e	Fiat 500	1427	1149	+278	+24.2
Smart electric drive coupe	Smart coupe	1055	820	+235	+28.7
Kia soul EV	Kia soul	1617	1306	+311	+23.8
Volkswagen e-Up!	Volkswagen Up	1289	1004	+284	+28.3
Volkswagen e-golf	Volkswagen golf	1617	1390	+227	+16.3
Chevrolet spark EV	Chevrolet spark	1431	1104	+327	+28.6
Renault fluence EV	Renault fluence	1618	1300	+318	+24.4

Figura 3.1. Tabella confronto peso in ordine di marcia (kg) EVs e ICEVs a parità di segmento.

Il trend del peso dei veicoli dal 2001 al 2014, come si può vedere dal grafico sottostante (**figura 3.2**), è in continua crescita; per quanto riguarda i veicoli elettrici ciò trova giustificazione nel fatto che molti *customers* ritengono inadeguata l'autonomia puramente elettrica degli EVs (*Patricia Egede et al.2015*).

Le case automobilistiche, di conseguenza, hanno provato ad aumentare il *driving range* dei propri veicoli, dotandoli di pacchi batterie di capacità maggiore e inevitabilmente più pesanti.

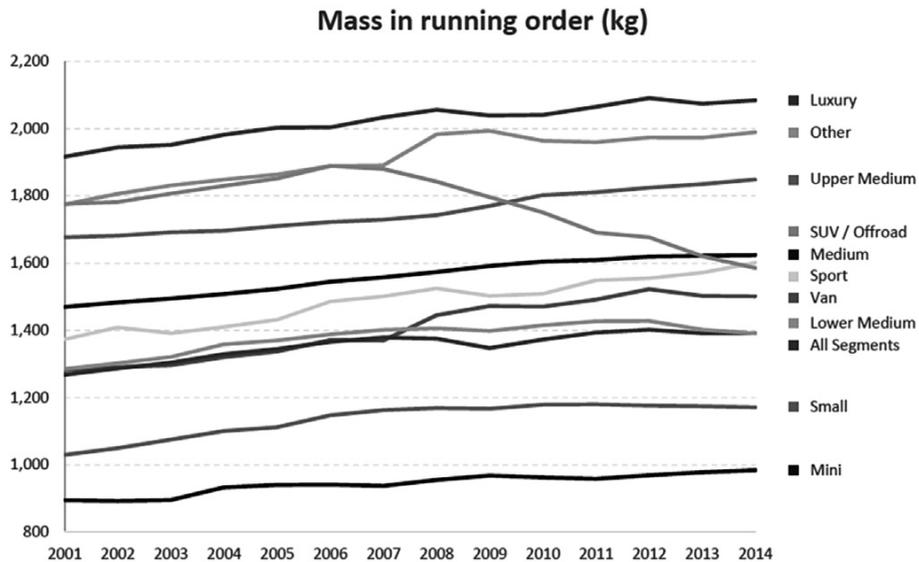


Figura 3.2. Grafico aumento peso in ordine di marcia dei veicoli dal 2001 al 2014.

Tutte queste considerazioni hanno portato alcuni autori a studiare come i LCA siano influenzati dal peso (e quindi dall'autonomia per i veicoli elettrici) e dal segmento a cui appartiene la vettura.

In uno studio di questo tipo è interessante analizzare:

- 1) Come varia l'energia media richiesta dal veicolo all'aumentare del peso (e del segmento a cui appartiene);
- 2) Come variano le emissioni di CO₂, tramite un'analisi LCA di tipo "cradle to grave", per un veicolo elettrico al variare del suo peso in ordine di marcia "Curb Weight";
- 3) Confronto con stessa analisi con veicoli con powertrain tradizionali, al variare del segmento.

Per esempio, *Linda Ager et al.*, hanno condotto uno studio su venti autovetture elettriche di diverso segmento, prendendo come riferimento per i consumi di energia elettrica richiesta per chilometro quelli del NEDC.

La sigla NEDC sta per "New European Driving Cycle", i dati fanno riferimento quindi a un ciclo di omologazione; tale ciclo si propone di rappresentare l'uso tipico di una vettura in Europa ed è utilizzato, tra l'altro, per valutare i livelli di emissioni inquinanti dei veicoli e per il consumo di carburante. Esso è considerato poco realistico in quanto le accelerazioni presenti sono piuttosto blande e poco rappresentative della guida reale. Piuttosto è da intendersi

come strumento per effettuare confronti dei consumi e delle emissioni tra diverse vetture, essendo il ciclo normato e riproducibile. Dal primo settembre 2017 [1] è stato rimpiazzato dal successore, denominato WLTP “Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure”.

Nella **figura 3.3** sono riportati i risultati dello studio, da cui si evince che, trascurata la contenuta dispersione dei dati, l’andamento del consumo di energia per chilometro in funzione del peso è rappresentato bene da una regressione lineare. I consumi crescono quindi linearmente all’aumentare del segmento del veicolo e del suo peso; La pendenza della retta è di 5.6 WhKm^{-1} per 100kg di peso aggiuntivo.

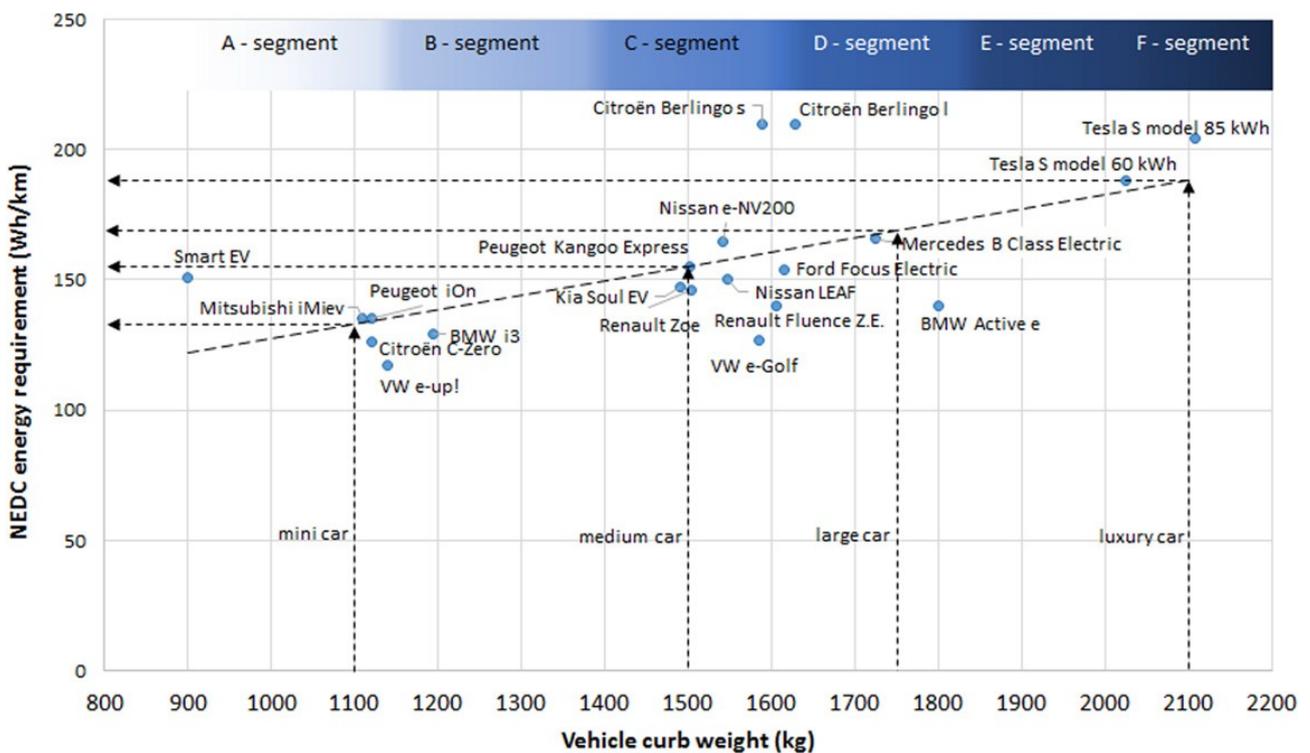


Figura 3.3. Il grafico mostra l’andamento dell’energia richiesta per Km secondo NEDC a seconda del segmento del veicolo, e quindi del suo peso in ordine di marcia.

Per l’analisi “cradle to grave”, gli autori hanno preso in considerazione con i relativi parametri, le quattro vetture della **figura 3.4** (un veicolo per segmento considerato).

Segment	Curb weight (kg)	Battery size (kWh)	Driving range (km)	EV energy requirement (Wh km^{-1})
A—mini car	1100	17.7	133	146
C—medium car	1500	24.4	171	170
D—large car	1750	42.1	249	185
F—luxury car	2100	59.9	317	207

Figura 3.4. Tabella vetture per segmento e relative caratteristiche. Autonomia in Km è calcolata dividendo l’energia fornita dalla batteria per il NEDC, e corretta con coefficienti che tengono conto della %carica max della batteria e dell’efficienza della batteria stessa.

Il mix considerato per la produzione di energia elettrica è quello Europeo (**figura 3.7**), mentre per i veicoli elettrici si stima un’emissione di 521 g di CO₂ a Kwh nella fase di uso (*Itten et al. 2014*).

La stima delle emissioni legate allo smaltimento dei veicoli da confrontare sono tratte dai papers di *Dewulf et al. (2010)* e *Hawkins et al. (2012)* per veicoli elettrici e tradizionali rispettivamente.

Date le precedenti assunzioni metodologiche e le fonti dei vari parametri, la **figura 3.5** sottostante riassume i risultati delle emissioni di CO₂ per i veicoli EVs e ICEVs (zone ombreggiate) per l’intero ciclo di vita, dalla fase di produzione a quella di smaltimento passando per la fase di uso del veicolo.

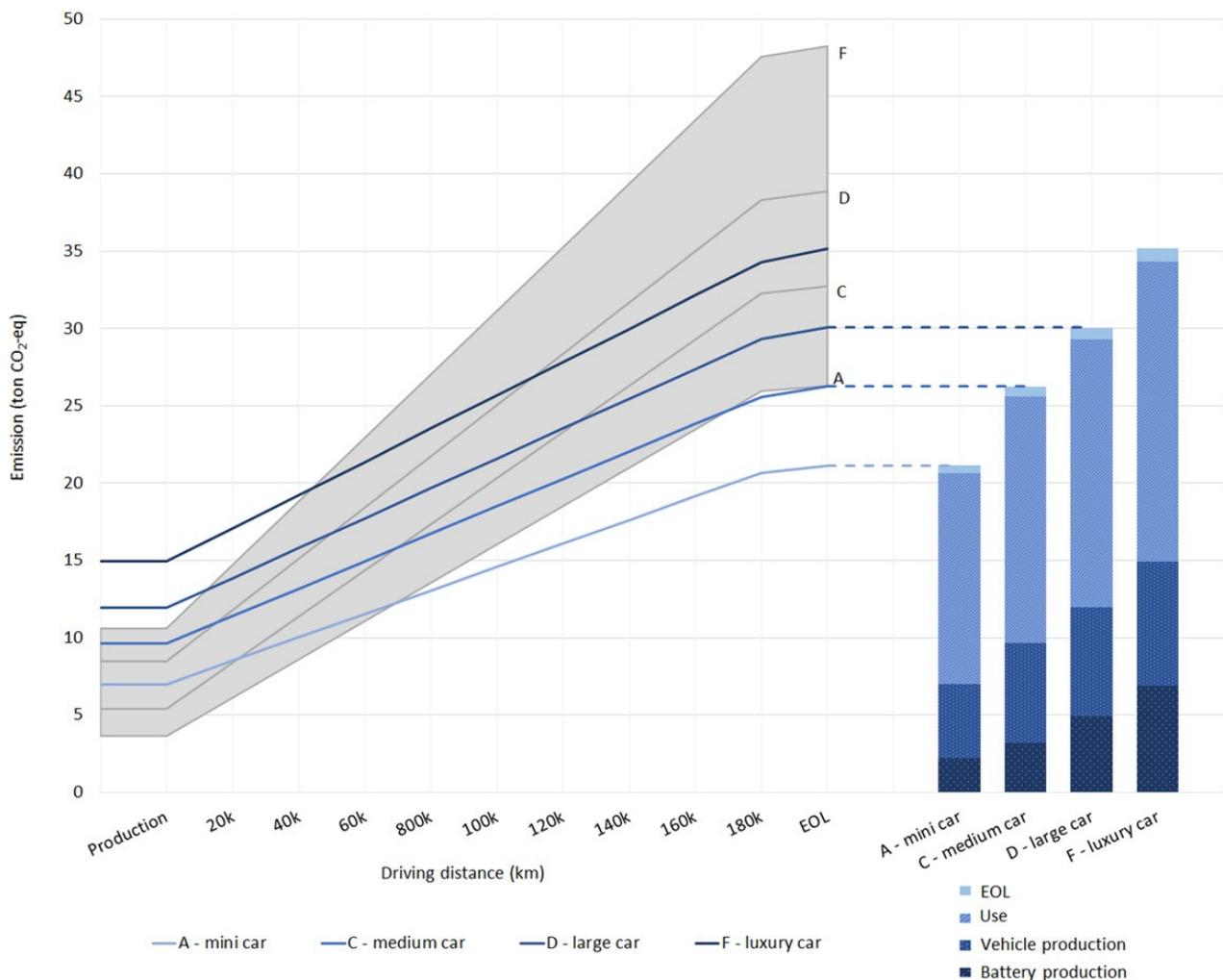


Figura 3.5. A sinistra confronto al variare dei segmenti A, B, C, D delle curve delle emissioni di CO₂ cumulative delle fasi di produzione, uso e smaltimento veicolo. Le zone ombreggiate sono relative agli ICEVs quelle blu agli EVs. Sulla destra le colonne mettono in evidenza i contributi di produzione del veicolo elettrico, produzione batterie, fase di uso e smaltimento ai valori massimi di CO₂ emessa.

Dal grafico di **figura 3.5** si possono trarre le seguenti conclusioni:

- veicoli leggeri e dimensioni più compatte risultano più efficienti e meno inquinanti di quelli più grandi;
- Il rapporto fra emissione massima (corrispondente al segmento F) e minima (segmento A) vale 1.8 per veicoli ICEVs e 1.7 per veicoli EVs;
- Per i veicoli elettrici il maggior contributo alle emissioni proviene dalla fase di produzione (in particolar modo delle batterie che apportano a un 31%-46% dell'impatto totale), per quelli tradizionali viene dalla fase di uso;
- Con le assunzioni fatte (soprattutto ipotesi di mix produttivo Europeo per l'energia elettrica) i veicoli elettrici risultano più efficienti del 20% rispetto ai tradizionali (di pari segmento) in termini di emissioni GHG in un'analisi "cradle to grave" ("dalla culla alla tomba" letteralmente);
- I veicoli elettrici partono con un "handicap" maggiore in termini di CO₂ rispetto ai tradizionali, per poi recuperare, non immediatamente, in un range compreso fra 44000 Km e 77000 Km. (I primi a recuperare sono i segmenti pesanti e meno efficienti);
- Ipotizzando una distanza media di 10000 Km percorsi in un anno, occorrono sette anni, nel caso peggiore, perché si raggiunga un punto di equilibrio fra le emissioni di ICEVs ed EVs;
- I veicoli elettrici ammortizzano la CO₂ prodotta inizialmente con la distanza percorsa, quindi considerando un chilometraggio minore di 180 mila km, per esempio 100 mila (chilometri che le case automobilistiche "garantiscono" come vita utile delle batterie) il vantaggio degli elettrici si riduce;
- La fase di smaltimento è quasi analoga, leggermente peggiore per gli elettrici, visto che in questa fase vanno smaltite anche le batterie (14%-20% del totale). Da sottolineare che la situazione cambia se si considerano gli impatti tossici allo smaltimento piuttosto che le emissioni GHG, dove gli elettrici sono fortemente penalizzati dalla presenza di acidi tossici e metalli pesanti nelle batterie.

L'intrinseco vantaggio di peso dei veicoli tradizionali rispetto agli alterativi risiede nel fatto che i combustibili che li alimentano hanno una densità energetica nettamente superiore e che li rende difficilmente sostituibili. La **figura 3.6** riporta la scala dei valori delle densità energetiche dei combustibili più usati.

