



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Meccanica

IMPATTO AMBIENTALE DEL TRASPORTO PRIVATO

**ENVIRONMENTAL IMPACT OF PRIVATE
TRANSPORT**

Relatore: Chiar.mo
Prof. **Dario Amodio**

Tesi di Laurea di:
Lenti Alessio

A.A. 2021/2022

Indice

Introduzione

1. EMISSIONI NEI MOTORI ENDOTERMICI

- 1.1. ANIDRIDE CARBONICA (CO₂)*
- 1.2. OSSIDI DI ZOLFO (SO_x)*
- 1.3. OSSIDI DI AZOTO (NO_x)*
- 1.4. IDROCARBURI INCOMBUSTI (HC)*
- 1.5. MONOSSIDO DI CARBONIO (CO)*
- 1.6. PARTICOLATO (PM_x)*
- 1.7. CLASSI EURO*

2. EMISSIONI DI CO₂ DEI MOTORI ENDOTERMICI

- 2.1. PARCO AUTO ITALIANO CIRCOLANTE E
CHILOMETRAGGIO TOTALE*
- 2.2. CONSIDERAZIONI SULLE MOTORIZZAZIONI*
- 2.3. CONSUMI IPOTIZZATI*
- 2.4. CALCOLO DELLE EMISSIONI DI CO₂ DEL PARCO AUTO
ATTUALE*
- 2.5. EFFETTI DI UN RADICALE RINNOVAMENTO*

3. PRODUZIONE INDIRETTA DI CO₂ PER UNA MOBILITA' TOTALMENTE ELETTRICA

- 3.1. LA PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA IN ITALIA*
- 3.2. CONSUMI IPOTIZZATI IN kWh*
- 3.3. CALCOLO DELLE EMISSIONI INDIRETTE DI CO₂ DI UN
POTENZIALE PARCO AUTO TOTALMENTE ELETTRICO*
- 3.4. MOBILITA' URBANA CON MICROVETTURE ELETTRICHE*
- 3.5. BATTERIE AL LITIO*
- 3.6. DANNI ED INQUINANTI DELLE BATTERIE AL LITIO*

4. CONCLUSIONI

5. BIBLIOGRAFIA

Introduzione

Come ben noto, la nostra esistenza sul pianeta Terra inizia ad essere un peso per l'equilibrio di quest'ultimo, in particolare per l'eccessiva produzione di sostanze che minano il normale comportamento dell'atmosfera.

Per questo le politiche socioeconomiche intraprese, in primis a livello mondiale, ma anche a livello europeo ed italiano, cercano di trasformare le nostre abitudini e i nostri consumi.

Uno degli ambiti su cui si è più lavorato è quello della mobilità, con un focus specifico sul trasporto privato. Basti pensare che il piano europeo prevede lo stop alle vendite di auto con emissioni nocive, in cui quindi si comprendono tutte quelle con motore endotermico, a partire dal 2035.

La soluzione sembrerebbe essere quella delle auto elettriche, ma anche i grandi marchi fanno notare la necessità di investire su tecnologie ancora più promettenti, come quella delle pile a combustibile.

In realtà, già molti produttori, se non tutti, hanno parzialmente o totalmente convertito i propri modelli con motore "tradizionale" in equivalenti ibridi o full-electric, anche grazie ai corposi investimenti europei ed extra-europei.

L'auto elettrica ha il notevole vantaggio di non emettere direttamente sostanze nocive, come la CO₂, gli ossidi di zolfo (SO_x) o quelli di azoto (NO_x), gli idrocarburi incombusti (HC), il monossido di carbonio (CO) e il particolato carbonioso (PM_x); per di più ha un ottimo rendimento, decisamente migliore rispetto ai motori endotermici.

Un altro vantaggio è la piacevolezza di utilizzo, dal momento che tutti i rumori legati alla combustione del carburante e al funzionamento dei motori classici sono assenti.

D'altro canto, l'auto elettrica ha comunque bisogno di energia, che non può essere prodotta all'interno dei pacchi batterie. Di conseguenza l'effettiva emissione di sostanze inquinanti è legata al modo in cui viene prodotta l'elettricità sul territorio.

Inoltre, i materiali necessari alla produzione di batterie al litio, che sono le più avanzate, sono concentrati in pochi paesi, portando ad uno sfruttamento dei terreni, del lavoro (anche minorile) e ad una concorrenza commerciale affiata.

Un esempio è l'elemento base di queste batterie: il litio. Infatti, il paese

che ne possiede la più grande riserva è il Cile, con 8 milioni di tonnellate su 17 stimate in tutto il mondo. L'estrazione in questa regione provoca notevoli danni ambientali perché richiede moltissima acqua ed energia.

Quindi parlare di soluzione eco-compatibile e assolutamente green per questo tipo di vetture è in realtà profondamente incorretto.

L'obiettivo sarà quindi confrontare quanto più approfonditamente possibile i vari mezzi, tenendo anche conto del diverso comportamento sulle varie tipologie di strada.

Attenzione: tutti i dati raccolti e tutte le considerazioni effettuate sono state fatte in riferimento ai tempi precedenti la pandemia e la guerra russo-ucraina, quindi in condizioni normali, senza fluttuazioni dovute a particolari eventi.

CAPITOLO 1

EMISSIONI NEI MOTORI ENDOTERMICI

1.1 ANIDRIDE CARBONICA (CO₂)

L'anidride carbonica, nota anche come CO₂, è la prima imputata nel riscaldamento globale, anche se non è l'unica sostanza che causa l'effetto serra.

Per questa ragione è stato ideato il Global Warming Potential (GWP) che raffronta i gas serra con la CO₂. Infatti, questo fattore esprime quanto i gas provochino l'effetto serra indipendentemente dalla loro massa, prendendo l'anidride carbonica con valore unitario.

Un esempio è il metano che ha un GWP pari a 25. Ciò significa che ha un effetto pari a 25 volte quello causato dall'anidride carbonica. Ma allora perché questo non mette molto più in allarme rispetto alla CO₂?

Perché le emissioni di metano sono di molto inferiori rispetto a quest'ultima.

Ritornando ai motori a combustione interna, la CO₂ è una diretta conseguenza della combustione, cioè dell'ossidazione del carburante.

Prendendo in esame i vari combustibili, bruciando un litro di benzina (0,68 kg) si originano 2,38 kg di anidride; per un litro di gasolio (0,835 kg), 2,65 kg di CO₂; per un kg di metano, 2,75 kg di CO₂; in ultimo, per un litro di GPL (0,52 kg), 1,61 kg di CO₂.

Si potrebbe essere tratti in inganno dal fatto che gasolio e metano hanno i più alti valori di anidride prodotta, ma in realtà non sono i più inquinanti. Il primo non lo è perché la motorizzazione a gasolio ha notoriamente consumi più bassi, grazie anche al miglior rendimento del ciclo Diesel; il secondo semplicemente perché è riferito ad un kg, che equivale a 1,52 litri.

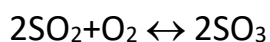
Se ci si riferisse ad un chilogrammo di combustibile, si avrebbe per la benzina la generazione di 3,5 kg di CO₂, per il gasolio 3,174 kg di CO₂, per il GPL 1,173 kg di CO₂ e per il metano lo stesso valore espresso in precedenza.

Tutto questo fa quindi intuire che la sostanza da tenere più in considerazione è l'anidride carbonica, a causa della facilità con cui se ne producono grandi quantità.

1.2 OSSIDI DI ZOLFO (SO_x)

Gli ossidi di zolfo più noti e dannosi prodotti nei motori a combustione

interna sono il biossido di zolfo (SO₂), noto anche come anidride solforosa, e il triossido di zolfo (SO₃), detto anche anidride solforica. Spesso la prima, quando immessa in ambiente, si ossida divenendo la seconda.



Questi sono il risultato della reattività dello zolfo con l'ossigeno ad alte temperature.

Lo zolfo è contenuto principalmente nel gasolio e negli oli lubrificanti. Proprio per limitare la produzione di queste sostanze, i combustibili possono contenere al massimo 10 mg di zolfo per kg di combustibile.

I problemi connessi alla loro presenza sono:

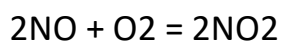
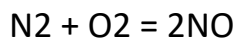
- irritazioni alle vie respiratorie per concentrazioni pari a 100 µg/m³ e problemi man mano più importanti al crescere dei livelli di esposizione;
- generazione di particolato;
- produzione dell'acido solforico, che acidifica le piogge, quando SO₃ entra in contatto con il vapore acqueo.



1.3 OSSIDI DI AZOTO (NO_x)

Gli ossidi di azoto regolamentati sono il monossido di azoto (NO) e il diossido di azoto (NO₂) e sono, in particolare, il tallone d'Achille dei motori Diesel.

Questi si formano in camera di combustione grazie all'elevata temperatura che porta l'azoto e l'ossigeno, già presenti nell'aria ma non reattivi tra loro in condizioni atmosferiche, ad unirsi.



NO e NO₂ hanno in generale effetti dannosi sulla funzionalità polmonare e sull'acidificazione delle piogge.

Possono, però, essere limitati grazie all'adozione di diverse tecnologie, ad esempio il sistema di ricircolo dei gas di scarico (EGR, Exhaust Gas Recirculation), oppure la trappola LNT (Lean NO_x Trap), o ancora il catalizzatore SCR (Selective Catalyst Reduction).

1.4 IDROCARBURI INCOMBUSTI (HC)

Gli idrocarburi sono quelle molecole organiche composte solo da atomi di carbonio e di idrogeno.

Ogni combustibile è formato da idrocarburi, la cui ossidazione libera energia che dovremmo essere in grado quanto più di sfruttare.

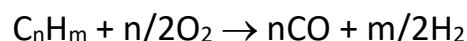
Purtroppo, non sempre si riesce a bruciare tutta la miscela aria/combustibile che immettiamo e per questo motivo gli idrocarburi che fuoriescono dal cilindro sono detti incombusti.

Questi sono dannosi per l'uomo in vari modi dal momento che ne fanno parte diverse molecole.

Per limitarne l'emissione si cerca di ottimizzare il rapporto aria/combustibile, rendendo la miscela magra, e facendo sì che non si creino zone di miscela grassa. Inoltre, si cerca di non abbassare eccessivamente la temperatura delle pareti del cilindro, su cui altrimenti potrebbero aderire queste sostanze che, di conseguenza, non brucerebbero. In ultimo, si montano allo scarico le marmitte catalitiche ossidanti.

1.5 MONOSSIDO DI CARBONIO (CO)

Altra molecola regolamentata tra le emissioni è il monossido di carbonio (CO), prodotto a causa dell'ossidazione parziale degli idrocarburi che formano i combustibili.



Questa deve essere quanto più limitata perché è una potente emotosina inodore, incolore ed insapore. Per questo sulle auto già da molti anni è obbligatorio montare dei convertitori catalitici ossidanti, che, come già detto, sono utili anche per la riduzione degli idrocarburi incombusti.

1.6 PARTICOLATO (PM_x)

Il particolato è un insieme di polveri di varie natura, composizione e dimensioni.

Si suddivide in particolato grossolano e particolato fine, separati dalla dimensione del diametro aerodinamico di 10 μm.

Sono anch'essi normati a causa della pericolosità sulla salute delle polveri fini, cioè PM₁₀ e PM_{2,5}, di diametri rispettivamente inferiori a 10 e 2,5 μm.

L'OMS ha infatti classificato tutte queste polveri come cancerogene.

Sono in particolare prodotti dai motori Diesel, ma a partire dalla classe Euro V ne sono state limitate le emissioni anche nelle motorizzazioni a benzina.

