

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITA' DI BOLOGNA
SCUOLA DI INGEGNERIA - Sede di Forlì

Corso di Laurea in INGEGNERIA MECCANICA - Classe L-9

ELABORATO FINALE DI LAUREA
in MACCHINE

**CONFRONTO DELL'IMPATTO AMBIENTALE
TRA AUTOVETTURE TRADIZIONALI
ED ELETTRICHE / IBRIDE**

Candidato
Riccardo Farneti

Relatore
Prof. Enrico Corti

Anno Accademico 2018/2019

Abstract: Il trasporto di persone rappresenta una delle principali fonti di sostanze inquinanti e climalteranti. In l'Italia il settore dei trasporti è responsabile di oltre il 25% delle emissioni totali di CO₂, oltre che di migliaia di tonnellate di altri inquinanti. Gli organismi di Governo ribadiscono da tempo la volontà di indirizzare il mercato automobilistico verso vetture meno inquinanti, tuttavia non è ancora chiaro quali tipologie di propulsioni siano più ecocompatibili. Questo studio di cerca di chiarire, basandosi sull'analisi del ciclo di vita dell'auto in contesto italiano, quali tra le vetture commercialmente disponibili (benzina, diesel, GPL, metano, elettriche ed ibride) abbia l'impatto minore dal punto di vista ambientale.

Sommario

PRIMA PARTE: Il problema dell'inquinamento ed il ruolo delle automobili	5
1.1 Introduzione.....	6
1.1.1 Inquinamento e cambiamento climatico	6
1.1.2 Le emissioni da trasporto su strada.....	7
1.1.3 La situazione in Italia.....	8
1.1.4 Lo scopo di questa tesi	10
SECONDA PARTE: L'analisi del ciclo di vita	11
2.1 Introduzione.....	12
2.1.1 Normative	12
2.1.2 Vantaggi e svantaggi dell'analisi del ciclo di vita	13
2.2 Classificazione degli impatti ambientali.....	14
2.3 Analisi della letteratura attuale.....	15
2.4 Obiettivi, confini e ipotesi dell'analisi.....	19
TERZA PARTE: Analisi delle fasi e dei fattori di inquinamento	21
3.1 Produzione della vettura (Cradle-to-Gate Analysis)	22
3.1.1 Impatto relativo alla produzione dell'auto	22
3.1.2 Impatto relativo alla produzione delle batterie	24
3.2 Uso della vettura.....	26
3.2.1 La catena dell'energia, dalla fonte alle ruote (Well-to-Wheel).....	26
3.2.2 Emissioni dovute all'interazione tra auto e manto stradale	34
3.2.3 Impatto della manutenzione del veicolo.....	36
3.3 Smaltimento della vettura (End of Life)	40
3.3.1 Il problema delle batterie	40
QUARTA PARTE: Conclusioni dell'analisi del ciclo di vita	43
4.1 Comparazione sull'intero ciclo di vita	44
4.2 Conclusioni.....	49
4.2.1 Riflessioni finali	51
Bibliografia	52

PRIMA PARTE

**Il problema dell'inquinamento
ed il ruolo delle automobili**

1.1 Introduzione

1.1.1 Inquinamento e cambiamento climatico

L'impatto ambientale delle attività umane è, al giorno d'oggi, uno dei temi più dibattuti e popolari sui media. L'inquinamento terrestre, atmosferico e oceanico e le sue ripercussioni sulla salute umana e sugli ecosistemi, sono fra i principali argomenti che, negli ultimi anni, hanno catturato l'attenzione dell'opinione pubblica.

In particolare i temi più in vista e che attualmente hanno rilevanza mondiale sono:

- Il problema della plastica negli oceani
- Il cambiamento climatico

Il cambiamento climatico dovuto al riscaldamento globale è quello che, con ogni probabilità, avrà in futuro le ripercussioni peggiori sulla vita delle persone:

“I cambiamenti climatici interessano tutte le regioni del mondo. Le calotte polari si sciolgono e cresce il livello dei mari. In alcune regioni i fenomeni meteorologici estremi e le precipitazioni sono sempre più diffusi, mentre altre sono colpite da siccità e ondate di calore senza precedenti.

Questi fenomeni dovrebbero intensificarsi nei prossimi decenni.”

Così viene riportato sulla pagina web della Commissione Europea dedicata alle conseguenze del cambiamento climatico. [1]

Il riscaldamento globale avviene per aumento dei cosiddetti gas serra.

Principali gas responsabili dell'effetto serra – fonte: Wikipedia [2]	
Gas Serra	Contributo
Vapore acqueo H ₂ O	36-70%
Anidride carbonica (CO ₂)	9-26%
Metano (CH ₄)	18%

Secondo le ricerche effettuate dall'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) la temperatura media della superficie terrestre, durante il corso del XX secolo, è aumentata di 0.74 ± 0.18 °C [3]. Questo riscaldamento, sempre secondo studi effettuati dall'IPCC, è dovuto quasi al 100% alle attività antropiche.[4] Dell'impatto di queste attività sul cambiamento climatico il 55% è imputabile all'immissione di CO₂ in atmosfera.[5]

Sempre secondo l'IPCC contenere il riscaldamento all'interno di 2°C permetterebbe di limitare le conseguenze.[6] Ridurre l'immissione di CO₂ in atmosfera sarebbe quindi una pratica necessaria al raggiungimento di questo obiettivo.

In un'ottica di controllo e riduzione degli agenti climalteranti e degli inquinanti in genere sono nati innumerevoli enti, internazionali come l'IPCC e nazionali come l'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) in Italia. Allo scopo di preservare il pianeta sono stati redatti molti trattati internazionali, quali l'Accordo di Parigi e il Protocollo di Kyoto. In questi trattati i paesi aderenti si sono impegnati a ridurre l'impatto ambientale delle proprie attività entro certi limiti, mediante l'applicazione di normative anti-inquinamento, la riduzione degli sprechi e il progresso tecnologico.

1.1.2 Le emissioni da trasporto su strada

Al giorno d'oggi uno dei più importanti fattori clima-alteranti è il trasporto di beni e persone su strada: secondo gli studi della Commissione Europea, nel 2016 circa il 21% delle emissioni totali di CO₂ in Europa è da attribuire al trasporto su strada. Inoltre, circa il 15% delle emissioni totali è imputabile ai veicoli leggeri, ovvero auto e furgoni.[7]

Per contrastare sia l'inquinamento che le emissioni di CO₂, negli anni sono state varate normative progressivamente più stringenti: a partire dall'euro 1 nel 1993, fino all'euro 6d che entrerà in vigore nel 2021. Queste normative sono state accompagnate da cicli e procedure di omologazione via via più aderenti all'utilizzo reale.

EU Emissions Legislation Timeline



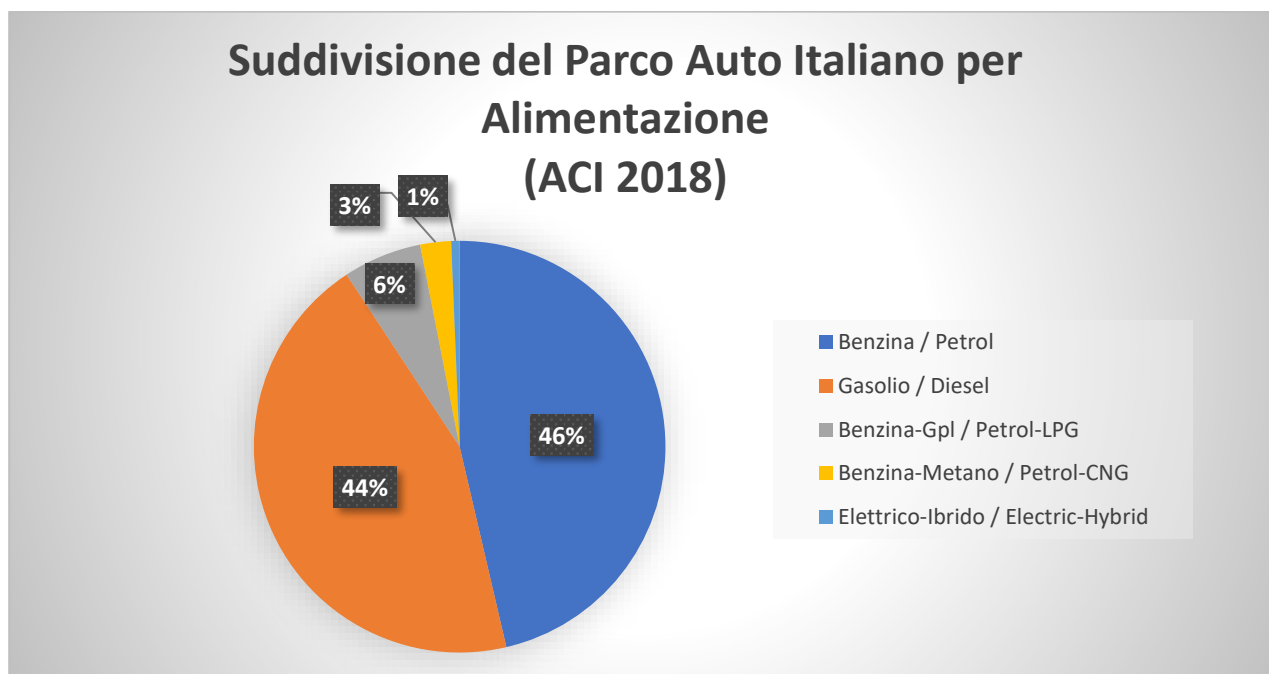
Linea del tempo delle normative europee anti-inquinamento – fonte: HDmotori.it [8]

1.1.3 La situazione in Italia, il parco auto attuale e il trend di mercato

L'Italia è la terza nazione in Europa per emissioni annue di CO₂, dopo Germania e Regno Unito, con 420 milioni di tonnellate circa nel 2017 [9], mentre a livello mondiale occupa la decima posizione.[10]

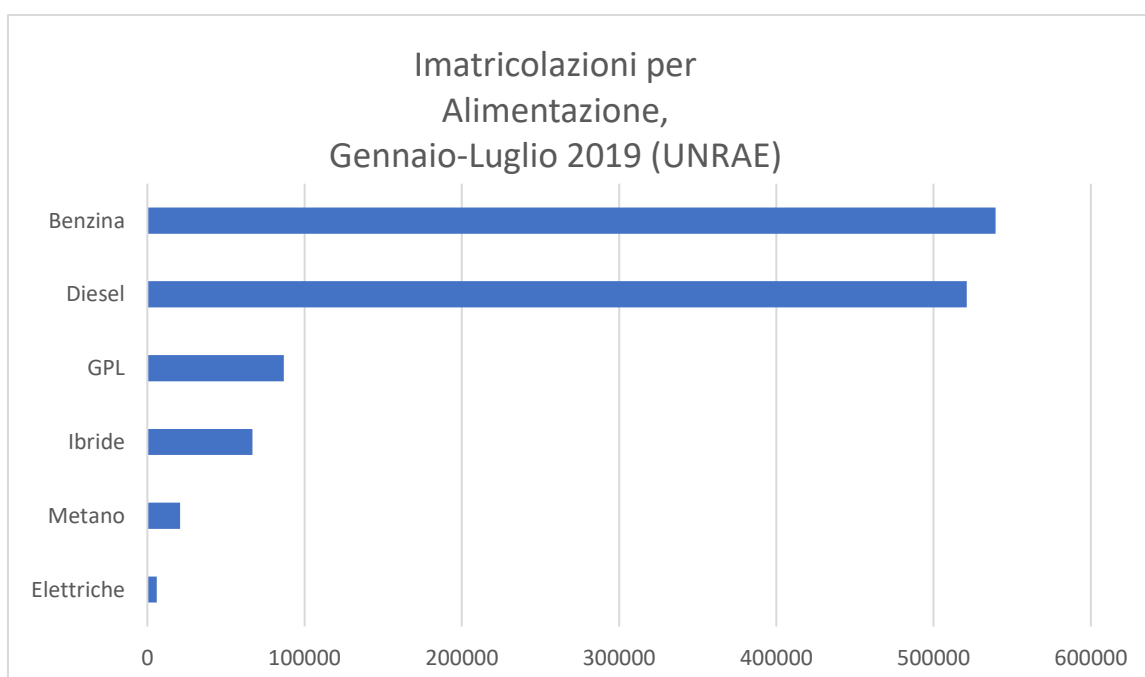
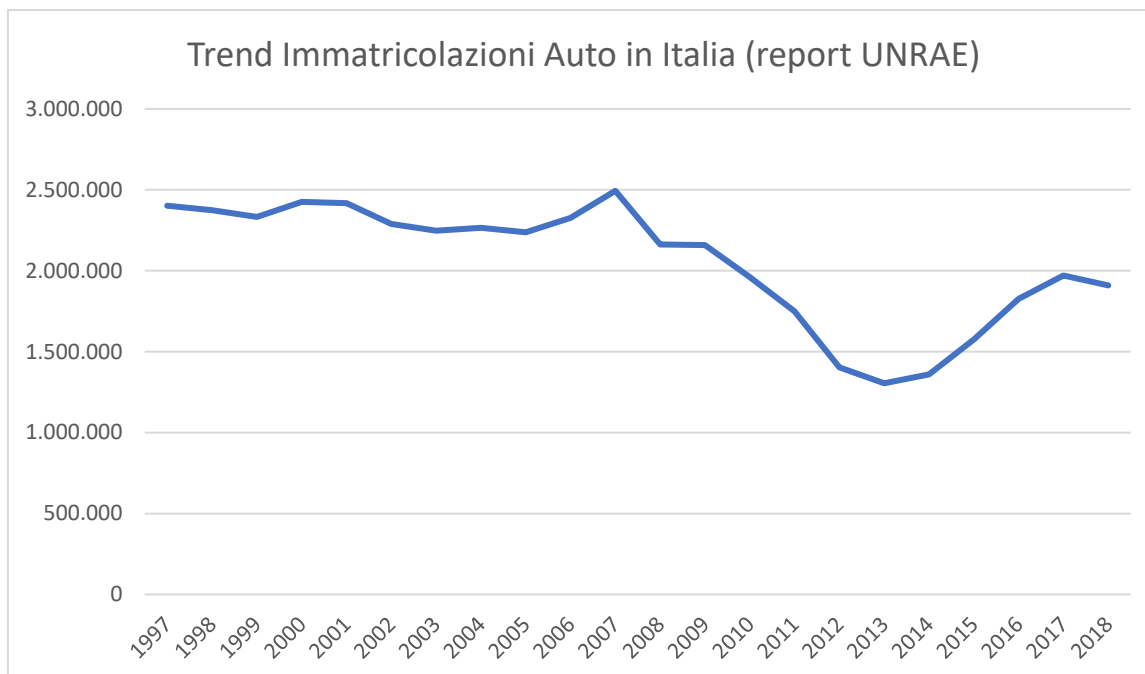
In Italia i trasporti sono responsabili quasi del 25% delle emissioni totali di CO₂ [11], oltre che di migliaia di tonnellate di altri inquinanti (benzene, composti organici volatili, ossidi di azoto, ecc.) come riportato nell'annuario dei dati ambientali sul sito dell'ISPRA.[12] Per certi inquinanti (come il benzene), le automobili sono responsabili di oltre il 50% delle emissioni totali dovute ai trasporti.

In Italia il parco auto attualmente conta circa 39 milioni di automobili (considerando che la popolazione italiana è di circa 61 milioni di persone, significa un'auto ogni 1,56 abitanti), con un'età media di 11 anni (statistiche ACEA 2017). Attualmente il 90% delle automobili sono alimentate con i classici carburanti liquidi, gasolio e benzina, il 9% circa sfrutta i combustibili gassosi, metano e GPL, mentre l'1% delle vetture è elettrico o sfrutta una propulsione ibrida (dati ACI 2018). In media un cittadino italiano percorre circa 11.125 km in auto ogni anno. [13]



Fonte dati: statistiche ACI 2018 [14]

Il trend delle immatricolazioni è calato nel periodo successivo alla crisi del 2008, per riprendersi negli ultimi due anni e assestarsi su circa 2 milioni di vetture nuove ogni anno, nel 2017 e nel 2018. [14][15]



Come riportato nelle statistiche UNRAE sulle immatricolazioni, le nuove vetture viaggiano prevalentemente a benzina e a gasolio, ma le alimentazioni alternative a GAS e elettriche/ibride stanno progressivamente prendendo piede.[16] Questo fenomeno, che si sta manifestando negli ultimi anni, probabilmente è dovuto ai seguenti fattori:

- **Blocchi del traffico:** per ridurre la concentrazione di particolato presente nell'aria in molte città del Nord Italia, negli ultimi anni sono stati istituiti innumerevoli blocchi alla circolazione per le vetture diesel fino all'euro 3 e le vetture benzina euro 0 e 1.
- **Incentivi e tasse:** in una manovra del 2019 sono stati introdotti gli ecobonus per l'acquisto di veicoli "green", la detrazione fiscale per le colonnine elettriche e l'ecotassa su nuove auto inquinanti.[17]

Inoltre, nella diffusione di veicoli elettrici e ibridi non sono trascurabili i fattori di moda e comfort:

- Moda: l'auto elettrica/ibrida è ormai diventato un oggetto di moda, oltre che uno status symbol per le persone che hanno a cuore l'ambiente.
- Comfort: data la silenziosità le auto elettriche ed ibride risultano più confortevoli da guidare. L'assenza di una trasmissione manuale rende inoltre più facile la guida su strade urbane.