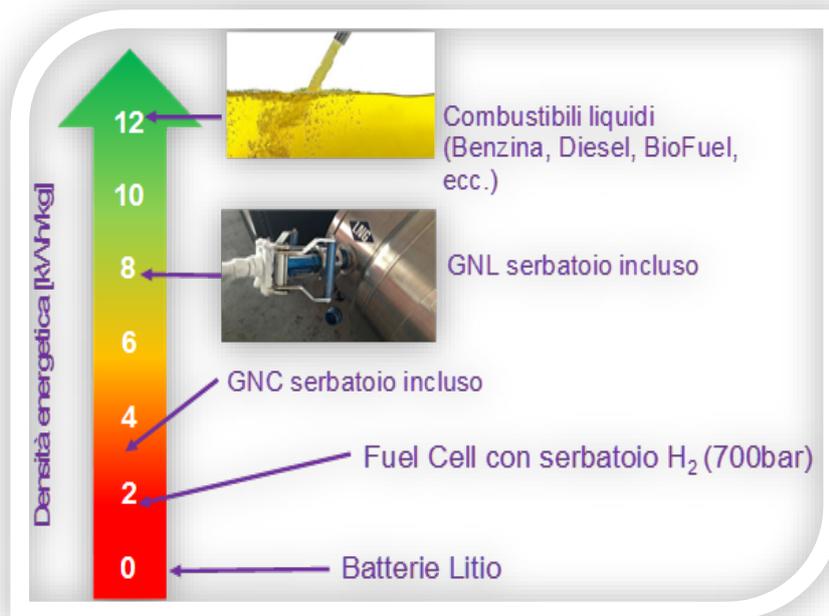


Figura 3.6. Scala densità energetica diversi combustibili.

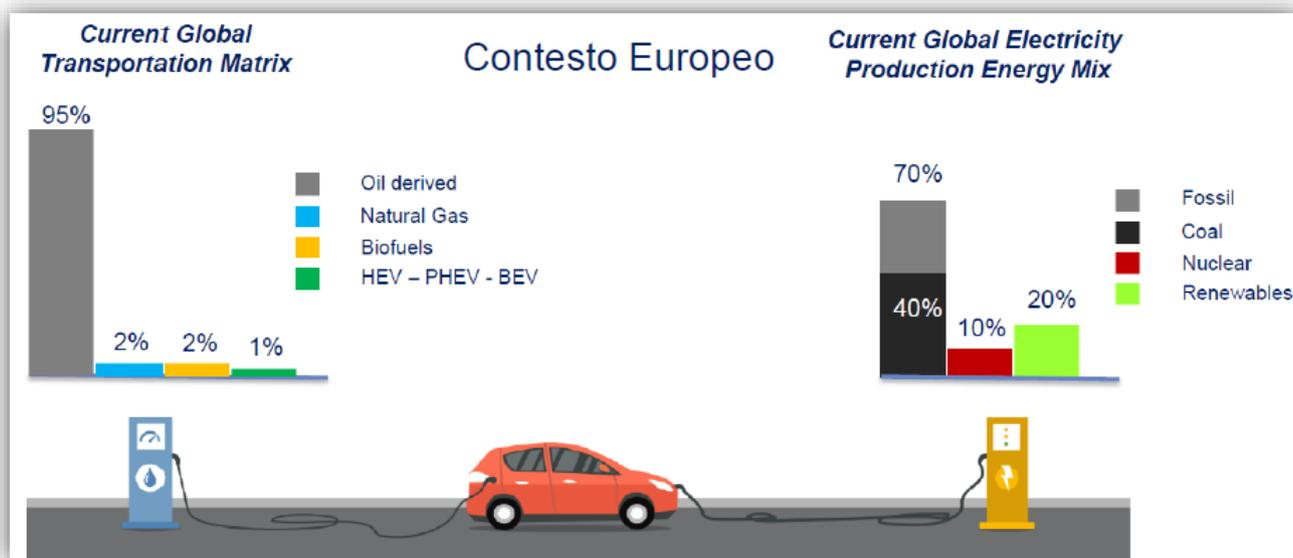


Figura 3.7. A sinistra la composizione percentuale del parco auto mondiale in funzione del tipo di combustibile. A destra, la composizione del mix produttivo energetico Europeo.

3.2 CORRELAZIONE PESO - EMISSIONE DI PARTICOLATO

Il particolato è una delle forme di inquinamento più nocive per la salute umana, e che colpisce sempre più i centri urbani; essendo per di più allo stato solido, solo la pioggia è in grado di rimuoverlo.

Come si può notare dalla **figura 3.16**, il particolato accompagna tutto il ciclo di vita del veicolo e anche del combustibile, venendo prodotto (in maniera più o meno marcata) in tutte le fasi: dalla produzione allo smaltimento.

Nella fase di uso del veicolo si distinguono:

- Particelle di particolato prodotte dai gas di scarico dei motori a combustione interna, soprattutto a iniezione diretta (solitamente diesel);
- Particelle di particolato (sia PM_{2.5} ma in quantità maggiori PM₁₀) non provenienti dai gas di scarico.

Recenti studi hanno dimostrato che queste ultime provengono principalmente:

- Dagli pneumatici a causa dell'attrito fra essi e il suolo;
- Dal manto stradale, sempre a causa dell'attrito;
- Dal materiale di attrito del sistema frenante;
- Da polveri presenti sul manto stradale risollevate in sospensione dalla scia del veicolo.

Come si può notare il fenomeno delle particelle PM non provenienti da gas di scarico, sono legate al fenomeno dell'attrito. La forza di attrito fra un corpo e una superficie dipende dal coefficiente di attrito fra essi (funzione della rugosità e della pulizia superficiale) e dal carico normale premente.

Nel caso di veicoli le emissioni di particelle PM sono fortemente correlate al peso del veicolo stesso, e aumentano con esso in modo lineare, specialmente quelle derivanti dagli pneumatici e dal manto stradale.

Le particelle provenienti dai freni dipendono dalla forza frenante, che è proporzionale alla quantità di moto del veicolo da frenare (grandezza fisica data dal prodotto della massa del veicolo per la sua velocità di avanzamento).

Al crescere del peso del veicolo, quindi, serve una maggiore forza frenante ottenibile, per esempio, con pastiglie più grandi, che a loro volta emetteranno più polveri sottili.

Per quanto riguarda il fenomeno della risospensione di polveri dal manto stradale, non esistono formulazioni rigorose, studiosi come *Gillies et al.* (2005) o *Amato et al.* hanno trovato che il legame fra particelle e il peso del veicolo è più che lineare, e che vi è una qualche dipendenza anche dalla velocità del veicolo stesso.

La **figura 3.8** riassume la dipendenza dell'emissione di tali particelle di particolato (mg/Km) in funzione il peso del veicolo.

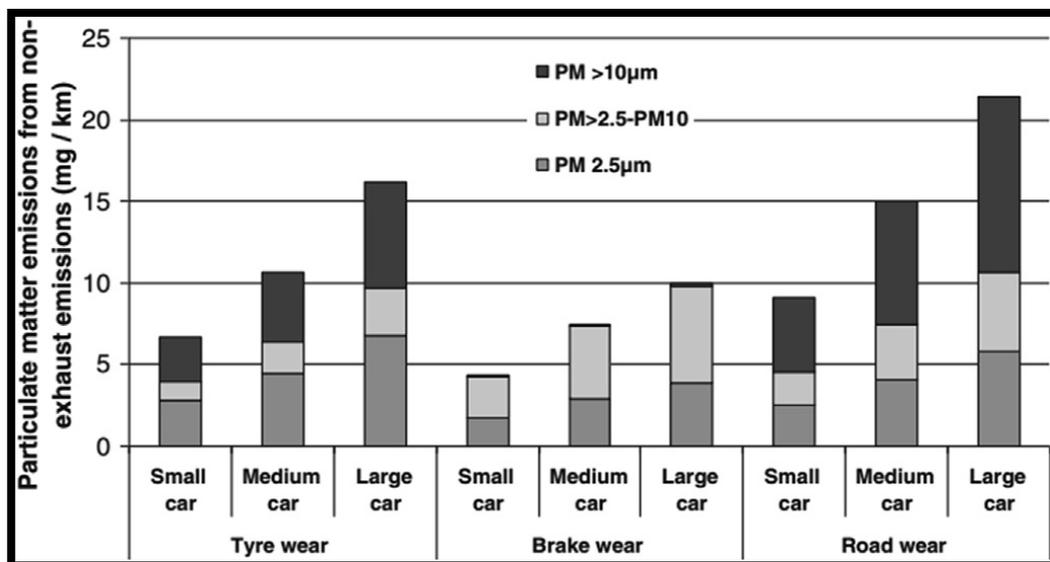


Figura 3.8. PM non provenienti da gas di scarico in funzione del segmento (peso) e delle diverse fonti Simons (2013) basati su studi di Ntziachristos and Boulter (2009).

Per evidenziare le differenze tra veicoli elettrici e tradizionali in termini di emissioni di particolato non da scarico, è opportuno confrontare veicoli disponibili in entrambe le motorizzazioni, così da imputare alla differenza di peso la maggiore emissione di tali particelle.

In **figura 3.9** sono riportati veicoli con indicato il relativo peso in ordine di marcia; in media un veicolo elettrico è il 24% più pesante della corrispondente versione tradizionale.

EV	ICEV	Mass in running order EV (kg)	Mass in running order ICEV (kg)	Weight difference (kg)	Weight difference (%)
Ford focus electric	Ford focus	1719	1500	+219	+14.6
Honda fit EV	Honda fit	1550	1215	+335	+27.6
Fiat 500e	Fiat 500	1427	1149	+278	+24.2
Smart electric drive coupe	Smart coupe	1055	820	+235	+28.7
Kia soul EV	Kia soul	1617	1306	+311	+23.8
Volkswagen e-Up!	Volkswagen Up	1289	1004	+284	+28.3
Volkswagen e-golf	Volkswagen golf	1617	1390	+227	+16.3
Chevrolet spark EV	Chevrolet spark	1431	1104	+327	+28.6

Figura 3.9. Tabella pesi e differenze percentuali in peso fra vetture elettriche e corrispondenti versioni tradizionali

Il peso in ordine di marcia si definisce come somma della massa a vuoto del veicolo più quella dei fluidi e del guidatore (massa media).

Per via delle normative Europee sempre più stringenti, i veicoli benzina e diesel hanno ridotto notevolmente le loro emissioni di particolato dai gas di scarico.

Studi rivelano che, in media, propulsori benzina o diesel emettono i seguenti valori di particolato dallo scarico (tutti valori ben al di sotto dei limiti imposti dalle normative EU) rappresentati in **figura 3.10**.

MOTORE	PM10 (mg/vKm)	PM2.5 (mg/vKm)
BENZINA	3.1	3.0
DIESEL	2.4	2.3

Figura 3.10. Tabella con valori medi di PM10 e PM2.5 allo scarico di motori tradizionali benzina o diesel.

Per quanto riguarda, invece, le particelle PM non da gas di scarico, tramite stime, misure in galleria del vento e in laboratorio, misurazioni on board a veicoli tester, si è scoperto che esse contribuiscono all'85% delle PM2.5 e al 90% delle PM10 del particolato totale del traffico, come riassunto dalla tabella in **figura 3.11**.

SORGENTE	PM10 (mg/vKm)	PM2.5 (mg/vKm)
PNEUMATICI	6.1	2.9
FRENI	9.3	2.2
MANTO STRADALE	7.5	3.1
RISOSPENSIONE POLVERI	40	12

Figura 3.11. Tabella con valori medi PM10 e PM2.5 derivanti dalle diverse sorgenti.

Considerando quindi le emissioni di particolato emesse dai veicoli elettrici, quelle totali provenienti dallo scarico e non dei veicoli tradizionali, si può affermare che:

- I veicoli elettrici emettono le stesse quantità medie di PM10 di veicoli tradizionali a benzina e diesel;
- I veicoli elettrici emettono il 3% e l'1% in più di particelle PM2.5 di veicoli motorizzati rispettivamente con motore benzina e diesel.

Questa forbice, inoltre, tenderà ad allargarsi considerando che le norme EU renderanno sempre più puliti in termini di particolato i gas di scarico dei motori termici, mentre le batterie sempre più pesanti renderanno le emissioni di particolato dei veicoli elettrici sempre maggiori.

Le emissioni di particelle di particolato e di sostanze tossiche confermano come i veicoli elettrici non si possano considerare globalmente meno inquinanti dei veicoli tradizionali, solo perché in determinate condizioni emettono il 20% in meno di CO₂.

Ancora una volta è evidente che le auto elettriche siano meno penalizzate quando il veicolo è di segmento piccolo; tuttavia per produrre veicoli elettrici con maggiore autonomia a trazione puramente elettrica, le case automobilistiche stanno ricorrendo all'uso di accumulatori sempre più grandi che incrementano sempre più il peso del veicolo complessivo.

Vehicle technology	Exhaust	Tyre wear	Brake wear	Road wear	Resuspension	Total
EV	0 mg/vkm	3.7 mg/vkm	0 mg/vkm	3.8 mg/vkm	14.9 mg/vkm	22.4 mg/vkm
Gasoline ICEV	3.0 mg/vkm	2.9 mg/vkm	2.2 mg/vkm	3.1 mg/vkm	12.0 mg/vkm	23.2 mg/vkm
Diesel ICEV	2.4 mg/vkm	2.9 mg/vkm	2.2 mg/vkm	3.1 mg/vkm	12.0 mg/vkm	22.6 mg/vkm

Figura 3.12. Confronto emissioni PM10 veicoli EVs, ICEVs benzina e diesel.

Vehicle technology	Exhaust	Tyre wear	Brake wear	Road wear	Resuspension	Total
EV	0 mg/vkm	7.2 mg/vkm	0 mg/vkm	8.9 mg/vkm	49.6 mg/vkm	65.7 mg/vkm
Gasoline ICEV	3.1 mg/vkm	6.1 mg/vkm	9.3 mg/vkm	7.5 mg/vkm	40 mg/vkm	66.0 mg/vkm
Diesel ICEV	2.4 mg/vkm	6.1 mg/vkm	9.3 mg/vkm	7.5 mg/vkm	40 mg/vkm	65.3 mg/vkm

Figura 3.13. Confronto emissioni PM2.5 veicoli EVs, ICEVs benzina e diesel.

3.3 IMPATTO AMBIENTALE IN TERMINI DI TOSSICITÀ

Come detto la produzione/smaltimento di batterie comporta un impatto tossico molto rilevante per la presenza di metalli pesanti (Nickel, Cadmio) e acidi.

Esistono diversi indici che quantificano la tossicità in relazione a diversi ambiti o sfere.

I più usati sono:

- HTP “*Human Toxicity Potential*” (potenziale di tossicità per la vita umana), indica quanto una sostanza sia in grado di recare danno all’organismo umano;
- FETP “*Freshwater Toxicity Terrestrial Potential*” indice che quantifica il grado di contaminazione e inquinamento dei bacini idrici;
- TAP “*Terrestrial acidification Potential*” quantifica il tenore di acidificazione del suolo terrestre a causa di agenti inquinanti.

I primi due indici sono fortemente influenzati dalla fase di produzione dei veicoli, il TAP invece è maggiormente influenzato dalla fase di utilizzo del veicolo stesso. La fase di smaltimento influenza allo stesso modo i precedenti indici.

Avendo una fase di produzione maggiore a causa della produzione delle batterie, i veicoli elettrici influenzano molto i primi due indici, viceversa il TAP è maggiormente influenzato dall’uso degli ICEVs.

Hawkins et al. (2012) hanno condotto uno studio dove focalizzano la loro attenzione oltre che sull’emissioni GHG, anche sulle emissioni tossiche di diversi tipi di veicoli. Hanno considerato vetture tradizionali a benzina e diesel, e vetture elettriche con batterie a ioni di litio (aventi tutte anodo in grafite) di tipo:

- Li-NCM (catodo in ossido di Nickel-Manganese-Cobalto) prodotte con mix Europeo di produzione di energia elettrica (caratteristiche in **figura 3.14**);
- Li-FePO₄ (catodo in Fosfato di Ferro) prodotte con mix Europeo di produzione energia elettrica (caratteristiche in **figura 3.15**);
- Li-NCM prodotte con mix energetico prevalentemente a carbone;
- Li-NCM prodotte con mix energetico prevalentemente a gas naturale.

