

ALMA MATER STUDIORUM

UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

Sede di Forlì

Corso di laurea in

INGEGNERIA MECCANICA

Classe L-9

ELABORATO FINALE DI LAUREA

in **MACCHINE**

**EVOLUZIONE DELLA LIMITAZIONE DI
SOSTANZE INQUINANTI E CLIMALTERANTI
NELLE NORMATIVE DI OMOLOGAZIONE PER
AUTOVEICOLI**

CANDIDATO

Debora Antonelli

RELATORE

Enrico Corti

Anno Accademico 2014/2015

Sessione III

INDICE

INTRODUZIONE	2
SITUAZIONE ATTUALE	3
Evoluzione delle normative, da Euro 0 a Euro 6.....	3
Come i veicoli possono rispettare la normativa Euro 6.....	6
Motori diesel.....	11
Motori benzina.....	26
Il problema del particolato, passaggio da PM a PN	28
SITUAZIONE FUTURA	46
Strategia EUROPA 2020.....	46
Curva di valore limite	48
Penalità per le emissioni in eccesso.....	49
Combustibili alternativi	50
CICLI DI OMOLOGAZIONE	60
Cicli di omologazione utilizzati fino al 2016	61
Normativa RDE e test di prova con PEMS on-board.....	65
Normativa WLTP e ciclo di omologazione WLTC	90
L'influenza della normativa WLTP sui consumi	101
CONCLUSIONI	109
BIBLIOGRAFIA	111

INTRODUZIONE

Il settore dei trasporti come sottolineato dall'associazione Transport & Environment, incide per un buon 20% sul totale delle emissioni inquinanti mondiali, contribuendo in percentuale pari al 16% sulla quantità di particolato emesso, per un 26% sul monossido di carbonio (CO) ed infine per il 40% del totale sulle emissioni di NOx, incentivando ulteriormente l'effetto serra, alterando la composizione dell'aria ambiente e provocando danni permanenti alla salute umana e al territorio stesso. I soggetti responsabili di questo inesorabile e silenzioso decadimento ambientale e salutare sono sostanze chimiche o aggregati di particelle inevitabilmente prodotti dal processo di combustione di motori ad accensione per compressione e ad accensione comandata.

È dal 1991 con la nascita delle norme Euro che inizia la difficoltosa battaglia volta alla riduzione di queste specie inquinanti da parte delle Agenzie Mondiali di tutela dell'ambiente e tutt'ora portata avanti da associazioni come l'EPA Environmental Protection Agency e l'UNECE (United Nations Economic Commission for Europe). Queste normative si pongono l'obiettivo di introdurre limiti adeguati ai singoli inquinanti emessi dai veicoli commerciali e di conseguenza, di indurre i costruttori a progettare automobili sempre più efficienti da un lato e più pulite dall'altro. Si pongono così le radici da cui nascono l'intera famiglia di sistemi di abbattimento degli inquinanti e le necessità di implementare tecnologie alternative e miglioramenti motoristici per rendere "più verdi" i motori a ciclo otto e a ciclo diesel. Un percorso sia di informazione che di sviluppo pratico spesso ostacolato dalla mancanza di coerenza dei cicli di omologazione, i quali non essendo conformi alle reali condizioni di guida garantiscono il superamento del test da parte di veicoli che, su strada, emettono una quantità di emissioni di gran lunga superiore a quella certificata. Ci si chiede quindi, come far fronte alle problematiche nascenti da questa discrepanza e parallelamente, come preparare i motori endotermici a soddisfare i limiti di normativa futuri sempre più rigidi che saranno inglobati sotto al nome RDE. Per rispondere esaurientemente a queste esigenze si procede in maniera sincrona introducendo sistemi di abbattimento delle emissioni sempre più sofisticati e prestanti affiancati ovviamente da miglioramenti tecnologici che permettano di ottimizzare la combustione, il sistema di iniezione e il funzionamento stesso del motore ed infine, sviluppando un ciclo di omologazione armonizzato rappresentativo delle reali condizioni di guida, il WLTC.

Tutte soluzioni mirate anche a trovare rimedio ad un pericoloso problema, l'inquinamento da polveri sottili e il peggioramento dell'effetto serra. Mentre si sono sempre poste limitazioni sul particolato, prima sulla quantità espressa in g/km poi sul numero di particelle per km percorso, non è mai stata soggetta a normative la CO₂; ecco che per avere una panoramica completa delle limitazioni sulle emissioni inquinanti, si introduce il progetto "Cars 2020" volto a controllare anche le emissioni del più pericoloso climalterante. Perché si pone l'attenzione su queste specie inquinanti e soprattutto, come porvi rimedio? Il particolato è divenuto oggetto di studio più approfondito da quando si è riscontrata la presenza di particelle più fini di quelle generalmente intrappolate dai filtri antiparticolato allo scarico dei veicoli specie di quelli a benzina; dalle PM10 si passa cioè ad avere particelle di dimensioni molto minori tali da non essere catturate dai sistemi fino ad ora adottati. Si procede quindi alla sperimentazione di tecnologie di filtraggio più sensibili e contemporaneamente ad introdurre limitazioni più severe sul numero di particelle emesse. D'altro canto, per diminuire l'effetto negativo indotto dall'anidride carbonica si insegue una strada volta alla diffusione di combustibili alternativi che apre le porte all'ibrido e all'elettrico.

SITUAZIONE ATTUALE

Evoluzione delle normative, da Euro 0 a Euro 6:

A partire dal 1991 l'Unione Europea ha emanato una serie di direttive finalizzate a ridurre l'inquinamento ambientale prodotto dai veicoli. Sono le cosiddette Euro 1-2-3-4-5 a cui si associa la sigla Euro 0 per i veicoli più inquinanti, immatricolati prima del dicembre 1992.

- **Euro 0:** rientrano in questa categoria tutti i veicoli a benzina senza catalizzatore e quelli "non ecodiesel". Si tratta per lo più di mezzi immatricolati prima del 31/12/1992, data dopo la quale è diventata obbligatoria l'omologazione alla classe Euro 1. Poiché altamente inquinanti, in molte città non possono circolare anche a prescindere dai blocchi del traffico (tranne che per alcune eccezioni come ad esempio le auto d'epoca).
- **Euro 1:** la normativa è in vigore dal 1993 e ha obbligato a montare sui nuovi veicoli la marmitta catalitica e ad usare l'alimentazione ad iniezione nei motori a benzina.
- **Euro 2:** la normativa è in vigore dal 1997 e ha imposto modifiche per la riduzione delle emissioni inquinanti differenziate tra i motori benzina e diesel.
- **Euro 3:** la normativa è in vigore dal 2001 e ha imposto l'adozione di un sistema chiamato EOBD, per tenere sotto controllo il sistema antinquinamento.
- **Euro 4:** la normativa è in vigore dal 2006 e impone limiti ancora più severi. Anche se in qualche caso era già presente sulle diesel Euro 3, il filtro antiparticolato comincia a diffondersi sulle Euro 4.
- **Euro 5:** in vigore da Ottobre 2008, la norma Euro 5 per essere rispettata impone l'adozione generalizzata del filtro antiparticolato sulle auto diesel e riduce anche il livello di emissione delle auto a benzina.



Figura 1: riduzione dei principali inquinanti come HC, NOx, PM attraverso le norme Euro.

Gli inquinanti a cui è stata rivolta maggiore attenzione attraverso la successione delle normative Euro sono gli ossidi di azoto, specie per i diesel ed il particolato, soprattutto quello di dimensioni ultrafini generato dai motori benzina. Lo standard iniziale (Euro 1) garantiva che le auto diesel emettessero non più di 780 mg/km di NOx, mentre per i motori benzina il picco massimo era di 490 mg/km.

Ciò in previsione ad Euro 2 che nel 1997 fece scendere per i motori diesel i limiti di NOx a 730 mg/km; seguito poi da Euro 3 nel 2000 portando con sé l'abbassamento del limite a 500 mg/km. Entro il 2006, entrarono in vigore le limitazioni Euro 4 con riduzione di NOx a 250 mg/km fino a 180 mg/km nel 2009 con Euro 5 (riduzione del 28%).

Attualmente, la quantità massima di NOx emessa dalle automobili diesel è leggermente superiore rispetto ai modelli a benzina. In base alle nuove norme Euro 6, tuttavia, il livello massimo per gli NOx per motori diesel è 80 mg/km (riduzione del 55% rispetto ad Euro 5) contro i 60 mg/km per i veicoli a benzina (riduzione del 25% da Euro 4 a Euro 6).

Da Euro 4 ad Euro 6 non hanno invece subito forti variazioni inquinanti come il monossido di carbonio (CO) e gli idrocarburi incombusti (HC).

Discorso diverso per il particolato il quale subisce una lieve riduzione in termini di PM (quantità espressa in g/km) per i motori benzina, da 5 mg/km a 4.5 mg/km tra Euro 5 ed Euro 6. Per i diesel invece, si ha una riduzione dell'80% tra Euro 4 ed Euro 5 (da 25 a 5 mg/km) fino ad eguagliare il limite dei benzina.

Il passaggio ad Euro 6 renderà più severa la limitazione del particolato poiché si inizierà a valutare il numero di particelle emesse PN.

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

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

* con iniezione diretta

Figura 2,3: variazione dei limiti delle emissioni inquinanti attraverso le norme Euro, rispettivamente dei motori diesel e benzina.

La norma Euro 6 è applicabile a partire dal 1° settembre 2014 per quanto riguarda il rilascio dell'omologazione e dal 1° settembre 2015 per l'immatricolazione e la vendita dei nuovi tipi di veicoli. Lo scopo della legislazione europea è quello di rendere le automobili meno dannose per l'ambiente e la salute; ciò significa livelli più bassi di emissioni sia di autovetture che di furgoni, specie per l'ossido di azoto (NOx), monossido di carbonio (CO), idrocarburi (THC e NMHC) e particolato, che è sostanzialmente la fuliggine. Un effetto a catena di questo provvedimento può essere interpretato come una migliore economia di carburante e quindi minori emissioni di CO₂.

NOx è un inquinante dannoso che viene spesso ritenuto responsabile di danneggiare l'ambiente ed è stato anche dimostrato essere la causa di gravi implicazioni per la salute umana; discorso analogo per il particolato. Infatti le nuove normative Euro 6 prevedono per le auto diesel un calo drastico del livello consentito di NOx emesso fino a un massimo di 80 mg/km, rispetto ai più alti livelli necessari per soddisfare la normativa Euro 5 e precedenti.

Di limitazioni sul numero di particelle PN se ne fa già menzione nel 2011 con Euro 5b, ponendo il limite a 6×10^{11} p/km per i diesel. Si procede in tal direzione anche per i benzina, in maniera forse più graduale:

- Euro 6b: 6×10^{12} p/km già da settembre 2015;
- Euro 6c: 6×10^{11} p/km da settembre 2017.

La normativa Euro 6c sarà introdotta insieme al ciclo di omologazione WLTC (Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle), il quale sarà accompagnato anche da una procedura aggiuntiva su strada imposta dal protocollo RDE (Real Driving Emissions) per passare, molto probabilmente, ad Euro 7 con la presenza della sola normativa WLTP e il relativo ciclo di omologazione universale.

È sorta la necessità di affiancare al PM il PN dal momento in cui si sono state registrate particelle carboniose in uscita dai motori benzina di dimensioni inferiori a quelle normalmente prodotte dai diesel e di conseguenza non soggette alle limitazioni applicate alla quantità di massa per km percorso. Ciò comporterà, molto probabilmente, l'adozione di un filtro antiparticolato più fine anche per i benzina (GDI).

Tale normativa include inoltre incentivi finanziari accordati dagli Stati membri destinati ad incoraggiare il rispetto anticipato dei nuovi valori limite, come verrà illustrato in seguito. Queste misure aggiuntive sono autorizzate se:

- si applicano a tutti i veicoli nuovi in vendita sul mercato di uno Stato membro che siano conformi ai requisiti fissati dal regolamento;
- cessano di essere validi alla data di applicazione dei valori limite;
- ammontano, per ogni tipo di veicolo a motore, ad un importo che non supera il costo supplementare dei dispositivi tecnici montati per soddisfare i limiti di emissione compreso il costo di installazione.

Incentivi volti ad un utilizzo sempre più diffuso di combustibili alternativi per usufruire dei benefici in termini di riduzione degli inquinanti e dei consumi.

Oltre al rispetto dei predetti limiti di emissione, delle agevolazioni per i costruttori che puntano ad

un'economia verde, si deve anche garantire la durata dei dispositivi di controllo dell'inquinamento dei motori a combustione per una distanza di 160000 km, così come la conformità in condizioni d'uso deve essere verificata per 5 anni o 100000 km.

Risulta indispensabile quindi, prevedere sia sistemi di trattamento dei gas di scarico sia innovazioni tecnologiche per migliorare le prestazioni dei motori in termini di combustione ottimizzata e sistema di iniezione efficiente, tali per cui si riescano ad emettere valori inferiori ai limiti imposti

Come i veicoli possono rispettare la normativa Euro 6:

Gli atomi di carbonio legati all'idrogeno bruciano e producono, in un processo di combustione ottimale CO_2 , mentre come accade più spesso, in presenza di un processo di non completa combustione si origina anche CO e idrocarburi incombusti HC. Inoltre, poiché questi combustibili non bruciano semplicemente con ossigeno ma con aria generica, avranno luogo reazioni tra azoto e ossigeno, nasceranno quindi anche i tanto dannosi NO_x . È su questi composti di scarico che la normativa va, principalmente, ad imporre i propri limiti.

Le tecnologie avanzate nei motori a combustione interna, che si pongono al momento come il modo più efficace per ridurre le emissioni di CO_2 sono: la riduzione delle dimensioni, l'iniezione diretta, la sovralimentazione, il controllo delle valvole a fasatura variabile. Nello studio di queste possibili soluzioni necessarie per rispettare i sempre più severi limiti si giunge a dover trovare un compromesso tra, apparati che producono CO, HC e particolato a favore invece di un risparmio di carburante e altri che generano tanta CO_2 quindi consumi molto elevati ma minori emissioni delle altre specie inquinanti.



Figura 4: aumento degli inquinanti o aumento dei consumi?

Nella Figura 5 che segue, sono evidenziati i maggiori inquinanti per i veicoli a benzina (colore verde), per i veicoli a diesel (colore blu) ed infine per le soluzioni a gas. Si può notare come un motore diesel abbia un'altissima concentrazione di particolato, non migliore è la concentrazione degli NO_x mentre può risultare conveniente in termini di CO_2 quindi di consumi. Il motore benzina risulta avere valori minori di tali inquinanti ma si trova in una condizione peggiore per quanto riguarda la CO e il numero di particelle di soot. Questo significa che il problema del benzina sono principalmente i consumi mentre per il diesel sono le emissioni.

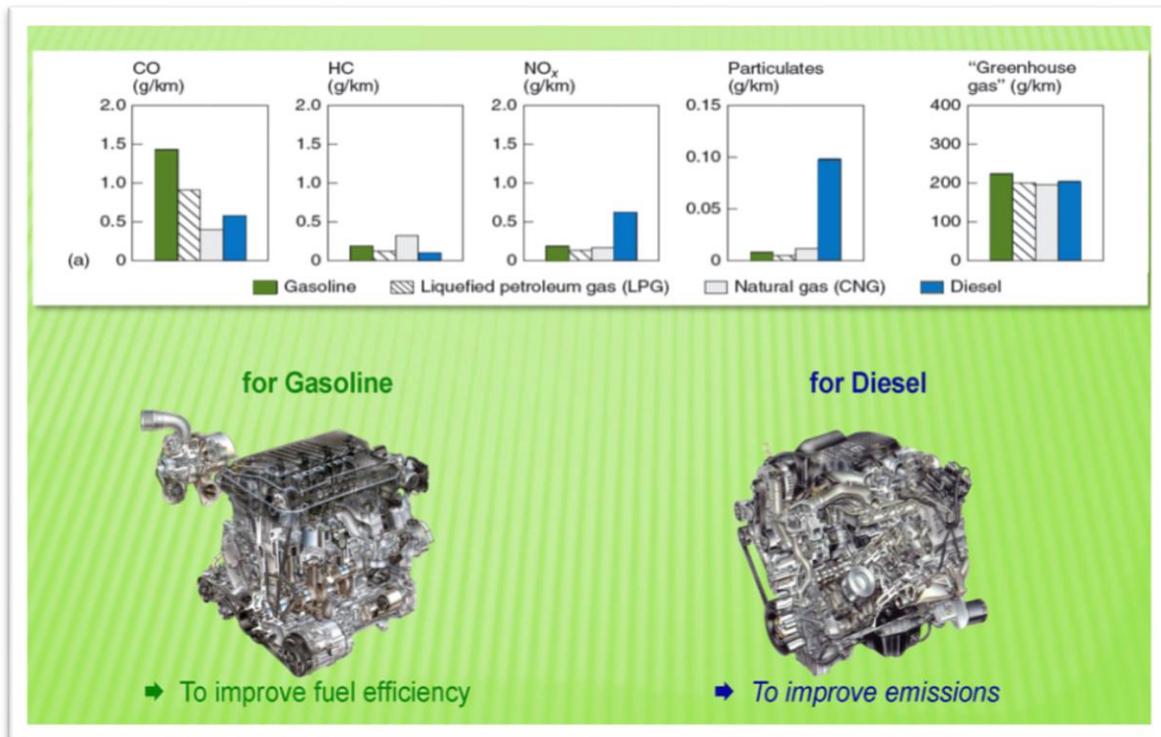


Figura 5: inquinanti maggiormente prodotti rispettivamente, dai motori benzina e da motori diesel.

Ecco perché si seguono strade diverse sull'ottimizzazione di queste due tipologie di motori a combustione interna e si sceglie dunque una motorizzazione piuttosto che l'altra.

Al di là dei tradizionali sistemi di post trattamento dei gas di scarico si può migliorare la situazione con variazioni sul piano progettuale e tecnologico dei motori stessi; accorgimenti efficaci ma ben lontani dall'essere un aiuto sostanziale nell'abbattimento dell'inquinamento.

Si può quindi lavorare su alcune tecnologie come l'iniezione diretta (si controlla meglio la combustione), la fasatura variabile, la sovralimentazione e il downsizing. Nella Figura 6, è rappresentata una panoramica generale di quali siano queste soluzioni motoristiche.

Il grafico in basso a sinistra può così essere interpretato: l'asse delle ascisse rappresenta la temperatura di combustione, su quello delle ordinate c'è il rapporto aria/combustibile. Considerando un motore diesel, quando si inietta combustibile nella zona della curva arancione, si sta generando localmente una miscela ricca quindi si ha un difetto d'aria; successivamente si originano i primi moti vorticosi in camera fino ad originare la combustione. Da questo punto in poi, aumenta la temperatura e si è sbilanciati sulla produzione di particolato. Procedendo, all'aumentare della temperatura, si ha un cambiamento della dosatura della miscela e il processo di combustione si sposta verso la zona critica di formazione degli NO_x.

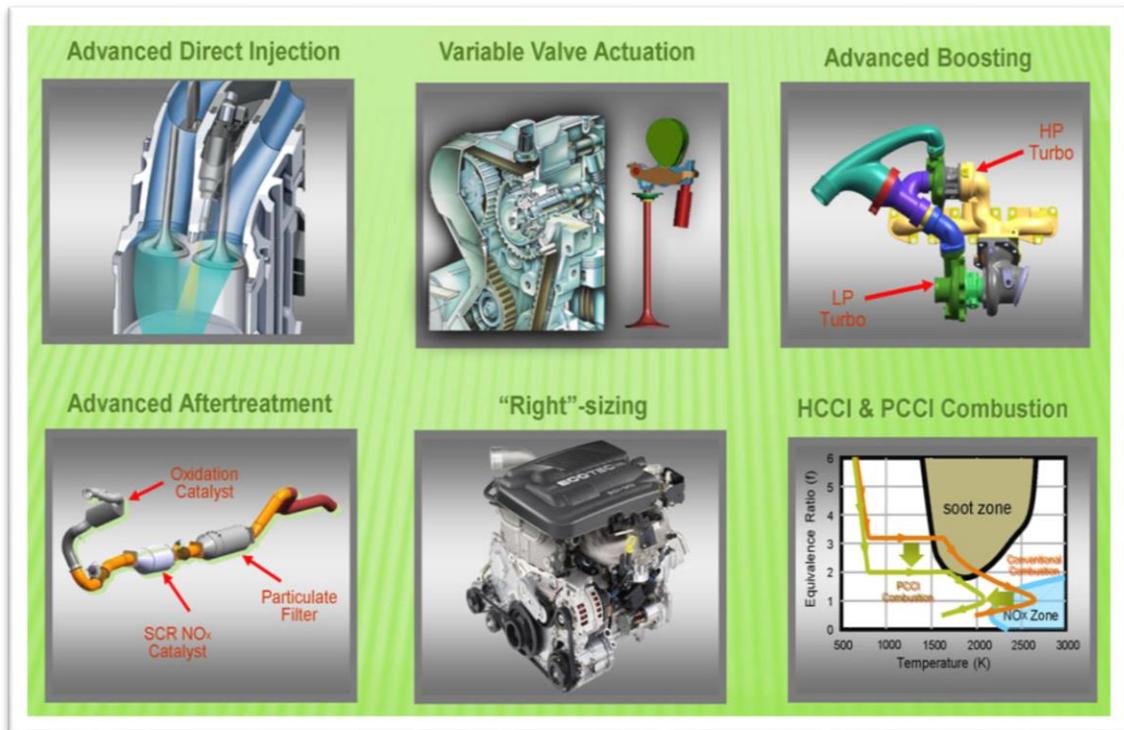


Figura 6: tecnologie motoristiche principali per la riduzione degli inquinanti.