Quindi, sia a livello di opinione pubblica che di politiche statali, le auto elettriche ed ibride si pongono come alternative più ecologiche alle automobili con il classico motore a combustione interna. Se ciò si può ritenere generalmente vero dal punto di vista delle emissioni allo scarico, nel momento in cui si considera il veicolo nel suo intero ciclo di vita l'alternativa elettrica/ibrida perde molto (se non tutto) il suo vantaggio ambientale.

La questione non è chiara, perché l'argomento è molto complesso, i fattori in gioco sono molti e variano da nazione a nazione, e spesso i conteggi e le metodologie utilizzate non sono molto trasparenti. Le analisi del ciclo di vita che sono state svolte in Italia sono relativamente poche, molte sono datate e incomplete.

1.1.4 Lo scopo di questa tesi

Lo scopo di questa tesi è quello di cercare di chiarire, mediante un'analisi del ciclo di vita basata sugli studi presenti in letteratura, quale sia l'impatto ambientale delle auto commercialmente disponibili, equipaggiate rispettivamente con motori a combustione interna ed elettrici/ibridi. Il fine ultimo è quello di stabilire, in linea di massima, quali tipologie di auto abbiano l'impatto minore dal punto di vista ambientale e, eventualmente, di fornire spunti per la realizzazione di un parco auto maggiormente ecosostenibile.

SECONDA PARTE
L'analisi del ciclo di vita

2.1 Introduzione all'analisi del ciclo di vita

Ogni oggetto affronta un ciclo di vita, che inizia con la sua produzione, continua con la fase di utilizzo e termina con il suo smaltimento. L'analisi del ciclo di vita (in inglese: "Life-Cycle Assessment", abbreviata in LCA e anche detta "Life-Cycle Analysis" o "Cradle-to-Grave Analysis") è una tecnica usata per quantificare l'impatto ambientale e sulla salute umana di un prodotto, durante tutta la sua vita.

2.1.1 Normative

La International Standards Organization (ISO) ha definito l'analisi del ciclo di vita come:

"Una tecnica utilizzata per valutare le conseguenze ambientali di un determinato prodotto, mediante:

- *La compilazione di un inventario degli input/output più rilevanti del sistema;*
- *La valutazione dei potenziali impatti ambientali, associati a questi input/output;*
- *L'interpretazione dei risultati delle fasi di analisi dell'inventario e degli impatti ambientali, in relazione agli obiettivi dello studio."* (ISO 14.040).

La procedura da seguire in un'analisi del ciclo di vita è descritta nelle norme ISO 14040 e ISO 14044. Le fasi principali sono:

1. Definizione di Obiettivi e Contesto, incluse l'unità funzionale su cui è condotto lo studio e i confini dell'analisi.
2. Analisi dell'Inventario, creando una lista dei materiali richiesti e dell'energia utilizzata per ogni parte considerata del ciclo di vita (cioè creando un modello del ciclo di vita), includendo anche le emissioni risultanti in aria, acqua e terra.
3. Valutazione dell'Impatto, raggruppando le tipologie di emissioni in categorie (esempio: cumulare i contributi dei vari gas serra nel bilancio del potenziale riscaldamento globale).
4. Interpretazione, per verificare i risultati, raffinare l'analisi e identificare i concetti più importanti da comunicare al pubblico destinatario dello studio.



Dal 2011 ad oggi sono state pubblicate altre linee guida per gli studi eseguiti sul settore automobilistico. Ad esempio, nell'ambito del progetto europeo eLCAr è stata redatta una

guida estensiva sull'argomento e pubblicato del materiale di formazione per chi conduce questi studi.[18] L'ISO 14025 invece regolamenta le Dichiarazioni Ambientali di Prodotto (EPD). Una EPD è una dichiarazione ambientale certificata che fornisce dati ambientali sul ciclo di vita dei prodotti.[19]

Altri standard per l'impatto ambientale comprendono: Carbon Footprint - ISO/TS 14067 o BSi PAS 2050, Water Footprint - ISO 14046, Footprint Reporting - ISO 14026.

2.1.2 Vantaggi e Svantaggi dell'Analisi del Ciclo di Vita

L'Analisi del Ciclo di Vita è un metodo strutturato che permette di gestire una grande quantità di dati complessi. Permette di realizzare delle comparazioni complete tra le varie opzioni disponibili per un'azienda che vuole realizzare un prodotto con un basso impatto ambientale. Questa metodologia permette di evidenziare quali fasi del ciclo di vita di un prodotto sono più dannose per l'ambiente e gli esseri umani; inoltre è utile per evitare di spostare il problema da una fase del ciclo di vita ad un'altra, oppure da un agente inquinante ad un altro.

Di contro, l'analisi del ciclo di vita può essere molto dispendiosa in termini di tempo e di risorse. Inoltre, l'accuratezza di uno studio del genere può essere limitata dall'accessibilità, dalla disponibilità e dalla qualità dei dati pertinenti. Quando dei dati non sono reperibili è necessario sopperire attraverso delle ipotesi. Si deve inoltre tener conto della soggettività delle scelte fatte in un'analisi del ciclo di vita, sia per quanto riguarda la stesura dell'inventario, che per le ipotesi prese in considerazione. Infine, i risultati degli studi incentrati sulle problematiche globali (es: cambiamento climatico) e regionali (es: acidificazione da NOx) potrebbero non essere applicabili a contesti locali (es: il problema della qualità dell'aria nelle città).

2.2 Classificazione degli impatti ambientali

Da un'analisi bibliografica dei danni ambientali dovuti alla produzione e all'utilizzo delle autovetture, si sono evidenziati i seguenti fattori di emissione:

Potenziale Di Riscaldamento Globale (Global Warming Potential – GWP): racchiude tutte le emissioni dei cosiddetti “gas serra”. Sono gas che aumentano l'assorbimento da parte dell'atmosfera della radiazione solare, incrementando la quantità trattenuta di calore e di conseguenza anche la temperatura globale media. Il gas preso come riferimento è la CO₂, mentre tutte le altre sostanze che impattano su questo processo (esempio: CH₄, N₂O, CFC) sono misurati in termini di CO₂ equivalente (CO₂e).

Potenziale di Acidificazione (Acidification Potential – AP): descrive l'emissione di sostanze come NO_x e SO₂, che hanno conseguenze su suolo, acqua, ecosistema, organismi biologici e materiali (es: edifici). Un esempio delle conseguenze di queste emissioni sono le piogge acide. La sostanza di riferimento è l'SO₂ e tutte le altre sostanze acidificanti (esempio: NO_x e NH₃) sono misurate in termini di SO₂ equivalente (SO₂e).

Potenziale di Eutrofizzazione (Eutrophication Potential – EP): si riferisce all'eccessiva immissione di nutrienti in acqua o nel terreno, con conseguente variazione nella composizione di flora e fauna. Un effetto secondario dell'eccessiva fertilizzazione dell'acqua è il consumo di ossigeno fino a livelli di concentrazione critici. La sostanza di riferimento è l'ortofosfato (PO₄), mentre le altre sostanze di impatto in questo processo (come NO_x e NH₃) sono misurate in termini di fosfato equivalente (PO₄e).

Potenziale di Formazione di Ozono Fotochimico (Photochemical Ozone Creation Potential – POCP): si riferisce alla formazione di foto-ossidanti, come l'ozono, il perossiacetilnitrato (PAN) ed il perossibenzoilnitrato (PBN). Queste sostanze vanno a comporre il cosiddetto “smog fotochimico” e sono dannose per la salute umana, per gli animali, per le piante e anche per diversi materiali a causa del loro forte potere ossidante. La sostanza di riferimento è l'etilene, mentre tutte le altre sostanze che impattano su questo processo (es: Composti Organici Volatili – VOC, NO_x e CO) sono misurati in termini di etilene equivalente.

Sospensione in Aria di Particolato Sottile (Particulate Matter – PM): racchiude l'insieme delle sostanze sospese in aria sotto forma di aerosol atmosferico. Si dividono per dimensione: PM₁₀ e PM_{2,5} sono le polveri in sospensione aventi diametro aerodinamico medio inferiore, rispettivamente a 10µm e 2,5µm. Oltre ad avere ripercussioni su flora, fauna e materiali, il particolato sottile produce effetti sulla salute umana [20] sia a breve (fenomeni acuti) che a lungo termine (fenomeni cronici). L'emissione di particolato sottile generalmente si misura in massa (unità di misura: milligrammi).

2.3 Analisi della letteratura attuale

Nella tabella sottostante sono stati riportate le analisi del ciclo di vita più rilevanti, eseguite negli ultimi 10 anni. Sono stati esclusi da questa prima analisi tutti gli studi che non sono comparativi e che si concentrano solo su una fase del ciclo di vita della vettura (costruzione, utilizzo o smaltimento).

Studio	Luogo di riferimento	Conclusioni	Link
FAYÇAL-SIDDIKOU BOUREIMA et al., 2009 - Comparative LCA of electric, hybrid, LPG and gasoline cars in Belgian context	Belgio	Le auto elettriche si comportano meglio delle altre tipologie di vetture sia dal punto di vista delle emissioni di CO ₂ , che dell'impatto sulla salute dell'uomo.	https://pdfs.semanticscholar.org/19d7/74ec3c7614ab4211d080d4e52bf91bf1f6dd.pdf
AGUIRRE K. et al, 2012 - Lifecycle Analysis Comparison of a Battery Electric Vehicle and a Conventional Gasoline Vehicle	California	Le auto elettriche sono più efficienti e meno inquinanti delle auto convenzionali.	https://www.ioes.ucla.edu/wp-content/uploads/ev-vs-gasoline-cars-practicum-final-report.pdf
HONGRUI MA et al., 2012 - A new comparison between the life cycle greenhouse gas emissions of battery electric vehicles and internal combustion vehicles	Regno Unito e California	In un contesto a bassa velocità e basso carico (come in città), considerando il mix energetico inglese, le auto elettriche emettono meno CO ₂ nel ciclo di vita, sia rispetto alle auto a combustione elettrica che alle ibride. Ad alta velocità e carico sono meglio le auto diesel.	https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421512000602
HAWKINS T. R. et al, 2012 - Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles	Unione Europea e USA	Le auto elettriche possono inquinare meno delle auto convenzionali, a patto che l'energia elettrica non venga prodotta dalla combustione di carbone, olio e lignite.	https://online.library.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1530-9290.2012.00532.x
SHARMA R. et al., 2013 - Conventional, hybrid and electric vehicles for Australian driving conditions. Part 2: life cycle CO ₂ -emissions.	Australia	I veicoli ibridi di Classe E emettono meno CO ₂ dei veicoli elettrici e convenzionali. I veicoli elettrici ed ibridi di Classe B invece inquinano di più della controparte a combustibili fossili.	https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X12001611

MESSAGIE M., 2014 - Life Cycle Analysis of the Climate Impact of Electric Vehicles	Unione Europea	Le auto elettriche emettono meno CO2 delle auto convenzionali. L'utilizzo di fonti energetiche rinnovabili riduce drasticamente le emissioni di CO2e.	https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/TE%20-%20draft%20report%20v04.pdf
DANIELIS R., 2015 - Inquinano maggiormente le auto elettriche o le auto convenzionali? Stime recenti, variabili determinanti e suggerimenti di politica dei trasporti	Mondo	Le auto elettriche sono migliori delle auto convenzionali per quanto riguarda i gas serra, circa uguali per quanto riguarda gli inquinanti locali, l'acidificazione e l'esaurimento dei materiali.	https://www.openstarts.units.it/bitstream/10077/12275/1/REPORT_2015%283%29-1%20Daniels.pdf
TAGLIAFERRI C., et al, 2016 - Life cycle assessment of future electric and hybrid vehicles: a cradle-to-grave systems engineering approach	Unione Europea	Le auto elettriche emettono meno gas serra, ma causano una maggiore acidificazione. Il mix energetico ed il riciclo delle batterie sono fattori preponderanti nell'analisi.	http://discoversy.ucl.ac.uk/1503806/1/Tagliaferri%20Life%20cycle%20assessment%20of%20future%20electric%20and%20hybrid%20vehicles.pdf
ELLINGSEN L., et al., 2016 - The size and range effect: lifecycle greenhouse gas emissions of electric vehicles	Mondo	A parità di segmento, le auto elettriche emettono meno CO2 delle auto diesel. La dimensione della batteria ed il peso della vettura sono i fattori che più influenzano le emissioni di CO2 delle auto elettriche.	https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/11/5/054010
QINYU QIAO et al., 2017 - Cradle-to-gate greenhouse gas emissions of battery electric and internal combustion engine vehicles in China.	Cina	Le auto elettriche emettono il 50% di gas serra in più rispetto alle auto con motore a combustione interna.	https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917305433
DANIELIS R., 2017 - Le emissioni di CO2 delle auto elettriche e delle auto con motore a combustione interna. Un confronto per l'Italia tramite l'analisi del ciclo di vita	Italia	Le auto elettriche emettono complessivamente meno CO2 di auto diesel, a benzina ed ibride.	http://www.sietitalia.org/wpsiet/Daniels%20-%20WPSIET%202017.pdf

FONTANA F., 2018 - Veicoli Elettrici Inquinano Meno? Un'analisi Comparativa Basata Sulla Metodologia LCA	Mondo	Le auto elettriche sono un valido strumento di riduzione delle emissioni, ma solo se accompagnate da una produzione energetica rinnovabile/sostenibile.	http://tesi.cab.unipd.it/62311/1/Fontana_Francesco.pdf
DEL PERO F. et al., 2018 - Life Cycle Assessment in the automotive sector: a comparative case study of Internal Combustion Engine (ICE) and electric car	Unione Europea	Le auto elettriche permettono una forte riduzione delle emissioni di CO2 complessive.	https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321618301690
BURCHART-KOROLA D. et al., 2018 - Environmental life cycle assessment of electric vehicles in Poland and the Czech Republic	Polonia e Repubblica Ceca	I veicoli elettrici si comportano meglio dei veicoli a combustione interna per quanto riguarda le emissioni di CO2 e l'esaurimento dei combustibili fossili, mentre si comportano peggio per quanto riguarda l'eutrofizzazione delle acque dolci, l'acidificazione, la tossicità umana ed il particolato sottile.	https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618325009
LIDIANE LA PICIRELLIDE SOUZA et al., 2018 - Comparative environmental life cycle assessment of conventional vehicles with different fuel options, plug- in hybrid and electric vehicles for a sustainable transportation system in Brazil	Brasile	Le auto elettriche sono i veicoli con le minori ripercussioni sull'ambiente.	https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965261832585X
GIRARDI P. et al., 2018 - Auto elettriche e auto tradizionali: un confronto basato sul ciclo di vita dalla city-car due posti al SUV	Unione Europea	Le auto elettriche sono meglio dei veicoli convenzionali per quanto riguarda le emissioni di gas serra, la formazione di particolato, l'acidificazione e lo smog fotochimico. Sono peggiori per quanto riguarda l'eutrofizzazione delle acque e la tossicità umana.	https://emob-italia.it/wp-content/uploads/2019/02/Energia-Elettrica-GIRARDI-STAMPA.pdf

Come si può notare, la maggior parte di questi studi arriva alle stesse conclusioni:

- Le auto elettriche in genere sono migliori delle auto convenzionali per quanto riguarda le emissioni in atmosfera di gas serra, sostanze acidificanti, particolato solido e sostanze fotochimiche, mentre sono peggiori per quanto riguarda la tossicità umana e l'eutrofizzazione delle acque dolci.
- L'aspetto che più penalizza le auto elettriche è la costruzione e lo smaltimento delle batterie al litio. Questo perché la costruzione richiede grandi quantità di energia e materiali rari/preziati, mentre lo smaltimento, se eseguito approssimativamente, immette nell'ambiente innumerevoli sostanze tossiche per l'uomo.
- Limitare il peso del veicolo e la dimensione delle batterie (per il motivo sopra citato) è fondamentale per limitare l'impatto ambientale delle auto elettriche.
- Il massimo vantaggio nell'utilizzo di un'auto elettrica si ha in un contesto cittadino, a bassa velocità e carico limitato.