I risultati dello studio, normalizzati rispetto al valore dell’impatto totale maggiore, sono rappresentati nella **figura 3.16**.

Da notare la presenza dei valori, normalizzati, del particolato (PMFP) e dello smog-fotochimico (POFP).

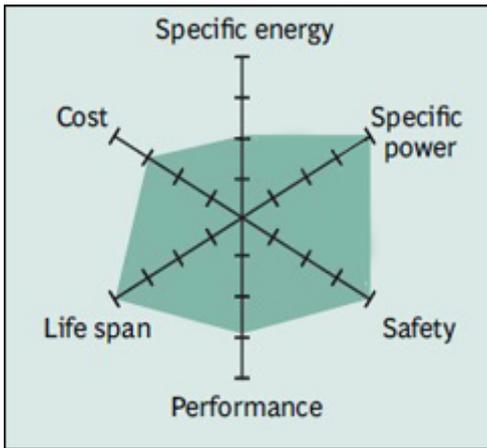


Figure 3.14. Snapshot di NMC [14].
 NMC ha buone caratteristiche globali e spicca per la densità potenza specifica.
 Preferenzialmente nasce come batteria di Trazione per veicoli elettrici da trazione.
 Ha il più basso tasso di autoriscaldamento.

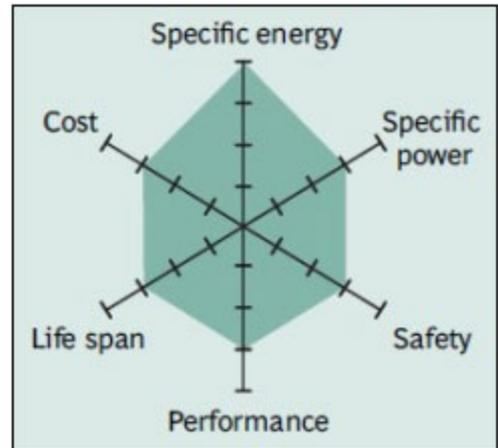


Figura 3.15. Snapshot di LiFePO₄ [14].
 Le sue qualità migliori sono la durata e la sicurezza.
 Elevato coefficiente di autoscarica.

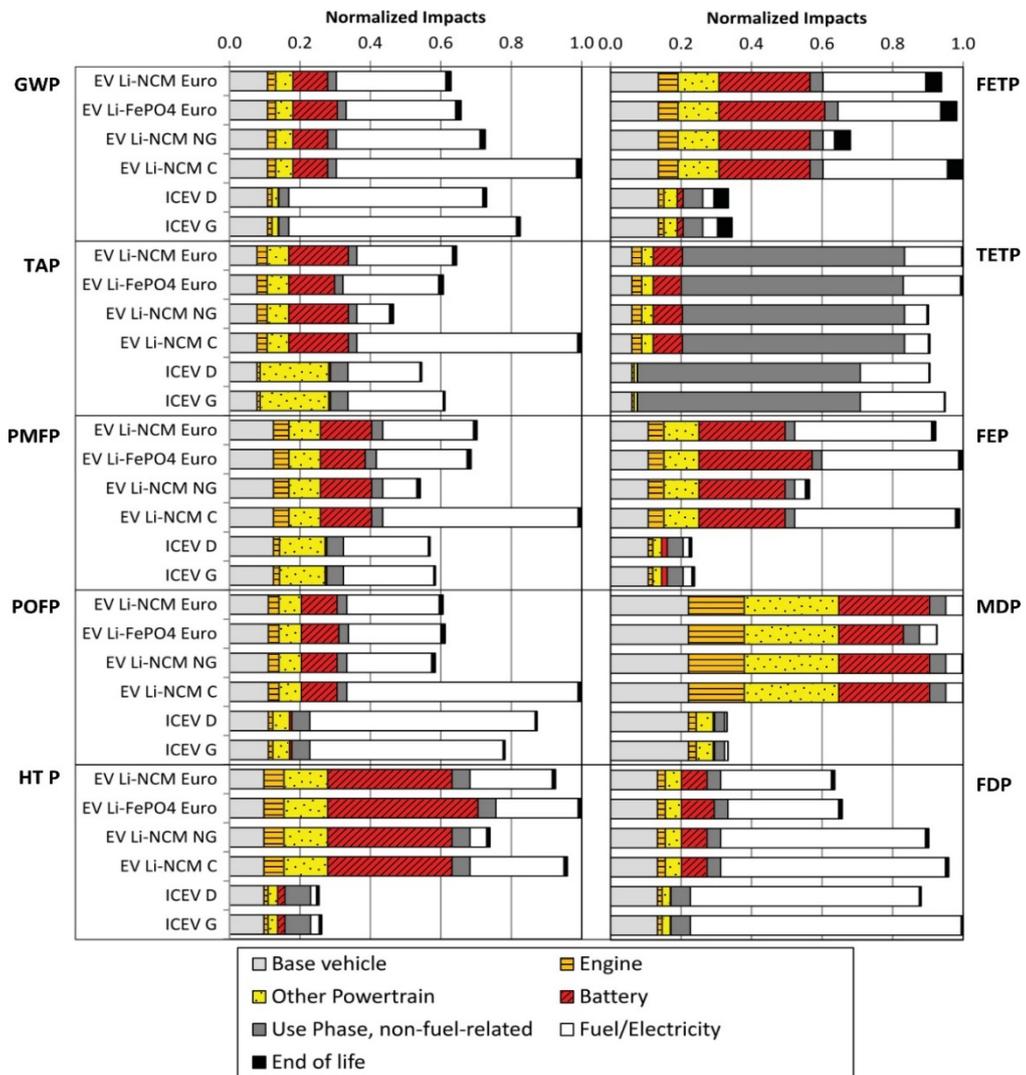


Figura 3.16. Diversi tipi di impatto ambientale di diverse tipologie di veicolo.

Risultati:

- I livelli di TAP sono praticamente gli stessi, anche se, la causa per veicoli elettrici proviene dalla produzione dei materiali della batteria (per la presenza di Nickel, Rame, Alluminio), per quelli tradizionali dalla produzione di metalli nobili come Platino del catalizzatore;
- Il trend del particolato segue quello della TAP, essendo in fase di produzione ascrivibile alle stesse cause (impatto del 35%-46% del totale). In fase di uso proviene in parte dai gas di scarico dei motori termici e in parte dagli pneumatici, dai freni e dal manto stradale;
- L'indice HTP è quello più critico per una sostituzione totale dei motori tradizionali con quelli elettrici, infatti i veicoli elettrici contribuiscono a farlo aumentare sia in fase di uso che di produzione (soprattutto per i metalli pesanti di cui la batteria è costituita);
- I veicoli elettrici producono un quantitativo di HTP maggiore del 180%-200% di quello dei motori tradizionali;
- La FTEP segue gli stessi andamenti della HTP, risultando un ulteriore indice critico per i veicoli elettrici.

3.4 INFLUENZA DI FATTORI ESTERNI SUL LIFE CYCLE ASSESSMENT

Il *Life Cycle Assessment* è uno strumento standardizzato, ma ciò nonostante per produrre risultati robusti deve essere usato con attenzione, perché spesso bisogna fare molte scelte e semplificazioni, decidere cosa considerare e cosa trascurare.

I risultati dell'analisi cambiano, per esempio, se si considerano i cosiddetti "fattori esterni". Riuscendo a "convertire" questi ultimi in termini di impatto ambientale si riducono le incertezze e si aumenta la robustezza dell'analisi LCA (*Patricia Egede et al. 2015*).

In **figura 3.17** è illustrato schematicamente un esempio di LCA per veicolo elettrico, per mostrarne la complessità. In particolare il veicolo è considerato un sistema interconnesso con fattori esterni ed interni, che globalmente ne influenzano il consumo di energia e le emissioni.

I fattori interni comprendono le caratteristiche stesse del veicolo come peso e tecnologia on board, la filiera di produzione e smaltimento del veicolo, e il ciclo di vita del combustibile.

I fattori esterni, che influenzano soprattutto la fase di uso, sono:

- L'utilizzatore;
- Le infrastrutture;
- Condizioni dell'ambiente circostante.

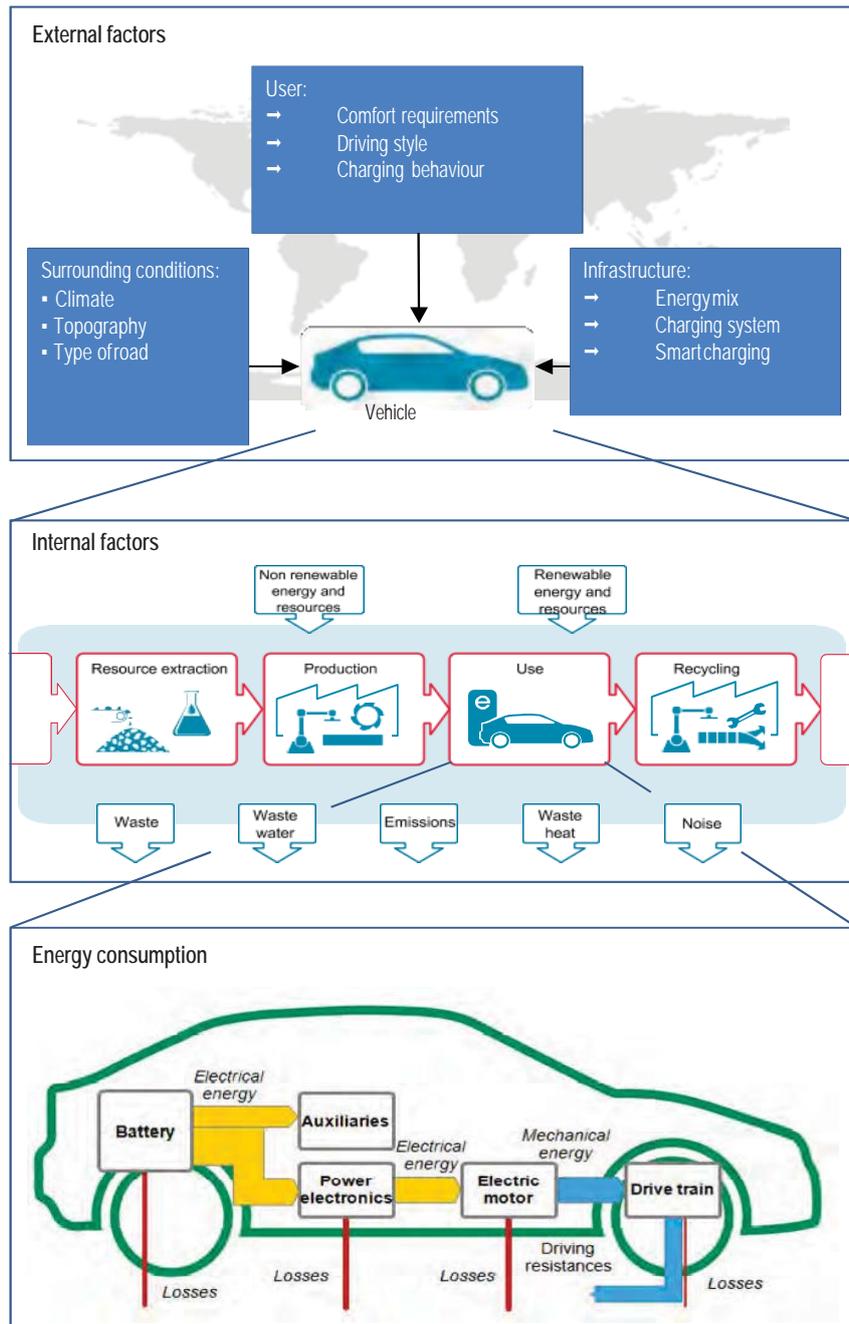


Figura 3.17. Schema di un LCA di veicolo elettrico, influenza di fattori interni e esterni. Fonte [17].

L'utente influenza l'impatto ambientale del veicolo sia con il proprio stile di guida, aumentando emissioni e consumo di energia con uno stile più aggressivo, sia con l'utilizzo di ausiliari (impianto di condizionamento o di riscaldamento) che, infine, con il suo comportamento nei confronti della ricarica delle batterie.

Le infrastrutture che influenzano maggiormente il LCA sono:

- Mix produttivo dell'energia elettrica: è uno dei parametri che influenza maggiormente i risultati, c'è molta differenza nel considerare le emissioni in

fase di produzione delle batterie, per esempio, in un contesto sostenibile o prevalentemente a carbone;

- Stazioni di ricarica: strutture che consentano la ricarica sicura e adeguata dei veicoli nei luoghi pubblici (l'eventuale costruzione di queste infrastrutture comporta un'ulteriore emissione di CO₂). Nella loro versione smart consentono la ricarica di più veicoli in tempi più veloci.

Per condizione dell'ambiente circostante si intende invece l'insieme della topografia e delle condizioni ambientali-climatiche di un determinato luogo. Le condizioni climatiche influenzano più la fase di uso dei veicoli elettrici che dei veicoli tradizionali; questo perché gli ausiliari sono elettrici e sottraggono energia direttamente alla batteria, limitandone l'autonomia.

Per tenere conto dell'influenza dei sopracitati fattori esterni, l'Unione Europea è stata la prima a introdurre a livello globale dall' 01/09/2017, nei cicli di omologazione delle vetture, anche i test RDE "*Real Driving Emissions*"; essi si svolgono su strada equipaggiando le vetture con specifiche apparecchiature portatili (Pems) per la misurazione delle emissioni. La prova può essere svolta in qualunque area, rispettando una serie di parametri legati alla tipologia del percorso, all'altitudine e alle procedure di guida [18].

3.4.1 ESEMPIO DI LCA CONSIDERANDO FATTORI ESTERNI E PESO

I veicoli elettrici come si è già visto nelle analisi precedenti sono tanto più efficienti, in termini di impatto ambientale, quanto minore è il loro peso.

Per renderli più leggeri vengono solitamente usati negli "*chassis*" leghe leggere di alluminio, più raramente quelle di magnesio, in sostituzione parziale o totale all'acciaio.

Tuttavia i processi di fabbricazione delle leghe leggere emettono solitamente più anidride carbonica di quelli relativi all'acciaio.

Esempi di valori della CO₂eq derivante dalla fabbricazione dei due metalli sono raccolti nella tabella di **figura 3.18**.

Partendo da questi dati e considerazioni *Patricia Egede et al. (2015)*, hanno condotto uno studio di tipo differenziale per mettere in evidenza, in funzione del

mix produttivo, in quali e quante nazioni l'alleggerimento del telaio in alluminio risulta conveniente in termini di emissioni di CO₂ eq.

L'analisi da loro condotta considera, per questo molto interessante, l'influenza di fattori esterni; i tre scenari da loro considerati sono riassunti nella tabella di **figura 3.19**. Per ogni scenario si indica una diversa combinazione dei fattori esterni quali stile di guida, topografia e clima (quindi uso ausiliari).

MATERIALE	CO ₂ eq/Kg	Riduzione peso %
Acciaio	5.7	-
Alluminio	13	67%

Figura 3.18. Tabella materiali e relative emissioni in fase di fabbricazione, riduzione peso % rispetto all'acciaio.

*emissione equivalente lavorazione acciaio presa da Ecoinvent 3.01 database, quella relativa all'alluminio. Fonte [19].

**dati riduzione peso di alluminio. Fonte [19].

Influencing factor	Scenario A	Scenario B	Scenario C
Driving behaviour	Cautious	Average	Dynamic
Desired temperature	Low	Medium	Medium
Topography	Flat	Hilly	Hilly
Type of road	City	City	Highway
Energy consumption [kWh/100km]	~10	~15	~20

Figura 3.19. Tabella riassuntiva tre scenari A, B, C, i dati relativi ai consumi di energia sono tratti dal database Ecoinvent 3.01. Fonte [20].

