



# ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

---

DIPARTIMENTO DI “INGEGNERIA INDUSTRIALE”

CAMPUS DI FORLÌ

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

## EMISSIONI INQUINANTI E METODI DI ABBATTIMENTO NEI MEZZI PESANTI

Relatore:

Prof. **Enrico Corti**

Candidato: **Casamenti Stefano**

Matricola 0000902841

Anno Accademico 2020/2021



# Indice

<b>Introduzione</b> .....	<b>6</b>
<b>1. I mezzi pesanti</b> .....	<b>8</b>
<b>1.1 Definizione e classificazione</b> .....	<b>8</b>
<b>1.2 Caratteristiche</b> .....	<b>9</b>
<b>1.2.1 Autoarticolati e Autotreni</b> .....	<b>11</b>
<b>1.3 Tipologie ed impieghi</b> .....	<b>13</b>
<b>1.4 Vantaggi del commercio su strada</b> .....	<b>15</b>
<b>2. Motore ed alimentazione dei mezzi pesanti</b> .....	<b>16</b>
<b>2.1 Il gasolio</b> .....	<b>16</b>
<b>2.1.1 Produzione</b> .....	<b>16</b>
<b>2.1.2 Caratteristiche</b> .....	<b>17</b>
<b>2.1.3 Numero di Cetano</b> .....	<b>18</b>
<b>2.1.4 Impieghi</b> .....	<b>20</b>
<b>2.2 Il ciclo Diesel</b> .....	<b>20</b>
<b>2.2.1 Ciclo ideale</b> .....	<b>21</b>
<b>2.2.2 Rendimento ideale</b> .....	<b>23</b>
<b>2.2.3 Ciclo limite</b> .....	<b>25</b>
<b>2.2.4 Ciclo reale</b> .....	<b>26</b>
<b>2.3 Il motore Diesel dei mezzi pesanti</b> .....	<b>28</b>
<b>2.3.1 Architettura</b> .....	<b>28</b>
<b>2.3.2 Funzionamento</b> .....	<b>31</b>
<b>2.3.3 Caratteristiche</b> .....	<b>32</b>
<b>2.4 Vantaggi e svantaggi del Diesel</b> .....	<b>35</b>

<b>3. Specie inquinanti ed effetto sull'uomo e sull'ambiente.....</b>	<b>37</b>
<b>3.1 Principali specie inquinanti.....</b>	<b>37</b>
3.1.1 Monossido di Carbonio (CO).....	37
3.1.2 Idrocarburi incombusti (HC).....	38
3.1.3 Ossidi di azoto (NO <sub>x</sub> ).....	38
3.1.4 Ossidi di zolfo (SO <sub>x</sub> ).....	39
3.1.5 Particolato (PM).....	40
3.1.6 Anidride Carbonica (CO <sub>2</sub> ).....	41
<b>3.2 La formazione nei motori Diesel.....</b>	<b>43</b>
<b>3.3 Principali parametri influenti sulle emissioni.....</b>	<b>45</b>
<b>4. Normative Europee sulle emissioni dei gas di scarico.....</b>	<b>47</b>
<b>4.1 La qualità del combustibile per autotrazione.....</b>	<b>47</b>
4.1.1 Miglioramento delle proprietà dei combustibili.....	47
4.1.2 Livello di zolfo nel combustibile.....	49
<b>4.2 Motivazioni per la richiesta dei combustibili ULS sul mercato.....</b>	<b>50</b>
<b>4.3 Normative Europee.....</b>	<b>50</b>
4.3.1 Direttive e limiti "Euro".....	51
4.3.2 Normative per mezzi pesanti.....	52
4.3.3 Le emissioni di CO <sub>2</sub> .....	55
4.3.4 Normative future.....	56
<b>5. Procedure di prova normalizzate.....</b>	<b>57</b>
<b>5.1 Strumenti di prova per valutazione delle emissioni.....</b>	<b>57</b>
5.1.1 Banco dinamometrico.....	58
5.1.2 Sistema di campionamento dei gas.....	58
5.1.3 Analizzatori per la misura degli inquinanti.....	59
<b>5.2 Differenze della prova tra Europa e USA.....</b>	<b>59</b>

<b>6. Metodi di abbattimento delle emissioni inquinanti.....</b>	<b>60</b>
6.1 <i>Introduzione.....</i>	60
6.2 <i>Sistema di diagnosi di bordo (EOBD).....</i>	62
6.3 <i>Sonda Lambda.....</i>	63
6.4 <i>Catalizzatori ossidanti.....</i>	65
6.5 <i>Filtri di particolato DPF.....</i>	66
6.5.1 <i>Il particolato solido nei Diesel.....</i>	66
6.5.2 <i>DPF.....</i>	68
6.5.3 <i>Il processo di rigenerazione.....</i>	69
6.5.4 <i>Vantaggi e svantaggi FAP e DPF.....</i>	71
6.6 <i>Tecnologia EGR.....</i>	71
6.7 <i>Nuova tecnologia di abbattimento NO<sub>x</sub> per Euro 6.....</i>	73
6.7.1 <i>Tecnologia SCR.....</i>	73
6.8 <i>Altre tecnologie già disponibili.....</i>	74
6.9 <i>Applicazione reale (Volvo D13K500).....</i>	75
<b>7. Combustibili alternativi.....</b>	<b>76</b>
<b>Conclusioni.....</b>	<b>79</b>
<b>Bibliografia, sitografia e normative.....</b>	<b>80</b>

## Introduzione

Il rilascio di sostanze tossiche e di gas serra nei processi di combustione è un importante problema ambientale, in particolare nelle aree urbane. Il funzionamento della maggior parte degli impianti fissi o mobili per generare calore e/o energia si basa sulla combustione degli idrocarburi in aria.

I gruppi inquinanti maggiormente emessi e limitati dalle normative sono numerosi:

- Idrocarburi incombusti e parzialmente ossidati (HC), costituiti da quella parte di combustibile che non è bruciata o che si è decomposta solo in parte;
- Ossido di carbonio (CO), dovuto alla presenza di zone di combustione in difetto di ossigeno;
- Ossido di azoto (NO<sub>x</sub>), derivano dalla reazione tra azoto e ossigeno presenti nell'aria, i quali a temperatura ambiente sono trascurabili, ma diventano rilevanti alle alte temperature dovute alla combustione;
- Particolato solido (PM, Particulate Matter), il cui componente principale è la fuliggine, materiale ad elevato contenuto di carbonio, sulla quale vengono assorbiti idrocarburi pesanti, tra cui gli I.P.A. (Idrocarburi Policiclici Aromatici) e sostanze inorganiche, tra cui i solfati provenienti dallo zolfo presente nel combustibile;
- Ossidi di zolfo (SO<sub>x</sub>);
- Anidride carbonica (CO<sub>2</sub>), inquinante termico;

I motori a combustione interna, soprattutto nel caso di motori Diesel e ad iniezione diretta di benzina, non sono in grado di miscelare perfettamente l'aria con il combustibile (a causa dei tempi ridotti a disposizione per tale operazione); ciò dà luogo alla formazione di fuliggine, principale costituente del particolato. Inoltre, in entrambi i casi di alimentazione, il biossido di carbonio (comunemente noto come anidride carbonica, CO<sub>2</sub>) costituisce il principale prodotto della reazione, esso non risulta nocivo come impatto diretto sulla salute umana, ma si tratta di un importante componente dei gas serra. Altre sostanze partecipano poi a fenomeni di inquinamento "secondario" (reazione degli inquinanti primari con altre specie chimiche presenti nell'ambiente sotto l'azione catalitica di un agente atmosferico), come lo smog fotochimico e le piogge acide. La principale fonte delle emissioni inquinanti è costituita dai trasporti, in corrispondenza delle aree urbane, nelle quali si ha una maggior concentrazione di veicoli. I maggiori responsabili delle emissioni causate dai trasporti sono i mezzi pesanti, impiegati soprattutto per il commercio su strada, ciò è dovuto alla loro movimentazione esclusivamente con motore Diesel e alle lunghe tratte che sono costretti a percorrere durante tutto l'arco dell'anno per portare a termine le consegne. Risulta quindi necessario adottare provvedimenti costruttivi che permettano il rispetto dei limiti imposti dalla legge.

Il contributo dei mezzi di trasporto all'inquinamento atmosferico è riportato nella seguente tabella[1]:

Inquinante	Contributo [% totale]	Autovetture		Mezzi pesanti
		Otto [g/Km]	Diesel [g/Km]	Diesel [g/Km]
Monossido di Carbonio (CO)	80 - 90	2	0.6	0.8
Idrocarburi Incombusti (HC)	60 - 90	0.2	0.06	0.1
Ossidi di Azoto (NO <sub>x</sub> )	50 - 80	0.15	0.5	0.6
Particolato (PM)	30 - 50	0	0.05	0.1
Anidride Carbonica (CO <sub>2</sub> )	20 - 30	200	160	180

[1] *Contributo dei mezzi di trasporto all'inquinamento atmosferico [EAA, European Environment Agency]*

Come si può notare dalla tabella, i mezzi pesanti, destinati al trasporto di merci, forniscono un contributo maggiore alle emissioni (su quasi tutti gli agenti inquinanti) rispetto alle autovetture; considerando che il numero di mezzi pesanti in circolazione sulle nostre strade è nettamente inferiore rispetto a quello delle autovetture allora tale contributo, in percentuale, aumenta notevolmente.

Per affrontare questo problema dovuto all'inquinamento atmosferico, la strategia dell'unione Europea si è basata su prescrizioni che riguardano le autovetture, i veicoli commerciali leggeri ed i veicoli pesanti, sul miglioramento dei combustibili e su una verifica più accurata delle emissioni inquinanti. Oltre all'applicazione di tecnologie motoristiche più avanzate e di dispositivi di post-trattamento ai gas di scarico, anche le specifiche ecologiche dei combustibili rappresentano uno dei tanti elementi che mirano al contenimento delle emissioni.

Combustibili più utili sono stati ottenuti nel tempo attraverso la messa al bando del piombo, e la successiva riduzione dello zolfo e del contenuto degli aromatici.

# 1 I mezzi pesanti

In questo primo capitolo si fornisce un'introduzione alla categoria di mezzi presi in esame. Verranno fornite una definizione e una classificazione di tali veicoli secondo la legge, saranno riportate le varie tipologie di mezzi pesanti con i relativi impieghi ed inoltre saranno indicati i principali vantaggi del trasporto di merci con questi veicoli.

## 1.1 – Definizione e classificazione

Per legge, si definiscono mezzi pesanti (HGV heavy goods vehicles) tutti i veicoli commerciali aventi un peso lordo del veicolo superiore a 3,5 tonnellate, ovvero 3500 Kg.

Secondo la "Classificazione dei veicoli", presente nel codice della strada all'articolo 47, essi sono definiti come mezzi di **Categoria N**: veicoli a motore destinati al trasporto di merci, aventi almeno quattro ruote. La categoria N ha poi al suo interno diverse sotto-categorie differenziate dal peso del veicolo; possiamo distinguere:

- **Categoria N1**: veicoli destinati al trasporto di merci, aventi massa massima non superiore a 3,5 tonnellate (non sono considerati mezzi pesanti);
- **Categoria N2**: veicoli destinati al trasporto di merci, aventi massa massima superiore a 3,5 tonnellate ma non superiore a 12 tonnellate;
- **Categoria N3**: veicoli destinati al trasporto di merci, aventi massa massima superiore a 12 tonnellate;

Per la loro guida è necessario possedere una patente di tipo C1 per gli autocarri che arrivano ad un massimo di 7,5 tonnellate; C per tutti gli autocarri, i quali hanno massa complessiva a pieno carico sempre maggiore di 3,5 tonnellate; C+E per la guida di mezzi ai quali vengono agganciati rimorchi o semirimorchi non leggeri (autoarticolati).

È possibile fare una classificazione più dettagliata di questi mezzi andando a considerare le seguenti caratteristiche:

- **Portata**: è il carico massimo trasportabile dal veicolo, il quantitativo di merce che satura completamente il mezzo in peso. Questa classificazione dipende dall'allestimento che viene fatto sul veicolo dopo l'acquisto e prima del suo utilizzo; perciò si deve tener conto delle specifiche richieste del cliente che variano a seconda della tipologia di merce da trasportare.
- **Massa complessiva a pieno carico**: massa limite che può raggiungere il veicolo a pieno carico per legge, considerando la somma del mezzo a vuoto (tara) e del carico massimo (portata). La pesa a vuoto del veicolo tiene conto anche dell'autista, della ruota di scorta e del serbatoio di carburante pieno.



- **Numero di assi:** l'asse (o assale) è un organo strutturale del veicolo al quale sono collegate due ruote, che ruotano grazie ad esso e sulle quali viene trasferito il carico gravante del veicolo stesso. Per questi mezzi, ad ogni assale è associata una massa limite trasportabile.

Abbiamo:

- 2 assi (4 ruote) per tutti i furgoni e le motrici di portata da 30 m<sup>3</sup> a 50 m<sup>3</sup>;
- 3 assi (6 ruote) per le motrici da 60 m<sup>3</sup> con un peso massimo non superiore a 26 tonnellate;
- 5 assi (10 ruote) nel caso di autoarticolati (2 assi nel trattore + 3 assi nel semirimorchio agganciato ad esso);

Possiamo dedurre che tutti i mezzi pesanti generalmente hanno più di 2 assi

- **Tipo di alimentazione:** tipo di combustibile impiegato per l'alimentazione del motore (solitamente questi mezzi pesanti sono tutti alimentati a Diesel)

Tutte queste informazioni appena riportate sono facilmente ricavabili in quanto sono riportate sulla carta di circolazione del veicolo.

## **1.2 – Caratteristiche**

I trasporti pesanti vengono effettuati quasi esclusivamente utilizzando gli **autocarri** [1.1].

Gli autocarri (comunemente definiti camion) sono veicoli in grado di trasportare merci autonomamente, si tratta di un mezzo di trasporto su strada singolo fornito di una motricità propria (a differenza di rimorchi e semirimorchi è in grado di muoversi da solo senza bisogno di essere "trainato").

Questi mezzi sono dotati di cassoni o vani di carico più o meno grandi e, in certi casi, di particolari apparecchiature da lavoro come gru operatrici o sponde montacarichi (per rendere più agevole la manovra di carico/scarico delle merci. Generalmente sono dotati di uno o due sedili passeggero a fianco del guidatore; negli ultimi anni le case costruttrici hanno aumentato il numero di sedili passeggero, tuttavia la legge italiana prevede che possano trovarsi sull'autocarro solamente le persone addette alla guida o altri operatori necessari alle operazioni di carico/scarico della merce, pertanto non è consentito il "classico" trasporto di passeggeri come sulle autovetture.

Da normativa il sedile del guidatore deve sempre essere protetto da eventuali spostamenti degli oggetti trasportati, perché ciò sia rispettato solitamente la cabina e il vano di carico sono separati, oppure, in presenza di mezzi con un unico vano, si pone un divisorio di protezione alle spalle del conducente.

Gli autocarri possono essere prodotti interamente da un'unica casa costruttrice oppure da più case differenti ed assemblati in un secondo momento, molti di quelli in circolazione ora derivano da autotelai o cabinati (veicoli con cabina ma senza carrozzeria) sui quali le aziende hanno successivamente installato le attrezzature più idonee a svolgere quella determinata mansione.

L'autocarro più diffuso per le strade è quello in cui il vano di carico (telonato o furgonato) è completamente diviso dalla cabina del guidatore.



[1.1] Esempio di autocarro [<https://it.wikipedia.org/wiki/Autocarro>]

### Allestimenti:

- **Centinatura:** il più comune, composto da un telaio metallico provvisto di traversine (stecche) necessarie per fermare il carico e ricoperto da un telone in materiale plastico. Questa soluzione consente un carico/scarico delle merci più agevole in quanto è facilmente apribile su tutti i lati;
- **Furgonatura:** solitamente è rivestita oppure frigorifera; consiste in pareti rigide ai lati e sul fondo del veicolo. Consente un migliore stivaggio delle merci grazie alle pareti piene che bloccano il carico trasportato;
- **Impianto di sollevamento:** un'altra soluzione comunemente usata è quella di applicare sul telaio un impianto idraulico di sollevamento e un impianto di aggancio per poter disporre nella parte del veicolo adibita al carico un container o una cassa mobile;
- **Cassone con sponde:** soluzione maggiormente impiegata sugli autocarri destinati al trasporto di materiali di scavo nell'edilizia; consiste in un cassone ribaltabile per mezzo di pistoni idraulici e dotato di sponde;

### 1.2.1 - Autoarticolati e Autotreni

Due importanti categorie di veicoli, facenti parte della famiglia degli autocarri, molto impiegate nel trasporto su strada sono:

#### **Autoarticolati** [1.2]:

L'autoarticolato (o bilico) è un veicolo commerciale a singolo rimorchio, in cui l'unità di traino, chiamata trattore stradale (veicolo provvisto solamente di cabina), è collegata al vano di carico (semirimorchio) mediante una ralla che ne consente lo snodo. La ralla è una delle due parti dell'accoppiamento meccanico *ralla-perno* che vanno a costituire l'autoarticolato, la ralla si trova sul trattore stradale mentre il perno si trova sul semirimorchio.

#### **Autotreni** [1.3]:

L'autotreno è un convoglio costituito da un'unità di trazione e da una o più unità di rimorchio sprovviste di motore. Le due semi-unità (trazione e rimorchio) sono collegate tra loro mediante un meccanismo definito *timone-campana*. Il timone, posto all'estremità anteriore del rimorchio, termina con un occhiello nel quale viene inserito un perno in acciaio che attraversa anche la campana (gancio posto all'estremità posteriore dell'unità trainante). Con questo tipo di collegamento, grazie ai movimenti del timone nel gancio, le due unità mantengono sempre una distanza fissa riuscendo a rendere "più fluide" le curve stradali.

Sono state svolte molte ricerche volte all'ottimizzazione di questo accoppiamento negli ultimi anni, ciò ha portato ad agganci semiautomatici facilmente utilizzabili con l'intervento del solo guidatore e ad un abbassamento progressivo dei piani di carico delle merci che sono passate da una possibilità volumetrica di carico di 80 m<sup>3</sup> ad una di 120 m<sup>3</sup>.



[1.2] Esempio di autoarticolato  
[<https://it.wikipedia.org/wiki/Autoarticolato>]



[1.3] Esempio di autotreno  
[<https://deltapubblicita.it/servizi/autocarri>]

Queste due categorie, se paragonate tra di loro, presentano caratteristiche duali (i vantaggi di una sono gli svantaggi dell'altra e viceversa):

<i>Autoarticolato</i>	<i>Autotreno</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Piano di carico uniforme con una lunghezza utile fino a 13,60 m che consente il trasporto di oggetti di particolare ingombro;</li> <li>▪ Possibilità di separare le due unità ed usare la parte motrice per l'aggancio di altri semirimorchi durante l'attesa in magazzino;</li> <li>▪ Maggior possibilità di utilizzo del <u>trasporto intermodale</u> anche con l'imbarco su navi, traghetti o ferrovia solo della parte posteriore, che può essere recuperata una volta arrivata a destinazione;</li> </ul> <p><i>(trasporto intermodale: metodo di trasferimento delle merci che utilizza unità di carico standardizzate, come container, che possono essere spostate facilmente da un mezzo di trasporto all'altro per arrivare a destinazione)</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Grazie ad una lunghezza superiore ammessa dall'accoppiata (18,75m contro i 16,50 dell'autoarticolato) si ha una maggior capacità di carico volumetrico;</li> <li>▪ In caso di necessità è possibile effettuare il trasporto solamente sull'autocarro trainante, ciò aumenta la flessibilità e diminuisce i costi dell'operazione;</li> <li>▪ Avendo il centro di spinta del rimorchio situato circa a metà della lunghezza complessiva del veicolo si ha una maggior controllabilità del mezzo in situazioni difficili;</li> </ul>

### **1.3-Tipologie e impieghi**

Oltre agli autotreni e agli autoarticolati citati in precedenza, possiamo descrivere altre tipologie di mezzi pesanti distinti in base all'impiego:

- *Autogrù:*  
Autocarro con cassone e gru dietro la cabina. Il cassone può essere fisso o ribaltabile mentre la gru può essere raccolta dietro alla cabina oppure distesa sul cassone. Sono dotati di quattro piedi stabilizzatori indipendenti comandati idraulicamente in modo da garantire la stabilità anche su terreni irregolari. Il numero di assi varia da due a quattro in base al peso della gru che si vuole installare. Sono principalmente usati per il carico di mezzi d'opera e per il trasporto di materiali pesanti in situazioni in cui non sono presenti condizioni di consegna agevoli (ad esempio cantieri in cui non ci sono banchine di carico);
- *Autocarri ribaltabili:*  
Dotati di impianto idraulico di sollevamento che consente di ribaltare il cassone per poter rilasciare il carico verticalmente oppure lateralmente. Impiegati soprattutto nel settore edile per il trasporto di macerie;
- *Autocarri con furgonatura e sponda montacarichi:*  
La furgonatura presenta pareti rigide ai lati e sul fondo; può essere più o meno coibentata (rivestita) e, per particolari merci, frigorifera (autocarri per trasporto refrigerato).  
La sponda montacarichi può essere verticale oppure ripiegata sotto allo sbalzo.  
Questo veicolo, per evitare eccessive problematiche di ingombro nell'attraversamento dei centri abitati, solitamente non possiede più di tre assi. Viene impiegato per il trasporto di merci, generalmente disposte su pallet, agli esercizi pubblici presenti nelle città (ad esempio negozi di alimentari);
- *Bisarca:*  
Autocarro destinato al trasporto di altri veicoli.  
Comunemente impiegato per il soccorso stradale e per il trasporto di più veicoli contemporaneamente tra le case costruttrici e le reti di vendita.  
Sono costituiti da un piano inferiore e un piano superiore dotato di un meccanismo che ne consente l'abbassamento; entrambi i piani possiedono un vano di carico aperto con delle guide, una rampa di carico e dei fermi che consentono il carico, lo scarico e il fissaggio delle vetture;
- *Autocarri cisterna:*  
Dotate di un autotelaio sul quale è fissata una cisterna che ha caratteristiche variabili a seconda del peso, del volume e di ciò che trasporta.  
Solitamente sono attrezzati con impianti di scarico a pressione e contatori di precisione del quantitativo di merce scaricata.  
Sono impiegati per il trasporto di materiali liquidi come: alimentari, carburanti, gas liquidi, derivati del petrolio oppure per sostanze più dense come ad esempio il cemento;

- *Autocarri silos:*  
Possiedono la stessa ingegneria e meccanica degli autocarri cisterna ma vengono utilizzati per il trasporto di polveri (mangimi alimentari o qualsiasi altro prodotto polverizzato)

**ADR:** Accord Dangereuses Route, accordo europeo relativo al trasporto internazionale di merci pericolose su strada (Ginevra, 1957).  
Definisce la pericolosità di una sostanza in base agli effetti che essa ha sull'uomo e sull'ambiente.  
La suddivisione iniziale è in classi:

*Classe 1: Materiali e sostanze esplosive*

*Classe 2: Gas*

*Classe 3: Liquidi infiammabili*

*Classe 4.1: Materie solide infiammabili e auto-reattive*

*Classe 4.2: Sostanze soggette ad autocombustione*

*Classe 4.3: Sostanze che, a contatto con l'acqua, sprigionano gas infiammabili*

*Classe 5.1: Sostanze ossidanti*

*Classe 5.2: Perossidi organici*

*Classe 6.1: Sostanze tossiche*

*Classe 6.2: Prodotti infettivi*

*Classe 7: Materiali radioattivi*

*classe 8: Materiali corrosivi*

*Classe 9: Materiali con pericolosità varia e pericolosi per l'ambiente*

[1.4] *Classificazione delle sostanze pericolose* [<https://www.pesanti.com>]

- *Autocarri per trasporto ADR:*  
Mezzi destinati al trasporto di sostanze pericolose (ad esempio infiammabili, tossiche, corrosive). Sono attrezzati in base alle specifiche normative e al materiale trasportato;
- *Autocarro a quattro ruote motrici:*  
Sono provvisti di trazione integrale, di un telaio maggiormente rialzato e di sospensioni indipendenti con un'ampia escursione per agevolare il passaggio su terreni irregolari.  
Mezzo destinato ad impegni gravosi sia in campo civile che militare;

### ***1.4 – Vantaggi del commercio su strada***

È possibile riassumere i principali vantaggi del trasporto con mezzi pesanti in questi pochi punti:

- Grazie all'efficacia delle odierne reti stradali è consentito il trasporto di merci di qualsiasi dimensione ed è possibile percorrere grandi distanze in tempi relativamente brevi;
- Mantengono intatte tutte le caratteristiche del prodotto fino alla consegna;
- Possono essere effettuate in ogni situazione e anche in casi di emergenza;
- A differenza del trasporto con navi, aerei e treni non presentano la problematica del "primo ed ultimo miglio", essa rende necessaria la presenza di un secondo mezzo di trasporto per portare la merce nel luogo in cui sarà caricata (ferrovia, porto, aeroporto) e per la consegna finale al cliente; ciò riduce notevolmente i tempi e i costi di consegna;

## 2 Motore ed alimentazione dei mezzi pesanti

I motori degli autocarri odierni presentano cilindrate diverse che variano da piccole cubature per veicoli più leggeri (simili a quelle delle autovetture), fino a cilindrate di 16000 cm<sup>3</sup> per motori molto grandi che possono sviluppare potenze superiori a 600 CV; questi motori possono essere disposti in linea oppure a V e la maggior parte di essi sono dotati di turbocompressore. Inoltre possono essere a 2 o a 4 tempi. Indipendentemente dalla loro cilindrata e dalla loro disposizione i motori degli autocarri sono esclusivamente motori diesel (alimentati a gasolio).

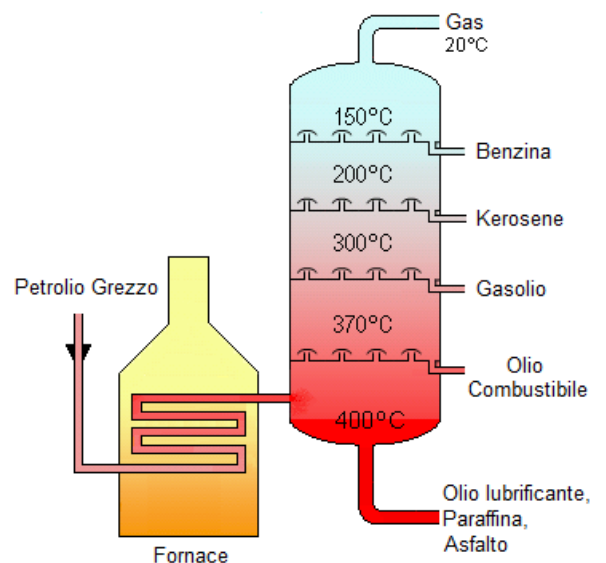
### 2.1 – Il gasolio

Il gasolio è una miscela di idrocarburi liquidi che viene ottenuta mediante un processo di distillazione frazionata del petrolio greggio. Viene impiegato principalmente come combustibile per i motori diesel, per il riscaldamento e per la produzione di energia elettrica.

Questa miscela trova le sue prime applicazioni in ambito meccanico nel 1893 ad Augusta (Germania) quando Rudolf Diesel eseguì le prime ricerche che in seguito portarono alla creazione del ciclo Diesel e successivamente al motore diesel.

#### 2.1.1 - Produzione

- Il metodo più comune per la produzione del gasolio è mediante *distillazione frazionata*<sup>[2.1]</sup> del petrolio greggio. La distillazione frazionata è un processo che ha la finalità di produrre le diverse tipologie di idrocarburi da trasformare in combustibile; i componenti della miscela di partenza sono separati in base alla loro temperatura di ebollizione, nella parte più bassa della colonna di distillazione (chiamata torre di frazionamento) si ha una maggior concentrazione delle sostanze aventi temperatura di ebollizione maggiore, man mano che si sale fino alla cima si hanno sostanze con temperature di ebollizione sempre minori. Il gasolio si ottiene dal petrolio greggio avente una temperatura media di circa 300-350°C all'uscita dalla torre di frazionamento.



[2.1] Processo di distillazione frazionata  
[[https://it.wikipedia.org/wiki/Distillazione\\_frazionata](https://it.wikipedia.org/wiki/Distillazione_frazionata)]

- Un secondo metodo per la produzione del gasolio è il *cracking*, in cui idrocarburi paraffinici pesanti, come il greggio, vengono frammentati per poter ottenere idrocarburi paraffinici leggeri: le benzine. Possiamo distinguerne due diverse tipologie: lo *steam cracking* e il *cracking catalitico*.

Nella prima si hanno impianti molto grandi che possono produrre da uno a tre milioni di tonnellate annue, in questo processo i reagenti vengono preriscaldati e vaporizzati, in seguito vengono miscelati con del vapore e riscaldati a temperature molto elevate (800-850°C) dentro a dei reattori tubolari.



Il cracking catalitico è il più impiegato per la produzione di gasolio; consiste sempre in un processo di divisione degli idrocarburi ma ciò avviene in presenza di un catalizzatore (specie chimica che interviene durante una reazione e consente di aumentarne o diminuirne l'energia di attivazione), questo consente di poter lavorare a temperature relativamente più basse (450-550°C).