Con il benzina il comportamento è abbastanza simile. L'obiettivo è evidentemente quello di gestire l'iniezione e la combustione per potersi mantenere in una zona intermedia tra le due. Questo concetto viene sintetizzato per i benzina con l'acronimo di **HCCI** (Homogeneous Charge Compression Ignition) e per i diesel con **PCCI** (Premixed Charge Compression Ignition). Questo è forse un buon obiettivo da raggiungere seppur ancora lontano dalle applicazioni pratiche di serie. Ne è un esempio quello di Mercedes con il DiesOtto, in cui l'idea è quella di gestire l'iniettore non come una valvola con due sole possibili condizioni di funzionamento (on/off) ma come un device in cui sia possibile guidare il movimento dello spillo con un'opportuna legge di moto in modo tale da far entrare la quantità giusta in ogni momento. Per fare questo è necessario avere sensori di combustione capaci di rilevare il ciclo di pressione nei pochi millisecondi durante i quali si esplica la combustione stessa e, oltretutto, per tutte le condizioni di funzionamento del motore.

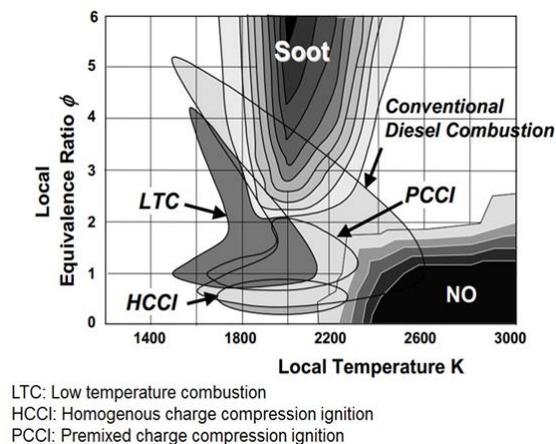


Figura 7: zone di funzionamento ad HCCI e PCCI.

Lo sviluppo di differenti tipologie di combustione per ridurre i problemi di emissioni si basa sull'introduzione di elementi caratteristici in camera come masse inerti di aria o gas di scarico che permettono di variare i parametri di combustione e lavorare con miscele allo stechiometrico (ma con molti inerti) che portano ottimi benefici sulla produzione di NOx e di particolato e lo si può fare in concomitanza con un sistema avanzato di iniezione e con la fasatura delle valvole. Le prove svolte su un motore a quattro cilindri Volvo dotato di sistema a doppia bobina di accensione, utilizzando aria come un diluente, dichiarano un beneficio sui consumi del 6% dovuto principalmente alla miglior efficienza di combustione derivante da concentrazioni di ossigeno superiori; quando si utilizzano i gas di scarico come diluenti, si arriva al 50% in meno di NOx [1]. L'applicazione della combustione diluita impone che una massa superiore entri nella camera inducendo una riduzione delle perdite del gruppo di pompaggio a causa del crollo di pressione oltre la valvola a farfalla, inoltre la massa aggiuntiva funge da dissipatore di calore abbassando la temperatura media nella camera di combustione. Diluendo il processo, la concentrazione di ossigeno nella combustione aumenta, ciò significa che le emissioni di CO e HC diminuiscono a causa del tasso di ossidazione più alto. Una seconda differenza tra i tipi di diluizione riguarda la risposta della produzione di NOx, se si introduce una quantità di aria ad un valore lambda oltre 1.2, l'effetto di raffreddamento diventa dominante sulla maggiore concentrazione di ossigeno e la formazione di NOx diminuisce. Se sono i gas di scarico ad essere usati come un diluente, la concentrazione di ossigeno cala e le temperature più basse diminuiscono ulteriormente i livelli di NOx.

Tuttavia, la gamma di funzionamento è limitata poiché si hanno benefici fino a che si è a carichi parzializzati ed essendo combustioni rapide e a basse temperature si ha comunque la produzione di inquinanti. Altro inconveniente comune è la scarsa capacità di assecondare i sistemi di trattamento, i moderni catalizzatori a tre vie (TWC) infatti non possono convertire NOx sotto condizioni di miscela magra.

Quella fin qui analizzata è un tipo di evoluzione possibile, affiancata da un'altra strategia: il down-sizing (spesso associato al down-speeding).

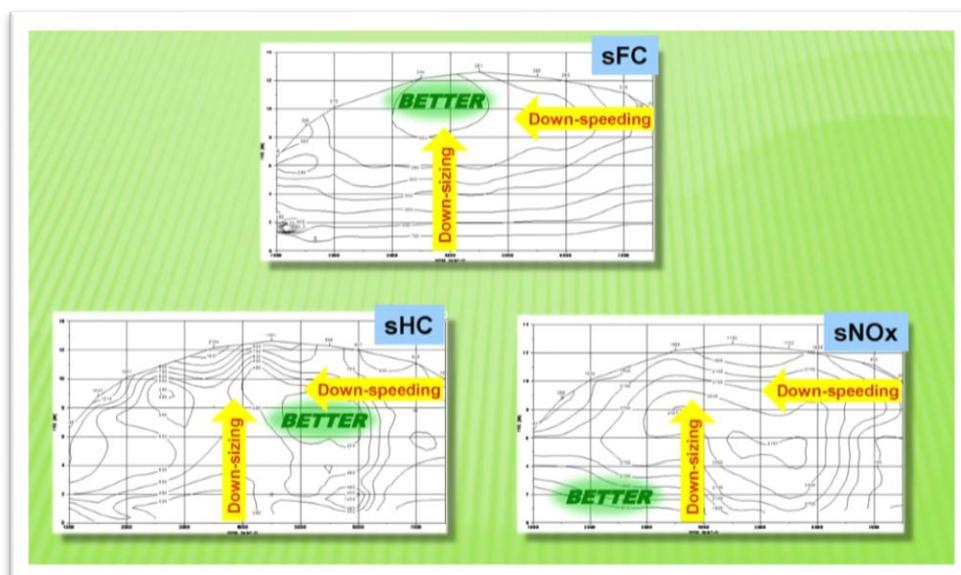


Figura 8: piani quotati per l'analisi del DOWN-SIZING.

I piani quotati nel caso dei motori a combustione interna sono costruiti riportando sull'asse orizzontale il numero di giri del motore, mentre sull'asse delle ordinate la coppia. La curva più alta è la curva di coppia, invece agli estremi laterali si ha il regime al minimo e al massimo numero di giri. Su questo piano vengono tracciate le linee di isolivello di un determinato parametro; nel diagramma in alto ad esempio, si hanno le linee di isolivello del consumo specifico, in basso a sinistra quelle degli idrocarburi incombusti e in basso a destra quella degli NOx. Il "better" è il punto migliore di funzionamento. Nel diagramma in alto con "better" è indicata la zona in cui si trovano i consumi più bassi, in quello in basso a destra invece indica la zona corrispondente a minori emissioni di NOx e a sinistra la zona con pochi HC. Se si considera una vettura che funziona a carico parziale, ci si trova a giri medio bassi, con bassa coppia e quindi in una zona ad alto consumo (grafico in alto). Se invece si preme maggiormente l'acceleratore, per quel tipo di motore che è stato qui quotato, ci si muove verso la zona del "better". Da qui il concetto di dimensionare bene il motore per il lavoro che deve svolgere.

Passando ai diagrammi in basso, la zona che corrisponde ad un più basso consumo non coincide con quella di minimizzazione degli HC e degli NOx; risulta quindi necessario introdurre i sistemi di post trattamento dei gas di scarico per ridurre gli inquinanti senza avere grosse variazioni in termini di consumo di combustibile.

Nella Figura 9 sono rappresentati i più comuni sistemi di post trattamento allo scarico dei motori benzina e diesel. Nel primo esempio, quando i gas passano attraverso il catalizzatore a tre vie (TWC) sono diminuiti nel migliore dei casi, di due ordini di grandezza; un ordine di grandezza invece per gli NOx. Se poi a causa delle limitazioni imposte dalla normativa Euro 6 il valore degli ossidi di azoto è ancora troppo elevato, si aggiunge il DeNOx che permette di scendere all'1%. Nel caso del diesel, con il primo catalizzatore si abbattano solo gli HC senza riuscire a fare nulla per gli NOx e il particolato. Per questi ultimi si utilizza un DeNOx ed un filtro antiparticolato rispettivamente, ottenendo alla fine un sistema ancora più complesso.

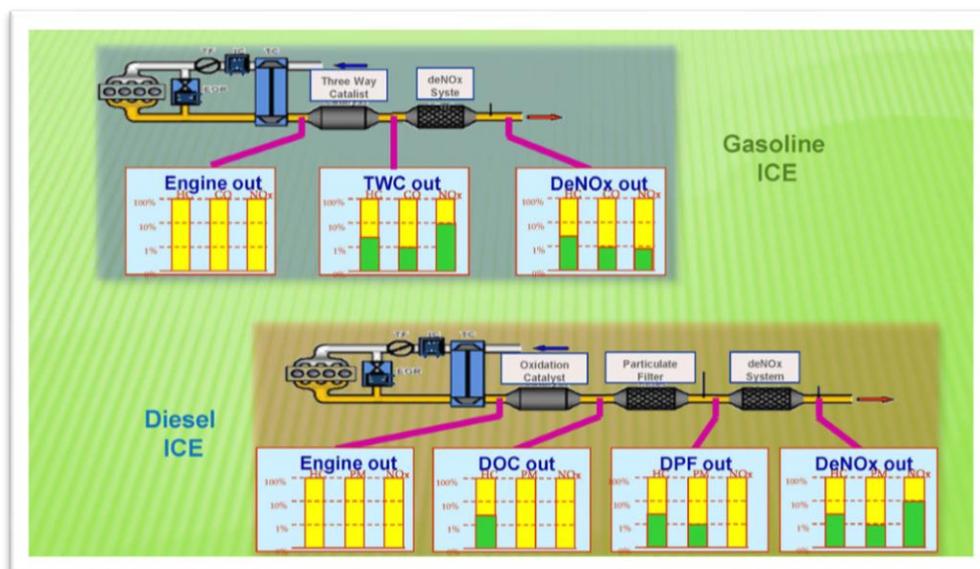


Figura 9: sistemi di abbattimento degli inquinanti per motori benzina (sopra) e per motori diesel (sotto). I diagrammi sono in scala logaritmica di base 10.

Purtroppo il motore a combustione interna sia esso a gasolio o a benzina ha dei limiti che non potranno probabilmente, mai essere superati. È una macchina termica che malgrado le recenti evoluzioni funziona con rendimenti ancora molto bassi. Quando poi ci si trova di fronte a sistemi di post trattamento che, in termini economici valgono quanto il motore stesso, è piuttosto evidente che è stato raggiunto un limite di perfezionamento che va oltre le potenzialità di questo tipo di motore. Le sempre più rigide normative costringeranno per ora, ad adottare diverse tecnologie di riduzione degli inquinanti ma in futuro indurranno a prendere in seria considerazione la scelta di forme alternative di trazione.

Motori diesel:

La maggior parte degli inquinanti prodotti dai motori ad accensione per compressione provengono da processi non ideali di combustione, reazioni tra i componenti della miscela ad alta temperatura e pressione, combustione del lubrificante del motore, nonché la combustione di componenti non idrocarburici del carburante (composti di zolfo e additivi). Inquinanti comuni includono idrocarburi incombusti (HC), monossido di carbonio (CO), ossidi di azoto (NO_x) o particolato (PM).

Le quantità di NO_x, CO e HC prodotte dipendono dalla composizione del combustibile, dal tipo di motore, dallo stato del veicolo e da condizioni operative come il rapporto air/fuel (A/F). I motori diesel, lavorando in eccesso di ossigeno, presentano emissioni minori di CO e HC ma superiori di NO_x, particolato e SO_x. Non esiste comunque un valore di A/F per il quale le emissioni di NO_x, CO e HC siano contemporaneamente ai valori minimi e le prestazioni non ne risentano, tant'è vero che la massima potenza ottenibile corrisponde alle condizioni di elevata formazione di NO_x. La tecnologia destinata all'abbattimento degli inquinanti ha sempre dovuto equilibrare potenza – consumo – abbattimento.

Il gasolio è una miscela di idrocarburi che, nel corso di un ideale processo di combustione, darebbe origine solo ad anidride carbonica (CO₂) e vapore acqueo (H₂O). In effetti, i gas di scarico dei motori diesel sono composti principalmente da CO₂, H₂O e la porzione non utilizzata di aria di sovralimentazione.

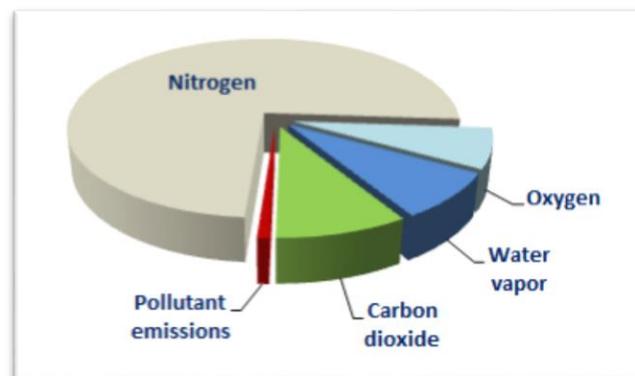


Figura 10: elementi costituenti l'output di una combustione diesel.

La formazione degli inquinanti durante il processo di combustione è fortemente influenzata dalla disomogeneità della carica, dovuta alla distribuzione del combustibile in seno all'aria continuamente variabile nel tempo [2].

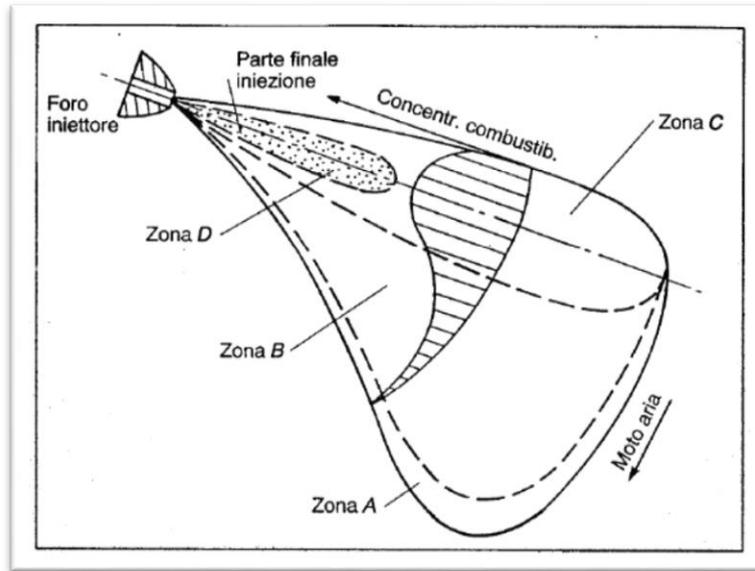


Figura 11: rappresentazione schematica della modalità di formazione degli inquinanti durante la combustione di un getto di combustibile.

Dalla Figura 11:

Zona A: prodotti di una parziale ossidazione (idrocarburi incombusti);

Zona B: prodotti di una completa combustione;

Zona C: prodotti di completa ossidazione e NO_x a carico parziale; prodotti di ossidazione incompleta e particolato a pieno carico;

Zona D: prodotti di ossidazione incompleta e particolato.

Gli **HC** possono avere ragioni diverse per la loro formazione:

- possono generarsi nella parte periferica della miscela dove la concentrazione di combustibile è troppo bassa per portare all'autoaccensione e propagazione del fronte di fiamma. Si possono verificare fenomeni di cracking e parziale ossidazione del combustibile;
- alcuni HC si possono generare nella parte centrale del getto dove la carenza locale di ossigeno non permette la totale ossidazione nelle fasi di pieno carico. Soprattutto per i motori di piccolo alesaggio, una parte considerevole della miscela raggiunge le pareti della camera e del pistone prima della completa ossidazione;
- la parte di combustibile rimasta nel "pozzetto" (volume compreso fra la sede dell'ago ed i fori di iniezione) dell'iniettore può essere aspirata in camera di combustione dopo che l'iniettore è stato chiuso e scaricata ancora incombusta.

Gli **NO_x** derivano dalla dissociazione di N₂ e O₂:

- i combustibili non contengono azoto ma è il 76% di N₂ che compone il comburente unito al 21% di O₂, i quali alle alte temperature si dissociano e formano ossidi di azoto;

- la cinetica chimica è legata in modo esponenziale alla temperatura e in modo lineare alle concentrazioni delle specie ($[N_2]$ e $[O_2]$) che al calare della temperatura dovrebbero giungere all'equilibrio. Ciò non è però valido per elevati gradienti locali di temperatura e brevi intervalli temporali di variazione. Di conseguenza, durante la fase di espansione in un motore diesel, le reazioni di distruzione dell'NO sono congelate dalla rapida diminuzione della temperatura e tale sostanza rimane come costituente dei gas combusti.

Le variabili motoristiche che maggiormente influenzano la concentrazione di questa specie inquinante sono:

- rapporto aria/combustibile della miscela di alimentazione, per cui gli NOx presentano un massimo per miscele leggermente spinte sul magro;
- anticipo di accensione rispetto al PMS, poiché ritardando l'accensione una minor quantità di combustibile brucia prima del PMS abbassando così, pressione e temperatura;
- ricircolo di parte dei gas combusti in aspirazione, i quali diluiscono la miscela comportandosi da inerti con il risultato di ottenere una diminuzione della temperatura;
- carico e regime di rotazione;
- rapporto di compressione e livello di sovralimentazione.

Le parti di miscela più sensibili alla formazione di NOx sono:

- le prime porzioni di miscela che, essendo debolmente magre e avendo a disposizione una buona percentuale di ossigeno, subiscono il surriscaldamento generato dalla combustione della parte centrale del getto;
 - il nucleo centrale dello spray dove si raggiungono temperature più elevate e si ha un eccesso di ossigeno, solo a carichi parziali.

Il **particolato**, insieme di particelle solide e liquide portate in sospensione dai gas di scarico la cui formazione è favorita da:

- zone a miscela ricca e a temperature relativamente basse. Tale condizione, risulta essere funzione del tempo di ritardo, della portata iniettata, della durata dell'iniezione e del tipo di combustibile;
- da un basso miscelamento fra combustibile e ossigeno. I fattori che possono ostacolare un corretto miscelamento e quindi incentivare la formazione di particolato sono il numero di fori dell'iniettore, bassa pressione di iniezione e bassa intensità del moto di swirl così come l'impatto del combustibile sulle pareti fredde del cilindro.

È generalmente diviso in tre frazioni:

- SOLIDA - costituita da particelle di carbonio secco, comunemente note come fuliggine;
- SOF - idrocarburi pesanti assorbiti e condensati sulle particelle di carbonio, chiamata frazione organica solubile;
- SO4 - frazione di solfato, acido solforico idratato.

L'anidride solforosa **SO₂**, è generata dallo zolfo presente nel carburante che ne influenza la concentrazione allo scarico. Vengono perciò, introdotti carburanti con tenore di zolfo inferiore allo 0.05% per la maggior parte delle applicazioni nei motori diesel. L'ossidazione di anidride solforosa produce anidride solforica che è il precursore dell'acido solforico che, a sua volta, è responsabile delle emissioni di particolato solfato. Ossidi di zolfo hanno un profondo impatto sull'ambiente essendo la principale causa di piogge acide.

Idrocarburi policiclici aromatici **IPA**, sono idrocarburi contenenti due o più anelli di benzene. Molti composti di questa classe sono noti agenti cancerogeni. Tali sostanze nei gas di scarico sono divise tra il gas e la fase particellare. I composti più nocivi di quattro e cinque anelli sono presenti nella frazione organica di DPM (SOF).

Ci sono altre fonti che possono contribuire alla generazione delle emissioni inquinanti di motori a combustione interna di solito in piccole concentrazioni, ma in alcuni casi contenenti materiale di elevata tossicità. Queste emissioni aggiuntive possono includere metalli e altri composti di usura del motore o composti emessi da catalizzatori di controllo delle emissioni (per volatilizzazione di composti solidi ad elevate temperature allo scarico). La formazione di nuove specie normalmente non presenti allo scarico può anche essere facilitata dall'utilizzo di catalizzatori. Questo richiama il caso in cui i catalizzatori vengono introdotti nella camera di combustione; ad esempio, alcuni additivi utilizzati per supportare la rigenerazione dei filtri antiparticolato diesel sono stati collegati ad emissioni di diossine e furani altamente tossici. La possibilità di avere nuove emissioni deve essere considerata quando vengono introdotti additivi nel combustibile o oli lubrificanti oppure quando fluidi vengono introdotti nei gas di scarico. Un esempio ben noto è l'urea utilizzata come riducente di NO_x nel catalizzatore SCR, le emissioni di tali dispositivi possono infatti includere ammoniaca così come una serie di prodotti nati dalla decomposizione incompleta dell'urea. Carburanti di bassa qualità possono essere ancora un'altra fonte di emissioni.

L'evoluzione tecnologica ha fatto sì che in realtà i diesel possano ancora evolvere in termini di miglioramento del sistema di iniezione e di efficienza dei sistemi di after-treatment, infatti si possono diminuire i livelli di emissioni ottimizzando la combustione mediante iniettori in grado di polverizzare finemente il combustibile (l'iniezione diretta in tal senso, ha portato grandi benefici), controllando la composizione della miscela aria/benzina e aumentando la turbolenza all'interno dei cilindri. Inoltre l'introduzione della tecnologia EGR (Exhaust Gas Recirculation), che consiste nel riciclare i gas di scarico re-iniettandoli nella camera di combustione, aiuta a contenere le temperature interne e gli eccessi d'ossigeno, principali fattori della formazione degli ossidi d'azoto (NO_x), decrementando ulteriormente la formazione di inquinanti. Queste soluzioni non sono però sufficienti per rispettare la normativa Euro 6.