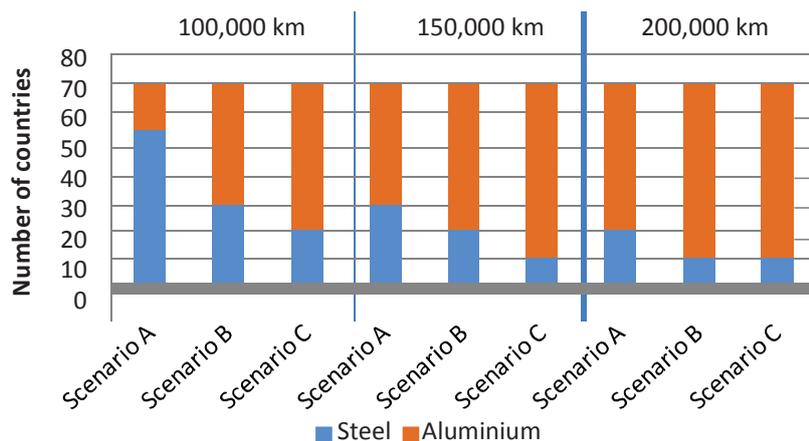


Figura 3.20. Grafico che riassume l'analisi delle emissioni più basse derivanti dall'uso dell'alluminio o acciaio.

Dal grafico che riassume i risultati dell'analisi, in **figura 3.20**, si nota che il vantaggio della riduzione di alluminio cambia con i fattori esterni, soprattutto in funzione del mix produttivo considerato. Cambia quindi il numero di nazioni dove l'alluminio conviene più dell'acciaio.

Si nota inoltre che, indipendentemente dallo scenario, l'alluminio conviene più dell'acciaio all'aumentare del *lifetime* considerato (distanza percorsa in chilometri); le emissioni di CO₂ legate al materiale sono ammortizzate, infatti, dai minori consumi di elettricità dovuti alla riduzione di peso.

Considerando il mix produttivo, una nazione che usa prevalentemente idroelettrico (tipo Brasile), date le più basse emissioni di CO₂, l'acciaio conviene sempre, salvo che in driving range molto elevati e alti consumi (scenario C).

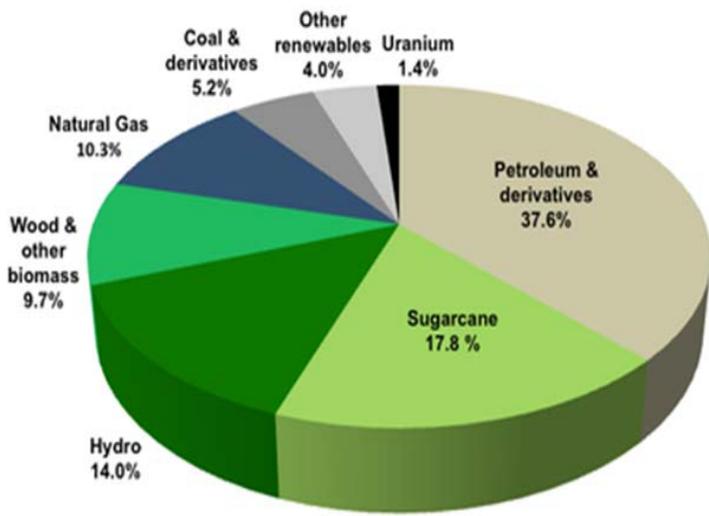
In un mix come quello della Germania, agli antipodi rispetto al Brasile, conviene l'alluminio in tutti i casi eccetto scenario A (bassi consumi). Per nazioni come la Spagna, il risultato non è chiaro del tutto.

Infatti per distanze percorse più lunghe conviene l'uso dell'alluminio, mentre nei casi percorso medio e breve usare l'alluminio conviene solo per alti consumi (scenario C) o per consumi medio-alti (scenari B e C).

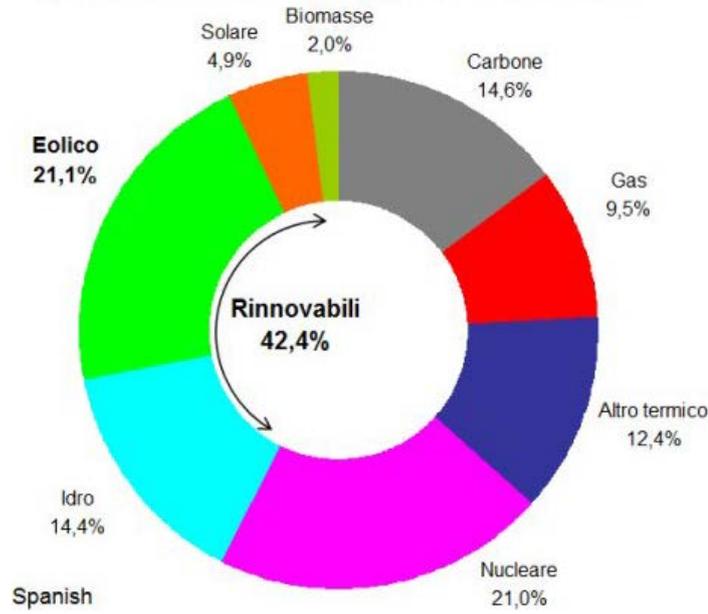
Considerando nel LCA il contributo in termini di GHG delle infrastrutture si introduce un ulteriore parametro che vincola il peso del veicolo; se da un lato bisogna alleggerirlo per renderlo più efficiente nei confronti dell'ambiente, dall'altro bisogna trovare un compromesso con le infrastrutture per la ricarica:

le batterie più piccole hanno, infatti, una minore autonomia e necessitano di una rete capillare più fitta di stazioni per la ricarica nell'area urbana.

(a)



(b)



(c)

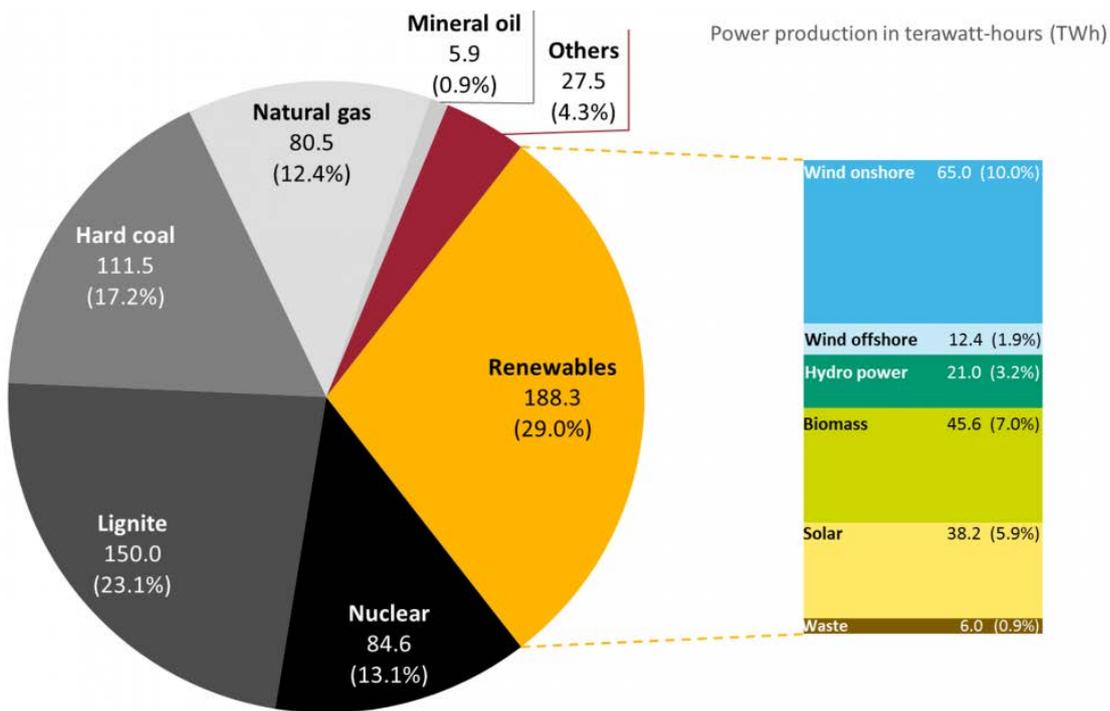


Figura 3.21. Mix produttivi energia elettrica: (a)Brasile, (b) Spagna, (c) Germania.

3.5 INFLUENZA DELLA FASE DI CARICA DELLE BATTERIE

Nel definire la metodologia di approccio all'LCA, in letteratura sono usati i consumi NEDC (per esempio nel report di *Linda Ager et al. 2016*) e generalmente non viene considerata l'emissione di GHG associata all'energia elettrica per ricaricare le batterie dei veicoli EVs.

Uno studio di *Hongrui Ma et al. (2012)* si propone di fare un confronto il più possibile aderente alla realtà, soffermandosi ad un'analisi LCA, considerando:

- Simulazioni di condizioni effettive di guida;
- l'emissione di GHG associata alla ricarica delle batterie e il modo in cui la rete risponde a questa ulteriore richiesta di energia elettrica (Real Tank To Wheel);
- GHG emesse per l'intero ciclo di vita dall'estrazione delle materie prime fino allo smaltimento del veicolo.

L'aspetto più innovativo di questo studio è quello di considerare l'impatto ambientale della ricarica delle batterie e nel valutare come la rete elettrica reagisca alla richiesta di energia.

La differenza, rispetto alla quasi totalità degli altri studi presenti in letteratura, sta nel considerare non l'energia media, bensì l'energia marginale che la rete elettrica fornisce in fase di carica alle batterie. L'energia elettrica marginale indica i Kwh che la rete deve erogare in più se aumenta di un'unità la quantità di energia richiesta per la ricarica delle batterie. Si collocano sulla stessa linea, nel considerare l'aliquota marginale e non media dell'energia elettrica, i lavori di *Chen et al., 2008; Dotzauer et al., 2010; Elgowainy et al., 2009*.

In un qualunque mix di produzione dell'energia elettrica le fonti a zero emissioni di anidride carbonica come nucleare o idroelettrico si sfruttano il più possibile, in modo continuativo, per soddisfare l'aliquota media e costante della richiesta di energia. Le fonti rinnovabili come l'eolico o il solare, caratterizzate da erogazione intermittente di energia elettrica, risultano inadatte a gestire i picchi di richiesta di energia elettrica.

Ne consegue che, nel caso di elettrificazione massiva del parco auto globale, le uniche risorse utilizzabili per far fronte ai picchi di richiesta per la ricarica delle batterie siano i combustibili fossili.

Anche in presenza di un mix molto sostenibile futuro quindi, per incrementare velocemente la produzione di energia elettrica bisognerà emettere molta anidride carbonica.

Questo scenario sarà valido fino a quando la capacità di produrre energia con basse emissioni di GHG non avrà superato la soglia della domanda minima di energia richiesta. Raggiunto questo punto di equilibrio, i picchi potranno essere gestiti con una quota sempre maggiore di energia elettrica prodotta in modo sostenibile e le emissioni serra inizieranno a diminuire. La rappresentazione grafica del concetto di quantità marginale di energia elettrica e la differenza con l'energia media si trova in **figura 3.24**. In essa si può notare come l'emissione di CO₂ associata alla produzione marginale di energia elettrica (KgCo₂eq/MJ) annua sia maggiore circa del 54% di quella media.

Nelle **figure 3.22** e **3.23** sono, inoltre, riportati rispettivamente la domanda di energia elettrica giornaliera (in un panorama con e senza veicoli elettrici) e il mix produttivo dell'energia elettrica nel Regno Unito in funzione della domanda di energia elettrica.

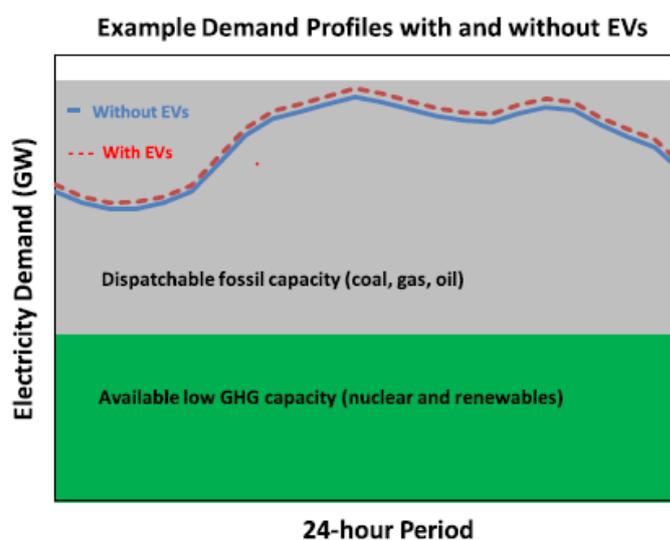


Figura 3.22. Domanda energia elettrica giornaliera con e senza presenza di veicoli elettrici. Sono distinti i contributi a bassa emissione di gas serra per l'aliquota media, da quelli non sostenibili per far fronte a picchi di richiesta energetica.

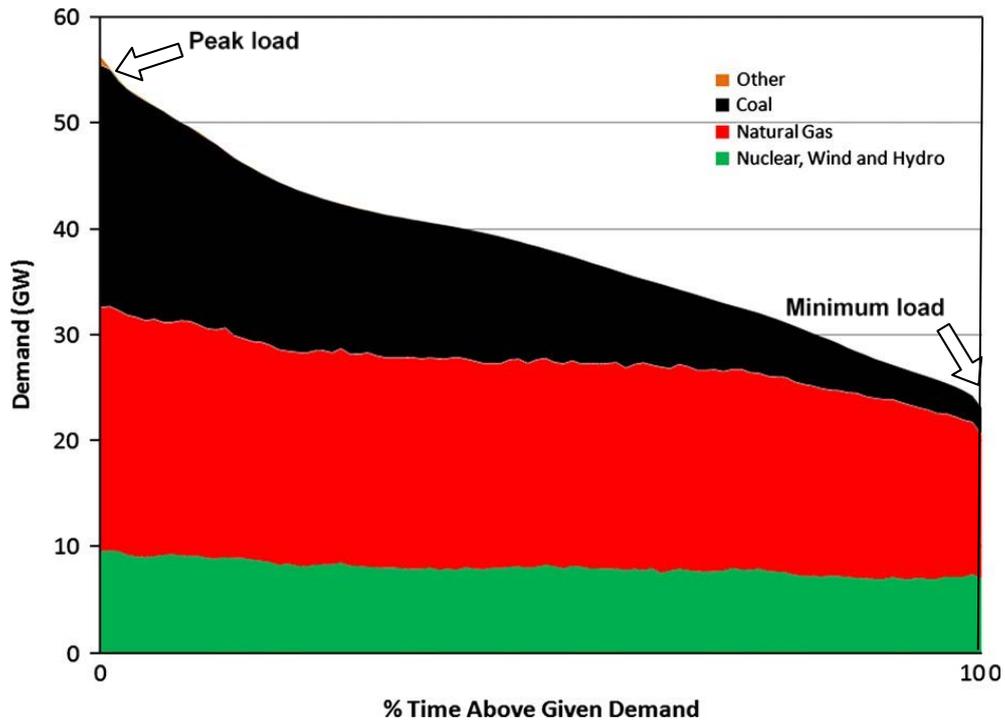


Figura 3.23 Mix produttivo energia elettrica Regno Unito.

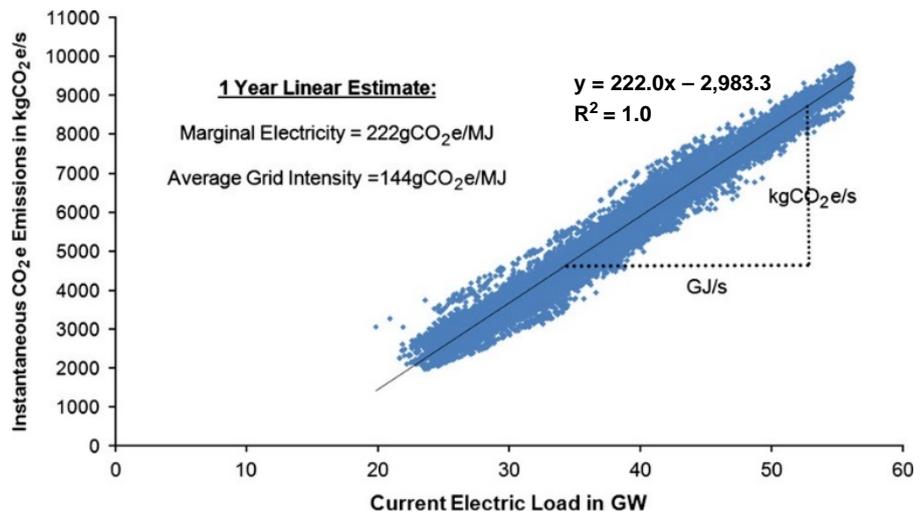


Figura 3.24. Portata istantanea di anidride carbonica emessa in funzione del carico richiesto dalla rete.