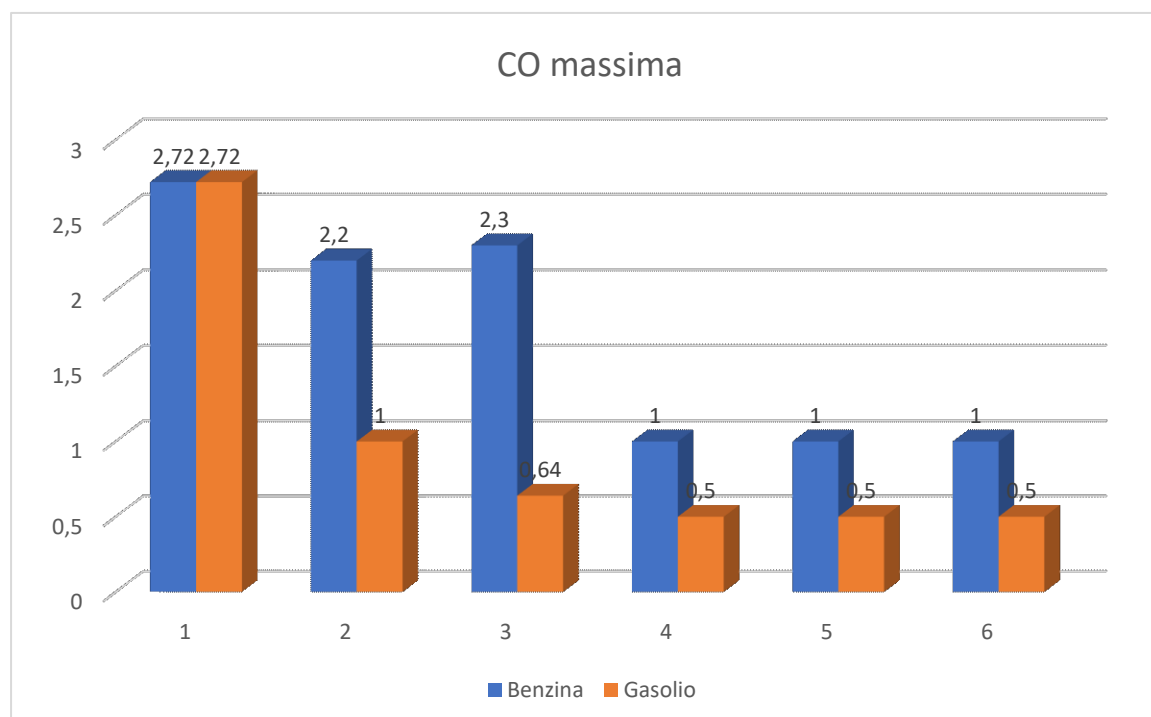
Per limitarne la dispersione i produttori di auto montano sulle vetture il Filtro Antiparticolato (FAP) oppure il Diesel Particulate Filter (DPF).

1.7 CLASSI EURO

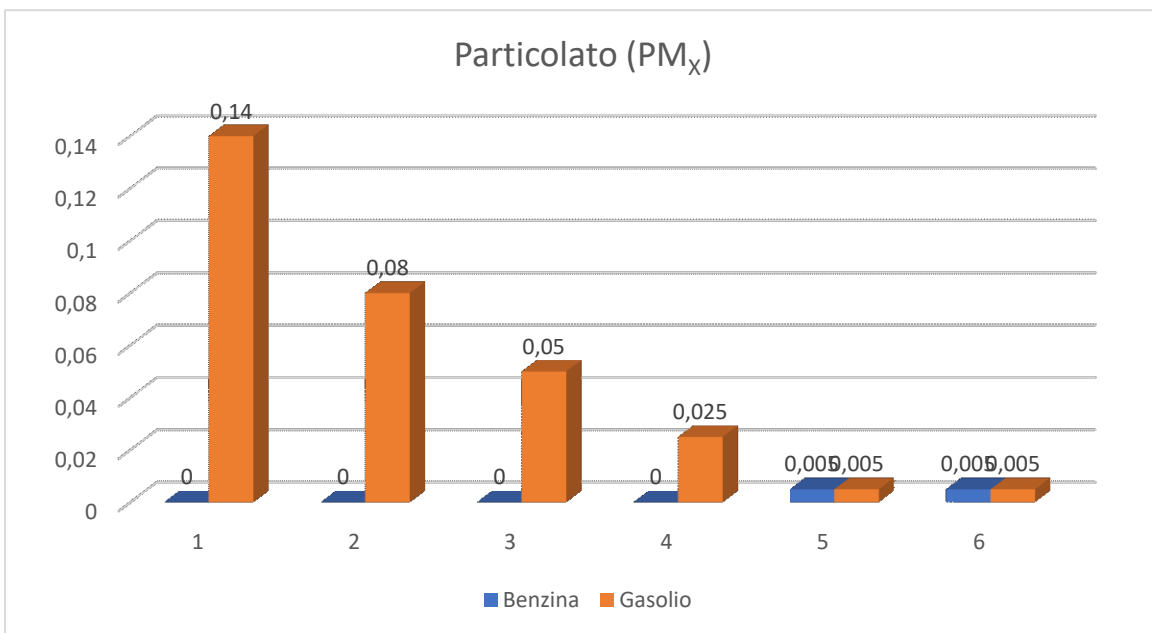
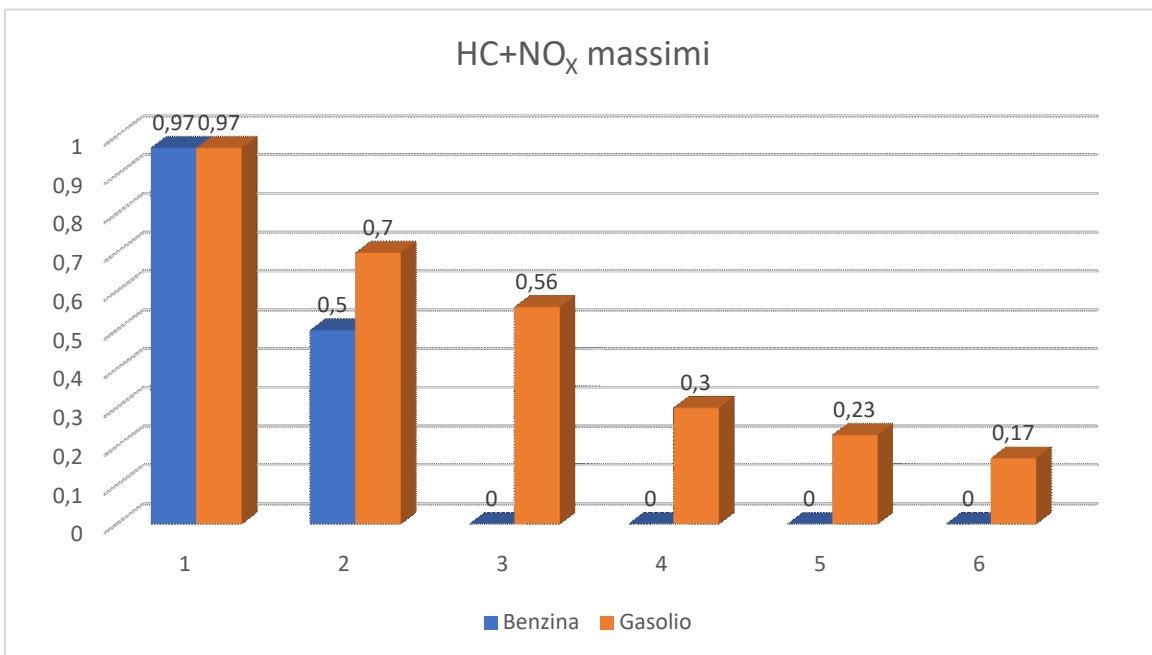
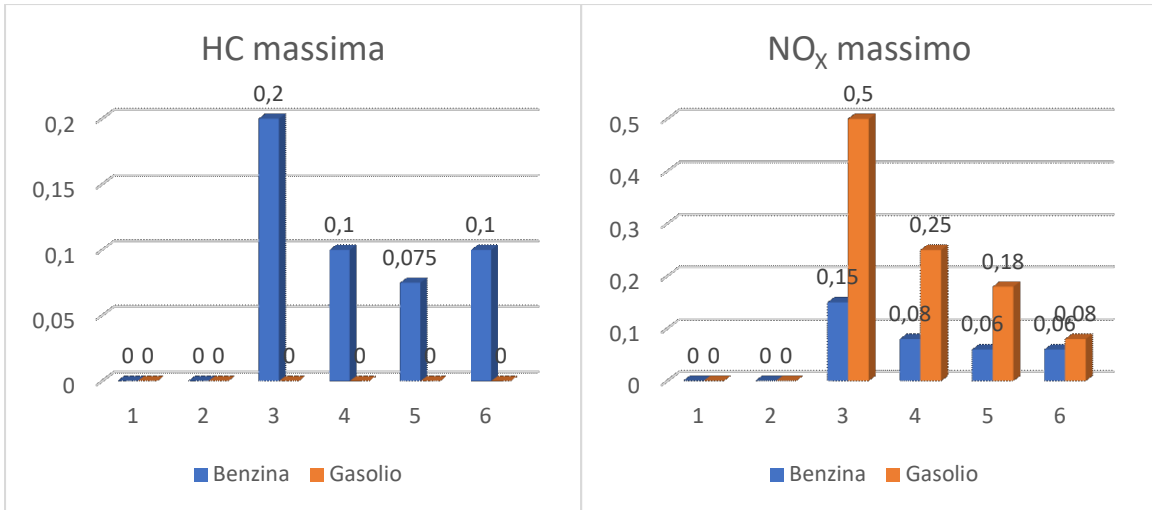
Parallelamente al continuo miglioramento sui consumi dato dalle necessità di ridurre l'inquinamento, i costi legati all'uso e di essere maggiormente appetibili sul mercato, le auto con motore a scoppio hanno visto il progredire di norme europee sempre più stringenti sulle emissioni delle sostanze di cui si è discusso.

Le prime che hanno visto la luce sono state le Euro 1, messe in atto a partire dal 1° gennaio 1993. Sono state seguite e sostituite poi dalle Euro 2 (1997), Euro 3 (2001), Euro 4 (2006), Euro 5 (2009) e in ultimo Euro 6 (2015). Chiaramente ogni norma sovrascrive le precedenti.

Ecco come sono andate migliorando le emissioni massime.



Il convertitore catalitico ossidante (marmitta catalitica) è la causa del notevole abbassamento della CO massima dei motori Diesel a partire dall'Euro 2; infatti, in precedenza, per le norme Euro 1 essa era necessaria solo per le motorizzazioni a benzina.



Attenzione! Quando il valore è nullo significa che le restrizioni sono applicate su parametri simili, ad esempio sui singoli HC e NO_x piuttosto che HC+NO_x, oppure perché non vigono limitazioni, come il particolato nei motori a benzina fino all'Euro 4.

La categoria Euro 6 al suo interno racchiude più normazioni: 6a, 6b, 6c, 6d-temp, 6d. Tra loro cambiano i metodi di rilevazione degli inquinanti.

CAPITOLO 2

EMISSIONI DI CO₂ DEI MOTORI ENDOTERMICI

Le analisi che si faranno d'ora in poi sui motori a combustione interna riguarderanno soltanto la CO₂, perché l'interesse collettivo è focalizzato sull'effetto serra causato dal trasporto privato, non su tutte le problematiche ambientali e sanitarie legate agli altri inquinanti.

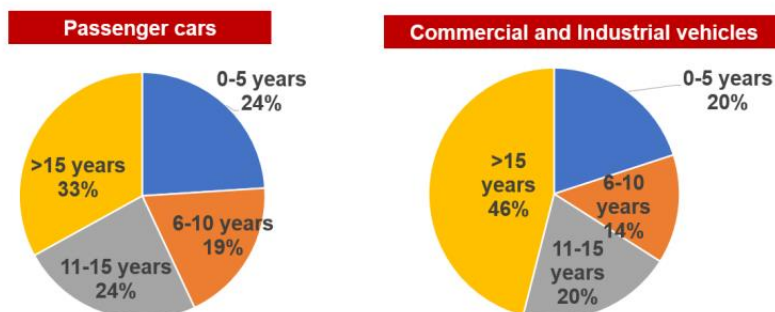
2.1 PARCO AUTO ITALIANO CIRCOLANTE E CHILOMETRAGGIO TOTALE

È evidente che il parco auto circolante sulle strade italiane non è molto giovane e una conferma la si riscontra negli studi dell'ANFIA (Associazione Nazionale Filiera Industria Automobilistica).

The Italian automotive industry during 2019



VEHICLES IN USE BY AGE In %



VEHICLES IN USE BY TYPE AND POWER SUPPLY

	Petrol	Petrol/LPG	Petrol/CNG	Diesel	Hybrid Petrol-EL	Hybrid Diesel-EL	BEV	Others	Not id.	Total
Passenger cars	18,174,338	2,574,287	965,340	17,467,776	316,209	18,359	22,728	519	5,676	39,545,232
Goods lorries	194,917	49,506	92,324	3,833,512	1,042	837	5,243	24	661	4,178,066
Special Vehicles	20,939	7,229	5,637	716,343	56	21	650	5	125	751,005
Road Tractors	157	41	1,850	187,963	1	1	28	1	261	190,303
Buses	443	297	4,729	93,960	8	126	537	12	37	100,149
Total CVs	216,456	57,073	104,540	4,831,778	1,107	985	6,458	42	1,084	5,219,523
Total MVs	18,390,794	2,631,360	1,069,880	22,299,554	317,316	19,344	29,186	561	6,760	44,764,755

[1]

Quello che però è utile sapere con maggior precisione è come le auto sono distribuite in base ad età e alimentazione. Il primo dei due punti viene in realtà affrontato con le classi Euro, dal momento che si ha dati precisi dell'ANFIA e quando queste norme sono state poste in essere o sostituite.