Per rientrare nel più recente limite di emissioni è necessario ricorrere a dispositivi di trattamento post combustione, vale a dire dei gas di scarico. Catalizzatori e filtri antiparticolato sono così diventati una costante da due decenni. I primi sono essenzialmente dei blocchi di ceramica solcati internamente da canali entro i quali circolano i gas combusti; canali rivestiti con materiali che rendono possibili le reazioni chimiche capaci di trasformare gli inquinanti in sostanze meno nocive. Una soluzione che, nella maggioranza dei casi, consente ai motori benzina di rientrare nei limiti dell'Euro 6. Non così invece per i diesel che devono ricorrere al filtro antiparticolato onde abbattere le polveri fini. Si tratta, nel caso specifico, di un vero e proprio filtro che trattiene la fuliggine e che

per questo va periodicamente rigenerato "bruciando" a oltre 600°C i residui. Un'operazione che le vetture moderne eseguono autonomamente. Si ricorre quindi, all'interazione tra catalizzatore ossidante, filtro antiparticolato e additivo AdBlue per abbattere le emissioni di ossidi di azoto e permettere di rientrare nella normativa Euro 6. Il catalizzatore ossidante, collocato 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 (NOx). Per l'abbattimento di questi ultimi, si ricorre a ben specifiche tecnologie.

Soluzioni per la riduzione degli NOx:

La norma antinquinamento Euro 6 stabilisce il limite legale per le emissioni di NOx provenienti da autovetture diesel a 80 mg/km (misurato su ciclo NEDC). Il passaggio da Euro 5 a Euro 6 ha spinto cambiamenti tecnologici nel controllo delle emissioni di NOx per soddisfare il più basso limite, per lo più sotto forma di sistemi di post trattamento di gas di scarico. Questo effetto sarà probabilmente amplificato dopo Euro 6, dovendo adottare le future normative RDE con i relativi test di omologazione svolti con sistemi portatili di misura delle emissioni (PEMS). Infatti il controllo degli ossidi di azoto è diventato una delle maggiori sfide tecniche che affrontano i produttori di automobili. Tre tecnologie principali, di cui le penultime, eseguite in post trattamento sono disponibili per questo scopo: modifiche interne al motore accoppiate con il ricircolo dei gas di scarico (EGR), trappole di NOx dette LNT (Lean NOx Trap) e riduzione catalitica selettiva SCR (Selective Catalytic Reduction).

La trappola di ossidi di azoto LNT sostituisce il catalizzatore dentro al filtro antiparticolato: intrappola gli ossidi di azoto che devono essere liberati successivamente dopo aver subito una trasformazione chimica. Il difetto di questo sistema nasce dalla necessità di rigenerare il filtro attraverso l'iniezione di una ridotta quantità di gasolio, avendo un consumo superiore pari a circa il 5% in più. Questo tipo di filtro va scelto quando si introducono altri sistemi che ottimizzano la combustione perché ci si aspetta comunque che una macchina Euro 6 più pulita, consumi anche di meno. Quando il compromesso fra consumo e beneficio in emissioni diventa troppo sfavorevole per il consumo, oppure il filtro non è più efficace perché sono troppi gli ossidi di azoto che deve processare, allora si cambia dispositivo. Qui entra in scena la seconda famiglia di dispositivi di after-treatment, l'SCR: attacca gli ossidi di azoto facendoli reagire con una specifica soluzione. Questo dispositivo ha però bisogno di un serbatoio dedicato a tale liquido che va riempito di una decina di litri ogni 7-8-9.000 km [3].

Le principali modalità di abbattimento e riduzione di queste specie inquinanti sono:

- LNT (Lean NOx Trap);
- SCR (Selective Catalytic Reduction),
- EGR.

La tabella 1 mette in luce le caratteristiche principali dei sistemi appena elencati:

Sistema	Vantaggi	Svantaggi
EGR	<ul style="list-style-type: none"> • Non è richiesta l'aggiunta di un fluido riducente. • Non è necessario un hardware in più a bordo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Più efficace a bassi regimi di carico. • Emissioni di NOx maggiori durante la guida ad alte prestazioni perché il massimo tasso di EGR applicabile diminuisce con il carico del motore. • Compromesso tra abbattimento degli NOx, l'economia dei consumi ed emissioni di particolato.
LNT (Lean NOx Trap)	<ul style="list-style-type: none"> • Elevata efficienza di conversione quando è nuovo e a bassi carichi, pari al 70-90%. • Non necessita di ulteriore fluido a bordo e dunque di infrastrutture che lo forniscano. 	<ul style="list-style-type: none"> • Bassa durabilità a causa dell'inquinamento da zolfo, dovendo spesso eseguire cicli di desolfatazione ad intervalli di 20-50 ore. • Aumento lieve del consumo di combustibile per la rigenerazione che avviene con periodicità di 1 minuto. • Necessita di elevata tecnologia per il controllo. • Costi elevati per la presenza di metallo nobile (Rh).
SCR (Selective Catalytic Reduction)	<ul style="list-style-type: none"> • Elevata efficienza di conversione (NH₃/NOx), fino anche al 95%. • Alta durabilità. • Assenza di incrementi di consumo del combustibile. • Insensibilità allo zolfo. • Emissioni inferiori di CO₂. 	<ul style="list-style-type: none"> • Veicolo dotato di extra fluido a bordo (AdBlue). • Infrastruttura di Urea di difficile implementazione. • Possibili slip di NH₃.
DeNOx ad HC	<ul style="list-style-type: none"> • Non necessita di ulteriore fluido a bordo e dunque di infrastrutture che lo forniscano. 	<ul style="list-style-type: none"> • Bassa resistenza allo zolfo. • Bassa resistenza alle alte temperature.

Tabella 1.

1. La tecnologia EGR:

L'EGR (Exhaust Gas Recirculation) è una tecnologia utilizzata per ridurre le emissioni inquinanti; consiste nel riciclare i gas di scarico (una quantità pari al 5-15 %) re-iniettandoli nella camera di combustione, facendoli passare dal collettore di scarico al collettore di aspirazione, così da contenere temperature interne ed eccessi d'ossigeno, i principali fattori della formazione degli ossidi di azoto (NOx).

Per ottenere questo ricircolo, si utilizza un'apposita elettrovalvola o idrovalvola l'Exhaust Gas Recirculation (EGR) che viene comandata dalla centralina del motore tramite un segnale Pulse Width Modulation (PWM – modulazione di larghezza di impulso) consentendo la regolazione della quantità di gas di scarico dai relativi collettori.

Nel caso del sistema EGR tradizionale, detto anche "ad alta pressione", i gas vengono recuperati all'uscita dai cilindri e riemessi direttamente all'aspirazione miscelandoli con l'aria in entrata. In tal modo viene limitata la formazione degli ossidi d'azoto durante la combustione, ma l'incremento delle temperature in fase d'aspirazione e la limitazione della pressione di sovralimentazione influiscono negativamente sul rendimento del motore.

L'EGR "a bassa pressione" si basa invece sul recupero dei gas di scarico più a valle, ovvero dopo il passaggio nella turbina e nel filtro antiparticolato. I flussi vengono quindi raffreddati all'interno di uno scambiatore di calore e nuovamente veicolati nel turbo, miscelandoli con l'aria aspirata così da ottenere un aumento della pressione di sovralimentazione. Quindi subiscono un ulteriore processo di refrigerazione nell'intercooler e contribuiscono una seconda volta alla combustione. Questo circuito, detto anche "a freddo", consente di aumentare il tasso di ricircolo tenendo sotto controllo temperatura e aspirazione. Gli ossidi d'azoto vengono contrastati più efficacemente che affidandosi all'EGR tradizionale e si ottiene, contestualmente, un superiore rendimento del motore dovuto alla combustione più efficiente. Dando vita ad un sistema che gioca a vantaggio anche della lotta alla CO₂. L'EGR a bassa pressione implica un'architettura del motore che minimizzi la distanza tra il gruppo catalizzatore-filtro antiparticolato e il circuito d'aspirazione. Si parla per questo di sistema di post trattamento "sotto turbo". La prossimità consente di portare catalizzatori e filtro antiparticolato a temperature più elevate rispetto alla norma, favorendone l'efficacia.

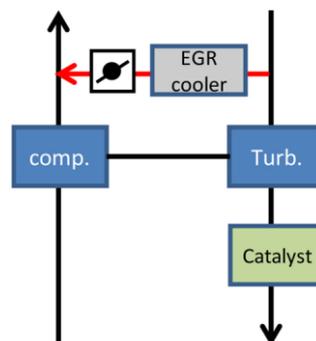


Figura 12: schema semplificato dell'EGR a bassa pressione o Low Pressure.

Nel caso dei motori a benzina, il sistema LP-EGR inoltre riduce il rischio di detonazione, in quanto un decremento degli NOx estingue in buona parte una delle cause scatenanti il

fenomeno.

I dati in output da un test condotto su un motore a benzina monocilindrico indicano che con una concentrazione di NOx intorno allo zero nel condotto di aspirazione diminuisce il margine di detonazione di 3 gradi, come evidenziato in Figura 13; effetto importante per migliorare il risparmio di carburante [4].

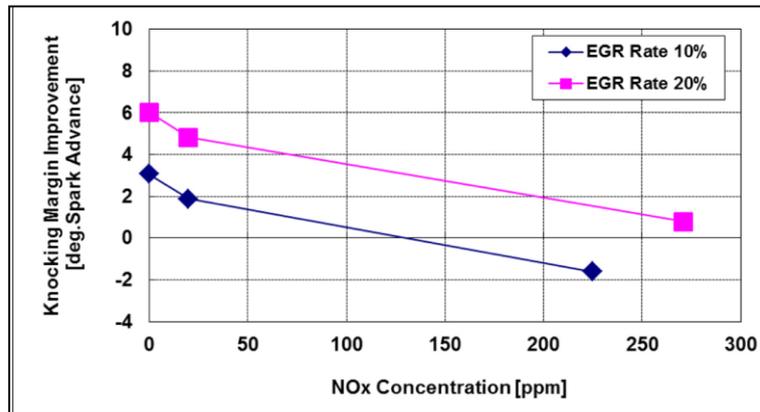


Figura 13: effetto delle concentrazioni di NOx in funzione del margine di detonazione al variare del tasso di EGR.

In seguito all'introduzione di EGR "a freddo", i benefici risultano estesi a molti più punti di funzionamento del motore a basse velocità e a carichi elevati rispetto alle tecnologie EGR convenzionali; infatti è qui che la temperatura dei gas di scarico viene ridotta notevolmente. Come risultato, la regione di combustione stechiometrica può essere ampliata e il miglioramento dei consumi di carburante può realmente essere previsto. Per il funzionamento a regime se l'apertura della valvola EGR è fissa, il tasso di EGR è determinato indipendentemente dal flusso dell'aria di aspirazione che varia a seconda dell'angolo di apertura della valvola a farfalla; quindi la porzione di gas riciccolanti può essere controllata solo mediante l'apertura della valvola EGR.

Per una forte riduzione della portata di aria aspirata, si osserva che il tasso di EGR aumenta momentaneamente. L'incremento è causato da un disallineamento tra la variazione della portata dell'aria di aspirazione e l'adattarsi a tale cambiamento del valore di pressione dei gas di scarico. Quando la valvola a farfalla è chiusa rapidamente durante la decelerazione, la portata d'aria diminuisce istantaneamente mentre la caduta di pressione quindi di riduzione della portata di gas riciccolanti è ritardata. L'apertura della valvola EGR è impostata per ottenere la quantità mirata in funzionamento a regime e il ritardo di risposta viene compensato solo in transitorio.

Si affianca a ciò la modesta lunghezza del percorso fatto dagli EGR, ulteriore fattore che può inquinare la stabilità di funzionamento.

Sebbene si riscontrino difficoltà nel controllo della valvola EGR per ottenere porzioni stabili di gas riciccolante in transitorio, il sistema LP-EGR è stato giudicato possedere il massimo effetto sul risparmio di combustibile nei GDI quando è attivo il turbocompressore.

I gas di scarico, da cui sono stati rimossi gli NOx dal catalizzatore posto a valle della turbina, vengono introdotti nel dispositivo di raffreddamento EGR (cooler) e appunto raffreddati dal liquido di refrigerazione del motore. A questo punto la massa fluida converge alla valvola EGR e viene indirizzata nel condotto di aspirazione a monte del compressore. Il

gas EGR si mescola con l'aria fresca e viene sovralimentato dal compressore, raffreddato nel intercooler (CAC) ed introdotto nel cilindro.

La Figura 14 mostra il miglioramento dell'economia di combustibile ottenuto, in funzione del tasso EGR in condizioni operative con turbocompressore attivo. I risultati mostrano che il risparmio generato è di circa il 5% quando viene applicato un tasso EGR del 20% [4].

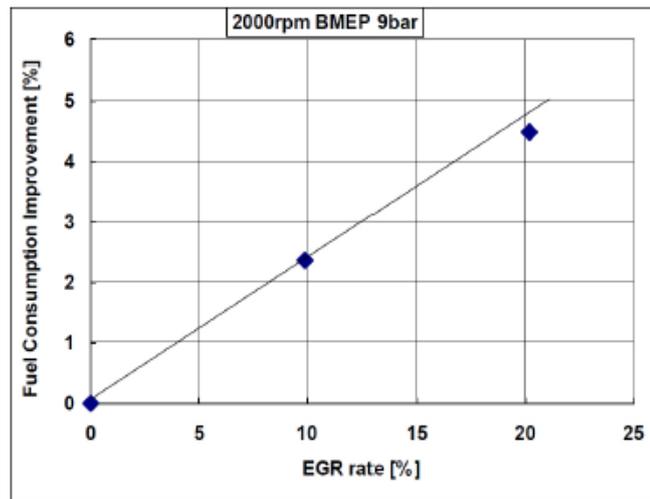


Figura 14: riduzione dei consumi in funzione del tasso di EGR in un motore a benzina.

Il sistema LP-EGR ha il miglior potenziale per decrementare i consumi e la quantità di NOx, grazie alla facilità di introduzione degli EGR e della modalità di estrazione a valle del catalizzatore TWC.

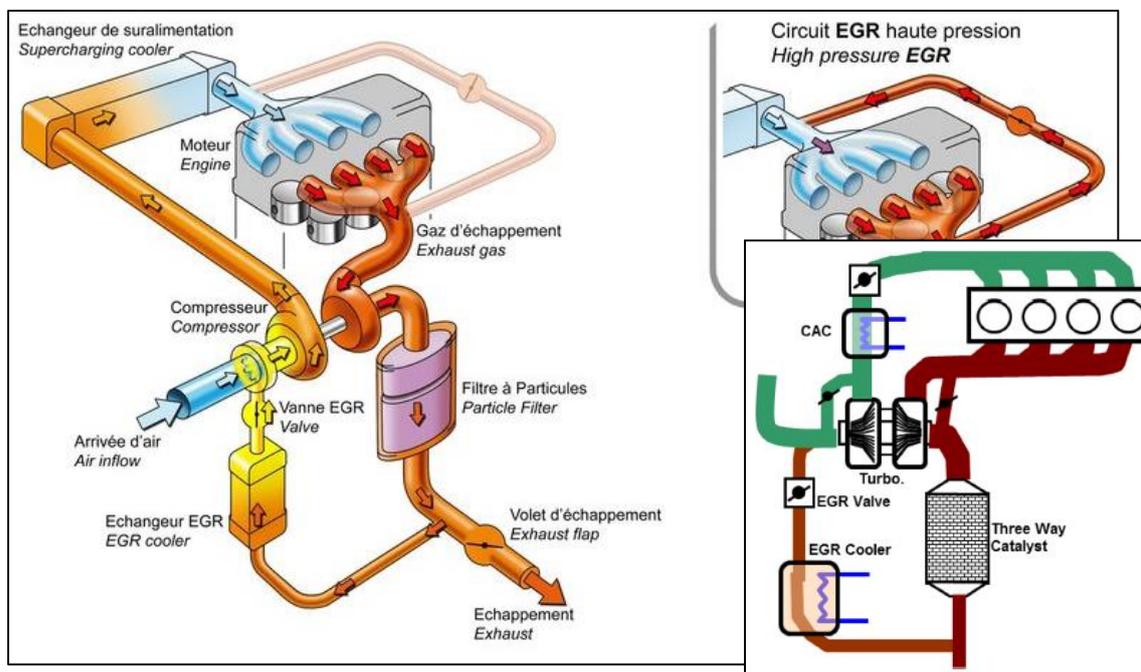


Figura 15: Low Pressure EGR.

2. La tecnologia NSR (NOx Storage and Reduction):

Si aggiunge alle soluzioni di abbattimento degli inquinanti una trappola per gli ossidi di azoto, **LNT (Lean NOx Trap)**. Questo sistema funziona "stoccando" gli ossidi di azoto, immagazzinandoli per circa 100 km quando la miscela è magra, per "rilasciarli" quando è stechiometrica o grassa. Questa tecnologia si basa sull'utilizzo di convertitori ovvero catalizzatori detti appunto LNT che sfruttano le proprietà di accumulo e di ossido-riduzione rispettivamente in ambiente LEAN ($\lambda > 1$) e in ambiente RICH ($\lambda < 1$) che, essendo caratterizzato da rapporto minore di quello stechiometrico 14.6:1, crea le condizioni per trasformare i nitrati in azoto e vapore d'acqua ripulendo il catalizzatore.

A differenza di un TWC (Three Way Catalyst) LNT opera in maniera discontinua; esso è costituito da una struttura monolitica rivestita di materiali come metalli alcalini o alcalini/terrosi (Ba, K, Na, Mg, Ca) che servono sia per la fase di accumulo degli NOx, sia per l'azione catalizzante di ossidazione e riduzione (metalli nobili rispettivamente Pt e Rh). In ambiente LEAN la NOx trap rimuove gli ossidi di azoto (NO ed NO₂) dai gas di scarico e li accumula sotto forma di Nitriti e Nitrati (Ba(NO₃)₂) durante la fase RICH. Sarebbe auspicabile prima della fase sopra citata, far avvenire l'ossidazione di NO in NO₂ sui siti di Platino che funge dunque da catalizzatore ossidante, essendo l'NO₂ più facilmente accumulabile nella trappola rispetto agli NO. Poiché la capacità di accumulo delle NOx Trap risulta essere limitata, sono necessarie rigenerazioni periodiche per evitare fenomeni di saturazione con conseguente perdita di efficacia del sistema di abbattimento. Tali rigenerazioni avvengono tramite un calo repentino del titolo della miscela con relativo aumento del tempo di iniezione, questo surplus di combustibile funge da riducente allo scarico per "la pulizia del filtro". Può avvenire generalmente attraverso due modalità:

- nel collettore di scarico con l'adozione di un iniettore aggiuntivo a monte del catalizzatore di NOx. Poiché la rigenerazione richiede assenza di ossigeno, quest'ultimo deve essere bruciato nella trappola stessa oppure in un catalizzatore ossidante a monte della trappola. Gli svantaggi possono nascere dall'esotermicità dell'ossidazione a danni della medesima trappola e dal lieve aumento del consumo di combustibile;
- direttamente nel cilindro iniettando un'ulteriore quantità di combustibile al suo interno. Per raggiungere la condizione di $\lambda < 1$, si può diminuire la massa d'aria aumentando la quantità di EGR in camera, diminuendo la pressione di sovralimentazione o strozzando l'aria all'aspirazione. Tale strategia è soprattutto utilizzata nel sistema Common Rail Multijet. Gli svantaggi si riscontrano in termini di aumento dei consumi e di fumo allo scarico.

Gli ulteriori idrocarburi iniettati hanno il compito di eliminare l'ossigeno in eccesso e di ridurre i nitrati (NO₃⁻) in N₂. Si riporta di seguito uno schema grafico, Figura 16, che facilita la comprensione del funzionamento della NOx Trap nelle fasi di accumulo e rigenerazione:

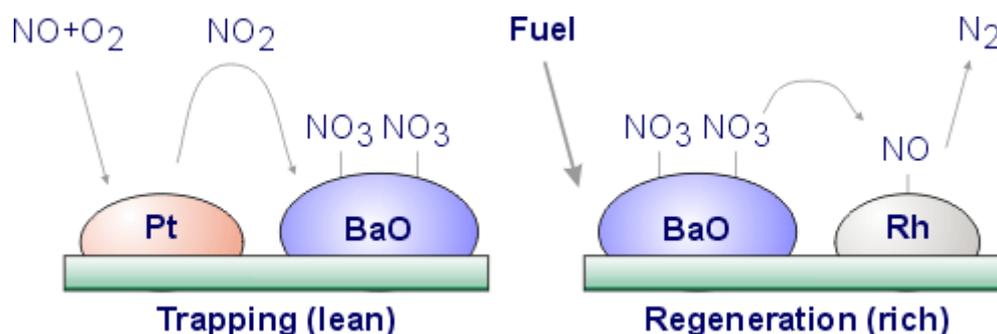


Figura 16: fase di accumulo e rigenerazione.

Questo perché, la riduzione in N_2 e la rigenerazione della NO_x Trap richiedono un ambiente riducente e quindi un livello pressoché nullo di O_2 .

Le NO_x Trap sono funzionanti in un range di temperature abbastanza esteso che va dai 200°C ai $450\text{-}500^\circ\text{C}$. Il limite inferiore di temperatura dipende dalla bassa cinetica di ossidazione di NO in NO_2 alle basse temperature mentre quello superiore è determinato dall'instabilità dei nitrati i quali, persino in condizioni di miscela magra, si possono decomporre alle elevate temperature.

Durante la periodica rigenerazione (che può avvenire anche ogni minuto circa), la conversione degli NO_x è migliorata grazie ad una più alta durata di rich-spike e valori bassi di lambda, il tutto però a scapito delle emissioni di HC e CO.

Questo sistema è particolarmente preferito, in termini di efficienza, per veicoli leggeri con cilindrata inferiori a 2 litri.