Osservazioni:

- La maggior parte degli studi è stata eseguita prendendo come riferimento gli stati aderenti all'Unione Europea. Se quindi le conclusioni tratte si possono ritenere generalmente valide in tutto il continente europeo, a causa dei differenti mix energetici e delle procedure di smaltimento delle vetture, non è detto che ciò valga per tutte le singole nazioni (Italia compresa).
- In alcuni degli studi sopra riportati non è molto chiara né l'entità né l'origine dei dati presi in considerazione. Inoltre, molti di questi studi iniziano ad essere datati.

2.4 Obbiettivi, confini e ipotesi dell'analisi

L'obiettivo di questo studio è realizzare un'analisi del ciclo di vita delle auto, per l'Italia, prendendo in considerazione le varie tipologie di vetture attualmente disponibili.

Si prenderanno in considerazione **differenti segmenti** di autovetture:

- Segmento A: minicar e citycar
- Segmento B: utilitarie
- Segmento C: berline a due e tre volumi
- Segmento D: berline di dimensioni medio-grandi, inclusi SUV e fuoristrada

ed equipaggiate con **diversi motopropulsori**:

- Motore a combustione interna a gasolio, benzina, benzina-GPL e benzina-metano
- Motore ibrido benzina-elettrico e diesel-elettrico
- Motore elettrico

Si considereranno gli impatti ambientali delle autovetture in tutte le fasi della loro vita (costruzione, utilizzo e smaltimento). Per ogni fase si descriveranno gli input e gli output più rilevanti in termini di impatto ambientale. Si anticipa già che non tutte le categorie di impatto, descritte precedentemente, verranno considerate per ogni fase e per ogni input, a causa dell'irreperibilità dei dati.

Per quanto riguarda la **fase di costruzione** si faranno stime generiche, in quanto le auto immatricolate in Italia vengono prodotte sia all'interno che all'esterno del continente europeo, e dovendo sottostare a differenti normative ambientali, generano impatti differenti. Ci si focalizzerà quindi sul legame tra dimensione/segmento della vettura ed impatto ambientale in fase di produzione.

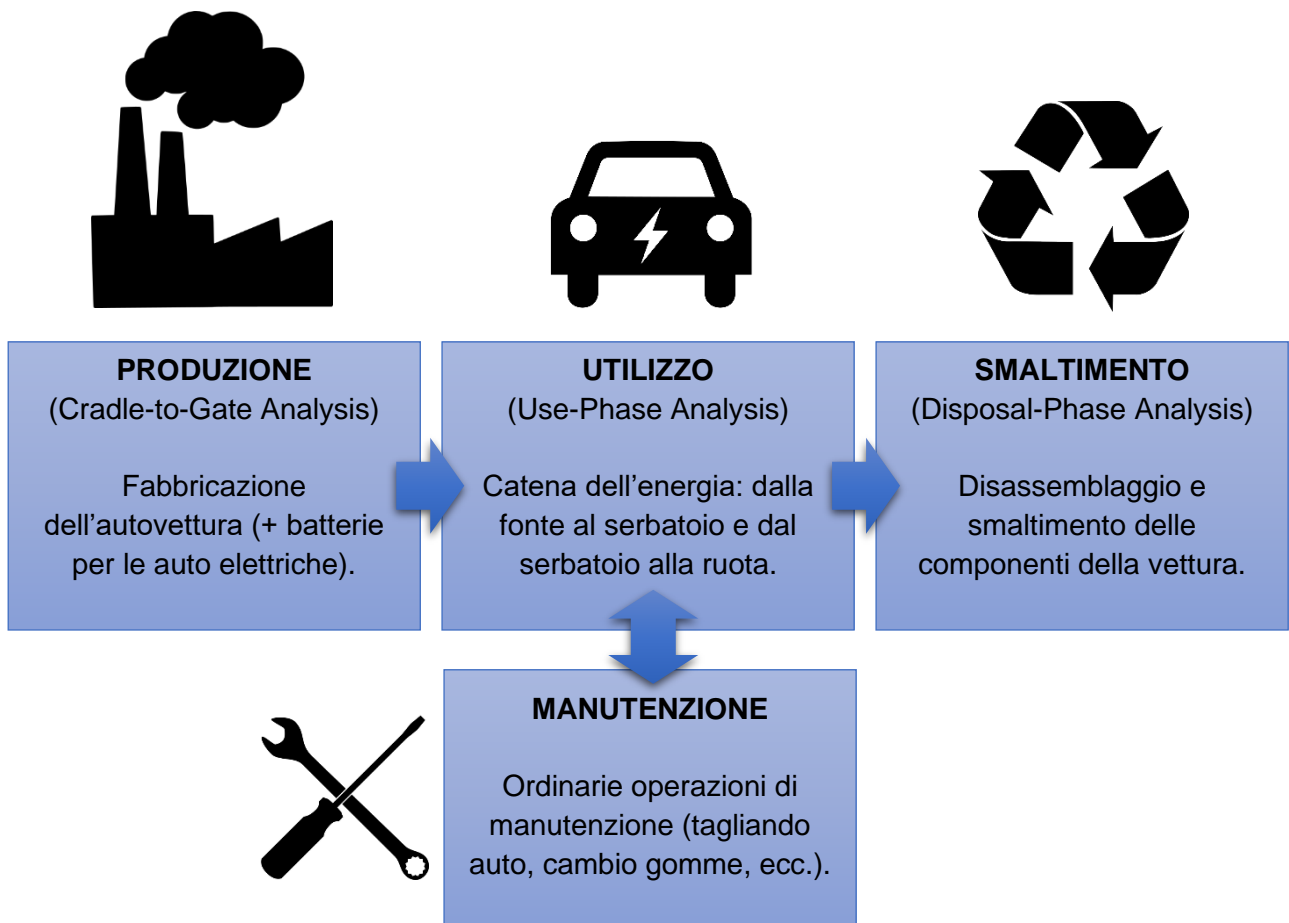
La **fase di utilizzo** invece è analizzata all'interno del contesto italiano. Allo scopo di stabilire una volta per tutte il vantaggio nell'utilizzo delle auto elettriche in termini di emissioni di CO₂, si procederà come segue:

- Per le auto con motore a combustione interna si considererà il consumo di carburante e partendo da esso si stimeranno le emissioni di CO₂.
- Per le auto elettriche si considereranno i consumi di energia elettrica dichiarati sul sito ev-database.org.
- Per le auto ibride, allo scopo di semplificare le stime, si considererà il consumo di carburante in condizioni di batteria scarica (ovvero senza una carica preliminare).

Inoltre, si prenderanno in considerazione anche i flussi di materiali dovuti alla manutenzione della vettura.

La **fase di smaltimento** sarà anch'essa contestualizzata con i dati italiani attualmente disponibili.

Nella figura sottostante sono state riassunte le fasi del ciclo di vita che verranno prese in analisi.



Ognuna di queste fasi verrà analizzata il più dettagliatamente possibile nella prossima parte dell'elaborato, mettendo in evidenza la differenza tra auto convenzionali ed elettriche/ibride.

TERZA PARTE
Analisi delle fasi e dei fattori di inquinamento

3.1 Produzione della vettura (Cradle-to-Gate Analysis)

Dall'analisi della letteratura attualmente disponibile risulta che la fase di produzione della vettura ha un impatto considerevole sull'ambiente. Secondo uno studio bibliografico condotto dalla Low Carbon Vehicle Partnership [21], la produzione delle auto convenzionali è responsabile dal 10 al 30% delle emissioni totali di gas serra, mentre la produzione delle auto elettriche dal 20 al 95% (in base al mix energetico di riferimento). Sempre secondo questo studio, per un'auto di media grandezza, in fase di produzione si emettono 5-8t di CO_{2e} per le auto a combustione interna, e 6-16t di CO_{2e} per le auto elettriche (in base alla dimensione del pacco batterie).

3.1.1 Impatto relativo alla produzione dell'auto (escluse le batterie)

Dallo studio della letteratura risulta marginale la differenza di emissioni in fase di produzione di tutte le tipologie di autovetture.

In una [domanda su Quora](#) [22], vari esperti han messo in evidenza come la fase costruttiva (escludendo le batterie) ha lo stesso impatto per tutte le tipologie di vetture (tradizionali, elettriche ed ibride), che l'entità di questo impatto dipende solo dal segmento di appartenenza della vettura e che cresce proporzionalmente con la dimensione e la lussuosità del veicolo.

Quindi possiamo ipotizzare che la fase di costruzione abbia lo stesso impatto per tutte le tipologie di propulsori, a parità di auto.

Per identificare l'entità e la tipologia dell'impatto sono stati analizzati i seguenti studi:

Studio	Auto in analisi	Conclusione
ADEME (agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie), 2010 - Guide des facteurs d'émissions	Non specificata	In fase di produzione, si stima l'immissione in atmosfera di 5.5t di CO _{2e} per t di veicolo
Mike Berners-Lee, 2010 - How Bad Are Bananas? The carbon footprint of everything	Citroen C1 in allestimento base, Ford Mondeo in allestimento medio, Land Rover Discovery in allestimento top	La produzione delle auto analizzate comporta l'emissione rispettivamente di 6, 17 e 35t di CO _{2e}
Ricardo, 2018 - Report for LowCVP on Lifecycle Emissions from Cars	Auto familiare media	Emesse 5.6t di CO _{2e} in fase di produzione

ACEA, 2018 - Environmental impact of car production strongly reduced over last decade	Media delle auto prodotte in Europa	In media per ogni auto si immettono in atmosfera 0.6t di CO ₂ e e 2,4kg di VOC
DEL PERO F. et al., 2018 - Life Cycle Assessment in the automotive sector: a comparative case study of Internal Combustion Engine (ICE) and electric car	Auto familiare media (modello virtuale del progetto europeo SuperLightCar)	Per un'auto familiare media, in fase di produzione si emettono circa 5t di CO ₂

Su tutti i dati analizzati le stime dell'ACEA sono sicuramente le più ottimistiche. Il dato sulle emissioni di CO₂ dello studio di Del Pero et al. del 2018 (circa 5t di CO₂ per ogni vettura prodotta) viene confermato dai precedenti studi del 2010 (Ricardo e ADEME, rispettivamente 5,6 e 5,5t per ogni autovettura prodotta). Questa differenza di 0,5t CO₂e è spiegabile, oltre che per le diverse metodologie utilizzate, anche dal crescente sforzo degli impianti di produzione di ridurre i consumi energetici. Prenderemo quindi come validi gli impatti e le relative entità fornite dallo studio di Del Pero.

DEL PERO et al., 2018 – Impatto ambientale della produzione di un'auto familiare (segmento C)		
Tipologia di Impatto	Unità di misura	Entità dell'impatto
Cambiamento climatico	t CO ₂ eq	4.973
Acidificazione	mol H+ eq	42.2
Tossicità umana	CTUh	0.00481
Particolato solido	kg PM2.5 eq	3.01
Formazione Ozono fotochimico	kg NMVOC	14.9
Esaurimento delle risorse	Kg Sb eq	2.18

I dati dello studio di Del Pero sono però relativi alle sole auto del segmento C, la cui massa a vuoto è mediamente di 1300kg. Nell'eventualità in cui si volessero eseguire delle stime per auto di segmenti differenti, con pesi differenti, si potrebbe ipotizzare una proporzionalità diretta tra il peso della vettura e l'emissione di inquinanti.

3.1.2 Impatto relativo alla produzione delle batterie

Per determinare l'impatto della produzione del pacco batterie di un'auto elettrica (o ibrida), sono stati analizzati i seguenti studi:

Studio analizzato	Batteria di riferimento	Considerazioni tratte
HAWKINS et al, 2011 - Life Cycle Environmental Assessment of Lithium-Ion and Nickel MetalHydride Batteries for Plug-In Hybrid and Battery Electric Vehicles	Batterie agli ioni di litio e NIMH	Studio molto interessante, riporta tutte le categorie di impatto per le due tipologie di batterie al litio, Li-NCM e Li-LFP (che risultano avere impatti simili). In media vengono emessi circa 230kg CO ₂ e/kWh batteria.
EPA, 2012 - Lithium-ion Batteries and Nanotechnology for Electric Vehicles: A Life Cycle Assessment	Batteria agli ioni di litio.	Le stime molto ottimistiche (112kg CO ₂ e / kWh batteria) e gli indici di impatto utilizzati non sono compatibili con quelli di questa tesi.
Ellingsen et al., 2014 - Life Cycle Assessment of a Lithium-Ion Battery Vehicle Pack	Batteria Li-NCM da 26,6kWh, 253kg	Valori di impatto molto più alti degli altri studi analizzati. (487kg CO ₂ e / kWh batteria).
Hyung Chul Kim et al., 2016 - Cradle-to-Gate Emissions from a Commercial Electric Vehicle Li-Ion Battery: A Comparative Analysis	Batteria Li-NCM da 23kWh, 430 celle, 300kg (produttore: LG Chem) della Ford Focus elettrica pre-2017	La produzione della batteria comporta l'emissione di 3,4t di CO ₂ e (140kg CO ₂ e/kWh batteria).

Si è deciso di considerare i dati dell'analisi più recente attualmente disponibile, eseguito nel 2016 sulla batteria Li-NCM da 23kWh della Ford Focus elettrica.

Functional unit	1 kWh battery						1 kg battery					
	GHG (kg CO ₂ -eq.)	VOC (g)	CO (g)	NO _x (g)	PM (g)	SO _x (g)	GHG (kg CO ₂ -eq.)	VOC (g)	CO (g)	NO _x (g)	PM (g)	SO _x (g)
Cell materials	27	43	102	96	62	845	2.2	3.4	8.2	7.7	4.9	67.6
Cell manufacturing	63	10	17	182	12	185	5.0	0.8	1.3	14.6	1.0	14.8
Enclosure	25	24	185	57	80	86	2.0	1.9	14.8	4.5	6.4	6.8
Thermal Management	5.9	1.5	39	11	11	22	0.5	0.1	3.2	0.9	0.9	1.7
Electrical System	0.5	1.2	2.1	5.9	6.0	27	0.04	0.1	0.2	0.5	0.5	2.2
BMS	13	1.6	5.3	15	5.0	25	1.0	0.1	0.4	1.2	0.4	2.0
Pack manufacturing	1.7	0.2	0.7	3.2	1.5	8.8	0.1	0.02	0.1	0.3	0.1	0.7
Transportation	4.1	6.5	9.2	34	3.3	18	0.3	0.5	0.7	2.7	0.3	1.5
Total	141	87	360	404	181	1282	11.3	7.0	28.8	32.3	14.5	97.4

Fonte: Hyung Chul Kim et al., 2016 - Cradle-to-Gate Emissions from a Commercial Electric Vehicle Li-Ion Battery: A Comparative Analysis [23]

Hyung Chul Kim et al., 2016 [23]			
Tipologia di impatto	Unità di misura	1 kWh di batteria	1kg di batteria
Cambiamento climatico	Kg CO ₂ eq	141	11.3
VOC	g	87	7.0
CO	g	360	28.8
NO _x	g	404	32.3
PM	g	181	14.5
SO _x	g	1282	97.4

Tra i due fattori di emissione possiamo scegliere per le varie categorie di inquinati (kg e kWh di batteria) la più indicata nell'esecuzione di stime per casi reali, che dovrebbe essere quella espressa in termini di kilogrammi di batteria. Questo perché, nel corso degli anni, la densità energetica (e quindi i kWh immagazzinati a parità di massa di materiale utilizzato) è andata crescendo, grazie al progresso tecnologico. Quindi i kWh non sono fedeli alle dimensioni in massa della batteria (e quindi alla quantità di materiale lavorato) e sono un indicatore più approssimativo dell'entità di impatto ambientale relativo ad una batteria. Tuttavia, considerando che l'ottenimento di maggiore densità energetica comporta sicuramente processi tecnologici più dispendiosi in termini di energia, è possibile ipotizzare una certa indifferenza nell'utilizzo di un fattore di emissione rispetto all'altro.