In base a ciò si possono ipotizzare i consumi delle auto, considerando, quando possibile, i poteri calorifici dei combustibili.

PARCO CIRCOLANTE AUTOVETTURE PER CLASSI EURO E ALIMENTAZIONE
CARS IN USE BY EURO CLASSES (based on EMISSION LIMITS) AND FUEL

	EURO 0	EURO 1	EURO 2	EURO 3	EURO 4	EURO 5	EURO 6	N.I.	TOTALE	%
2017										
BENZINA/Petrol	2.040.795	841.305	2.892.722	2.561.888	4.888.075	2.228.295	1.828.447	19.238	18.106.563	47,2
DIESEL	580.877	193.088	995.562	3.015.275	5.277.014	4.078.014	2.758.093	413	16.899.738	43,9
BZ-GPL/Petrol-LPG	208.591	62.478	159.225	112.122	935.892	481.338	351.020	354	2.309.020	6,0
BZ-METANO/Petrol-CNG	38.219	13.755	83.064	54.110	343.038	272.725	153.729	64	928.704	2,4
ELE-IBRID/BEV-Hybrids	6	-	1	18	6.886	51.259	119.322	7.500	185.052	0,5
ALTRE/Others	433	1	3	11	15	16	6	-	485	0,0
NON IDENT	3.492	56	20	113	57	4	-	2.019	5.761	0,0
TOTALE 2017	3.768.213	1.110.683	4.100.597	5.743.335	11.451.577	7.109.651	5.206.617	29.648	38.520.321	100,0
2018										
BENZINA/Petrol	2.881.531	777.891	2.801.285	2.387.314	4.709.639	2.199.846	2.508.703	19.193	18.083.402	48,3
DIESEL	574.475	183.495	905.140	2.772.148	5.098.605	4.033.343	3.751.274	410	17.318.888	44,4
BZ-GPL/Petrol-LPG	201.241	58.915	144.071	108.328	921.780	488.453	488.720	354	2.409.840	6,2
BZ-METANO/Petrol-CNG	38.092	12.592	48.285	49.943	337.987	272.411	190.830	64	945.184	2,4
ELE-IBRID/BEV-Hybrids	7	-	2	18	6.520	49.381	188.556	12.158	258.640	0,7
ALTRE/Others	451	1	3	9	14	16	11	-	505	0,0
NON IDENT	3.476	51	18	96	47	3	-	2.020	5.711	0,0
TOTALE 2018	3.696.273	1.032.945	3.696.804	5.317.852	11.072.552	7.043.453	7.124.094	34.197	39.018.170	100,0
2019										
BENZINA/Petrol	2.842.879	728.081	2.341.511	2.209.003	4.517.355	2.187.825	3.350.759	19.145	18.174.338	48,0
DIESEL	571.347	176.012	822.415	2.520.071	4.882.470	3.985.088	4.509.066	427	17.467.776	44,2
BZ-GPL/Petrol-LPG	198.552	58.691	133.817	107.121	912.709	501.061	684.183	353	2.574.287	6,5
BZ-METANO/Petrol-CNG	34.311	11.688	40.707	45.817	331.672	271.929	229.174	64	965.340	2,4
ELE-IBRID/BEV-Hybrids	-	-	-	-	6.058	47.539	280.959	22.740	357.296	0,9
ALTRE/Others	485	1	2	7	15	16	13	-	519	0,0
NON IDENT	3.488	48	16	82	41	2	-	2.019	5.676	0,0
TOTALE 2019	3.650.822	970.479	3.338.268	4.882.101	10.650.320	6.973.440	9.035.054	44.748	39.545.232	100,0

Fonte/Source: ACI

In Italia l'adeguamento della flotta veicolare agli standard ambientali per i nuovi veicoli procede con un ritmo fisiologico di sostituzione del parco.
Per le automobili è ancora presente una quota non trascurabile (20,5% del parco totale auto) di veicoli a benzina di classe sEuro 4, mentre per le auto diesel questa quota è pari al 10%, insieme rappresentano il 31% del parco.
La diffusione dei veicoli più nuovi non è omogenea a livello nazionale. In molte regioni del centro-sud (Marche, Umbria, Lazio, Abruzzo, Molise, Campania, Basilicata, Puglia, Calabria, Sicilia e Sardegna) sono ancora caratterizzate da una presenza di autoveicoli di tipo Euro 6 inferiore alla media nazionale.
Inoltre al Sud, i veicoli di "vecchia generazione" (fino allo standard Euro 4 incluso) costituiscono ancora più del 24% del parco totale auto.
Viceversa in Piemonte, Valle d'Aosta, Lombardia, Liguria, Friuli Venezia Giulia, Trentino-Alto Adige, Veneto, Emilia-Romagna, lo sviluppo della motorizzazione è caratterizzato da veicoli conformi agli standard emissivi più recenti (Euro 5-6), che costituiscono quasi un quarto dell'intero parco.
In Italy, the adaptation of the vehicle fleet to environmental standards for new vehicles proceeds at the physiological pace of vehicle-in-use replacement.
For cars there is still a non-negligible share (20.5% of the total car fleet) of petrol vehicles of class s Euro 4, while for diesel cars this share is equal to 10%; together they represent 31% of the fleet.
The dissemination of the newer vehicles is not the same at a national level. Many regions of central-southern Italy (Marche, Umbria, Lazio, Abruzzo, Molise, Campania, Basilicata, Puglia, Calabria, Sicily and Sardinia) are still marked by a lower presence of Euro 6 vehicles, compared to the national average. Moreover, in the South, the "old generation" vehicles (up to Euro 4 included) are still more than 24% of the vehicles in use.
On the contrary, in Piedmont, Valle d'Aosta, Lombardy, Liguria, Friuli Venezia Giulia, Trentino-Alto Adige, Veneto, Emilia-Romagna, the development of the motorization is marked by vehicles meeting the latest emission standards (Euro 5/6), representing about a fourth of the entire fleet.

[2]

Il chilometraggio totale lo si ricava, invece, in base ai dati riportati dall'Osservatorio UnipolSai del 2019, ma riferito al 2018. Quest'ultimo ha potuto fare una stima dei chilometri percorsi in media ogni anno da ciascuno dei quattro milioni di automobilisti che hanno scelto di installare la scatola nera Unibox sulla propria vettura.

La stima è di 11.885 km per ogni vettura, che moltiplicata per il numero di vetture circolanti in Italia dà un chilometraggio totale di circa $4,7 \cdot 10^{11}$ km.

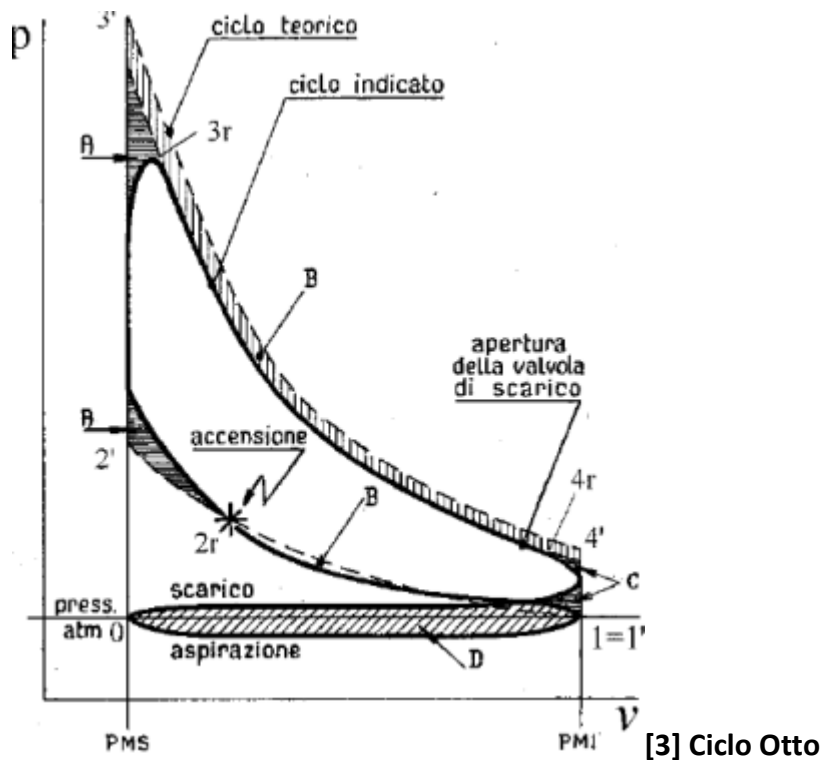
2.2 CONSIDERAZIONI SULLE MOTORIZZAZIONI

Le vetture alimentate a gasolio seguono un ciclo diverso da quello delle auto a benzina, metano o GPL. Le prime effettuano un ciclo Diesel, mentre le seconde un ciclo Otto.

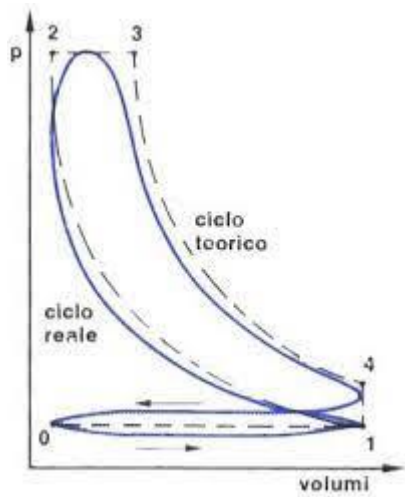
La differenza sostanziale è su come viene introdotta l'energia sotto forma di calore. Infatti, da un punto di vista teorico, nel ciclo Otto la trasformazione in cui si introduce calore è un'isocora (cioè a volume costante), invece nel ciclo Diesel è un'isobara (a pressione costante).

Dal punto di vista pratico, si osserva che l'accensione della miscela nel primo caso è a carico della candela, la quale, scoccando una scintilla, avvia la reazione di ossidazione/combustione. Nel secondo invece, la combustione avviene grazie alle alte temperature raggiunte in fase di compressione.

I grafici rappresentativi dei due cicli sono i seguenti.



[3] Ciclo Otto



[4] Ciclo Diesel

Per quanto riguarda lo studio dei consumi si parte dai motori a gasolio e a benzina.

Le autovetture alimentate a GPL o a metano effettuano lo stesso ciclo di quelle a benzina e, quindi, hanno un motore con stessa architettura.

Questo fa sì che, per calcolare i consumi, si dovrà fornire sempre lo stesso quantitativo di energia di quelle a benzina, ma con carburanti diversi.

Perciò, quello che si studierà saranno le relazioni tra i poteri calorifici.

Combustibile	Potere calorifico inferiore [MJ/kg]	Densità [kg/litro]
Gasolio	44,4	0,835
Benzina	43,6	0,68
GPL	46,1	0,52
Metano	52	0,656

[5]

Per la motorizzazione a GPL (ϕ), si confronta il potere calorifico per litro di questo carburante con quello della benzina (β), ricordando che bisogna moltiplicare il valore riportato in tabella per la densità:

-Benzina: $PCI_{\beta} \cdot \rho_{\beta} = 43,6 \cdot 0,68 = 29,648$ MJ/l;

-GPL: $PCI_{\phi} \cdot \rho_{\phi} = 46,1 \cdot 0,52 = 23,972$ MJ/l.

Quindi sarà necessaria una percentuale in litri di GPL in più pari a:

$$\frac{PCI_{\beta} \cdot \rho_{\beta} - PCI_{\phi} \cdot \rho_{\phi}}{PCI_{\phi} \cdot \rho_{\phi}} \cdot 100 = \frac{29,648 - 23,972}{23,972} \cdot 100 \approx 23,68\%$$

Una volta determinati i consumi delle auto a benzina, quelli delle vetture a GPL saranno il 123,68%.

Il ragionamento per il metano (γ) è simile, ma si deve tenere conto del fatto che spesso il consumo e la vendita di questo carburante è espresso in kg.

Per questo, avendo un consumo specifico C_{β} di un motore a benzina, il consumo teorico è pari a:

$$\frac{PCI_{\beta} \cdot \rho_{\beta} \cdot C_{\beta}}{PCI_{\gamma}} \cdot 100 = 0,57 \cdot C_{\beta}$$

Nella pratica questo fattore 0,57 non è raggiungibile. Una delle motivazioni potrebbe essere semplicemente che la detonazione risulti impossibile con un così basso quantitativo di metano all'interno del cilindro.