In genere le NO_x Traps hanno un volume rilevante rispetto ai convenzionali TWC perché contengono elevate quantità di metallo nobile che viene perso gradualmente durante l'invecchiamento alle alte temperature. Per ovviare a questo inconveniente si sta sviluppando una nuova tecnologia che con l'introduzione di uno scambiatore di calore permetterebbe di ridurre le quantità di metallo nobile necessarie in una NO_x Trap. Tale scambiatore può essere usato per limitare la massima temperatura raggiunta dall'LNT durante l'invecchiamento. Danneggiabili facilmente a causa dello zolfo accumulato, possono anche portare alla formazione di acido solfidrico che dovrà essere smaltito con un apposito catalizzatore posizionato a valle del De NO_x .

Per i motori benzina "lean burn" si possono usare: catalizzatori con ossidi di bario o potassio, rivestiti di platino palladio e rodio; nel campo dei Diesel i De NO_x sono di platino e zeolite.

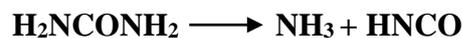
3. La tecnologia a riduzione selettiva catalitica SCR:

Per veicoli leggeri con cilindrata superiori a 2L, è conveniente usare un catalizzatore SCR perché consente di mantenere alte potenze specifiche nonostante le emissioni contenute. Potenze che senza questa soluzione, soprattutto per i motori diesel, dovrebbero essere tagliate drasticamente. Questo sistema di abbattimento si serve di un catalizzatore e dell'aggiunta di un agente chimico riducente, Ammoniaca o Urea, sfruttandone la capacità di assorbimento dell'ossigeno, producendo così vapore acqueo e N_2 a scapito degli NO_x . L'urea essendo meno tossica risulta di più larga applicazione, nonostante venga sempre più

commercializzato l'AdBlue, soluzione al 32.5% di urea tecnica di alta qualità (bassi contenuti di calcio, metalli etc.) in acqua demineralizzata. Questa soluzione viene iniettata proporzionalmente alla quantità dei gas di scarico e viene regolata con precisione dal sistema di gestione elettronico del motore grazie al sensore NOx installato a valle del catalizzatore SCR. Tale informazione verrà acquisita dalla centralina SCR/motore la quale eventualmente, provvederà a modificare la quantità di agente riducente da iniettare. Alcune vetture dispongono di due sonde NOx, una a monte del catalizzatore riducente e l'altra a valle: tramite i valori riscontrati da queste la centralina è in grado di controllare l'efficienza del catalizzatore riducente istante per istante. Il sistema SCR di trattamento dei gas di scarico è una delle tecnologie più efficienti ed ecologiche arrivando a convertire fino all'80% delle emissioni. La sua progettazione e dimensionamento dipendono da diversi parametri motoristici ma anche dal combustibile impiegato e dalle altre emissioni del motore. Il sistema risulta costituito da:

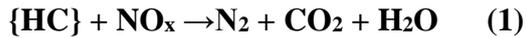
- un iniettore di additivo posto prima del filtro;
- un serbatoio per l'additivo e una pompa che alimenta l'iniettore;
- un sistema di dosaggio regolato dall'unità di controllo;
- un sensore NOx posto dopo il filtro che valuta il corretto funzionamento del catalizzatore;
- un catalizzatore SCR (posto dopo il filtro antiparticolato);
- sonda di temperatura.

Permette quindi di dare origine alle reazioni chimiche di trasformazione degli ossidi in azoto,

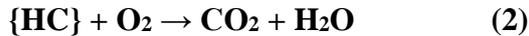


Un elemento da non trascurare è l'iniettore, si è infatti potuto constatare che in diversi casi nel giro di poco più di 8.000 km, si è andato a depositare uno strato di residuo solido piuttosto spesso. È presumibile che nell'arco di 20/25.000 km si possano riscontrare malfunzionamenti o che addirittura questo si blocchi. A seconda della logica di funzionamento delle centraline dei diversi veicoli, l'anomalia del sistema potrebbe innescare delle strategie particolari: il motore potrebbe entrare in condizione di recovery, oppure avere autonomia limitata in termini di chilometri percorsi o di avviamenti effettuati. Quindi è consigliabile verificare periodicamente lo stato in cui versa l'iniettore dell'AdBlue e se necessario, asportare il materiale solido depositatosi sopra al fine di evitare la sostituzione del pezzo o problemi più gravi all'intero sistema.

I catalizzatori **DeNOx ad HC** Hydrocarbon-SCR (lean NO_x reduction), consentono una riduzione selettiva degli NOx tramite gli idrocarburi HC ed altri composti contenuti nei gas di scarico come CO ed alcoli senza l'introduzione di reagenti esterni. Essi hanno inoltre il pregio di essere poco suscettibili all'avvelenamento da zolfo. Durante la riduzione catalitica selettiva gli idrocarburi sono sottoposti alle seguenti reazioni:



In pratica gli idrocarburi possono anche reagire in modo non selettivo con l'ossigeno secondo la seguente reazione:



Di conseguenza questo tipo di catalizzatori deve essere ottimizzato affinché avvenga la reazione selettiva (1) e non la (2) con l'ossigeno.

La selettività è determinata da:

- materiale del catalizzatore;
- tipi di idrocarburi;
- temperatura;
- contenuto di ossigeno nello scarico;
- rapporto HC/NO_x.

Esistono due tipi di catalizzatori DeNO_x: Attivi e Passivi. I DeNO_x Passivi usano esclusivamente idrocarburi provenienti dal combustibile bruciato in camera di combustione e quindi grazie alla loro semplicità, affidabilità e bassi costi potrebbero essere i sistemi preferiti, se non fosse che le concentrazioni di HC ottenibili da questi talvolta non sono sufficienti ad ottenere elevate conversioni di NO_x. Per ovviare a ciò si richiede l'aggiunta di ulteriori HC nei gas di scarico (DeNO_x Attivi) che può avvenire:

- a monte del catalizzatore DeNO_x;
- all'interno del cilindro tramite iniezioni ritardate.

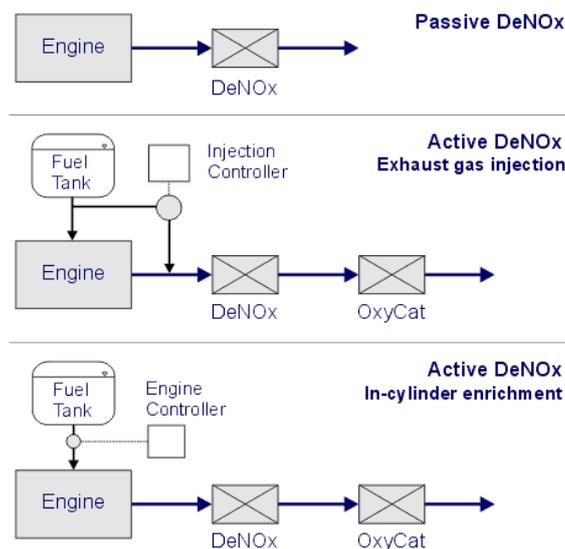


Figura 17: configurazioni dei catalizzatori DeNox Passivi e Attivi.

I catalizzatori che fanno uso di tale strategia vengono perciò detti DeNO_x Attivi e sono caratterizzati da:

- un aumento dei consumi di combustibile;

- la necessità di implementare un catalizzatore ossidante a valle della trappola (per eliminare eventuali idrocarburi in eccesso uscenti dal catalizzatore DeNOx).

L'iniezione di ulteriore combustibile attraverso una post-injection con il sistema common-rail non comporta elevati costi grazie alla flessibilità del sistema Multijet. Il problema maggiore soprattutto in vista della continuità dell'arricchimento, è l'impatto sul film di olio lubrificante ed usura del motore che si potrebbe eliminare ricorrendo ad un tempo d'iniezione ritardato, rischiando però di causare una combustione parziale o cracking degli idrocarburi prima che raggiungano il catalizzatore, perdendo dunque di efficacia.

Soluzioni per la riduzione degli HC e CO:

Diesel Oxidation Catalysts (DOC): rimangono una tecnologia chiave per i motori diesel, dove l'elevato contenuto di ossigeno dei gas di scarico preclude l'uso di catalizzatori a tre vie. Questi catalizzatori ossidanti convertono CO e HC e tendono anche a diminuire la massa delle emissioni di particolato ossidando alcuni degli idrocarburi che vengono assorbiti sulle particelle di carbonio. Ulteriori vantaggi del DOC includono ossidazione di derivati di idrocarburi incombusti non regolamentati, come ad esempio aldeidi o IPA, così come la riduzione o l'eliminazione degli odori dei gas di scarico.

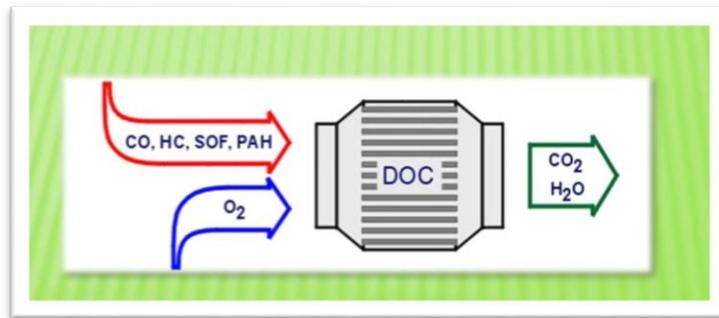
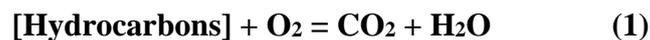


Figura 18: schema semplificato delle reazioni generate in un DOC.

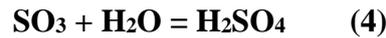
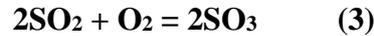
La riduzione delle emissioni nel DOC avviene attraverso l'ossidazione chimica delle sostanze inquinanti che si verifica nel corso dei siti catalitici attivi. Questi processi possono essere descritti dalle seguenti reazioni chimiche.



Gli idrocarburi vengono ossidati per formare anidride carbonica e vapore acqueo, come descritto dalla reazione (1) o in un altro modo stechiometricamente rigoroso (1a). Infatti, le reazioni (1) e (1a) rappresentano: l'ossidazione della fase gassosa degli HC, nonché l'ossidazione di composti SOF. La reazione (2) descrive l'ossidazione di monossido di carbonio in biossido di carbonio che

comporta un beneficio in termini di riduzione di CO e HC ma un peggioramento delle emissioni del gas effetto serra per eccellenza.

Tuttavia, un catalizzatore promuoverà l'ossidazione di tutti i composti a carattere riducente; alcune delle reazioni di ossidazione possono produrre composti indesiderabili. L'ossidazione di anidride solforosa in triossido di zolfo con la conseguente formazione di acido solforico (H₂SO₄), descritta dalle reazioni (3) e (4), è forse il più importante di questi processi.



Quando i gas di scarico in uscita dal tubo di scappamento vengono miscelati con l'aria, la temperatura diminuisce. In queste condizioni H₂SO₄ allo stato gassoso si combina con le molecole d'acqua formando composti di acido solforico idratato. Questo materiale contribuisce alle emissioni totali di particolato del motore. La formazione catalitica di solfati, in particolare in combinazione con il combustibile diesel ad alto tenore di zolfo, può aumentare significativamente le emissioni totali di PM. L'ossidazione di NO in NO₂ è un'altra reazione che può essere considerata indesiderabile in alcune applicazioni:



È interessante notare come il biossido di azoto può essere utilizzato efficacemente per facilitare la rigenerazione dei filtri antiparticolato o per migliorare le prestazioni di alcuni tipi di catalizzatori SCR. Si può avere un aumento di NO₂ dall'uso di questi dispositivi.

Il meccanismo di reazione nei catalizzatori di ossidazione diesel, si spiega con la presenza di siti catalitici attivi sulla superficie del supporto del catalizzatore che hanno la capacità di assorbire ossigeno.

In conclusione: le sempre più ristrette limitazioni per essere rispettate richiedono, oltre ad una miglior tecnologia impiantistica e ad una ottimizzazione della combustione, sistemi di abbattimento quali: EGR, DOC, sistemi di riduzione degli NOx e filtro antiparticolato.

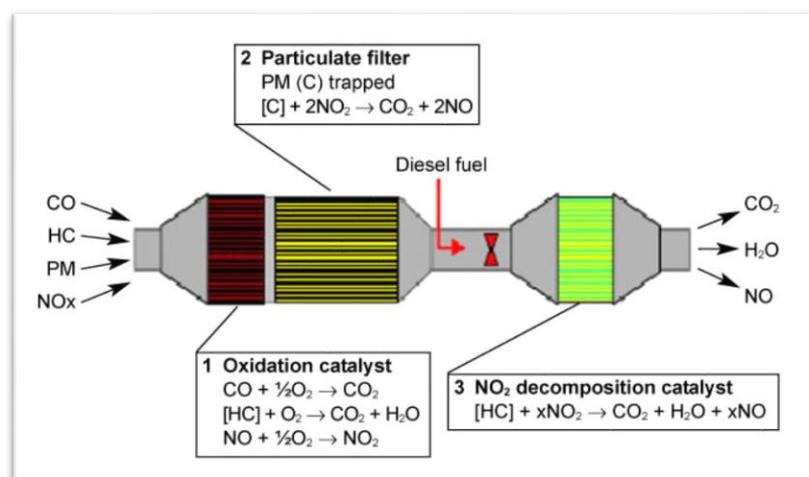


Figura 19: esempio di sistema completo di post trattamento dei gas di scarico con soluzione per l'abbattimento di NOx, a catalizzatore DeNOx ad HC, più DOC e filtro antiparticolato.

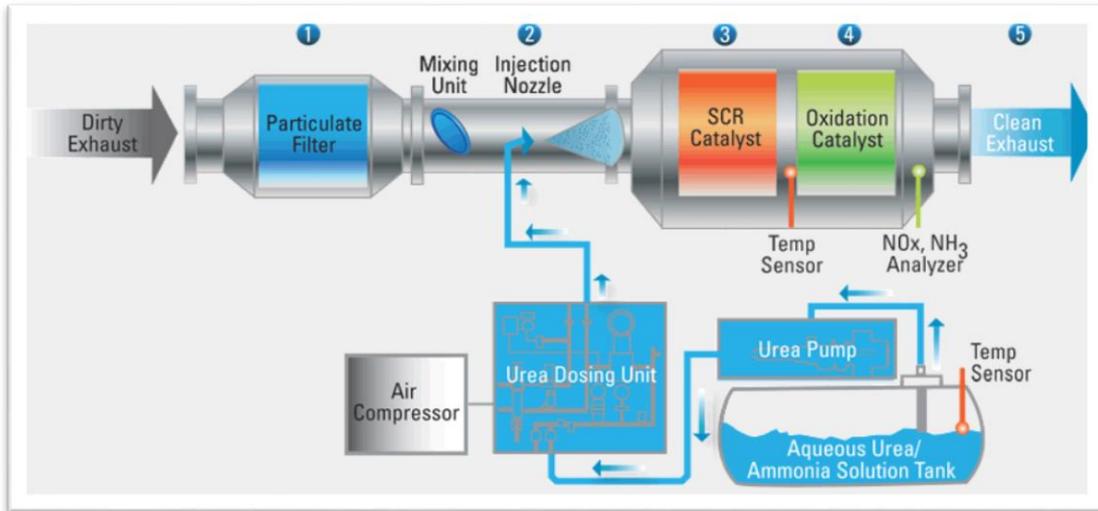


Figura 20: esempio di sistema completo di post trattamento gas di scarico con soluzione per l'abbattimento di NOx, a SCR ad iniezione di Urea, più DOC e filtro antiparticolato.

Motori benzina:

Soluzioni per la riduzione degli HC, CO, NOx:

L'ultimo componente chiave nella lotta all'abbattimento delle emissioni, limitatamente ai motori benzina è il catalizzatore a tre vie (TWC). Il catalizzatore a tre vie è fatto da un involucro in acciaio inox il quale contiene un corpo che può essere realizzato in due modi: con un blocco di ceramica solcato da tanti piccoli canali con una peculiare forma a nido d'ape, oppure con tanti fogli metallici corrugati molto sottili che vengono arrotolati uno sull'altro per formare molti micro canali. In tutti e due i casi sulla superficie di queste canalizzazioni viene depositato uno strato di wash-coat (un impregnante solitamente a base di allumina) che ha una superficie frastagliata in grado di aumentare l'area lambita dai gas. I TWC operano in un sistema a circuito chiuso comprendente un sensore lambda per regolare l'ossigeno, in modo tale da tenere la miscela a valori vicini inferiormente allo stechiometrico. Il catalizzatore può quindi contemporaneamente ossidare CO, HC in CO₂ e acqua riducendo NOx in azoto.



Figura 21: rappresentazione schematica della funzione del TWC.

Le sostanze catalizzatrici: sulla superficie del wash-coat o rivestimento attivo, sono poi depositati combinazioni di metalli preziosi come il platino, il palladio, il rodio e ossidi che favoriscono la reazione di riduzione, "strappano" gli atomi di ossigeno dagli ossidi di azoto, rilasciando innocuo azoto (N_2). Dopodiché, l'ossigeno in forma ionica partecipa alla reazione di ossidazione innescata da platino e palladio che trasforma il CO e gli HC rispettivamente in CO_2 e acqua. In questo caso, un ambiente ricco di ossigeno favorisce la seconda reazione e inibisce la prima, il contrario se l'ambiente è povero di ossigeno. Per questo motivo la superficie dei canalini presenti all'interno del catalizzatore deve essere molto ampia per consentire un grande e prolungato contatto tra inquinanti e sostanze catalizzatrici. Le modifiche alla capacità termica di substrati e al tipo di composizione del catalizzatore hanno portato a grandi miglioramenti in termini di prestazioni.



Figura 22: sistema TWC.

L'importanza delle temperature: in tutto questo procedimento è importante la capacità della marmitta di scaldarsi velocemente perché inizia a convertire il 50% delle sostanze inquinanti solo a partire da una temperatura di circa $300^{\circ}C$ e poi raggiunge il funzionamento ottimale a circa $500^{\circ}C$. Può sembrare un aspetto di secondaria importanza ma i cicli di omologazione prevedono la partenza a freddo, quindi i primi minuti di funzionamento possono influire drasticamente sul risultato finale. Per questo negli ultimi anni le case hanno iniziato ad adottare accorgimenti come, le resistenze elettriche che preriscaldano i gas di scarico, cambiare la tecnica dei motori integrando i collettori di scarico nella testata (si scaldano prima) e porre i catalizzatori molto vicini al motore.

Il coefficiente d'aria: l'efficienza di conversione di un catalizzatore a tre vie dipende molto dal giusto equilibrio tra coefficiente d'aria, all'interno della miscela, con la benzina. Se la miscela è troppo grassa aumenta l'abbattimento degli NO_x ma diminuisce quello dei CO e degli HC, al contrario se la miscela risulta troppo magra. Così, l'efficienza della conversione catalitica risulta massima cioè prossima all'80%, quando il rapporto aria/benzina è più vicino possibile a quello stechiometrico.

La sonda lambda: la ECU quindi, si occuperà di rendere magra o grassa la miscela aria-benzina a seconda che l'ossigeno presente nei gas di scarico sia poco oppure troppo. La sonda lambda è un sensore che fornisce un segnale elettrico atto ad evidenziare la quantità di ossigeno nella miscela; è formato da un corpo metallico che sostiene il sensore vero e proprio dotato di una filettatura e di una zona esagonale che ne consente l'avvitamento al collettore di scarico. Nella parte finale del corpo metallico è riportato l'elettrodo positivo della sonda, mentre quello negativo (o massa) è il

corpo metallico stesso. I tipi di sonde lambda sono due, a seconda del tipo di ceramica utilizzata nel sensore: a biossido di zirconio (attivo) e a biossido di titanio (passivo).

È opportuno verificare l'efficacia del catalizzatore nel tempo, visto che con il trascorrere degli anni e dei chilometri tende a diminuire, ecco perché si è reso necessario l'utilizzo di due sonde lambda per avere un monitoraggio migliore delle condizioni di lavoro del motore e poterle correggere tempestivamente. Una prima sonda lambda si trova a monte del catalizzatore mentre la seconda è a valle e la ECU si occupa di controllare il differenziale che sussiste tra i valori che forniscono.

Sistemi catalitici riscaldati elettricamente utilizzano un piccolo catalizzatore prima del catalizzatore principale. Il substrato su cui viene depositato il catalizzatore è realizzato in metallo in modo che, quando viene fatta passare una corrente elettrica, si riscalda rapidamente. Questo porta il catalizzatore alla temperatura operativa completa in pochi secondi.

I dispositivi ottimizzati che incorporano queste nuove tecnologie sono tutt'ora in fase di aggiornamento e in produzione. L'uso di convertitori catalitici aggiuntivi vicino al collettore di scarico riduce il tempo di light-off in partenza a freddo da uno o due minuti a pochi secondi e di conseguenza, le emissioni totali. L'ulteriore miglioramento della tecnologia del substrato, in combinazione con catalizzatori altamente stabili termicamente e componenti di stoccaggio di ossigeno, permettono l'approccio con catalizzatore monoblocco per soddisfare le norme Euro 6.

Il problema del particolato, passaggio da PM a PN:

Con i termini "particolato", "polveri sottili", "polveri totali sospese" (PTS), si indica l'insieme di particelle solide e liquide generate nel processo di combustione e portate in sospensione nell'aria dai gas di scarico. Nei motori ad accensione comandata si possono individuare tre classi di particolato: piombo, solfato, organico. Il piombo derivante da composti metallo-organici, veniva utilizzato come additivo nelle benzine e oggi è vietato nella maggior parte delle normative. Il solfato derivante dallo zolfo contenuto nel combustibile è tutt'oggi assai limitato nelle benzine commerciali.