- Altro metodo è il GTL (Gas To Liquid); processo di raffineria che converte gas naturali o idrocarburi gassosi in idrocarburi a catena più lunga (come la benzina e il gasolio).

### 2.1.2 - Caratteristiche:

Il gasolio è una miscela liquida solitamente incolore o tendente al giallo.

Le sue principali proprietà chimico-fisiche sono riportate nella tabella sottostante:

Densità [g/cm <sup>3</sup> ]	0,8
Solubilità in acqua	Insolubile
Temperatura di fusione [°C]	Da -40 a 6
Temperatura di ebollizione	Da 141 a 462
Tensione di vapore [Pa]	400
Viscosità cinematica [m <sup>2</sup> /s]	4·10 <sup>-6</sup>
Punto di fiamma	> 56
Temperatura di autoignizione	>225

[2.2] *Tabella riassuntiva caratteristiche chimico-fisiche gasolio* [<https://www.tamoil.it>]

Due caratteristiche di notevole importanza, per l'impiego meccanico, sono le cosiddette "proprietà a freddo", ovvero il *punto di intorbidamento* che rappresenta la temperatura, espressa in °C, alla quale il carburante comincia a diventare opaco e il *CFFP (Cold Filter Plugging Point)* che è la temperatura alla quale il prodotto non scorre più entro un determinato tempo all'interno di un certo filtro. Altre caratteristiche rilevanti sono la *proprietà lubrificante* e la *viscosità* che influiscono sulle prestazioni dei sistemi di iniezione del carburante.

A livello legislativo, in Italia, le specifiche del gasolio per autotrazione sono regolate dalle norme UNI EN 590, che fanno riferimento alle direttive europee EN 590 (alle quali devono attenersi obbligatoriamente tutte le auto diesel commercializzate nell'Unione Europea).

CARATTERISTICHE	UNITÀ DI MISURA	VALORE		METODO
		Min	Max	
Aspetto		Chiaro & Limpido		ASTM D 4176/2 - 02
Densità a 15°C	Kg/m <sup>3</sup>	820,0	845,0	EN ISO 3675, EN ISO 12185
Numero di cetano		51,0		EN 15195, EN ISO 5165
Indice di cetano		46,0		EN ISO 4264
Distillazione: Recupero a 150°C Recupero a 250°C Recupero a 350°C	%(v/v) %(v/v) %(v/v) °C	85	2 <sup>(2)</sup> 65 360	EN ISO 3405
Punto di infiammabilità	°C	55,0		EN ISO 2719
Poliaromatici (2 anelli +)	%(m/m)		8	EN 12916
Viscosità a 40°C	mm <sup>2</sup> /s	2,000	4,500	EN ISO 3104
Punto di nebbia 16 mar - 14 nov	°C	Riportare		EN 23015
Punto di nebbia 15 nov - 15 mar	°C		0	
C.F.P.P. 16 mar - 15 nov			0	EN 116
C.F.P.P. 15 nov - 15 mar	°C		-10,0	
Zolfo totale	mg/kg			EN ISO 20884
			10,0	EN ISO 20846
Corrosione su rame (3h a 50°C)	indice		1	EN ISO 2160
Residuo carbonioso (su res 10%)	%(m/m)		0,30	EN ISO 10370
Acqua	mg/kg		200	EN ISO 12937
Ceneri	%(m/m)		0,010	EN ISO 6245
Potere lubrificante	µm		460	EN ISO 12156-1
Stabilità all'ossidazione	g/m <sup>3</sup>		25	EN ISO 12205
	h	20		EN ISO 15751
Contaminazione totale	mg/kg		24	EN ISO 12662
Contenuto biodisel	%(v/v)		7,0	EN ISO 14078

[2.3] Proprietà del gasolio secondo normativa EN590:2009 [<https://www.gruppoapi.com/gasolio>]

### 2.1.3 – Numero di Cetano

All'interno del motore, il gasolio viene iniettato direttamente in camera di combustione e portato ad elevate pressioni e temperature che, in presenza di aria danno origine a combustioni spontanee.

Il comportamento del gasolio nella fase di accensione (tempo trascorso tra l'iniezione e l'inizio della combustione) viene espresso con un indice chiamato *numero di cetano*, maggiore è questo valore e maggiore sarà la prontezza del carburante all'accensione; il numero di cetano determina quindi la capacità di auto-accensione del gasolio. Questo valore è usato per classificare i vari gasoli che alimentano i motori diesel.

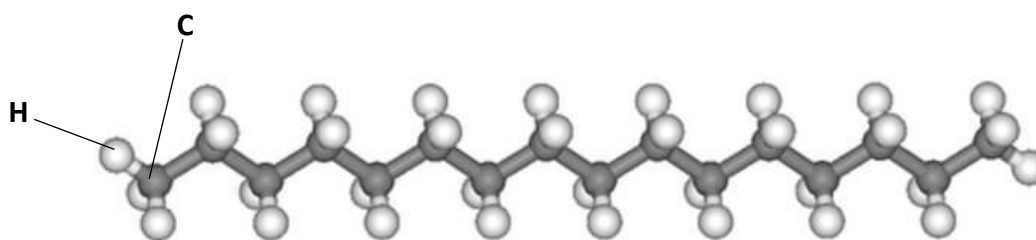
La prova per la determinazione del numero di cetano viene svolta su un motore monocilindrico campione, il quale viene alimentato con una miscela di Cetano puro (C<sub>16</sub>H<sub>34</sub>)[2.4] avente ritardo all'accensione nullo, quindi un alto potere detonante (NC=100), e α-metilnaftene caratterizzata da un potere detonante basso (NC=0).

Si alimenta il motore con il combustibile in esame, in seguito viene aumentato il rapporto di compressione ( $rc$ ) fino a portare l'accensione in corrispondenza del P.M.S. (punto morto superiore); si ripete la procedura con due miscele campione opportunamente proporzionate per avere NC maggiore e minore rispetto a quello incognito del carburante in esame, successivamente si rilevano anche i ritardi all'accensione; questo parametro si determina con un apposito rilevatore posto sull'iniettore, più precisamente si ha l'iniettore munito di un contatto elettrico che rileva l'istante in cui si solleva lo spillo ed ha inizio l'iniezione e un dispositivo elettronico che registra l'istante in cui il combustibile si accende, il tempo trascorso tra queste due rilevazioni indica il ritardo all'accensione.

In questo modo, si ottengono due miscele di riferimento che richiedono un rapporto di compressione che comprende anche quello del combustibile in esame, il quale potrà essere facilmente trovato mediante interpolazione su un grafico (con rapporto di compressione sulle ascisse e NC sulle ordinate).

Non risulta conveniente avere un ritardo all'accensione né troppo basso né troppo esteso: nel caso di ritardo basso si corre il rischio di avere goccioline di gasolio che potrebbero avviare la propria combustione prima di aver avuto il tempo di vaporizzare nell'aria calda compressa, ciò comporterebbe la presenza di zone ad elevata temperatura che porterebbero alla formazione di inquinanti (ossidi di azoto); mentre, nel caso di un ritardo all'accensione troppo esteso, una consistente parte di combustibile verrebbe iniettata prima dell'accensione con un'eccessiva velocità di reazione e conseguenti picchi di pressione che potrebbero danneggiare la camera di combustione. Un gasolio si considera di buona qualità se possiede un numero di cetano (NC) compreso tra 60 e 80; per legge l'NC dei gasoli per motori diesel non deve essere inferiore a 47.

Possiamo considerare il numero di Cetano come l'opposto del numero di Ottano (NO) con il quale si caratterizzano le benzine, esso infatti viene definito in base al potere anti-detonante della miscela. Combustibili che presentano un alto NO sono inutilizzabili nei motori diesel perché presentano un basso NC, e viceversa. Nelle benzine vengono aggiunti anti-detonanti mentre nei gasoli vengono aggiunti pro-detonanti.



[2.4] Molecola di cetano ( $C_{16}H_{34}$ ) [<https://www.chimica-online.it>]

### 2.1.4 – Impieghi

La principale applicazione del gasolio è sicuramente quella di combustibile per autotrazione; in essa si hanno limitazioni più rigide in merito a determinati parametri e caratteristiche migliori che gli permettono di lavorare anche in condizioni estreme per poter garantire sempre una buona efficienza al motore. Può essere impiegato anche in altri ambiti:

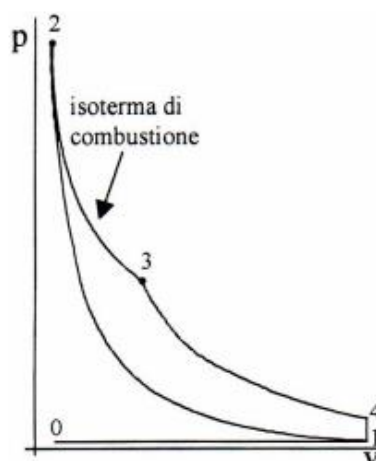
- Motori navali: viene impiegato un gasolio altobollente con elevati tenori di zolfo
- Combustione stazionaria: usato per alimentare la combustione assieme ad una caldaia o un generatore di vapore per la produzione di calore; ha caratteristiche meno stringenti rispetto a quello per autotrazione: non ci sono limiti sul numero di cetano, ammette un tenore di zolfo più elevato ed è più auto bollente, inoltre non è indicata una temperatura massima alla quale il 95% del prodotto è distillato (questo valore invece è posto a 360°C per i gasoli da autotrazione)
- Produzione di energia elettrica: impiegato negli impianti di cogenerazione che prevedono l'abbinamento di un motore a combustione interna in cui l'energia meccanica viene trasformata da un generatore in energia elettrica e un sistema di recupero del calore per la produzione di energia termica

## 2.2 – Il ciclo Diesel

Il ciclo Diesel è un ciclo termodinamico nel quale l'accensione della miscela avviene per effetto delle elevate temperature che si ottengono in seguito ad una fase di compressione; questo ciclo venne studiato da Rudolf Diesel (in onore del quale venne attribuito il suo nome al ciclo) verso fine '800. Il ciclo Diesel fu brevettato in due modelli differenti: prima in maniera teorica con quello che ora viene chiamato *primo ciclo diesel*, successivamente, in seguito ad alcune modifiche per poterlo rendere utilizzabile nella pratica, venne creato il *secondo ciclo diesel* (comunemente detto ciclo diesel).

### Primo ciclo Diesel<sup>[2.5]</sup> (cessione di calore a temperatura costante)

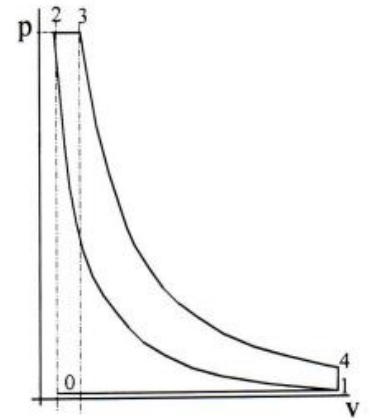
Con questo ciclo Rudolf Diesel cercò di avvicinarsi il più possibile al modello del ciclo di Carnot. Infatti, essendo le fasi di compressione ed espansione approssimativamente adiabatiche, egli credeva di realizzare una combustione isoterma dosando l'iniezione in modo da eguagliare il calore prodotto con il lavoro ceduto durante l'espansione; ciò in realtà non era ottenibile.



[2.5] Primo ciclo Diesel [Corso di macchine: Motori a combustione interna Dot. Ing. Daniele Scatolini]

### Secondo ciclo Diesel<sup>[2.6]</sup> (cessione di calore a pressione costante)

In questo ciclo si suppone che la combustione avvenga totalmente a pressione costante, in realtà anche questa è una forzatura che non rispecchia a pieno il ciclo in situazioni reali.



[2.6] *Secondo ciclo Diesel*

[Corso di macchine: Motori a combustione interna Dot. Ing. Daniele Scatolini]

#### 2.2.1 – Ciclo ideale

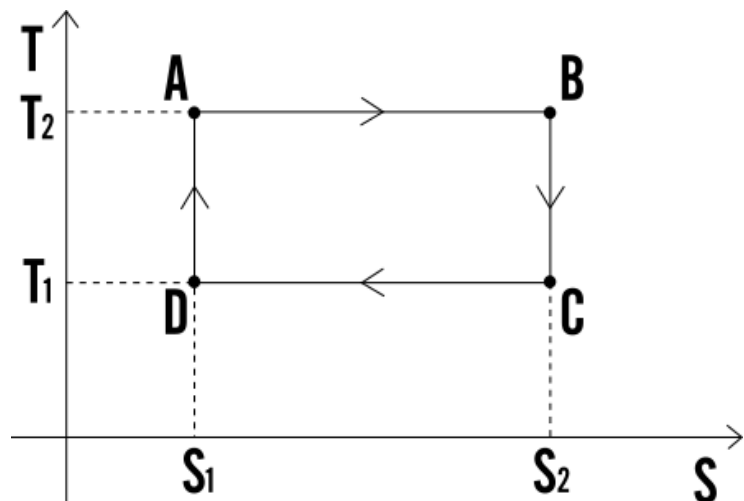
Le prestazioni dei motori sono determinate dagli scambi di energia che avvengono tra i fluidi di lavoro e i loro organi mobili. Per analizzare questi scambi inizialmente è conveniente supporre che sia il fluido di lavoro che la macchina si comportino in maniera ideale; si esamina quindi l'insieme delle trasformazioni termodinamiche che costituiscono il ciclo ideale.

Quando si deve realizzare un ciclo che ha lo scopo di convertire l'energia termica in energia meccanica è sempre conveniente prendere come riferimento il ciclo di Carnot<sup>[2.7]</sup>, esso infatti è il ciclo che presenta il massimo rendimento tra tutti i cicli ottenibili (siccome ha a disposizione una sorgente di calore a temperatura costante elevata ed un pozzo di calore a temperatura costante bassa). Delle quattro trasformazioni che compongono il ciclo di Carnot conviene conservare, anche per i cicli ideali dei motori, le due trasformazioni isoentropiche di compressione (**D-A**) ed espansione (**B-C**), mentre le due trasformazioni isoterme di alta temperatura (**A-B**) e di bassa temperatura (**C-D**) è preferibile sostituirle con

trasformazioni più adeguate a questo tipo di macchine.

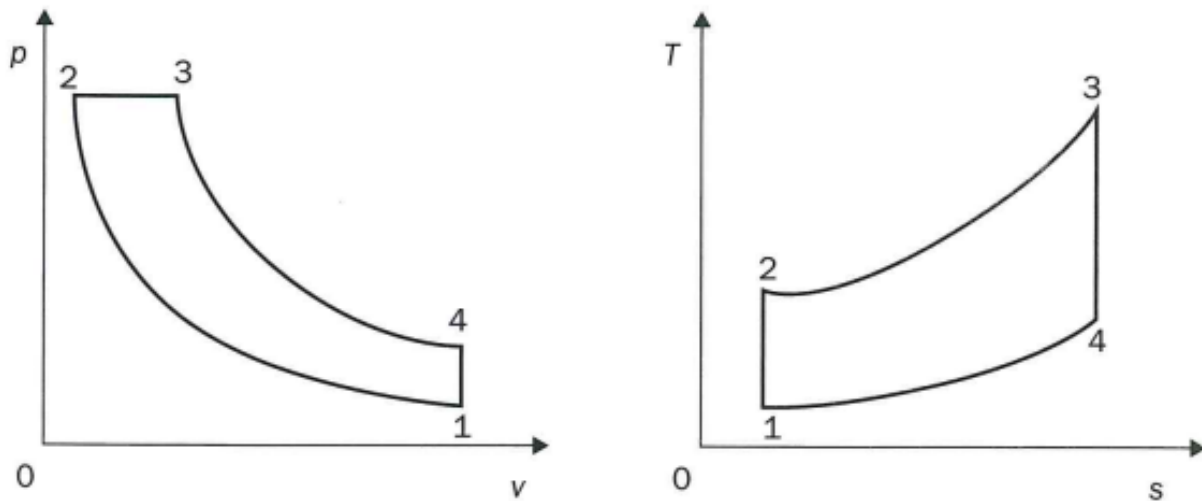
Nel caso dei motori a combustione interna infatti la sorgente di energia termica ad alta temperatura non è a temperatura costante; si ha del combustibile che, combinandosi con l'aria, dà luogo a reazioni esotermiche portando la temperatura dei gas combusti a valori molto alti (queste temperature dipendono principalmente dalla natura del combustibile e dal rapporto della miscela aria/combustibile).

Siccome questi valori di temperatura si raggiungono solamente durante la fase di combustione, che è intercalata da altre tre fasi durante le quali la temperatura è nettamente inferiore, non è possibile trattare la sorgente di calore come se fosse a temperatura costante.



[2.7] *Ciclo di Carnot* [<https://www.youmath.it>]

Per analizzare il comportamento del motore Diesel conviene far riferimento ad un ciclo ideale che prevede compressione, espansione isoentropica e scarico di calore a volume costante ed una combustione che avviene a pressione costante.



[2.8] *Ciclo Diesel ideale su: diagramma P-V [2.8.1] diagramma P-S [2.8.2]*  
 [Ciclo Otto e ciclo Diesel dipartimento di ingegneria Meccanica Novara Ing. Silvano Andorno]

Sul diagramma **P-V**[2.8.1] possiamo distinguere quattro fasi:

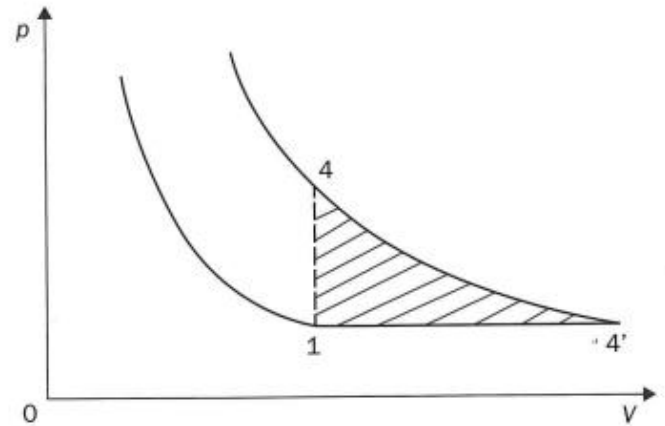
- 1-2** Fase di compressione *adiabatica* (senza perdite di calore)
- 2-3** Fase di combustione *isobara* (a pressione costante)
- 3-4** Fase di espansione *adiabatica*
- 4-1** Fase di scarico *isocora* (a volume costante)

Essendo questi dei cicli ideali, si è supposto che essi siano sempre percorsi dallo stesso fluido di lavoro che scambia calore con le sorgenti esterne e poi riprende il ciclo; per questo motivo sull'asse delle ascisse dei due cicli sono riportate grandezze specifiche all'unità di massa del fluido (volume specifico  $V$  o entropia specifica  $S$ ). Se si riportassero invece grandezze totali (Volume totale o entropia totale) si potrebbero tracciare dei cicli chiamati "cicli di lavoro" che mostrano il processo di ricambio del fluido di lavoro alla fine di ogni ciclo.

Nel caso dei motori risulta conveniente chiudere il ciclo nell'atmosfera scaricandovi i gas combusti già espansi e prelevando l'aria necessaria per il nuovo ciclo. Questa operazione viene effettuata per mezzo di una trasformazione a volume totale costante (isocora), mentre il pistone si ferma ed inverte il suo moto al P.M.I. (punto morto inferiore). In questo modo si ha il vantaggio di poter comandare il moto del pistone con una semplice coppia cinematica biella-manovella che converte il moto alternato rettilineo del pistone nel moto rotatorio dell'albero motore; si ha però lo svantaggio di interrompere l'espansione dei gas combusti quando la pressione nel cilindro è ancora superiore a quella atmosferica, ciò comporta una perdita di energia.

In figura è mostrata, sul piano P-V, la fase di scarico spontanea che avviene lungo la trasformazione isocora 4-1 ( $V_4 = V_1$ ) che comporta una perdita di lavoro rispetto al ciclo con espansione prolungata fino alla pressione atmosferica (area 4-4'-1).

Questa energia è in parte recuperabile solamente nei motori turbo-sovralimentati.



[2.9] Fase di scarico del fluido in un ciclo di lavoro

[Corso di macchine: Motori a combustione interna Dot. Ing. Daniele Scatolini]

In queste macchine, dette volumetriche, non vi è una limitazione pratica sulla temperatura massima di combustione perché è sufficiente raffreddare in maniera opportuna le superfici esterne degli organi che delimitano la camera di combustione per mantenere le temperature entro valori che non diano problemi alla resistenza dei materiali. Sono invece presenti dei limiti per quanto riguarda la pressione massima raggiunta nel ciclo e per la pressione massima di fine compressione.

I limiti sulla pressione massima raggiunta nel ciclo sono dovuti all'esigenza di evitare organi meccanici con dimensioni eccessive. Per quanto riguarda la pressione di fine compressione viene limitata per vari motivi: essa infatti è direttamente correlata alla pressione massima del ciclo e l'avviamento del motore risulta tanto più difficoltoso quanto più grande è il lavoro speso in questa fase.

- A parità di pressione finale di compressione il massimo rendimento si ha con una combustione a volume costante (quindi con un motore a benzina).
- A parità di pressione massima di combustione il massimo rendimento è ottenuto con una combustione a pressione costante (quindi con un motore diesel).

## 2.2.2 – Rendimento ideale

Essendo il calcolo del rendimento svolto su un ciclo ideale, bisogna tener conto di alcune ipotesi semplificative: [Fondamenti motori a combustione interna, Giancarlo Ferrari-Esculapio-2016]

1. Ogni ciclo è sempre percorso dalla stessa massa di fluido lungo trasformazioni reversibili; riceve calore dalla sorgente ad alta temperatura durante la fase di combustione e cede il calore che non viene trasformato in lavoro alla sorgente a bassa temperatura durante la fase di scarico;

2. Il fluido che evolve durante il ciclo è considerato un gas perfetto, quindi:
  - La sua equazione è  $p \cdot v = R \cdot T$
  - Ha viscosità nulla
  - Presenta proprietà termiche costanti (Calore specifico a pressione e volume costante  $C_p$ ,  $C_v$ )
3. Le trasformazioni di compressione ed espansione sono isoentropiche perché il fluido, essendo considerato perfetto, non è viscoso e non ci sono scambi di calore con l'esterno;

Siccome il ciclo Diesel (come il ciclo Otto) può essere visto come un caso particolare di ciclo Sabathè, il calcolo del rendimento ideale ( $\eta_{id}$ ) può essere fatto partendo da questo ciclo che viene definito secondo i seguenti rapporti:

- Rapporto volumetrico di compressione:  $r = v_1/v_2$
- Rapporto di combustione a volume costante:  $\tau_v = T_3/T_2 = p_2/p_3$
- Rapporto di combustione a pressione costante:  $\tau_p = T_3'/T_3 = v_3'/v_3$

Secondo la definizione di rendimento, è possibile scrivere:

$$\eta_{id} = l/q_1 = 1 - (q_2/q_1) = 1 - C_v \cdot (T_4 - T_1) / [C_v \cdot (T_3 - T_2) + C_p \cdot (T_3' - T_3)]$$

Siccome lungo una trasformazione isoentropica le temperature sono legate ai volumi specifici dalla relazione  $T \cdot v^{k-1} = costante$ , è possibile esprimere tutte le temperature del ciclo in funzione di  $T_1$  e dei rapporti caratteristici del ciclo:

$$T_2 = T_1 \cdot (v_2/v_1)^{k-1} = T_1 \cdot r^{k-1} \qquad k = \frac{C_p}{C_v}$$

$$T_3 = \tau_v \cdot T_2 = T_1 \cdot \tau_v \cdot r^{k-1}$$

$$T_3' = \tau_p \cdot T_3 = T_1 \cdot \tau_v \cdot \tau_p \cdot r^{k-1}$$

$$T_4 = T_3' \cdot (v_3'/v_1)^{k-1} = T_1 \cdot \tau_v \cdot \tau_p \cdot r^{k-1} \cdot (\tau_p \cdot v_3'/v_1)^{k-1} = T_1 \cdot \tau_v \cdot \tau_p \cdot r^{k-1} \cdot (\tau_p/r)^{k-1} = T_1 \cdot \tau_v \cdot \tau_p^k$$

Sostituendo e semplificando la formula del rendimento riportata in precedenza si ottiene:

$$\eta_{id} = 1 - (1/r^{k-1}) \cdot (\tau_v \cdot \tau_p^k - 1) / [(\tau_v - 1) + (\tau_p - 1) \cdot \tau_v \cdot k]$$

In forma più sintetica:

$$\eta_{id} = 1 - (1/r^{k-1}) \cdot f(\tau_v, \tau_p)$$

Dove  $f(\tau_v, \tau_p)$  è la funzione di  $\tau_v$  e  $\tau_p$  presente nella formula precedente ed il suo valore è circa 1;

$$\eta_{id} = 1 - (1/r^{k-1}) \cdot \underbrace{(\tau_v \cdot \tau_p^k - 1) / [(\tau_v - 1) + (\tau_p - 1) \cdot \tau_v \cdot k]}_{f(\tau_v, \tau_p)}$$

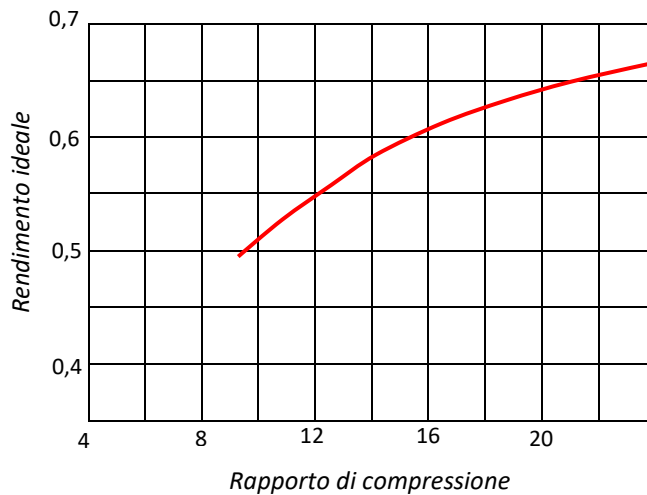
Nel ciclo Diesel si ha il rapporto di combustione a volume costante  $\tau_v = 1$ .

Quindi il rendimento ideale per questo ciclo sarà:

$$\eta_{id} = 1 - (1/r^{k-1}) \cdot (\tau_p^k - 1) / [(\tau_p - 1) \cdot k]$$



Questa espressione del rendimento ci mostra l'influenza che esercitano su di esso il rapporto di compressione  $r$  e i rapporti di combustione a pressione e volume costante  $\tau_p$  e  $\tau_v$ ; in particolare i valori di  $\eta_{id}$  crescono all'aumentare di  $r$  con legge iperbolica.



[2.10] Andamento parabolico del rendimento ideale di un ciclo diesel con  $\tau_p=2$  in funzione del rapporto di compressione

[Fondamenti motori a combustione interna, Giancarlo Ferrari-Esculapio-2016]

### 2.2.3 – Ciclo limite

Con lo scopo di ottenere un ciclo Diesel reale, si può effettuare un passaggio intermedio in cui si mantiene ancora l'ipotesi di macchina ideale ma si considera il fluido di lavoro come reale, ovvero con le sue effettive caratteristiche. Prima della combustione il fluido che evolve nei cilindri è formato da aria, vapori di combustibile ed una frazione di gas combusti ricircolati dal ciclo precedente, mentre dopo la combustione è costituito dai prodotti di ossidazione del combustibile.

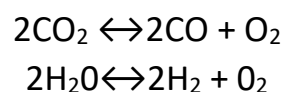
Il fluido reale differisce da quello ideale per le seguenti motivazioni:

- La sua capacità termica aumenta con la temperatura;
- I prodotti di ossidazione del combustibile ( $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$ ) si dissociano alle alte temperature;
- Il processo di combustione cambia le sue caratteristiche;

Questo ciclo viene detto "ciclo limite" in quanto fornisce il limite superiore delle prestazioni che si riescono ad ottenere dal motore perfezionando continuamente la macchina.

L'aumento della temperatura con conseguente aumento della capacità termica del fluido reale comporta una diminuzione del rendimento del ciclo limite; la perdita di lavoro che si registra tra ciclo ideale e ciclo limite è dovuta alla differenza tra i calori sottratti.