Perciò si utilizzeranno dei fattori maggiori di 0,57, ma comunque inferiori all'unità.

2.3 CONSUMI IPOTIZZATI

Chiaramente non tutte le auto si comportano allo stesso modo; ci sono auto più pesanti, altre con maggiori potenze, altre ancora adeguate soprattutto al trasporto urbano.

Perciò si sono ipotizzati consumi per le varie alimentazioni che possano essere un'approssimazione di un valore medio. Il tutto tenendo conto della

classe Euro a cui appartengono queste auto.

Attenzione! D'ora in poi con Euro 0 si intendono tutte le vetture non soggette a restrizioni Euro, quindi precedenti al 1993.

CLASSI EURO 0/EURO 1

Motori a benzina Euro 0/Euro 1: consumo su terreno misto 8 l/100km, su terreno urbano 10 l/100km, su terreno extraurbano 7 l/100km

Motori a gasolio Euro 0/Euro 1: consumo su terreno misto 6,5 l/100km, su terreno urbano 8,5 l/100km, su terreno extraurbano 5,5 l/100km

Motori a metano Euro 0/Euro 1: consumo su terreno misto 6 kg/100km, su terreno urbano 7,5 kg/100km, su terreno extraurbano 5,3 kg/100km (fattore moltiplicativo di 0,75 anziché 0,57)

Motori a GPL Euro 0/Euro 1: consumo su terreno misto 9,9 l/100km, su terreno urbano 12,4 l/100km, su terreno extraurbano 7,4 l/100km

CLASSE EURO 2

Motori a benzina Euro 2: consumo su terreno misto 7,3 l/100km, su terreno urbano 9 l/100km, su terreno extraurbano 6,8 l/100km

Motori a gasolio Euro 2: consumo su terreno misto 6 l/100km, su terreno urbano 7,5 l/100km, su terreno extraurbano 5,3 l/100km

Motori a metano Euro 2: consumo su terreno misto 5,5 kg/100km, su terreno urbano 6,7 kg/100km, su terreno extraurbano 5,1 kg/100km (fattore moltiplicativo di 0,75 anziché 0,57)

Motori a GPL Euro 2: consumo su terreno misto 9 l/100km, su terreno urbano 11,1 l/100km, su terreno extraurbano 8,4 l/100km

CLASSE EURO 3

Motori a benzina Euro 3: consumo su terreno misto 7 l/100km, su terreno urbano 8,5 l/100km, su terreno extraurbano 6,5 l/100km

Motori a gasolio Euro 3: consumo su terreno misto 5,5 l/100km, su terreno urbano 6,5 l/100km, su terreno extraurbano 5 l/100km

Motori a metano Euro 3: consumo su terreno misto 5 kg/100km, su terreno urbano 6,1 kg/100km, su terreno extraurbano 4,7 kg/100km (fattore moltiplicativo di 0,72 anziché 0,57)

Motori a GPL Euro 3: consumo su terreno misto 8,7 l/100km, su terreno urbano 10,5 l/100km, su terreno extraurbano 8 l/100km

CLASSE EURO 4

Motori a benzina Euro 4: consumo su terreno misto 6,7 l/100km, su terreno urbano 8 l/100km, su terreno extraurbano 6,2 l/100km

Motori a gasolio Euro 4: consumo su terreno misto 5,2 l/100km, su terreno urbano 6,2 l/100km, su terreno extraurbano 4,8 l/100km

Motori a metano Euro 4: consumo su terreno misto 4,7 kg/100km, su terreno urbano 5,6 kg/100km, su terreno extraurbano 4,3 kg/100km (fattore moltiplicativo di 0,7 anziché 0,57)

Motori a GPL Euro 4: consumo su terreno misto 8,3 l/100km, su terreno urbano 9,9 l/100km, su terreno extraurbano 7,7 l/100km

CLASSE EURO 5

Motori a benzina Euro 5: consumo su terreno misto 6,5 l/100km, su terreno urbano 7,8 l/100km, su terreno extraurbano 6 l/100km

Motori a gasolio Euro 5: consumo su terreno misto 5 l/100km, su terreno urbano 6 l/100km, su terreno extraurbano 4,5 l/100km

Motori a metano Euro 5: consumo su terreno misto 4,4 kg/100km, su terreno urbano 5,3 kg/100km, su terreno extraurbano 4,1 kg/100km (fattore moltiplicativo di 0,68 anziché 0,57)

Motori a GPL Euro 5: consumo su terreno misto 8 l/100km, su terreno urbano 9,6 l/100km, su terreno extraurbano 7,4 l/100km

CLASSE EURO 6

Motori a benzina Euro 6: consumo su terreno misto 6,2 l/100km, su terreno urbano 7,5 l/100km, su terreno extraurbano 5,6 l/100km

Motori a gasolio Euro 6: consumo su terreno misto 4,7 l/100km, su terreno urbano 5,7 l/100km, su terreno extraurbano 4,2 l/100km

Motori a metano Euro 6: consumo su terreno misto 4 kg/100km, su terreno urbano 4,9 kg/100km, su terreno extraurbano 3,7 kg/100km (fattore moltiplicativo di 0,65 anziché 0,57)

Motori a GPL Euro 6: consumo su terreno misto 7,7 l/100km, su terreno urbano 9,3 l/100km, su terreno extraurbano 6,9 l/100km

2.4 CALCOLO DELLE EMISSIONI DI CO₂ DEL PARCO AUTO ATTUALE

Con tutti questi dati in mano, si può ora cercare di calcolare, in maniera approssimata ma comunque affidabile, le emissioni dell'unico gas serra prodotto dalle autovetture con motore a scoppio: la CO₂.

Il calcolo parte da ipotesi su come sono effettuate le percorrenze; in genere, si prende un 25% su strada urbana, un altro 25% su extraurbana e il restante 50% su percorsi misti, ad eccezione delle classi Euro 0, 1 e 2.

Le auto delle classi appena citate avranno una bassa percorrenza che, oltretutto, sarà solo mista; questo perché in città hanno notevoli restrizioni alla circolazione, quindi non percorreranno un numero di chilometri

rilevante in urbano; inoltre sono inadeguate al trasporto extraurbano, per via di diversi fattori, quale ad esempio le basse velocità raggiungibili.

Il conto in generale sarà di questo tipo: si divideranno i chilometri percorsi su ogni tipo di strada per il consumo specifico, in modo da ricavare i litri di carburante consumati per ogni auto; poi si moltiplicheranno questi litri per il numero di auto appartenenti a quella classe; in ultimo si moltiplicherà il valore ottenuto per i chilogrammi di CO₂ prodotta dall'ossidazione di un litro/chilogrammo di quel carburante.

EURO 0, 1, 2

Le vetture di queste classi percorreranno 5000 km all'anno solo su percorsi misti.

Euro 0:

- a benzina: 5000 km "misti", quindi 400 l/auto; totale litri=400·2.842.679=1.137.071.600 litri di benzina, che producono 2,706 milioni di tonnellate di CO₂;
- a gasolio: 5000 km "misti", quindi 325 l/auto; totale litri=325·571.347=185.687.775 litri di gasolio, che producono 0,492 milioni di tonnellate di CO₂;
- a metano: 5000 km "misti", quindi 300 kg/auto; totale kg=300·34.311=10.293.300 kg di metano, che producono 0,028 milioni di tonnellate di CO₂;
- a GPL: 5000 km "misti", quindi 495 l/auto; totale litri=495·198.552=98.283.240 litri di GPL, che producono 0,158 milioni di tonnellate di CO₂.

Il totale della CO₂ prodotta ogni anno dalle auto Euro 0 è pari a 3,384 milioni di tonnellate.

Euro 1:

- a benzina: 5000 km "misti", quindi 400 l/auto; totale litri=400·726.061=290.424.400 litri di benzina, che producono 0,691 milioni di tonnellate di CO₂;
- a gasolio: 5000 km "misti", quindi 325 l/auto; totale litri=325·176.012=57.203.900 litri di gasolio, che producono 0,152 milioni di tonnellate di CO₂;
- a metano: 5000 km "misti", quindi 300 kg/auto; totale kg=300·11.666=3.499.800 kg di metano, che producono 0,010 milioni di tonnellate di CO₂;
- a GPL: 5000 km "misti", quindi 495 l/auto; totale litri=495·56.691=28.062.045 litri di GPL, che producono 0,045 milioni di tonnellate di CO₂.

Il totale della CO₂ prodotta ogni anno dalle auto Euro 1 è pari a 0,898 milioni di tonnellate.

Euro 2:

- a benzina: 5000 km “misti”, quindi 365 l/auero; totale litri=365·2.341.511=854.651.515 litri di benzina, che producono 2,034 milioni di tonnellate di CO₂;
- a gasolio: 5000 km “misti”, quindi 300 l/auero; totale litri=300·822.415=246.724.500 litri di gasolio, che producono 0,654 milioni di tonnellate di CO₂;
- a metano: 5000 km “misti”, quindi 275 kg/auero; totale kg=275·40.707=11.194.425 kg di metano, che producono 0,031 milioni di tonnellate di CO₂;
- a GPL: 5000 km “misti”, quindi 450 l/auero; totale litri=450·133.617=60.127.650 litri di GPL, che producono 0,097 milioni di tonnellate di CO₂.

Il totale della CO₂ prodotta ogni anno dalle auto Euro 2 è pari a 2,816 milioni di tonnellate.

EURO 3

Si suppone che le vetture appartenenti alla categoria Euro 3 facciano circa 8000 km/anno, di cui 2000 in urbano, 4000 misti e 2000 su strade extraurbane.

Euro 3:

- a benzina: 2000 km “urbani”, quindi 170 l/auero; 4000 km “misti”, quindi 280 l/auero; 2000 km “extraurbani”, quindi 130 l/auero. Il totale dei litri per auto è di 580 l/auero, per un totale di tutte le auto pari a 580·2.209.003=1.281.221.740 litri di benzina, che producono 3,049 milioni di tonnellate di CO₂, di cui 0,894 in urbano, 1,472 misto e 0,683 extraurbano;
- a gasolio: 2000 km “urbani”, quindi 130 l/auero; 4000 km “misti”, quindi 220 l/auero; 2000 km “extraurbani”, quindi 100 l/auero. Il totale dei litri per auto è di 450 l/auero, per un totale di tutte le auto pari a 450·2.520.071 =1.134.031.950 litri di gasolio, che producono 3,005 milioni di tonnellate di CO₂, di cui 0,868 in urbano, 1,469 misto e 0,668 extraurbano;
- a metano: 2000 km “urbani”, quindi 122 kg/auero; 4000 km “misti”, quindi 200 kg/auero; 2000 km “extraurbani”, quindi 94 kg/auero. Il totale dei chilogrammi per auto è di 416 kg/auero, per un totale di tutte le auto pari a 416·45.817=19.059.872 kg di metano, che producono 0,052 milioni di tonnellate di CO₂, di cui 0,015 in urbano,

0,025 misto e 0,012 extraurbano;

- a GPL: 2000 km “urbani”, quindi 210 l/auto; 4000 km “misti”, quindi 348 l/auto; 2000 km “extraurbani”, quindi 160 l/auto. Il totale dei litri per auto è di 718 l/auto, per un totale di tutte le auto pari a $718 \cdot 107.121 = 76.912.878$ litri di GPL, che producono 0,124 milioni di tonnellate di CO₂, di cui 0,036 in urbano, 0,06 misto e 0,028 extraurbano.

Il totale della CO₂ prodotta ogni anno dalle auto Euro 3 è pari a 6,230 milioni di tonnellate, di cui 1,813 in ambito urbano, 3,026 nel misto e 1,391 nell’extraurbano.

EURO 4

Si suppone che le vetture appartenenti alla categoria Euro 4 facciano circa 10000 km/anno, di cui 2500 in urbano, 5000 misti e 2500 su strade extraurbane.