Considerando il contributo marginale dell'energia elettrica per caricare le batterie ed effettuando un'analisi delle emissioni su tutto il ciclo di vita di veicoli elettrici, tradizionali e ibridi, nel contesto del Regno Unito e della California, *H. Ma et al.* (2012), hanno ottenuto i risultati sintetizzati nelle **figure 3.25** e **3.26**.

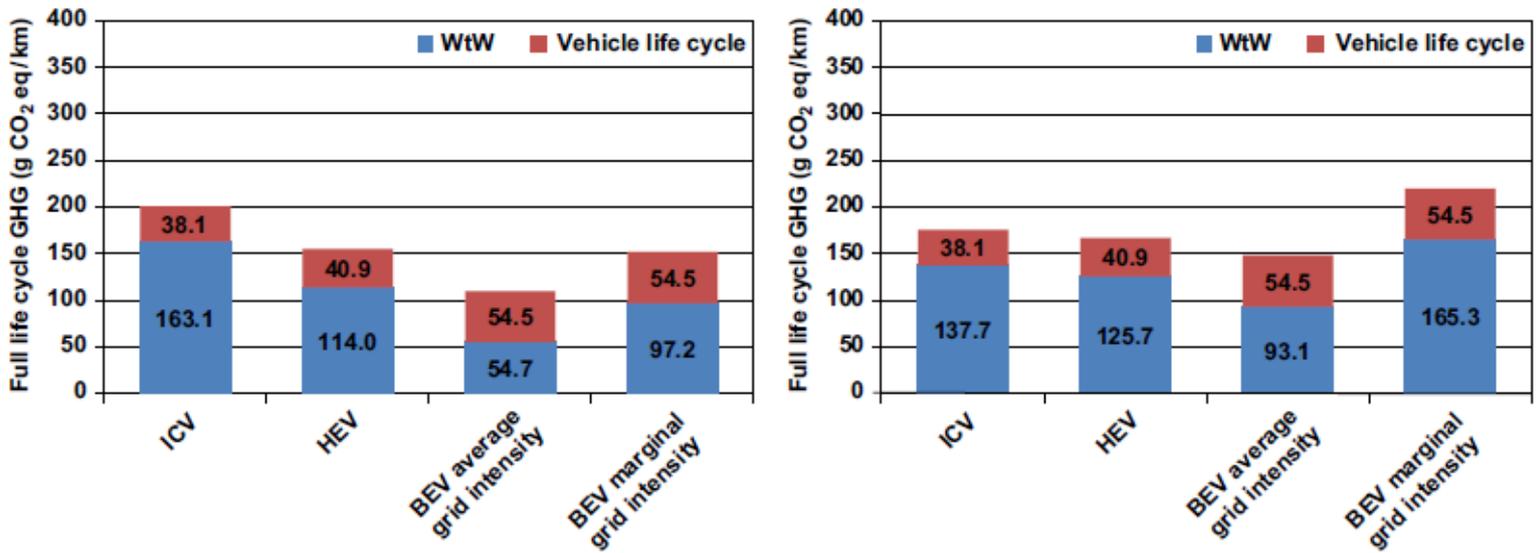


Figura 3.25. Confronto emissioni WtW e LCA di veicoli di segmento medio-piccolo tradizionali, elettrici e ibridi in un panorama UK (2015). Fonte [21].

A sinistra condizioni analisi: bassi carichi e velocità (ciclo urbano senza ausiliari); A destra velocità e carichi elevati (ciclo extraurbano con ausiliari inseriti). Fonte [21].

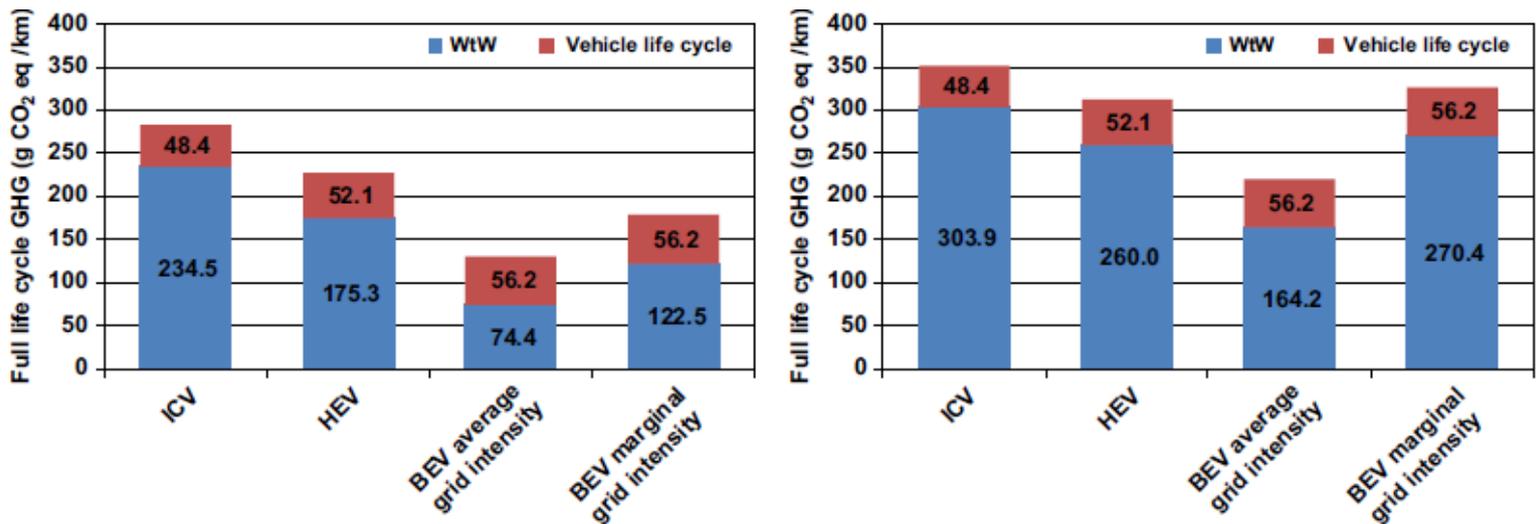


Figura 3.26. Confronto emissioni WtW e LCA di SUV tradizionali, elettrici e ibridi in un panorama California (2015).

A sinistra condizioni analisi: bassi carichi e velocità (ciclo urbano senza ausiliari); A destra velocità e carichi elevati (ciclo extraurbano con ausiliari inseriti). Fonte [21].

Dal grafico relativo al contesto del Regno Unito si possono desumere le seguenti conclusioni:

- Considerando la richiesta media invece che marginale si commette un errore maggiore circa del 40% nella stima dei gas serra;
- In un ciclo urbano, considerando l'energia marginale, i veicoli elettrici inquinano tanto quanto gli ibridi;
- In termini di emissioni per la produzione del veicolo, il veicolo elettrico è il più penalizzato, infatti la fase di produzione contribuisce al 30% - 50% delle emissioni totali;
- Considerando cicli ad alti carichi e velocità, cresce l'efficienza nelle emissioni dei veicoli tradizionali, mentre decresce quella degli elettrici; questi ultimi, in tale scenario, sono quelli ad emettere più CO₂ (sia in termini di WTW che ciclo di produzione veicolo).

Considerando invece il contesto della California e i SUV come tipo di veicolo:

- Emissioni serra relative al WTW sono maggiori rispetto ai veicoli leggeri (e più efficienti), considerati nel contesto del Regno Unito;
- I veicoli elettrici hanno emissioni inferiori a quelli tradizionali.

Sintetizzando le informazioni dei due grafici:

- I veicoli elettrici leggeri sono più efficienti di quelli con peso maggiore;
- I veicoli EVs possono essere più efficienti in termini di GHG dei veicoli ICEVs, quando l'energia elettrica è prodotta in modo sostenibile, e in particolare se è sostenibile l'aliquota marginale che consente la ricarica delle batterie;
- I vantaggi dei veicoli elettrici si hanno soprattutto in cicli urbani a basse velocità e con pochi ausiliari inseriti (esempio impianti di riscaldamento/condizionamento);
- La produzione dei veicoli elettrici e dei loro pacchi batteria incide maggiormente sull'intero ciclo di vita (30%-50%) rispetto ai veicoli tradizionali;
- L'uso dell'energia elettrica marginale fornisce un quadro più realistico delle emissioni GHG, ed essendo tale energia prodotta da combustibili fossili penalizza ulteriormente in termini di impatto ambientale i veicoli elettrici;
- Visto che le analisi sono molto sensibili al contesto scelto, è bene precisarne le condizioni e limitare bene il campo di studio.

3.6 INFLUENZA DEL MIX PRODUTTIVO

Dalle diverse analisi considerate risulta chiaramente che:

- il contributo in termini di GHG, dei veicoli elettrici, provenga soprattutto dalla fase di produzione del veicolo e delle batterie;
- in fase di uso è importante considerare l'aliquota dell'energia marginale per la ricarica delle batterie.

Entrambi questi fattori, precedentemente analizzati in dettaglio, mettono in evidenza una dipendenza, molto più marcata rispetto ai veicoli tradizionali, dalla filiera di produzione dell'energia elettrica.

Al crescere della sostenibilità del mix energetico considerato risulta più efficiente l'impatto ambientale dei veicoli EVs.

Di seguito saranno riportati alcuni esempi che si trovano in letteratura:

1. Studio condotto da *Linda Ager et al.* [10]

Viene analizzato l'impatto ambientale dei veicoli elettrici in funzione della presenza, più o meno marcata, del carbone nel mix produttivo dell'energia elettrica;

Sono presentati quattro scenari:

- a) Produzione di energia elettrica assumendo il valore medio di carbone usato nel mix produttivo mondiale (emissioni di 1029 g CO₂eq kWh⁻¹)
- b) Produzione di energia elettrica assumendo valore medio di gas naturale usato nel mix produttivo mondiale (emissioni pari a 595 g CO₂eq kWh⁻¹)
- c) Produzione di energia elettrica assumendo valore medio di eolico usato nel mix produttivo mondiale (emissioni di 21 g CO₂eq kWh⁻¹)
- d) Produzione di energia elettrica completamente da eolico (ipotesi surrealistica) assumendo un'emissioni di CO₂ di 17 g CO₂eq kWh⁻¹.

I risultati sono riportati nella **figura 3.27**.

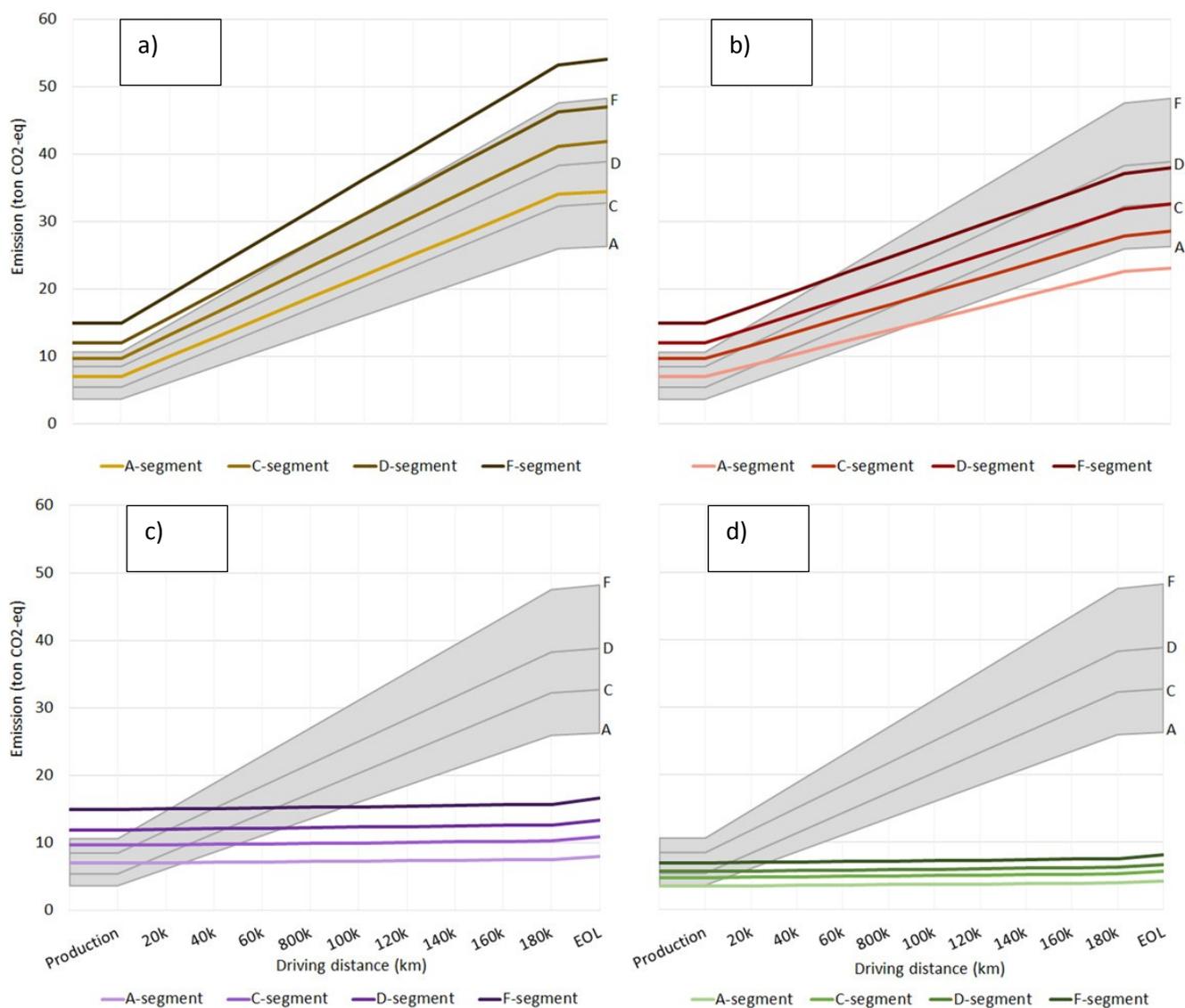


Figura 3.27. Variazioni emissioni GHG al variare delle fonti usate per la produzione di energia elettrica: a) carbone, b) gas naturale, c) eolico (valore medio mondiale), d) solo eolico.

Analizzando la **figura 3.27** si possono trarre le seguenti conclusioni:

- Nello scenario (a) i veicoli elettrici, vista la preponderanza dell'uso del carbone, mostrano emissioni di CO₂ maggiori del 12%-31% rispetto ai veicoli tradizionali;
- Considerando il mix Europeo, **figura 3.7**, l'impatto ambientale dei veicoli elettrici diminuisce rispetto ai veicoli tradizionali all'aumentare della distanza percorsa; nello scenario (a) accade, invece, il contrario;
- Usando il gas naturale, l'impatto ambientale dei veicoli elettrici è del 12%-21% superiore a quello dei veicoli tradizionali; risulta leggermente superiore anche al caso di produzione di energia elettrica da mix europeo, **figura 3.7**.

- Nello scenario (c) i veicoli elettrici risultano migliori dei tradizionali indipendentemente dal segmento, con un'emissioni minore del 60%-70%; al crescere della sostenibilità del vettore energetico diminuisce l'impatto della fase di uso (ricarica delle batterie in questo caso). Viceversa aumentano le emissioni dovute allo smaltimento veicolo e batterie.
- Nell'ipotesi utopistica dello scenario (d) le emissioni dei veicoli elettrici sono circa dell'80% inferiori a quelle dei veicoli tradizionali.
- Questi drastici valori percentuali di riduzione delle emissioni a favore dell'elettrificazione sono poco significativi, per via dell'ipotesi di un sistema energetico basato prevalentemente sull'eolico, caratterizzato da un funzionamento molto discontinuo.
- L'elemento interessante è, invece, che si vede che al crescere della sostenibilità dell'energia elettrica, pesa sempre meno la fase di produzione dei veicoli elettrici; In questo scenario di produzione di energia *green* i valori di CO₂ emessi sono circa di 3.2 kg CO₂-eq kg⁻¹, mentre la produzione delle batterie influenza solo per il 20% (contro il 50%-60% considerando il mix Europeo) l'intero ciclo di vita in termini di GHG.
- Infine è evidente che al diminuire del tenore di carbone nel mix produttivo dell'energia elettrica, i risultati diventano quasi indipendenti dagli effetti del peso e del segmento, che mostrano emissioni di GHG molto simili fra loro.