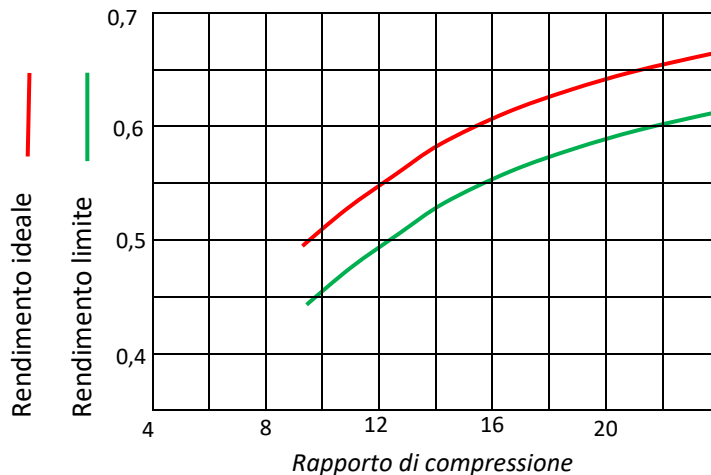
Bisogna anche tener conto che nel fluido reale alle elevate temperature che si raggiungono durante il processo di combustione le reazioni di ossidazione non avvengono in maniera completa ma sono presenti i seguenti equilibri chimici:



[Fondamenti motori a combustione interna, Giancarlo Ferrari-Esculapio-2016]

Le velocità con cui le molecole di  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  si dissociano in  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  e  $\text{O}_2$  eguagliano la velocità con cui queste molecole si trasformano in  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$ . Le frazioni molari presenti in queste reazioni chimiche dipendono dalla temperatura e dal rapporto di miscela dei reagenti. Al crescere della temperatura saranno più spostate verso destra mentre, al diminuire di essa, tenderanno a sbilanciarsi maggiormente a sinistra.

Ciò comporta un reale rilascio di energia durante la combustione che risulta essere inferiore a quello previsto dal ciclo teorico ed una parziale restituzione dell'energia non liberata a causa dei fenomeni di dissociazione durante l'espansione; questo ci porta ad avere un'espansione non più isoentropica ma ad entropia crescente.



[2.11] Confronto tra i valori di rendimenti ideale e limite per un ciclo Diesel in funzione del rapporto di compressione

[Fondamenti motori a combustione interna, Giancarlo Ferrari-Esculapio-2016]

## 2.2.4 – Ciclo reale

In fine è possibile eliminare anche l'ipotesi di macchina ideale per poter studiare il ciclo reale, ovvero fluido di lavoro reale che evolve in una macchina reale. Questo ciclo rappresenta l'evoluzione nel tempo delle reali condizioni fisiche di un fluido di lavoro all'interno del cilindro di un vero motore.

Il ciclo reale può essere calcolato con un adeguato modello di simulazione oppure può essere misurato in sala prova installando un trasduttore di pressione sulla testa del motore in funzione (in passato questo trasduttore veniva chiamato indicatore, ecco perché questo ciclo viene anche definito ciclo indicato).

I principali aspetti che differenziano una macchina reale da una ideale sono:

- Le pareti del cilindro non sono adiabatiche, ma consentono continui scambi di calore con il fluido di lavoro;
- La combustione non è perfetta perché avviene ad una propria velocità finita e perché potrebbe essere incompleta
- Sono presenti delle perdite di carico nel processo di ricambio del fluido a fine ciclo
- Presenza di anticipi e ritardi nella realizzazione delle varie fasi

Ognuna di queste caratteristiche riportate influisce in maniera più o meno rilevante sul rendimento del ciclo.

- Il flusso di calore ( $Q'$ ) dai gas che evolvono nel cilindro, verso il fluido refrigerante, in prima approssimazione si può ritenere proporzionale all'area della superficie del cilindro ( $S_{cil}$ ), mentre la portata in massa di fluido ( $m_f$ ), a cui il calore è sottratto, è proporzionale al prodotto tra il volume del cilindro ( $V_{cil}$ ) e il numero di giri ( $n$ ). Il loro rapporto rappresenta il calore ceduto all'esterno per ciclo dall'unità di massa e risulta inversamente proporzionale alla velocità media del pistone ( $u_{mp}$ ):

$$Q'/m_f \sim S_{cil}/(V_{cil} \cdot n) \sim D^2/(D^3 \cdot n) \sim 1/u_{mp}$$

Da questa proporzionalità si intuisce che: al crescere della velocità media del pistone il motore si avvicina al comportamento ideale di macchina adiabatica, mentre al diminuire di tale velocità aumentano i tempi, durante i quali una crescente quantità di calore può fluire verso il refrigerante con un conseguente aumento di questa perdita. Nonostante tutto il suo effetto sulla perdita di rendimento non è così rilevante (circa un 5-10%).

- La combustione, non considerata perfetta, avviene in un tempo finito con una propria velocità e di conseguenza non può avvenire a volume costante (ciò richiederebbe una velocità infinita) e non è nemmeno auspicabile che avvenga a pressione costante (perché sarebbe troppo lenta). Tutto ciò comporta un calo del rendimento reale rispetto a quello ideale che può essere minimizzato programmando l'inizio della fase di combustione con un corretto anticipo (iniezione anticipata di combustibile).

Inoltre la combustione reale può anche essere incompleta perché a differenza dei cicli ideale e limite, in cui si suppone che tutta l'energia fornita allo stato chimico attraverso il combustibile venga completamente rilasciata attraverso il processo di combustione, si tiene conto del fatto che i gas reali scaricati contengono prodotti di completa ossidazione del combustibile ma anche frazioni di prodotti di incompleta ossidazione (idrocarburi incombusti e particolato solido).

Siccome i motori diesel lavorano normalmente con eccessi d'aria, questa condizione di incompleta combustione limita in maniera poco rilevante il rendimento reale (circa 1-2%).

- I cilindri di un motore reale sono collegati all'ambiente esterno attraverso delle luci di passaggio e dei collettori di aspirazione e scarico che includono numerosi componenti ausiliari; a causa di questi componenti le perdite fluidodinamiche sui flussi reali che incontrano attraverso le luci dei cilindri e dei vari componenti dei collettori modificano la parte finale del ciclo motore e il processo di ricambio del fluido di lavoro.



Più nello specifico è possibile riassumere la sua architettura in questo modo:

La camera di combustione è costituita da uno o più cilindri, solitamente fissi e chiusi ad una estremità, in cui si muovono dei pistoni<sup>[2.14]</sup> ad accoppiamento preciso; il cilindro ha una struttura molto robusta perché deve sopportare pressioni elevate (ciò comporta un maggior peso del motore).

Il moto alterno del pistone determina una variazione del volume della camera di combustione tra la testa del pistone e l'estremità chiusa del cilindro.

La faccia esterna del pistone è collegata all'albero a gomiti tramite una biella che costituisce il meccanismo di trasmissione e trasformazione del moto alterno in moto rotatorio.

L'albero a gomiti presenta, per ogni biella, una parte a sbalzo (chiamata bottone di manovella); essa fa sì che, durante la rotazione, la potenza dei singoli cilindri venga applicata nel punto più adatto dell'albero a gomiti.

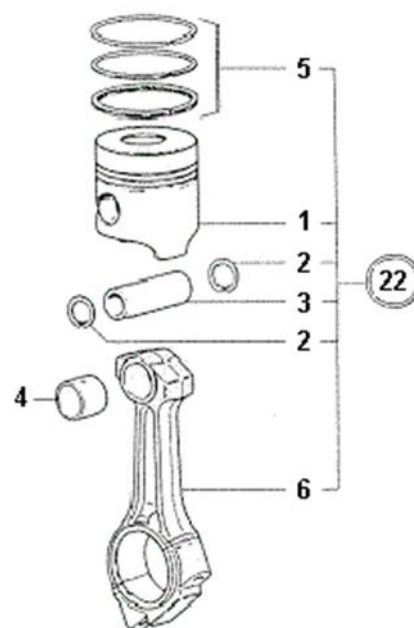
Gli alberi a gomiti sono dotati di volani (più o meno pesanti) che, grazie alla loro inerzia, riducono le irregolarità nel movimento dell'albero.

Il sistema di alimentazione del combustibile è costituito da una pompa del carburante e da un dispositivo per la vaporizzazione di esso; il carburante vaporizzato viene trasferito ai cilindri tramite gli iniettori<sup>[2.15]</sup>.

I gas di scarico prodotti dalla combustione vengono aspirati ed eliminati nell'atmosfera per mezzo di apposite valvole di scarico ad azionamento meccanico. Queste valvole normalmente vengono mantenute chiuse da un sistema di molle elicoidali e la loro apertura viene effettuata al momento opportuno del ciclo per mezzo di un albero a camme o a eccentrici.

Nel motore Diesel non è presente la candela di accensione; infatti in fase di compressione l'aria si riscalda fino a temperature elevate e il gasolio iniettato, quando entra a contatto con essa, si incendia e provoca lo scoppio senza l'ausilio della scintilla fornita dalla candela.

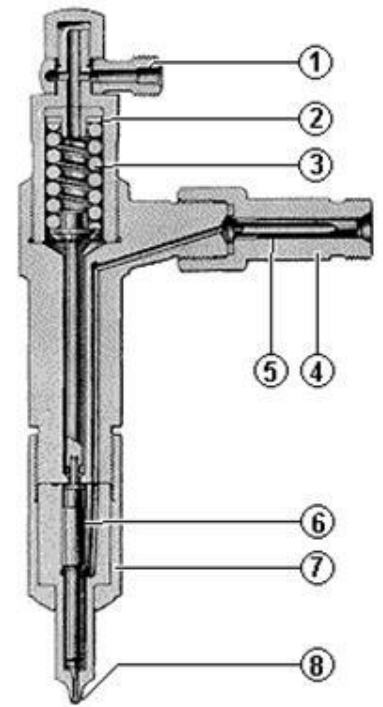
- 1 Stantuffo
- 2 Anello di sicurezza
- 3 Perno
- 4 Boccola piede biella
- 5 Anello elastico stantuffo
- 6 Biella
- 7 Pistone



[2.14] Pistone e componenti [www.larapedia.com]

- 1 Raccordo di scarico dell'eccesso di combustibile
- 2 Rosette di taratura della pressione d'iniezione
- 3 Molla di pressione della valvola ad ago
- 4 Raccordo d'entrata combustibile
- 5 Filtro a barretta
- 6 Valvola ad ago
- 7 Dado di ritegno pulverizzatore
- 8 Forellini di pulverizzazione

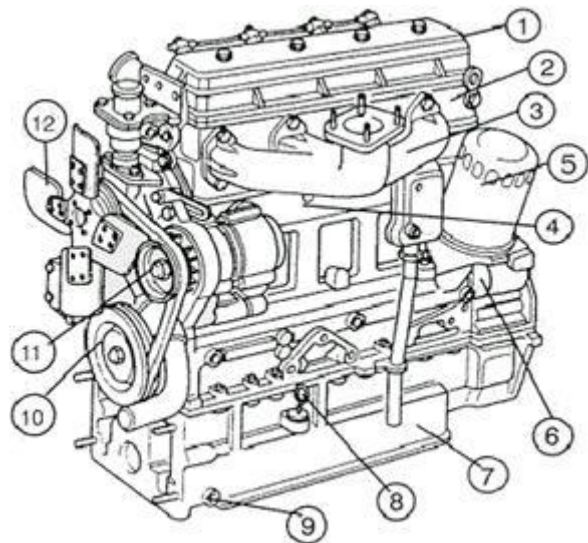
Gli attuali motori Diesel sono dotati di iniezione diretta, l'immissione del combustibile avviene direttamente nella camera di combustione e non in una pre-camera (iniezione indiretta). La funzione dell'iniettore è quella di "nebulizzare" il gasolio, riducendo il più possibile i tempi di ritardo all'accensione e di conseguenza riducendo le emissioni dovute alla disomogeneità della carica.



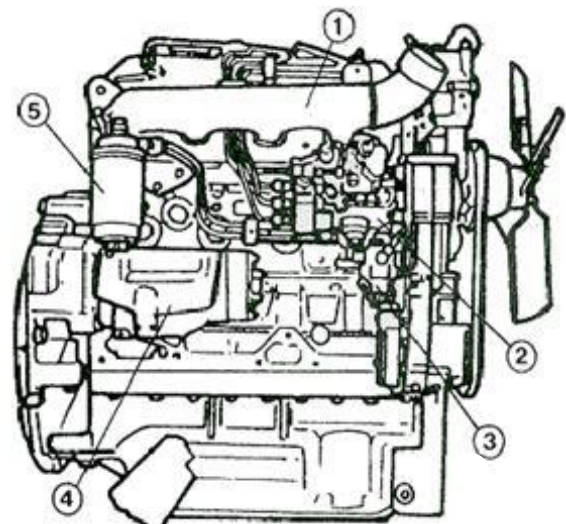
[2.15] Iniettore del combustibile

Esempio architettura di un motore diesel 4 cilindri aspirato [2.16] e [2.17]

- 1 Coperchio punterie
- 2 Condotto di scarico
- 3 Testa cilindri
- 4 Filtro olio motore
- 5 Basamento
- 6 Coperchio della pompa di iniezione
- 7 Asta livello olio
- 8 Tappo di scarico olio motore
- 9 Coppa olio
- 10 Puleggia albero motore
- 11 Alternatore
- 12 Ventilatore

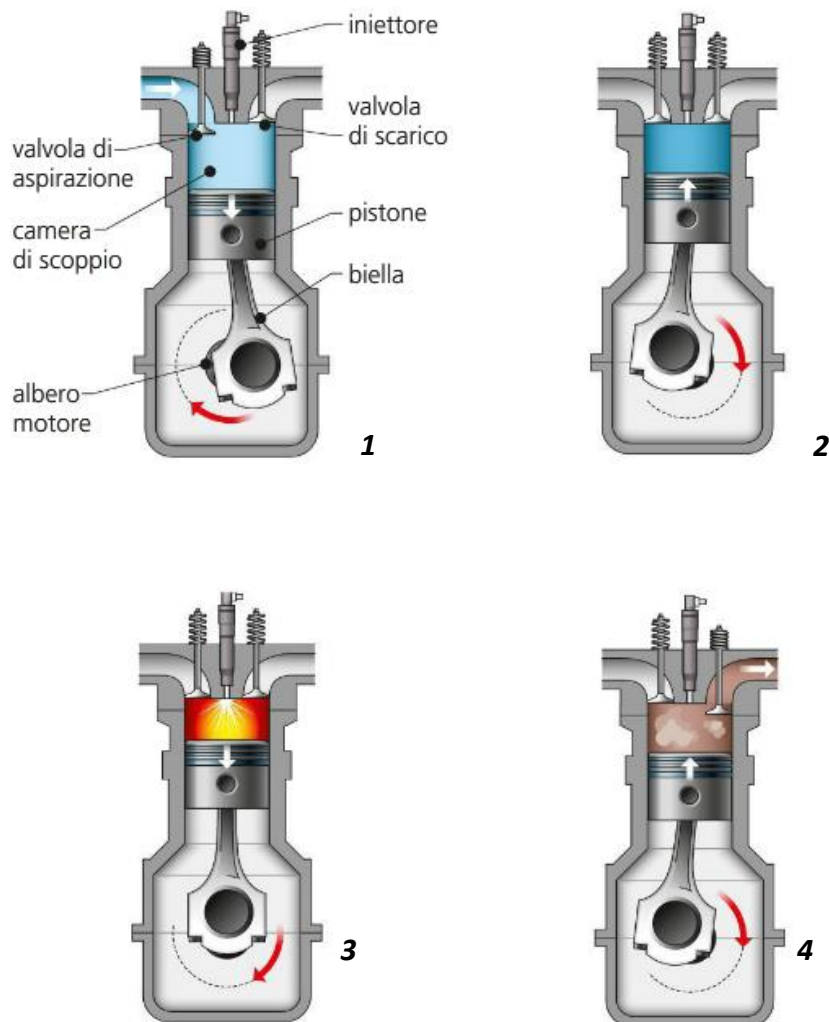


- 1 Condotto d'aspirazione
- 2 Pompa d'iniezione
- 3 Pompa d'alimentazione
- 4 Motorino d'avviamento
- 5 Filtro combustibile



## 2.3.2 - Funzionamento

In questi motori, che come suggerito dal nome utilizzano il ciclo Diesel, il combustibile suddiviso in fini goccioline viene iniettato in aria calda e compressa in modo da provocare l'autoaccensione e dare origine ad una combustione più allungata nel tempo.



[www.tecnologiaduepuntozero.it]

Lo schema rappresenta le quattro fasi di un motore diesel a 4 tempi:

- 1- Aspirazione:** Il pistone scende e aspira solamente aria (niente combustibile) che entra nel cilindro, la valvola di sinistra è aperta;
- 2- Compressione:** Il pistone risale e comprime l'aria che arriva a temperature di 700-800°C, entrambe le valvole sono chiuse;
- 3- Espansione:** Il gasolio vaporizzato viene iniettato nella camera di combustione dove, a causa delle elevate temperature, brucia in maniera istantanea. L'espansione dovuta alla combustione della miscela spinge il pistone verso il basso che, in questo modo, compie la terza corsa (fase attiva o di potenza);
- 4- Scarico:** Il pistone risale ed espelle i gas combusti, la valvola di destra è aperta;

### 2.3.3 – Caratteristiche

Più nel dettaglio i motori dei mezzi pesanti possiedono cilindrata variabili che possono andare da cubature piccole (comunque medio-grandi rispetto a quelle delle autovetture) di circa 3000 – 4000 cm<sup>3</sup> fino a cilindrata molto grandi da 16000cm<sup>3</sup> che possono sviluppare potenze estremamente elevate superiori a 600 CV; mediamente si hanno veicoli con motori aventi cilindrata di circa 8000cm<sup>3</sup> che sviluppano potenze di 450 – 550 CV.

Anche il numero di cilindri è variabile da veicolo a veicolo; i più diffusi sono a 6 cilindri oppure 8 cilindri.

I cilindri possono essere disposti *in linea* oppure *a V* a seconda della disponibilità di ingombro che essi possono occupare all'interno del motore, i pregi e i difetti più rilevanti di queste due configurazioni sono:

IN LINEA		A V	
PRO	CONTRO	PRO	CONTRO
Semplicità costruttiva	Ingombro	Design compatto	Design complesso
Bilanciamento ottimale	Limitate possibilità di posizionamento	Baricentro più basso	Costi di produzione più elevati
		Possibilità di adattarsi ad architetture diverse	Bilanciamento più difficile
			Tendenza a vibrazione che richiede contralberi

[2.18] Principali vantaggi e svantaggi delle configurazioni in linea e a V

Possiamo avere motori a *due tempi* oppure a *quattro tempi*:

Nei motori a quattro tempi più di metà del ciclo è dedicata all'espulsione dei gas combusti e all'aspirazione della carica fresca ad opera del pistone, in questo modo si genera un buon ricambio del fluido di lavoro.

Nei motori a due tempi una parte minore del ciclo è destinata alla sostituzione della carica, si cerca di non sacrificare troppo le fasi di compressione ed espansione che influenzano in maniera notevole le prestazioni del motore; si ha un ricambio del fluido di lavoro meno soddisfacente.

I motori a 2 tempi solitamente sono impiegati per la movimentazione dei mezzi più pesanti perché i maggiori carichi termici generati da un motore di questa tipologia possono essere contrastati meglio nel caso di grandi cilindrata e motori lenti; inoltre in questi vi è la possibilità di effettuare un buon lavaggio del cilindro con sola aria e di utilizzare combustibili più scadenti grazie all'assenza di valvole.



Effettuando un confronto tra il motore a due tempi con quello a quattro, evidenziamo per il primo i seguenti **vantaggi**:

1. Potenza specifica più alta, doppia a livello teorico, perché realizzano una fase utile ad ogni giro dell'albero motore, anziché ogni due giri come il quattro tempi.  
A livello pratico però, la sostituzione della carica alla fine di ogni ciclo è peggiore, quindi il guadagno solitamente risulta più basso rispetto alla teoria, ma comunque consistente (si hanno guadagni circa del 50-60%);
2. Maggior semplicità costruttiva perché in questi motori la frequenza del ciclo viene a coincidere con quella del manovellismo, rendendo possibile l'uso di luci, controllate dal moto del pistone, per l'introduzione e lo scarico dei fluidi di lavoro dal cilindro;
3. Coppia motrice più uniforme, ciò è dovuto al fatto che la fase utile di espansione si ripete ad ogni giro di manovella;

e **svantaggi**:

1. Rendimento più basso, a parità delle altre condizioni, perché l'ultima parte della corsa di espansione (utilizzabile per raccogliere lavoro utile) viene interrotta per consentire l'inizio del processo di lavaggio del cilindro;
2. Ricambio del fluido peggiore rispetto ai quattro tempi. Ciò comporta una presenza più consistente di gas combusti residui nella carica fresca che portano ad avere un processo di combustione peggiore con emissioni inquinanti e consumi maggiori;
3. Maggiori sollecitazioni termiche e meccaniche sugli organi del motore dovute alla mancanza della parte del ciclo adibita allo scarico dei gas combusti e all'aspirazione della carica fresca, in cui solitamente si hanno temperature e pressioni più basse, al posto di queste fasi si susseguono con frequenza doppia compressioni ed espansioni che presentano carichi termici e meccanici più alti.

La maggior parte dei mezzi pesanti odierni è dotata di *turbocompressore*.

Il turbocompressore è un gruppo meccanico con scopo di sovralimentazione del motore costituito da due giranti: una per la turbina centripeta che viene azionata dai gas di scarico (lato caldo) e una per il compressore che aspira l'aria dal filtro, ne aumenta la pressione, e la invia ai cilindri (lato freddo). Queste due giranti, calettate sullo stesso albero, vengono posizionate il più vicino possibile alla testata del motore dove si hanno i condotti di scarico e alimentazione; sono lubrificate e raffreddate dall'olio del motore che circola nella scatola centrale del supporto dei cuscinetti dell'albero sul quale sono calettate.

I gas di scarico prodotti dal motore azionano la prima girante (lato caldo) che trasmette il suo moto rotatorio alla seconda girante (lato freddo) la quale aspira l'aria che proviene dal filtro e la trasferisce ai cilindri.

Più è alto il regime di rotazione, maggiore sarà il volume dei gas di scarico prodotti e maggiore sarà il volume d'aria aspirato dal turbocompressore (per questo motivo sulla turbina, o sulla pompa di iniezione, è presente una valvola limitatrice che si apre in caso la pressione dell'aria aspirata risulti troppo elevata).

La velocità della turbina è proporzionale alla velocità di rotazione del motore, quindi al suo consumo orario.

Il turbocompressore è il metodo più diffuso per la sovralimentazione dei motori endotermici, in particolare nel campo dei mezzi pesanti; è un complesso altamente efficiente in quanto utilizza l'energia residua dei gas di scarico, che altrimenti andrebbe persa, per azionare la turbina e quindi il compressore.

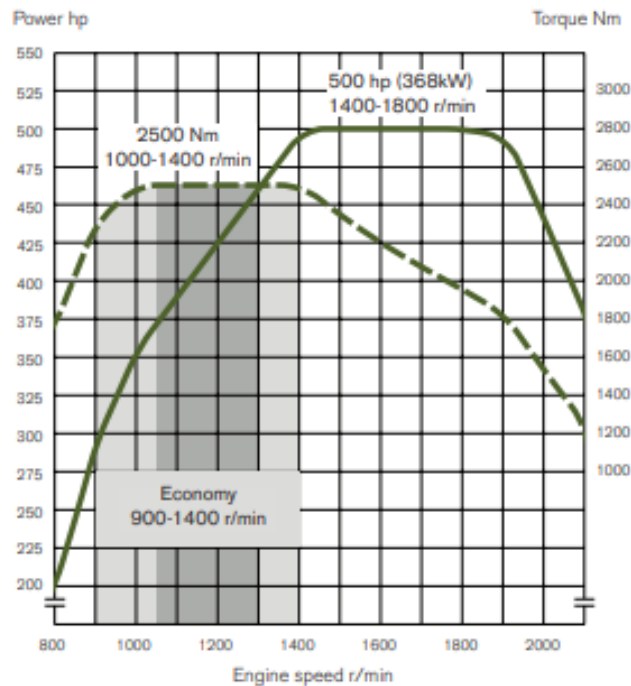
*Per capire in ambito reale la vera struttura di un motore di questa tipologia di seguito è riportata la scheda tecnica di un motore: **Volvo D13K500***

Il D13K500 è un motore diesel, EURO 6, con 6 cilindri in linea, una cilindrata di 12,8 litri (12800 cm<sup>3</sup>) e 500CV, è dotato di albero a camme in testa, di quattro valvole per ogni cilindro e iniezione common-rail con un'elevata pressione di iniezione. La sua camera di combustione e il suo collettore di aspirazione sono progettati per l'ottimizzazione del combustibile, l'ottima efficienza è favorita anche dal rapporto di riempimento molto elevato.

Gli ingranaggi della distribuzione del motore sono ubicati nella parte posteriore e azionano la pompa servosterzo, la pompa dell'olio, la pompa di alimentazione e il compressore dell'aria. Il loro posizionamento nella parte posteriore contribuisce anche ad un miglior raffreddamento del motore poiché il flusso dell'aria fredda in entrata non viene ostruito.

<i>Denominazione</i>	<i>D13K500, EU6SCR</i>
<i>Potenza massima a 1400–1800 giri/min</i>	<i>500 CV (368 kW)</i>
<i>Regime massimo</i>	<i>2100 giri/min</i>
<i>Coppia massima a 1000-1400 giri/min</i>	<i>2500 Nm</i>
<i>N° di cilindri</i>	<i>6</i>
<i>Alesaggio</i>	<i>131 mm</i>
<i>Corsa pistone</i>	<i>158 mm</i>
<i>Cilindrata</i>	<i>12,8 dm<sup>3</sup></i>
<i>Rapporto di compressione</i>	<i>17,0 : 1</i>
<i>Potenza freno allo scarico (EPG) a 2300 giri/min</i>	<i>200 kW</i>
<i>Potenza freno motore (VEB) a 2300 giri/min</i>	<i>375 kW</i>
<i>Regime economico</i>	<i>900-1400 giri/min</i>
<i>Regime ottimale</i>	<i>1050-1300 giri/min</i>
<i>Volume cambio olio, incluso filtro</i>	<i>33 litri</i>
<i>Filtri dell'olio</i>	<i>2 a flusso totale, 1 a bypass</i>
<i>Circuito di raffreddamento, volume totale</i>	<i>38 litri</i>
<i>Peso a secco (motore base)</i>	<i>1100 kg</i>
<i>Sistema post-trattamento gas di scarico, peso</i>	<i>130 kg</i>

[2.19] Scheda tecnica D13K500 [www.Volvo.com]



[2.20] Curve caratteristiche D13K500 [www.Volvo.com]

## 2.4 – Vantaggi e svantaggi del Diesel

I principali vantaggi che si hanno in un motore ad accensione per compressione sono:

- Miglior rendimento termodinamico
- Minori perdite dovute al ricambio del fluido di lavoro
- Rapporto di compressione più alto
- Assenza del rischio di detonazione

Mentre i principali svantaggi sono:

- Scarsa adattabilità del processo di combustione al variare del numero di giri
- Sistemi di post-trattamento dei gas di scarico più costosi
- Motore più robusto e di conseguenza più pesante
- Processo di combustione più ruvido che provoca maggiori vibrazioni e ne aumenta rumorosità e costi di installazione

Più nel dettaglio, un miglior rendimento termodinamico implica, a parità di qualsiasi altra condizione, la possibilità di bruciare meno combustibile per avere lo stesso effetto utile: questo si traduce in una minor emissione di CO<sub>2</sub> allo scarico (rispetto ad un motore ad accensione comandata) rendendo quindi il motore diesel meno impattante sull'ambiente per quanto riguarda l'effetto serra. Il rendimento termodinamico più elevato si ottiene grazie alla possibilità di aumentare il rapporto di compressione a valori intorno a 20:1 (contro i 10:1 dei motori a benzina). Questo aumento è possibile perché non vi è rischio di detonazione del combustibile (autoaccensione in un istante diverso da quello desiderato, ovvero allo scoccare della scintilla) a differenza dei motori a scoppio in cui la detonazione è alla base del loro funzionamento.

Inoltre un minor consumo di combustibile implica minori costi di esercizio che lo rendono particolarmente indicato per il trasporto pesante: infatti tale componente, viste le distanze percorse e il consumo comunque più elevato rispetto ad un'autovettura, diventa particolarmente significativo nell'economia totale dell'autotrasporto. Un altro aspetto che contribuisce all'impiego dei motori diesel per gli autotrasporti è il fatto che a parità di potenza prodotta, rispetto ad un motore a benzina, sviluppa una coppia più elevata perché il loro regime di rotazione è più basso; questa elevata coppia permette di superare gli eventuali bruschi aumenti di forza resistente che si possono incontrare lungo il tragitto.

Anche le minori perdite dovute al ricambio di fluido contribuiscono al miglioramento del rendimento globale; ciò è dovuto al fatto che in questi motori non è necessario mantenere costante il rapporto stechiometrico (aria-combustibile) durante la combustione, quindi non è necessario regolare la quantità d'aria in camera rispetto alla quantità di combustibile iniettato (siccome si tende a lavorare sempre con miscele spostate sul magro), per questo motivo non è presente la valvola a farfalla che nei motori a ciclo Otto causa perdite dovute alla laminazione del flusso d'aria in ingresso. Grazie a questa caratteristica, la regolazione del carico avviene semplicemente variando la quantità di combustibile iniettato lasciando inalterata la quantità di aria aspirata ad ogni ciclo.

Dai difetti si può osservare che la velocità della reazione di combustione resta costante nel tempo al variare del numero di giri, quindi aumenta l'intervallo angolare di cui essa necessita per essere compiuta.