Euro 4:

- a benzina: 2500 km “urbani”, quindi 200 l/auto; 5000 km “misti”, quindi 335 l/auto; 2500 km “extraurbani”, quindi 155 l/auto. Il totale dei litri per auto è di 690 l/auto, per un totale di tutte le auto pari a $690 \cdot 4.517.355 = 3.116.974.950$ litri di benzina, che producono 7,418 milioni di tonnellate di CO₂, di cui 2,150 in urbano, 3,602 misto e 1,666 extraurbano;
- a gasolio: 2500 km “urbani”, quindi 155 l/auto; 5000 km “misti”, quindi 260 l/auto; 2500 km “extraurbani”, quindi 120 l/auto. Il totale dei litri per auto è di 535 l/auto, per un totale di tutte le auto pari a $535 \cdot 4.882.470 = 2.612.121.450$ litri di gasolio, che producono 6,922 milioni di tonnellate di CO₂, di cui 2,006 in urbano, 3,364 misto e 1,552 extraurbano;
- a metano: 2500 km “urbani”, quindi 140 kg/auto; 5000 km “misti”, quindi 235 kg/auto; 2500 km “extraurbani”, quindi 107,5 kg/auto. Il totale dei chilogrammi per auto è di 482,5 kg/auto, per un totale di tutte le auto pari a $482,5 \cdot 331.672 = 160.031.740$ kg di metano, che producono 0,440 milioni di tonnellate di CO₂, di cui 0,128 in urbano, 0,214 misto e 0,098 extraurbano;
- a GPL: 2500 km “urbani”, quindi 247,5 l/auto; 5000 km “misti”, quindi 415 l/auto; 2500 km “extraurbani”, quindi 192,5 l/auto. Il totale dei litri per auto è di 855 l/auto, per un totale di tutte le auto pari a $855 \cdot 912.709 = 780.366.195$ litri di GPL, che producono 1,257 milioni di tonnellate di CO₂, di cui 0,364 in urbano, 0,610 misto e 0,283 extraurbano.

Il totale della CO₂ prodotta ogni anno dalle auto Euro 4 è pari a 16,037 milioni di tonnellate, di cui 4,648 in ambito urbano, 7,79 nel misto e 3,599 nell'extraurbano.

EURO 5, 6

Si suppone che le vetture appartenenti alle categorie Euro 5 ed Euro 6 facciano circa 17.780 km/anno, di cui 4500 in urbano, 8900 misti e 4380 su strade extraurbane.

Euro 5:

- a benzina: 4500 km "urbani", quindi 351 l/auto; 8900 km "misti", quindi 578,5 l/auto; 4380 km "extraurbani", quindi 262,8 l/auto. Il totale dei litri per auto è di 1192,3 l/auto, per un totale di tutte le auto pari a $1192,3 \cdot 2.167.825 = 2.584.697.748$ litri di benzina, che producono 6,152 milioni di tonnellate di CO₂, di cui 1,811 in urbano, 2,985 misto e 1,356 extraurbano;
- a gasolio: 4500 km "urbani", quindi 270 l/auto; 8900 km "misti", quindi 445 l/auto; 4380 km "extraurbani", quindi 197,1 l/auto. Il totale dei litri per auto è di 912,1 l/auto, per un totale di tutte le auto pari a $912,1 \cdot 3.985.068 = 3.634.780.523$ litri di gasolio, che producono 9,632 milioni di tonnellate di CO₂, di cui 2,851 in urbano, 4,7 misto e 2,081 extraurbano;
- a metano: 4500 km "urbani", quindi 238,5 kg/auto; 8900 km "misti", quindi 391,6 kg/auto; 4380 km "extraurbani", quindi 179,6 kg/auto. Il totale dei chilogrammi per auto è di 809,7 kg/auto, per un totale di tutte le auto pari a $809,7 \cdot 271.929 = 220.180.911,3$ kg di metano, che producono 0,606 milioni di tonnellate di CO₂, di cui 0,179 in urbano, 0,293 misto e 0,134 extraurbano;
- a GPL: 4500 km "urbani", quindi 432 l/auto; 8900 km "misti", quindi 712 l/auto; 4380 km "extraurbani", quindi 324,1 l/auto. Il totale dei litri per auto è di 1468,1 l/auto, per un totale di tutte le auto pari a $1468,1 \cdot 501.061 = 735.607.654,1$ litri di GPL, che producono 1,184 milioni di tonnellate di CO₂, di cui 0,349 in urbano, 0,574 misto e 0,261 extraurbano.

Il totale della CO₂ prodotta ogni anno dalle auto Euro 5 è pari a 17,574 milioni di tonnellate, di cui 5,190 in ambito urbano, 8,552 nel misto e 3,832 nell'extraurbano.

Euro 6:

- a benzina: 4500 km "urbani", quindi 337,5 l/auto; 8900 km "misti", quindi 551,8 l/auto; 4380 km "extraurbani", quindi 245,3 l/auto. Il totale dei litri per auto è di 1134,6 l/auto, per un totale di tutte le

auto pari a $1134,6 \cdot 3.350.759 = 3.801.771.161$ litri di benzina, che producono 9,048 milioni di tonnellate di CO₂, di cui 2,692 in urbano, 4,4 misto e 1,956 extraurbano;

- a gasolio: 4500 km “urbani”, quindi 256,5 l/auto; 8900 km “misti”, quindi 418,3 l/auto; 4380 km “extraurbani”, quindi 184 l/auto. Il totale dei litri per auto è di 858,8 l/auto, per un totale di tutte le auto pari a $858,8 \cdot 4.509.966 = 3.873.158.801$ litri di gasolio, che producono 10,264 milioni di tonnellate di CO₂, di cui 3,066 in urbano, 4,999 misto e 2,199 extraurbano;
- a metano: 4500 km “urbani”, quindi 220,5 kg/auto; 8900 km “misti”, quindi 356 kg/auto; 4380 km “extraurbani”, quindi 162 kg/auto. Il totale dei chilogrammi per auto è di 738,5 kg/auto, per un totale di tutte le auto pari a $738,5 \cdot 229.174 = 169.244.999$ kg di metano, che producono 0,465 milioni di tonnellate di CO₂, di cui 0,139 in urbano, 0,224 misto e 0,102 extraurbano;
- a GPL: 4500 km “urbani”, quindi 418,5 l/auto; 8900 km “misti”, quindi 685,3 l/auto; 4380 km “extraurbani”, quindi 302,2 l/auto. Il totale dei litri per auto è di 1406 l/auto, per un totale di tutte le auto pari a $1406 \cdot 664.183 = 933.841.298$ litri di GPL, che producono 1,504 milioni di tonnellate di CO₂, di cui 0,448 in urbano, 0,733 misto e 0,323 extraurbano.

Il totale della CO₂ prodotta ogni anno dalle auto Euro 6 è pari a 21,281 milioni di tonnellate, di cui 6,345 in ambito urbano, 10,356 nel misto e 4,58 nell’extraurbano.

Il totale della CO₂ prodotta annualmente dal parco auto italiano circolante è pari a 68,22 milioni di tonnellate, di cui 17,996 su strade urbane, 36,822 su percorsi misti e 13,402 su tragitti extraurbani.

2.5 EFFETTI DI UN RADICALE RINNOVAMENTO

Negli ultimi anni si sono anche visti corposi investimenti per favorire l’acquisto di vetture nuove, in modo da ringiovanire il parco auto italiano.

L’obiettivo è naturalmente cercare di avere auto con maggiori rendimenti e che, quindi, possano percorrere gli stessi chilometri con quantità di carburante inferiori.

Come cambierebbe la produzione di CO₂ nel caso (ottimistico) in cui tutte le vetture da Euro 0 ad Euro 5 fossero rimpiazzate da modelli nuovi?

Si ipotizza di avere lo stesso numero di auto in base al combustibile usato, ma tutte di classe Euro 6, con i numeri suggeriti dalla tabella [1]. Queste percorreranno 11.885 km, come dettato dall’indagine di UnipolSai, secondo

la ripartizione già vista 25%-25%-50%.

Perciò conteranno 2970 km in urbano, la stessa quantità nell'extraurbano e 5950 su percorrenze miste.

Grazie ai consumi ipotizzati si ricavano:

- a benzina: 2970 km "urbani", quindi 222,8 l/auto; 5950 km "misti", quindi 368,9 l/auto; 2970 km "extraurbani", quindi 166,3 l/auto. Il totale dei litri per auto è di 758 l/auto, per un totale di tutte le auto pari a $758 \cdot 18.174.338 = 13.776.148.200$ litri di benzina, che producono 32,787 milioni di tonnellate di CO₂, di cui 9,637 in urbano, 15,957 misto e 7,193 extraurbano;
- a gasolio: 2970 km "urbani", quindi 169,3 l/auto; 5950 km "misti", quindi 279,7 l/auto; 2970 km "extraurbani", quindi 124,7 l/auto. Il totale dei litri per auto è di 573,7 l/auto, per un totale di tutte le auto pari a $573,7 \cdot 17.467.776 = 10.021.263.090$ litri di gasolio, che producono 26,556 milioni di tonnellate di CO₂, di cui 7,837 in urbano, 12,947 misto e 5,772 extraurbano;
- a metano: 2970 km "urbani", quindi 145,5 kg/auto; 5950 km "misti", quindi 238 kg/auto; 2970 km "extraurbani", quindi 109,9 kg/auto. Il totale dei chilogrammi per auto è di 493,4 kg/auto, per un totale di tutte le auto pari a $493,4 \cdot 965.340 = 476.298.756$ kg di metano, che producono 1,310 milioni di tonnellate di CO₂, di cui 0,386 in urbano, 0,632 misto e 0,292 extraurbano;
- a GPL: 2970 km "urbani", quindi 276,2 l/auto; 5950 km "misti", quindi 458,2 l/auto; 2970 km "extraurbani", quindi 204,9 l/auto. Il totale dei litri per auto è di 939,3 l/auto, per un totale di tutte le auto pari a $939,3 \cdot 2.574.287 = 2.418.027.779$ litri di GPL, che producono 3,893 milioni di tonnellate di CO₂, di cui 1,145 in urbano, 1,899 misto e 0,849 extraurbano.

La CO₂ prodotta sarà quindi pari a 64,546 milioni di tonnellate, divisi in: 19,005 su ciclo urbano, 31,435 su misto e 14,106 su extraurbano.

Il miglioramento di quattro milioni di tonnellate mette in luce come l'incentivazione all'acquisto di auto nuove sortisce degli effetti, ma non così significativi.

Inoltre, l'obiettivo di un motore endotermico più green è molto difficile da raggiungere, poiché è una tecnologia già pienamente sviluppata, quindi con scarso margine di miglioramento.

CAPITOLO 3

PRODUZIONE INDIRETTA DI CO₂ PER UNA MOBILITA' TOTALMENTE ELETTRICA

La critica più feroce mossa nei confronti della mobilità full-electric è sulla modalità di produzione dell'energia elettrica.

Difatti, i due tipi di vetture confrontati in questa sede hanno sempre lo stesso obiettivo, quello di trasformare una fonte di energia in lavoro, o più specificatamente in energia cinetica.

Il primo visto finora usa l'energia chimica di un carburante all'interno di uno dei due cicli accennati in precedenza; il secondo, invece, sfrutta l'elettricità stoccata nelle batterie.

A colpo d'occhio si direbbe che quest'ultimo non inquina, perché al suo interno non c'è un'effettiva produzione di anidride; eppure, indirettamente può causare l'aumento in atmosfera del famigerato gas serra se la produzione di energia non avviene da fonti rinnovabili.

3.1 LA PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA IN ITALIA

Tutte le informazioni a proposito di come viene prodotta e distribuita l'elettricità in Italia sono state prese dal rapporto 343/2021 dell'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) dal titolo "Indicatori di efficienza e decarbonizzazione del sistema energetico nazionale e del settore elettrico".

Tabella 2.2 – Dati di produzione e consumo di energia elettrica (TWh).

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020*
Produzione lorda di energia elettrica	216,6	241,5	276,6	303,7	302,1	283,0	289,8	295,8	289,7	293,9	282,3
<i>apporti da pompaggio</i>	3,5	4,1	6,7	6,9	3,3	1,4	1,8	1,8	1,7	1,8	1,9
Calore utile	-	-	-	53,6	56,3	59,3	61,0	61,1	59,6	60,2	55,8
Energia destinata a servizi ausiliari	11,5	12,3	13,3	13,1	11,3	10,6	10,1	10,6	9,9	9,9	9,2
Produzione netta	205,1	229,2	263,3	290,6	290,7	272,4	279,7	285,3	279,8	284,0	273,1
Energia destinata ai pompaggi	4,8	5,6	9,1	9,3	4,5	1,9	2,5	2,5	2,3	2,5	2,6
Produzione destinata al consumo	200,3	223,6	254,2	281,3	286,3	270,5	277,2	282,9	277,5	281,5	270,6
Saldo import/export	34,7	37,4	44,3	49,2	44,2	46,4	37,0	37,8	43,9	38,1	32,2
Energia elettrica richiesta	234,9	261,0	298,5	330,5	330,5	316,9	314,3	320,5	321,4	319,6	302,8
Perdite di rete	16,2	17,6	19,2	20,6	20,6	19,7	18,8	18,7	18,0	17,8	16,8
Consumi elettrici	218,8	243,5	279,3	309,8	309,9	297,2	295,5	301,9	303,4	301,8	286,0

* Dati preliminari TERNA e stime ISPRA

[6]

Si noti da questa tabella come negli ultimi anni, nonostante il processo di elettrificazione della mobilità non sia ancora significativo, i consumi siano aumentati. La motivazione che spesso si dà è che l'efficientamento energetico degli elettrodomestici sia in realtà un'arma a doppio taglio: da

una parte si è indotti a pensare di consumare meno, dall'altra ciò ci spinge involontariamente a fare più cicli di lavoro e quindi a spendere più di prima.