Il particolato organico, costituito prevalentemente da particelle carboniose che hanno assorbito sulla loro superficie idrocarburi di vario tipo, riguarda molto anche i motori diesel. La struttura base del particolato emesso da questi motori consiste in particelle primarie (diametro medio 10÷60 nm) aggregate a migliaia in agglomerati di diverse dimensioni chiamati "particelle". Il particolato carbonioso si forma attraverso processi estremamente complessi e in parte ancora sconosciuti, la maggior parte deriva dalla combustione incompleta degli idrocarburi del combustibile.

In base agli studi più recenti si può affermare che il particolato carbonioso (spesso viene indicato anche con i nomi comuni di "soot", fuliggine o "nerofumo") può essere considerato dannoso sia per l'ambiente che per la salute umana. In quanto sottoprodotto di praticamente quasi tutti i processi di combustione, esso è un componente "abituale" dell'atmosfera, in particolare delle zone a maggiore urbanizzazione.

Tali particelle inoltre, costituiscono lo "scheletro" attorno al quale si coagula e si forma lo smog delle aree urbane; la dimensione tipica (dell'ordine del micron) lo pone al di sotto della "soglia di inalabilità" convenzionalmente posta a 10 µm (PM10), rivelandole così anche come causa di disturbi degli apparati cardiovascolare e respiratorio. Tale particolato infine, contiene nella propria struttura, un gran numero di composti organici (come ad esempio i PAH fortemente indiziati di

portare agenti cancerogeni) ed è stata ormai evidenziata una stretta relazione tra inquinamento ambientale da particolato carbonioso e diffusione del cancro.

Le limitazioni sul numero di particelle (PN) sono state introdotte per i veicoli leggeri dal Settembre 2011 (Euro 5b) e limitano il numero di particelle non volatili emesse per ciclo di marcia europeo a 6×10^{11} p/km. Il nuovo standard richiede effettivamente l'installazione del DPF ad alta efficienza in tutti i veicoli a diesel. La stessa necessità si riscontra anche per i veicoli a benzina che utilizzano l'iniezione diretta (GDI) fin da prima della normativa Euro 6; inizialmente con un limite di 6×10^{12} p/km (Euro 6b) e da settembre 2017 con 6×10^{11} p/km (Euro 6c). Questo ritardo nasce dalla volontà di lasciare ai produttori tempo sufficiente per esaminare la possibilità di ottenere motori a benzina conformi ai limiti vigenti attraverso il miglioramento del processo di combustione, senza bisogno di utilizzare un filtro antiparticolato (GPF). Le nascenti preoccupazioni si hanno però, in riferimento alla presenza di particelle solide di dimensioni $< 23 \text{ nm}^{[*]}$, che risultano non essere coperte dalle normative e più dannose per la salute umana. Sono difficilmente catturabili dai tradizionali filtri montati sui veicoli a diesel e generate in ingenti quantità dai motori benzina. I nuovi obiettivi da raggiungere, sulla base di queste problematiche, sono inerenti alla determinazione di un metodo efficace per la misurazione e poi l'abbattimento di queste nano particelle.

[]: per dimensione $< 23 \text{ nm}$ ci si riferisce al diametro aerodinamico ovvero corrispondente al diametro di un'ipotetica sferetta di densità uguale a 1 g/cm^3 ugualmente veicolata dall'aria.*

Il metodo PMP, tutt'ora utilizzato per misurare particelle non volatili, copre solo quelle che hanno dimensioni maggiori di 23 nm. Questo valore di target risulta essere superiore alle dimensioni tipiche di particelle volatili in modalità di nucleazione ma più piccolo rispetto alla modalità di accumulo delle particelle solide dei diesel. La motivazione che ha spinto ad escludere le particelle volatili dalle misurazioni, nasce dall'esigenza di avere stabilità e ripetibilità del metodo di misura. Ci sono state molte discussioni sulla validità e l'utilità di un limite inferiore a 23 nm, poiché si è dimostrato che le particelle sub-23 nm si possono trovare nelle emissioni dei motori diesel senza post trattamenti allo scarico e a bassi carichi. Processi come la rinucleazione di acido solforico portano ad ottenere materiale semi-volatile in un basso range di dimensioni. Per esempio, la rigenerazione dei filtri DPF nei moderni veicoli può produrre emissioni di particelle solide inferiori ai 23 nm. Inoltre studi ed esperimenti recenti hanno messo in luce che additivi a base di metalli in olio e gli stessi carburanti possono generare grandi numeri di particelle di piccole dimensioni. Questo può quindi portare ad una revisione delle dimensioni attuali di cut-off pari a 23 nm, poiché è già possibile ridurre il limite inferiore a 10 nm con strumenti CPC (contatore di particelle a nuclei di condensa) [5].

Sistema di misurazione PMP (Particulate Measurement Programme) per particelle maggiori di 23 nm:

Secondo il regolamento UNECE 83, il sistema di misurazione del numero di particelle specifica che solo le particelle solide devono essere misurate. Particelle volatili e semi-volatili che si formano dalla nucleazione di composti gassosi come i gas di scarico freddi, devono essere escluse perché possono contribuire significativamente alla variabilità della misura, in quanto sono influenzabili dalla temperatura e dalle condizioni di diluizione. La terminologia particella solida non è sempre

correttamente usata, si rivolge solo a porzioni di materiale che non evaporano a temperature di 300°C, quindi una più corretta designazione sarebbe particella non volatile. Il sistema PMP:

- il flusso di scarico del veicolo viene prima diluito con aria filtrata da un filtro HEPA all'interno del tunnel di diluizione (CVS) con tubo di trasferimento delle particelle a diametro interno ≥ 8 mm (flusso laminare). Il CVS è collegato al VPR che rimuove le particelle volatili e diluisce il campione attraverso un trattamento termico di termodiluizione. Il VPR è costituito da un diluente primario (PND_1) in cui il flusso permane per un tempo ≤ 3 s con fattore di diluizione dell'aria calda (DF) ≥ 10 e temperatura del campione diluito ≥ 150 °C per evitare la condensazione di alcuni composti dei gas di scarico prima che siano inclusi nel campione. Successivamente si incontra un tubo riscaldato con temperatura di parete tra 300 e 400 °C che migliora la rimozione di tali sostanze. Infine si ha un diluente secondario (PND_2) che rimuove tutte le particelle volatili dello scarico, così che rimangano solo quelle solide.
- Superata questa prima parte, si presenta il contatore del numero di particelle (PNC) il cui limite inferiore di rilevamento (D_{50})^[*] è fissato a 23 nm, per escludere dalle misure idrocarburi a bassa volatilità presenti come particelle in modalità di nucleazione, includendo invece la fuliggine primaria. La temperatura di ingresso è < 35 °C, diametro del tubo ≥ 4 mm e tempo di permanenza di ≤ 0.8 s. Il PNC deve essere a flusso pieno (senza splitting interno) con un tempo di risposta < 5 s ed efficienze di conteggio (CE) di 0.5 ± 0.12 a 23 nm e > 0.9 a 41 nm.
- Il tempo di residenza totale del flusso all'interno del sistema deve essere ≤ 20 s.

[*]: D_{50} è definita come la dimensione delle particelle per cui si ha l'efficienza di rilevazione del 50%.

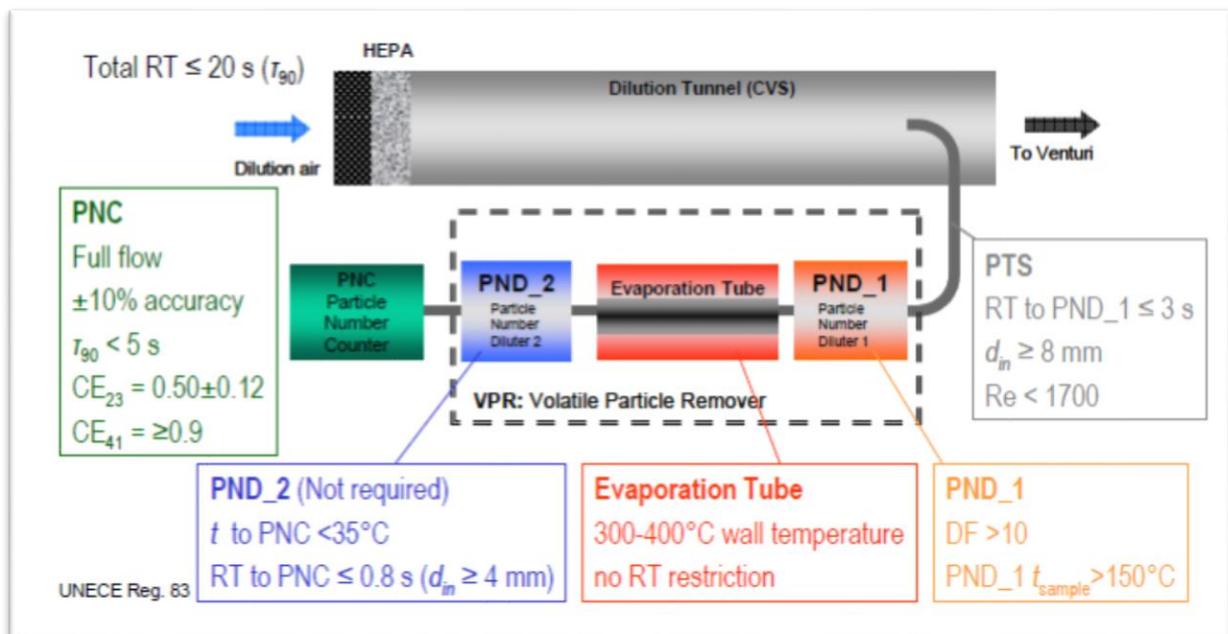


Figura 23: sistema di misurazione PMP.

Sistema di misurazione delle particelle inferiori a 23 nm, o nano particelle:

Le dimensioni delle particelle solide dei gas di scarico del motore costituite principalmente da fuliggine, sono distribuite intorno al valore di 50 nm, al contrario, i diametri delle particelle volatili si aggirano sui 20 nm. Pertanto, il contatore PNC si adatta bene a misurare solo le particelle solide. Si sta valutando di adottare PNC ultrafini con soglia di rilevamento inferiore a quella fino ad oggi utilizzata. Tuttavia, ci sono ancora sfide tecniche per la misurazione precisa delle particelle sub-23 nm. Si nota l'esistenza di particelle volatili rinucleate all'uscita del VPR, le quali possono causare errori di misura anche con PNC ultrafini. Per risolvere tale problema, sono stati valutati gli effetti dell'applicazione di uno stripper catalitico caldo (HCS): utilizzando un catalizzatore di ossidazione si riporta un'elevata efficienza di rimozione di particelle volatili, essenzialmente costituite da idrocarburi e lo stesso HCS può rimuovere l'eventuale presenza di solfato sulla sua superficie, nonostante ancora non sia stato sufficientemente approfondito il suo rendimento. Nano particelle solide devono essere preconditionate nel VPR senza perdite significative di particolato, oltre ad evitare la rinucleazione delle particelle volatili. In uno studio condotto dalla Toyota Motor Corp, si installò un HCS disponibile in commercio nella VPR, per rimuovere efficacemente le particelle volatili al posto del tubo di evaporazione (ET) richiesto dalla normativa CEE. In termini di efficienza di rimozione e di penetrazione di particelle solide, sono stati confrontati i sistemi con VPR dotato di ET e con VPR dotato del HCS.

Il sistema di misurazione presenta due PNC: il primo è un contatore di particelle a nuclei di condensa (CPC), necessario a misurare il numero di particelle superiori a 23 nm come da regolamento e il secondo per quelle inferiori, il cui D_{50} è 4 nm. Il gas campione in uscita dal VPR può essere quindi, simultaneamente misurato da entrambi. All'interno del VPR, il tubo di evaporazione ET è stato sostituito dal HCS con il medesimo valore di temperatura. Il sistema di trasferimento delle particelle (PTS) comprende ora, la punta della sonda di campionamento (PSP), un pre-classificatore di dimensione delle particelle (PCF) e il condotto di trasferimento (PTT).

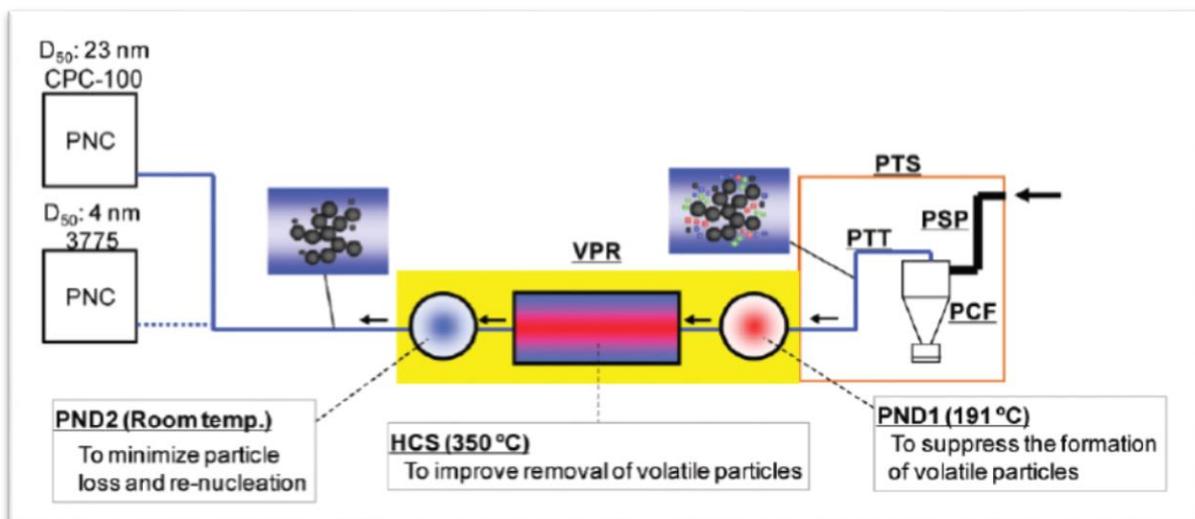


Figura 24: sistema di misurazione per particelle di dimensioni inferiori ai 23 nm.

Sulla base della verifica delle prestazioni e della ricerca di applicabilità effettiva allo scarico del veicolo di questo sistema sperimentale, i punti da sviluppare per avere una reale implementazione sono:

1. la lunghezza del PTT deve essere il più breve possibile per evitare perdite di minuscole nano particelle sub-23 nm.
2. È necessaria una nuova metodologia di calibrazione per il PNC, il cui D_{50} sia inferiore a 23 nm; perché è difficile generare nano particelle di piccolo diametro di poli-alfa-olefina, materiale usuale per la calibrazione dei PNC conformi con il regolamento ECE.
3. Si nota una maggiore efficienza di riduzione dell'alta concentrazione di particelle volatili tramite l'HCS, rispetto all'utilizzo di un ET. La capacità di ossidazione del catalizzatore nell'ossidare idrocarburi, è il motivo di questa maggiore efficienza. Efficienze migliori di rimozione di nebbie di acido solforico e particelle di solfato di ammonio sono state osservate con l'HCS, grazie alla sua capacità di assorbimento dei solfati. D'altra parte, la penetrazione dell'HCS tende ad essere inferiore poiché si hanno perdite di diffusione nella struttura a nido d'ape del nucleo.
4. È necessario studiare una procedura di correzione del VPR nel sistema di misurazione di nano particelle, in quanto il grado di penetrazione diminuisce drasticamente per dimensioni inferiori a 23 nm.
5. Per un flusso di gas di scarico reale, i valori misurati dal PNC con soglia di rilevamento a 23 nm in entrambi i sistemi, sia quello equipaggiato con ET che quello con HCS, erano equivalenti. Le concentrazioni di particelle solide misurate da entrambi i PNC i cui D_{50} a 23 nm e 4 nm, si discostano di poco perché la frazione di nano particelle di dimensioni inferiori a 23 nm allo scarico del GDI testato, era estremamente basso, questo grazie al lavoro svolto dall'HCS.

Da questo primo approccio sperimentale nascono le attuali e future ricerche per sviluppare sistemi di misurazione di particelle solide inferiori e superiori ai 23 nm che abbiano un ottimale margine di precisione [5,6,7].

Soluzioni per la riduzione del particolato:

Il problema del particolato ultrafine è nato con i sistemi di iniezione ad alta pressione, che però hanno anche portato grandi benefici: i motori consumano di meno, quindi producono meno CO_2 , sono più silenziosi e fluidi. Il filtro antiparticolato è stato creato proprio per risolvere il problema della produzione inevitabile di polveri sottili, è costituito da blocchi a nido d'ape in cui il gas non può passare direttamente ma deve fare un percorso a serpentina e in questo passaggio deposita le polveri sulle pareti. Quando il filtro è pieno, la centralina elettronica diagnostica che è necessario fare la rigenerazione. Si inietta del combustibile a valvole di scarico aperte, il gasolio nebulizzato arriva nel DOC, portando la temperatura a $600^{\circ}C$ e rendendo possibile la combustione del particolato. Quindi le particelle di polvere non escono ma vengono bruciate: il risultato, come per ogni combustione di composti a base carboniosa, è principalmente CO_2 .

Il Particolato, misurato in forma gravimetrica come PM fino a prima di Euro 5, viene ad oggi valutato attraverso una tecnica molto più raffinata che consente di annotare il numero di particelle PN emesse al kilometro, nasce così un nuovo limite esteso anche ai benzina ad iniezione diretta. Dall'Euro 5 in poi il filtro è diventato necessario per tutti i costruttori e sarà mantenuto anche sui motori Euro 6. Nel 2017, la Commissione Europea sostituirà l'attuale ciclo di omologazione NEDC (New European Driving Cycle) con il World Light Vehicle Test Cycle (WLTC) che è stato progettato anche per evitare che i costruttori si avvantaggiassero troppo dell'uso del

dispositivo Stop&Start che in fase di omologazione azzerava i consumi nei periodi di minimo, permettendo un risparmio di CO₂ anche del 4-5%. Con il nuovo ciclo il vantaggio si riduce allo 0.4-0.5%. I filtri delle automobili sono governati e monitorati dall'elettronica del motore, funzionano in due fasi distinte (accumulo e rigenerazione) e sono progettati dai singoli costruttori per ogni motore.

In assenza di ossigeno e a temperature superiori a 400°C gli idrocarburi (HC), elementi del carburante o dell'olio di lubrificazione, sono decomposti in radicali e molecole più piccole (pirolisi), in particolare acetilene. Quei primi radicali cominciano a creare molecole di policiclici (PAH), che sono i precursori di particelle di fuliggine. La combinazione di questi con molecole di HC e altre specie, formano piccole particelle di fuliggine (inizio). Un'ulteriore deidrogenazione e la combinazione delle specie portano ad una veloce crescita di particelle più grandi o agglomerati di forma non sferica. Più tardi, nel processo di combustione, la fuliggine generata viene ossidata e quindi solo una piccola quantità entra nel sistema di scarico.

Un ruolo fondamentale nella ricerca delle migliori prestazioni è ricoperto dalla forma dello spray che si sviluppa nella camera di combustione. La definizione dello spray nel motore è detta *spray targeting* il cui obiettivo è garantire la corretta formazione di una miscela omogenea o stratificata, a seconda delle modalità di gestione del motore, con elevata ripetibilità per tutto l'arco di funzionamento, riducendo e controllando la generazione di film di combustibile sulle pareti della camera di combustione e garantendo un'elevata polverizzazione del getto. La forma dello spray è fortemente influenzata dalle condizioni operative del motore e dai diversi parametri di controllo del sistema di iniezione, quali pressione di iniezione, inizio e durata dell'iniezione, quantità e distribuzione delle iniezioni nel singolo ciclo motore. L'interazione tra lo spray e i moti dell'aria nel cilindro e la modalità di evaporazione delle gocce (con la possibilità di *flash-boiling*) sono determinanti nella definizione del target dello spray. L'iniettore viene progettato e realizzato per determinare la forma di spray insieme alla camera di combustione o adattato ad essa.

Le condizioni di combustione in camera determineranno il grado di ossidazione: alte temperature e promotori di ossidazione sufficienti come ossigeno o radicali OH sono i principali fattori di influenza. La combustione premiscelata è dominante nei motori benzina, tuttavia disomogeneità possono portare a zone ricche localmente che causano la formazione di particolato. Soprattutto nei motori GDI a regimi ricchi può esserci una discreta concentrazione di frazioni organiche volatili. Carenze nella miscela sono trovate anche vicino alle pareti della camera, quando il carburante viene depositato ed eccessiva formazione di fuliggine si verifica a causa dei cosiddetti "pool fire". Inoltre il particolato, costituito da frazione organica volatile, è generato a causa di processi di ossidazione incompleti come l'estinzione del fronte di fiamma. A parete, l'ossidazione delle particelle generate è ridotta e la combustione termina facilmente con conseguente aumento del particolato. Soprattutto in Cold Start e Warm-Up Engine Conditions questa tendenza è amplificata, l'evaporazione dello strato di carburante a parete è ridotta e la miscelazione turbolenta con l'aria è limitata a causa dei bassi regimi.

Nel complesso, le particelle di scarico del motore benzina sono costituite da materiali simili e hanno una morfologia non troppo differente dalle particelle dei motori diesel. Tuttavia, per i motori benzina si ha tipicamente un numero maggiore di particelle a dimensioni più piccole.

Contrariamente al particolato tipico del diesel, la maggioranza non è composta da carbonio elementare, ma bensì di composti ad alta e bassa volatilità che sono altamente dipendenti dalle condizioni operative. La modalità di formazione della miscela aria-combustibile determina le emissioni di particolato finali, quindi l'ottimizzazione del processo di iniezione, la successiva

miscelazione e minimi strati di combustibile a parete sono le linee guida globali per basse emissioni di particolato. Architetture di motori GDI con configurazione di iniezione centrale dovrebbero quindi avere in questo senso, diversi vantaggi [8].