Questo problema limita il regime massimo di rotazione attorno ai 5000 giri/min poiché oltre a questa soglia il processo di combustione avrebbe una durata angolare troppo elevata. Se tale intervallo angolare fosse troppo ampio, si andrebbe ad interferire con la fase di aspirazione andando ad inserire combustibile a valvola ancora aperta (con un grande spreco di combustibile), oppure con la fase di scarico in cui si avrebbe una fase di espansione ancora in corso nel momento dell'apertura della valvola di scarico che causerebbe un crollo della pressione in camera con conseguente impossibilità di estrarre lavoro utile dal combustibile bruciato.

Sul piano dell'inquinamento invece possiamo dire che i sistemi di post trattamento dei gas combusti, usati per riportare i due tipici inquinanti dei motori diesel (particolato solido e ossidi di azoto) entro i valori stabiliti dalla legge, sono molto più costosi e meno sperimentati rispetto a quelli applicati sui motori a benzina.

Generalmente nei motori ad accensione per compressione si hanno costi immediati più elevati rispetto ai motori a benzina dovuti al peso maggiore di essi e alla struttura più complessa; in un'ottica di lungo periodo però questi costi immediati risultano ammortizzati dai consumi minori e dal costo più basso del carburante.

## 3 Specie inquinanti ed effetto sull'uomo e sull'ambiente

### 3.1 – Principali specie inquinanti

Di seguito verranno riportate le caratteristiche delle principali specie inquinanti emesse dai motori, con riferimento sia ai meccanismi di formazione e distribuzione, sia all'impatto sull'ambiente e sulla salute umana.

Conoscere in dettaglio i meccanismi di formazione degli inquinanti è fondamentale per determinare poi i livelli di emissione. La formazione di alcune specie è strettamente correlata con il processo di combustione, come ad esempio il particolato oppure il monossido di carbonio; altre invece si formano in funzione delle condizioni termodinamiche dell'ambiente che si crea con il processo di combustione, come gli ossidi di zolfo e gli ossidi di azoto.

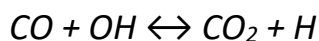
#### 3.1.1 – Monossido di carbonio (CO)

Si forma in tutti i processi che comportano reazioni incomplete di combustione di sostanze contenenti carbonio, dunque è un prodotto di ossidazione parziale del carbonio stesso in condizioni di difetto di ossigeno. Tuttavia, considerando i motori a combustione interna, va sottolineato che grandi quantità di questa sostanza possono essere prodotte anche in condizioni di sufficiente quantità d'aria.

I valori di CO osservati nei gas di scarico sono minori dei massimi livelli misurati nella camera di combustione, ma allo stesso tempo maggiori dei valori di equilibrio alle condizioni dello scarico. Questo significa che le concentrazioni di questa sostanza allo scarico, sono governate da particolari cinetiche chimiche. Nelle fiamme premiscelate (idrocarburi-aria), la formazione di CO è un passaggio fondamentale per la combustione, che può essere schematizzato dalla seguente reazione chimica:  
[[www.Autotecnica.it](http://www.Autotecnica.it)]



Il monossido di carbonio ottenuto viene successivamente ossidato per mezzo di una seconda reazione: [[www.Autotecnica.it](http://www.Autotecnica.it)]



La prima reazione è molto rapida e comporta la quasi completa ossidazione del carbonio.

Di norma si assume che il sistema carbonio-ossigeno-idrogeno sia in condizioni di equilibrio alle alte temperature, ciò consente di ottenere concentrazioni elevate di CO e OH.

Queste due specie, in base alla seconda reazione, tendono poi a formare CO<sub>2</sub> man mano che la temperatura diminuisce. Va considerato però che la velocità di questa reazione diminuisce rapidamente al calare della temperatura, fino a diventare nulla al di sotto di 700 °C; di conseguenza un raffreddamento così rapido della miscela gassosa può portare al "congelamento" della reazione stessa, e dunque a prodotti che presentano elevate concentrazioni di CO non più ossidabile a CO<sub>2</sub>, pur essendo a temperatura ambiente e in presenza di grandi quantità di ossigeno.

Siccome il monossido di carbonio è un gas inodore ed incolore, la sua presenza nell'aria aumenta ancora di più il rischio per la salute umana, in quanto questa sostanza inquinante ha un'elevata affinità per l'emoglobina (Hb) del sangue, con conseguente formazione di carbossi-emoglobina (COHb) che, immessa nel sistema circolatorio, provoca la mancata ossigenazione delle cellule da parte del sangue e può portare alla morte.

### 3.1.2 – Idrocarburi incombusti (HC)

Sono dei combustibili chimici che derivano da un'ossidazione incompleta di molecole contenenti idrogeno e carbonio. I gas di scarico dei motori a combustione interna contengono un'ampia varietà di HC incombusti.

	Percentuale di HC totali			
	Paraffine	Olefine	Acetilenici	Aromatici
senza catalizzatore	33	27	8	32
con catalizzatore	57	15	2	26

[3.1] *Composizione dei principali idrocarburi incombusti in un motore ad accensione comandata [www.Salute.gov.it]*

La composizione del combustibile può influenzare molto la composizione e l'entità degli HC, tuttavia la maggior parte di questi non si forma nella fase di combustione, ma per pirolisi, ovvero per decomposizione dei composti organici ad opera della temperatura raggiunta nel cilindro.

I composti organici ossigenati presenti nei fumi di scarico, costituiti prevalentemente da fenoli e carbonili, partecipano alla formazione dello smog fotochimico, sono anche irritanti e odoranti. I carbonili di interesse sono le aldeidi il cui componente principale è la formaldeide; essi costituiscono circa il 10% delle emissioni di HC nei motori diesel e in percentuale ancora minore nei motori a benzina; mentre i fenoli, invece, sono presenti in quantità minore rispetto alle aldeidi.

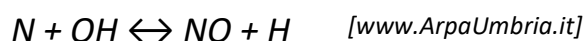
L'uso dei combustibili a base alcolica aumenta le emissioni di composti ossigenati; infatti, prendendo come riferimento lo stesso motore ad accensione comandata, queste saranno maggiori in un motore alimentato a metanolo rispetto ad un'alimentazione a benzina.

### 3.1.3 – Ossidi di azoto (NO<sub>x</sub>)

Quando si parla di ossidi di azoto, la sigla NO<sub>x</sub> sta ad indicare l'insieme delle emissioni costituite da monossido di azoto (NO), componente predominante (per circa il 90%), e da biossido di azoto (NO<sub>2</sub>). Il primo viene prodotto all'interno del motore durante la fase di combustione, mentre il secondo si forma a partire dagli NO, attraverso reazioni che avvengono dopo lo scarico dei gas combusti in atmosfera.

La principale fonte di monossido di azoto è l'ossidazione ad alta temperatura dell'azoto molecolare (N<sub>2</sub>) contenuto nell'aria di combustione, inoltre, se anche il combustibile contiene livelli significativi di azoto, la quantità di NO che viene prodotta sarà maggiore (sia la benzina che il gasolio contengono tracce non rilevanti di questo elemento).

Il meccanismo di formazione del monossido di azoto a partire dall'azoto presente nell'atmosfera si basa sul modello di Zeldovich, ovvero sulle seguenti reazioni di formazione e distruzione dell'NO:



La formazione di questa sostanza inquinante è fortemente legata ad alcuni parametri come la temperatura (al di sotto di 1300 °C la reazione si arresta), il rapporto stechiometrico aria-combustibile (che condiziona sia la massima temperatura di combustione sia la quantità di ossigeno disponibile per l'ossidazione dell'azoto), ed il processo di combustione. Infatti, nel caso di fiamme in fase premiscelata, la temperatura è legata al rapporto aria-combustibile, mentre nel caso di fiamme a diffusione, questo rapporto varia nello spazio, quindi il suo valore medio non è legato alla temperatura; di conseguenza vi è la possibilità, in quest'ultimo caso, di avere concentrazioni di NO<sub>x</sub> molto più elevate.

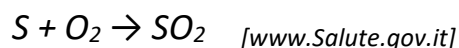
Le emissioni di ossidi di azoto hanno un impatto considerevole sull'ambiente e sulla salute dell'uomo, in quanto questi possono reagire con l'acqua dando luogo ad acido nitrico (HNO<sub>3</sub>), responsabile del fenomeno delle piogge acide (assieme all'acido solforico), ed inoltre sono i principali agenti responsabili dello smog fotochimico, il quale ha origine dalla riduzione del biossido di azoto (NO<sub>2</sub>) ad opera delle radiazioni solari sottoforma di energia fotonica (hv); l'ossigeno atomico così prodotto, si combina poi con l'ossigeno molecolare dell'aria dando luogo ad ozono (O<sub>3</sub>). L'ozono è benefico nella stratosfera perché protegge dai raggi ultravioletti, ma risulta essere un potente inquinante a livello del suolo, in quanto attacca vernici, gomme e plastiche, ed è irritante per vie aeree ed occhi.

### 3.1.4 – Ossidi di zolfo (SO<sub>x</sub>)

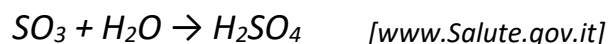
Con il termine ossido di zolfo si indicano principalmente le seguenti sostanze chimiche: diossido di zolfo (SO<sub>2</sub>) e triossido di zolfo (SO<sub>3</sub>).

Il primo, noto anche come anidride solforosa, è un gas incolore dal caratteristico odore empireumatico (particolare odore, simile a quello dello zucchero bruciato, ottenuto per distillazione secca di prodotti animali o vegetali), con elevata solubilità in acqua e possibilità di corrodere materie plastiche se liquefatto.

Un esempio di produzione industriale è la combustione di zolfo in aria:



Il secondo, noto anche come anidride solforica, è un composto corrosivo che porta alla formazione di acido solforico se reagisce con l'acqua:



Il biossido e il triossido di zolfo sono i principali inquinanti atmosferici a base di zolfo.

La maggiore fonte di inquinamento è costituita dalla combustione di combustibili fossili (carbone e derivati del petrolio) in cui lo zolfo è presente come impurezza.

Il biossido di zolfo è un forte irritante delle vie respiratorie e un'esposizione prolungata, anche a minime concentrazioni, può provocare faringiti e disturbi all'apparato sensoriale.

Inoltre è stata accertata una sinergia dannosa in caso di esposizione combinata con il particolato, il quale è in grado di trasportare il biossido di zolfo nelle parti più profonde del polmone, aumentandone quindi il danno anche in presenza di concentrazioni più ridotte.

### **3.1.5 – Particolato (PM)**

Con il termine particolato si indica l'insieme delle particelle solide e liquide che vengono generate durante la fase di combustione e successivamente portate in sospensione dai gas di scarico.

Nei motori a benzina possiamo distinguere tre differenti classi di emissioni di particolato: da piombo, solfato e particolato organico. Il primo deriva dai composti metallo-organici come il piombo tetraetile o tetrametile, utilizzati come additivi delle benzine (ne aumentano il potere detonante), oggi sono vietati dalle normative dei paesi maggiormente sviluppati.

I solfati derivano dallo zolfo presente nel combustibile, anche se ormai grazie alle direttive in vigore le benzine sono depurate quasi totalmente da questo elemento.

Il particolato organico riguarda soprattutto i motori diesel, è costituito per la maggior parte da particelle carboniose che hanno assorbito superficialmente idrocarburi di vario tipo e sono emesse solo in presenza di miscele molto ricche.

Se nei motori a benzina regolati correttamente il particolato totale non costituisce un grosso problema (10 mg/km), altrettanto non si può dire per i motori Diesel, dove il particolato organico è costituito per lo più da particelle carboniose (fuliggine o fumo nero) su cui si sono condensati composti organici ad alto peso molecolare (aldeidi, chetoni), e le emissioni variano tra 0.05 e 0.2 g/km. La struttura base del particolato emesso dai motori diesel è costituita da particelle primarie (aventi diametro medio di 10-60 nm) aggregate a migliaia in agglomerati di diverse dimensioni chiamati particelle. Un possibile percorso nel quale queste molecole si formano è quello della decomposizione termica o deidrogenazione ad alta temperatura (circa 1000-3000 K nelle fiamme di diffusione di un motore diesel), dove le molecole del combustibile si decompongono in prodotti intermedi tipo acetilene o poliacetilene, considerati i principali precursori dei gruppi carboniosi; questi poi crescono per adesione superficiale con altre specie povere di idrogeno, e la maggior parte di essi vengono bruciati in presenza di ossigeno, dando luogo a prodotti gassosi come CO e CO<sub>2</sub>. Quando invece la temperatura si abbassa, i nuclei carboniosi si coagulano e formano particelle di dimensioni maggiori.

Nella formazione del particolato sono molto influenti la struttura della molecola di combustibile (soprattutto gli idrocarburi a catena ramificata e gli aromatici) e anche il rapporto aria-combustibile, il quale se si ha una miscela grassa (ricca di combustibile), ne favorisce la comparsa.



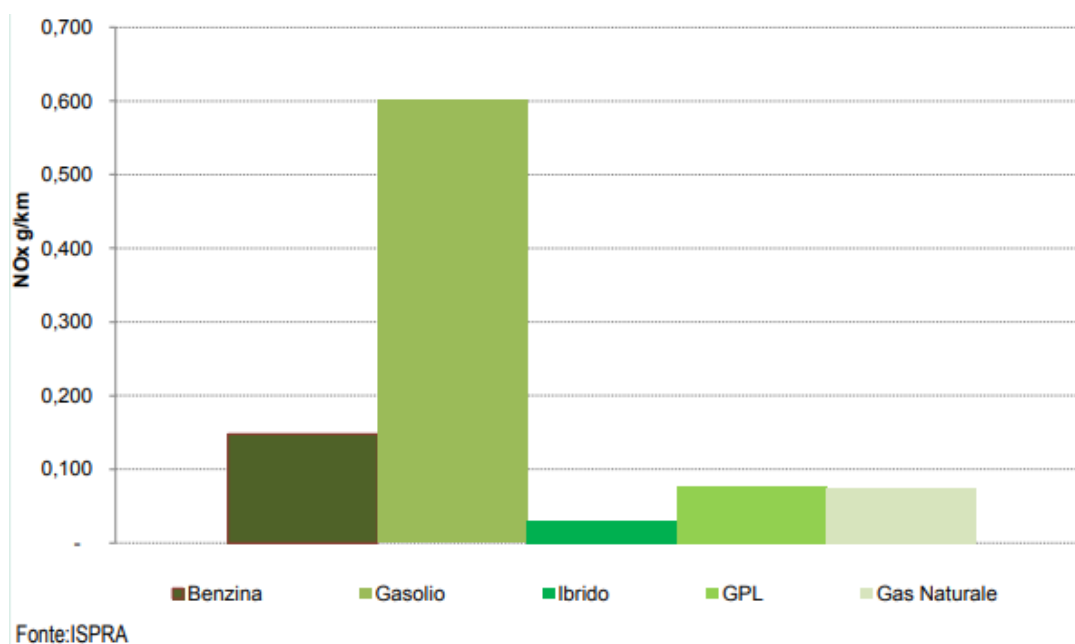
Il particolato ha un diverso livello di pericolosità per la salute umana in relazione al diametro medio  $d_m$  delle particelle. Quelle più pericolose hanno diametri compresi tra  $0.5 \div 10 \mu m$  (frazione respirabile, PM10) che determinano patologie acute e croniche a carico dell'apparato respiratorio (asma, bronchiti, allergia, tumori) e cardio-circolatorio (aggravamento dei sintomi cardiaci nei soggetti predisposti).

### 3.1.6 – Anidride carbonica (CO<sub>2</sub>)

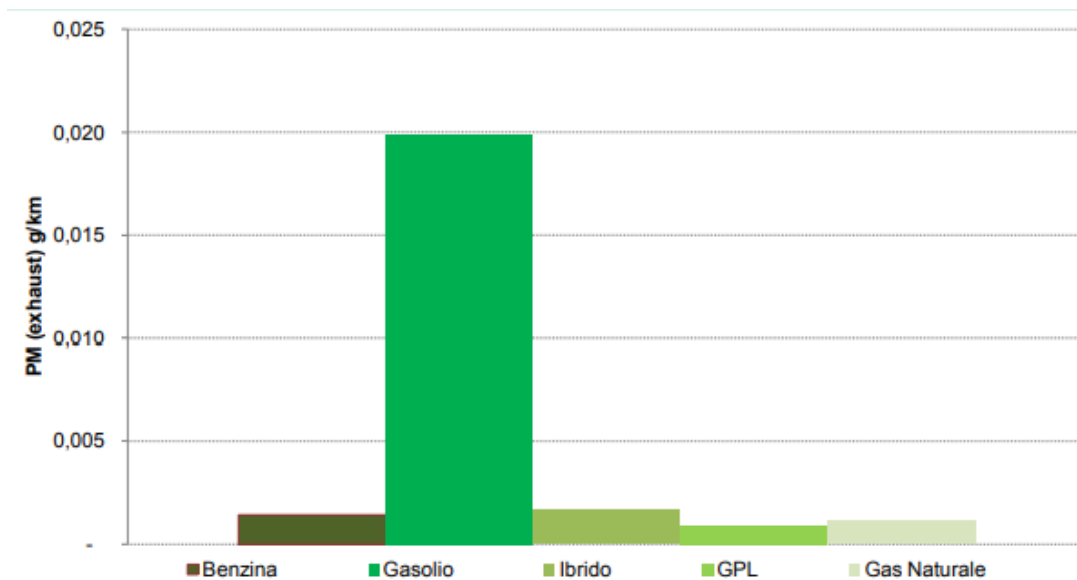
È fra i principali prodotti della combustione dei composti che contengono carbonio (in particolare dei combustibili fossili), nonché principale fattore che contribuisce all'effetto serra che, come ormai è risaputo, comporta la riduzione del calore disperso per irraggiamento dal pianeta e di conseguenza l'aumento della sua temperatura media.

Nell'ultimo secolo si è registrato un sensibile aumento della concentrazione di CO<sub>2</sub>, a seguito anche della continua deforestazione, ed è difficile poterne valutare quantitativamente le conseguenze che ciò comporterà negli anni avvenire, tuttavia si prevede che il progressivo aumento della temperatura media del pianeta possa portare a lunghi periodi di siccità e a desertificazione, allo scioglimento dei ghiacciai e al conseguente aumento del livello degli oceani.

Le soluzioni per limitare l'emissione di questo inquinante sono complesse e molto costose, per cui è più opportuno limitare l'impiego dei combustibili fossili; anche se possibili interventi per ridurla possono essere uno sviluppo di motori sempre più efficienti che producano meno anidride carbonica, unitamente all'impiego di combustibili ecosostenibili che ne riducano di molto la produzione, come il metano.



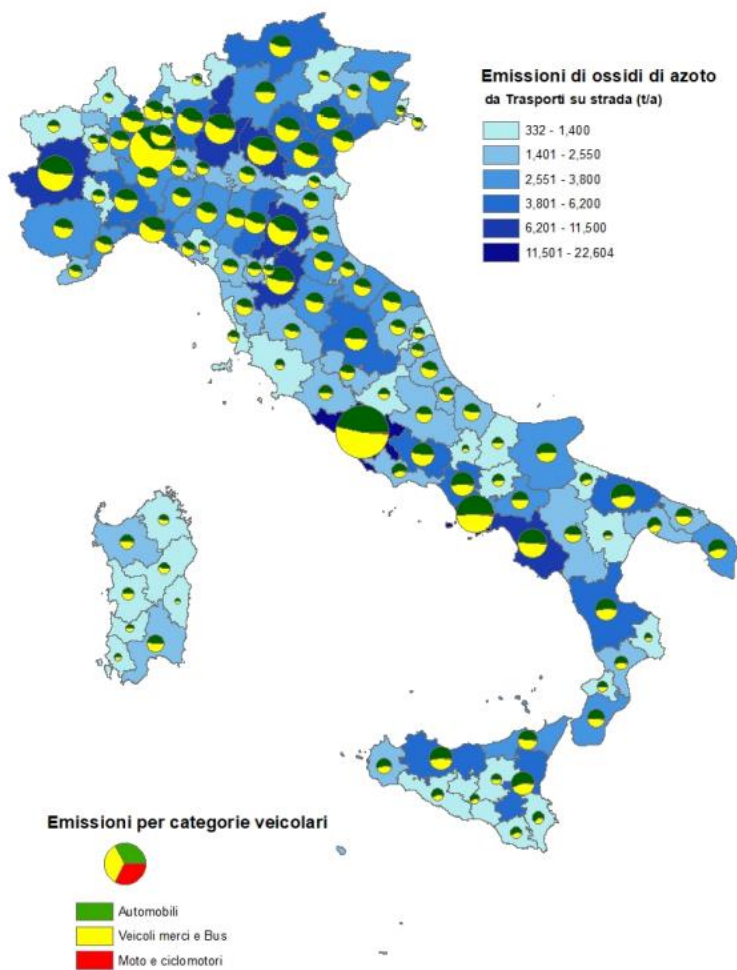
[3.2] *Quantità di NO<sub>x</sub> emessa dalle diverse tipologie di combustibile*  
[ISPRA, Istituto Superiore Per la Protezione e la Ricerca Ambientale]



Fonte: ISPRA

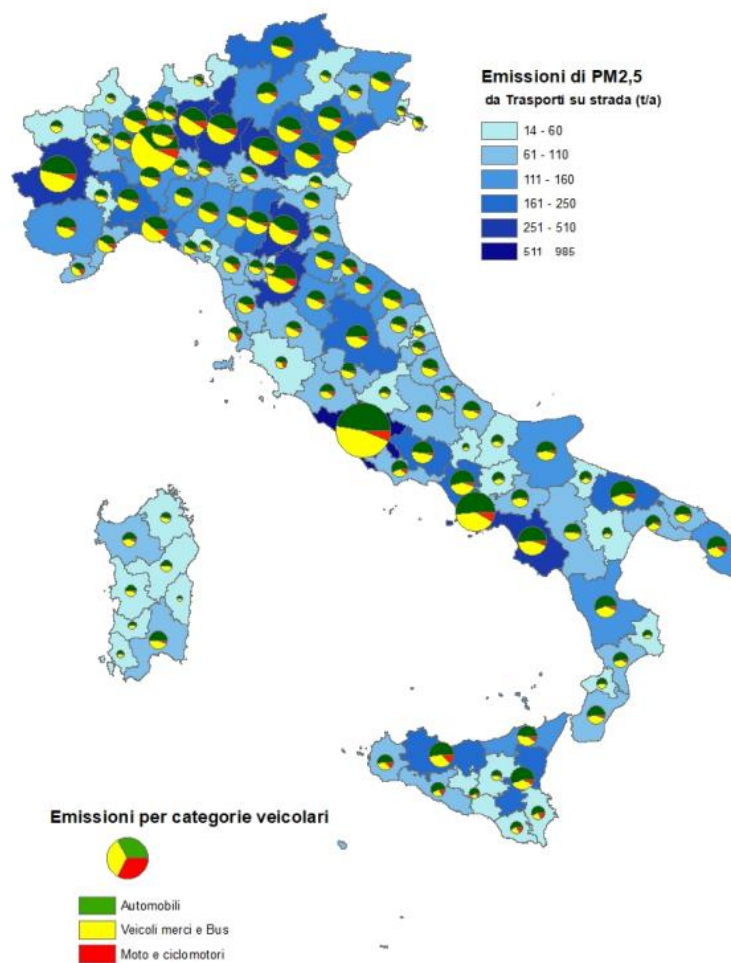
[3.3] Quantità di PM emessa dalle diverse tipologie di combustibile

[ISPRA, Istituto Superiore Per la Protezione e la Ricerca Ambientale]



Fonte: ISPRA

[3.4] Veicoli responsabili delle emissioni di NO<sub>x</sub> [ISPRA]

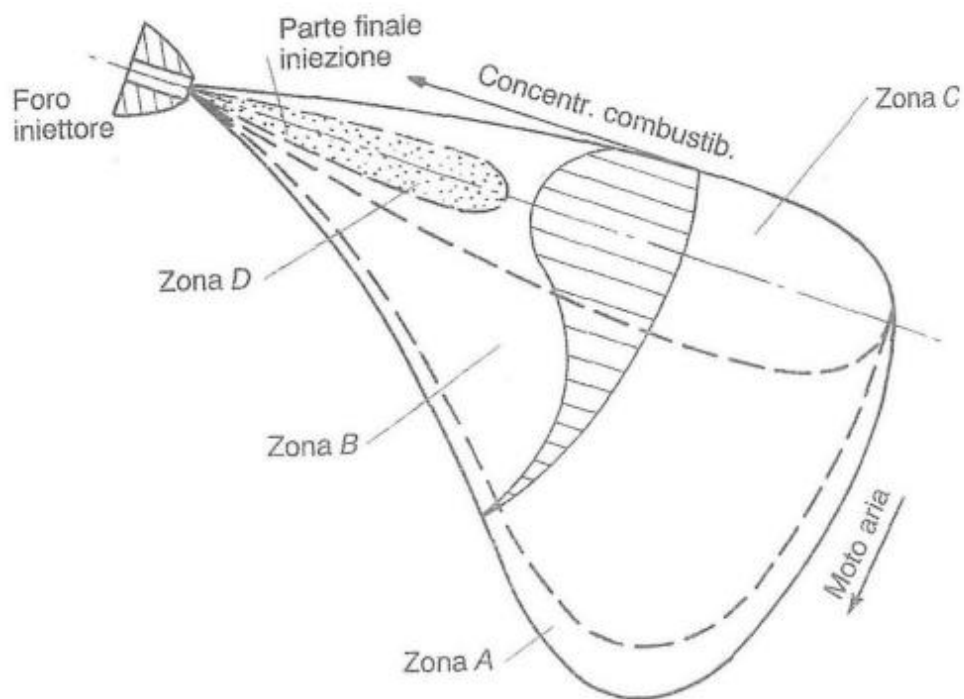


Fonte: ISPRA

[3.5] Veicoli responsabili delle emissioni di PM [ISPRA]

- Dai dati forniti dall'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca ambientale) possiamo notare che i due principali agenti inquinanti emessi dai motori Diesel sono: gli ossidi di azoto ( $\text{NO}_x$ )[3.2] e il particolato solido (PM)[3.3]. Inoltre si vede anche che questi motori hanno un livello di emissione, dei due agenti sopra citati, nettamente superiore rispetto a tutte le altre tipologie.
- I grafici [3.4] e [3.5] rivelano che i principali responsabili di queste emissioni sono proprio i mezzi pesanti adibiti al commercio, indicati con la "fetta" gialla del grafico; ciò risulta sensato se pensiamo che questi veicoli sono tutti alimentati a gasolio e sono quelli che percorrono le distanze più lunghe.

### 3.2 – La formazione nei motori Diesel



[3.6] Getto di gasolio iniettato in aria dotata di un modo di swirl

Zona A: Formazione HC

Zona B: Formazione di  $\text{NO}_x$

Zona C: Formazione di  $\text{NO}_x$  e PM

Zona D: Formazione di HC e PM

[Fondamenti motori a combustione interna, Giancarlo Ferrari-Esculapio-2016]

In figura [3.6] sono illustrate le zone di formazione di HC, CO, NO<sub>x</sub> e PM a seguito della combustione di un getto di combustibile (spray) iniettato in aria dotata di moto turbolento tangenziale (swirl): moto asimmetrico ricreato nel cilindro tra aspirazione e scarico per aumentare la turbolenza e diminuire i tempi di ritardo dell'accensione.

La formazione dell'ossido di azoto (NO<sub>x</sub>) avviene secondo il meccanismo di Zeldovich descritto in precedenza (vedi par. 3.1.3) che viene esteso anche ai motori diesel, ma che in questo contesto risulta molto più complesso a causa della distribuzione non uniforme del combustibile nella carica.

La loro produzione è legata alla disponibilità di ossigeno e di azoto allo stato atomico determinata dalle alte temperature di combustione; tali condizioni si possono verificare nelle regioni magre (con eccesso di aria) attorno al getto che bruciano per prime (estremità della *zona B*) e in corrispondenza del nucleo centrale dello spray (*zona C*), nella quale si hanno le temperature massime e carichi parziali con ossigeno in eccesso.

Al diminuire della temperatura durante la fase di espansione, la concentrazione di NO<sub>x</sub> viene congelata per il rapidissimo raffreddamento dei gas (circa 100 K/ms). Questo raffreddamento è più veloce rispetto ai motori a benzina perché all'effetto dell'espansione si aggiunge, nei Diesel, il miscelamento dei gas combusti con l'aria in eccesso, più fredda, che circonda gli sprays.

Il monossido di carbonio (CO), costituisce un prodotto intermedio dell'ossidazione degli idrocarburi. Se vi è sufficiente disponibilità di ossigeno, viene successivamente ossidato a CO<sub>2</sub>, ma la reazione può risultare incompleta a causa dei brevi tempi di residenza e delle basse temperature. Solitamente in un motore Diesel la disponibilità di ossigeno è elevata, perché sono di per sé caratterizzati da rapporti aria/combustibile spostati sul magro, e dunque ciò garantisce una sufficiente ossidazione del CO, per cui la sua presenza allo scarico è molto inferiore rispetto a quella dei motori Otto (quasi un ordine di grandezza in meno).