Tabella 2.3 – Produzione elettrica lorda per fonte a partire dal 1990 (TWh).

Fonte	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020*
Idroelettrica	35,1	41,9	50,9	42,9	54,4	47,0	44,3	38,0	50,5	48,2	48,5
di cui autoproduttori	5,8	6,6	1,8	0,8	0,9	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5
Termoelettrica	178,3	196,1	220,5	253,1	231,2	192,1	199,4	209,5	192,7	195,7	183,1
di cui autoproduttori	20,5	33,6	19,4	19,0	22,9	18,5	17,9	19,3	22,3	21,8	21,8
Geotermica	3,2	3,4	4,7	5,3	5,4	6,2	6,3	6,2	6,1	6,1	6,0
Eolica e fotovoltaica	0,0	0,0	0,6	2,4	11,0	37,8	39,8	42,1	40,4	43,9	44,7
TOTALE	216,6	241,5	276,6	303,7	302,1	283,0	289,8	295,8	289,7	293,9	282,3

* Dati preliminari TERNA e stime ISPRA

[7]

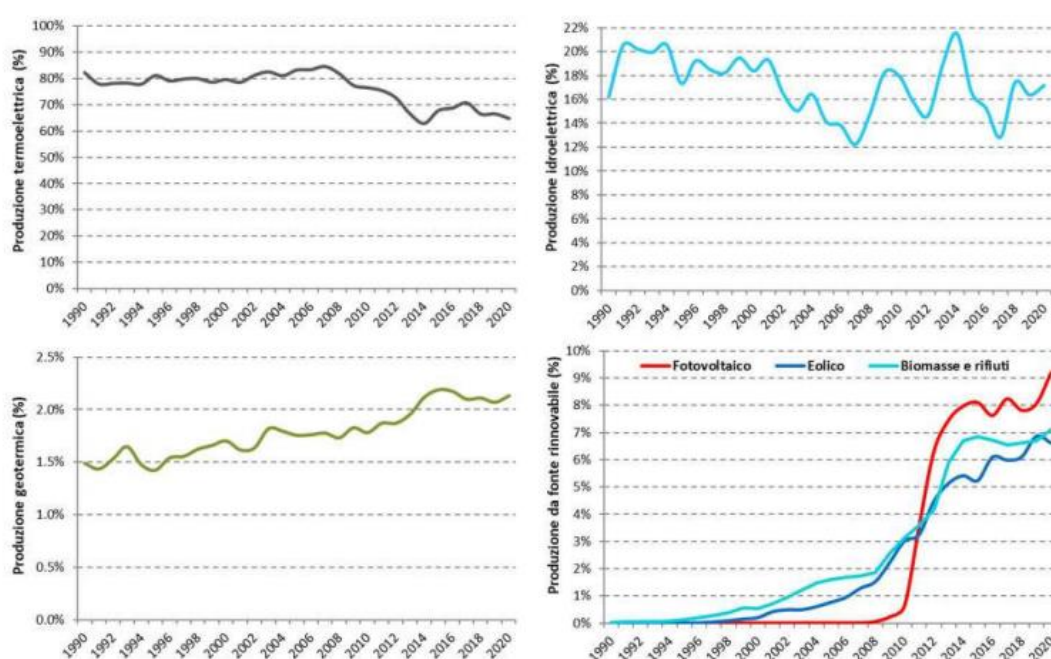


Figura 2.4 – Quota della produzione elettrica lorda nazionale dalle diverse fonti. Per il 2020 stime ISPRA su dati preliminari TERNA.

[8]

Tabella 2.4 – Produzione elettrica lorda per combustibile (TWh).

Fonte	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2017	2018	2019
Solidi	32,0	24,1	26,3	43,6	39,7	43,2	32,6	28,5	18,8
Gas naturale*	39,7	47,0	101,4	149,3	152,7	110,9	140,3	128,5	141,5
Gas derivati	3,7	3,4	4,3	5,8	4,7	2,2	2,5	2,5	2,4
Prodotti petroliferi	102,7	120,8	85,9	47,1	21,7	13,4	11,5	11,0	10,2
Altri combustibili	0,1	0,4	1,9	6,2	11,6	21,8	21,9	21,6	22,1
Totale da combustibili	178,3	195,8	219,7	252,0	230,5	191,5	208,8	192,1	195,1

* Dal 2017 si registra la produzione di energia elettrica da biometano (16,4 GWh nel 2017 e 50 GWh nel 2018; GSE) compresa nel gas naturale. Per il 2019 sono stimati 152 GWh; stime ISPRA).

[9]

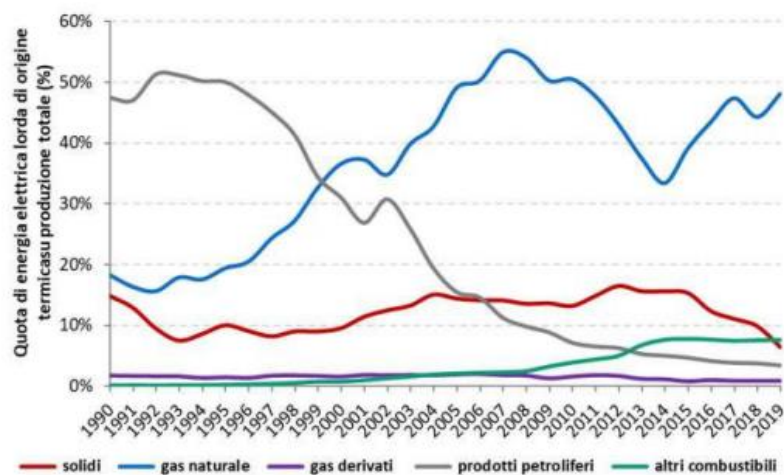


Figura 2.5 – Andamento della quota di energia termoelettrica prodotta per tipologia di combustibile.

[10]

Fortunatamente queste tabelle mettono in luce come in Italia siano stati fatti enormi passi avanti nella produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili. In particolare, il fotovoltaico è passato in un decennio dal rappresentare lo 0,5% dell'energia totale prodotta al 9%, con una crescita che non sembra volersi arrestare.

Con questo però non si deve dimenticare che la produzione idroelettrica gioca un ruolo fondamentale sul territorio italiano, dal momento che ha pesato sempre circa il 16% del totale, con picchi di quasi il 22%. Ciò testimonia come sia capillare da anni la presenza di queste centrali.

Grazie alla conformazione del suolo nazionale, a partire dagli anni 2000 si è incrementato l'eolico, e grazie alla ricerca anche l'uso di biomasse e di rifiuti, che hanno un minor impatto ambientale.

Inoltre, i sistemi delle centrali termoelettriche sono diventati più efficienti, grazie ai cicli combinati, e meno inquinanti, grazie all'uso del gas naturale come combustibile, a discapito di altri decisamente più dannosi per l'ambiente.

Tutto ciò ha permesso una riduzione del fattore di emissione.

Tabella 2.25 – Fattori di emissione della produzione elettrica nazionale e dei consumi elettrici (g CO₂/kWh).

Anno	Produzione termoelettrica lorda (solo fossile)	Produzione termoelettrica lorda ¹	Produzione termoelettrica lorda e calore ^{1,3}	Produzione elettrica lorda ²	Produzione di calore ³	Produzione elettrica lorda e calore ^{2,3}	Consumi elettrici
1990	709,3	709,1	709,1	593,1	-	593,1	577,9
1995	682,9	681,8	681,8	562,3	-	562,3	548,2
2000	640,6	636,2	636,2	517,7	-	517,7	500,4
2005	585,2	574,0	516,5	487,2	246,7	450,4	466,7
2006	575,8	564,1	508,2	478,8	256,7	443,5	463,9
2007	560,1	548,6	497,0	471,2	256,3	437,8	455,3
2008	556,5	543,7	492,8	451,6	252,0	421,8	443,8
2009	548,2	529,9	480,9	415,4	260,5	392,4	399,3
2010	546,9	524,5	470,1	404,6	247,3	379,7	390,1
2011	548,5	522,4	461,0	395,6	227,8	367,7	379,1
2012	562,8	530,4	467,8	386,8	227,1	361,3	374,3
2013	556,0	506,6	438,8	338,2	218,2	317,8	327,6
2014	575,5	514,0	439,5	324,4	206,9	304,6	309,9
2015	544,4	489,2	425,3	332,7	218,9	312,9	315,2
2016	518,3	467,4	409,3	322,5	220,2	304,6	314,3
2017	492,7	446,9	394,5	317,4	215,3	299,9	309,1
2018	495,0	445,6	389,7	297,2	209,5	282,2	282,1
2019	462,2	415,5	367,4	277,6	211,8	266,3	268,6
2020*	454,6	404,6	361,9	263,4	222,2	256,5	258,3

¹ comprensiva della quota di elettricità prodotta da bioenergie

² al netto degli apporti da pompaggio

³ considerate anche le emissioni di CO₂ per la produzione di calore (calore convertito in kWh)

* stime preliminari

[11]

Il fattore che interessa in questo studio è pari a 268,6 gCO₂/kWh (kWh consumato), che però va corretto, poiché considera l'energia importata ad impatto nullo per il nostro territorio.

“Il fattore di emissione per consumo di energia elettrica si riduce ulteriormente in ragione della quota di energia elettrica importata dall'estero le cui emissioni atmosferiche sono originate fuori dal territorio nazionale”. [12]

Riprendendo quindi la tabella [6], il totale dell'anidride carbonica è $268,6 \cdot 301,8 \cdot 10^9 = 81,06348$ milioni di tonnellate. Essendo generati soltanto nella produzione di 281,5 TWh, quindi non il totale dell'energia consumata, come considerato nel report, si ha $(81,06348 \cdot 10^{12}) / (281,5 \cdot 10^9) = 287,97$ g/kWh.

Se si moltiplica quindi per il totale dell'energia richiesta, si ottiene la CO₂ eventualmente prodotta se tutta l'energia fosse generata in Italia.

$$287,97 \cdot 319,6 \cdot 10^9 = 92,035 \text{ milioni di tonnellate di CO}_2$$

Dividendo poi per il consumo, si ricava il vero fattore di emissione, che vale 304,954 gCO₂/kWh.

Grazie a questo valore si può calcolare l'anidride prodotta nel caso in cui l'intero parco auto italiano venisse sostituito da vetture totalmente elettriche, naturalmente conoscendo i chilowattora che queste consumano.

3.2 CONSUMI IPOTIZZATI IN kWh

A partire dal 2018, in Europa, ogni produttore deve effettuare il test WLTP (Worldwide Harmonised Light Vehicle Test Procedure) per poter fare immatricolare i propri mezzi in vendita.

Questo tipo di test, condotto in laboratorio, è affidabile per quanto riguarda i consumi su percorrenze miste; infatti, viene svolto su uno specifico banco a rulli per un totale di 23,25 km, divisi in due fasi urbane e due extraurbane, che rappresentano rispettivamente il 52% e il 48% del totale.

Le velocità sono comprese tra 0 e 131 km/h, in modo da essere più fedeli alla realtà, per un valore medio di 46,5 km/h. Inoltre, il test deve essere condotto per due volte a temperature differenti: 15°C e 23°C.

Il consumo medio riportato dalle case automobilistiche deve essere quindi ritoccato se si è al di fuori di una percorrenza mista. In genere, le auto elettriche soffrono molto le strade extraurbane, con un aumento medio di circa il 23% e picchi di oltre il 30%; invece, su strade urbane hanno una riduzione media di circa il 15% rispetto a quanto misurato nel ciclo WLTP, perché riescono a recuperare una buona parte dell'energia grazie alla frenata rigenerativa.

Questo sistema non fa altro che utilizzare il motore come freno e alternatore quando si deve rallentare.

In media le auto full-electric hanno un consumo di 15,625 kWh/100km e le batterie al litio in fase di ricarica hanno un rendimento del 90%; quindi, se si considerassero i chilowattora di ricarica per 100 chilometri di ciclo misto, si parlerebbe di un consumo medio di 17,36 kWh/100km. Lo stesso vale per le altre tipologie di percorrenze.