La Figura 25 illustra gli aspetti più importanti da variare affinché le emissioni di un motore GDI siano ridimensionate:

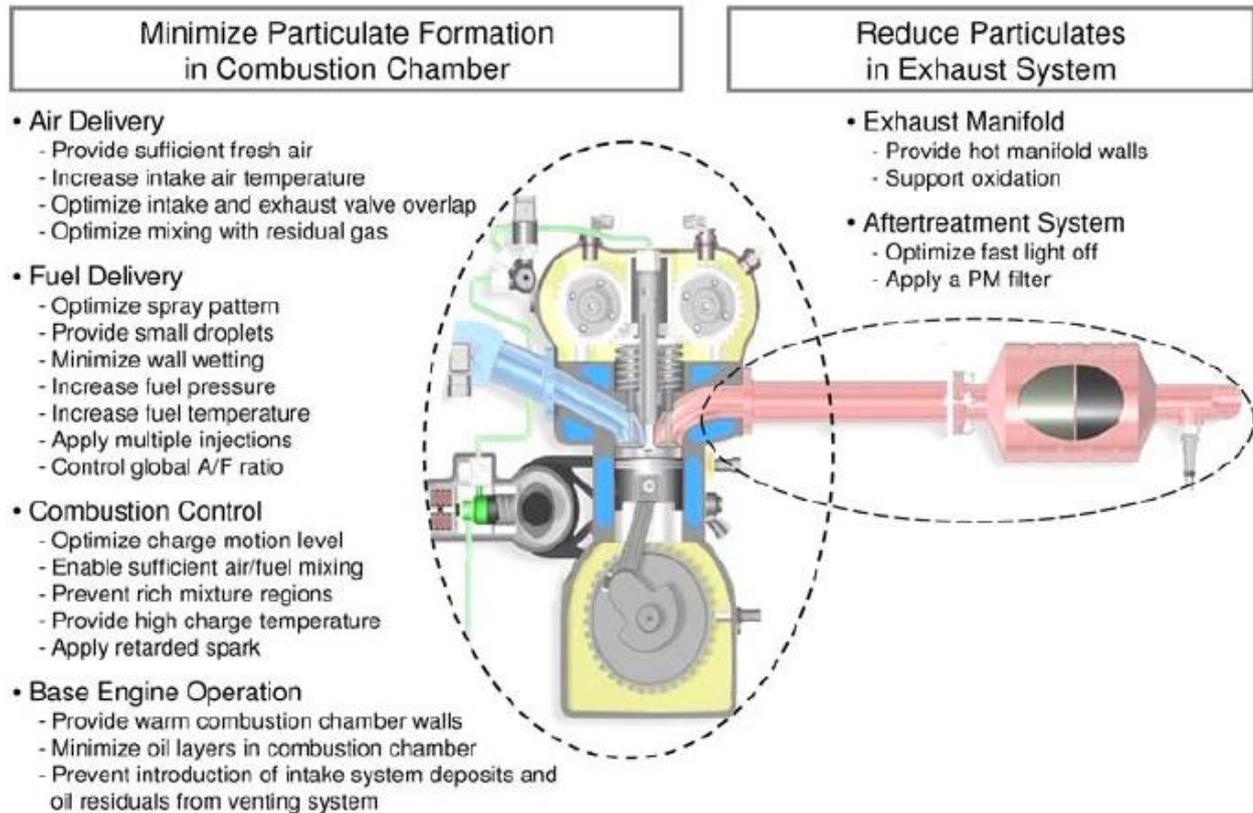


Figura 25: tecnologie per minimizzare la formazione di particolato nei motori benzina.

L'attuale tendenza verso il downsizing e l'attenzione per l'economia di carburante senza il crollo delle prestazioni, in combinazione con regolamentazioni severe sui limiti di emissioni richiedono lo sviluppo di nuove tecnologie per i motori. Gli attuali processi di combustione come il funzionamento a carica stratificata o la variabilità del treno valvola si concentrano principalmente sulla ottimizzazione delle condizioni di funzionamento a basso carico dei motori DISI.

Un'altra possibilità per ridurre le emissioni di PN è quella di aumentare la pressione di iniezione del carburante, un aumento fino a 80 MPa può non solo ridurre le emissioni PN ma anche gli ossidi di azoto e gli idrocarburi durante il riscaldamento del catalizzatore. Si evidenzia l'influenza di diverse configurazioni di ugelli (ad alto e basso flusso statico, numero di fori) sulle emissioni di gas di scarico e sulle prestazioni del motore.

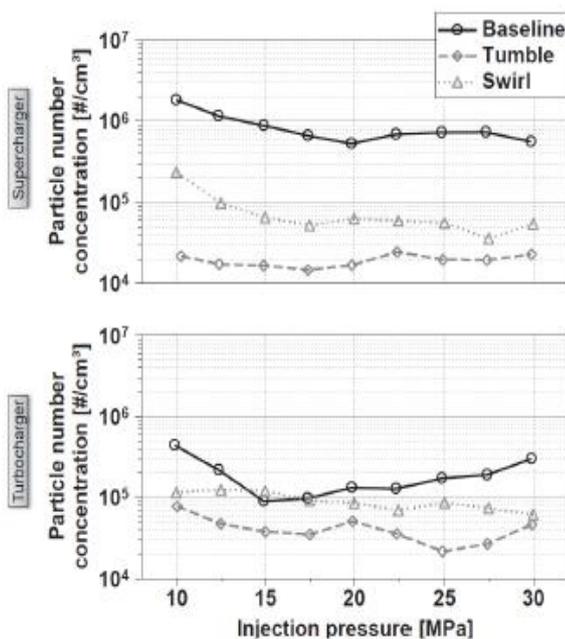
Altro fattore che partecipa attivamente alla formazione del particolato è la composizione del combustibile, avendo un grande impatto sul comportamento della combustione e quindi sulle emissioni. L'aggiunta di etanolo alla benzina è equivalente a migliorare il processo di combustione e quindi a ridurre la formazione di fuliggine, rendendo l'effetto di nucleazione della modalità ad accumulo indebolito. Thewes ne studiò l'influenza utilizzando un iniettore montato centralmente, testò il tetraidro-2-metilfurano con il 1-butanolo e 2-butanolo confrontandoli con l'etanolo [9]. Gli

autori osservarono che il funzionamento del motore con butanolo in condizioni di carico generale, portava ad un aumento delle emissioni di idrocarburi e PN, mentre l'etanolo provocava solo un aumento delle emissioni di idrocarburi. Questo comportamento si presunse essere causato dalla preparazione della miscela impropria, confermato infatti dalla presenza di olio diluito. Questi risultati si adattano al lavoro di Jin C. che misurò un aumento delle emissioni di propene, 1,3-butadiene ed acetilene, causanti la formazione di benzene; composti aromatici come quest'ultimo, sono i precursori della fuliggine e quindi della formazione di particelle [10, 11].

A causa degli impatti negativi dei combustibili contenenti alcool sulle emissioni di idrocarburi e PN mostrati da Thewes e Dageförde, rispetto a miscele con etanolo e butanolo (40% di alcol, 60% RON 95), si provò anche toluene non diluito come composto aromatico e due combustibili alchilati. I composti aromatici supportano il processo di formazione di particelle come già accennato. Il carburante alchilato è una miscela di diversi idrocarburi paragonabili a 95 ottani, ma con un composto aromatico vicino allo 0%; la quantità ridotta di elementi aromatici è sostituita da una maggiore quantità di iso-paraffine. I risultati mostrano che la quantità di emissioni di idrocarburi e PN sono più alti per il toluene con la possibilità di essere ridotti utilizzando carburante alchilato con la minima quantità di composti aromatici. L'influenza del combustibile contenente alcol è quindi dipendente da molteplici effetti interagenti come il valore calorico, la tensione superficiale, la viscosità e il calore di evaporazione [12].

I risultati mostrati da Berndorfer invece, su come i depositi sulla punta dell'iniettore provochino una fiamma a diffusione ritardata, mostrano una correlazione con le emissioni misurate di PN; le caratteristiche di spruzzatura come l'angolo del cono di spruzzo, penetrazione e dimensioni delle goccioline, risultano comunque incentivare la formazione di PN. Gli autori affermano infatti che la fiamma a diffusione vicino alla punta dell'iniettore è un forte collaboratore sia per PM che PN, a condizione di motore caldo e in regime stazionario [13].

Recentemente sono stati presentati i risultati ottenuti su un motore DISI di un autovettura di serie dotato di un iniettore a solenoide con una pressione massima di 30 MPa e un carburante alchilato,



sottolineando come le emissioni di gas di scarico siano fortemente dipendenti dal movimento della carica; con un aumento della contropressione allo scarico la temperatura dei gas aumenta, così una grande quantità di idrocarburi può essere ossidata nel sistema di scarico riducendo le emissioni, soprattutto in configurazione swirl e tumble. Diverse variazioni del valore della pressione di iniezione sono state utilizzate per mostrarne l'influenza sul comportamento di combustione e delle emissioni del motore. Un aumento di questo parametro, porta ad una penetrazione del getto di combustibile e velocità di diffusione maggiore ma una riduzione delle emissioni di PN è evidente solo con turbolenza (swirl). Per configurazione baseline, PN aumenta anche per pressioni d'iniezione superiori a 20MPa.

Figura 26: concentrazione di PN in funzione della pressione di iniezione e a seconda del tipo di moto in camera.

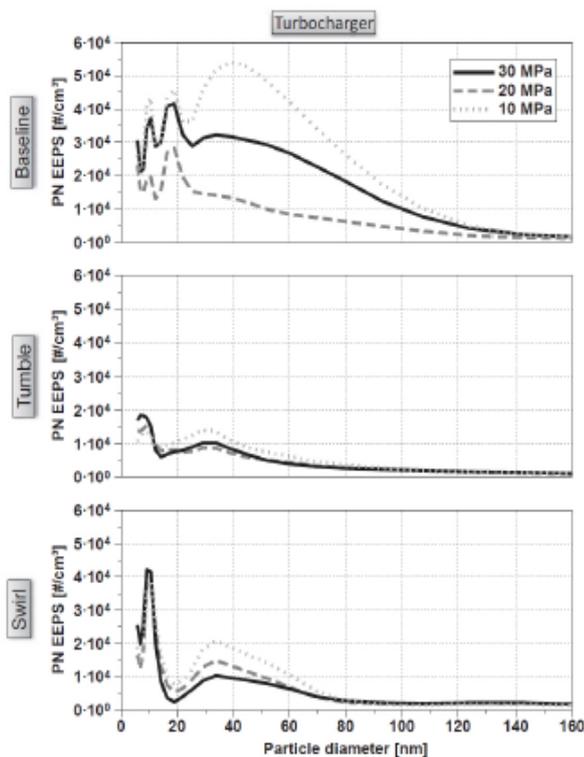


Figura 27.

Nella Figura 27 si ha la distribuzione delle dimensioni delle particelle per le tre tipologie di movimento della carica in riferimento ad un motore con turbocompressore, indicate per i tre valori di pressioni di iniezione 10 MPa, 20 MPa e 30 MPa. Con la configurazione baseline il numero di particelle per cm^3 a 30 MPa è superiore rispetto alla presenza di una pressione di 20 MPa, ma decresce a 10 MPa. Da un aumento della pressione di iniezione e della massa di combustibile iniettato ad alto carico del motore, la modalità di accumulo può essere ridotta, in tal modo però cresce la modalità di nucleazione, ciò conduce l'emissione di PN a quantità inferiori. Mentre per il moto di tumble e swirl le emissioni sono tendenzialmente sempre più basse rispetto al baseline [14].

In generale, l'emissione di PN in un motore DISI o GDI ad una variazione di SOI (start of injection), mostra comportamenti differenti. Un'iniezione precoce comporta un'interazione dello spray con il pistone causando un film di carburante e quindi poolfire, mentre un ritardo riduce il tempo per la preparazione della miscela, porta a zone ricche localmente e alla formazione di fuliggine. Alte temperature dei gas di scarico e la presenza di ossigeno residuo alla fine del processo di combustione sono necessari per un'ossidazione efficiente, sia nella camera che nel sistema di scarico. Ad un dato carico del motore e con uno specifico ritardo della scintilla, si può ottenere una combustione ritardata con un aumento di temperatura dei gas di scarico riducendo così il particolato. Dall'altro canto, un approccio di questo tipo, porta ad una penalità in termini di consumi ed è quindi utilizzato solo durante catalyst light off.

Una configurazione del motore con un riscaldamento veloce delle zone più estreme della camera contribuisce a minimizzare il combustibile liquido immagazzinato nelle pareti, sulla superficie del pistone e sul cilindro. Inoltre la presenza di olio motore nella combustione, introdotto in camera sia attraverso il percorso di lubrificazione sia attraverso i condotti di aspirazione, incrementa la formazione delle particelle.

La partenza a freddo e la fase di riscaldamento del catalizzatore influenzano fortemente le emissioni complessive di particolato, non essendo il motore ancora in temperatura di funzionamento non incita un'efficace ossidazione delle particelle, costituite da residui volatili. Di conseguenza, qualsiasi misura per ridurre la fase di riscaldamento contribuirà a diminuire sia la massa di particolato che il numero delle particelle.

In linea di principio, filtri per il particolato già in uso per i moderni motori diesel, possono essere applicati anche per motori benzina. La dimensione più ridotta delle particelle generate dai motori benzina richiede un filtro più fine, che di conseguenza porta ad una superiore contropressione nel sistema di scarico con un impatto negativo sulle prestazioni, sul consumo di combustibile ed

emissioni di CO₂. L'aggiunta di un filtro antiparticolato superficialmente, causerebbe un aumento significativo di complessità e di costi del sistema di post trattamento ma dovendo soddisfare le imminenti certificazioni reali di emissioni (RDE), risulta essere un potenziale strumento di controllo del particolato.

Motori a benzina, filtro GPF:

Il parametro principale da considerare quando si introduce una tecnologia come questa sono l'efficienza di filtrazione, la caduta di pressione e la conversione catalitica. Un'elevata porosità ha il potenziale per ridurre efficacemente le emissioni di PN in un ampio intervallo di punti di funzionamento del motore.

La tecnologia chiave del motore a benzina (GDI) si basa sulla riduzione delle emissioni di CO₂, migliorando la coppia e la potenza. Poiché la maggior parte delle particelle nei GDI si formano durante la fase di avviamento a freddo, come così durante la modalità di riscaldamento del catalizzatore, il sistema di iniezione comprendendo ad esempio il numero di iniezioni, i tempi e la quantità, è stato ulteriormente sviluppato per migliorare l'omogeneità della miscela. Come risultato, si può attualmente raggiungere il limite di $6 \cdot 10^{12}/\text{km}$ durante un ciclo di guida europeo (NEDC); ma in previsione del futuro ciclo di omologazione su strada (legislazione Euro 6c), nessun motore GDI riuscirà a soddisfare tali normative se non con la dotazione di un filtro GPF.

Per ridurre le emissioni di particolato di un motore diesel, si adotta il DPF che è una tecnologia di controllo delle emissioni già in uso da diversi anni; sarebbe infatti ovvio usarlo come disegno base per lo sviluppo di un filtro analogo applicabile ai benzina. Una delle preoccupazioni però, è l'impatto che potrebbe avere una caduta di pressione generata dai sistemi di post trattamento sulle prestazioni, così come il rischio di aumentare le emissioni di CO₂. Nel caso di un filtro catalizzato, è noto come il rivestimento e i pori del materiale filtrante siano fattori importanti per ridurre al minimo la caduta di pressione e per ottenere un'elevata efficienza di filtrazione. Dal momento che il rivestimento influenza fortemente il disegno del filtro, l'ottimizzazione di quest'ultimo è più complessa di quella per i filtri non-catalizzati. Così un filtro a struttura wall-flow, è una delle soluzioni possibili per le future normative al di là di 6 Euro.

Per poter migliorare le prestazioni di questo strumento e per poter averne concrete applicazioni, è opportuno tener conto di alcuni importanti risultati nati dall'analisi e utilizzo sperimentale del filtro [15]:

- posizione del filtro a circa 150 cm a valle dal TWC. Tale posizione è stata scelta principalmente per disponibilità di spazio e procedure di installazione semplificate.

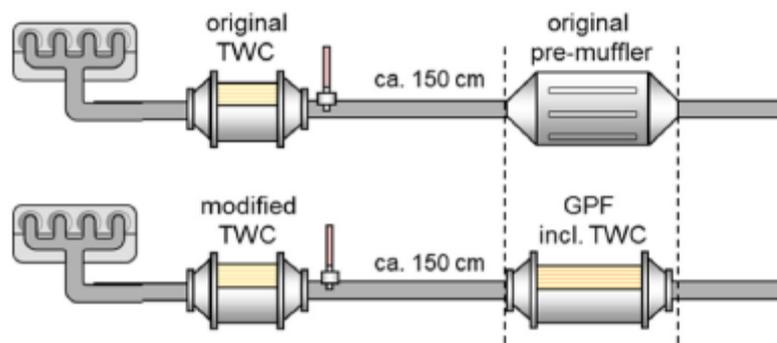


Figura 28: sistema di scarico prima e dopo il montaggio di un GPF.

- Se si utilizza un materiale ad elevata porosità, pari o maggiore al 60%, si contribuisce a minimizzare la caduta di pressione dopo il rivestimento catalitico. Questo aiuta a mantenere sotto controllo i consumi di carburante e quindi le emissioni di CO₂. Un filtro di cordierite costituito da un materiale a bassa porosità (42% porosità) e con una struttura a cella ad elevata area frontale aperta (OPA = open frontal area) è stato presentato come un filtro ben bilanciato in termini di bassa caduta di pressione e alta resistenza.
- Per elevate quantità di catalizzatore (pari a circa 100 g/L), il MPS (= dimensione media dei pori) del materiale cordierite influisce sulla caduta di pressione indotta dal filtro; pertanto è opportuno avere dei valori di MPS tra 15 micron e 25 micron.
- La modifica della densità cellulare ha un piccolo impatto sull'efficienza di filtrazione rispetto a ciò che induce una variazione dello spessore della parete del filtro, che non deve essere mai troppo sottile.
- Poiché le condizioni di gas di scarico come la temperatura e il rapporto di ossigeno sono diverse da quelle dei motori diesel, è previsto un diverso comportamento di rigenerazione. Mentre la temperatura interna del filtro potrebbe aumentare a causa di reazioni esotermiche, cioè fenomeni creati dalla conversione dei gas ad opera del catalizzatore, il segnale di caduta di pressione è colto come l'input per dare inizio alla rigenerazione. Pertanto, solo la combinazione di caduta di pressione e temperatura indica un evento di rigenerazione di successo.
A condizioni stechiometriche (AFR = 14.7), la temperatura interna del GPF che innesca il processo di combustione della fuliggine è di 650 °C. Quando ci si sposta ad una miscela più povera, AFR = 17.0, la riduzione della caduta di pressione è più rapida e la temperatura interna del GPF che "accende" la fuliggine scende a 500 °C. Questo è dovuto al fatto che, l'aumento dell'ossigeno disponibile accelera la combustione della fuliggine.
- L'aumento delle emissioni di CO₂ dovute alla perdita di carico per invecchiamento del filtro è difficilmente rilevabile.
- La perdita di potenza indotta da un GPF usato è trascurabile durante il normale funzionamento del veicolo.

Applicando in via del tutto sperimentale filtri GPF su veicoli a benzina, i risultati ottenuti in termini di emissioni sono stati [15]:

- panoramica delle emissioni registrate:

Milestones of GPF		Recorded Emission
0 km (fresh)	100,000 km	Particle Number and Mass
20,000 km	120,000 km	HC, CO, NOx, NMHC
60,000 km	160,000 km	CO ₂ (associated fuel consumption)

Figura 29: emissioni registrate a differenti distanze.

- Consumi registrati:

After traveling the distance of 160,000 km with a catalyzed GPF	
Fuel Consumption	8.45 l / 100 km
Engine Oil	0.305 l / 10,000 km (total 4.7 liters)

Figura 30.

- Emissioni di gas inquinanti come HC, CO e NO_x durante un ciclo NEDC sono state ben gestite dal filtro catalizzato. Maggiore attenzione è volta al comportamento di guida dinamico sotto al ciclo di guida armonizzato per veicolo leggeri, in Figura 31, 32, 33. Il consumo di carburante di ciascuna prova è rappresentato dall'emissione di CO₂ associata, come illustrato in Figura 34 ed 35. Diventa ovvio che anche un GPF vecchio non impone alcun aumento significativo delle emissioni di CO₂ durante un ciclo NEDC. Dopo il periodo di rodaggio del motore, le emissioni di CO₂ scendono ad un livello di 140 g/km, mentre l'invecchiamento fa alternare le emissioni di CO₂ dei veicoli tra +/- 2,0 g/km. Senza il GPF catalizzato, le emissioni di gas allo scarico tendono ad aumentare nel tempo, questo può essere dovuto all'effetto di invecchiamento del monoblocco TWC. Non appena il GPF è installato, vi è attività catalitica aggiuntiva a favore della riconversione dei gas anche dopo un certo chilometraggio.