Per i motori diesel l'origine degli idrocarburi incombusti (HC) sono molteplici.

Innanzitutto la zona esterna dello spray (*zona A*), dove la concentrazione di combustibile è troppo bassa per portare all'autoaccensione, può essere sede di reazioni di cracking termico e parziale ossidazione del combustibile. Altri HC possono derivare dall'incompleta combustione del nucleo centrale del getto, specialmente nella parte finale dell'iniezione (*zona D*). Un altro importante contributo alla formazione di idrocarburi incombusti è dato dal combustibile che viene aspirato nel cilindro dalla cavità inferiore dell'iniettore (compreso tra la sede dello spillo e i fori di iniezione) dopo che lo spillo si è chiuso.

Questo problema può essere risolto riducendo il volume di tale cavità, o eliminandolo completamente.

L'ultima specie che prendiamo in considerazione è il particolato (PM), si forma nelle regioni del getto caratterizzate da valori locali del rapporto aria-combustibile minori del valore stechiometrico (miscela grassa) e interessate da fiamme a diffusione. In particolare, il nucleo centrale del getto (*zona C*) contiene gocce di combustibile di dimensioni maggiori rispetto alla zona di premiscelazione (*zona B*), queste bruciano per diffusione in un ambiente che può risultare povero di ossigeno, producendo consistenti quantità di particolato. Il processo di combustione interessa anche l'ultima parte di combustibile iniettato (*zona D*), che viene introdotto sotto l'azione di pressioni di iniezione non elevate. In questo modo si formano gocce di grandi dimensioni che subiscono una rapida evaporazione e decomposizione termica, a causa dei gas ad alta temperatura che la circondano,

senza che queste possano avere un'adeguata penetrazione. La combustione di conseguenza porterà alla produzione di particelle carboniose, oltre che di CO e HC. La concentrazione di PM allo scarico dei Diesel è determinata, inoltre, dai fenomeni di ossidazione del particolato, che si verificano nella zona di fiamma dove le particelle carboniose vengono a contatto con l'ossigeno che non ha partecipato alla combustione. Le reazioni di ossidazione del particolato, responsabili dell'aspetto giallo luminoso della fiamma, portano a un drastico abbattimento delle particelle formatesi (oltre il 90%), ciò fa sì che le emissioni allo scarico risultino notevolmente ridotte rispetto a quelle valutabili sulla base dei soli processi di formazione.

La seguente tabella [3.7] mostra come le emissioni allo scarico varino in funzione delle diverse condizioni di funzionamento del motore.

Condizione di funzionamento	Emissione				
	CO <sub>2</sub> [%]	CO [%]	HC [ppm]	NO <sub>x</sub> [ppm]	PM [mg/m <sup>3</sup> ]
Minimo	1.0	0.15	200	50	10
Accelerazione	11	0.06	150	1000	100
Velocità costante	8	0.02	100	400	20
Decelerazione	--	--	100	50	10

[3.7] Concentrazione degli inquinanti misurati allo scarico di un motore diesel [www.transportenvironment.org]

### 3.3 – Principali parametri influenti sulle emissioni

Le emissioni di CO sono limitate nei motori Diesel e non presentano perciò un problema significativo, al contrario invece delle emissioni di HC, NO<sub>x</sub> e PM che sono influenzate da alcuni parametri da tenere in considerazione.

- **Regime di rotazione e condizioni di carico:** Associato alla pressione media effettiva (p<sub>me</sub>, lavoro utile per unità di cilindrata), essendo questa correlata alla quantità di combustibile iniettata per ciclo:
  - Gli HC tendono a crescere con la pressione media effettiva, infatti una maggior quantità di combustibile si deposita sulle pareti della camera ed è presente nel nucleo centrale del getto. Nonostante le più alte temperature, gli HC che si formano non possono essere ossidati in fase di espansione a causa della crescente scarsità di ossigeno.  
Pur non essendo molto elevata come emissione, va comunque controllata perché contiene alte concentrazioni di aldeidi;
  - Gli NO<sub>x</sub> crescono rapidamente all'aumentare del carico in quanto la temperatura di combustione aumenta progressivamente con esso. Sono la principale emissione gassosa allo scarico, essendo favorita dalla disuniforme distribuzione

del combustibile nella carica, che rende disponibile ossigeno nelle zone dove la temperatura è più alta;

- Il particolato è l'inquinante caratteristico e va controllato a causa della sua elevata pericolosità per la salute umana. La sua concentrazione aumenta con l'aumentare del carico, a causa della crescente scarsità di ossigeno che favorisce i processi di formazione nelle regioni ricche del getto.

- **Parametri di iniezione:** È l'anticipo dell'iniezione che controlla l'angolo di manovella al quale si avvia la combustione.

Maggiori ritardi di iniezione, e quindi di combustione, comportano dei picchi di temperatura e pressione più bassi e quindi una minor produzione di NO<sub>x</sub> (ma anche una riduzione della pme e del rendimento effettivo del motore).

Le emissioni di HC non risentono delle variazioni di questo parametro.

La stessa cosa non si può dire per il particolato, il quale aumenta ritardando l'iniezione del combustibile, a causa delle più basse temperature e dei tempi minori disponibili per il processo di ossidazione. Inoltre maggiori portate di iniezione determinano più elevate velocità di miscelamento fra aria e combustibile, e quindi un più rapido rilascio del calore di combustione; ciò determina una riduzione del consumo specifico ma, allo stesso tempo, una maggiore produzione di NO<sub>x</sub>, per effetto delle elevate temperature raggiunte. Un miscelamento più efficace consente di avere minori emissioni di HC e PM.

- **Swirl:** Moto rotatorio attorno all'asse del cilindro che assume l'aria aspirata in seguito ad un'opportuna configurazione del gruppo condotto-valvola di aspirazione, che genera un'elevata energia cinetica turbolenta e promuove il rapido miscelamento tra il combustibile e l'aria stessa nel corso dell'iniezione e della combustione. Questo parametro riduce i tempi di combustione influenzando, di conseguenza, anche le emissioni inquinanti, le quali aumentano nel caso di NO<sub>x</sub> e diminuiscono per HC e PM.

- **Sovralimetazione:** Viene applicata ormai nella quasi totalità dei motori Diesel, viene utilizzata oltre che per aumentare la potenza specifica richiesta, con lo scopo di limitare la produzione di fumo allo scarico. Dati i più grandi eccessi d'aria disponibili, risultano ridotte le emissioni di PM, HC e CO, ma non quelle di NO<sub>x</sub>, in quanto l'aumento considerevole delle pressioni e quindi delle temperature, ne comporta per questa sostanza inquinante effetti negativi. Il solo modo per contenerle, è la riduzione opportuna del rapporto di compressione volumetrico del motore, ritardando l'iniezione e ricorrendo alla pratica della interrefrigerazione della carica compressa, che abbassa la temperatura dell'aria aspirata.

## **4 Normative Europee sulle emissioni dei gas di scarico**

In questo capitolo verranno esposti tutti i provvedimenti adottati dalla comunità Europea nel corso degli anni per far fronte al problema dell'inquinamento causato dai veicoli, ed in particolare quelle riferite ai motori diesel che alimentano i mezzi pesanti.

### **4.1 – La qualità del combustibile per autotrazione**

L'Unione Europea ha affrontato in modo sempre più efficace il problema dell'inquinamento atmosferico determinato dal traffico veicolare.

In questo ambito le specifiche ecologiche della benzina e del gasolio costituiscono, unitamente all'applicazione di tecnologie motoristiche sempre più avanzate e di dispositivi di post-trattamento dei gas di scarico, uno dei principali elementi del pacchetto di misure adottate a livello comunitario e su scala nazionale per ridurre le emissioni in atmosfera di sostanze nocive legate al consumo di carburanti per autotrazione. Una particolare attenzione è stata posta sulle quantità di zolfo presenti nei combustibili, che in più di trent'anni è stato abbassato di circa 300 volte, non solo per ridurre l'emissione di anidride solforosa (principale causa delle piogge acide) ma soprattutto per consentire l'applicazione di nuovi dispositivi catalitici di post-trattamento dei gas derivanti dalla combustione; essi infatti si danneggiano se nei prodotti di combustione è presente dello zolfo.

La direttiva europea 2003/17/CE richiede la progressiva diminuzione del contenuto di zolfo nei combustibili per autotrazione da 50 mg/kg fino a raggiungere un massimo di 10 mg/kg per tutti i combustibili commercializzati dal 1° Gennaio 2009. Questi sono tuttora denominati combustibili U.L.S. (Ultra Low Sulphur). In seguito la direttiva 2009/30/CE ha modificato nuovamente la 98/70/CE (prima normativa, entrata in vigore nel 1998, che stabiliva le specifiche tecniche dei combustibili da utilizzare nei motori diesel e benzina), introducendo nuove misure per l'utilizzo dei biocombustibili e la riduzione dei gas serra.

#### **4.1.1 – Miglioramento delle proprietà dei combustibili**

A partire dagli anni novanta le norme tecniche dei combustibili furono regolamentate su base europea per uniformare la qualità della benzina e del gasolio distribuiti sul mercato comunitario, attraverso la pubblicazione di norme europee sviluppate dal CEN (Comitato Europeo di Normalizzazione); la norma per il gasolio è la EN 509. L'aggiornamento di tali norme viene effettuato periodicamente per tenere conto, non solo delle progressive modifiche delle caratteristiche dei combustibili imposte dalle direttive europee, ma anche dallo sviluppo di metodi di prova sempre più aggiornati. La prima edizione della normativa sul gasolio era datata 1993, quella successiva entrò in vigore nel 1998 ma fu modificata poco dopo per far fronte ai nuovi limiti imposti dalla 98/70/CE su alcuni parametri fisici e composizionali del carburante che avevano un impatto notevole sulle emissioni inquinanti. I parametri presi in considerazione dalla nuova norma erano: il numero di cetano, il contenuto di idrocarburi poliaromatici, la temperatura alla quale distilla il 95% del gasolio (T95), densità e contenuto di zolfo.

A livello di caratteristiche prestazionali, per il gasolio è stato necessario introdurre due nuovi parametri: il potere lubrificante e il contenuto di biodisel (FAME – esteri metilici di acidi grassi).

La necessità di introdurre un limite minimo al potere lubrificante è stata determinata dall'evidenza della perdita di questa proprietà a causa della distruzione delle sostanze polari contenute nel combustibile ULS durante il processo di desolforazione in raffineria.

Infatti, il potere lubrificante del gasolio è una proprietà fondamentale per proteggere dall'usura le parti meccaniche dell'apparato di iniezione del motore a contatto col combustibile, e per mantenere inalterato nel tempo il suo corretto funzionamento.

La presenza di biodisel è una delle misure attuate dalla Commissione Europea per introdurre progressivamente l'impiego dei biocombustibili per la riduzione delle emissioni di anidride carbonica. È stato quindi introdotto un contenuto di FAME massimo pari al 5% in volume, in maniera che la miscela risulti ancora utilizzabile assieme al combustibile convenzionalmente impiegato per alimentare i motori.

Proprietà		Livello	1993	2000	2005	2009
Numero di cetano		Min	49,0	51,0	51,0	51,0
Densità	Kg/m <sup>3</sup>	Min–Max	820-860	820-845	-845	-845
Poliaromatici	%m	Max	-	11	11	11
T95	°C	Max	370	360	360	360
Zolfo	mg/kg	Max	2000	350	50	10

[4.1] *Evoluzione delle caratteristiche di rilevanza ambientale del gasolio*  
 [Norma EN 590-04 – Automotive fuels – Diesel – Requirements and test methods (2004)]

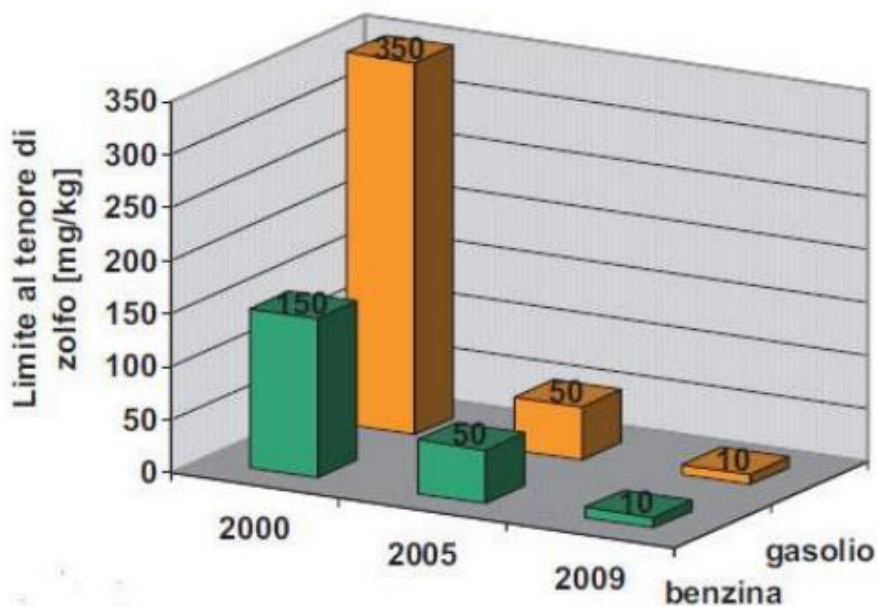
La norma EN 590 consente anche l'impiego di additivi che permettono di rispettare i limiti normativi per alcune caratteristiche come: stabilità all'ossidazione, comportamento a freddo e potere lubrificante. In alcuni casi, l'impiego di tali additivi consente di prevenire fenomeni indesiderati come la formazione di depositi, inoltre consente di aumentare le prestazioni del prodotto e renderlo più competitivo sul mercato. La presenza di prodotti di conversione (prodotti di cracking ricchi di olefine) nella produzione del gasolio, necessaria per soddisfare le elevate richieste del mercato, infatti, può determinare la presenza di lacche e depositi carboniosi sugli iniettori e sulle valvole. Questi depositi, oltre a causare malfunzionamenti e peggiorare l'economia del veicolo, sono causa dell'incremento di emissioni inquinanti. Il miglioramento delle proprietà detergenti, ottenuto trattando il combustibile con opportuni additivi, aiuta a limitare sensibilmente la formazione di tali depositi. L'uso di additivi correttivi nei combustibili nell'appropriato dosaggio è ammesso dalle norme europee, purché sia riconosciuta l'assenza di effetti indesiderabili, quali il deterioramento progressivo della drive-ability dell'autoveicolo e il mantenimento dell'efficienza dei sistemi di alimentazione del motore.



#### 4.1.2 – Livello di zolfo nel combustibile

Tra i parametri di qualità del gasolio (e della benzina), il tenore di zolfo è quello che ha ricevuto la maggiore attenzione poiché la sua presenza nei combustibili influisce in maniera indiretta sull'impatto ambientale degli autoveicoli. La prima limitazione sulla quantità di zolfo nei motori diesel venne imposta con una norma europea nel 1975, successivamente venne aggiornata. Inizialmente l'obiettivo era la riduzione dell'emissione di anidride solforosa nell'atmosfera, in seguito, l'ulteriore riduzione di zolfo, era stata imposta soprattutto per mantenere buone performance dei catalizzatori per gli autoveicoli Diesel.

Il grafico [4.2] mostra come il tenore di zolfo sia stato ridotto di oltre 300 volte per il gasolio e 100 volte per la benzina dagli inizi degli anni 90 fino ad oggi.



[4.2] Evoluzione del tenore di zolfo nella benzina e nel gasolio [www.Minambiente.it]

Con la direttiva 2003/17/CE, la Commissione Europea ha completato il quadro normativo sulla qualità dei combustibili. Essa stabilisce una maggiore restrizione al limite del tenore di zolfo, per tenere conto della forte influenza di questo parametro sull'efficienza dei dispositivi catalitici di nuova concezione, progettati per controllare le emissioni inquinanti nei gas di scarico. La direttiva ha imposto che l'introduzione sul mercato dei combustibili a bassissimo tenore di zolfo fosse effettuata in modo progressivo dal 2005 al 2008, per arrivare poi al 1° gennaio 2009 ad avere un contenuto di zolfo nei combustibili non superiore a 10 mg/kg. I combustibili ULS presentano caratteristiche prestazionali superiori a quelle dei combustibili convenzionali, consentono la diffusione dei propulsori di nuova concezione e dei sistemi innovativi di post-trattamento dei gas combusti per rispettare i limiti alle emissioni inquinanti Euro 4, Euro 5 ed Euro 6, e permettono all'industria automobilistica di perseguire l'obiettivo di contenere l'emissione dell'anidride carbonica al valore di target di 130 g/km dal 2012. A partire dal 2020 il limite di emissioni medie di CO<sub>2</sub>, secondo il regolamento (CE) n. 443/2009, deve scendere a 95 g/km.

## **4.2 – Motivazioni per la richiesta dei combustibili ULS sul mercato**

Numerose esperienze di laboratorio hanno messo in evidenza come l'efficienza dei catalizzatori e dei sensori per il controllo delle emissioni nei gas di scarico si riduca notevolmente se nel combustibile e anche nel lubrificante sono presenti elementi, quali il fosforo, il silicio, lo zolfo e metalli che costituiscono i composti organometallici impiegati nella formulazione degli additivi. Lo zolfo, in particolare, è quello maggiormente preso in considerazione data la sua presenza "naturale" nei composti di origine petrolifera. Secondo quanto messo in evidenza dalle maggiori associazioni di Costruttori mondiali (ACEA, Alliance, EMA e JAMA) nel documento "World-Wide Fuel Charter", l'applicazione di alcune delle nuove tecnologie di riduzione delle emissioni inquinanti non consentono il rispetto degli standard Euro 5 ed Euro 6 in presenza di combustibili con elevati livelli di zolfo. Questa non conformità può dipendere dalla sensibilità più o meno accentuata allo zolfo dei catalizzatori di nuova generazione. Essa si manifesta come una perdita più o meno rapida dell'efficienza di conversione degli inquinanti (avvelenamento) nel corso della vita del veicolo; questo processo di avvelenamento è tanto più rapido quanto più è alta la concentrazione di zolfo, spesso è un processo irreversibile. La rigenerazione automatica dei sistemi di abbattimento degli inquinanti, che richiede temperature dei gas di scarico più elevate ottenibili attraverso un arricchimento momentaneo della miscela aria-combustibile, diventa sempre più frequente per la perdita di efficienza causata dalla presenza dello zolfo nel combustibile. In queste condizioni si manifesta un aumento del consumo di carburante e, di conseguenza, dell'emissione di anidride carbonica, in contrasto con l'obiettivo di contenere l'effetto serra. Lo scopo principale è dunque quello di utilizzare un motore alimentato con miscele povere al quale si associano metodi per l'abbattimento del particolato e degli ossidi di azoto, in modo tale da rispettare i limiti imposti dalle normative Euro 5 ed Euro6.

La direttiva 2013/17/CE ha imposto l'obbligo alle compagnie petrolifere di rendere disponibili sul mercato dei combustibili privi di zolfo, in modo sempre crescente, ciò ha consentito ai costruttori l'anticipazione sul mercato di nuovi mezzi dotati di dispositivi avanzati in grado di ridurre le emissioni inquinanti, adeguandosi così alle normative europee.

## **4.3 – Normative Europee**

La riduzione delle emissioni inquinanti degli autoveicoli è stata soggetta in Europa, fin dai primi anni settanta, a restrizioni imposte con la promulgazione di direttive comunitarie per l'omologazione e la conformità di produzione, basate sulle migliori tecnologie motoristiche esistenti al momento. Per ottenere l'omologazione in un nuovo modello di autovettura bisogna soddisfare, con prove di laboratorio, i limiti imposti dalla direttiva in vigore al momento per l'emissione degli inquinanti regolamentati, espressi in massa/km (autoveicolo) o in massa/kWh (motore). Nei seguenti paragrafi sono riportate tutte le direttive (con in i rispettivi limiti legati alle emissioni inquinanti) emanate fino ad oggi, le normative ora in vigore per i mezzi pesanti sulle emissioni inquinanti e sulla CO<sub>2</sub>.

### 4.3.1 – Direttive e limiti “EURO”

Con la direttiva 91/441/CEE, detta “normativa consolidata”, venne introdotta una procedura di prova più rigorosa (ciclo di guida standard urbano associato ad un ciclo di guida extraurbano) per l’omologazione dei veicoli sia a benzina che diesel.

Furono imposte anche nuove specifiche per le apparecchiature di campionamento e limiti più restrittivi alle emissioni; venne introdotto anche il particolato come parametro inquinante.

Questa direttiva imponeva per la prima volta anche un limite sulle emissioni evaporative, definito EURO 1, e un test di durata per le autovetture dotate di un convertitore catalitico.

Successivamente, nel 1994, venne aggiornata con la direttiva 94/12/CE per fissare nuovi limiti (EURO 2) per le autovetture e, nel 1996, anche per gli autoveicoli leggeri (96/69/CE).

Un ulteriore aggiornamento (direttiva 98/69/CE) ha introdotto nuovi requisiti di controllo per le emissioni autoveicolari, tra i quali un sistema di diagnostica a bordo (EOBD) per informare l’utente di eventuali malfunzionamenti del mezzo durante l’utilizzo; venne anche ridotto di un fattore pari a 2 il limite delle emissioni inquinanti regolamentate nel 2000 (EURO 3). Ci fu un ulteriore riduzione per quelle da adottate nel 2005 (EURO 4).

Gli standard EURO 5 ed EURO 6 sono stati fissati dalla Commissione Europea e riportati nel regolamento CE N.715/2007 emesso nel 2007, mentre i nuovi limiti e il protocollo per l’attuazione del regolamento sono stati definiti nel 2008 per essere poi applicati nel 2009 (EURO 5) e nel 2014 (EURO 6). Il nuovo regolamento fissa un sistema EOBD (diagnostica a bordo) ed un raddoppio del chilometraggio (160000 Km) per la verifica della funzionalità dei dispositivi catalitici adottati sul modello in omologazione. Venne introdotto anche un limite delle emissioni di particolato per i motori a benzina con iniezione diretta e vennero fissati limiti sul numero di particelle emesse dalle vetture diesel e sugli idrocarburi non metanici. Nei limiti EURO 5 ed EURO 6, a differenza del passato, sono stati fissati limiti separati per le emissioni degli idrocarburi incombusti e degli ossidi di azoto per le autovetture a benzina. Il rispetto del limite Euro 5 per le emissioni di particolato, rimasto invariato anche per EURO 6, prevede l’uso di un filtro antiparticolato idoneo.

Normativa	Massa di ossido di carbonio (CO) [g/km]		Massa di idrocarburi (HC) [g/km]		Massa di ossido di azoto (NO <sub>x</sub> ) [g/km]		Massa di particolato (PM) [g/km]	
	Benzina	Diesel	Benzina	Diesel	Benzina	Diesel	Diesel	
Direttiva 91/441 1992 (Euro 1)	<b>2,72</b>	<b>2,72</b>	<b>0,97(*)</b>	<b>0,97(*)</b>	<b>0,97(*)</b>	<b>0,97(*)</b>	<b>0,14</b>	[91/441 CE]
Direttiva 94/12 1996 (Euro 2)	<b>2,2</b>	<b>1,0</b>	<b>0,5(*)</b>	<b>0,7(*)</b>	<b>0,5(*)</b>	<b>0,7(*)</b>	<b>0,080</b>	[94/12 CE]
Direttiva 98/69 A 2000 (Euro 3)	<b>2,3</b>	<b>0,64</b>	<b>0,20</b>	<b>0,56(*)</b>	<b>0,15</b>	<b>0,5</b>	<b>0,050</b>	[98/69-A CE]
Direttiva 98/69 B 2005 (Euro 4)	<b>1,0</b>	<b>0,50</b>	<b>0,10</b>	<b>0,30(*)</b>	<b>0,08</b>	<b>0,25</b>	<b>0,025</b>	[98/69-B CE]

[4.3] Limiti alle emissioni per l’omologazione alle autovetture in Europa

**Nota:**

(\* ) I limiti Euro 1 ed Euro 2 per tutte le motorizzazioni ed i limiti Euro 3 ed Euro 4 per le autovetture diesel si riferiscono alla somma dei valori delle emissioni di HC ed NO<sub>x</sub> determinati dalla prova (emissione combinata).

Emissioni	Regolamento 715/2007 (Euro 5) 1° settembre 2009		Regolamento 715/2007 (Euro 6) 1° settembre 2014	
	Benzina	Diesel	Benzina	Diesel
Massa di ossido di carbonio (CO) [g/km]	<b>1,0</b>	<b>0,5</b>	<b>1,0</b>	<b>0,5</b>
Massa di idrocarburi incombusti totali (HCT) [g/km]	<b>0,1</b>	-	<b>0,1</b>	-
Massa di idrocarburi incombusti non metallici (NMHC) [g/km]	<b>0,068</b>	-	<b>0,068</b>	-
Massa di ossido di azoto (NO <sub>x</sub> ) [g/km]	<b>0,060</b>	<b>0,180</b>	<b>0,060</b>	<b>0,080</b>
Massa combinata HC e NO <sub>x</sub> (HC + NO <sub>x</sub> ) [g/km]	-	<b>0,230</b>	-	<b>0,170</b>
Massa di particolato (PM) [g/km]	<b>0,005</b> <i>(iniezione diretta)</i>	<b>0,005</b>	<b>0,005</b> <i>(iniezione diretta)</i>	<b>0,005</b>

[4.4] Limiti CE Euro 5 ed Euro 6 alle emissioni delle autovetture [CE 715/2007]

### 4.3.2 – Normativa per i mezzi pesanti

Tutt'ora i mezzi pesanti sono regolati, a livello Europeo, dalla direttiva UE 2018/858 in vigore dal 1° settembre 2020, questa direttiva sostituisce la precedente CE 595/2009.

L'obiettivo di tale direttiva è definire le regole relative all'omologazione di veicoli a motore, dei loro motori e delle parti di ricambio di veicoli pesanti per quanto riguarda le emissioni prodotte. Il regolamento stabilisce inoltre delle linee guida relative a:

- Conformità in servizio di veicoli e motori;
- Durabilità dei dispositivi di controllo dell'inquinamento;
- Accessibilità delle informazioni sulla diagnostica di bordo e su riparazione e manutenzione dei veicoli;
- Misure di consumo del combustibile ed emissioni di CO<sub>2</sub>;

### 1. *Ambito di applicazione*

Questo regolamento è applicato ai veicoli a motore delle categorie M1, M2, N1 ed N2 aventi una massa di riferimento che supera i 2610 Kg e a tutti i veicoli a motore della categoria M3 ed N3.

**Nota:**

I veicoli di categoria N sono quelli adibiti al trasporto di merci (capitolo 1), mentre quelli di categoria M sono destinati al trasporto di persone.

### 2. *Obblighi dei costruttori*

I fabbricanti devono:

- poter dimostrare che tutti i nuovi veicoli, motori o loro parti, venduti, immatricolati o messi in servizio nell'Unione europea sono stati oggetto di una procedura di omologazione CE in conformità al presente regolamento;
- adottare misure tecniche che garantiscano che le emissioni dal tubo di scarico del veicolo siano effettivamente limitate per tutto il periodo di vita dei veicoli in condizioni normali di impiego;

### 3. *Requisiti e prove*

I costruttori devono produrre i loro veicoli o motori con componenti che garantiscano il rispetto dei limiti di emissione emanati dalla Commissione Europea (Euro 6).

### 4. *Accesso alle informazioni*

I fabbricanti devono:

- Garantire agli operatori indipendenti (aziende indipendenti dai rivenditori) l'accesso alle informazioni relative alle attrezzature di diagnostica, agli strumenti e ai software;
- fornire una struttura standardizzata, sicura e a distanza per permettere ai meccanici indipendenti di realizzare operazioni che riguardano l'accesso al sistema di sicurezza del veicolo;

Le informazioni devono essere pubblicate sui siti web dei costruttori (nel caso ciò non sia possibile in un altro formato appropriato).