3.2 Uso della vettura

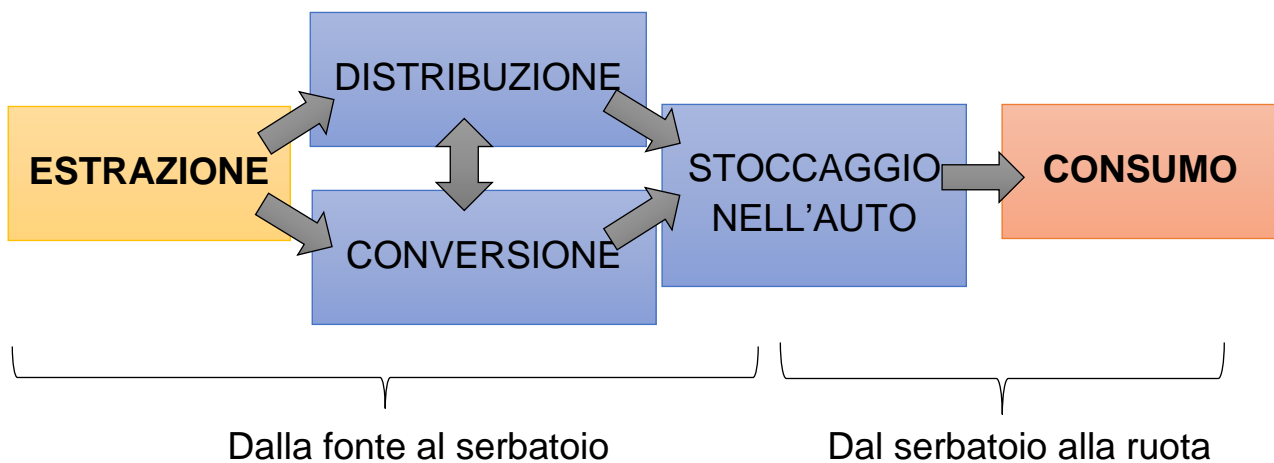
Durante la fase di utilizzo della vettura si possono individuare tre diverse cause di inquinamento:

1. Le emissioni dovute al consumo di risorse per la movimentazione del veicolo (combustibile/elettricità).
2. Le emissioni dovute all'usura di freni e pneumatici, e all'interazione tra auto e asfalto.
3. La manutenzione del veicolo.

In questa sezione andremo ad analizzare ognuna di queste tre fasi.

3.2.1 La catena dell'energia, dalla fonte alle ruote (Well-to-Wheel)

Nel considerare l'impatto ambientale del consumo di risorse (combustibile/elettricità) per la propulsione dell'automobile non basta considerare le emissioni allo scarico (tra l'altro non presente nelle auto elettriche), ma bisogna ripercorrere tutta la catena dell'energia dall'estrazione, alla conversione/trasformazione fino all'utilizzo sia dei combustibili fossili (per le auto tradizionali), che dell'elettricità (per le auto elettriche).



Dalla fonte al serbatoio (Well-to-Tank)

Per questa fase della catena dell'energia, a causa della complessità del sistema e della mancanza di dati sperimentali, è possibile reperire unicamente il fattore di impatto ambientale relativo alle emissioni di CO₂ equivalenti.

Combustibili fossili

Il Join Research Centre (JRC) europeo ha eseguito uno studio nel 2014 sulle emissioni di CO₂ derivate dall'estrazione, conversione e trasporto dei combustibili fino in Europa.

Si riporta di seguito I risultati dell'analisi:

JRC Eucar Concawe, 2014 - WELL-TO-TANK Report version 4.a: JEC WELL-TO-WHEELS ANALYSIS [24]		
Carburante	Emissioni di CO₂ (g CO₂e / MJ carburante)	Energia consumata (MJ / MJ carburante finale)
Benzina	13	0.18
Diesel	15	0.20
Gas Naturale	14	0.16
GPL	8	0.12

Come si può notare il GPL è il combustibile che, nel suo percorso dall'estrazione fino al serbatoio, è responsabile dell'emissione della minor quantità di CO₂e. Seguono la benzina, il gas naturale e il diesel.

Per conteggiare queste emissioni nell'impatto di ogni kilometro percorso dall'autovettura è necessario convertirle in g CO₂e / MJ.

Carburante	Emissioni (g CO₂e / MJ)	Densità energetica	Emissioni per unità di carburante consumata.
Benzina	13	34.6 MJ/L	450 g/L
Diesel	15	42.3 MJ/L	635 g/L
Gas Naturale	14	53.6 MJ/kg	750 g/kg
GPL	8	25,3 MJ/L	202 g/L

Consideriamo trascurabili le emissioni dovute al rifornimento della vettura (consumo energetico del distributore, emissione in atmosfera di particelle di benzina, gasolio e gas), in quanto, teoricamente, dovrebbero essere molto contenuti come impatto.

Energia elettrica

Il mix energetico italiano, ed il relativo impatto ambientale, è stato ampiamente descritto in un report del 2019 dell'ISPRA.[25] Secondo questa ricerca nel 2018 in Italia sono stati consumati 302,6 TWh di energia elettrica, con 19,3 TWh di elettricità andati sprecati per le perdite di rete e 10.4 TWh utilizzati nei servizi ausiliari (si parla di circa 0.09 TWh di perdita ogni 1 TWh consumato al contatore). Nel 2018 la produzione elettrica in Italia era composta dal 38.9% di fonti rinnovabili ed il restante da centrali termoelettriche a gas, carbone e altri

combustibili fossili. Sempre secondo questo studio, nel 2017 per ogni kWh di energia elettrica consumata sono stati emessi 308g di CO₂ in atmosfera. Moltiplicando questo fattore di impatto per 1.09 si ottengono circa **336 gCO₂/kWh**, ovvero l'impatto totale della produzione e del pompaggio di 1 kWh di energia elettrica fino al contatore di casa.

Tuttavia, l'ammontare di energia elettrica che arriva al contatore non corrisponde esattamente a quella che viene immagazzinata nella batteria di un'auto elettrica. La ricarica della batteria avviene attraverso un dispositivo dedicato, che sfrutta la corrente alternata a 230v disponibile alle prese elettriche delle abitazioni italiane, convertendola in corrente continua alla tensione di 36 o 48v delle batterie. Il processo di ricarica va incontro a delle perdite e solo l'85% dell'energia impiegata viene effettivamente immagazzinato nella batteria.[26] Ciò significa che per immagazzinare 1 kWh di elettricità sono necessari $1 + 15/85 = 1,18$ kWh di energia elettrica.

In conclusione, per ogni kWh trasferito nella batteria di un'auto elettrica vengono emessi nell'atmosfera circa:

$$336 \text{ g CO}_2\text{e} / \text{kWh consumato} * 1.18 \text{ kWh consumato} / \text{kWh ricaricato} =$$

396 g CO₂e / kWh ricaricato

Per quanto riguarda le emissioni inquinanti (ovvero diverse dalla CO₂) non sono direttamente disponibili i fattori di emissione per unità di energia elettrica prodotta, ma solo il dato totale delle emissioni per la produzione di energia elettrica e calore (Settore 1A1a). I dati più recenti disponibili si riferiscono al 2016, ma in quanto a mix energetico (tra fonti fossili e rinnovabili) la composizione è paragonabile al 2018 e così anche le emissioni. Nella tabella sottostante sono stati estrapolati i dati relativi a NOx, NMVOC, NH₃ e particolato (tuttavia, sono disponibili anche i dati di emissioni per metalli pesanti e altri inquinanti):

Public electricity and heat production (Sector 1A1a) – Fonte: ISPRA [27]							
	NOx	SOx	NMVOC	NH ₃	PM2.5	PM10	TSP
Total emissions (kt)	32.33	9.41	2.75	0.14	0.39	0.62	0.65

TSP: Total Suspended Particles

Sempre nel report sulle emissioni di CO₂ reso disponibile dall'ISPRA sono disponibili i dati di produzione di energia elettrica lorda e di calore utile (2016: 289.8 e 61 TWh, per un totale di 350.8 TWh di energia prodotta). Essendo 1 TWh = 10⁹ kWh, e 1 kt = 10⁹ g, basta dividere il dato sulle emissioni per il dato sull'energia prodotta, per ottenere il fattore di emissione espresso in grammi su kilowattora, poi moltiplicare questo valore per i fattori di perdita (1,08) e di ricarica (1.18), in modo da ottenere il fattore di emissione per ogni kWh immagazzinato nella batteria dell'auto elettrica:

Inquinante:	NOx	SOx	NMVOC	NH ₃	PM2.5	PM10	TSP
-------------	-----	-----	-------	-----------------	-------	------	-----

Fattore di emissione in fase di produzione (g/kWh)	0,092	0,027	0,0078	0,00041	0,0011	0,0018	0,0019
Fattore di emissione alla batteria (g/kWh)	0,118	0,034	0,010	0,00053	0,0014	0,0023	0,0024

Dal serbatoio alla ruota (Tank-to-Wheel)

Qui di seguito sono riportati i limiti sulle emissioni imposti dalla normativa euro 6. Sebbene siano un punto di partenza nella comprensione dell'entità delle emissioni delle automobili, funzionanti a benzina e gasolio, non hanno una vera corrispondenza con ciò che accade nella realtà. In particolare, le emissioni di NOx sono molto maggiori per le vetture a gasolio, mentre entrambe le tipologie di veicoli emettono una minor quantità di particolato solido rispetto al limite previsto.

Limiti emissioni (g/km)	Benzina	Gasolio
CO	1	0.50
THC	0.10	-
NMTHC	0.068	-
NOx	0.060	0.080 (THC+NOx < 0.170)
PM	0.0045	0.0045

Fonte: [Wikipedia – Euro VI \[28\]](#)

Inoltre l'impatto sul cambiamento climatico non è regolato dalla normativa Euro 6. In questa analisi ci soffermeremo quindi sulle emissioni di NOx, di particolato solido e di CO₂. Soltanto per quest'ultimo fattore di impatto faremo una distinzione per tipologia di segmento.

Emissioni di NOx

I seguenti dati provengono da uno studio che ha analizzato le emissioni reali di oltre 149 vetture euro 5 ed euro 6.

Fonte: O'Driscolla et al. - Real world CO2 and NOx emissions from 149 Euro 5 and 6 diesel, gasoline and hybrid passenger cars [29]		
Valori Medi Emissioni NOx (g/km) (s.d. = deviazione standard)	Benzina (Euro 6)	Diesel (Euro 6)
Città	0.040 (s.d. 0.04)	0.440 (s.d. 0.44)
Strada Extraurbana	0.040 (s.d. 0.06)	0.330 (s.d. 0.36)

% rispetto limiti euro 6		
Città	70%	550%
Strada Extraurbana	70%	410%

Come si può notare, in condizioni di guida reali i motori a gasolio omologati Euro 6 sfiorano i limiti consentiti del 400%. Tuttavia, dal 1° settembre 2019 entra in vigore la normativa Euro 6d-Temp, che impone a tutti i veicoli un test di omologazione in condizioni di guida reali, con un margine superiore del 110% sui limiti teorici di emissione. Ciò significa che un'auto diesel immatricolata in questo periodo (settembre 2019) deve necessariamente emettere meno di 0.168 g/km di NOx.

Sempre nello studio sopra citato, sono stati analizzati 6 veicoli ibridi a benzina (non Plug-In) ed è risultato un fattore medio di emissione di NOx di circa 0.002 g/km.

Emissioni di particolato (PM)

Per quanto riguarda le emissioni di particolato sottile, le auto diesel euro 6 rientrano ampiamente nei limiti imposti dalla relativa normativa con 0,0004 g/km di polveri sottili emesse in un contesto cittadino a basse temperature (caso critico).[30]

Le nuove auto a benzina con tecnologia GDI (Gasoline Direct Injection) possono emettere fino a 10 volte la quantità di PM emesso dalle nuove auto diesel (quindi 0.004 g/km) e 1000 volte la quantità di PM emesso dalle auto benzina non GDI. Ciò avviene a causa dell'iniezione diretta che non garantisce un miscelamento omogeneo di aria e combustibile e a causa delle maggiori pressioni che vengono raggiunte in camera di combustione. È però possibile ridurre le emissioni di particolato sotto 0.001 g/km (valore che prenderemo come riferimento) attraverso il montaggio di un filtro antiparticolato. [31]

Ricapitolando:

Emissioni (g/km)	Benzina (Euro 6)	Diesel (Euro 6)
NOx	0.040	0.168
PM	0.001	0.0004

Si possono riscontrare valori ancora inferiori per quanto riguarda le alternative a diesel e benzina:

- Auto bi-fuel a metano (Gas Naturale): la combustione del metano produce una minore quantità di sostanze fotochimiche, particolato solido e NOx, in quanto presenta caratteristiche di accensione e combustione migliori della benzina. [32]
- Auto bi-fuel a GPL (Gas Propano Liquido): il GPL è il combustibile "pulito" più diffuso attualmente, la sua combustione produce meno sostanze fotochimiche e composti tossici della benzina, oltre che una minore quantità di particolato solido.[32]
- Auto ibride: l'architettura delle auto ibride, sia a gasolio che a benzina, permette di ridurre di molto le emissioni inquinanti, in quanto il motore endotermico lavora sempre

a condizioni di regime tali che la combustione è più efficiente e produce un minore impatto ambientale.

Emissioni di CO₂

Nel calcolo delle emissioni di CO₂ ipotizziamo che la combustione sia completa/perfetta e che ogni atomo di carbonio si combini con due atomi di idrogeno. Una mole di carbonio (peso: 12g) si combina con due moli di ossigeno (peso: 16x2=32g) per formare una mole di CO₂ (peso: 12+32=48g). Per ogni grammo di carbonio contenuto nel combustibile si originano quindi $44/12=3.67$ g di CO₂.

	Benzina	Diesel	GPL	Metano
Concentrazione di carbonio	0.870	0.862	0.825	0.727
Massa di un litro di carburante (g/L)	750	835	550	-
Massa di carbonio per unità carburante (g/L)	653	720	454	727 g/kg
CO₂ prodotta dalla combustione di un'unità di carburante (g/L)	2397	2642	1666	2668 g/kg

Fonte dati di partenza: ecoscore [33]

Per determinare il fattore di emissione di CO₂ (g/km) di un'autovettura sarà sufficiente moltiplicare la quantità di CO₂ prodotta dalla combustione di un'unità di carburante (g/L) per il consumo di carburante (L/km).

Per stimare il fattore di emissione di CO₂ (g/km) delle auto elettriche basterà, invece, moltiplicare la quantità di CO₂ prodotta per ogni kWh immagazzinato in batteria (calcolato in precedenza) per il consumo della vettura in termini di kWh al kilometro (kWh/km).

Emissioni totali di CO₂, dalla fonte alla ruota (Well-to-Tank)

CARBURANTE:	Benzina (L)	Diesel (L)	GPL (L)	Metano (kg)	Elettricità Immagazzinata (kWh)
Emissioni dovute a produzione e trasporto (gCO ₂ e/unità carburante)	450	635	202	750	396
Emissioni dovute al consumo (gCO ₂ /unità carburante)	2397	2642	1666	2668	
Totale emissioni per unità di carburante (CO₂e/unità carburante)	2847	3277	1868	3418	396

Tipologia:	Benzina	Diesel	GPL	Metano	Elettrica	Ibrida Benzina	Ibrida Diesel
Segmento A	Suzuki Celerio 1.0 68cv	Nissan Micra 1.5 90cv	Opel Karl 1.0 73cv	Volkswagen eco Up! 1.0 68cv	BMW i3 33 kWh	-	-
Consumi nel misto (unità carburante/km)	0.044	0.040	0.058	0.030	0.163		
Impatto sul riscaldamento globale (CO ₂ e/km)	125.2	131.1	108.3	102.5	64.5		
Segmento B	Ford Fiesta 1.0 100cv	Mazda 2 1.5 105cv	Nissan Note 1.2 80cv	Volkswagen Polo 1.0 90cv	Renault Zoe R90 25.9 kWh	Toyota Yaris Hybrid	-
Consumi nel misto (unità carburante/km)	0.050	0.041	0.074	0.041	0.159	0.045	
Impatto sul riscaldamento globale	142.4	134.4	138.2	140.1	63	128.1	