Così si hanno:

- 17,36 kWh/100km nel ciclo misto;
- 21,35 kWh/100km nel ciclo extraurbano;
- 14,76 kWh/100km nel ciclo urbano.

3.3 CALCOLO DELLE EMISSIONI INDIRETTE DI CO₂ DI UN POTENZIALE PARCO AUTO TOTALMENTE ELETTRICO

Conoscendo ora i consumi sui vari tipi di strade e la CO₂ generata nella produzione di energia elettrica, si vanno a sommare i chilometri percorsi per ogni tipologia dalle auto circolanti.

In totale si hanno:

- $2,55 \cdot 10^{11}$ km nel ciclo misto;
- $1,0651 \cdot 10^{11}$ km nel ciclo extraurbano;
- $1,0651 \cdot 10^{11}$ km nel ciclo urbano.

Ora si moltiplica il totale di chilometri percorsi su ogni tipologia di strada per il relativo consumo, in modo da calcolare tutti i chilowattora necessari per il trasporto.

a) $2,55 \cdot 10^{11} \cdot 17,36/100 = 4,4268 \cdot 10^{10}$ kWh che equivalgono a 44,268 TWh;

b) $1,0651 \cdot 10^{11} \cdot 21,35/100 = 2,274 \cdot 10^{10}$ kWh che equivalgono a 22,74 TWh;

c) $1,0651 \cdot 10^{11} \cdot 14,76/100 = 1,5721 \cdot 10^{10}$ kWh che equivalgono a 15,721 TWh.

L'energia necessaria al trasporto privato sarebbe quindi pari a 82,729 TWh.

Moltiplicando ora per il fattore di emissione corretto in precedenza, si ha un totale di $82,729 \cdot 10^9 \cdot 304,954 = 2,52 \cdot 10^{10}$ kgCO₂ = 25,2 milioni di tonnellate di CO₂.

Quindi, potendo cambiare tutto il parco auto italiano attuale con vetture totalmente elettriche, si passerebbe da 68,22 milioni di tonnellate di CO₂ prodotte annualmente a 25,2, cioè si ridurrebbe del 63% circa.

In realtà questi dati sono strettamente connessi con la qualità della produzione elettrica, cioè in quale modo la si ricava; perciò, la soluzione non resta semplicemente cambiare auto, ma riuscire a sfruttare sempre più le fonti rinnovabili.

3.4 MOBILITA' URBANA CON MICROVETTURE ELETTRICHE

Si pongono ora a confronto, a titolo esemplificativo, tre diversi mezzi per il trasporto in contesti urbani: l'auto elettrica, l'auto con motore a combustione interna e il monopattino elettrico.

Di primo acchito si potrebbe pensare che l'ultimo non sia paragonabile con le altre due, perché ha una velocità massima di legge pari a 25 km/h, che è di molto inferiore a quella raggiungibile con una macchina. In realtà, nelle città di oggi, in cui il traffico è spesso molto intenso, le velocità medie non sono così alte.

Infatti, la velocità media nelle grandi metropoli è pari a 12 km/h, nelle città italiane raggiunge i 15 km/h, che però sono 7-8 km/h negli orari di punta. Quindi un monopattino elettrico potrebbe tranquillamente tenere il passo delle vetture.

Ciò mostra che il problema è l'impossibilità di realizzare un flusso stazionario di mezzi; il collo di bottiglia, quindi, non è tanto la tipologia del mezzo, quanto l'infrastruttura della rete stradale in questo contesto.

L'enorme differenza delle tre categorie è la potenza che possono generare. Le auto hanno in media una potenza minima di 50 kW; invece, il monopattino ha per legge una potenza massima di 500 W, cioè ben 100

volte in meno.

Chiaramente però il monopattino non può essere sempre di utilità, perché, ad esempio, se si vogliono portare dei passeggeri, ciò non è possibile.

Però questo esempio è servito per centrare il paradosso del trasporto in città.

La soluzione migliore è perciò un mezzo che sia leggero, chiuso, sicuro, relativamente capiente e non troppo potente, cioè una microcar elettrica.

Ci sono vari esempi di questa tipologia di vetture: Citroën Ami, XEV Yoyo, Tazzari Zero Junior, Estrima Birò, Opel Rocks-e e molte altre.

Queste hanno potenze molto basse che oscillano tra 4 kW e 8 kW, ma hanno dei consumi altrettanto accattivanti che si aggirano attorno ai 7,143 kWh/100km.

Come visto in precedenza, il consumo va riferito alla ricarica, cioè va tenuto conto del rendimento medio del 90% di una batteria al litio. Quindi è più veritiero un valore pari a $7,143 \cdot 100 / 90 = 7,94$ kWh/100km.

Questi sono valori che nessun'auto utile al trasporto di persone su tracciati misti o extraurbani ha.

Si ipotizza quindi di sostituire tutte le auto in città con quadricicli di questo genere.

Ricordando una percorrenza di $1,0651 \cdot 10^{11}$ km nel ciclo urbano, si ottiene un consumo di $1,0651 \cdot 10^{11} \cdot 7,94 / 100 = 8,457 \cdot 10^9$ kWh = 8,457 TWh.

Questo cambiamento permette quasi di dimezzare i consumi elettrici.

Con questa configurazione, in cui si hanno auto elettriche familiari nei cicli misto ed extraurbano e microcar in quello urbano, si ha un consumo elettrico totale pari a 75,465 TWh, che, moltiplicato per il fattore di emissione, mi dà una produzione di anidride di $75,465 \cdot 10^9 \cdot 304,954 = 2,2986 \cdot 10^{10}$ kgCO₂, cioè 22,986 milioni di tonnellate di CO₂.

La riduzione rispetto alla situazione attuale sarebbe del 66,3%.

Si avrebbe un ulteriore vantaggio nel diminuire lo spazio impegnato, poiché queste microcar hanno un'impronta al suolo inferiore rispetto ai classici mezzi a quattro ruote.

Un altro ancora riguarda la manutenzione delle strade; infatti, le buche stradali crescono più velocemente quando attraversate ad alta velocità da mezzi pesanti.

In ultima istanza, i vantaggi sono molteplici e distribuiti sia sul piano ambientale che sul piano socioeconomico.

3.5 BATTERIE AL LITIO

Le batterie ad oggi più commercializzate sono quelle al litio, o ancora più

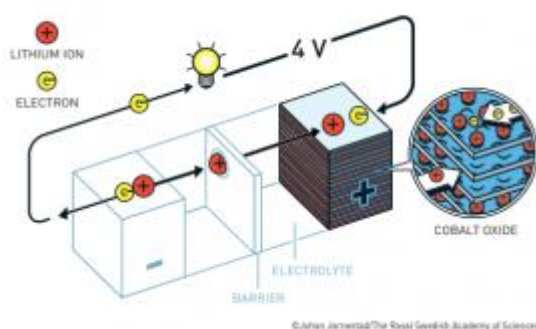
nello specifico, a ioni di litio. Questo tipo di celle è così importante che per gli inventori è valso nel 2019 il premio Nobel per la chimica.

Uno dei grandi vantaggi rispetto agli altri tipi di batterie disponibili in commercio è il fatto che sono ricaricabili.

Per poter capire come si ricaricano, bisogna fare un accenno alla loro struttura.

I componenti di ogni batteria litio-ione (LIB) sono: catodo e anodo (elettrodi), elettrolita e separatore.

La produzione di energia si ha grazie al trasferimento di elettroni, generati nella reazione di ossidoriduzione degli elettrodi, da anodo a catodo attraverso il circuito esterno. Quindi, per caricare queste batterie, basta realizzare la reazione inversa con l'apporto di corrente esterna.

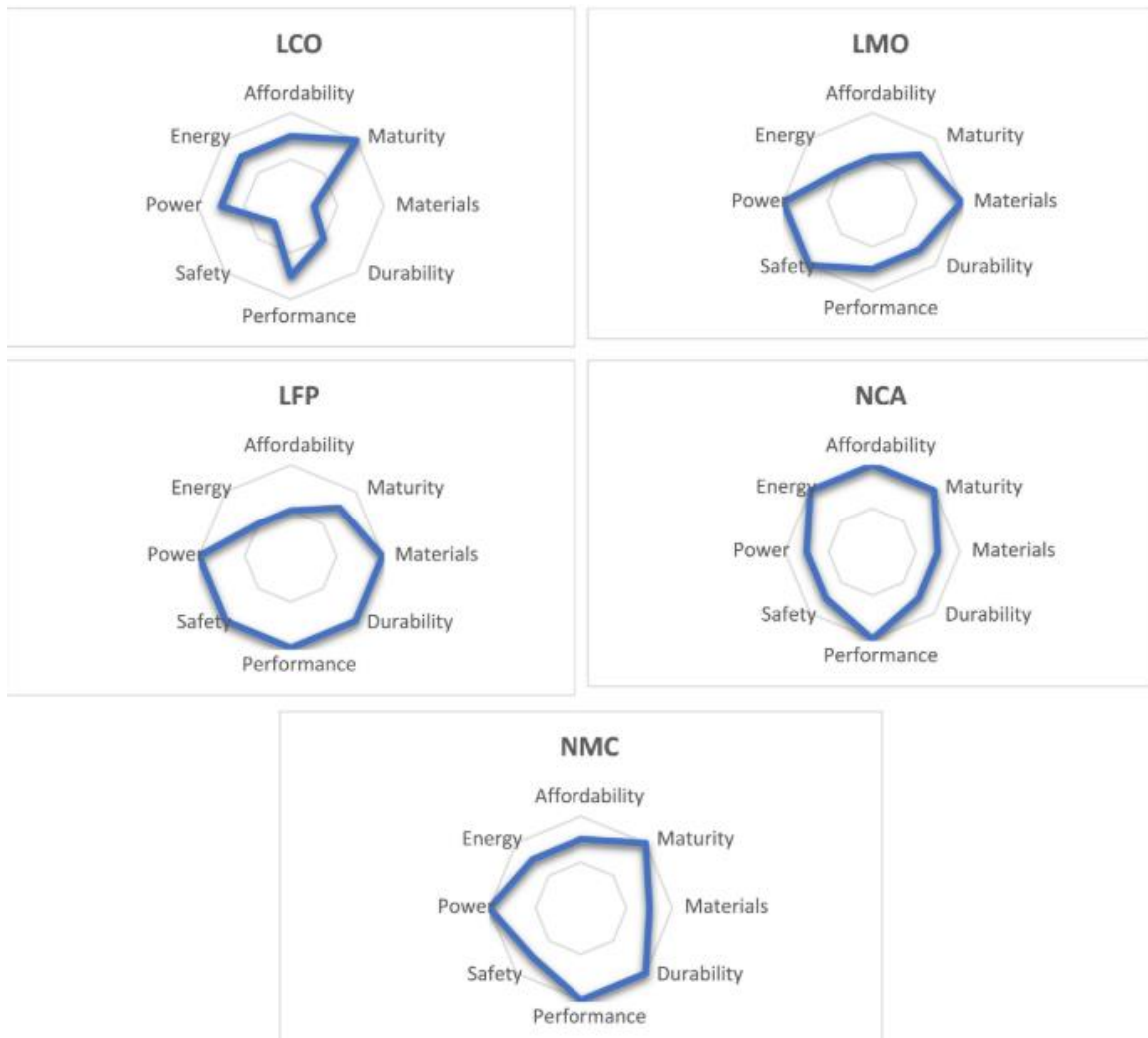


[13]

Il catodo nelle LIB è l'elemento più variabile, tanto che ci sono diverse classificazioni in base al materiale di quest'ultimo. Esistono:

- LCO (LiCoO_2): è il primo catodo ideato per le LIB e il più venduto, ha come vantaggi una bassa autoscarica e un'alta densità energetica, ma pecca per il costo del cobalto e la scarsa stabilità termica;
- LMO (LiMnO_2): è più economico, sicuro e duraturo del precedente, ma ha una ridotta intensità di energia;
- NCA ($\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$): ha densità energetica e durata maggiori dell'LCO, ma la sua capacità soffre le alte temperature;
- NMC ($\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z\text{O}_2$): varia molto nelle proporzioni dei suoi elementi e per questo è molto versatile;
- LFP (LiFePO_4): possiede elevata sicurezza, durata, basso costo e ridotto impatto ambientale, ma patisce molto l'autoscarica e ha una bassa energia specifica.

I catodi più usati nei veicoli elettrici sono l'NCA e l'NMC.