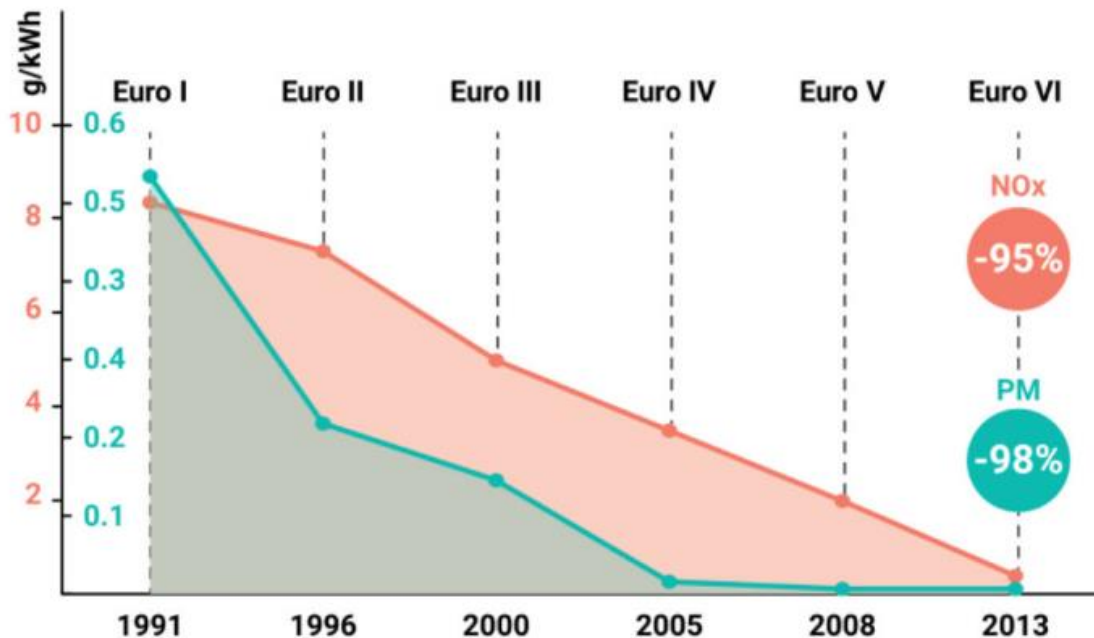
### 5. *Incentivi*

Gli Stati membri possono concedere incentivi finanziari per l'acquisto di veicoli a motore prodotti in serie conformi al presente regolamento. Sono concepibili misure sia per l'adeguamento dei veicoli a motore già in circolazione che per la loro demolizione.

Il capitale di questi incentivi finanziari dovrà essere equivalente al costo supplementare dei dispositivi tecnici utilizzati per soddisfare la conformità ai limiti di emissione di un veicolo.

I limiti di emissione per i mezzi pesanti odierni, emanati dalla Commissione Europea ed entrati in vigore per la prima volta nel 2009, sono quelli definiti Euro 6.

Gli agenti inquinanti su cui si focalizza maggiormente la Euro 6 sono due: Ossido di azoto ( $\text{NO}_x$ ) e particolato solido (PM). Nel grafico [4.5] è riportata l'evoluzione delle limitazioni attuate su tali fattori partendo dalla prima (Euro1 – 1991) fino a quella odierna (Euro6 - 2013):



[4.5] Evoluzione dei limiti di  $\text{NO}_x$  e PM negli anni [www.Camionsupermarket.it]

Come si può notare questi parametri sono stati ridotti notevolmente con il passare degli anni; inizialmente, con la Euro1, si avevano dei valori di  $\text{NO}_x$  poco superiori ad 8 g/kWh, ora si hanno valori di 0,4 g/kWh nel ciclo di prova in condizioni stazionarie a caldo e di 0,46 g/kWh nel ciclo di prova con transitori (che prevede partenze sia a freddo che a caldo).

Negli Stati Uniti invece, la normativa vigente è l'EPA2010, che prevede limiti più bassi (0,27 g/kWh per entrambi i cicli). La Euro6 e la EPA2010 prevedono metodologie di test differenti soprattutto a livello di calibrazioni utilizzate. Queste differenze rendono impossibile effettuare un paragone tra le norme e contribuiscono a farle sviluppare in parallelo; ciò risulta molto svantaggioso per ogni costruttore che dovrà effettuare test diversi necessari all'omologazione sui suoi veicoli per poterli vendere nei rispettivi Paesi; sarebbe molto più efficiente un'unica norma a livello internazionale.

### 4.3.3 – Le emissioni di CO<sub>2</sub>

Il regolamento UE 2019/1242, entrato in vigore il 14 agosto 2019, stabilisce le norme di emissioni di CO<sub>2</sub> per i veicoli pesanti. Esso si impone di:

- contribuire al rispetto degli impegni assunti dall'UE nell'ambito dell'accordo di Parigi (2015);
- ridurre i costi del consumo di carburante per gli operatori dei trasporti, soprattutto per le piccole e medie imprese e per i consumatori;
- contribuire a mantenere la leadership tecnologica dei produttori e dei fornitori dell'UE.

I benefici attesi da questo regolamento sono:

- Circa 54 milioni di tonnellate di CO<sub>2</sub> ridotte nel periodo 2020-2030;
- Risparmio di petrolio fino a 170 milioni di tonnellate di petrolio nel periodo 2020-2040;
- Risparmi alla pompa pari a circa 25 000 EUR nei primi 5 anni di utilizzo per un nuovo autocarro acquistato nel 2025 e fino a circa 55 000 EUR nei primi 5 anni di utilizzo per un nuovo autocarro acquistato nel 2030;
- Aumento del PIL con conseguente creazione di nuovi posti di lavoro;

A partire dal 2025 i costruttori dovranno raggiungere gli obiettivi fissati per le emissioni medie di CO<sub>2</sub> per l'intero parco veicoli dei loro nuovi autocarri registrati in un determinato anno civile. Obiettivi più severi saranno applicati dal 2030.

Gli obiettivi sono espressi in percentuale di riduzione delle emissioni rispetto alla media dell'Unione Europea nel periodo di riferimento che va dal 1° luglio 2019 a giugno 2030:

- A partire dal 2025: riduzione del 15%
- A partire dal 2030: riduzione del 30%

L'obiettivo del 2025 può essere raggiunto utilizzando tecnologie già presenti sul mercato e riguarderà solo i mezzi di grandi dimensioni (che rappresentano circa il 70% delle emissioni di CO<sub>2</sub> di tutti i veicoli pesanti)

L'obiettivo del 2030 sarà valutato nel 2022 nell'ambito del riesame del regolamento e dovrebbe essere esteso anche ad autoveicoli più piccoli come autocarri piccoli, pullman, autobus e rimorchi.

Il regolamento prevede incentivi per:

- Veicoli a emissioni zero (ZEV): autocarri senza emissioni di CO<sub>2</sub> allo scarico;
- Veicoli a basse emissioni (LEV): autocarri con una massa massima a pieno carico superiore a 16 tonnellate e con emissioni di CO<sub>2</sub> inferiori alla metà delle emissioni medie di tutto il suo gruppo immatricolati nel periodo di riferimento 2019;

*Commissione Europea-Riducing CO<sub>2</sub>*

#### 4.3.4 – Normative future

L'unico ente che ha già reso pubblici i dettagli dei nuovi standard è il consiglio californiano CARB (California Air Resources Board).

Si baserà su due fasi, la prima applicabile tra il 2024 e il 2026 e la seconda dal 2027 in avanti.

Nella prima i limiti di NO<sub>x</sub> scenderanno a 0,07 g/kWh (75% in meno del valore attuale) e sarà introdotto un limite di 10 grammi all'ora per la sosta a motore acceso, questo nuovo provvedimento è molto importante perché la sosta al minimo, nei mezzi pesanti, rappresenta una fase molto prolungata e quindi un importante fonte di emissioni (specialmente degli NO<sub>x</sub> a causa delle basse temperature dei gas di scarico).

Secondo gli esperti del CARB, questi nuovi limiti possono essere raggiunti solo grazie a una ricalibrazione dei sistemi già esistenti e a qualche sviluppo per quanto riguarda le tecnologie di post-trattamento.

Nella seconda fase, dal 2027, si intende ridurre le emissioni di NO<sub>x</sub> del 90% con un valore limite compreso tra 0,02 e 0,04 g/kWh. Per riuscirci sarà necessario apportare delle modifiche ai sistemi di post-trattamento sfruttando l'iniezione di sostanze catalizzanti (SCR).

Secondo CARB l'ostacolo più grande sarà quello relativo alla temperatura dei catalizzatori che, se non viene mantenuta elevata, causa una drastica perdita di efficienza in questi sistemi.

La sfida per il futuro sarà quella di consentire un riscaldamento rapido, e di mantenere alte le temperature dei gas di scarico, anche in condizioni di basso carico (come durante i percorsi urbani o nelle fasi di stazionamento a motore acceso).

Per quanto riguarda l'Europa, a marzo 2020 Bruxelles ha avviato le prime consultazioni per i nuovi standard Euro 7, che avranno come obiettivi quello di semplificare gli standard in vigore tutt'ora (ad esempio il quadro attuale per auto/furgoni e per camion/autobus è diverso per norme e per scadenze), di evitare iniziative nazionali (come i blocchi del traffico), e di misurare le emissioni anche durante l'intera vita dei veicoli sulle strade europee.



## 5 Procedure di prova normalizzate

La quantità di elementi di scarico inquinanti e di conseguenza la loro concentrazione in atmosfera, è strettamente dipendente dalle condizioni di funzionamento del motore. In fase di accelerazione un motore produrrà una quantità di inquinanti di gran lunga maggiore rispetto alla fase di decelerazione. Per questo motivo è necessario analizzare le caratteristiche dei vari motori definendo alcune procedure di prova normalizzate. Tali procedure possono essere stabilite sia in relazione a prove su strada che in laboratorio, cercando di garantire alcuni requisiti fondamentali:

- Significatività rispetto al funzionamento reale;
- Ripetibilità (analogia di risultati ottenuti rispetto alla stessa struttura di prova);
- Riproducibilità (analogie di risultati ottenuti in strutture di prova differenti);

Le prove di strada sono caratterizzate da un'ottima significatività ma da scarsa ripetibilità e riproducibilità causate dalla presenza di parametri di disturbo (traffico e condizioni atmosferiche) che le rendono quindi poco idonee ad essere normalizzate, a differenza di quelle in laboratorio. Tuttavia le prove al banco motore (quindi in laboratorio) risultano meno significative rispetto a quelle su strada, esse prevedono l'impiego di una serie di apparecchiature su tutto il veicolo che riproducono in maniera affidabile le condizioni reali (banchi dinamometrici). Su tali apparecchiature vengono eseguiti dei percorsi normalizzati, chiamati cicli guida, riferiti a percorsi di guida urbana o extraurbana costituiti da sequenze di movimento caratteristiche del veicolo.

I cicli guida normalizzati in Europa, chiamati cicli modali, sono caratterizzati da una sequenza di modalità di marcia del veicolo (velocità costante, accelerazione o decelerazione costante) ed hanno una legge prefissata di utilizzo del cambio. Quelli impiegati negli USA, per la EPA2010 (*vedi 4.3.2*), sono detti "cicli a profilo di velocità" e non hanno una legge prefissata di utilizzo del cambio (ciò è dovuto all'elevato impiego del cambio automatico).

### **5.1 – Strumenti di prova per valutazione delle emissioni**

Generalmente per i mezzi pesanti, per questioni di praticità, le procedure normalizzate prevedono esclusivamente prove al banco dinamometrico sviluppate in laboratorio solo sul motore.

Per valutare le emissioni dei gas di scarico in laboratorio gli strumenti impiegati sono:

1. *Banco dinamometrico*
2. *Sistema di campionamento dei gas*
3. *Analizzatori per la misura degli inquinanti*

### 5.1.1 – Banco dinamometrico

Il banco dinamometrico, comunemente definito banco prova, è costituito da uno o due rulli con inerzia bassa, sui quali sono collocate le ruote motrici del veicolo. I rulli sono collegati ad un freno dinamometrico di tipo elettrico, che simula la resistenza al moto del veicolo, e ad uno o più volani che riproducono l'inerzia del veicolo durante le fasi di accelerazione e decelerazione.

Nella figura [5.1] è rappresentato un tipico banco dinamometrico per effettuare i test sui mezzi pesanti.



[5.1] Banco multiplatforma per prova sui mezzi pesanti [www.directindustry.it]

### 5.1.2 – Sistema di campionamento dei gas

Esistono tre differenti tipologie di sistema di campionamento dei gas:

- Ad accumulo: tipico sistema previsto dalla normativa europea fino alla fine degli anni '80, i gas di scarico vengono raffreddati e raccolti in grandi sacchi durante il corso della prova. Una volta conclusa, si procede alla valutazione della pressione e del volume complessivo dei gas nei sacchi, determinando quindi le concentrazioni dei diversi inquinanti. In questo modo è possibile risalire alla massa di ciascuno di essi con lo scopo di riferirne le emissioni all'unità di lunghezza percorsa (g/km) durante tutta la durata della prova. Si tratta di un sistema molto semplice che utilizza sacchi molto grandi, per non aumentare la contropressione allo scarico del motore, e che fornisce informazioni solo sui valori medi delle emissioni lungo il ciclo.
- A diluizione variabile: in questo sistema i gas di scarico sono miscelati con aria ambiente aspirata mediante un ventilatore, simulando l'effetto reale prodotto dall'atmosfera sui gas che vi sono immessi. Un campione viene spillato con continuità e raccolto in sacchi di piccole dimensioni, per essere poi analizzato una volta finita la prova determinandone dunque le concentrazioni degli inquinanti.

È il sistema più utilizzato al giorno d'oggi, in quanto ne è prescritto l'impiego sia dalla normativa Europea che da quella USA, consente di simulare le condizioni reali di immissione degli inquinanti nell'atmosfera.

- A campionamento continuo: consiste nel prelievo continuo, mediante una sonda inserita nel condotto di scarico, di una frazione di gas combustibili che vengono analizzati con continuità da un banco di analizzatori. Questo permette di ottenere informazioni relative alle emissioni nelle differenti condizioni di funzionamento del motore, inoltre tale sistema può essere utilizzato anche come analizzatore a bordo del veicolo nel caso di prove su strada. La procedura di calcolo dei livelli medi di emissione è molto complessa, altre problematiche derivano dall'instabilità di alcune reazioni nel caso di temperature troppo elevate, per cui questo sistema viene utilizzato con particolari accorgimenti.

### **5.1.3 – Analizzatori per la misura degli inquinanti**

Lo strumento per la valutazione degli inquinanti è costituito da dispositivi a flusso continuo:

- Analizzatori non dispersivi ad infrarosso (NDIR), per CO e CO<sub>2</sub>
- Analizzatore a ionizzazione di fiamma (FID), per HC
- Analizzatore a chemiluminescenza (CLA) oppure non dispersivo di risonanza a raggi ultravioletti (NDUVR), per NO<sub>x</sub>
- Determinazione per via gravimetrica attraverso due filtri posti in serie, per PM

La normativa solitamente definisce anche la precisione richiesta per gli analizzatori, ovvero 3 ppm (parti per milione) per concentrazioni inferiori a 100 ppm, e le caratteristiche di gas puri e miscele campione che si devono utilizzare per il funzionamento e la loro taratura.

## **5.2 – Differenze della prova tra Europa e USA**

Come riportato nel capitolo 4.3.2, le limitazioni europee sugli inquinanti (Euro6) sono differenti rispetto a quelle americane (EPA2010) sia nei valori limite che nelle modalità della prova, ma soprattutto nella metodologia di valutazione dei risultati.

Il programma europeo utilizza un metodo di valutazione con media mobile in cui i dati vengono raggruppati in gruppi di misurazione, detti finestre, per i quali viene rilevata la media mobile secondo per secondo. Un veicolo si considera in regola se il 90% delle medie mobili di tutte le finestre risulta al di sotto del valore limite normativo. Per essere considerata valida, la potenza media espressa dal motore all'interno di una finestra temporale, deve essere più elevata rispetto ad una percentuale della potenza massima dichiarata dal motore.

Il programma americano prevede invece che la valutazione della conformità venga effettuata solo quando si è all'interno di determinati parametri, in termini di giri, coppia e limiti di potenza, e quando le temperature dei gas di scarico sono superiori a 250°C. Solamente se il motore rimane per almeno 30 secondi all'interno di questi parametri i risultati vengono considerati validi. La misurazione all'interno di questo lasso temporale viene chiamata evento NTE (Not To Exceed).

Se il 90% degli eventi NTE rimane al di sotto del limite di emissioni, il veicolo viene considerato conforme.

Quindi, mentre i test europei hanno soltanto un parametro che può escludere la prova (la potenza erogata dal motore), i test americani prevedono che molte condizioni debbano essere soddisfatte per poter ritenere valida la prova.

Altre differenze tra Europa e USA riguardano:

	Europa	USA
Condizioni di prova	Effettuate da organizzazioni terze (come centri tecnici), che selezionano i percorsi prova in accordo ai requisiti. Vengono provati almeno 3 motori per ogni tipologia	Effettuato direttamente dai costruttori. Vengono provati almeno 5 motori per ogni tipologia
Condizioni di guida	Specifiche tratte in ambiente urbano, extraurbano ed autostrada	Non ci sono specifiche condizioni di guida
Condizioni di carico	Il veicolo può essere testato con qualsiasi carico utile tra il 10% e il 100% del carico utile massimo ammissibile	È previsto un "carico normale" definito in maniera non specifica

[5.2] *Differenze della prova sulle emissioni inquinanti tra Europa e USA [Euro6 ; EPA10]*

Un'analisi condotta dall'ICCT (The International Council On Clean Transportation) ha rivelato che le regolamentazioni Europee sono più efficaci nel contenere gli NOx. Il principale problema di quelle americane deriva dall'utilizzo di fasce molto strette che limitano i requisiti per ritenere validi i rilevamenti, le quali escludono a priori il controllo delle emissioni in molte condizioni di utilizzo, soprattutto in quelle di guida urbana. In questo studio si dimostra anche che i veicoli pesanti e i motori costruiti per il mercato europeo sono migliori nel controllo delle emissioni durante la marcia a bassa velocità, con poco carico o in condizioni di motore acceso a veicolo fermo.

## 6 Metodi di abbattimento delle emissioni inquinanti

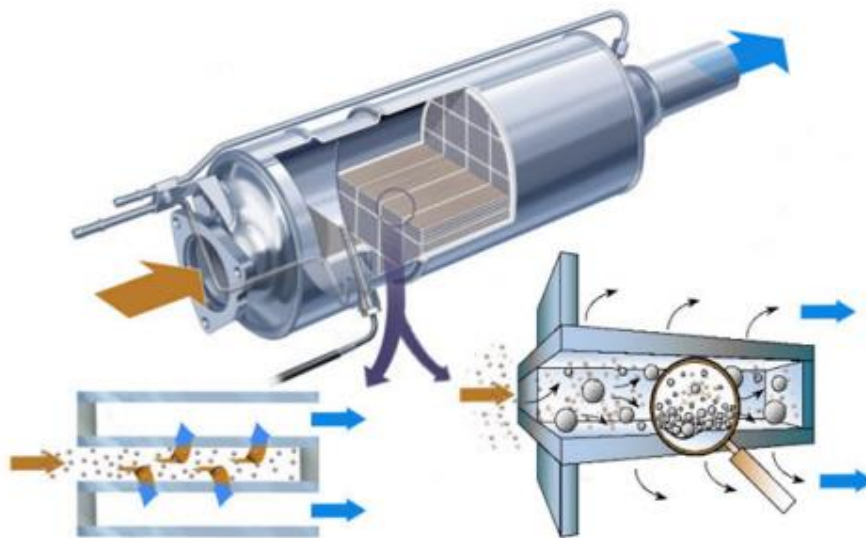
In questo capitolo vengono descritti i principali sistemi di abbattimento delle emissioni inquinanti applicati sui motori diesel, in particolare quelli dei mezzi pesanti, illustrandone caratteristiche e prestazioni.

### 6.1 – Introduzione

Uno dei principali obiettivi di tutti i costruttori è il contenimento delle emissioni inquinanti, dato che le normative diventano sempre più stringenti. Per fare ciò è possibile ottimizzare la combustione (sotto questo aspetto l'iniezione diretta ha portato miglioramenti notevoli, consentendo la polverizzazione del carburante) oppure introdurre una tecnologia EGR (Exhaust Gas Recirculation), che consiste nel ricircolare i gas di scarico reiniettandoli nelle camere di combustione così da poter contenere le temperature interne e gli eccessi di ossigeno che sono la principale causa della formazione degli ossidi di azoto ( $\text{NO}_x$ ).

L'EGR può essere effettuato in maniera tradizionale, detto anche ad alta pressione, se i gas vengono recuperati all'uscita dai cilindri e reiniettati direttamente nell'aspirazione miscelandoli con l'aria in entrata; oppure a bassa pressione se il recupero avviene più a valle, dopo il passaggio in turbina e nel filtro anti-particolato. In entrambi i casi, purtroppo, l'EGR non è sufficiente per rispettare i limiti imposti dall'Euro6. Per poter rimanere entro tali limiti è necessario operare con dispositivi di trattamento post-combustione, ovvero dei gas di scarico, come il filtro anti-particolato (FAP).

I motori Diesel devono ricorrere a tale filtro per poter abbattere le polveri fini; si tratta di un vero e proprio filtro che trattiene la fuliggine e, per questo motivo, va periodicamente rigenerato: i residui che vi sono rimasti vengono bruciati a temperature maggiori di  $600^\circ\text{C}$ , questa operazione viene eseguita in maniera autonoma nei mezzi più moderni.



[6.1] Funzionamento del filtro antiparticolato (FAP) [[www.red-live.it/automotorpedia](http://www.red-live.it/automotorpedia)]

Il “vero nemico” dei motori Diesel sono gli ossidi di azoto (NO<sub>x</sub>), prodotti in grande quantità a causa della combustione magra, ricca di ossigeno. La norma Euro6 prevede, per questi motori, limiti di emissioni degli NO<sub>x</sub> bassissimi che impongono l’adozione di un catalizzatore specifico: il de-NO<sub>x</sub>, ad accumulo, da pulire periodicamente arricchendo l’iniezione di carburante; oppure il sistema SCR (Selective Catalytic Reduction), più tecnologico e maggiormente indicato per le vetture con medio/alte prestazioni perché consente di mantenere alte potenze specifiche nonostante le emissioni contenute. Quest’ultimo metodo trasforma gli NO<sub>x</sub> in vapore acqueo (H<sub>2</sub>O) e azoto (N<sub>2</sub>), entrambi innocui.

## **6.2 – Sistema di diagnosi di bordo (EOBD)**

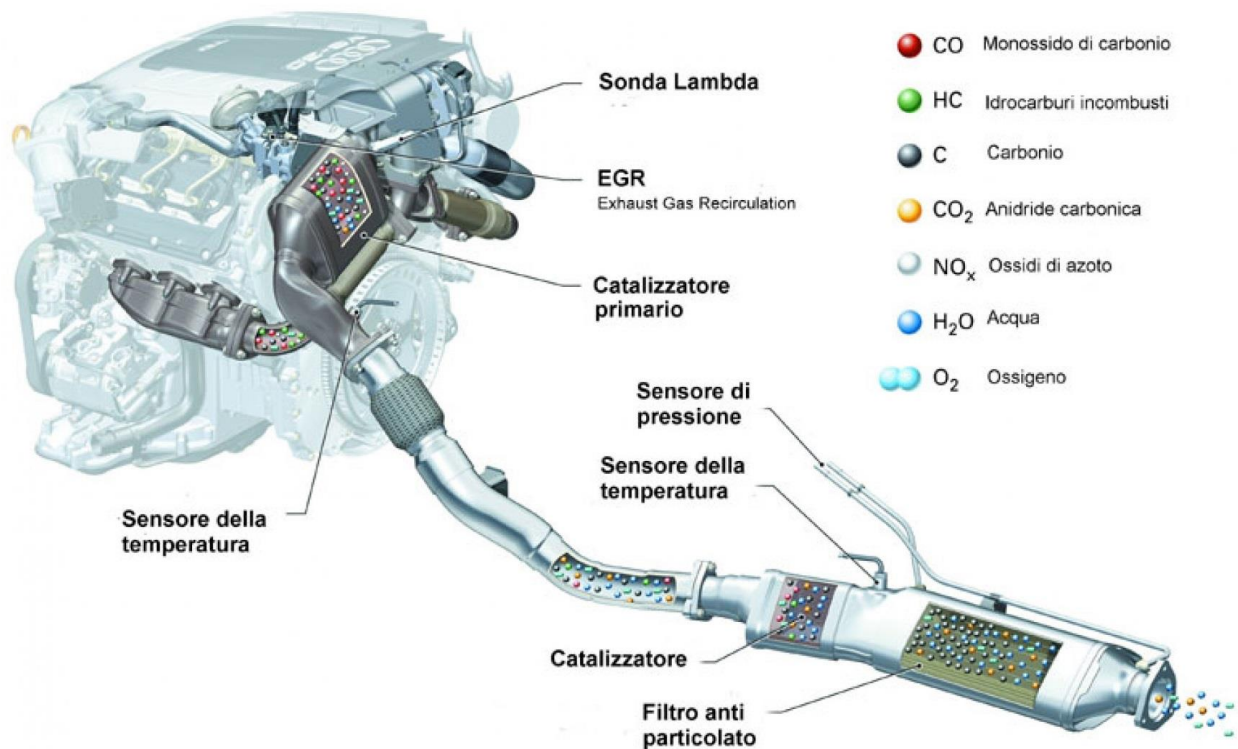
Affinché nel tempo venga garantita la capacità di soddisfare le norme antinquinamento dei veicoli, i legislatori hanno imposto che le verifiche sulla qualità dei gas scaricati dal motore siano effettuate biennialmente (direttiva 92/55), con una tolleranza pari allo 0.5% dei limiti fissati; inoltre il sistema di abbattimento delle emissioni deve garantire un corretto funzionamento per almeno 160.000 km (EURO 6), cioè la vita media di un veicolo.

Rimane comunque il rischio che in alcuni casi il sistema di controllo, sempre più complesso, perda la capacità di contenere le emissioni entro i limiti di legge.

Attualmente è prescritto, dalla direttiva 98/69/CE, la presenza di un sistema automatico di diagnosi di bordo, chiamato EOBD (European On Board Diagnostic), in grado di segnalare eventuali malfunzionamenti dei componenti mediante l’accensione di una spia. Il proprietario è obbligato a far riparare immediatamente il guasto, poiché il computer di bordo memorizza la distanza percorsa dal momento della sua segnalazione e sono previste delle sanzioni.

I componenti da tenere monitorati sono:

- *Il sensore di ossigeno*: rileva continuamente le variazioni di ricchezza dell’alimentazione del motore, emettendo segnali di tensione variabili nel tempo, permettendo, in base ad essi, alla centralina elettronica di regolare la durata dell’apertura degli iniettori. Con l’aggiunta di un secondo sensore a valle del convertitore catalitico è possibile fare un confronto tra i segnali di uscita dei due sensori ed individuare eventuali malfunzionamenti;
- *I convertitori catalitici*: in questi dispositivi l’efficienza non deve diminuire fino al punto di dover compromettere l’entità dei gas scaricati. Il deterioramento può essere segnalato per mezzo dell’analisi del segnale proveniente dal sensore di ossigeno posto a valle del convertitore catalitico. Se la conversione degli inquinanti avviene in modo corretto, l’ossigeno presente nei gas viene consumato totalmente nelle reazioni di ossidazione di CO e HC, portando il segnale del sensore ad essere basso e più o meno costante; se invece l’efficienza del sensore si riduce, l’O<sub>2</sub> presente a valle della marmitta catalitica cresce, comportando un segnale più intenso e variabile.
- *Le candele di accensione*: che per usura o difetti dei collegamenti elettrici possono causare mancate accensioni e, di conseguenza, scarico di CO e HC dai cilindri, inducendo accelerazioni angolari anomale all’albero motore;
- *L’impianto antievaporativo*: per invecchiamento può perdere la capacità di trattenere i vapori provenienti dal serbatoio;



[6.2] Schema di impianto di scarico con sistema di diagnosi di bordo EOBD [www.ammirati.org]

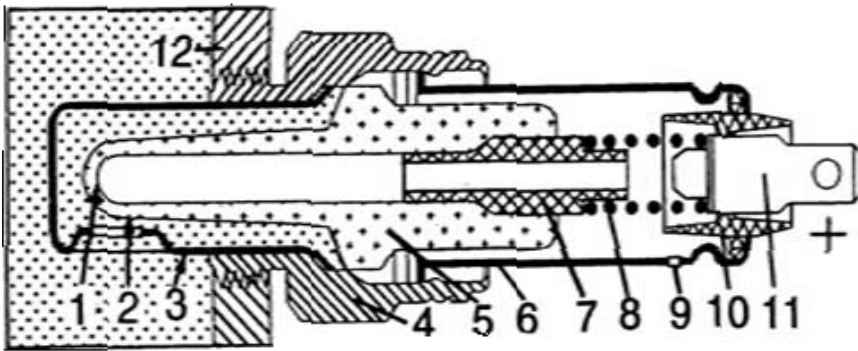
### 6.3 – Sonda Lambda

La sonda lambda è il sensore che informa istantaneamente la centralina elettronica in merito alla concentrazione di ossigeno nei gas di scarico. Con questo segnale, la centralina corregge il dosaggio di combustibile in termini di rapporto stechiometrico riducendo quindi le emissioni inquinanti e permettendo una migliore efficienza.

La lettera lambda ( $\lambda$ ) è stata usata per rappresentare il rapporto aria/combustibile ideale entro il quale i dispositivi di abbattimento degli inquinanti lavorano al meglio. Si è stabilito inoltre, in forma empirica, che per un motore con sonda lambda (a biossido di zirconio) il valore di  $\lambda_{ideale} = 1$  rappresenta il rapporto stechiometrico della miscela teorica di 14,7:1, quindi 14,7 parti di aria per 1 parte di combustibile. Il valore di lambda è espresso come:

$$\lambda = \frac{\text{Qtà. di aria aspirata}}{\text{Qtà. di aria teorica necessaria a bruciare il combustibile}} \quad [www.primauto.net]$$

Nella figura [6.3] è rappresentato uno schema relativo ad una sonda Lambda, inserita nel condotto dal quale escono direttamente i gas di scarico. Questo sensore non è altro che una cella elettrolita, a base di zirconio, che separa due elettrodi "spugnosi" di platino, avente una delle due estremità chiuse. L'estremità aperta consente all'aria atmosferica di entrare e venire a contatto con l'elettrodo interno. L'elettrodo esterno invece, è costituito da un sottile strato di ceramica che funge da protezione per il sensore contro l'elevata aggressività termica e chimica dei gas di scarico.