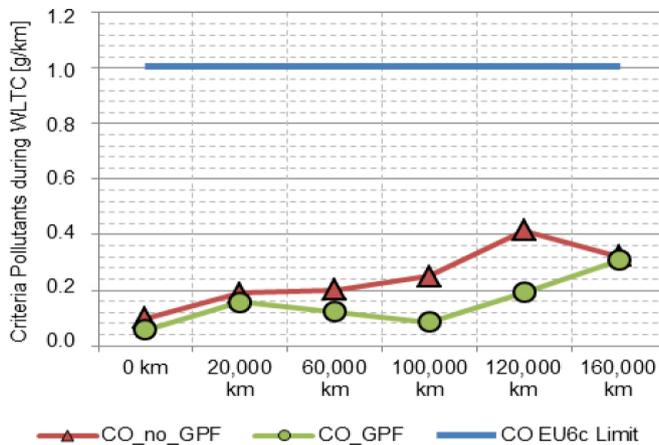
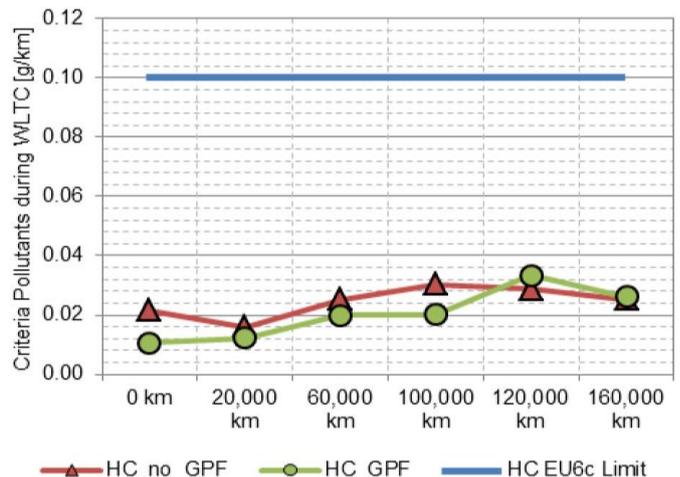


Figura 31: emissioni di CO prima e dopo l'aggiunta del filtro.

Figura 32: emissioni di HC prima e dopo l'aggiunta del filtro.



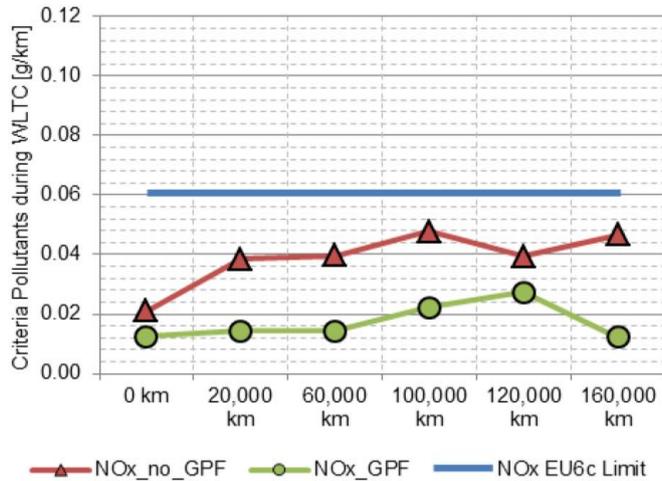


Figura 33: emissioni di NOx prima e dopo l'aggiunta del filtro.

Figura 34: emissioni di CO₂ in un ciclo NEDC.

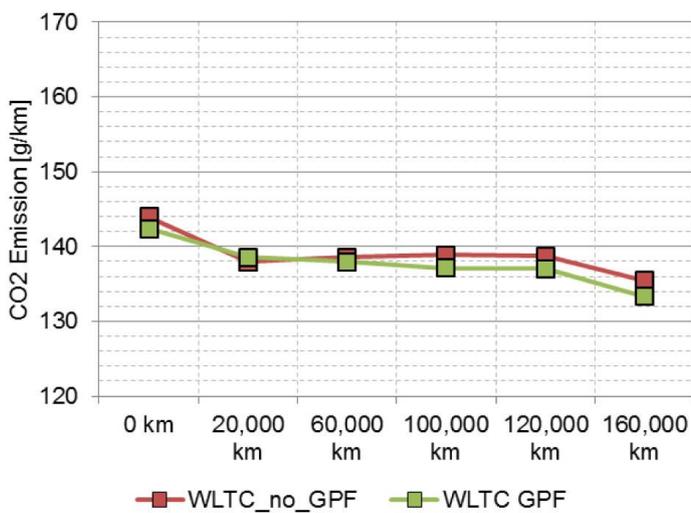
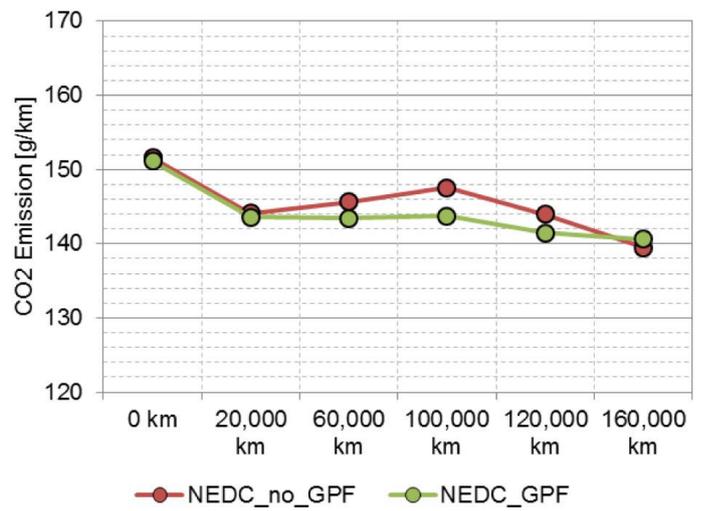


Figura 35: emissioni di CO₂ in un ciclo WLTC.

La Figura 36 mostra che le emissioni di PN del veicolo senza GPF sono già sotto il limite della legislazione Euro 6c. Durante un ciclo WLTC si nota un leggero aumento di PN rispetto al ciclo NEDC che porta i valori di PN maggiormente vicino ai limiti della normativa. Implementando il GPF è possibile diminuire notevolmente tali valori. Inoltre, la filtrazione migliora in modo significativo nel corso della vita utile del filtro stesso. Molto probabilmente l'aumento dell'efficienza di filtrazione è causata da un accumulo di uno strato di cenere generato da residui di olio sulla parete del canale del filtro, ciò è stato confermato dall'Analisi Post Mortem (PMA). Tale miglioramento fornisce fiducia in più in questa soluzione per soddisfare le esigenze future del RDE.

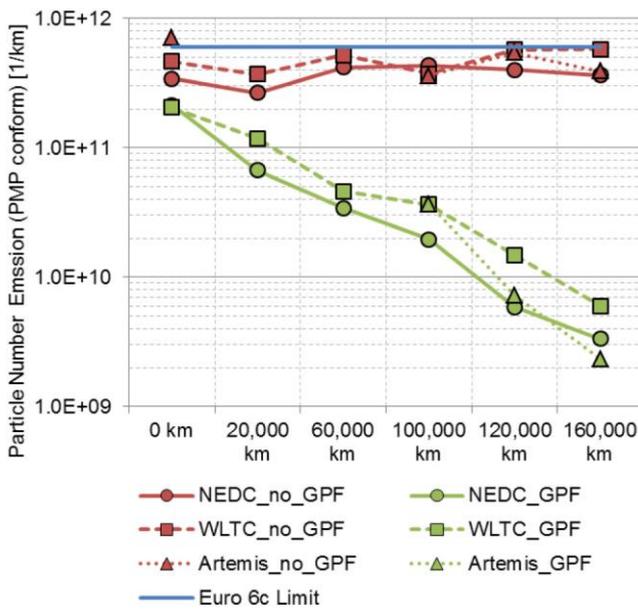


Figura 36: emissioni di PN in assenza e presenza del filtro GPF durante i cicli di prova WLTC, NEDC e ARTEMIS-160.

Infine le Figure 37 e 38 mostrano le emissioni di PN confrontate tra il sistema originale e quello comprensivo di filtro GPF usato, durante un ciclo più aggressivo come il RTS-95 e il NEDC, partendo a -7 ° C. Un GPF è in grado di gestire cicli di guida molto aggressivi inoltre si può far fronte con il motore all'avviamento freddo, a diverse temperature ambiente anche sotto a 0 ° C.

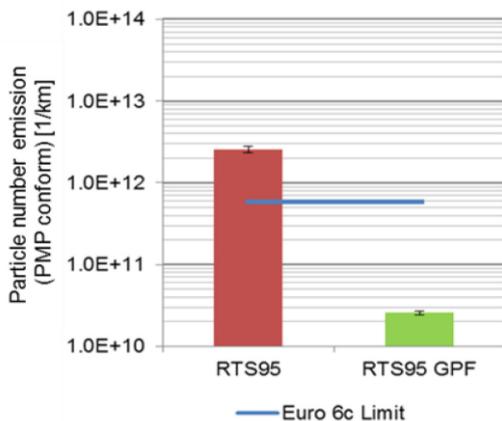


Figura 37: emissioni di PN durante il ciclo RTS 95; prima senza filtro (rosso) e successivamente a GPF installato

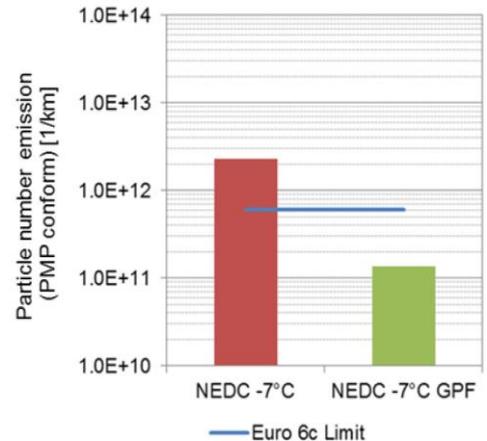


Figura 38: emissioni di PN durante il ciclo NEDC; prima senza filtro (rosso) e successivamente a GPF installato (verde).

I GPF inoltre sono più economici infatti i costi di montaggio sono stati stimati in un range di € 40-130; più semplici, più compatti e più resistenti di quelli usati nei diesel, poiché la maggiore temperatura dello scarico impedisce un accumulo di fuliggine e permette la rigenerazione continua del filtro. L'uso di un GPF ha il potenziale di ridurre il numero di particelle emesse di un fattore di 1000 o più, in maniera efficace ed affidabile in un ampio intervallo di punti operativi del motore e soddisfa tutti i requisiti per lunghi chilometraggi. Il GPF è sicuramente una soluzione notevole per ridurre le emissioni di particelle nocive e per aiutare a mantenere l'aria pulita.

Motori a diesel, filtro DPF e FAP:

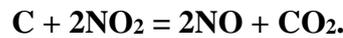
I filtri si dividono in due gruppi, caratterizzati dal tipo di supporto contenuto in essi e da diverse efficienze di rimozione del particolato:

- Sistemi chiusi (Closed traps): l'intero flusso di gas esausti passa più volte attraverso i canali del filtro in maniera alternata da quelli chiusi a quelli aperti; le particelle di particolato vengono intrappolate nelle pareti dei canali, mentre il CO e gli HC vengono ossidati. L'ossidazione del particolato può essere effettuata mediante un processo discontinuo oppure continuo.
- Sistemi aperti (Open traps): possono essere di diversa forma e materiale, ad esempio possono essere costituiti da una schiuma ceramica irregolare all'interno della quale il flusso passa e deposita il materiale carbonioso. La definizione "aperto" deriva dal fatto che, contrariamente a quanto avviene nei filtri chiusi, non tutto il flusso è soggetto a rimozione del particolato in quanto si possono creare dei cammini preferenziali nella schiuma senza che il particolato possa depositarsi; per tale motivo l'efficienza dei sistemi aperti è inferiore a quella dei sistemi chiusi. Il particolato viene ossidato per mezzo di NO₂, prodotto da un opportuno catalizzatore che avvolge la spugna. L'interesse verso i filtri di tipo aperto nasce dalla facilità con la quale essi possono essere montati su autovetture a diesel di vecchia fabbricazione.

I materiali di costruzione di tali dispositivi variano molto in base alla tipologia di filtro e produttore; la geometria di intrappolamento è molto diversificata e comprende monoliti a nido d'ape in ceramica o metallo su cui sono depositati materiali nobili come Palladio, Platino. Entrambi i sistemi possono presentare una rigenerazione discontinua oppure continua, a seconda del meccanismo con cui il particolato viene rimosso dal filtro.

- Filtri a rigenerazione discontinua: prevedono un processo di rigenerazione periodica del filtro dovuto all'accumulo di particelle carboniose, dipendente fortemente dalle condizioni di utilizzo del motore. E' possibile dare un valore indicativo considerando necessaria la rigenerazione dopo circa 400-500 km di utilizzo oppure quando si registra una caduta di pressione prefissata tra monte e valle del filtro. Il processo di rigenerazione consiste nell'ossidazione delle particelle depositatesi nelle strutture del filtro a temperature prossime a 600°C. Si possono avere due diversi meccanismi di rigenerazione: con aggiunta di additivo (cerina) o meno.

- Filtri a rigenerazione continua: utilizzati per autoveicoli leggeri e pesanti dove non è possibile installare filtri antiparticolato a rigenerazione discontinua. Tali sistemi hanno una struttura simile ai discontinui, la caratteristica che li contraddistingue consiste nel fatto che il processo di rigenerazione è di tipo continuo senza necessità di effettuare post-iniezioni di combustibile. Il particolato è ossidato per mezzo di NO₂, ottenuto tramite un catalizzatore ossidante posto a monte del filtro secondo una reazione del tipo:



I requisiti di un filtro "ideale" possono essere così riassunti:

- efficienza di filtrazione > 90%;
- pressione a monte tale da non causare un aumento dei consumi superiore al 5%;
- bassa inerzia termica;
- elevata stabilità termomeccanica con qualunque metodo di rigenerazione;
- affidabilità meccanica pari a quella del motore;
- elevata capacità di ritenzione delle particelle non ossidabili (ceneri);
- costi accettabili per l'applicazione automobilistica;
- assenza di manutenzione;
- durata paragonabile a quella del motore.

Il FAP: questa tipologia di filtri è stata la prima ad essere installata su vetture di produzione. In campo tecnico, il FAP appartiene alla tipologia di filtri che utilizzano vari additivi per essere rigenerati, a base ossidi di cerio, ferro (l'additivo commercialmente è noto con il nome "Eolys"). Essendo i primi storicamente installati a bordo delle autovetture, le problematiche annesse ed i metodi di manutenzione e riparazione sono maggiormente noti. Con il nome di FAP si classifica quindi quella tipologia di filtri che utilizzano un additivo per eseguire la rigenerazione attiva. La combustione del particolato avviene alla temperatura di all'incirca 600-650°C; per raggiungere questi valori si effettuano post iniezioni dopo il punto morto superiore, che bruciano sul catalizzatore ossidante posto davanti al filtro ceramico. Per abbassare la soglia di rigenerazione, il carburante nel sistema è additivato opportunamente, così da ridurre la temperatura di combustione del particolato a 450°C circa. Le emissioni sono filtrate, raccolte e infine bruciate a 450°C ogni 300/500 km, liberando il catalizzatore nel momento in cui l'automobile supera una determinata velocità e per un certo numero di km. La sostanza chimica aggiunta, chiamata *cerina* (ossido di cerio; il cerio è un elemento metallico usato anche nella produzione di alcune leghe di alluminio e nella produzione di acciai), permette la "cattura" da parte del FAP del particolato; inoltre è in grado di abbassare la temperatura a cui il particolato stesso può essere distrutto. Essa è contenuta in un serbatoio a parte, di circa 5 litri sufficienti per 80.000/120.000 Km. Durante il funzionamento la cerina si accumula insieme al particolato e al momento in cui l'apposito sistema di misurazione rileva che la differenza di pressione tra ingresso e uscita del filtro ha raggiunto il minimo consentito, si attiva la procedura di combustione.

Il DPF: questa tipologia di filtro ad accumulo (Diesel Particulate Filter), costituito da una matrice in ceramica porosa a nido d'ape all'interno del quale viene fatto passare il gas, non utilizza l'additivo ma innalza maggiormente la temperatura dei gas di scarico fino a 600-650°C. L'incremento viene effettuato attraverso una serie di post-iniezioni con conseguenti post-combustioni, che in parte avvengono nei collettori di scarico e nei catalizzatori ossidanti; tali valori di temperatura sono più che sufficienti a bruciare completamente il particolato accumulato nel filtro. Inoltre si possono adottare altri provvedimenti per innalzare la temperatura come ad esempio, il blocco della valvola EGR, la chiusura parziale della farfalla dell'aria aspirata (si riduce così notevolmente la pressione di sovralimentazione e si aumenta il carico motore), la chiusura delle palette a geometria variabile del turbocompressore (minima trasmissione del calore dei gas di scarico alle turbine).

Sempre per agevolare il processo di combustione del particolato accumulato, sulle pareti del filtro sono inseriti dei metalli nobili che operano da catalizzatori. Il filtro senza additivo lavora a temperature di innesco rigenerazione più elevate e a causa delle maggiori post-iniezioni richieste soffre di una certa contaminazione (diluizione) da olio motore. In funzione del numero delle rigenerazioni e quindi dello stile guida adottato, l'olio motore può deteriorarsi più rapidamente del normale a causa della diluizione con il gasolio. Alla base della metodologia di rigenerazione del DPF vi è il sistema di iniezione multiple common-rail (MultiJet).

Il sistema è costituito da due componenti principali:

- catalizzatore ossidante;
- filtro per il particolato.

I materiali del filtro e la sua configurazione geometrica costituiscono un elemento chiave nei sistemi DPF, devono essere valutati in base alla contropressione allo scarico, l'efficienza di trattenimento del particolato, la facilità di rigenerazione, la durata nel tempo delle prestazioni offerte ed infine il costo.

Normalmente il materiale utilizzato per realizzarli, è il carburo di silicio che consente:

- elevata efficienza di filtrazione;
- perdita di carico ridotta;
- buona resistenza alle sollecitazioni termiche, meccaniche e chimiche;
- grande capacità di immagazzinamento del particolato per limitare la frequenza della rigenerazione.

La struttura del filtro DPF è realizzata da canali ostruiti alternativamente che permette di ottenere una superficie filtrante estesa. Lo scopo del filtro è quello di forzare il moto dei gas esausti attraverso le pareti porose dell'elemento filtrante permettendo così la rimozione meccanica delle particelle di particolato. Dopo ogni rigenerazione rimane sempre una quota parte di residuo solido (le ceneri) non bruciato che determina la vita di un filtro DPF, normalmente dura fino a 250.000 km ma può ridursi in base al profilo guida del cliente, del consumo di olio del motore e del numero di rigenerazioni.

L'assenza della cenere crea un minore accumulo di cenere nel filtro e ciò è un grosso vantaggio pratico ed economico poiché evita di dover sostituire il DPF alle scadenze chilometriche previste invece per il FAP. Tuttavia, l'accumulo nel tempo di ceneri ineliminabili può ridurre l'efficienza del DPF al punto da rendere necessaria la sua sostituzione a percorrenze molto elevate.

Resta peraltro da chiarire se il biossido di cerio espulso sia pure in minime quantità dallo scarico, (il tutto va moltiplicato per il numero dei veicoli circolanti), possa avere effetti dannosi a lungo termine per la nostra salute.

Un altro aspetto trascurato del funzionamento dei filtri antiparticolato riguarda l'aumento di emissione di CO_2 , infatti tale gas viene prodotto dalla combustione del particolato secondo la reazione: $\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$. Mentre un effetto positivo che si verifica nel DPF, è lo sfruttamento del biossido d'azoto come ossidante per il carbonio (particolato), ottenendo anidride carbonica e ossido d'azoto: $\text{NO}_2 + \text{C} = \text{NO} + \text{CO}_2$.

Sull'efficacia del filtro antiparticolato c'è ancora oggi molta confusione. Si pensa infatti che durante la rigenerazione le particelle intrappolate vengano rilasciate nuovamente nell'ambiente. In questa porzione di non più di 10-15 minuti ogni 300-400 km, il filtro si comporta come se non ci fosse; ma essendo per un tempo relativamente breve, si determina comunque un effetto realmente positivo.

La Figura 39 evidenzia come il DPF sia efficace nella riduzione del particolato qualunque sia la sua dimensione. È quindi del tutto errato pensare che il DPF determini un maggior rilascio di nano particelle; queste sono già presenti all'origine senza DPF. Ciò è ormai ampiamente dimostrato da tutte le indagini sperimentali sia negli USA che in Europa.

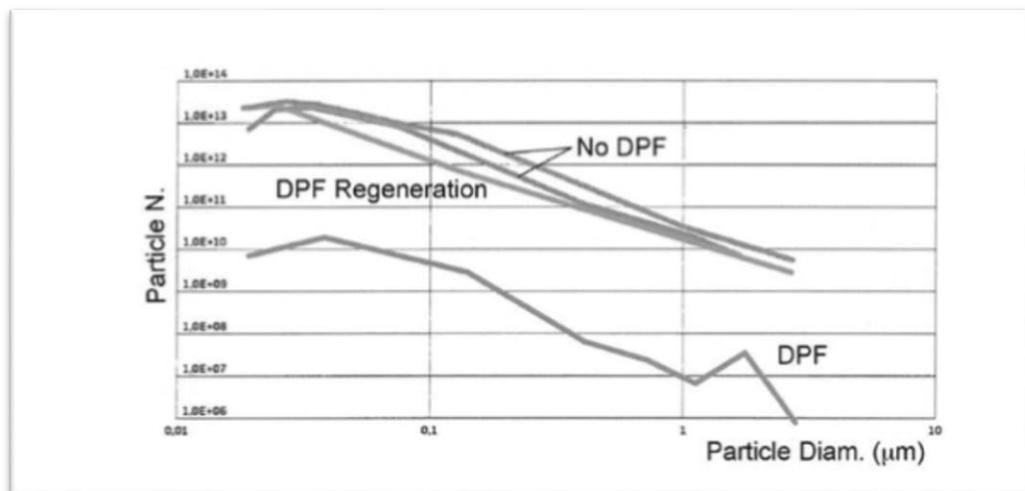


Figura 39: andamento del numero di particelle emesse in assenza e presenza del filtro DPF durante la rigenerazione; valori in scala logaritmica.