[14]

Per l'anodo esistono invece tre versioni principali:

- grafite lamellare: ha buone proprietà, ma il difetto principale è l'esfoliazione durante l'utilizzo;
- LTO ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$): possiede elevata stabilità termica, durata ed è sicura, ma il titanio risulta assai costoso, perciò è più di nicchia;
- sale LiPF_6 in solventi organici: è quasi l'unico elettrolita delle batterie commerciali, ma ha problemi in termini di sicurezza, essendo tossico e facilmente infiammabile.

Inoltre, le LIB si possono categorizzare in base alla geometria: cilindriche, prismatiche o "a sacchetto".

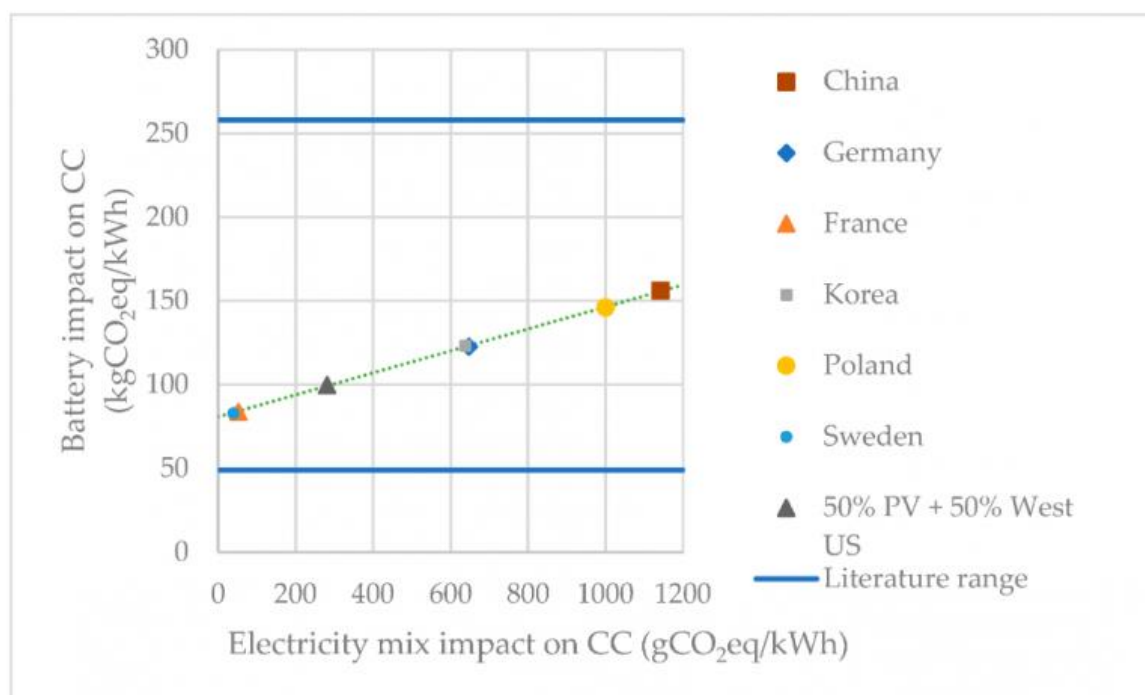
3.6 DANNI ED INQUINANTI DELLE BATTERIE AL LITIO

Stabilire l'impatto ambientale della produzione di batterie al litio è, per più ragioni, particolarmente complesso.

La prima è che i materiali utilizzati sono parecchi, circa una ventina, e tutti con trattamenti specifici per l'applicazione elettrochimica.

Il secondo è che la produzione di CO₂ per l'alimentazione di quest'industria è fortemente legata al mix energetico del paese di riferimento. Cioè, se si prende in analisi la Cina, che è anche il principale produttore di batterie, ha un fattore di emissione molto alto, ben al di sopra della media dei paesi europei; questo fa sì che si paghi a caro prezzo, in termini di inquinamento, l'elettricità usata per far funzionare tutta la catena industriale.

Invece, se le batterie fossero prodotte in paesi come Svezia o Francia, che hanno un basso fattore di emissione grazie alla prevalenza dell'energia proveniente dal nucleare, l'impatto sarebbe decisamente inferiore.



[15]

Purtroppo, la Cina, che ha un pessimo mix energetico, produce il 73% dei GWh di batterie della produzione mondiale, seguita dagli Stati Uniti con il 12% e il Giappone e la Corea del Sud con qualche punto percentuale.

Un terzo fattore è l'uso stesso che se ne fa delle batterie, ovvero, quanto più si usa una batteria, tanto più i grammi di anidride prodotta per chilowattora saranno inferiori. Perciò è preferibile applicare le batterie in quei prodotti per cui i cicli di carica saranno molteplici.

Altri fattori stanno nelle conseguenze dell'estrazione dei vari elementi; come accennato nell'introduzione, i minerali essenziali si trovano concentrati in pochi paesi.

Il litio ha le più grandi riserve nel cosiddetto "Triangolo del litio", che ha i vertici in Argentina, Cile e Bolivia. Nonostante ce ne siano grandi quantità anche nelle argille e nell'acqua marina, le fonti economicamente più

favorevoli, per questo più sfruttate, sono la salamoia e i minerali. Questo metodo estrattivo induce all'ulteriore desertificazione dei terreni già poveri d'acqua di questa regione. Inoltre, è causa di dissesti socioeconomici del territorio, per via del forte sfruttamento da parte delle aziende estrattrici, aiutate dalla mancanza di leggi ad hoc.

Il secondo elemento essenziale per questi beni è il cobalto. Si stima che le sue riserve ammontino a circa 7 milioni di tonnellate, che però sono disuniformemente distribuite; basti pensare che addirittura il 50% del totale è concentrato nella Repubblica Democratica del Congo e un altro 17% in Australia. La Cina è invece leader nella raffinazione di questo elemento, con il 46% di tutto quello lavorato nel globo.

Per l'elevato costo viene estratto assieme a rame e nichel; purtroppo, per poter abbassare ulteriormente i prezzi, spesso si ricorre in territorio congolese allo sfruttamento di manodopera minorile.

Fortunatamente la ricerca, sia europea che extra-europea, sta portando ad un minor uso di questo elemento; in questo modo si potrà abbassare il costo per chilowattora delle LIB e si riuscirà ad avere una batteria eticamente sostenibile.

Altri componenti essenziali sono il nichel, il manganese e la grafite. I primi due in realtà sono molto usati già da anni nella produzione di acciaio e non sembra che possano esserci particolari problemi nella catena di approvvigionamento, se non per il fatto che l'estrazione e la raffinazione sono sempre concentrate in pochi paesi.

La grafite è forse la sostanza più facile da ottenere, perché è molto presente su tutta la superficie terrestre. La grafite naturale è il modo migliore e più economico, tuttavia, in caso di problematiche nel rifornimento, c'è la possibilità di ottenere la grafite sinteticamente, però ad un costo dieci volte maggiore a causa dell'energia necessaria.

Negli anni a venire, l'estrazione di questi componenti potrà però essere smorzata dal riciclo. In particolare, ci sono due strade percorribili: il recupero di materiale e la politica della seconda vita.

Nel primo caso le batterie vanno smaltite nel modo corretto, cioè devono seguire dei passaggi ben precisi: preselezione, recupero di energia, smontaggio, bonifica, liberazione, raffinazione e separazione metallurgica.

In questo modo si possono ottenere dei materiali abbastanza pregiati, riutilizzabili o in nuove batterie, nel caso di processi idrometallurgici, oppure nell'industria edilizia, nel caso di processi pirometallurgici.

La politica della seconda vita mira invece ad una nuova applicazione delle celle. Ad esempio, se si ha un pacco batterie di un'auto giunto all'80% della sua capacità iniziale, questo risulta inadeguato per l'utilizzo che se ne sta

facendo; ciò non significa che non è più in grado di stoccare energia. Quindi, piuttosto che procedere allo smaltimento, si preferisce trovare un ambito in cui è ancora usufruibile, come negli impianti fotovoltaici di case o appartamenti.

CAPITOLO 4

CONCLUSIONI

È evidente come le politiche messe in atto a livello globale per l'elettrificazione del trasporto non siano sconsiderate, a patto che la produzione elettrica abbia come obiettivo la totale ecosostenibilità.

Ad oggi, in un paese come l'Italia, che ha una forte vocazione alle rinnovabili, la riduzione dell'anidride carbonica prodotta sarebbe notevole.

Invece se si considerasse un paese in forte crescita economica come la Cina, che è ancora molto legata alla produzione termoelettrica, potrebbe non essere così vantaggioso convertire il parco auto odierno con uno totalmente elettrico.

Inoltre, le tonnellate di CO₂ che sono state calcolate vanno contestualizzate, cioè confrontate con il totale prodotto da un paese. Su suolo italiano nel 2019 si sono prodotte circa 418 milioni di tonnellate di CO₂ equivalente; abbassare di 45 milioni di tonnellate, come si è stimato con un trasporto privato elettrico coadiuvato dalle microcar in città, può dare una bella mano, ma non è sufficiente. Infatti, vanno migliorati i processi di fabbricazione delle batterie e vanno resi ecologici tutti gli altri settori.

Certamente vanno considerati anche ulteriori elementi; uno di questi, che abbiamo già accennato, è il trasporto urbano, che rimane uno scoglio per molte città in Italia.

Alla luce della recente pandemia, i trasporti pubblici si sono dimostrati insufficienti e hanno scoperto tutti i loro punti deboli. D'altro canto, una mobilità completamente privata porterebbe ad una eccessiva saturazione della rete stradale.

Per cercare di far combaciare le cose, in un futuro in cui sicuramente tutto sarà automatizzato, si può prevedere di avere un flusso stazionario di auto con ridotta impronta del suolo pilotate dall'intelligenza artificiale, che permetterà di percorrere le stesse distanze di oggi in minor tempo, con maggiore sicurezza e tranquillità.

Un altro punto da tenere bene in mente è anche la rete di ricarica delle auto. Questa può essere di facile realizzazione in territori pianeggianti e con uno strato di terreno adeguatamente lavorabile, ma purtroppo sono condizioni rare da trovare. Se si pensasse di costruirla in una città come Roma, ci sarebbero di certo molti inconvenienti, in primis legati ai reperti storici ancora interrati che spesso allungano i tempi.

In questi termini le celle a combustibile possono avere un vantaggio, poiché l'idrogeno, nonostante le varie difficoltà del caso, può essere stoccato e venduto come un qualsiasi carburante in un distributore.

L'opzione dell'idrogeno, che è un vettore energetico e quindi ha comunque bisogno di "ricaricarsi" nell'idrolisi, può soppiantare l'elettrico, purché vengano effettuati grandi investimenti a favore della ricerca in questo ambito.

In conclusione, parlando di transizione ecologica, le vetture full-electric sono un passaggio pressoché obbligato, visto lo stato di maggiore arretratezza delle tecnologie concorrenti, ma dovrebbe rimanere solamente una fase intermedia che possa portare a soluzioni migliori sotto tutti gli aspetti, sia tecnico-scientifici, sia etici, sia di comfort.

BIBLIOGRAFIA

- [1] [https://www.anfia.it/data/studi-e-statistiche/dati-statistici/settore-industriale/ANFIA-Report Italian Automotive Industry 2019 DEF ENG.pdf](https://www.anfia.it/data/studi-e-statistiche/dati-statistici/settore-industriale/ANFIA-Report%20Italian%20Automotive%20Industry%202019%20DEF%20ENG.pdf)
- [2] [https://www.anfia.it/data/dtracker/industria autoveicolistica italia 2010-2019 trend 2020.pdf](https://www.anfia.it/data/dtracker/industria%20autoveicolistica%20italia%202010-2019%20trend%202020.pdf)
- [3] [http://aero.altervista.org/propulsione/c1/ciclo Otto indicato.html](http://aero.altervista.org/propulsione/c1/ciclo%20Otto%20indicato.html)
- [4] <https://www.istitutopesenti.edu.it/dipartimenti/meccanica/Macchine/motORI%20A%20C%20I.pdf>
- [5] <https://www.ingdemurtas.it/tabelle/potere-calorifico/>
- [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12]
- <https://www.isprambiente.gov.it/files2021/pubblicazioni/rapporti/r343-2021.pdf>
- [13], [14] <https://www.motus-e.org/tecnologia/la-produzione-delle-batterie-li-ione>
- [15] Philippot M., Alvarez G., Ayerbe E., Van Mierlo J., Messagie M., Eco-Efficiency of a Lithium-Ion Battery for Electric Vehicles: Influence of Manufacturing Country and Commodity Prices on GHG Emissions and Costs, Batteries, 2019, 5, 23