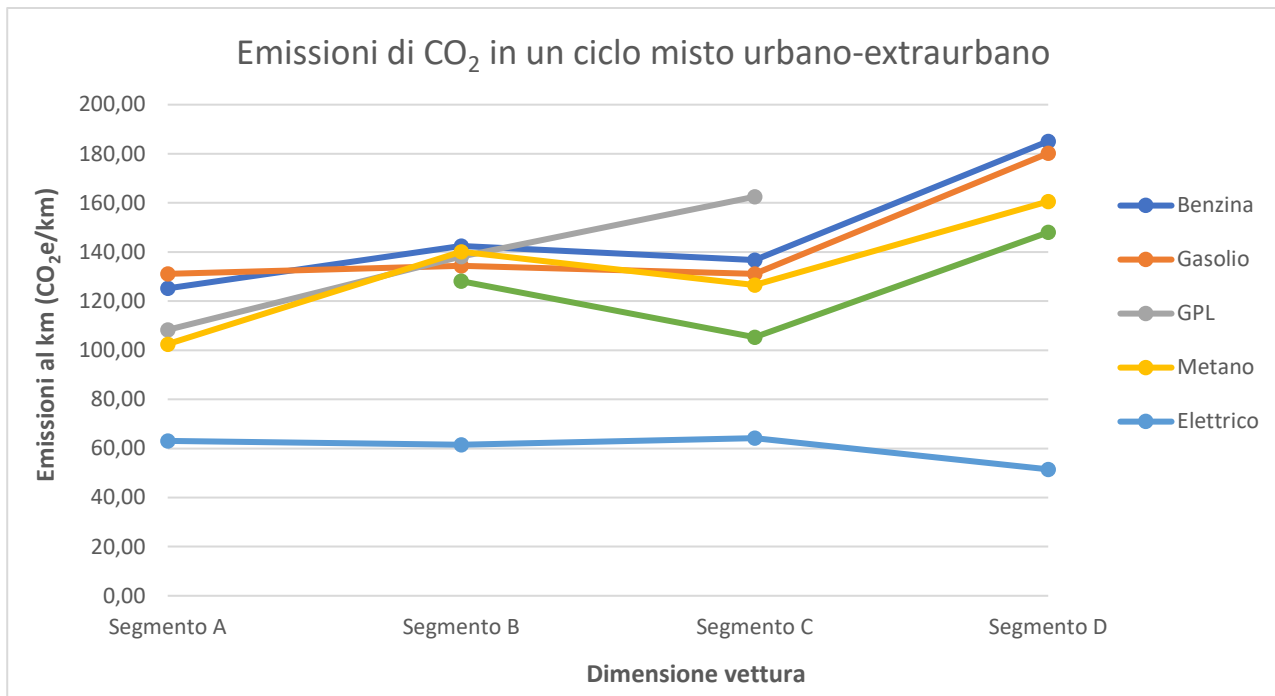
(CO ₂ e/km)							
Segmento C	Volkswagen Golf 1.0 110cv	Mercedes A180d 1.5 116cv	Fiat Tipo 1.4 120cv	Skoda Octavia Wagon 1.5 130cv	Nissan Leaf 40.0 kWh	Toyota Prius	-
Consumi nel misto (unità carburante/km)	0.048	0.040	0.087	0.037	0.166	0.037	
Impatto sul riscaldamento globale (CO ₂ e/km)	136.7	131.1	162.5	126.5	65.7	105.3	
Segmento D	Subaru Levorg 2.0 150cv	Opel Insigna 1.6 136cv	-	Audi A4 Avant 2.0 170cv	Hyundai Kona 64kWh	Hyundai Ioniq Plug-in	DS 5 Hybrid
Consumi nel misto (unità carburante/km)	0.065	0.055		0.047	0.133	0.052	0.049
Impatto sul riscaldamento globale (CO ₂ e/km)	185.1	180.2		160.6	52.7	148	160.6

Tutti i dati sui consumi provengono dal sito motor1.com (test eseguiti dal giornalista automobilistico Fabio Gemelli), ad eccezione delle vetture BMW i3, Renault Zoe e Nissan Leaf, i cui valori provengono da ev-database.uk. Tutti i valori di consumo si riferiscono ad un percorso misto urbano-extraurbano. Nella realtà le auto di segmento D sono generalmente utilizzate in percorrenze prevalentemente autostradali, con consumi leggermente maggiori. Alcune caselle della tabella sono state lasciate vuote perché non esistono autovetture commercialmente disponibili per quella combinazione di segmento e alimentazione. Inoltre, per i veicoli ibridi si considera solo il funzionamento attraverso il motore endotermico (nessuna ricarica preliminare da presa di corrente).

I consumi per km percorso si ottengono dividendo la quantità di carburante utilizzata per la distanza percorsa.

Esempio: partendo dal dato di consumo della Suzuki Celerio, cioè 4,4L/100km sul ciclo combinato urbano/extraurbano, il dato di unità di carburante/km si ottiene dividendo 4,4L per 100km: $4.4/100=0.044$ (unità di carburante consumate in un km).

Nel grafico successivo sono riassunti i dati sui fattori di emissioni di CO₂ per le varie alimentazioni e segmenti.



L'elettrico esce indubbiamente vincente dal confronto sulle emissioni di CO₂ emesse durante l'utilizzo della vettura. Seguono i veicoli ibridi a benzina. Tra i veicoli a combustione interna i risultati non sono univoci per tutte le tipologie di auto: il metano risulta generalmente l'alimentazione più virtuosa, seguita dal GPL che però è progressivamente penalizzato dalla taglia dell'auto; la benzina si comporta meglio del gasolio solamente per le auto di piccole dimensioni (segmento A).

Si può notare come le dimensioni delle autovetture influisca (ovviamente) negativamente sui consumi. Vi è però una diminuzione dei consumi (e quindi delle emissioni di CO₂) nel passaggio dal segmento B al segmento C, per tutte le tipologie di alimentazione. Ciò probabilmente è dovuto ai seguenti fattori:

- Le vetture di segmento C sono qualitativamente migliori del segmento B, da cui una maggiore efficienza.
- Si è considerato un ciclo misto urbano/extraurbano, dove le auto di segmento C risultano avvantaggiate in quanto dotate di un propulsore di cilindrata maggiore che permette consumi più contenuti in andature sostenute. In un ciclo puramente urbano le auto di segmento B probabilmente eguaglierebbero le omologhe di segmento superiore (grazie al minor peso e quindi una minor quantità di energia sprecata in fase di frenata).

3.2.2 Emissioni dovute all'interazione tra auto e manto stradale

Le emissioni connesse alla fase di utilizzo della vettura non si limitano a ciò che fuoriesce dallo scarico dell'auto (per i veicoli a combustione interna) o dalle centrali che producono l'energia elettrica (per le auto elettriche). Escludendo le emissioni allo scarico, le automobili emettono polveri sottili anche attraverso i seguenti fenomeni:

- l'usura degli pneumatici
- l'usura dei freni
- l'usura del manto stradale
- la ri-sospensione di polveri depositate sulla superficie stradale

Si può ipotizzare che ciascuna delle fonti di particolato solido sopra citate dipenda dal peso del veicolo. L'abrasione di pneumatici e manto stradale dipende dalla frizione tra il battistrada delle gomme e la superficie della strada. L'entità della frizione dipende dal coefficiente di attrito e dall'entità della forza normale alla superficie. Un aumento di peso quindi comporta un aumento dell'usura sia degli pneumatici, che del manto stradale. L'usura dei freni invece dipende dalla frizione tra le pastiglie e i dischi dei freni. Poiché l'energia richiesta per rallentare un veicolo è proporzionale alla massa del veicolo stesso, allora lo sarà anche l'usura dei freni. La ri-sospensione, invece, dipende dalle dimensioni, dalla massa e dall'aerodinamica del veicolo.

Nella seguente tabella, sono stati riportati i dati dello studio condotto da Andrew Simons nel 2013, riguardanti i fenomeni di usura:

Simons, 2013 - Road transport: new life cycle inventories for fossil-fuelled passenger cars and non-exhaust emissions in ecoinvent v3 [34]			
Emissioni per kg di veicolo	Usura Totale (mg/km percorso)	PM10 (mg/km)	PM2.5 (mg/km)
Pneumatici	0,0573	0,00408	0,00286
Freni	0,00445	0,00396	0,00174
Strada	0,00979	0,00490	0,00264
Totale	0,07154	0,01294	0,00724

Comparando vari modelli di vetture equipaggiate con motori endotermici, con i corrispettivi elettrici, si ottengono i fattori di emissione riportati nella tabella successiva:

Modello	Segmento	Massa ICEV in ordine di marcia (kg)*	Emissioni di particolato (mg/km)	Massa EV in ordine di marcia (kg)*	Emissioni di particolato (mg/km)	Incremento emissioni (mg/km)
Fiat 500	A	1149	82,19946	1427	95,73743	13,53797
Volkswagen Up!	A	1004	71,82616	1289	86,47901	14,65285
Smart Coupé	A	820	58,6628	1055	70,77995	12,11715
Ford Focus	C	1500	107,31	1719	115,32771	8,01771
Volkswagen Gol	C	1390	99,4406	1617	108,48453	9,04393
Media			83,887804		95,361726	11,473922

(fonte: Simons, 2013 [34])

*ipotesi conservativa: essendoci la frenata rigenerativa, per le auto elettriche non si considerano le emissioni dovute all'usura dei freni

Per quanto riguarda la **risospensione** di polveri, uno studio del 2012 condotto sulle strade extraurbane di Barcellona è arrivato a stimare un fattore di emissione nel range di 9.4-36.9 mg/km (0.0094-0.0369 g/km).[35] Questa variabilità è data dalle condizioni della strada e da peso, dimensioni, aerodinamica e tipologia di pneumatici del veicolo.

Paragonando i dati ottenuti (in media 0,084 g/km da usura, +0,011 g/km nel passaggio all'elettrico, fino a 0.0369g/km di risospensione) con i dati sulle emissioni allo scarico riportate in precedenza (rispettivamente 0,001 e 0,0004 g/km per benzina e diesel), si può giungere alle seguenti conclusioni:

- ridurre il peso del veicolo è fondamentale per ridurre le emissioni di particolato per tutte le autovetture;
- le emissioni di particolato allo scarico sono marginali rispetto al totale;
- i veicoli elettrici, a causa del maggior peso, emettono una maggior quantità di particolato durante la fase di funzionamento.

3.2.3 Impatto della manutenzione del veicolo

Anche la fase di manutenzione del veicolo ha un impatto sull'ambiente, in quanto è associata ad un flusso di materiali in ingresso e in uscita.

Per le auto convenzionali la manutenzione periodica può comprendere le seguenti operazioni:

- Cambio olio, filtro olio, filtro aria (ogni 10-30mila km o 1-2 anni)
- **Sostituzione filtro abitacolo (ogni 10-30mila km o 1-2 anni)**
- Sostituzione filtro carburante (ogni 30km)
- Sostituzione candele di accensione (ogni 30mila km)
- Sostituzione cinghia di distribuzione (ogni 90mila km)
- Rabbocco liquido del radiatore (all'occorrenza)
- **Sostituzione pastiglie freni (ogni 40-50mila km)**
- **Sostituzione dischi freni (ogni 80-100mila km)**
- **Sostituzione liquido freni (ogni 60-100mila km)**
- Sostituzione batteria 12v (ogni 6-10 anni)
- **Sostituzione pneumatici (20-40mila km, massimo 5-6 anni)**

Le voci evidenziate in blu sono condivise con la manutenzione periodica di un'auto elettrica, alle quale si aggiunge unicamente il cambio del fluido di refrigerazione della batteria (ogni 80mila km circa). Inoltre, grazie alla frenata rigenerativa operata dal motore elettrico, le pastiglie e i dischi dei freni sono soggetti a minor usura e quindi possono essere cambiati a intervalli di percorrenza maggiori.

Tra le voci elencate sopra, quelle più importanti per frequenza di attuazione ed entità di materiale coinvolta, sono sicuramente il cambio olio e filtri (per i motori a combustione interna) e la sostituzione degli pneumatici (per tutte le vetture). Analizziamo di seguito le conseguenze a livello ambientale.

Sostituzione olio, filtro olio, filtro aria e filtro abitacolo

Le operazioni di sostituzione olio e filtri vengono eseguite nel tagliando base dei veicoli con motore a combustione interna. Nei veicoli elettrici è presente unicamente il filtro abitacolo, che viene sostituito nel controllo periodico consigliato dalle case costruttrici.

Il filtro dell'olio si occupa di trattenere le particelle e i residui che con le alte temperature, la frizione e l'abrasione si accumulano nell'olio motore. Esso è costituito da un involucro esterno di latta, un elemento filtrante composto da fibre di cellulosa, vetro e poliestere, un cilindro metallico forato ed alcune guarnizioni. [36]

Il filtro dell'aria è responsabile del filtraggio di polvere e particelle dall'aria necessaria alla combustione. In genere è costituito da un pannello di carta o cotone, eventualmente supportato da una rete metallica, ripiegato su sé stesso a fisarmonica ed inserito in un contenitore di plastica parallelepipedale.

Il filtro abitacolo, invece, filtra l'aria destinata agli occupanti del veicolo, trattenendo polvere e pollini. Viene realizzato con fibra di carta e cotone.

La piccola dimensione di questi filtri, unita all'utilizzo di materiali generalmente eco-compatibili (i filtri aria sono in carta-cotone), probabilmente ne rende trascurabile l'impatto ambientale derivante dalla produzione e smaltimento.

L'olio motore è responsabile della lubrificazione del manovellismo del propulsore. La quantità e qualità dell'olio sostituito dipende dalla tipologia e dalle dimensioni del propulsore e va da 3 fino a 7 litri per le auto di cilindrata più grossa. L'olio per auto si ottiene per raffinazione dal petrolio greggio e, in seguito, viene additivato con sostanze che ne aumentano la resistenza alle alte temperature ed il potere lubrificante. È formato da composti alifatici e aromatici ed in minor parte da idrocarburi poliaromatici, molto dannosi perché mutagenici e cancerogeni.[37] Inoltre, con l'utilizzo accumula quantità progressivamente maggiori di metalli pesanti.

Un litro di olio motore usato può inquinare fino a 3784 m² di terreno, rendendolo improduttivo per l'agricoltura o la crescita delle piante, per un periodo di tempo che può arrivare anche a 100 anni.[38]

Gli idrocarburi dell'olio si diffondono orizzontalmente sulla parte superiore delle falde acquifere, contaminando l'acqua ed il suolo. L'ingresso dell'olio usato nel terreno riduce l'aerazione, immobilizza i nutrienti e riduce il pH del terreno, penalizzandone sensibilmente la fertilità ed incrementando la mortalità degli animali che vivono negli strati superiori.[39]

Gli oli usati sono quindi considerati una delle categorie più pericolose di inquinanti ambientali, rappresentando una grave minaccia per l'ecosistema e la salute pubblica.

Circa 1/3 dell'olio per auto venduto viene perso nell'ambiente durante l'utilizzo del veicolo, attraverso gli accoppiamenti e le guarnizioni del motore. Esso si deposita sulla superficie di parcheggi e strade, rimanendovi finché un temporale ne causa la dilavazione nel terreno

limitrofo (fuori città) o nei canali di scolo (nelle zone urbane), causando i danni sopra citati. [38]

I $\frac{2}{3}$ restanti della quantità iniziale, in linea di massima, vengono raccolti dalle officine meccaniche e mandati a dei centri di raccolta specializzati. In Italia la quasi totalità di questi olii viene recuperata e riciclata attraverso un processo di "rigenerazione". Nel 2016 sono state rigenerate oltre 110 tonnellate di oli da autotrazione: il 65% di queste sono state trasformate in nuove basi di lubrificanti, il 12% sono diventate bitume e l'8% gasolio. [40]

Nonostante il recupero e la rigenerazione, fino ad un terzo dell'olio viene comunque disperso nell'ambiente e l'impatto ambientale non può essere trascurabile.

Sostituzione pneumatici

Tutte le auto, che siano a combustione interna, ibride, o elettriche, periodicamente devono sostituire gli pneumatici perché soggetti a usura. Gli pneumatici hanno in genere una vita utile compresa tra i 20 e i 40-60000km, in base allo stile di guida adottato, alle condizioni della strada e alle caratteristiche del veicolo.



Schema costruttivo di uno pneumatico, fonte: www.bridgestone.com

Uno pneumatico per automobili è suddivisibile in 5 diverse parti:

- Battistrada (Tread): è la parte dello pneumatico che entra a contatto con la strada, è realizzato con composti della gomma.
- Spalla (Side wall): è la parte di gomma che unisce il battistrada al tallone dello pneumatico.
- Corpo (Body Ply): è la struttura di sostegno principale ed è formata di fibre sintetiche come il poliestere e il rayon.
- Cinghia (Belt): fornisce rigidità al battistrada e protegge la carcassa, di solito è costituito da fili metallici intrecciati.
- Tallone (Bead): è formato da un filo di acciaio e permette di unire saldamente lo pneumatico al cerchio.

In base al diametro e alla larghezza, uno pneumatico può pesare tra i 6.5 e i 15kg, con una media di 8.5kg per una gomma standard da 15" di diametro.[41] Considerando che le ruote in un'auto sono quattro, possiamo affermare che ogni 30mila km circa di uso misto dovranno essere processati almeno 35kg di materiali per la realizzazione di nuove gomme e dovrà essere smaltita una massa quasi equivalente di pneumatici consumati. Alcune analisi del

ciclo di vita degli pneumatici sono state portate avanti negli anni, evidenziando come l'impatto delle fasi di produzione e smaltimento siano trascurabili rispetto alla fase di utilizzo.[42] La categoria di impatto più importante durante l'utilizzo è costituita dall'emissione di particolato che è stata analizzata precedentemente. Inoltre, non esiste studio alcuno che abbia evidenziato una maggiore usura degli pneumatici correlato al maggior peso delle auto elettriche. In conclusione, non ci si prolungherà oltre nell'analisi dell'impatto ambientale dovuto alla sostituzione degli pneumatici.