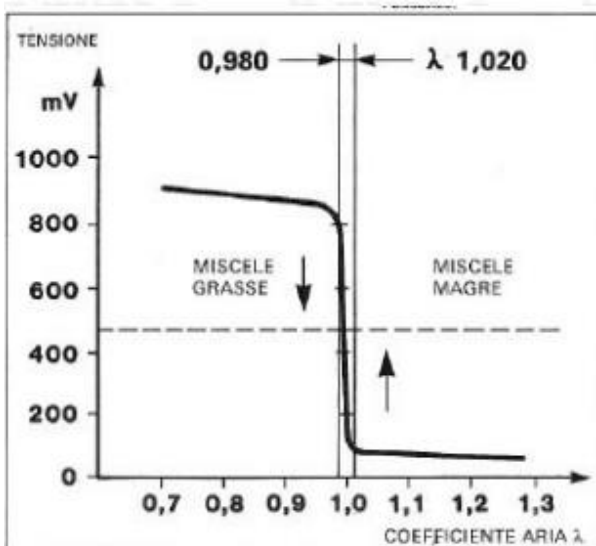
- 1 - elettrodo positivo
- 2 - elettrodo negativo
- 3 - tubo di protezione
- 4 - massa
- 5 - parte in ceramica
- 6 - manicotto di protezione
- 7 - manicotto di contatto
- 8 - molla di contatto
- 9 - orifizio di areazione
- 10 - parte isolante
- 11 - terminale alimentazione
- 12 - tubo di scarico

[6.3] Sonda lambda a bioossido di zirconio [www.primauto.net]

I sistemi che usano questo tipo di dispositivo gestiscono le condizioni della miscela aria-carburante usando la sonda solo per capire quando è il momento di smagrire o ingrassare, senza tener conto dei valori intermedi, in modo tale da tenere la carburazione sempre ad una media dei valori di massimo e minimo presi come riferimento, e quindi di  $\lambda = 1$ .

Quando lo strato ceramico raggiunge una temperatura di circa 300-350°C (sotto questa temperatura non si ha un corretto funzionamento del dispositivo), diventa poroso e consente all'ossigeno molecolare dei gas di raggiungere l'elettrodo interno. Se le pressioni parziali dell'ossigeno presente nell'aria e nei gas di scarico sono diverse, quello con la pressione parziale maggiore (sicuramente quello dell'aria atmosferica), a contatto con l'elettrodo di platino si riduce in ioni di  $O^-$  che attraversano lo strato di zirconio. A causa di ciò si stabilisce una differenza di potenziale tra gli elettrodi, la quale è inversamente proporzionale alla pressione parziale dell'ossigeno presente nei gas di scarico. Se i gas di scarico sono poveri di ossigeno, a causa di una miscela troppo ricca, c'è il rischio di formazione del monossido di carbonio (CO), altamente tossico, allora la centralina reagisce riducendo la durata dell'iniezione ottenendo una miscela più povera. I tempi di risposta sono circa di 50 ms.

Di seguito è riportato l'andamento della tensione ai capi della sonda lambda in funzione del fattore lambda:

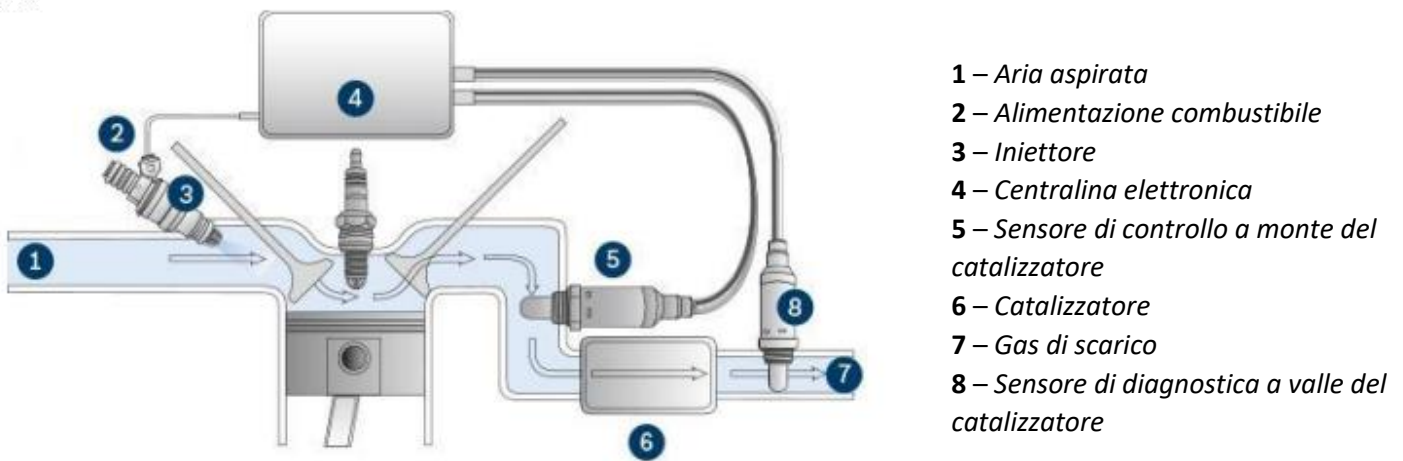


- $\lambda = 1$  miscela ideale
- $\lambda > 1$  miscela magra
- $\lambda < 1$  miscela grassa

[6.4] Andamento della tensione ai capi della sonda lambda al variare del fattore  $\lambda$  [www.primauto.net]



Questo sensore, come rappresentato nello schema [6.5], può quindi essere usato come segnale di retroazione in un circuito di controllo ad anello chiuso, in grado di mantenere l'alimentazione del motore intorno al rapporto di miscela stechiometrico, con tolleranza sufficientemente stretta perché il convertitore trivalente allo scarico operi con elevata efficienza.



[6.5] Schema di un sistema di controllo Bosch ad anello chiuso [Bosch-automotive.com]

Per motori che funzionano con miscele molto magre sono state sviluppate sonde dette “povere” che riescono a lavorare con dei coefficienti  $\lambda$  prossimi ad 1,5 e temperature che vanno dai 150 agli 800 °C. Questo tipo di sonda ha permesso di poter lavorare con questo sistema anche sui motori Diesel.

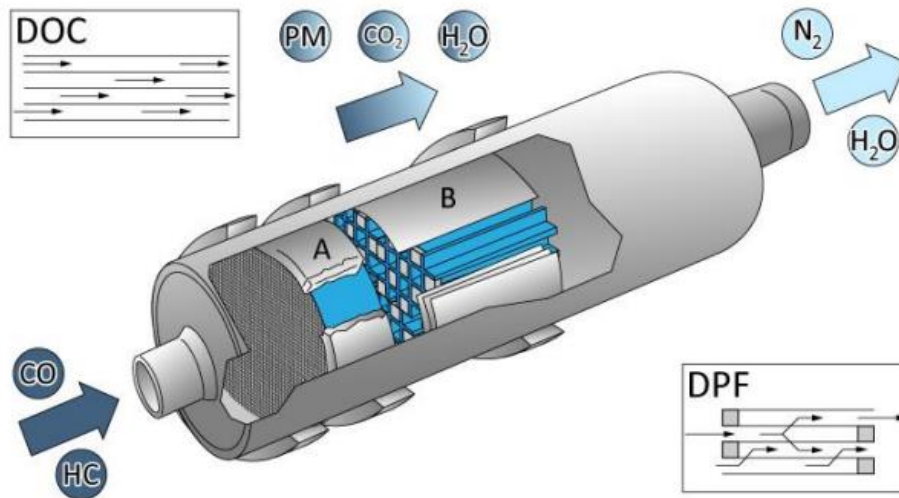
## 6.4 – Catalizzatori ossidanti

In un motore Diesel le emissioni possono essere ridotte con l'impiego di marmitte catalitiche ossidanti chiamate DOC (Diesel Oxidation Catalyst). Queste marmitte permettono l'ossidazione, a seconda del tipo di motore, dal 30 all'80% delle emissioni gassose di HC, e dal 40 al 90% di CO. Nonostante tutto le DOC non sono in grado di creare un ambiente riducente necessario per l'abbattimento degli NO<sub>x</sub>, ed inoltre, hanno poco effetto sulla parte carboniosa del particolato (soot secco), dove la riduzione dal 30 al 50% di esso è dovuta all'ossidazione degli idrocarburi contenuti allo stato gassoso ad alta temperatura nei gas di scarico, sottraendoli all'eccessiva condensazione attorno ai nuclei solidi di carbonio. Questa marmitta, come nei convertitori catalitici adottati nei motori a benzina, è costituita da un unico blocco ceramico sul quale è depositato il catalizzatore (solitamente in platino o palladio, o entrambi) disperso su un'ampia superficie in modo da massimizzare il contatto con le emissioni liquide e gassose.

Il degrado del DOC è dovuto alla presenza di alcune sostanze nello scarico, quali additivi incombusti presenti nell'olio lubrificante come: zinco, fosforo, antimonio, calcio e magnesio.

Un ulteriore problema legato al suo utilizzo è la possibilità che esso converta anche il biossido di zolfo (SO<sub>2</sub>) in triossido di zolfo (SO<sub>3</sub>) che in presenza di vapore d'acqua forma gocce di acido solforico e particelle di solfati solidi, le quali si potrebbero aggiungere al particolato già emesso, portando il motore fuori dai limiti imposti dalle normative.

Un consistente abbattimento delle emissioni di particolato emesso può essere ottenuto solamente aggiungendo al DOC un filtro di particolato DPF (Diesel Particulate Filter).



[6.6] Schema DOC e DPF in serie per motore Diesel  
[Emissioni zero-Articolo estratto da quattroruote-2007]

## 6.5 – Filtri di particolato DPF

### 6.5.1 – Il particolato solido nei Diesel

Come già analizzato in precedenza (*paragrafo 3.1.5*), il particolato (soot) è quell'insieme di particelle solide e liquide, che derivano da una combustione incompleta sviluppata nel cilindro e che successivamente continua durante la fase di espansione, formato principalmente da gasolio incombusto, ma anche da una parte di olio lubrificante combusto.

Per le temperature superiori a 500 °C le singole particelle sono costituite principalmente da grappoli di numerose sfere di carbonio, con una piccola parte di idrogeno, aventi un diametro compreso tra i 15 e i 30 nm. Quando la temperatura cala, cioè in fase di espansione avanzata e scarico, le particelle si rivestono assorbendo composti organici con un elevato peso molecolare (come gli idrocarburi incombusti, gli idrocarburi ossigenati e gli idrocarburi poliaromatici).

Tutto ciò porta ad avere allo scarico un particolato con dimensioni tra i 20 e i 100 nm. Generalmente le particelle con dimensioni maggiori danno un contributo più rilevante in termini di massa totale, mentre quelle con diametro minore (nanoparticelle) sono responsabili dei danni alla salute umana.



[6.7] Dimensioni del particolato a confronto [www.gruppoacquistoauto.it]

Classificazione delle varie “famiglie” di particolato:

- *Particolato grossolano*: particolato sedimentabile avente dimensioni superiori ai 10  $\mu\text{m}$ , non in grado di penetrare nel tratto respiratorio superando la laringe, se non in piccola parte.
- *PM10*: particolato formato da particelle inferiori a 10  $\mu\text{m}$ , è una polvere in grado di penetrare nel tratto respiratorio superiore (naso e laringe).
- *PM 2,5*: particolato fine con diametro inferiore a 2,5  $\mu\text{m}$  (un quarto di centesimo di millimetro), è una polvere toracica, cioè in grado di penetrare profondamente nei polmoni soprattutto durante la respirazione dalla bocca; per dimensioni ancora inferiori (particolato ultrafine) si parla di polvere respirabile, ovvero in grado di penetrare nei polmoni fino in profondità.
- *PM1*: con diametro inferiore ad 1  $\mu\text{m}$ .
- *PM 0,1*: con diametro inferiore a 0,1  $\mu\text{m}$ .
- *Nanopolveri*: con diametri dell'ordine di grandezza dei nanometri (PM 0,001).

### 6.5.2 – DPF

L'utilizzo del filtro di particolato (DPF) in sostituzione al filtro anti-particolato (FAP), è diventato indispensabile al fine di riuscire a rispettare la normativa Euro 4, trattenendo gran parte del particolato emesso, impedendone la dispersione nell'ambiente. Questo filtro non è altro che un setto poroso in grado di intrappolare le particelle in sospensione, e quindi di ostacolarne il passaggio.



[6.8] *Struttura di un filtro di particolato (DPF)* [[https://it.wikipedia.org/wiki/Filtro\\_di\\_particolato](https://it.wikipedia.org/wiki/Filtro_di_particolato)]

Le trappole sono elementi filanti di diversa natura che trattengono fisicamente il particolato, evitando che questo venga rilasciato nell'ambiente. In seguito a questo trattamento, la trappola si intasa e provoca un aumento intollerabile della contropressione allo scarico che causa un aumento dei consumi e compromette il buon funzionamento del motore. È quindi necessario accoppiare alle trappole un dispositivo che, in maniera automatica, sia in grado di rigenerare il supporto filtrante, eliminando il particolato che si è accumulato; tale processo viene definito *processo di rigenerazione*.

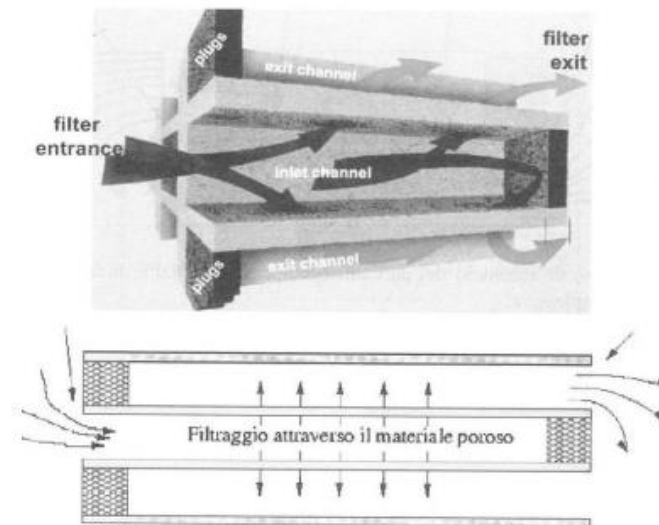
Le prestazioni di questi filtri vengono valutate in termini di costo, efficienza del filtraggio, possibilità di rigenerazione, resistenza a sollecitazioni termiche e cadute di pressione; queste caratteristiche sono tutte in funzione della tipologia di materiali impiegati e dalle geometrie adottate. Per quanto riguarda i materiali, vengono realizzati filtri metallici, metalli sinterizzati o schiume metalliche, e ceramici, cordierite o carburi di silicio. I più diffusi sono proprio i carburi di silicio, essi presentano valori inferiori di porosità rispetto ai filtri in cordierite, ma offrono una resistenza termica migliore (2000 °C) senza alterazioni delle loro caratteristiche meccaniche. Questo li rende adatti al processo di rigenerazione, perché la reazione di ossidazione del soot, estremamente esotermica, necessita di materiali che resistono alle alte temperature.

Per quanto riguarda la configurazione, invece, quella più comune ha un unico blocco estruso a nido d'ape a parete filtrante, la quale consente di disporre di un'ampia superficie filtrante e di buone caratteristiche fluidodinamiche.

Nel caso di filtri in materiale ceramico le celle vengono tappate utilizzando cordierite grezza e non porosa, per una profondità variabile dai 5 ai 10 mm.

Grazie a questa geometria si ottiene il filtraggio dei gas di scarico, i quali sono obbligati ad attraversare la superficie porosa di ogni cella. Durante questo processo si assiste al progressivo accumulo del particolato, in un primo momento all'interno delle micro-cavità del materiale, sino a costituire un deposito (cake) che, con il passare del tempo, andrà ad ostruire la sezione passante.

A questo punto, è necessario eseguire l'operazione di rigenerazione per pulire il filtro e renderlo nuovamente operativo.



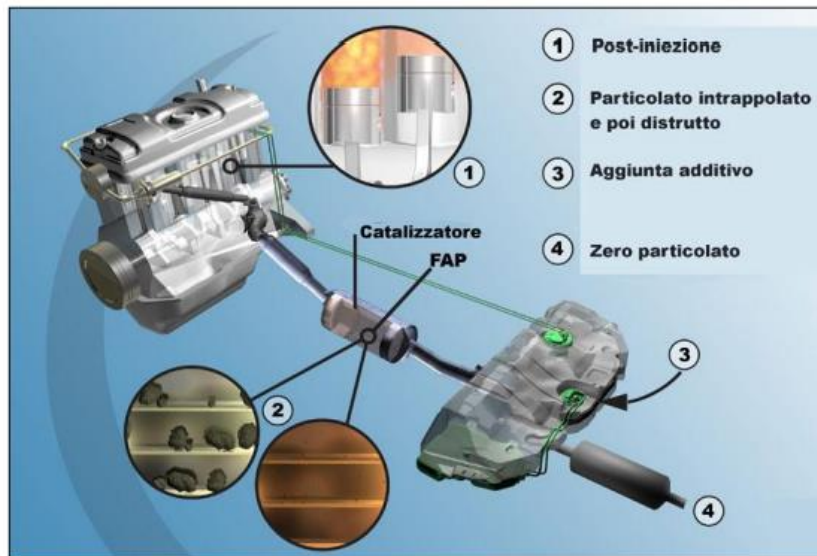
[6.9] Filtro ceramico in cordierite [Fondamenti motori a combustione interna, Giancarlo Ferrari-Esculapio-2016]

### 6.5.3 – Il processo di rigenerazione

Possiamo definire la rigenerazione come il processo di combustione del particolato presente all'interno del filtro, avviene mediamente ogni 800/1000 Km ma, per particolari utilizzi gravosi del veicolo, può avvenire anche ogni 400 Km.

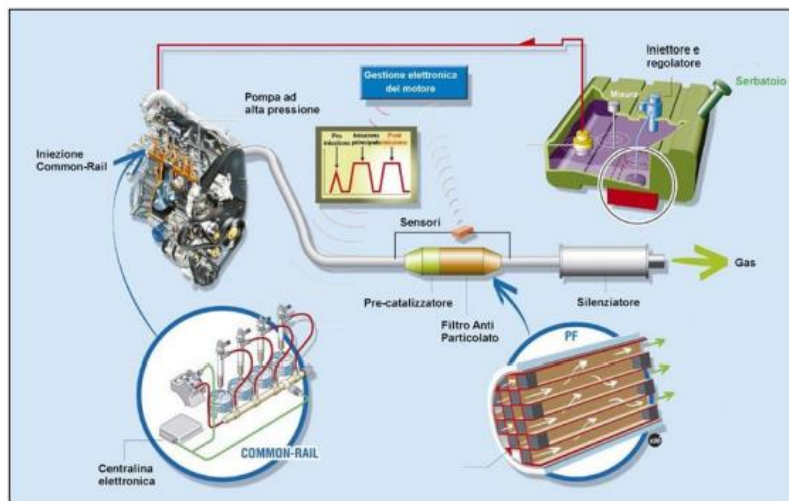
Le due tipologie di filtro per il particolato (DPF e FAP) si distinguono principalmente per il loro processo di rigenerazione differente.

Nel caso del filtro anti-particolato FAP<sup>[6.10]</sup>, quando i canali si intasano di particelle di PM10, generando quindi una differenza di pressione tra ingresso e uscita del filtro, questa viene rilevata dalla centralina del veicolo che attiva la fase di rigenerazione. Il sistema di iniezione, durante questa fase, avvia un'iniezione supplementare per portare la temperatura iniziale dei gas di scarico da 150 °C (temperatura normale durante la circolazione urbana) a 450 °C all'entrata del catalizzatore. Tale temperatura però non è sufficiente ad innescare la combustione del PM necessaria alla rigenerazione del filtro (che avviene a 550 °C), il carburante è additivato con la cerina (prodotto a base di ossido di cerio) che riduce la temperatura di combustione del particolato fino a 450 °C. Il sistema FAP prevede l'impiego di un serbatoio di cerina da circa 5 litri (sufficiente per circa 80000 Km di autonomia), dal quale l'additivo viene prelevato e miscelato al gasolio attraverso un elettro iniettore pilotato dalla centralina. Il particolato, raggiunta la temperatura desiderata, reagisce con l'ossigeno e il biossido di azoto NO<sub>2</sub>, ottenuto tramite un catalizzatore situato a monte del filtro, ossidandosi e producendo anidride carbonica e monossido di azoto (NO). L'intero sistema di controllo viene affidato alla centralina d'iniezione, la quale, interpretando alcuni parametri prova forniti da specifici sensori, esegue il processo di rigenerazione. A causa di questa produzione di anidride carbonica e ossido di azoto, dovuta all'ossidazione del particolato, che facevano correre il rischio di superare i limiti posti dalle normative su questi due agenti inquinanti, è stato necessario sostituire il filtro FAP con il filtro DPF.



[6.11] *Rigenerazione FAP con additivo* [www.grifforicambi.it]

Il filtro di particolato (DPF)[6.11], invece, non utilizza additivi in quanto innalza maggiormente la temperatura dei gas di scarico (fino a 600°C), attraverso due post-iniezioni, e di conseguenza due post-combustioni (di cui l'ultima avviene nei collettori di scarico), in modo tale che questa sia sufficientemente alta da bruciare completamente il particolato che si è accumulato nel filtro. Tuttavia, in condizioni normali di utilizzo del motore, il gas di scarico non risulta molto caldo, pertanto è necessario introdurre calore dall'esterno. Questo calore può essere fornito sia da un riscaldatore elettrico che da un bruciatore per gasolio, entrambi posti davanti al filtro. Questo sistema ha il vantaggio di non richiedere il rifornimento di cerina che, oltre ad essere un prodotto dannoso per la salute umana, presenta anche un costo piuttosto elevato.



[6.12] *Rigenerazione DPF senza additivo* [www.grifforicambi.it]

In realtà, in entrambi i filtri, avvengono due tipi di rigenerazione: una passiva ed una attiva. La prima avviene continuamente quando il veicolo viene impiegato alle alte velocità con temperature di filtro fino ai 250°C. La seconda viene comandata dalla centralina di gestione del motore con postazione singola o doppia. In entrambe le tipologie l'efficienza del filtraggio raggiunge il 95% dell'eliminazione del particolato prodotto; ciò permette ai veicoli Diesel di rispettare anche i limiti più severi imposti sulle emissioni inquinanti.

#### 6.5.4 – Vantaggi e svantaggi FAP e DPF

Oltre alla principale differenza tra questi due filtri, legata al metodo di rigenerazione, possiamo definirne altre riassumendole brevemente, come vantaggi e svantaggi, in questa tabella [6.13]:

FAP		DPF	
PRO	CONTRO	PRO	CONTRO
Bassa temperatura di rigenerazione Basse contropressioni	Scarsa durata Complessità generale del sistema	Semplicità generale del sistema Nessun utilizzo di additivi	Diluizione dell'olio motore Elevate temperature di rigenerazione

[6.13] Altre differenze tra filtro FAP e DPF

#### 6.6 – Tecnologia EGR

L'EGR (Exhaust Gas Recirculation) è una tecnologia impiegata per ridurre le emissioni inquinanti, consiste nel riciclo dei gas di scarico e nella loro reiniezione nelle camere di combustione in modo tale da poter contenere le temperature interne di combustione e l'eccesso di ossigeno (principali fattori della formazione di NO<sub>x</sub>). Nel caso dell'EGR tradizionale, ad alta pressione, i gas vengono recuperati all'uscita dai cilindri e reiniettati direttamente nella camera all'aspirazione, miscelandoli con l'aria in entrata.

In questo modo viene limitata la formazione di ossido di azoto durante la combustione, ma l'aumento della temperatura in fase di aspirazione e la limitazione della pressione di sovralimentazione influiscono negativamente sul rendimento del motore.

L'EGR a bassa pressione si basa sul recupero dei gas di scarico più a valle, ovvero dopo il passaggio nella turbina e nel filtro anti-particolato. I flussi vengono quindi raffreddati all'interno di uno scambiatore di calore e inviati nuovamente al turbo, vengono miscelati con l'aria aspirata in modo tale da ottenere un aumento della pressione di sovralimentazione. Successivamente subiscono un ulteriore processo di raffreddamento nell'intercooler e contribuiscono, per la seconda volta, alla

combustione. Questo circuito a bassa pressione, detto anche a freddo, consente di aumentare il tasso di ricircolo mantenendo comunque la temperatura all'aspirazione sotto controllo.

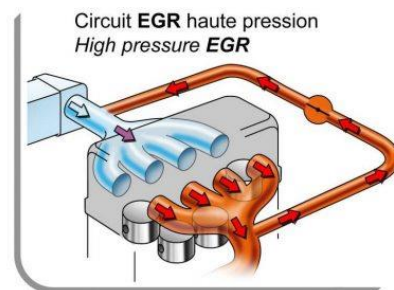
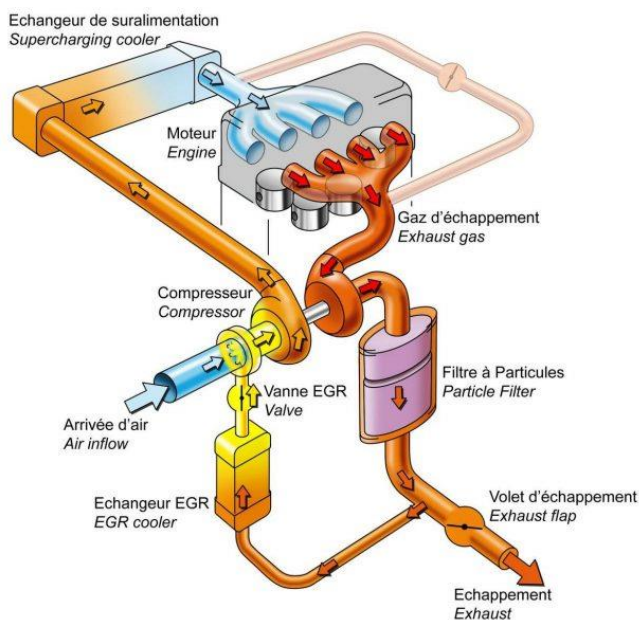
Gli ossidi di azoto vengono contrastati in maniera più efficace con questo metodo, rispetto a quello tradizionale, inoltre si ottiene un miglior rendimento dovuto alla combustione più efficiente; questo metodo limita anche la formazione della CO<sub>2</sub>.

L'EGR a bassa pressione necessita di un'architettura del motore che minimizzi la distanza tra il gruppo catalizzatore-filtro anti particolato e il circuito d'aspirazione. Per questo motivo, quando ci si riferisce all'EGR a bassa pressione, si parla di sistema di post trattamento "sotto-turbo".

Tale vicinanza consente di portare catalizzatori e filtro a temperature più elevate rispetto alla norma, favorendone quindi l'efficacia.

### EGR basse pression - Low pressure EGR

Recirculation des gaz d'échappement par une boucle froide  
Exhaust Gas Recirculation through Cold Loop



EGR basse pression : moins d'émissions polluantes, meilleur rendement de combustion donc moins de CO<sub>2</sub> émis.  
Low pressure EGR: less polluting emissions, improved combustion, thus less CO<sub>2</sub>.



[6.14] Schema tecnologia EGR a bassa pressione [<http://red-live.it>]



## 6.7 – Nuova tecnologia di abbattimento NO<sub>x</sub> per Euro 6

Come detto in precedenza, il vero problema dei motori Diesel rimane l'emissione degli ossidi di azoto, prodotti in elevate quantità a causa di una combustione ricca di ossigeno (magra).

La normativa Euro 6 prevede, per i mezzi pesanti, emissioni non superiori a 0,4 g/kWh per questa specie inquinante; un valore decisamente inferiore rispetto alla precedente Euro 5. La norma attuale impone quindi l'adozione di tecnologie più avanzate per consentire il rispetto di questi limiti e, di conseguenza, poter omologare i veicoli.