2. Studio di Hawkins et al. (2012) [13]

Nel loro studio hanno comparato le emissioni serra e tossiche in quattro diversi scenari comprendenti veicoli diesel, benzina ed elettrici (con batterie ottenute da diverse combinazioni di mix produttivi, precedentemente analizzate in dettaglio).

Con l'ausilio della figura **3.16** si possono sintetizzare le seguenti conclusioni:

- Si hanno benefici usando veicoli elettrici in luogo dei tradizionali, con produzione di elettricità da gas naturale, in termini di TAP (acidificazione suolo terrestre), particolato e smog fotochimico;
- Usando per produrre le batterie mix produttivi più sostenibili i vantaggi del punto precedente si intensificano, insieme a una riduzione dei gas serra emessi

- iii. Considerando energia elettrica da eolico e da carbone, le vetture elettriche emettono una CO₂ complessiva rispettivamente di 106 g CO₂-eq/Km e di 352 g CO₂-eq/Km. Quest'ultimo valore li renderebbe poco competitivi rispetto agli ICEVs tradizionali;
- iv. L'uso del gas naturale per l'energia elettrica si colloca come impatto a metà fra eolico e carbone in termini di CO₂ legata al ciclo di vita dei veicoli elettrici;
- v. Indipendentemente dalla sorgente usata per la produzione di energia elettrica, l'impatto in termini di tossicità dei veicoli elettrici risulta sempre maggiore dei veicoli tradizionali.

3. Studio di Quiao et al. (2017) [25]

Si tratta di un'analisi "*cradle to gate*" ("dalla culla al cancello" letteralmente), cioè un'analisi parziale del ciclo di vita dei veicoli elettrici e tradizionali, che mette in luce i consumi energetici e le emissioni dall'estrazione del combustibile al "cancello" dell'industria, prima della distribuzione al cliente. Comprende la fase di produzione del veicolo, ma non le fasi di uso e smaltimento.

Lo studio ha come contesto la Cina, e ciò è interessante per diversi motivi:

- i. Nazione con più grande mercato dell'automobile;
- ii. Il governo cinese sta investendo in una massiva elettrificazione, dai 250 mila veicoli elettrici del 2015 ai 5 milioni del 2020;
- iii. Fornisce un'indicazione delle emissioni di CO₂ per produrre veicoli elettrici in paesi fortemente in via di sviluppo, non caratterizzati di certo da produzione green di energia elettrica;
- iv. Molte fabbriche automobilistiche producono i loro veicoli in Cina;
- v. Molte batterie elettriche di trazione vengono prodotte in Cina.

Lo studio viene condotto considerando i materiali che costituiscono i veicoli elettrici e tradizionali, e viene allocato per ogni materiale il costo, in termini di energia e di anidride carbonica equivalente emessa, necessario per produrlo con il know-how tecnologico disponibile in Cina. L'impatto del veicolo risulta dalla somma dell'energia spesa per l'estrazione e lavorazione dei materiali, più quella relativa all'assemblaggio.

Dallo studio emerge che gli elementi più costosi in termini di energia ed emissioni riguardano i cicli di fabbricazione relativi all'acciaio e soprattutto la produzione delle batterie destinate ai veicoli elettrici.

Per quanto riguarda la produzione delle batterie, la fase più onerosa in termini di impatto ambientale è la lavorazione dei materiali attivi: 125306 MJ/t, 1866 kgCO₂eq sono rispettivamente i consumi di energia e le emissioni di CO₂ per lavorazione dei materiali attivi di una batteria NCM.

I risultati dello studio, considerando le emissioni GHG globali e il consumo di energia specifico, per ogni materiale, processo e sorgente utilizzata sono raccolti nella seguente tabella di **figura 3.28**:

VEICOLO	CONSUMO ENERGIA (MJ)	KgCO ₂ -eq
EVs con batteria NCM	92392	15005
Evs con batteria LiFePO ₄	94341	15174
ICEVs	63515	9985

Figura 3.28. Dati consumo energia ed emissione equivalente da produzione diversi veicoli.

Dalla tabella si evince che i consumi di energia per i veicoli elettrici, in Cina, sono maggiori del 45%-50% rispetto ai tradizionali, mentre le emissioni di GHG sono maggiori di quelli dei veicoli tradizionali del 48%-52%. Come già detto ciò è da imputare principalmente alla produzione dell'acciaio e delle batterie dei veicoli elettrici. Il seguente grafico, **figura 3.29**, riassume le spese energetiche (in alto) e le emissioni serra (in basso) per i diversi tipi di veicoli considerati, in funzione dei componenti, dei materiali e delle risorse energetiche usate.

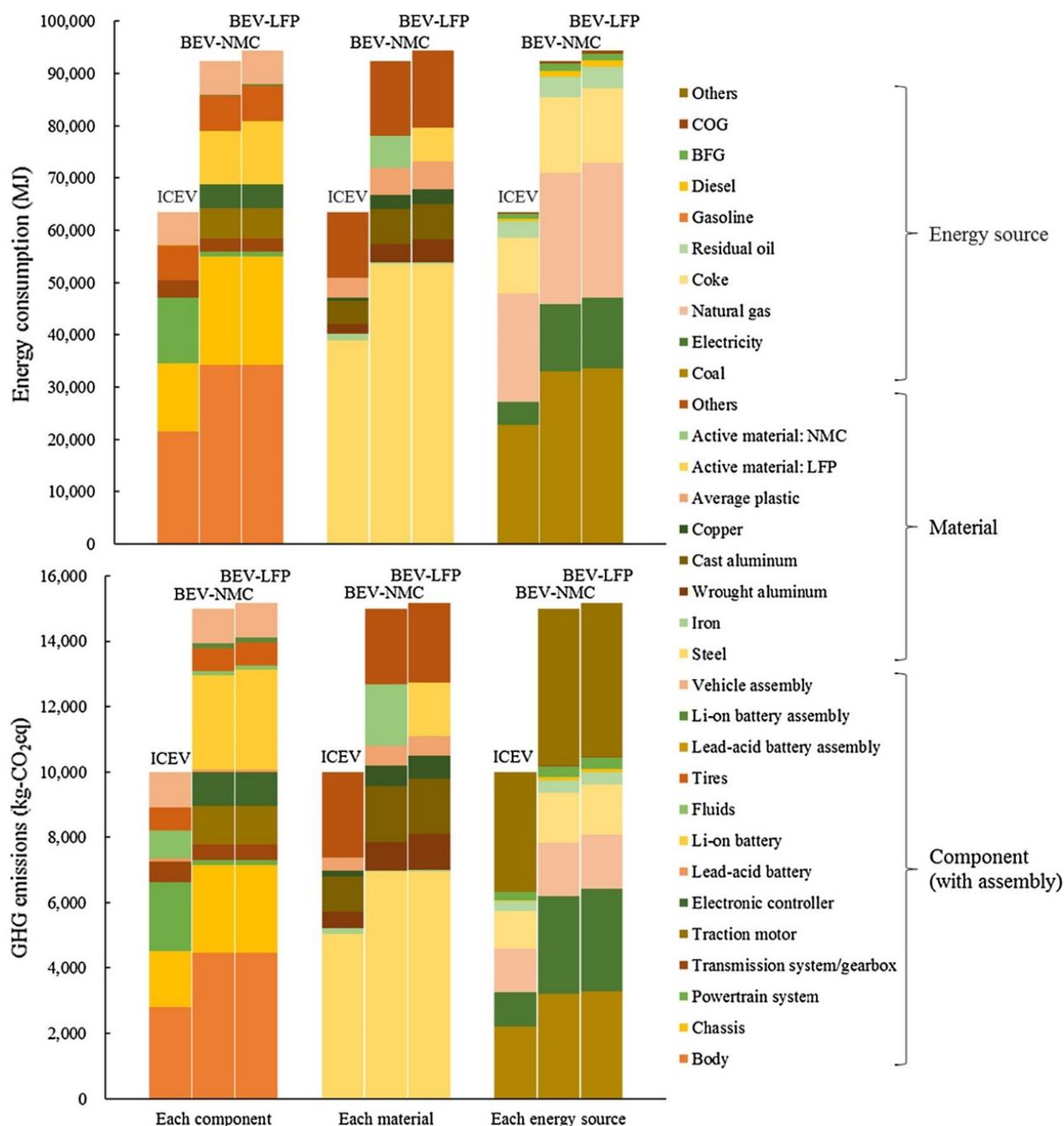


Figura 3.29. Il grafico mostra le emissioni GHG (in basso) e di consumo di energia (in alto) globali per ogni componente, materiale e fonte di energia per i diversi tipi di veicolo.

Da queste considerazioni si può affermare che la Cina non è una nazione pronta all'elettrificazione immediata, perché ha un mix produttivo energetico basato prevalentemente sul carbone (**figura 3.30**). Questo, insieme alla tecnologia disponibile, rende elevata l'emissione di GHG anche dell'industria siderurgica e in generale amplifica la forte dipendenza delle emissioni dei veicoli elettrici dalla fase di produzione. Di seguito le figure **3.31** e **3.32** mostrano le dipendenze dell'energia

consumata e delle emissioni rispettivamente per ogni singolo componente, materiale e risorsa energetica usata.

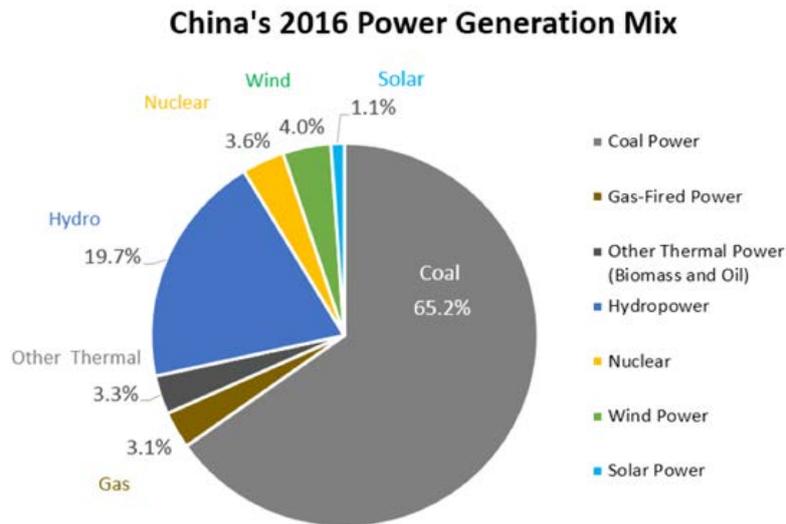


Figura 3.30. Mix produttivo energia elettrica in Cina (2016).

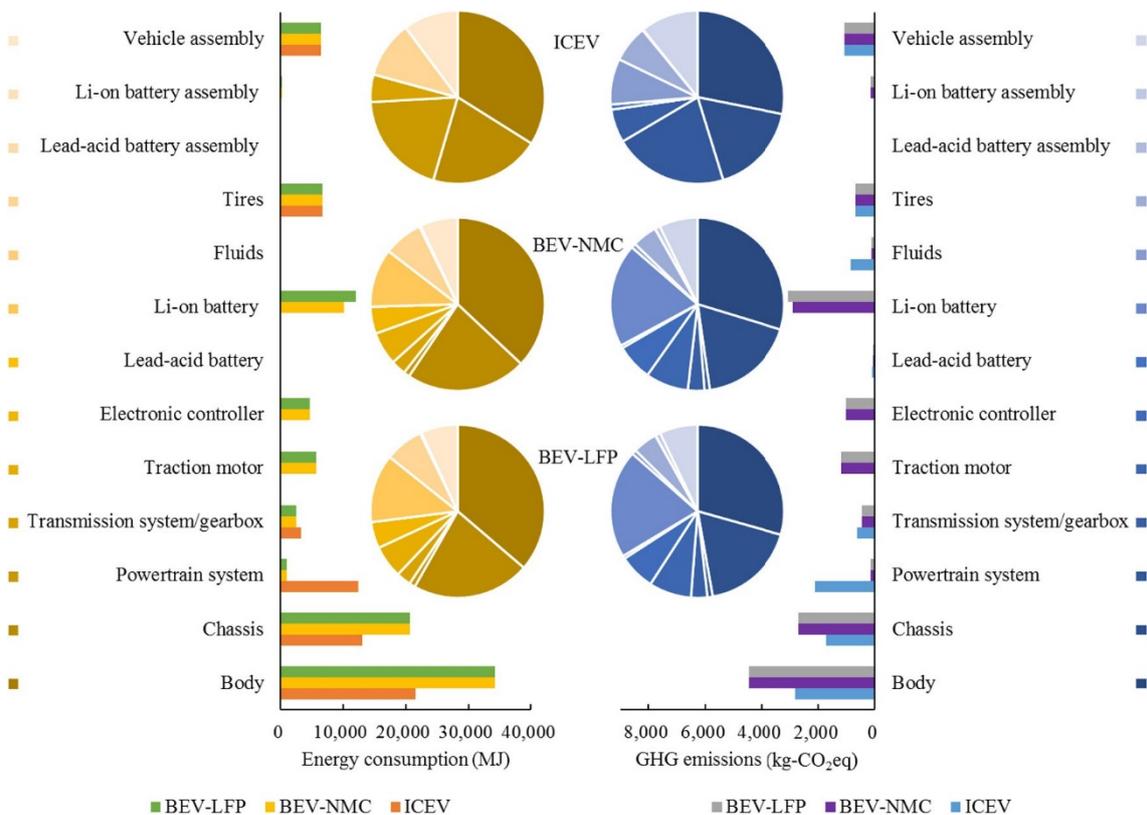


Figura 3.31. Consumo di energia ed emissioni GHG per ogni componente. Fonte[25]