3.3 Smaltimento della vettura (End of Life)

Lo smaltimento della vettura è la fase conclusiva dell'intero ciclo di vita. Per gli standard italiani, un'auto a ciclo otto si inizia a considerare "a fine vita" superati i 200mila km, un diesel di grossa cilindrata invece può superare anche i 400mila.[43] La percorrenza totale, però, non è solo una questione di alimentazione, ma anche di dimensioni: segmenti inferiori (A e B) percorrono in genere meno strada rispetto ai veicoli di segmento superiore (C, D, ...), in quanto utilizzati prevalentemente in un contesto urbano.

Oltre al fattore spazio bisogna tener conto anche del fattore tempo: attualmente un'auto inizia a essere considerata vecchia (e quindi passibile di rottamazione) all'avvicinarsi dei 20 anni dall'immatricolazione. In caso di incentivi alla rottamazione e limitazioni alla circolazione, questo periodo di tempo può ulteriormente accorciarsi.

Una volta rottamata l'automobile non può più circolare e viene smantellata. Parte dei pezzi viene recuperata e rivenduta nel mercato dei ricambi usati. Ciò che non si riesce a vendere, in Italia viene generalmente riciclato (un'auto è riciclabile per l'80% del suo peso) o termovalorizzato. Dal 2015, inoltre, è in vigore l'obbligo di recuperare almeno il 95% del peso del veicolo: minimo l'85% dovrà essere riutilizzato o inviato alle industrie che lo ricicleranno, mentre il restante 10% sarà impiegato nel recupero energetico.[44]

Lo smaltimento di una vettura convenzionale (non elettrica) produce quindi un impatto ambientale limitato (di gran lunga trascurabile rispetto alle fasi di produzione e utilizzo). Questa deduzione viene confermata anche dall'analisi condotta da Del Pero et al. nel 2018, che ha evidenziato un impatto trascurabile della fase di smaltimento del veicolo, sia per auto a combustione interna, che per le auto elettriche.

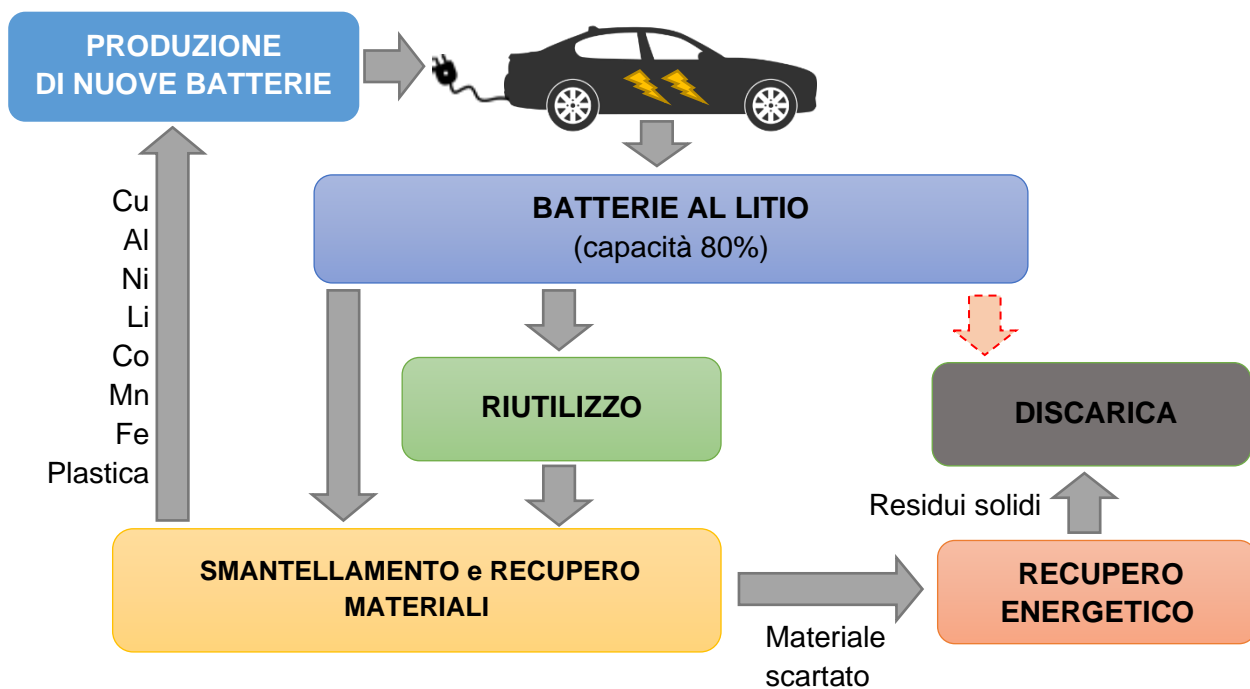
3.3.1 Il problema delle batterie

Per le batterie delle auto elettriche l'impatto dello smaltimento non è ancora stato del tutto definito. La diffusione delle auto elettriche è un fenomeno recente e le varie modalità di smaltimento sono ancora in fase di sviluppo.

La batteria di un'auto elettrica dura tipicamente tra i 200 e i 250mila km [45], anche se l'uso sempre più diffuso delle stazioni di ricarica rapida (ad oltre 50kW) riduce la durata della batteria, in quanto la degradazione della batteria cresce con l'intensità di corrente.[46]

Una volta che il pacco batterie perde il 20% circa della sua capacità iniziale, diventa inutilizzabile per l'autotrazione, in quanto questa diminuzione di prestazioni influisce sull'accelerazione, sulla percorrenza possibile con una carica e sulle capacità rigenerative del veicolo.[47]

Le batterie giunte a questa fase, possono essere riutilizzate oppure riciclate per recuperare i materiali di maggior valore.



Questo schema rappresenta la fase finale del ciclo di vita del pacco batterie di un'auto elettrica.

Rispetto ai veicoli elettrici le applicazioni stazionarie richiedono una minore densità energetica. Quindi, le batterie che possiedono ancora l'80% della loro capacità originale vengono raccolte, i moduli vengono suddivisi in gruppi con la stessa capacità/vita residua e riassembleati in nuovi pacchi batteria, destinati all'accumulo di energia elettrica per edifici e torri di telecomunicazione, oltre che alla stabilizzazione e soddisfacimento dei picchi della rete elettrica. Le batterie possono essere fornite dai costruttori di veicoli elettrici e la vita utile di questi accumulatori rigenerati può superare i 10 anni.[48]

Secondo degli studi condotti nel 2017, entro il 2025 oltre il 75% delle batterie usate, provenienti da auto elettriche, verranno riutilizzate in applicazioni stazionarie per svariati anni dopo la rottamazione del veicolo, dopodiché verranno inviate in centri di riciclaggio per recuperare i componenti di valore.[49]

Nei centri di recupero le batterie vengono scaricate completamente e disassemblate nelle loro componenti base. Si procede quindi all'estrazione dei metalli più pregiati attraverso processi idrometallurgici o pirometallurgici. Quest'ultimo passaggio ha un impatto ambientale rilevante come è stato verificato da alcuni studi, ma questo impatto non è tutt'ora esattamente quantificabile.[50][51]

Tuttavia, sono attualmente in fase di sperimentazione nuove tecniche di recupero dal basso impatto ambientale, che potrebbero essere già disponibili per lo smaltimento delle batterie attualmente vendute.[52] Unendo questa ottimistica previsione al fatto che il materiale, recuperato in questo modo, può essere utilizzato al posto di materia prima vergine (la cui estrazione produce notevoli danni all'ambiente), non appare oltremodo infondata l'ipotesi di ritenere irrilevante, rispetto alle fasi di produzione e utilizzo, l'impatto ambientale della fase di smaltimento delle batterie.

QUARTA PARTE
Conclusioni dell'analisi del ciclo di vita

4.1 Comparazione sull'intero ciclo di vita

Allo scopo di determinare quale tipologia di vettura produca il minore impatto ambientale è necessario unificare i dati delle varie fasi di vita. Prima, però, è opportuno fare alcune considerazioni:

- Come si è evidenziato nell'analisi dei fattori di inquinamento, la fase di produzione delle auto, convenzionali ed elettriche/ibride (escluse le batterie), sono pressoché equivalenti dal punto di vista dell'impatto ambientale. Quindi in questa comparazione verrà valutato unicamente l'impatto della produzione delle batterie.
- Sempre nell'analisi dei fattori di inquinamento si è giunti alla conclusione che la fase terminale di una vettura risulta trascurabile rispetto alla produzione e all'utilizzo. Quindi non verrà considerata nella comparazione.

Inoltre, il confronto si effettuerà sui valori di CO₂, NO_x e PM, in quanto più rilevanti come impatto su clima e salute (nonché più attendibili a livello di stima), e su una percorrenza complessiva di 160mila km, in quanto valore minimo di durata delle batterie per le auto elettriche (nonché plausibile percorrenza di una vettura di segmento B).

Infine, si è scelto di comparare unicamente le auto del segmento B (anziché tutti i segmenti), per i seguenti motivi:

- Sono le più vendute: secondo le statistiche UNRAE compongono quasi il 38% delle vetture immatricolate nell'ultimo anno.
- Sono versatili, cioè adatte all'utilizzo misto urbano-extraurbano.
- Sono disponibili con tutte le tipologie di propulsori e alimentazioni che sono state considerate in questa tesi.

Tabella di comparazione delle emissioni sull'intero ciclo di vita

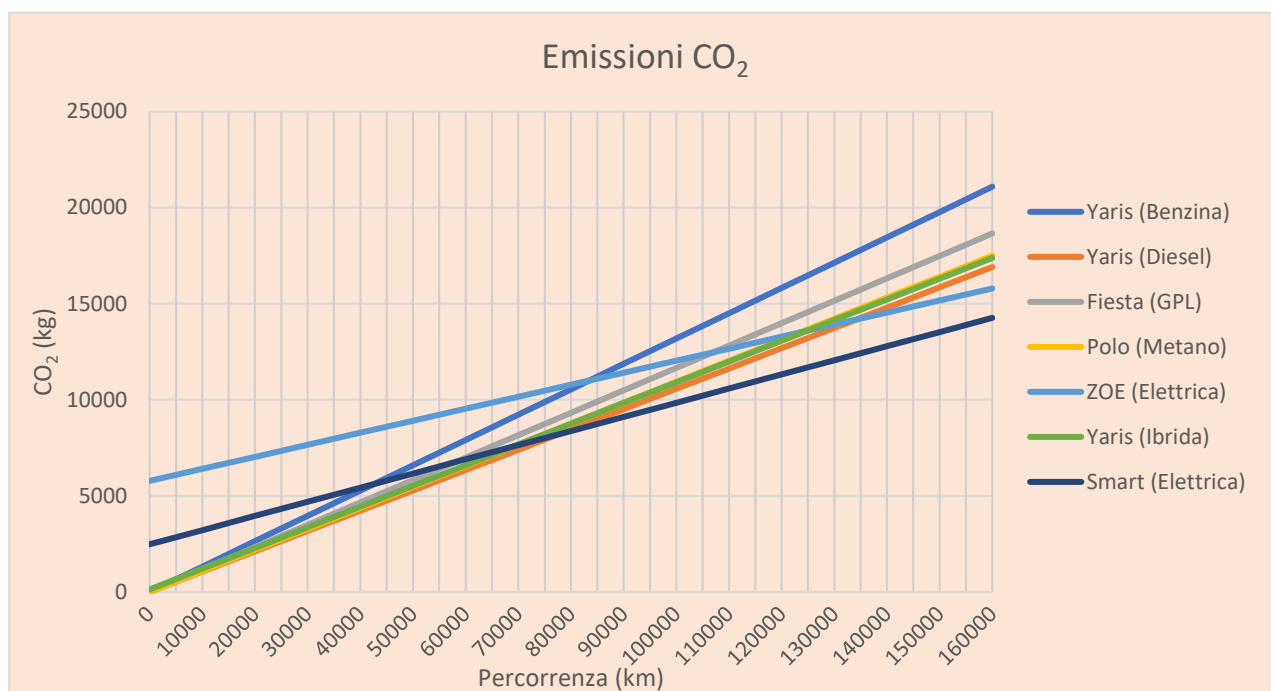
FATTORI DI EMISSIONE	CO2	NOx	PM	Note
	Unità di misura			Nelle batterie il maggior fattore di impatto è l'acidificazione, qui non riportato
	g/kWh			
Produzione batterie	141000	404	181	
Allo scarico	g/uec	g/km	g/km	UEC: unità energetica consumata
Benzina	2397	0,04	0,001	
Diesel	2642	0,168	0,0004	
GPL	1666	0,04	0,001	L'impatto di GPL e metano nella realtà
Metano	2668	0,04	0,001	risulta inferiore
Elettricità	396	0,118	0,0024	Fattori per l'elettricità espressi in g/uec
Non allo scarico	mg/(km*kg veicolo)			
Usura	-	-	0,07154	
	mg/km			E' stato considerato per tutte le vetture il
Risospensione	-	-	9,4	valore minimo (data l'incertezza della stima)

COMPARAZIONE VEICOLI

	Toyota	Ford	Volkswag	Renault	Toyota	Smart	
Modello auto	Yaris 1.3	Yaris 1.0 D-4D	Fiesta 1.1 75 CV	en Polo 1.0 TGI	Zoe R90	Yaris 1.5 Hybrid	ForFour Electric Drive*
Alimentazione	Benzina	Diesel	GPL	Metano	Elettrica	Ibrida	Elettrica
Dimensione batteria (kWh)					41	0,9	17,6
CO2 (g)					5781000	126900	2481600
NOx (g)					16564	363,6	7110,4
PM (g)					7421	162,9	3185,6
Consumo (uec/km)	0,055	0,04	0,07	0,041	0,158	0,045	0,186
CO2 (g/km)	131,835	105,68	116,62	109,388	62,568	107,865	73,656
NOx (g/km)	0,04	0,168	0,04	0,04	0,018644	0,002	0,021948
PM (g/km)	0,001	0,0004	0,001	0,001	0,000379	0,000818	0,000446
Peso in ordine di marcia (kg)	1045	1075	1108	1275	1543	1150	1170
PM - Usura (g/km)	0,074759	0,076906	0,079266	0,091214	0,110386	0,082271	0,083702
PM - Sospensione (g/km)	0,0094	0,0094	0,0094	0,0094	0,0094	0,0094	0,0094
Vita complessiva (km)	160000						
CO2 totale (kg)	21093,6	16908,8	18659,2	17502,08	15791,88	17385,3	14266,56
NOx totale (kg)	6,4	26,88	6,4	6,4	19,54704	0,6836	10,62208
PM totale (kg)	13,62549	13,87288	14,34661	16,25816	26,64747	14,96117	18,15331
- di cui dovuto al peso:	13,46549	13,80888	14,18661	16,09816	19,1658	14,66736	14,89629
- percentuale sul totale:	98,83%	99,54%	98,88%	99,02%	71,92%	98,04%	82,06%

*si è deciso di prendere in considerazione anche la Smart ForFour Electric Drive, oltre alla Renault Zoe R90, per mettere in evidenza l'importanza del peso e della dimensione della batteria nel totale delle emissioni.

Analisi della CO₂ emessa



Dall'analisi del grafico della CO₂ le auto più parsimoniose, in termini di emissioni climalteranti, risultano le due auto elettriche, seguite dall'auto diesel e poi, allo stesso livello, dal metano e dall'ibrido a benzina. La peggiore di tutte è l'auto a benzina, mentre il GPL risulta una via di mezzo tra benzina e diesel.