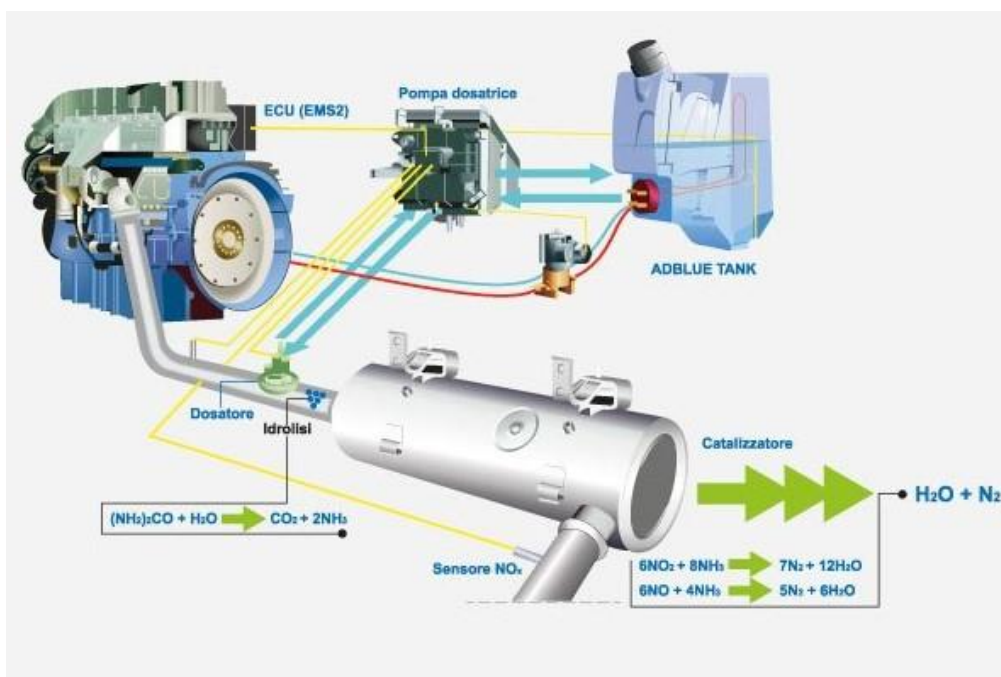
### 6.7.1 – Tecnologia SCR

La tecnologia BlueHDI è una delle soluzioni odierne più avanzate, impiegata per far rientrare i motori Diesel entro la normativa Euro 6. Mira all'abbattimento delle emissioni inquinanti, sfruttando la combinazione tra catalizzatore ossidante, filtro anti-particolato e additivo AdBlue (una soluzione acquosa di urea contenuta in un apposito serbatoio) iniettato nel flusso dei gas di scarico. Tale processo favorisce l'immissione di ammoniaca nel catalizzatore che trasforma fino all'80% dell'ossido di azoto in azoto e vapore acqueo, entrambi innocui.

Il catalizzatore ossidante, posto all'uscita della tubazione di scarico, permette di trattare gli idrocarburi incombusti (HC) e il monossido di carbonio (CO), ma non gli ossidi di azoto (NO<sub>x</sub>).

Per l'abbattimento degli NO<sub>x</sub> si è optato per la tecnologia SCR (Selective Catalytic Reduction), che consiste nell'aggiunta di un catalizzatore supplementare a monte del filtro antiparticolato.

Questo catalizzatore, composto da un supporto in ceramica, trasforma continuamente gli NO<sub>x</sub> in vapore acqueo (H<sub>2</sub>O) e azoto (N<sub>2</sub>). La reazione chimica si ottiene iniettando un liquido, appunto l'AdBlue, composto da una miscela di acqua (al 67,5%) e Urea (al 32,5%). L'iniezione dell'SCR, a contatto con i gas di scarico ad alta temperatura, trasforma l'AdBlue in ammoniaca (NH<sub>3</sub>) la quale funge da riduttore trasformando l'ossido di azoto in H<sub>2</sub>O e N<sub>2</sub>.



[6.15] Tecnologia SCR ad iniezione di AdBlue [www.blueazotal.it]

L'AdBlue costituisce un costo supplementare, sia in sede progettuale che durante il mantenimento del mezzo. È infatti necessario prevedere un serbatoio dedicato, un sistema dosatore e l'acquisto periodico del liquido. L'SCR inoltre non è bypassabile: a 1000 Km dall'esaurimento dell'urea, il motore taglia le prestazioni sino ad arrivare, dopo un numero contenuto di accensioni, all'arresto forzato.

Uno studio del SwRI (Southwest Research Institute), effettuato sui motori a fine vita, ha dimostrato che applicando filtri passivi di NO<sub>x</sub>, iniettando carburante nello scarico, coibentando i catalizzatori e integrando l'SCR nel filtro di particolato (DPF), si può arrivare a emissioni di NO<sub>x</sub> di circa 0,05 g/kWh, quindi già in linea con le direttive imposte da CARB per il 2024 (4.3.4).

Un secondo studio, sempre svolto da SwRI, ha approfondito nuove configurazioni dell'SCR. È emerso che se si affiancasse un secondo SCR, specifico per le basse temperature, in aggiunta a quello principale, si potrebbero ottenere grossi vantaggi. Questa soluzione, unita a strategie per il mantenimento delle temperature, porterebbe ad un'ipotetica emissione di NO<sub>x</sub> di soli 0,024 g/kWh (non solo in linea con le normative del 2024, ma anche con gli standard previsti per il 2027). Non è ancora chiaro però quale potrebbe essere l'impatto economico di un sistema di post-trattamento a doppia SCR.

### **6.8 – Altre tecnologie già disponibili**

Ad oggi, per i mezzi pesanti, esistono altre tecnologie disponibili, che possono anche essere usate contemporaneamente, per poter rispettare i nuovi standard in arrivo.

<b>Tecnologia</b>	<b>Impatto sulla CO<sub>2</sub></b>
Coibentazione del collettore di scarico e dei catalizzatori per ridurre le perdite di calore negli avviamenti a freddo	Nessun impatto
Bypass degli scambiatori di calore nelle fasi in cui non sono richiesti	Nessun impatto
Turbine elettriche per migliorare i tempi di risposta e velocizzare lo start-up del motore	Riduzione dei consumi
Aumento del regime minimo nelle condizioni stazionarie per aumentare il flusso e quindi aumentare le temperature dei gas di scarico	Aumento dei consumi
Riscaldamento elettrico dei catalizzatori durante le fasi di start & stop	Nessun impatto
Iniezione del carburante direttamente nei tubi di scarico per alzare la temperatura dei gas	Aumento dei consumi
Filtro passivo a freddo di NO <sub>x</sub> , che viene intrappolato e poi rilasciato solamente quando l'SCR è sufficientemente caldo	Aumento dei consumi
Integrazione del sistema SCR nel filtro di particolato (DPF) per avvicinare il sistema al motore e rendere più veloce il riscaldamento	Nessun impatto

Alcune di esse potranno avere impatti sulle emissioni di CO<sub>2</sub>, ovvero del consumo, altre invece non hanno alcun impatto, o addirittura possono diminuirle.

Nella tabella [6.16] sono riportate tali tecnologie con il relativo impatto sulla CO<sub>2</sub>:

## 6.9 - Applicazione reale

Per comprendere al meglio quali siano i dispositivi di abbattimento delle emissioni e i metodi per rimanere entro le normative, più comunemente impiegati al giorno d'oggi, sui mezzi pesanti, facciamo riferimento al motore già analizzato anche in precedenza: [www.Volvo.com]

### **Volvo D13K500** (struttura motore e curve caratteristiche cap. 2.3.3)

A livello di emissioni inquinanti, sulla sua scheda tecnica, la casa costruttrice Volvo riporta:

Il D13K500 è un motore a basse emissioni, sia per quanto riguarda i gas di scarico, sia per quanto concerne il livello di rumore. La normativa Euro 6 prevede la riduzione degli ossidi d'azoto (NOX) dell'80% e delle emissioni di particolati del 50%, rispetto allo standard Euro 5. Per soddisfare i requisiti legali, Volvo Trucks ha sviluppato un sistema di post-trattamento che, nella marmitta, combina i sistemi DOC (catalizzatore ossidante), DPF (filtro antiparticolato), SCR (riduzione catalitica selettiva) e ASC (catalizzatore per residuo di ammoniaca). Il motore Euro 6 si basa sull'affidabile versione Euro 5. Presenta un circuito EGR non raffreddato che, in combinazione con l'iniezione del gasolio nei gas di scarico, aumenta la temperatura di questi ultimi, quando si presenta la necessità in cicli di guida a basse temperature. Con il sistema di post-trattamento delle emissioni, i motori Volvo offrono un'elevata efficienza e superano le normative vigenti denominate Euro 6 versione Step C.

I componenti aggiuntivi del sistema post-trattamento hanno due scopi principali: migliorare il flusso dei gas di scarico e garantire che questi ultimi arrivino al sistema di post-trattamento a temperatura ottimale, assicurando che il livello di emissioni non venga superato. Il catalizzatore ossidante (DOC, Diesel Oxidation Catalyst) produce il biossido di azoto necessario al filtro antiparticolato (DPF, Diesel Particulate Filter) per la combustione efficace dei particolati. In condizioni di freddo, fornisce il calore necessario per la rigenerazione. Il filtro antiparticolato raccoglie i particolati (PM, particulate matter) finché non vengono bruciati automaticamente durante la rigenerazione. Nella zona di miscelazione dell'SCR (Selective Catalytic Reduction), sui gas di scarico viene iniettata l'AdBlue. Quando raggiungono il catalizzatore, gli ossidi d'azoto (NOX) vengono trasformati in innocuo azoto gassoso e acqua. Il catalizzatore per residuo di ammoniaca (ASC, Ammonia Slip Catalyst) rappresenta l'ultimo passaggio prima del tubo di scarico, in cui l'eventuale ammoniaca residua (NH<sub>3</sub>) viene rimossa. Per la gestione del calore nel sistema di post-trattamento viene utilizzata una micro iniezione di carburante nel tubo di scarico. Il gasolio viene bruciato nel DOC, che si scalda, e questo garantisce l'efficienza del DPF e il buon funzionamento dell'SCR.

## 7 Combustibili alternativi

Negli ultimi anni, per poter rispettare i limiti imposti dalle normative, stanno avendo molto successo mezzi pesanti alimentati con combustibili differenti dal solito gasolio. Tali combustibili, definiti appunto combustibili alternativi, sono in grado di alimentare motori, mantenendo sempre una buona efficienza, con il vantaggio di costi ed emissioni ridotti.

I principali combustibili impiegati sono due:

- **CNG** (Compressed Natural Gas): combustibile fossile ottenuto comprimendo il gas naturale, composto principalmente da metano ( $\text{CH}_4$ ).
- **LNG** (Liquefied Natural Gas): combustibile che si ottiene sottoponendo il gas naturale, dopo opportuni trattamenti di depurazione e disidratazione, a successive fasi di raffreddamento e condensazione. Il prodotto finale, allo stato liquido, si presenta trasparente, inodore e composto prevalentemente da metano e da quantità minori di etano, propano, butano e azoto.

Stiamo assistendo ad una rapida diffusione dei mezzi alimentati con queste due tipologie di combustibile; dal 2018 ad oggi le vendite dei mezzi pesanti a CNG e LNG sono cresciute notevolmente e, allo stesso tempo, sono calate quelle dei camion a Diesel. Questa inversione di tendenza è dovuta principalmente a due caratteristiche che questi combustibili riescono a soddisfare in maniera ottimale: diminuzione dei costi di esercizio e riduzione dell'impatto ambientale.

Nel primo caso, a parità di percorrenza, un chilogrammo di metano liquido (LNG) o gassoso (CNG) può costare fino a 50 centesimi in meno rispetto ad un litro di gasolio. Tale convenienza purtroppo risulta ancora limitata a causa dei maggiori costi dei veicoli a gas. Questi infatti presentano prezzi di listino più alti rispetto ai veicoli Diesel aventi pari prestazioni; risultano addirittura doppi nel caso di veicoli alimentati a metano liquido a causa degli speciali serbatoi criogenici necessari per mantenere l'LNG a bassa temperatura e pressione.

Si è stabilito che in Europa, entro il 2025, dovrà essere disponibile una stazione di servizio di CNG ogni 150 Km, e una di LNG ogni 400 Km; sarà così possibile garantire una logistica sostenibile e, forse, libera dai combustibili fossili.

Sul piano ambientale, le emissioni di  $\text{CO}_2$  di un camion a CNG sono inferiori del 35% rispetto a quelle di un camion Diesel della stessa categoria, se si circola con particolari tipologie di gas (ad esempio quello svizzero che è miscelato con il 27,3% di biogas) la riduzione arriva anche all'80-85%. Anche con l'LNG la riduzione dei gas serra è molto buona.

Inoltre, l'utilizzo del CNG comporta ulteriori vantaggi rispetto ai combustibili tradizionali: si ha una riduzione delle emissioni di ossidi di azoto di circa il 75% e di polveri sottili del 97% (fonte EMPA, laboratori federali svizzeri per la scienza e la tecnologia dei materiali).

Anche dal punto di vista delle prestazioni il confronto regge.

A differenza del settore automobilistico, in cui la conversione a metano ha sempre avuto una finalità economica controbilanciata da un compromesso sulle prestazioni decisamente inferiori rispetto ai motori alimentati con combustibili fossili, sui camion anche le performance del gas sono molto più competitive.

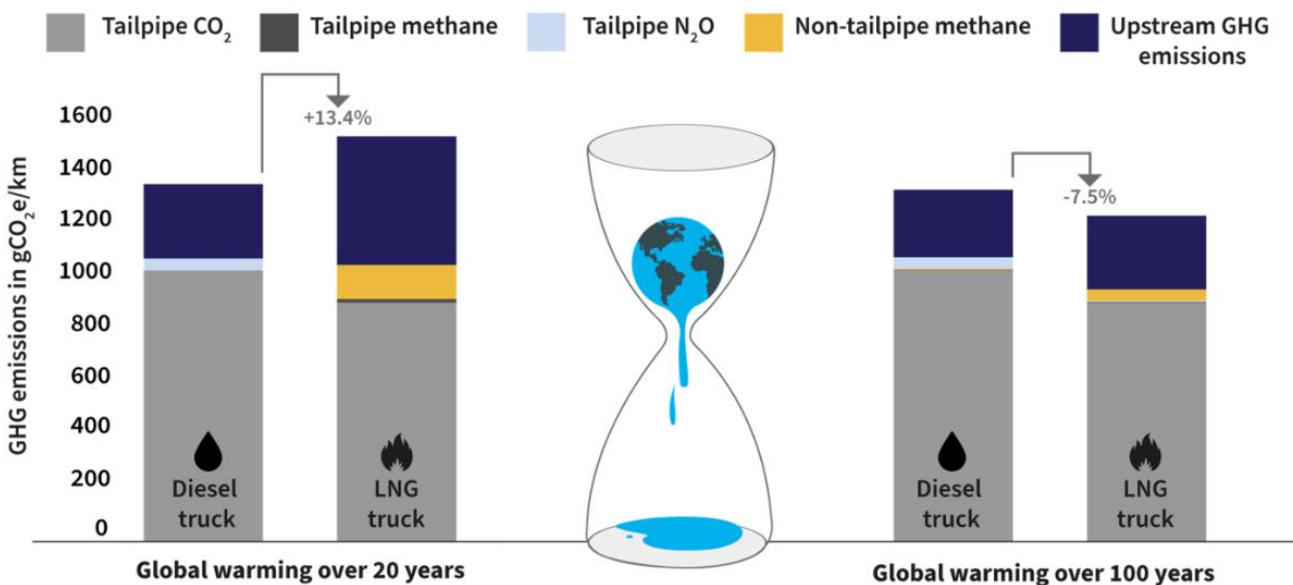
La motivazione risiede nel tipo di motori utilizzati, infatti nelle auto si privilegia una conversione della benzina con rapporti di compressione bassi che sfruttano poco il potere antidetonante del metano. Questa caratteristica lo rende molto più idoneo a essere utilizzato su varianti di propulsori a ciclo Diesel, impiegati proprio per i mezzi pesanti.

Su questi combustibili alternativi però esistono pareri contrastanti; alcuni esperti che, per mezzo di studi e prove su strada, hanno dimostrato che i camion alimentati a metano inquinano di più rispetto a quelli a gasolio.

Uno studio commissionato da T&E (Transport & Environment) afferma che, nel breve periodo, un camion alimentato a LNG inquina il 37% in più rispetto ad uno Diesel e che un effettivo vantaggio sulle emissioni in favore del metano si avrebbe solo dopo circa cent'anni di vita del veicolo.

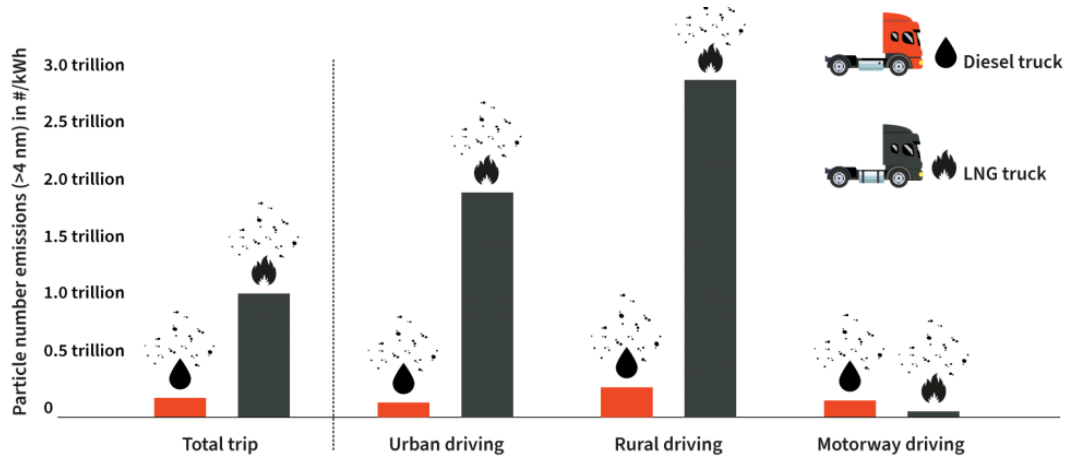
Per dimostrare ciò l'ente T&E ha commissionato all'università di Graz (Ungheria) un test in condizioni di guida reale.

Per questo test sono stati confrontati due camion Iveco: uno alimentato a LNG e l'altro a gasolio; i ricercatori hanno analizzato le emissioni di gas serra dal serbatoio alla ruota (Tank-to-Wheel), quelle dal pozzo al serbatoio (Well-to-Tank) e quelle dal pozzo alla ruota (Well-to-Wheel). Considerando un orizzonte temporale di vent'anni è emerso che il camion a LNG emette gas serra in maniera più elevata rispetto al diesel (+13,4%); tale confronto si capovolge in favore del metano se si amplia la finestra temporale fino a cent'anni (-7,5%).



[7.1] Confronto delle emissioni di CO<sub>2</sub> tra LNG e Diesel [Test by Technical University of Graz for T&E – 2020]

I ricercatori affermano anche che il camion a LNG produce minori emissioni di NO<sub>x</sub> ma non di particolato, infatti il camion a LNG testato ha prodotto una quantità di particolato 37 volte superiore rispetto all'altro veicolo in prova, oltretutto il particolato emesso era formato da particelle aventi una dimensione inferiore rispetto a quello emesso dal diesel, il che lo rende più pericoloso per la salute umana.



[7.2] Confronto delle emissioni di particolato tra LNG e Diesel [Test by Technical University of Graz for T&E – 2020]

## Conclusioni

Con questa tesi si è voluto affrontare un argomento che da decenni è fonte di dibattito a livello globale ovvero: l'inquinamento atmosferico prodotto dai mezzi di trasporto, in particolare dai mezzi commerciali definiti pesanti, di rilevante importanza anche ai fini della salute dell'uomo; numerosi infatti sono gli studi epidemiologici che correlano il grado di inquinamento con l'insorgere di diverse patologie più o meno gravi.

Con il congresso sul clima tenutosi a Glasgow dal 31 ottobre 2021 al 13 novembre 2021 (COP26), ben 195 Paesi hanno discusso un nuovo accordo, in seguito a quello di Parigi del 2015, per ridurre le emissioni, in modo da rallentare il riscaldamento globale: il rialzo della temperatura media globale va contenuto sotto ad 1.5°C, sono state adottate nuove norme per la riduzione delle emissioni ed è stato costituito un fondo per la gestione dei danni riconducibili al cambiamento climatico.

La continua ricerca di soluzioni differenti ai combustibili fossili è un'esigenza fondamentale, perché le riserve di petrolio sono realmente in via di esaurimento, e dunque attualmente l'alternativa più plausibile a sostituire l'alimentazione Diesel dei camion risultano essere i combustibili ottenuti dal metano, sul quale però non sono ancora del tutto chiare le caratteristiche antinquinanti (come riportato dallo studio della T&E) e i costi, ancora troppo elevati. Una seconda alternativa potrebbe essere il motore elettrico, alimentato a batterie chimiche oppure con celle a combustione: le prime, avendo accumulatori con piombo e acido solforico, presentano ancora problemi relativi all'autonomia, alla ricarica e allo smaltimento, non offrendo al momento la soluzione giusta; le seconde sono ancora in fase di miglioramento nel tentativo di migliorare l'efficienza delle celle.

Va però precisato che sono già in atto sperimentazioni e prototipi di mezzi pesanti ibridi, spinti da motopropulsori aventi un motore elettrico abbinato ad uno a combustione interna, i quali consentono di avere emissioni inquinanti ridotte, ma non ancora prestazioni soddisfacenti.

Se questa tipologia di motori riuscirà ad essere perfezionata sui mezzi pesanti, come sta succedendo con le autovetture, si avranno numerosi vantaggi in merito alla riduzione della CO<sub>2</sub> che già viene stimata, solo per le autovetture, attorno ai 70 g/Km entro il 2025.

Nel frattempo però vanno previsti provvedimenti strutturali che ci consentano il rispetto di tali limiti.

Questo tema dunque è costantemente di estrema attualità: non solo chi amministra il territorio ma anche il mondo della scienza, con le sue conoscenze e capacità di ricerca, deve proseguire ad individuare sistemi di trasporto con emissioni sempre più contenute e a costi accessibili, cercando di servirsi maggiormente, in un futuro non troppo lontano, di tecnologie più "pulite" e di fonti di energia rinnovabili. La collettività, da parte sua, dovrà responsabilizzarsi maggiormente, evitando sprechi ed usi impropri, ai quali oggi talvolta assistiamo. Tutto ciò potrà garantire un futuro migliore a noi, ma soprattutto alle prossime generazioni, cercando di preservare il più possibile il pianeta su cui viviamo.

## Bibliografia

- Codice della Strada – Art.47: Classificazione veicoli
- Codice della strada – Art.116: Patente ed abilitazioni
- Corso di Macchine: motori a combustione interna – Dott. Ing. Daniele Scatolini
- Ciclo Otto e ciclo Diesel - dipartimento di Ingegneria Meccanica - Novara - Ing. Silvano Andorno
- Fondamenti motori a combustione interna - Giancarlo Ferrari – Esculapio – 2016
- Scheda tecnica Volvo Trucks – Driving Progress
- Trasporto su strada: Inventario nazionale delle emissioni e disaggregazione provinciale – ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) – 2019
- Trasporti - Antonella Bernetti, Antonio Caputo, Marina Colaiezzi, Giovanni Finocchiaro, Gianluca Iarocci – 2019
- K.L. Kohel, J.D. Benson, V. Burns, R.A. Gorse, A.M. Hochhauser, R.M. Reuter – Effect of Gasoline Composition and Properties on Vehicle Emissions: A Review of Prior Studies, Auto/Oil Air Quality Improvement Research Program – SAE Technical Paper N. 912321 - (1991)
- Test by Technical University of Graz for T&E – 2020
- ACEA, ALLIANCE, EMA, JAMA – World-Wide Fuel Charter – 4<sup>a</sup> edizione - settembre 2006
- Motori, Traffico e Ambiente - Piero Pinamonti – CISM – Udine – 2004
- Quattroruote – Emissioni zero - 2007

## Sitografia

- <http://mezzicommerciali.it/trucks>
- <https://www.allestimenticamionblog.com/>
- <https://jet-log.it/>
- <https://it.wikipedia.org/wiki/Autocarro>
- <https://it.wikipedia.org/wiki/Autoarticolato>
- <https://deltapubblicita.it/servizi/autocarri>
- <https://www.pesanti.com>
- [https://it.wikipedia.org/wiki/Distillazione\\_frazionata](https://it.wikipedia.org/wiki/Distillazione_frazionata)



- <https://www.tamoil.it>
- <https://www.gruppoapi.com/gasolio>
- <https://www.chimica-online.it>
- <https://www.youmath.it>
- <https://www.larapedia.com/motori/Il-motore.html>
- [www.tecnologiaduepuntozero.it](http://www.tecnologiaduepuntozero.it)
- <https://it.motor1.com>
- <https://www.motori.it/curiosita/237817/motore-2-tempi-vs-4-tempi-pregi-e-difetti.html>
- [www.Volvo.com](http://www.Volvo.com)
- <https://blog.trucksout24.com/it/allgemein/i-10-camion-piu-potenti-del-mondo/>
- [www.Autotecnica.it](http://www.Autotecnica.it)
- [www.Salute.gov.it](http://www.Salute.gov.it)
- [www.ArpaUmbria.it](http://www.ArpaUmbria.it)
- [https://ec.europa.eu/clima/eu-action/transport-emissions/road-transport-reducing-co2-emissions-vehicles/reducing-co2-emissions-heavy-duty-vehicles\\_it?etrans=it](https://ec.europa.eu/clima/eu-action/transport-emissions/road-transport-reducing-co2-emissions-vehicles/reducing-co2-emissions-heavy-duty-vehicles_it?etrans=it)
- <https://www.automoto.it/news/ue-test-emissioni-reali-rde-la-soglia-di-tolleranza>
- <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/HTML/?uri=LEGISSUM:mi0029&from=IT>
- <https://www.docenti.unina.it>
- <http://www.mtsspa.net/it/prodotti/filtri-fap-dpf>
- [www.Minambiente.it](http://www.Minambiente.it)
- [www.Camionsupermarket.it](http://www.Camionsupermarket.it)
- [www.directindustry.it](http://www.directindustry.it)
- [www.red-live.it/auto/motorpedia](http://www.red-live.it/auto/motorpedia)
- [www.ammirati.org](http://www.ammirati.org)
- [www.primauto.net](http://www.primauto.net)
- [www.Bosch-automotive.com](http://www.Bosch-automotive.com)
- [www.gruppoacquistoauto.it](http://www.gruppoacquistoauto.it)
- [www.grifforicambi.it](http://www.grifforicambi.it)
- <http://red-live.it>

- [www.blueazotal.it](http://www.blueazotal.it)
- <https://www.sicurauto.it/news/attualita-e-curiosita/metano-vs-diesel-un-camion-emette-il-37-in-piu-secondo-uno-studio/>

## Normative e Direttive

- Direttiva europea 2003/17/CE del Parlamento europeo e del Consiglio - 3 marzo 2003 - modifica la direttiva 98/70/CE relativa alla qualità della benzina e del combustibile diesel (2003)
- Direttiva 98/70/CE del Parlamento europeo e del Consiglio - 13 ottobre 1998 - relativa alla qualità della benzina e del combustibile diesel e recante modificazione della Direttiva 93/12/CE del Consiglio (1998)
- Direttiva 2009/30/CE del Parlamento Europeo e del consiglio – 23 Aprile 2009 - modifica la direttiva 98/70/CE per quanto riguarda le specifiche relative a benzina, combustibile diesel e gasolio nonché l'introduzione di un meccanismo inteso a controllare e ridurre le emissioni di gas a effetto serra, modifica la direttiva 1999/32/CE del Consiglio per quanto concerne le specifiche relative al combustibile utilizzato dalle navi adibite alla navigazione interna e abroga la direttiva 93/12/CEE
- Norma EN 590-04 – Automotive fuels – Diesel – Requirements and test methods – 2004
- Regolamento (CE) 443/2009 – 23 Aprile 2009 - definisce i livelli di prestazione in materia di emissioni delle autovetture nuove nell'ambito dell'approccio comunitario integrato finalizzato a ridurre le emissioni di CO2 dei veicoli leggeri
- Direttiva 91/441/CE del Consiglio – 26 Giugno 1991 - modifica la direttiva 70/220/CEE concernente il ravvicinamento delle legislazioni degli Stati Membri relative alle misure da adottare contro l'inquinamento atmosferico con le emissioni dei veicoli a motore – Euro 1
- Direttiva 94/12 CE del Consiglio – 1996 - Euro 2
- Direttiva 98/69-A CE – 2000 - Euro 3
- Direttiva 98/69-B CE – 2005 -Euro 4
- Regolamento 715/2007 – 20 Giugno 2007 – Euro 5
- Regolamento 715/2007 – 20 Giugno 2007 – Euro 6
- Regolamento (UE) 2018/858 del Parlamento europeo e del Consiglio – 30 Maggio 2019 - relativo all'omologazione e alla vigilanza del mercato dei veicoli a motore e dei loro rimorchi, nonché dei sistemi, dei componenti e delle entità tecniche indipendenti destinati a tali veicoli, che modifica i regolamenti (CE) n. 715/2007 e (CE) n. 595/2009 e abroga la direttiva 2007/46/CE

- 2010 EPA Decontamination Research and Development Conference – 27 Luglio 2011
- Regolamento UE 2019/1242 del Parlamento Europeo e del Consiglio – 20 Giugno 2019 - definisce i livelli di prestazione in materia di emissioni di CO2 dei veicoli pesanti nuovi e modifica i regolamenti (CE) n. 595/2009 e (UE) 2018/956 del Parlamento europeo e del Consiglio e la direttiva 96/53/CE del Consiglio.