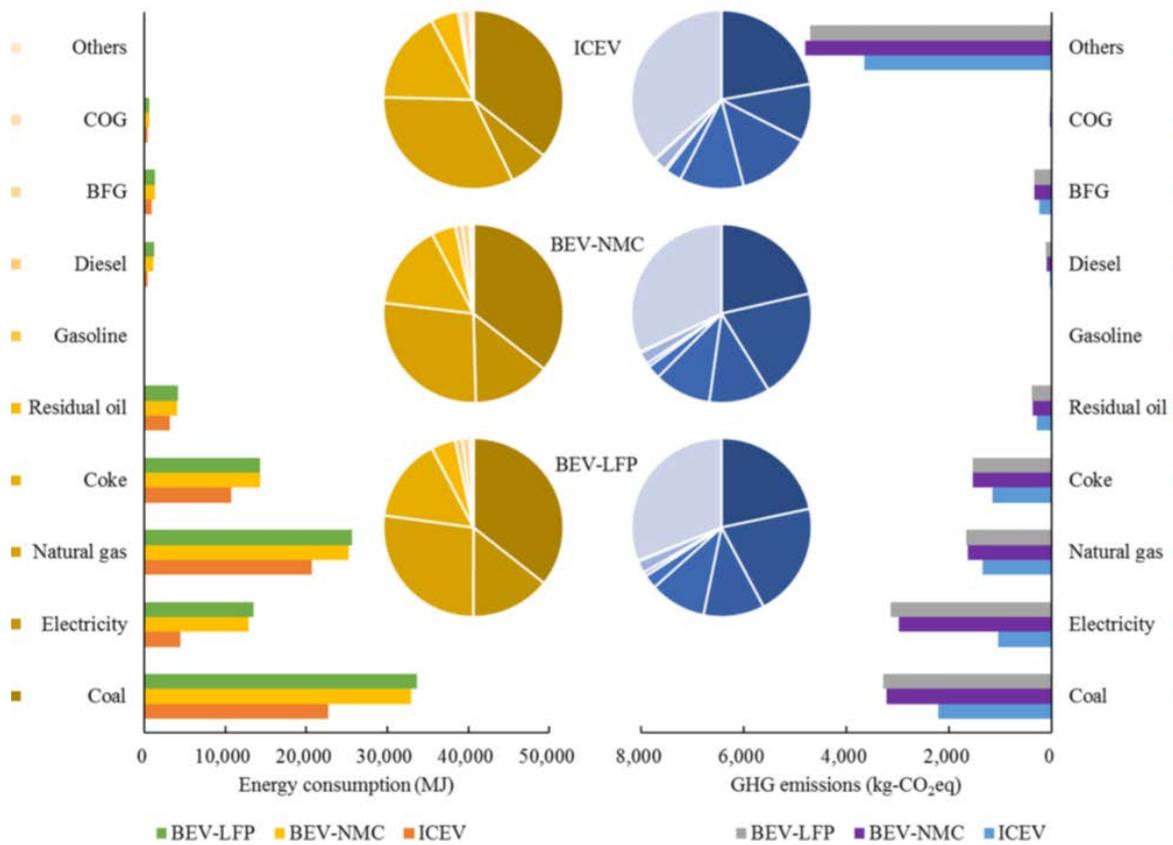
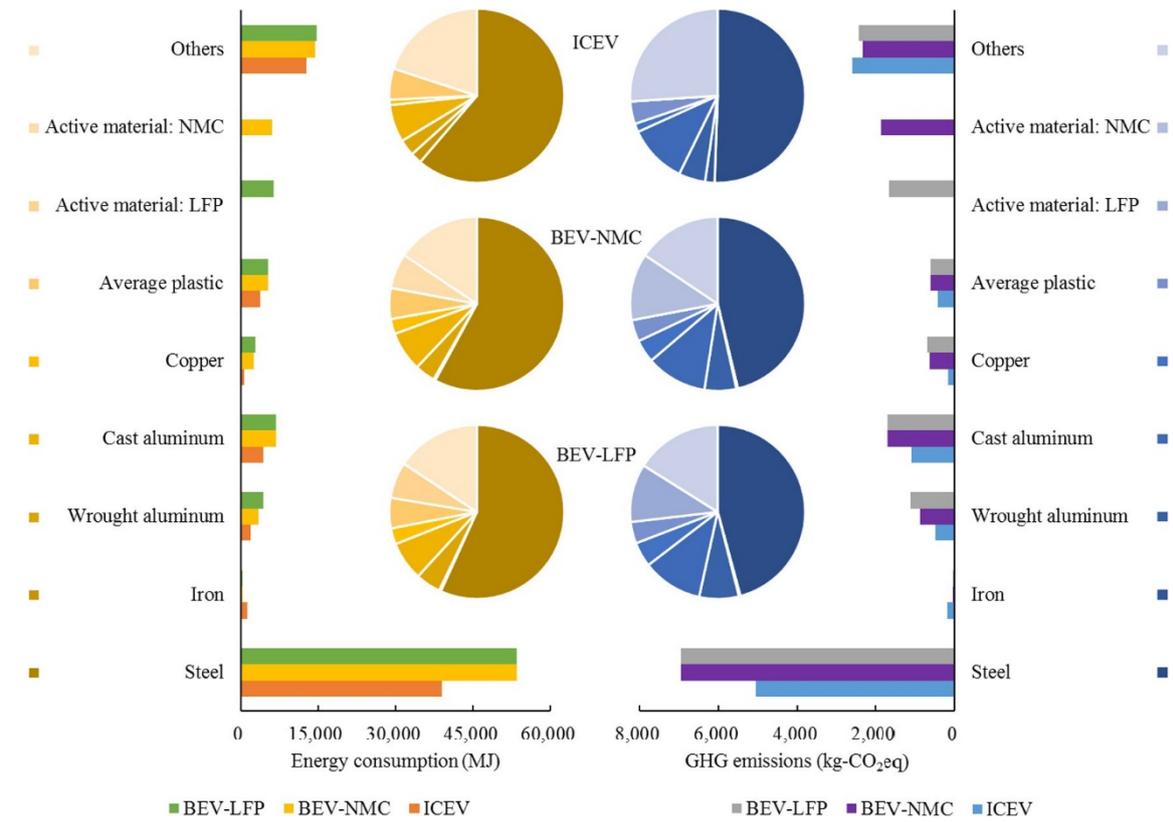


Fig.3.32. Consumo di energia ed emissioni GHG per ogni materiale (in alto) e per ogni risorsa energetica (in basso). [25]

Come indicato dagli stessi autori Quiao et al., la Cina non è ancora pronta per l'elettrificazione del parco auto, ciò è ancora più evidente confrontando i dati emissioni GHG per produzione di veicoli elettrici con quelli di altre nazioni (figura 3.33)

AREA GEOGRAFICA	ICEVs Kg CO ₂ -eq	EVs – NMC Kg CO ₂ -eq	EVs LI-FePO ₄ Kg CO ₂ -eq
CINA	9985	15005	15174
U.S.A	7052	9450	9222
AUSTRALIA	8000	13000	13000
EUROPA	6500	13000	14000

Figura 3.33. I dati degli U.S.A provengono da Argonne National Laboratory U.S.A, quelli relativi all'Europa dal Database Ecoinvent v2.2, dati dell'Australia da fonte [26].

Si può concludere quindi che quando si parla di elettrificazione totale dei veicoli bisogna stare attenti al contesto in cui viene ad applicarsi; La forte dipendenza dalla composizione delle risorse energetiche limita l'uso dell'elettrico a tutti quei contesti "pronti" o in procinto di una produzione di energia elettrica sostenibile, viceversa si emette un livello di CO₂ maggiore di quello prodotto dai normali motori a combustione interna.

Le considerazioni sul mix produttivo acquisiscono ancora più importanza, se si considera anche la fase di utilizzo di un veicolo elettrico.

Come precedentemente analizzato, si può affermare che la quota di energia elettrica da considerare nella ricarica delle batterie è la quantità marginale, di norma superiore all'energia media richiesta alla rete; anche nel caso di mix sostenibili l'energia marginale necessita di una reazione veloce della rete, ottenibile con l'uso di combustibili fossili.

Unico modo, come già detto, per gestire i picchi con meno emissioni GHG è fare in modo che la quota di energia sostenibile sia maggiore del carico minimo richiesto alla rete.

4.PROSPETTIVA FUTURA

Dal 1991 a oggi i motori a combustione sono stati esposti sempre a nuove e più rigide normative sulle emissioni in fase dei cicli di omologazione, come si può vedere in **figura 4.1**.

In prospettiva futura, le emissioni di CO₂ dovranno scendere dai 130g/Km del 2015 ai 95 g/Km per il 2021 e probabilmente intorno ai 70 g/Km entro il 2025 (**figura 4.2**).

Tuttavia per le aziende produttrici di motori termici questi vincoli, lungi da rappresentare delle “minacce”, costituiscono stimoli per l’innovazione tecnologica di un prodotto ancora valido anche in termini di impatto ambientale.

La CO₂ è l’emissione inquinante che oggi preoccupa di più perché:

- Gli incombusti CO e H_xC_y sono abbattibili dai motori benzina tramite il catalizzatore trivalente, e non costituiscono un problema per il diesel (in camera di combustione si ha un ambiente ossidante che evita la formazione di incombusti);
- Il particolato PM è tenuto sotto controllo tramite filtri antiparticolato sempre più efficienti “FAP attivi”, e comunque è sempre in quantità minore rispetto a quello proveniente da gomme, freni e asfalto;
- Gli NO_x pur dipendendo marcatamente dallo stile di guida (**figura 4.3**), tuttavia, le più recenti tecnologie, come l’SCR con AdBlue (riduttore catalitico selettivo di NO_x) hanno dimostrato di poter contenere tali emissioni entro il limite di 80 mg/km, in qualunque condizione di guida e condizione atmosferica. Inoltre, grazie all’ulteriore sviluppo tecnologico in corso, è prevedibile un ulteriore miglioramento del livello di emissioni fino a circa 10-15 mg/km;
- Uno studio condotto da *AVISIO GmbH* in una stazione di rilevazione a Stoccarda, in una zona urbana con elevato tasso di traffico, ha rivelato che il contributo di una vettura diesel Euro 6 con omologazione RDE all’ossido di azoto N₂O₂ è marginale. Si deduce, quindi, che nell’arco di 5-10 anni il motore diesel potrà diventare trascurabile nelle emissioni rispetto alle altre sorgenti, con ulteriori sviluppi di motorizzazioni in grado di raggiungere i 10 mg/Km in termini di NO_x, (**figura 4.4**).



Figura 4.1. Riduzione dei principali inquinanti come HC, NOx, PM attraverso le norme Eu.

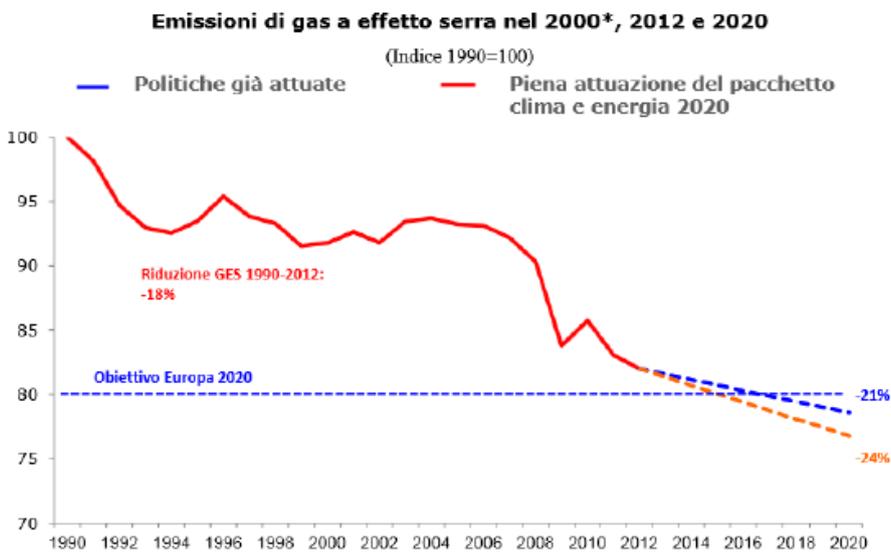


Figura 4.2. Riduzione della CO2 in presenza della piena attuazione del pacchetto Clima ed Energia 2020.

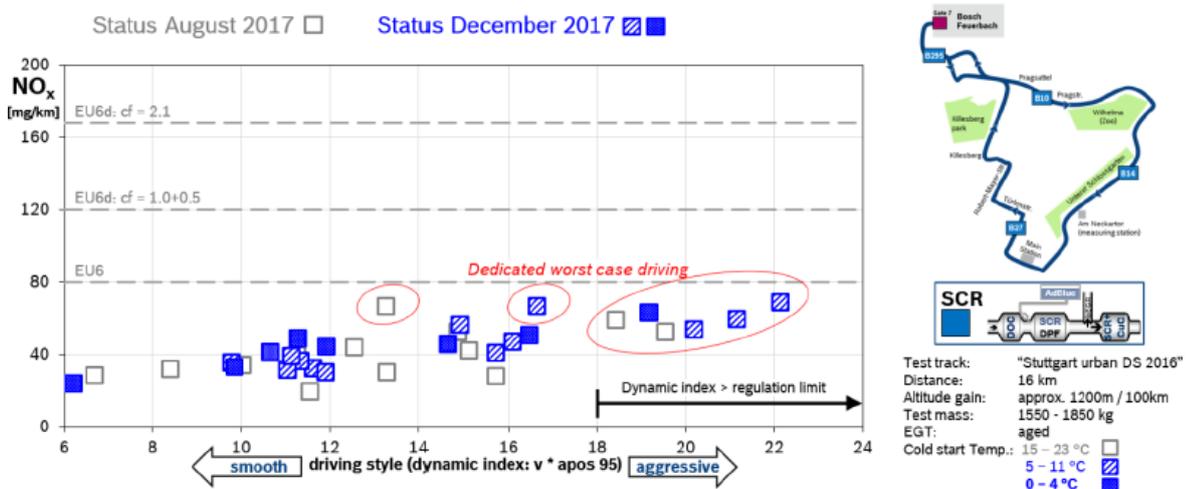


Figura 4.3. Test RDE di vettura diesel equipaggiata con SCR di ultima generazione, emissioni di NOx in funzione dello stile di guida. Fonte [27]

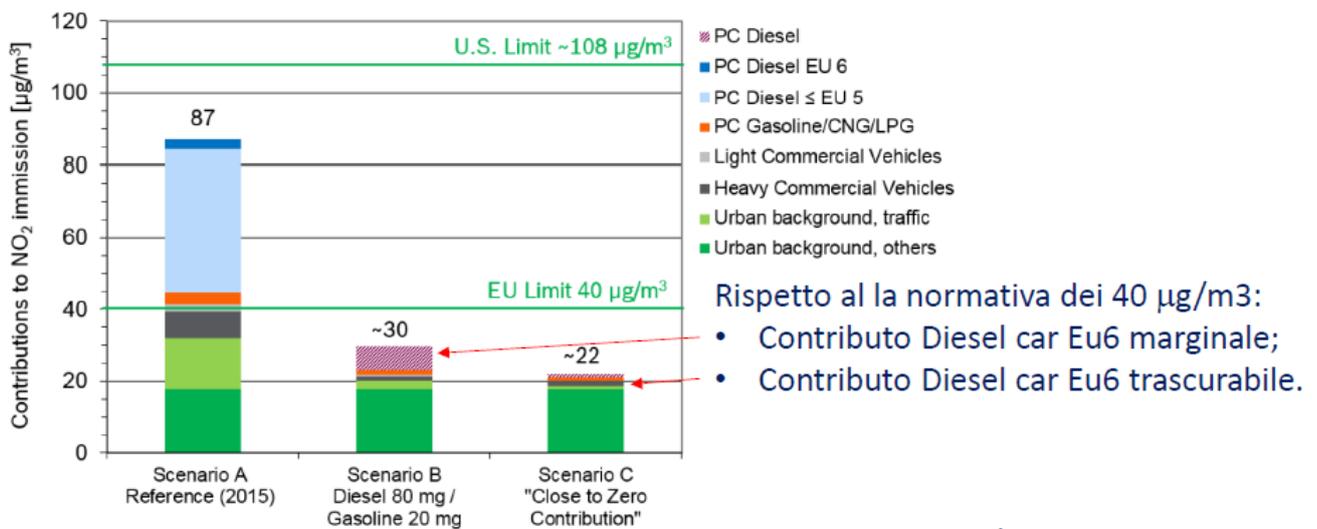


Figura 4.4. Contributo emissioni delle diverse tecnologie agli ossidi di azoto. Fonte [27]

L' emissione di anidride carbonica risulta quindi il target per rendere ulteriormente più sostenibili i motori tradizionali.

Le strategie che si dovranno adottare sono:

- Continuo sviluppo tecnico dei motori benzina e diesel in modo da aumentarne il rendimento, ridurne i consumi e le emissioni (per esempio ricorrendo al *downsizing* e alla sovralimentazione, si ottengono motori più piccoli ed efficienti);
- Aumentare il grado di ibridazione dei propulsori attualmente disponibili, il che consentirebbe di ridurne i consumi ed emissioni di CO₂, per raggiungere obiettivi di efficienza globale di circa il 50% per i motori benzina e 54-55% per i motori Diesel;
- Impiego di percentuali sempre maggiori di biocombustibili che hanno un contenuto minore in termini di carbonio, quindi tendono a limitare la formazione di CO₂.

L'ibridazione e l'uso più copioso di biocombustibili renderanno il diesel ancora competitivo e strategico per il raggiungimento degli obiettivi di emissioni GHG nel medio termine, almeno per le tipologie di vetture di medio/grande segmento ed utilizzate per distanze percorse di medio/lungo raggio (segmenti e distanze che sfavoriscono, invece, i veicoli elettrici).