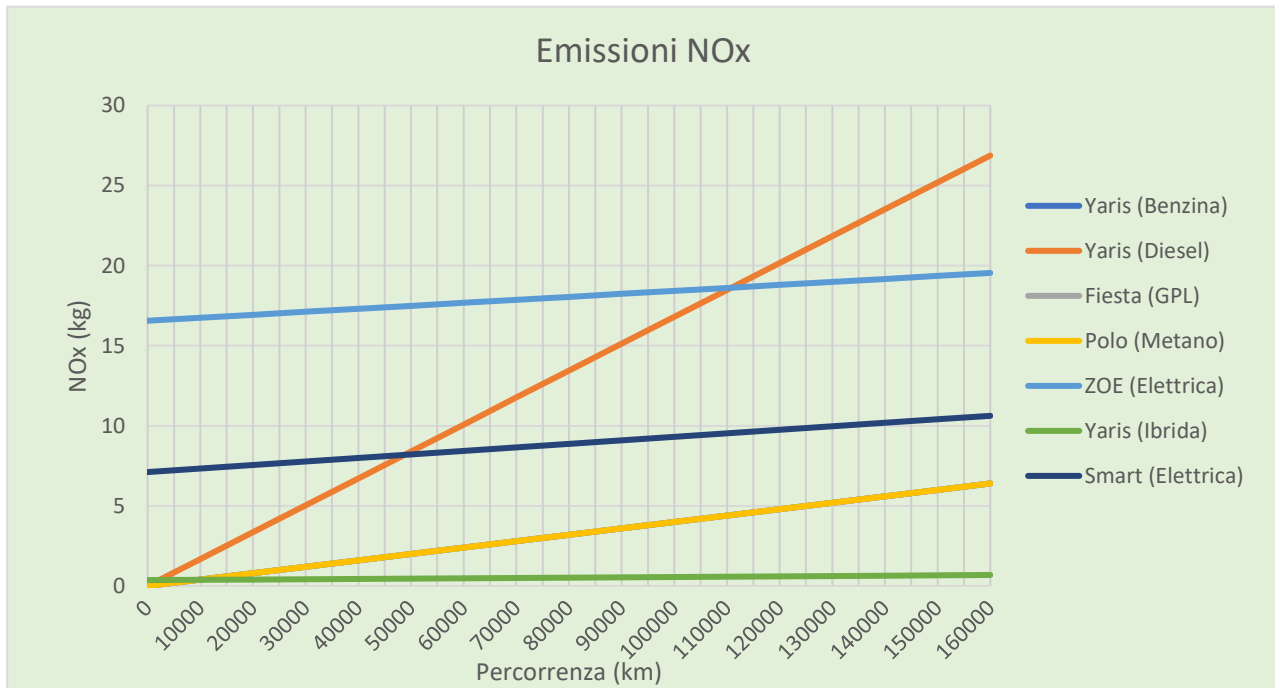
Generalizzando i risultati ottenuti, possiamo ipotizzare che la classifica sull'intero ciclo di vita delle emissioni di CO₂ per le varie propulsioni sia:

(Peggior) Benzina > GPL > Metano ~ Ibrida > Diesel > Elettrica (Migliore)

Osservazioni:

- La ZOE e la Smart rivelano uno svantaggio iniziale in termini di emissione di CO₂ (rispettivamente di 5 e 3 tonnellate). La Smart (la meno svantaggiata inizialmente) colma il divario con la migliore delle auto convenzionali (Polo a metano) solo al raggiungimento dei 70mila km circa. Quindi le auto elettriche appaiono meno efficaci, in un'ottica di breve periodo, in termini di minore emissione di CO₂.
- In caso di percorrenze più elevate, se la batteria è stata oggetto di stress (temperature critiche, ricarica rapida, ecc...), potrebbe essere necessario sostituirla andando a vanificare il vantaggio conseguito rispetto alle auto tradizionali in termini di riduzione di CO₂.
- In caso di rapida elettrificazione del parco auto italiano, l'aumento dei consumi di energia elettrica dovuto alla ricarica dei veicoli verrebbe coperto attraverso la produzione di elettricità da fonti fossili, con conseguente aumento della CO₂ emessa a parità di kWh prodotta. Si verrebbe quindi a vanificare il vantaggio ipotizzato in termini di impatto sul cambiamento climatico.

Analisi degli NOx emessi



Dall'analisi del grafico degli NOx risulta evidente lo svantaggio dato dalla produzione delle batterie, che impedisce alle auto elettriche di essere tra le migliori per quanto riguarda l'emissione di NOx. L'auto migliore in assoluto risulta la Yaris Hybrid, che oltre ad ottimizzare la combustione annullando praticamente le emissioni di NOx, è dotata di una batteria dalla capacità (quindi massa) estremamente contenuta (0,9kWh), limitando l'impatto dovuto alla produzione. I grafici delle auto a benzina, GPL e metano risultano sovrapposti, in quanto si è ipotizzato lo stesso fattore di emissione per tutte e tre le propulsioni. Nella realtà le alimentazioni a metano e GPL dovrebbero essere caratterizzate da una migliore combustione e una minore quantità di NOx emessi. L'auto diesel, il cui fattore è stato fatto coincidere con l'attuale limite di emissioni, risulta il più inquinante in termine di emissioni di NOx.

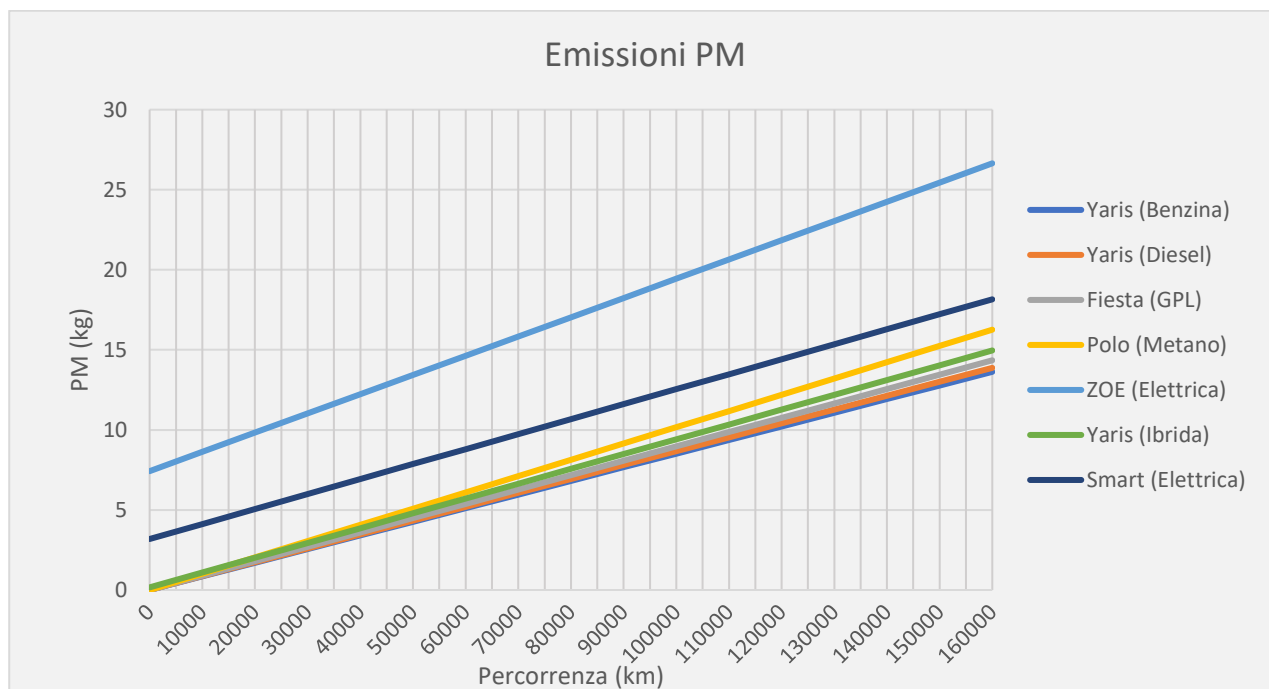
Generalizzando i risultati ottenuti, possiamo ipotizzare che la classifica sull'intero ciclo di vita delle emissioni di NOx per le varie propulsioni sia:

(Peggior) Diesel > Elettrica > Benzina > GPL ~ Metano > Ibrida (Migliore)

Osservazioni:

- Gli NOx sono degli inquinanti che agiscono a livello locale (regionali), quindi a differenza della CO₂ (che è un clima alterante), il loro impatto sull'ambiente e sulla salute delle persone è strettamente legato al luogo di emissione. Da questo punto di vista i veicoli elettrici possono risultare vantaggiosi se utilizzati in un contesto cittadino, rispetto, ad esempio, ai veicoli diesel, in quanto "spostano" l'emissione di NOx dal luogo di utilizzo della vettura a quello di produzione delle batterie e dell'energia.
- Se non fosse per lo svantaggio iniziale dovuto alla produzione delle batterie, le auto elettriche avrebbero un impatto in termine di NOx minore delle auto convenzionali.

Analisi del particolato solido emesso



Dall'analisi del grafico del particolato solido emesso, risulta evidente il duplice svantaggio delle auto elettriche: la costruzione delle batterie ed il peso dell'auto. La produzione della batteria è di per sé responsabile di quasi il 25% del totale di emissioni di particolato, mentre l'incremento di peso incide negativamente sulle emissioni non allo scarico.

Il peso è il fattore più influente per tutte le tipologie di auto, in quanto incide sull'usura di pneumatici, freni, asfalto e sulla risospensione di polveri. Viene chiarito pertanto il motivo per cui un'auto a metano (dotata di bombole molto pesanti) può emettere più particolato solido di un'auto diesel. Le emissioni allo scarico invece risultano praticamente trascurabili per tutte le alimentazioni.

Generalizzando i risultati ottenuti, possiamo ipotizzare che la classifica sull'intero ciclo di vita delle emissioni di particolato solido per le varie propulsioni sia:

(Peggior) Elettrica > Ibrida (peso batterie), Metano (peso bombola) > Diesel > GPL, Benzina (Migliore)

Osservazioni:

- Il diesel è stato inserito prima delle auto a benzina e GPL per il maggior peso dei motori.
- Sempre per le auto diesel non è chiaro quale sia l'impatto dei meccanismi di rigenerazione del filtro antiparticolato sulle emissioni totali di PM.

4.2 Conclusioni

Risulta evidente come le auto abbiano un impatto significativo sull'ambiente e sulla salute delle persone, non facile da determinare in maniera oggettiva. Trattasi infatti di oggetti di natura complessa, la cui produzione ed il cui utilizzo non sono legati solo ad aspetti di necessità e di praticità, ma anche alla moda, al fatto di rappresentare uno dei principali status symbol e sono pesantemente influenzati dalle scelte legislative per il settore fatte dai singoli stati.

In questa tesi si è applicata la metodologia dell'analisi del ciclo di vita utilizzando i dati disponibili per il territorio italiano, allo scopo di stabilire in linea di massima quali tipologie di vetture acquistabili in Italia abbiano il maggiore (o minore) impatto ambientale.

Le criticità dell'analisi condotta

Al fine di fornire un quadro il più possibile oggettivo è opportuno evidenziare le criticità presenti nell'analisi effettuata.

Prima fra tutte il grado di rappresentatività della realtà dei dati preliminarmente raccolti e utilizzati per le stime condotte in questo elaborato, in quanto provenienti da ricerche e analisi sul campo di cui non si conosce l'esatta metodologia.

Un'altra criticità risiede nelle semplificazioni che sono state adottate per sopperire alla mancanza di dati di difficile acquisizione.

Un altro fatto non da sottovalutare è l'aver escluso, in fase di comparazione, l'impatto ambientale della costruzione della vettura e l'impatto dovuto allo smaltimento delle batterie.

In particolare, per le batterie si è ipotizzato che, in caso di successivo riutilizzo in altre applicazioni, seguito da un corretto smaltimento, l'impatto ambientale della loro "rottamazione" si potesse considerare già incluso nel bilancio di produzione delle stesse, in quanto i materiali recuperati eviterebbero di dover estrarre e raffinare materie vergini. Nella realtà l'impatto a fine vita delle batterie è ancora tutto da verificare.

I problemi appena elencati, tuttavia, non dovrebbero pregiudicare lo scopo iniziale di questo elaborato, ovvero stimare in linea di massima le entità degli impatti.

Conclusioni

Dall'analisi effettuata sono emersi gli impatti ecologico delle varie tipologie di auto nelle varie fasi di vita, nonché i vantaggi e gli svantaggi di ogni tipologia di propulsione.

Una delle conclusioni raggiunte è che **l'impatto ambientale della produzione di una vettura (batterie escluse) è marginalmente influenzato dal tipo di propulsore utilizzato. L'entità dell'impatto dipende invece in larga parte dal segmento di appartenenza della vettura, ovvero dalle dimensioni, dal peso e dall'elevato**

“standing” della stessa. Oltre a ciò, **l’impatto della produzione è influenzato dal luogo in cui viene costruita l’auto.** Ad esempio: la produzione di auto in Europa, grazie alle normative stringenti e ad un mix energetico orientato ad un minore utilizzo di combustibili fossili, risulterà più ecocompatibile rispetto alla produzione di auto in nazioni meno virtuose. Per la fase di smaltimento del veicolo si può giungere alle medesime conclusioni.

La produzione e lo smaltimento delle batterie risultano essere fattori critici a livello ambientale, comportando l’emissione di grandi quantità di sostanze climalteranti, inquinanti e cancerogene. In particolare, l’estrazione e la lavorazione del litio comporta il rilascio nell’ecosistema di elevate quantità di sostanze eutrofizzanti.

Nonostante lo svantaggio iniziale in termini di produzione di anidride carbonica, sul lungo periodo le auto elettriche possono permettere una notevole riduzione della CO₂ emessa, a patto però che l’equilibrio produttivo tra le varie fonti energetiche (rinnovabili e non) rimanga inalterato, o meglio ancora che venga progressivamente decarbonificato.

Lo stesso discorso non vale per le altre due tipologie di emissioni che sono state analizzate. La produzione della batteria produce enormi quantità di NO_x che non riescono ad essere compensate dal ridotto fattore di emissione in fase di funzionamento delle auto elettriche. Per quanto riguarda le emissioni di particolato la presenza delle batterie costituisce un handicap notevole: l’impatto della produzione ed il peso aggiuntivo rendono le auto elettriche i veicoli che emettono le maggiori quantità di particolato solido.

Il peso gioca un ruolo fondamentale nelle emissioni complessive dell’auto: il risparmio di materiale, oltre che diminuire l’impatto in fase di produzione e migliorare l’efficienza del veicolo, è il fattore che più influenza le emissioni di particolato solido. Infatti, si è riscontrato che la maggior parte del particolato emesso da un veicolo dipende dai fenomeni di usura di pneumatici, freni e asfalto, e i relativi fattori di emissione sono proporzionali al peso della vettura.

Affinché un’auto elettrica possa effettivamente inquinare meno di un’auto convenzionale, quindi, **sono necessarie alcune condizioni:**

- L’impatto della produzione e dello smaltimento delle batterie deve essere minimizzato.
- Il mix energetico della nazione in cui vengono prodotte e utilizzate deve essere composto in buona parte da fonti rinnovabili. In questa analisi il mix energetico italiano è stato considerato (forse in maniera ottimistica) sufficientemente orientato all’impiego di fonti rinnovabili, permettendo alle auto elettriche di limitare, durante l’utilizzo, le emissioni di sostanze inquinanti e climalteranti.
- Il peso di un’auto elettrica deve essere paragonabile a quello delle omologhe a combustione interna.

Pertanto, una progressiva elettrificazione del parco auto potrebbe portare a significativi risultati dal punto di vista ambientale solo se accompagnata da un deciso incremento della produzione di energia da fonti rinnovabili. In tal modo, infatti, non si dovrebbe sopperire alla

maggior richiesta di energia elettrica unicamente attraverso centrali termoelettriche (fonti fossili), peggiorando le emissioni dovute alla produzione di elettricità e quindi l'impatto dei veicoli elettrici sull'ambiente.

Tra le auto convenzionali, quelle alimentate a metano probabilmente sono le più virtuose, in quanto limitano le emissioni di inquinanti, soprattutto considerando la riduzione di peso dovuta all'impiego sempre maggiore di bombole in carbonio.

Le auto ibride, invece, unendo l'efficienza dei propulsori elettrici ad un contenimento delle dimensioni delle batterie, si pongono come alternativa più ecologica alle altre tipologie di vetture.

4.2.1 Riflessioni finali

In Italia, così come in Europa, gli organismi di Governo ribadiscono da tempo la volontà di indirizzare il mercato automobilistico verso vetture meno inquinanti. Tuttavia, l'attuale legislazione, oltre che essere spesso carente e poco incisiva, sembra non prendere in dovuta considerazione tutte le emissioni correlate alle automobili: ad esempio i blocchi del traffico, le ecotasse, gli ecoincentivi paiono riferirsi unicamente alle emissioni allo scarico. L'aspetto del peso delle auto, preponderante nelle emissioni di particolato, non viene adeguatamente considerato.

I blocchi del traffico, che vengono attuati allo scopo di ridurre la concentrazione di particolato presente nell'aria, comportano che le auto appartenenti a certe categorie di emissione vadano incontro a delle limitazioni, come il divieto di accedere ai centri delle città. In questo modo però, si rischia di disincentivare la circolazione di auto datate (ma leggere), mentre auto nuove dal peso elevato (ad esempio SUV) possono circolare liberamente, producendo ingenti quantità di particolato solido, attraverso l'usura di gomme, freni e asfalto, e la risospensione di polveri. Nei blocchi del traffico, quindi, oltre a certe categorie di emissioni, dovrebbe essere vietata la circolazione anche ai veicoli che superino una certa massa a vuoto.

In conclusione appare necessaria una più attenta valutazione dei maggiori fattori di inquinamento delle auto, che non si focalizzi principalmente sul loro impatto in termini di emissione di gas in fase di utilizzo, ma tenga conto, come evidenziato, di altri fattori legati al loro intero ciclo di vita, quali la dimensione ed il peso.

Tale approccio dovrebbe trovare adeguata applicazione in particolare in ambito legislativo, ma anche consentire una maggiore e più completa conoscenza dell'argomento, volta ad indirizzare in maniera più favorevole per l'ambiente le scelte dell'utilizzatore finale.

Bibliografia

- 1) Commissione Europea - Le conseguenze dei cambiamenti climatici, [https://ec.europa.eu/clima/change/consequences_it]
- 2) Wikipedia - Riscaldamento globale, [https://it.wikipedia.org/wiki/Riscaldamento_globale#Cause]
- 3) IPCC, 2007: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- 4) Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, L.V. Alexander, S.K. Allen, N.L. Bindoff, F.-M. Bréon, J.A. Church, U. Cubasch, S. Emori, P. Forster, P. Friedlingstein, N. Gillett, J.M. Gregory, D.L. Hartmann, E. Jansen, B. Kirtman, R. Knutti, K. Krishna Kumar, P. Lemke, J. Marotzke, V. Masson-Delmotte, G.A. Meehl, I.I. Mokhov, S. Piao, V. Ramaswamy, D. Randall, M. Rhein, M. Rojas, C. Sabine, D. Shindell, L.D. Talley, D.G. Vaughan and S.-P. Xie, 2013: Technical Summary. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- 5) Rete Clima - CO2 (anidride carbonica, biossido di carbonio) [<https://www.reteclima.it/co2/>]
- 6) Hoegh-Guldberg, O., D. Jacob, M. Taylor, M. Bindi, S. Brown, I. Camilloni, A. Diedhiou, R. Djalante, K.L. Ebi, F. Engelbrecht, J. Guiot, Y. Hijioka, S. Mehrotra, A. Payne, S.I. Seneviratne, A. Thomas, R. Warren, and G. Zhou, 2018: Impacts of 1.5°C Global Warming on Natural and Human Systems. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press
- 7) European Commission - Road transport: Reducing CO2 emissions from vehicles [https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles_en]
- 8) HDmotori.it - Euro 6D TEMP: tutto quello che c'è da sapere | Speciale emissioni e consumi [<http://www.hdmotori.it/2018/05/24/euro-6d-temp-speciale-emissioni-normativa-auto/>]
- 9) ISPRA - L'andamento delle emissioni [<http://www.isprambiente.gov.it/it/temi/cambiamenti-climatici/landamento-delle-emissioni>]
- 10) Wikipedia - Stati per emissioni di CO2 [https://it.wikipedia.org/wiki/Stati_per_emissioni_di_CO2]
- 11) ISPRA - Report | Annuario dei Dati Ambientali | Emissioni dei gas serra dai trasporti [<https://annuario.isprambiente.it/ada/downreport/html/6827>]

- 12) ISPRA - Report | Annuario dei Dati Ambientali | Emissioni di inquinanti atmosferici dai trasporti
[\[https://annuario.isprambiente.it/ada/downreport/html/6828\]](https://annuario.isprambiente.it/ada/downreport/html/6828)
- 13) Facile.it - 11.125 chilometri: ecco quanto hanno guidato gli italiani nel 2016
[\[https://www.facile.it/news/quant-km-hanno-percorso-in-auto-gli-italiani.html\]](https://www.facile.it/news/quant-km-hanno-percorso-in-auto-gli-italiani.html)
- 14) ACI, Area Professionale Statistica, Agosto 2019 - AUTO-TREND: Analisi statistica sulle tendenze del mercato auto in Italia
[\[http://www.aci.it/fileadmin/documenti/studi_e_ricerche/auto-trend/2019/Auto-trend0819.pdf\]](http://www.aci.it/fileadmin/documenti/studi_e_ricerche/auto-trend/2019/Auto-trend0819.pdf)
- 15) UNRAE - L'Auto 2017, Sintesi Statistica | Il Mercato Italiano negli ultimi 10 anni, Nuove forme di mobilità: dalla proprietà all'uso
[\[http://www.unrae.it/files/AnnualReportUNRAE_2017_web_5b28b32173ff0.pdf\]](http://www.unrae.it/files/AnnualReportUNRAE_2017_web_5b28b32173ff0.pdf)
- 16) Redazione ANSA, 07 giugno 2019 - Più auto in giro, aumentano 'green' ma sale età media mezzi
[\[http://www.ansa.it/canale_motori/notizie/analisi_commenti/2019/06/07/piu-auto-in-giro-aumentano-green-ma-sale-eta-media-mezzi_4df50c92-245c-43c7-b98a-3fafe0505eee.html\]](http://www.ansa.it/canale_motori/notizie/analisi_commenti/2019/06/07/piu-auto-in-giro-aumentano-green-ma-sale-eta-media-mezzi_4df50c92-245c-43c7-b98a-3fafe0505eee.html)
- 17) Barbara Weisz, pmi.it, 1° marzo 2019 - Ecoincentivi ed Ecotassa 2019: guida completa
[\[https://www.pmi.it/economia/green-economy/296439/ecoincentivi-ed-ecotassa-2019-guida-completa.html\]](https://www.pmi.it/economia/green-economy/296439/ecoincentivi-ed-ecotassa-2019-guida-completa.html)
- 18) eLCAR , 2013 - [\[http://www.elcar-project.eu/\]](http://www.elcar-project.eu/)
- 19) EPD Internazional - Coes'è una Dichiarazioni Ambientali di Prodotto (EPD)? - The International EPD® System
[\[https://www.environdec.com/it/\]](https://www.environdec.com/it/)
- 20) Arpae - PM10 - Effetti sulla salute | Aria | Arpae
[\[https://arpae.it/dettaglio_generale.asp?id=120&idlivello=193\]](https://arpae.it/dettaglio_generale.asp?id=120&idlivello=193)
- 21) LowCVP, 1° Agosto 2018 - Understanding the life cycle GHG emissions for different vehicle types and powertrain technologies | Final Report for LowCVP
[\[https://www.lowcvp.org.uk/assets/reports/LowCVP-LCA_Study-Final_Report.pdf\]](https://www.lowcvp.org.uk/assets/reports/LowCVP-LCA_Study-Final_Report.pdf)
- 22) Quora - What is the carbon foot print of manufacturing a Tesla?
[\[https://www.quora.com/What-is-the-carbon-foot-print-of-manufacturing-a-Tesla\]](https://www.quora.com/What-is-the-carbon-foot-print-of-manufacturing-a-Tesla)
- 23) Hyung Chul Kim, Timothy J. Wallington, Renata Arsenault, et al, 1° giugno 2016 - Cradle-to-Gate Emissions from a Commercial Electric Vehicle Li-Ion Battery: A Comparative Analysis, Publication: Environmental Science & Technology, Publisher: American Chemical Society
[\[https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.est.6b00830\]](https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.est.6b00830)
- 24) JRC Eucar Concawe, 2014 - WELL-TO-TANK Report version 4.a: JEC WELL-TO-WHEELS ANALYSIS
[\[https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/eur-scientific-and-technical-research-reports/well-tank-report-version-4a-jec-well-wheels-analysis\]](https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/eur-scientific-and-technical-research-reports/well-tank-report-version-4a-jec-well-wheels-analysis)
- 25) ISPRA, 2019 - Fattori di emissione atmosferica di gas a effetto serra nel settore elettrico nazionale e nei principali Paesi Europei
[\[http://www.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/rapporti/fattori-di-emissione-atmosferica-di-gas-a-effetto-serra-nel-settore-elettrico-nazionale-e-nei-principali-paesi-europei\]](http://www.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/rapporti/fattori-di-emissione-atmosferica-di-gas-a-effetto-serra-nel-settore-elettrico-nazionale-e-nei-principali-paesi-europei)

- 26) Nathaniel Kong, Plug-in Hybrid & Electric Vehicle Research Center, Settembre 2018 - Exploring Electric Vehicle Battery Charging Efficiency
[\[https://ncst.ucdavis.edu/wp-content/uploads/2018/09/Kong_NCST-Fellowship-Report.pdf\]](https://ncst.ucdavis.edu/wp-content/uploads/2018/09/Kong_NCST-Fellowship-Report.pdf)
- 27) Sinanet (ISPRA), 2019 - Informative Inventory Report 2019
[\[http://www.sinanet.isprambiente.it/it/sia-ispra/serie-storiche-emissioni/informative-inventory-report/view\]](http://www.sinanet.isprambiente.it/it/sia-ispra/serie-storiche-emissioni/informative-inventory-report/view)
- 28) Wikipedia - Euro VI [https://it.wikipedia.org/wiki/Euro_VI]
- 29) Rosalind O'Driscolla, Marc E. J. Stettler, Nick Molden, Tim Oxley, and Helen M. ApSimon - Real world CO₂ and NO_x emissions from 149 Euro 5 and 6 diesel, gasoline and hybrid passenger cars
[\[https://spiral.imperial.ac.uk/bitstream/10044/1/55296/2/Revised%20manuscript.pdf\]](https://spiral.imperial.ac.uk/bitstream/10044/1/55296/2/Revised%20manuscript.pdf)
- 30) Transportøkonomisk institutt - Diesel cars have high emissions in real traffic
[\[https://www.toi.no/transport-technology-and-environment/diesel-cars-have-high-emissions-in-real-traffic-article33388-1314.html\]](https://www.toi.no/transport-technology-and-environment/diesel-cars-have-high-emissions-in-real-traffic-article33388-1314.html)
- 31) Jiacheng Yang, Patrick Roth, Thomas D. Durbin, Kent C. Johnson, David R. Cocker, III, Akua Asa-Awuku, Rasto Brezny, Michael Geller, and Georgios Karavalakis - Gasoline Particulate Filters as an Effective Tool to Reduce Particulate and Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Emissions from Gasoline Direct Injection (GDI) Vehicles: A Case Study with Two GDI Vehicles (Environmental Science & Technology 2018 52 (5), 3275-3284, DOI: 10.1021/acs.est.7b05641)
[\[https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.est.7b05641\]](https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.est.7b05641)
- 32) Piotr Bielaczyc, Andrzej Szczotka and Henryk Brodzinski, 2001 – Analysis of the exhaust emissions from vehicles fuelled with petrol or LPG and CNG alternatively (Journal of KONES. Combustion Engines, Vol B, No1-2, 2001)
[\[https://ilot.edu.pl/KONES/2001/JOK2001%20NO%201-2/R43.pdf\]](https://ilot.edu.pl/KONES/2001/JOK2001%20NO%201-2/R43.pdf)
- 33) Ecoscore, 2019 - How to calculate the CO₂ emission from the fuel consumption?
[\[http://ecoscore.be/en/info/ecoscore/co2\]](http://ecoscore.be/en/info/ecoscore/co2)
- 34) Andrew Simons, 2013 - Road transport: new life cycle inventories for fossil-fuelled passenger cars and non-exhaust emissions in ecoinvent v3
[\[https://www.ecoinvent.org/files/2013_simons_ijlca_road_transport_in_ecoinvent_3.pdf\]](https://www.ecoinvent.org/files/2013_simons_ijlca_road_transport_in_ecoinvent_3.pdf)
- 35) F. Amato, A. Karanasiou, T. Moreno, A. Alastuey, J.A.G. Orza, J. Lumbreras, R. Borge, E. Boldo, C. Linares, X. Querol, Dicembre 2016 - Emission factors from road dust resuspension in a Mediterranean freeway
[\[https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231012007510\]](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231012007510)
- 36) Andrew Del-Colle, popularmechanics.com, 2012 - What's Actually Inside an Oil Filter?
[\[https://www.popularmechanics.com/cars/how-to/a8133/whats-actually-inside-an-oil-filter-13272754/\]](https://www.popularmechanics.com/cars/how-to/a8133/whats-actually-inside-an-oil-filter-13272754/)
- 37) Rafael Vazquez-Duhalt, 1988 - Environmental Impact Of Used Motor Oil
[\[https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/2648567\]](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/2648567)
- 38) S. Chin, N. Shafiq, M. Nuruddin - Effects of used engine oil in reinforced concrete beams: the structural behaviour (World Academy Science and Engineering Technology, 63 (2012), pp. 932-938)
[\[https://www.semanticscholar.org/paper/Effects-of-used-Engine-Oil-in-Reinforced-Concrete-Chin-Shafiq/ef8fe6f2e96047b886a381bc8b9c6a4248d6e60c\]](https://www.semanticscholar.org/paper/Effects-of-used-Engine-Oil-in-Reinforced-Concrete-Chin-Shafiq/ef8fe6f2e96047b886a381bc8b9c6a4248d6e60c)

- 39) N. Das, P. Chandran, 2011 - Microbial degradation of petroleum hydrocarbon contaminants: an overview (Biotechnology Research International)
[\[https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21350672\]](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21350672)
- 40) Francesco Donnici, motori.it, Dicembre 2017 - Olio lubrificante usato: da rifiuto pericoloso a risorsa economica
[\[https://www.motori.it/ecoauto/686410/olio-lubrificante-usato-da-rifiuto-pericoloso-risorsa-economica.html\]](https://www.motori.it/ecoauto/686410/olio-lubrificante-usato-da-rifiuto-pericoloso-risorsa-economica.html)
- 41) Oponeo, 2019 - How much does a tyre weigh?
[\[https://www.oponeo.co.uk/tyre-article/how-much-does-a-tyre-weigh\]](https://www.oponeo.co.uk/tyre-article/how-much-does-a-tyre-weigh)
- 42) BLCI, 2003- Life cycle assessment of an average European car tyre
[\[https://ec.europa.eu/environment/archives/waste/pdf_comments/blic_annex.pdf\]](https://ec.europa.eu/environment/archives/waste/pdf_comments/blic_annex.pdf)
- 43) MocautoGroup.com, 1° luglio 2016 - Dopo quanti chilometri un'auto è troppo usata?
[\[https://www.mocautogroup.com/news/sostenibilita/auto-usata-quanti-km/\]](https://www.mocautogroup.com/news/sostenibilita/auto-usata-quanti-km/)
- 44) Raffaello Binelli, ilgiornale.it, 11 novembre 2015 - Che fine fanno le auto rottamate?
[\[http://www.ilgiornale.it/news/cronache/che-fine-fanno-auto-rottamate-1193275.html\]](http://www.ilgiornale.it/news/cronache/che-fine-fanno-auto-rottamate-1193275.html)
- 45) Gao Y., Jiang J., Zhang C., Zhang W., Ma Z., Jiang Y., 2017 - Lithium-ion battery aging mechanisms and life model under different charging stresses. (J. Power Source; 2017:356:103–114)
[\[https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378775317305876\]](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378775317305876)
- 46) Hawkins T.R., Singh B., Majeau-Bettez G., Strømman A.H., 2012 - Comparative environmental life cycle assessment of conventional and electric vehicles. (J. Ind. Ecol, 2012:17:53–64)
[\[https://www.researchgate.net/publication/256048655_Comparative_Environmental_Life_Cycle_Assessment_of_Conventional_and_Electric_Vehicles\]](https://www.researchgate.net/publication/256048655_Comparative_Environmental_Life_Cycle_Assessment_of_Conventional_and_Electric_Vehicles)
- 47) Saxena S., Le Floch C., MacDonald J., Moura S., 2015 - Quantifying EV battery end-of-life through analysis of travel needs with vehicle powertrain models. (J. Power Source. 2015;282:265–276)
[\[https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775315000841\]](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775315000841)
- 48) De Gaspari M. Energy Management Conference; Milan: 26 October 2018. Energy storage su building.
- 49) Melin H.E. Creation Inn; London, 2017 - Circular Opportunities in the Lithium-Ion Industry
- 50) Anna Boyden, Vi Kie Soo Matthew Doolan, 2016 - The Environmental Impacts of Recycling Portable Lithium-Ion Batteries
[\[https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827116300701\]](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827116300701)
- 51) Xiaohong Zheng, Zewen Zhu, Xiao Lin, Yi Zhang, Yi He, Hongbin Cao, Zhi Sun, 2018 - A Mini-Review on Metal Recycling from Spent Lithium Ion Batteries
[\[https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095809917308226\]](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095809917308226)
- 52) Chen X., Luo Ch., Zhang J., Kong J., Zhou T., 2015 - Sustainable recovery of metals from spent lithium-ion batteries: a green process (ACS Sustain. Chem. Eng. 2015;3:3104–3113)
[\[https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acssuschemeng.5b01000\]](https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acssuschemeng.5b01000)