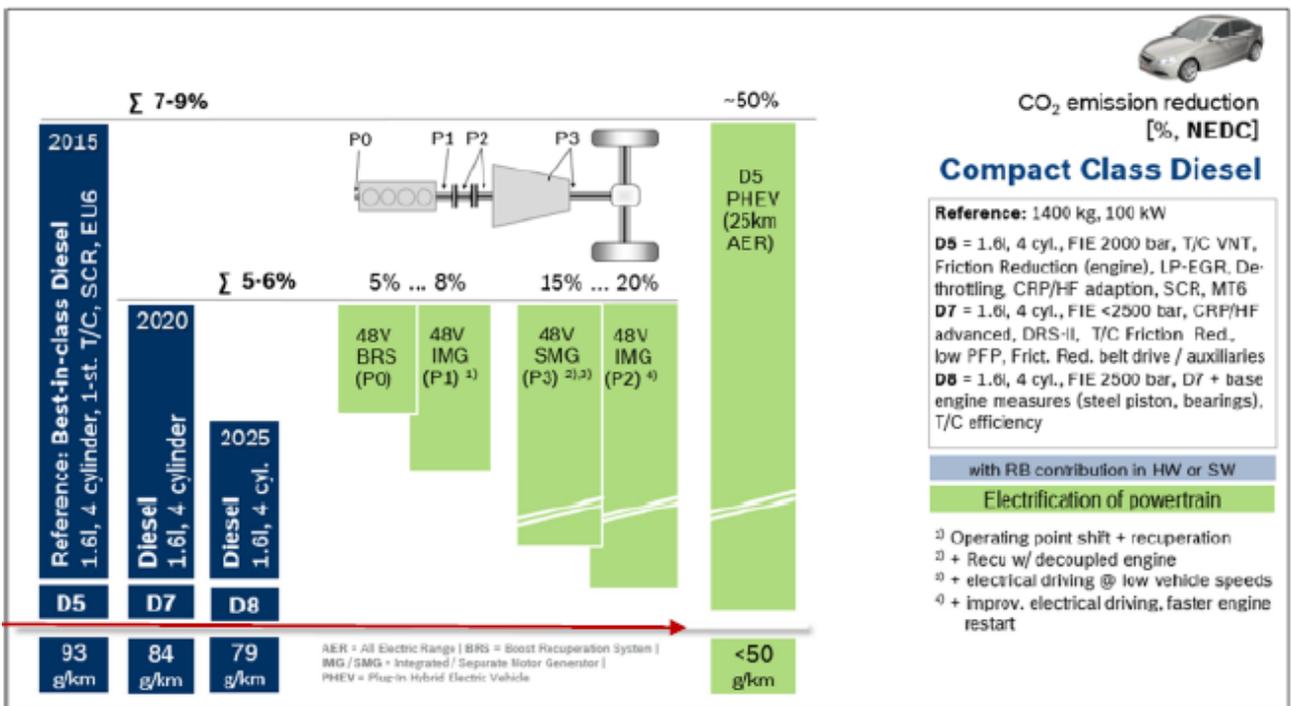
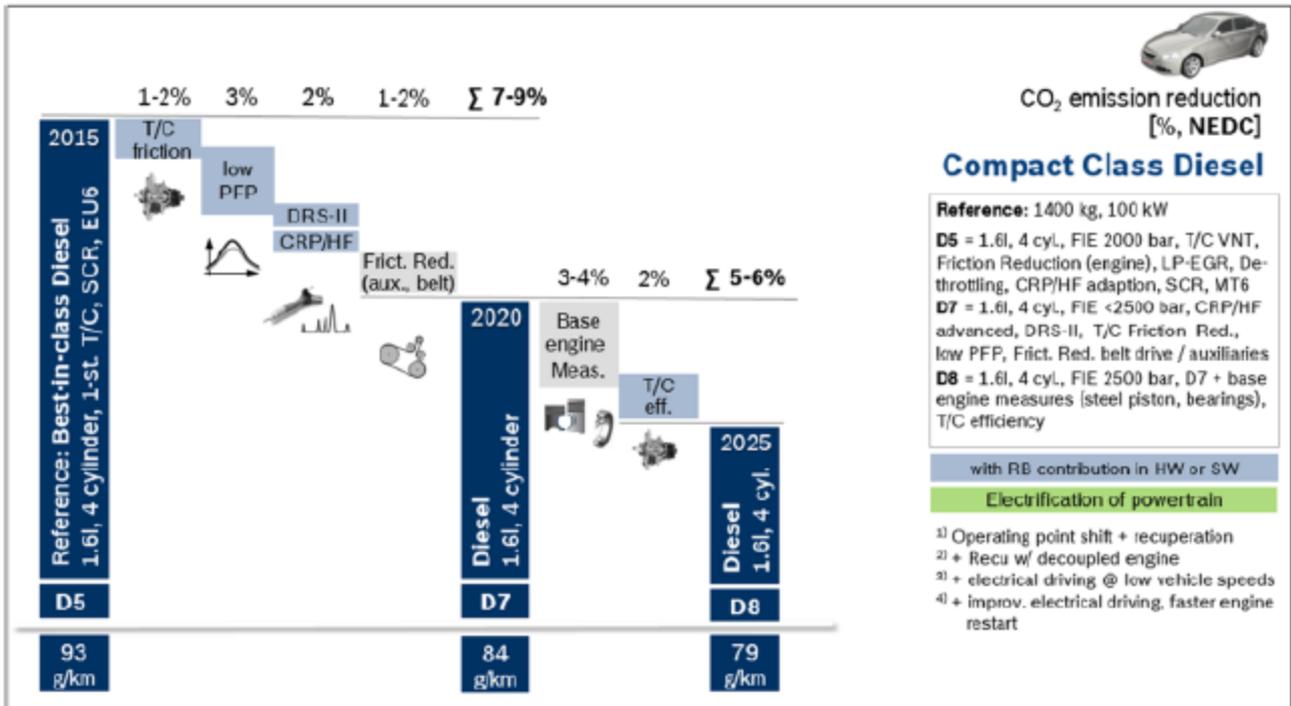


Figura 4.5. Tecnologie Diesel in sviluppo per il target di efficienza del 54-57%, tramite uso l'ibridizzazione e uso di biocombustibili. Fonte [28].

5.CONCLUSIONI

L'obiettivo portante di questa tesi è stato quello di effettuare una panoramica circa i consumi di energia e l'impatto ambientale ottenibili con diverse tecnologie di propulsione, tramite il confronto di articoli scientifici presenti in letteratura.

In particolare, si è analizzato il confronto tra veicoli con motori tradizionali e veicoli elettrici, che sono considerati, fra i veicoli alternativi, i principali candidati dalle case automobilistiche per la sostituzione dei motori a combustione.

L'obiettivo dell'analisi non è stato principalmente solo quello di concentrarsi sulle differenze fra le due tipologie di veicoli in termini di emissioni GHG, ma in generale sull'impatto globale, considerando per esempio emissioni di particolato e l'impatto tossico sull'ambiente.

Questo per mostrare che i veicoli alternativi non hanno vantaggi assoluti o schiacciati su quelli tradizionali, tanto da implicare una sostituzione immediata; anzi dall'analisi si nota come ancora questa tecnologia debba migliorare su molti punti di vista, se si vuole imporre come un'opzione tecnologicamente più ecologica.

Un altro risultato dell'analisi è che i vantaggi dell'elettrico, quando si manifestano, dipendono fortemente dalle condizioni al contorno considerate come: infrastrutture, mix produttivo, know-how tecnologico, clima e uso del conducente.

Sono emerse le seguenti conclusioni:

- L'impatto ambientale in termini di GHG è principalmente influenzato dal peso e dalla produzione delle batterie;
- La fase di produzione del veicolo, batterie incluse, costituisce il 50%-60% delle emissioni di gas serra dell'intero ciclo di vita;
- I veicoli elettrici solitamente, a parità di mix produttivo e di segmento, partono con un gap di CO₂ dovuto alla fase di produzione rispetto ai veicoli tradizionali, per poi recuperare con la distanza percorsa; in media servono 40000Km-70000Km prima del punto di equilibrio con i veicoli tradizionali (ipotizzando 10 mila km annui servirebbero 7 anni nel caso peggiore!);
- Il risultato del punto precedente dimostra che i veicoli elettrici non sono una soluzione in grado di fare diminuire immediatamente le emissioni di CO₂;

- In media i veicoli elettrici sono il 24% più pesanti dei corrispondenti tradizionali;
- I veicoli elettrici emettono una quantità di particolato pari a quella proveniente dai gas di scarico dei veicoli tradizionali;
- Una riduzione di peso rende i veicoli elettrici più performanti dal punto di vista ambientale, sia in termini di emissioni serra ma soprattutto di particolato non proveniente da gas di scarico;
- Il peso deve essere un compromesso fra l'esigenza di emissioni GHG e particolato contenute, e di un'autonomia sufficientemente elevata in modo da limitare il numero di infrastrutture da realizzare per la ricarica;
- La riduzione di peso con adozione di materiali più leggeri è da considerare in virtù del contesto scelto, efficienza del sistema produttivo e know-how tecnologico; questo perché solitamente i materiali più leggeri hanno un'emissione maggiore di anidride carbonica di quelli più pesanti;
- Considerato che in un veicolo elettrico, a fronte di zero emissioni allo scarico, la gran parte della CO₂ emessa proviene dalla fase di produzione, perché abbia dei vantaggi occorre un mix energetico il più pulito e sostenibile possibile, perché quest'ultimo influenza a cascata molti fattori di produzione;
- Nei contesti con produzione di energia elettrica sostenibile, l'elettrico emette circa il 20% meno di emissioni globali di GHG dei veicoli tradizionali;
- A prescindere dal mix produttivo i veicoli elettrici hanno un nettamente peggiore impatto di tossicità ambientale, dato dalla produzione e smaltimento delle batterie che contengono molti metalli pesanti e sostanze tossiche.

Considerato quanto detto e che i motori tradizionali hanno migliorato il loro impatto ambientale grazie alle sempre più severe norme di omologazione EU, nel breve e anche medio termine il motore a combustione interna resta uno strumento strategico per gli obiettivi di riduzione delle emissioni globali.

In una prospettiva futura, a lungo termine, l'elettrico potrà essere un valido candidato se la filiera del vettore energetico diventerà più pulita globalmente, e se ci saranno nuove tecnologie per gli accumulatori, in grado di risolvere i problemi di peso, autonomia e tossicità di quelli attualmente disponibili sul mercato.

6.BIBLIOGRAFIA

- [1] World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). 2004. *Mobility 2030: Meeting the challenges to sustainability*. Geneva, Switzerland: WBCSD.
- [2] Sims R et al 2014 Transport Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change ed O Edenhofer et al. (Cambridge: Cambridge University Press). pp 1–115.
- [3] G. Ferrari, “Motori a combustione interna” 4 ed. 2008, Edizioni Il Capitello, Torino.
- [4] Regolamento (CE) N. 715/2007 del Parlamento Europeo e del consiglio del 20 giugno 2007, relativo all’omologazione dei veicoli a motore riguardo alle emissioni dei veicoli passeggeri e commerciali leggeri (Euro 5 ed Euro 6) e all’ottenimento di informazioni sulla riparazione e la manutenzione del veicolo.
- [5] United Nations Environment Programme. 2015. Life Cycle Assessment. [Online]. <http://www.unep.org/resourceefficiency/Consumption/StandardsandLabels/MeasuringSustainability/LifeCycleAssessment/tabid/101348/Default.aspx>
- [6] Nordelöf, A., Messagie, M., Tillman, A-M., Ljunggren Söderman, M. and Van Mierlo, J. 2014a. Environmental impacts of hybrid, plug-in hybrid, and

- battery electric vehicles—what can we learn from life cycle assessment? The International Journal of Life Cycle Assessment.19(11), pp. 1866-1890.
- [7] Jens F. Peters, Marcel Weil. 2017. Providing a common base for life cycle assessments of Li-Ion batteries. Journal of Cleaner Production, pp.704-713.
- [8] Patricia Egede et al. A Framework to Consider Influencing Factors. Procedia CIRP 29 (2015). pp 233 – 238.
- [9] Victor R.J.H. Timmers, Peter A.J. Achten. 2016. Non-exhaust PM emissions from electric vehicles. Atmospheric Environment (2016). pp 10-18.
- [10] Linda Ager-Wick Ellingsen, Bhawna Singh and Anders Hammer Strømman. The size and range effect: lifecycle greenhouse gas emissions of electric vehicles. Environ. Res. Lett. 11 (2016) 054010.
- [11] NEDC. [online] Web Url:
https://it.wikipedia.org/wiki/Nuovo_ciclo_di_guida_europeo
- [12] Itten R, Frischknecht R and Stucki M 2014 Life Cycle Inventories of Electricity Mixes and Grid (Uster, Switzerland: Paul Scherrer Institut (PSI)) (<http://esu-services.ch/fileadmin/download/publicLCI/itten-2012-electricity-mix.pdf>).
- [13] Troy R. Hawkins, Bhawna Singh, Guillaume Majeau-Bettez, and Anders Hammer Strømman. Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles. Journal Of Industrial Ecology. (2012). pp 53-65.
- [14] [online] https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion
- [15] Simons, A., 2013. Road transport: new life cycle inventories for fossil-fuelled passenger cars and non-exhaust emissions in ecoinvent v3. Int. J. Life Cycle Assess.pp1-15.
- [16] Ntziachristos, L., Boulter, P., 2009. EMEP/EEA Air Pollutant Emissions Inventory Guidebook 2009: Road Vehicle Tyre and Brake Wear; Road

Surface Wear. European Environment Agency, Copenhagen. Cited in Simons (2013).

- [17] TLK Thermo, Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (2013)
- [18] [online]https://www.quattroruote.it/news/industria/2017/08/31/consumi_ed_emissioni_entrano_in_vigore_i_test_wltp_ed_rde.html
- [19] Das S. Life Cycle Energy and Environmental Assessment of Aluminum-Intensive Vehicle Design, *SAE Int. J. Mater. Manf.* 2014;7(3): pp 588-595.
- [20] Ecoinvent 3.01 Database, Swiss Center for Life Cycle Inventories, 2013.
- [21] Hongrui Ma, FelixBalthasar, NigelTait, XavierRiera-Palou, AndrewHarrison. A new comparison between the life cycle greenhouse gas emissions of battery electric vehicles and internal combustion vehicles. *Energy Policy* 44 (2012). pp 160–173.
- [22] Chen, Y., Sijm, J., Hobbs, B.F., Lise, W., 2008. Implications of CO₂ emissions trading for short run electricity market outcomes in northwest Europe. *Journal of Regulatory Economics* 34(3), pp 251–281.
- [23] Dotzauer, E., 2010. Greenhouse gas emissions from power generation and consumption in a Nordic perspective. *Energy Policy* 38, pp 701–704.
- [24] Elgowainy, A., Burnham, A., Wang, M., Molburg, J., Rousseau, A., 2009. Well-to- Wheels energy use and greenhouse gas emissions analysis of plug-in hybrid electric vehicles. Technical Report ANL/ESD/09-2, Argonne National Laboratory.
- [25] Qinyu Qiao, Fuquan Zhao, Zongwei Liu, Shuhua Jiang, Han Hao, 2017. Cradle-to-gate greenhouse gas emissions of battery electric and internal combustion engine vehicles in China. *Applied Energy* 204 (2017); pp 1399–1411.

- [26] Sharma R, Manzie C, Bessede M, Crawford RH, Brear MJ. Conventional, hybrid and electric vehicles for Australian driving conditions. Part 2: life cycle CO₂-emissions. *Transport Res Part C: Emerg Technol* 2013; pp 63–73.
- [27] Andreas Kufferath, Michael Krüger, Dirk Naber, Ellen Mailänder, Rudolf Maier - Robert Bosch GmbH, The Path to a Negligible NO₂ Immission Contribution from the Diesel Powertrain. *Internationales Wiener Motorensymposium 2018*.
- [28] Fonte: A. Kufferath et al., Fuel consumption in accordance with real driving emissions: The future of Diesel Passenger Car. *Vienna Motorsymposium 2017*.

7.RINGRAZIAMENTI

Volevo ringraziare in primo luogo, il mio relatore, il Prof. Ing. Enrico Corti per la sua disponibilità e per la sua comprensione e soprattutto per la sua pazienza.

Ringrazio la mia famiglia per essermi sempre stata vicina, per avermi supportato e sopportato in questo lungo percorso, non avermi fatto mai mancare la fiducia e per avere sempre creduto in me anche nei momenti più difficili.

Ringrazio la mia fidanzata Elena per essermi stata vicina nonostante la distanza, per essere sempre paziente e pronta a incoraggiarmi in ogni evenienza, e per avermi sempre incitato a studiare nei momenti meno facili.

Ringrazio i miei amici del Lanteri, Luigi, Antonio, Alessandro, Leo, Gildo, Marco, Mario, Nicolò, Niccolò, Aurelio, Paolo, padre Roberto per essermi sempre stati vicini, per avermi supportato e aiutato a crescere.