SITUAZIONE FUTURA

Il trasporto su strada è in parte responsabile del deterioramento della qualità dell'aria europea e della maggior esposizione dei cittadini ad agenti cancerogeni.

In questo contesto, la politica dell'Unione europea in materia di trasporti mira a diminuire le emissioni di gas serra e quindi, l'assoluto consumo di combustibili fossili, del 20% rispetto ai livelli del 2008 entro il 2030 e del 60% al di sotto dei livelli del 1990 entro il 2050; aumentando l'efficienza del carburante, spostandosi verso combustibili alternativi, sostenendo l'elettrificazione dei trasporti e applicando procedure di prova delle emissioni più complete e reali.

Per raggiungere questi obiettivi l'Unione Europea regola i consumi e le emissioni dei trasporti su strada con un quadro legislativo completo che è stato sviluppato nel corso degli ultimi 40 anni, andando a lavorare su:

- conformità della produzione che garantisce che tutti i veicoli di una stessa tipologia rispettino le specifiche di omologazione;
- conformità in servizio (ISC) e requisiti di durabilità per poter dare garanzie di prova che i veicoli soddisfino la legislazione durante la fase di utilizzo.
- Procedura di omologazione standardizzata che indichi realmente se i limiti di emissioni sono soddisfatti. Le prove di omologazione devono assicurare la riproducibilità delle misure e dovrebbero valutare il comportamento delle emissioni come in condizioni operative normali.

Fissare standard di emissioni di CO₂ per i veicoli è una delle politiche di maggior successo dell'Unione Europea per quanto riguarda la lotta ai cambiamenti climatici. Così facendo si stimola l'innovazione e il mantenimento di un'alta competitività nell'industria automobilistica europea, attraverso la creazione di un mercato di tecnologie innovative e sofisticate che migliorino l'efficienza in termini di consumi. Attualmente il regime temporale degli standard per le automobili è al 2021, quello dei veicoli commerciali leggeri al 2020, mentre non esiste ancora uno standard per i camion. Nuovi standard al 2025 potrebbero fornire una quota significativa di tagli che dovranno essere fatti nel settore dei trasporti per centrare gli obiettivi Clima ed Energia posti al 2030. Tecnologie economicamente efficaci per ridurre le emissioni dei veicoli convenzionali da una media di 95 g/km a 70 g/km sono disponibili e promettono un ritorno dell'investimento entro tre anni grazie ai risparmi sull'acquisto di carburante. Un'intelligente regolamentazione che potrebbe essere in grado di promuovere i veicoli elettrici nel mercato stimolandone la scelta da parte dei possibili acquirenti [16].

Strategia EUROPA 2020^{*1}:

Tra il 1990 e il 2012 le emissioni di gas a effetto serra sono diminuite del 18% a livello dell'UE. Questi progressi sono in parte attribuibili alle politiche in vigore su Clima ed Energia e in parte alla crisi che ha inciso sensibilmente. Un lieve aumento delle emissioni di gas a effetto serra si è registrato durante la temporanea ripresa del 2010. Questo risultato, tanto più rilevante se si pensa che dal 1990 l'economia europea è cresciuta di circa il 45% in termini reali, mostra chiaramente che la crescita economica e le emissioni di gas a effetto serra vanno sempre più scindendosi. Di conseguenza nel 2012 l'economia europea presentava un'intensità di carbonio quasi dimezzata (l'intensità di carbonio = quantità di emissioni per unità di PIL) rispetto al 1990. Le ultime tendenze

lasciano supporre che l'obiettivo Europa 2020 sulle emissioni di gas a effetto serra potrà essere raggiunto. In linea con gli incoraggianti sviluppi degli ultimi anni, la riduzione delle emissioni di gas a effetto serra potrebbe superare l'obiettivo attestandosi al 24% entro il 2020.

I primi obiettivi di emissione di biossido di carbonio delle autovetture nuove sono stati fissati nel 1998/99 attraverso accordi volontari tra la Commissione europea e l'industria automobilistica rappresentata da tre associazioni di produttori: ACEA (European Automobile Manufacturers Association), JAMA (costruttori di automobili giapponesi) e KAMA (Korean Automobile Manufacturers Association).

Due gruppi separati di regolamenti riguardano le emissioni di CO₂: un primo gruppo relativo alle sole autovetture e un secondo proposto invece per gli altri veicoli leggeri come furgoni.

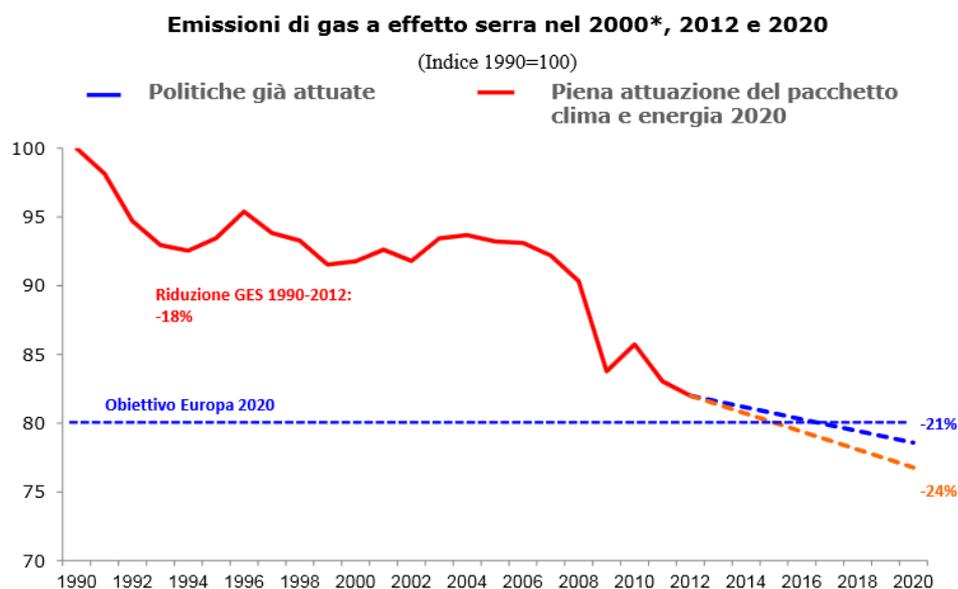


Figura 40: riduzione della CO₂ in presenza della piena attuazione del pacchetto Clima ed Energia 2020.

[*]: Le emissioni di CO₂ sono misurate ancora nel ciclo di prova NEDC, così come i valori limite sono determinati sulla base dei presenti cicli di omologazione.

Il trasporto su strada è la seconda fonte di emissioni di gas ad effetto serra nell'UE, dopo la generazione di energia; esso contribuisce per circa un quinto delle emissioni totali di anidride carbonica.

Questo è uno dei pochi settori in cui le emissioni sono aumentate rapidamente nel corso degli ultimi 20 anni, con l'eccezione del periodo 2008-2010. Nel periodo tra il 1990 e il 2010 le emissioni sono aumentate del 22.6%; questo aumento ha agito come un freno al progresso dell'Unione Europea nella riduzione delle emissioni globali di gas a effetto serra, in calo del 15.4%, infatti le sole autovetture sono responsabili di circa il 12% delle emissioni di CO₂ dell'UE. Anche se ci sono stati miglioramenti significativi negli ultimi anni nella tecnologia dei veicoli, in particolare nel risparmio di carburante che si traduce in minori emissioni di CO₂, questi non sono stati sufficienti per neutralizzare gli effetti dell'aumento del traffico e delle dimensioni di veicoli.

Il regolamento UE sulle autovetture è la misura principale della strategia volta a ridurre le emissioni di CO₂ dei veicoli leggeri (auto e furgoni). Ai sensi del regolamento, le emissioni medie di CO₂ delle automobili non dovevano superare i 130 grammi di CO₂ per km entro lo scorso 2015, introdotti gradualmente dal 2012. Ciò rappresenta una riduzione del 19% rispetto al livello del 2006 (161.3 g di CO₂ per km) e dovrebbe scendere ulteriormente a 95 g/km entro il 2020, una riduzione pari al 20% rispetto al 1990. Almeno il 95% delle nuove autovetture dovrà soddisfare tale requisito entro quell'anno e il 100% dal 2021 in poi. Questo approccio è simile alla legislazione sulle emissioni di CO₂ dei veicoli commerciali leggeri (furgoni) adottato nel 2011. Il raggiungimento di questi obiettivi aiuterà gli Stati membri al conseguimento delle riduzioni di gas a effetto serra che hanno promesso di consegnare entro il 2020 nell'ambito del pacchetto Clima ed Energia. Ogni produttore ottiene un obiettivo annuale sulla base della massa media di tutte le sue nuove auto immatricolate in Europa in un dato anno. A partire dal 2012 i produttori devono garantire che il 65% delle autovetture nuove immatricolate in Europa ogni anno abbia emissioni medie che sono sotto i rispettivi obiettivi. La percentuale sale al 75% nel 2013, ad 80% nel 2014 e al 100% nel 2015; discorso analogo per il processo di ulteriore riduzione da oggi all'imminente 2020.

Curva di valore limite:

Le emissioni indicative sono stabilite per ogni auto in base alla sua massa in relazione alla curva limite; essa è impostata in modo tale che solo la media della flotta è regolata, così i produttori saranno ancora in grado di rendere i veicoli con emissioni sopra i loro obiettivi a norma, sempre se questi sono compensati da altri veicoli che sono sotto ai valori limite. Per le auto più pesanti quindi, sono ammesse emissioni superiori a vetture più leggere, garantendo nel contempo che l'obiettivo di 95 g/km nel 2020 sia soddisfatto.

Al fine di rispettare il regolamento, un costruttore dovrà garantire che la media complessiva ponderata delle vendite di tutte le sue nuove macchine non superi la curva del valore limite. La curva per autovetture viene definita in modo che, rispetto ad oggi, le emissioni dei veicoli pesanti dovranno essere ridotte di più di quelle dei veicoli leggeri.

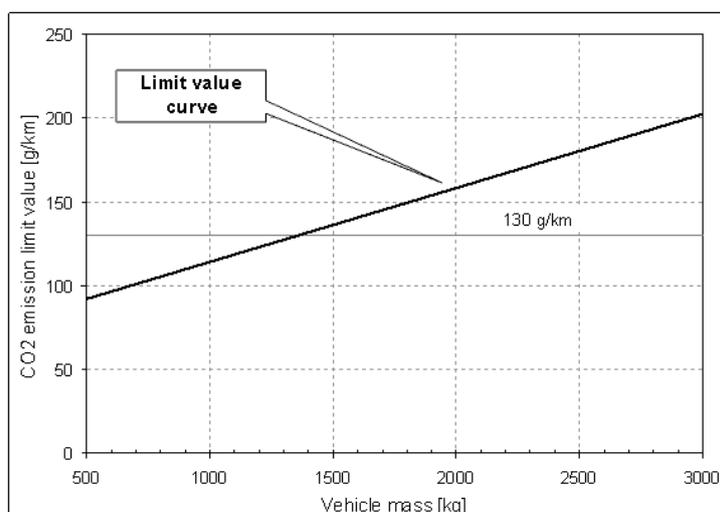


Figura 41: curva di valore limite, relazione tra l'obiettivo di emissioni di CO₂ e la massa del veicolo.

La formula per la curva del valore limite è:

$$\text{Emissioni specifiche di CO}_2 \text{ consentite} = T + a \times (M - M_0).$$

Dove:

- M = massa in kg del veicolo;
- M₀ (massa media dei veicoli) = 1372 kg per gli anni civili 2012-2015. M₀ = 1392.4 kg per il 2016;
- a (coefficiente) = 0.0457 dal 2012 fino al 2019. a = 0.0333 a partire dal 2020;
- T (target delle emissioni di CO₂) = 130 g/km a partire dal 2012 fino al 2019. T = 95 g/km dal 2020.

Dal 2016 il valore di M₀ è adeguato ogni anno in modo da riflettere la massa media delle autovetture negli ultimi tre anni civili; così, il rispettivo obiettivo di CO₂ (130 o 95 g/km) è direttamente applicabile al valore di massa media.

Le autovetture vendute nel 2014, in media, emettevano il 2.6% di emissioni di CO₂ in meno rispetto a quelle vendute nel 2013 e quasi 7 g/km in meno rispetto all'obiettivo 2015, secondo i dati provvisori pubblicati dall'Agenzia Europea dell'Ambiente.

Il livello medio di emissioni di una nuova auto venduta nel 2014 era 123.4 grammi di anidride carbonica per chilometro, significativamente al di sotto dell'obiettivo di 130 g/km. Dal momento in cui il monitoraggio è stato avviato ai sensi della legislazione vigente nel 2010, le emissioni sono diminuite di 17 g/km (12%); ciò significa un consumo di carburante di circa 5.6 litri per 100 km di benzina o 4.9 L/100 km di gasolio.

Entro il 2021 la media da raggiungere gradualmente a partire dall'anno precedente, è 95 grammi di CO₂ per chilometro equivalente ad un consumo di carburante di circa 4.1 L/100 Km di benzina o 3.6 L/100 Km di gasolio.

Gli obiettivi per il 2015 e 2021 rappresentano quindi, una riduzione del 18% e 40% rispettivamente, rispetto alla media del 2007 di 158.7g/km.

Mentre l'obiettivo medio collettivo dell'UE è stato raggiunto prima della scadenza, non è ancora stato confermato se i diversi produttori hanno incontrato i propri obiettivi annuali specifici sulla base della massa media delle auto che vendono [16].

Penalità per le emissioni in eccesso:

Se un produttore non raggiunge il suo obiettivo, cioè se i livelli medi di emissione sono al di sopra del target fissato dalla curva del valore limite, dal 2012 al 2018 si dovrà pagare un'indennità per il mancato soddisfacimento dei limiti. Quanto più un produttore lo supera, tanto più alta sarà la mora che viene calcolata sulla base del numero di grammi per chilometro (g/km) che un veicolo medio genera sopra l'obiettivo, moltiplicato per il numero di automobili registrate dal fabbricante. Una penalità di € 5 a vettura immatricolata si applicherà al primo g/km sopra all'obiettivo, € 15 per il secondo g/km, € 25 per il terzo g/km e 95 € per ogni ulteriore g/km. Dal 2019 ogni g/km di superamento avrà un costo di 95 €.

Per ovviare a queste problematiche e importare soluzioni alternative atte a ridurre i consumi, con conseguenti benefici in termini di inquinamento da anidride carbonica, molti Stati hanno adottato diversi tipi di incentivi per favorire l'acquisto di veicoli elettrici:

- riduzioni della tassa di immatricolazione (ad esempio in Austria è previsto un bonus di € 500 per i sistemi a propulsione alternativi, in particolare per i veicoli elettrici a batterie e ibridi);
- riduzioni delle tasse sui redditi (in Belgio è pari al 30% del prezzo di acquisto con un massimo di € 9.000);
- esenzioni dalla tassa annuale di circolazione (nel Regno Unito e in Germania per i primi cinque anni);
- incentivi all'acquisto (£ 5.000 nel Regno Unito; da € 2.000 a € 6.000 concessi dai Governi Regionali spagnoli).

In molte città i veicoli elettrici sono anche autorizzati a circolare nelle zone a basse emissioni, entrare nelle zone a traffico limitato, parcheggiare gratuitamente nelle aree centrali, utilizzare le corsie preferenziali, nonché esentati dal "road pricing" o dalla "congestion charge" dove applicati. Tali vantaggi sono probabilmente possibili dato il numero limitato di veicoli elettrici sulla strada ma se aumentassero esponenzialmente, le Autorità municipali ed i Governi dovrebbero rivedere la praticabilità di tali politiche.

La legge prevede però anche i cosiddetti super crediti per le auto a basse emissioni. Dal 2013 ad oggi, i "super crediti" per veicoli ad emissioni di CO₂ < 50 g/km nel calcolo della media verranno conteggiati come: 3.5 veicoli nel 2012 e 2013, ridotti a 2.5 nel 2014, a 1.5 veicoli nel 2015 e un veicolo a partire dal 2016 fino al 2019.

Per favorire la diffusione di auto elettriche e ibride plug-in, il regolamento consente super crediti anche dal 2020 al 2022, limitati però a 7.5 g/km. In particolare un'auto a basse emissioni conterà come 2 macchine nel 2020, come 1.67 nel 2021 e come 1.33 nel 2022, per poi essere considerata come tutte le altre a partire dal 2023.

Combustibili alternativi:

La regolamentazione relativa alle emissioni di CO₂ ha fornito sicurezza negli investimenti anche per i fornitori dell'industria automobilistica che hanno consegnato una serie di soluzioni da integrare per i costruttori di automobili. Gli standard del 2025 guideranno lo sviluppo e la diffusione della domanda globale di tecnologie low-carbon avanzate, aiutando ad assicurare ai produttori europei di rimanere competitivi a livello mondiale e non eccessivamente concentrati su soluzioni marginali.

La strategia comunitaria volta ad incoraggiare lo sviluppo di veicoli puliti ed efficienti si basa, per ridurre le emissioni di CO₂ delle autovetture e dei veicoli commerciali leggeri, su un approccio globale per la decarbonizzazione dei trasporti da sviluppare nei seguenti due ambiti:

- promuovere l'efficienza energetica dei veicoli tradizionali (motori a combustione interna) e migliorare ulteriormente la qualità dei carburanti convenzionali (benzina, gasolio);
- favorire lo sviluppo di tecnologie innovative riguardanti sia i carburanti (biocarburanti, carburanti gassosi) che i motori a propulsori alternativi (veicoli elettrici a batteria, veicoli ibridi plug-in, ibridi convenzionali, veicoli a celle di combustibile).

Sono disponibili una serie di tecnologie con un rapporto positivo costi-benefici per migliorare l'efficienza dei veicoli convenzionali e stare ben al di sotto del target di 95 g/km del 2021. Uno studio in corso da parte della Commissione Europea ha individuato numerosi punti da sviluppare per migliorare l'efficienza dei veicoli convenzionali oltre il 2020, di seguito illustrate [17].

- potenziale tecnologico del veicolo stesso;
- sistemi di alimentazione a combustibili alternativi;
- gestione ottimizzata del traffico;
- infrastrutture con diversi mezzi di trasporto;
- comportamento di guida del cliente.

Quasi ogni parte dell'automobile comporta possibilità di applicare misure per ridurre il combustibile; ad esempio il peso del veicolo, la resistenza dell'aria e al rotolamento giocano un ruolo molto importante nella riduzione del consumo di carburante. Mediante l'ottimizzazione di tali parametri, il biossido di carbonio può essere ulteriormente ridotto di circa il 3%. La massima influenza deriva dal miglioramento dell'intera trasmissione, compreso motore e cambio attraverso:

- l'innalzamento del rendimento termico per perfezionamento della formazione della miscela e del sistema di iniezione.
- Una combustione magra a elevato rapporto di compressione.
- La riduzione delle perdite del ciclo motore tramite fasatura variabile delle valvole, iniezione diretta e carica stratificata.
- La riduzione delle perdite meccaniche del motore e dell'intera trasmissione attraverso la scelta di materiali, del design, del tipo di lubrificanti e della gestione termica.
- Un'efficace corrispondenza tra dimensioni del motore e esigenze del veicolo;
- il down-sizing del motore;
- il funzionamento del motore a bassa velocità mediante ingranaggi "intelligenti" auto-operanti che lavorano costantemente nella regione a più basso consumo di carburante.

Con l'uso di queste misure di ottimizzazione sul motore e sulla trasmissione, possono essere realizzate riduzioni di anidride carbonica tra il 5 e il 15%.

Le prestazioni dei motori sono determinate dalle caratteristiche dei combustibili; questo implica che molti parametri di costruzione e di funzionamento siano influenzati dalla qualità del carburante ed anche dalla forma della camera di combustione, dalla modalità di formazione della miscela e di accensione. La qualità del carburante non solo influenza direttamente la coppia del motore ma pure il suo consumo di carburante e le emissioni di gas di scarico dal 5% fino all'8%.

Un alto numero di ottano e di cetano sono necessari per consentire una buona base per una completa combustione, inoltre alcuni idrocarburi insaturi (aromatici e olefine) e preferibilmente molti idrocarburi saturi (paraffine) sono necessari per aumentare il contenuto di idrogeno del combustibile e in tal modo a ridurre le emissioni di anidride carbonica [18].

La soluzione maggiormente adottata negli ultimi anni e che sembra offrire ampi margini di miglioramento, è l'implementazione di sistemi a propulsione alternativi che permettono di ridurre in maniera rilevante i consumi e quindi anche gli inquinanti emessi [19]. I possibili combustibili alternativi da sostituire, almeno in parte ai comuni diesel e benzina sono:

- 1. BIODIESEL:** è un combustibile rinnovabile e biodegradabile che può essere prodotto da oli vegetali e/o da grassi animali, quindi più pulito del diesel.

Il biodiesel è liquido e spesso definito come B100 che viene usato per alimentare i motori ad accensione spontanea. Può essere miscelato e utilizzato in diverse concentrazioni, le più comuni sono: B100 (biodiesel puro), B20 (20% biodiesel 80% gasolio), B5 (5% di biodiesel, 95% gasolio) e B2 (2% di biodiesel, 98% gasolio). Utilizzando il biodiesel come carburante per veicoli aumenta la sicurezza energetica, in quanto provoca danni molto minori del gasolio se versato o disperso nell'ambiente ed è più sicuro perché il punto di infiammabilità è superiore a 130°C, rispetto a circa i 52°C del diesel comunemente usato, infine migliora la qualità dell'aria e dell'ambiente. Riduce le emissioni di gas a effetto serra perché l'anidride carbonica liberata dalla combustione del biodiesel è compensata dall'anidride carbonica assorbita durante la crescita dei semi di soia o di altre materie prime da cui è ricavato; l'uso del B100 riduce le emissioni di oltre il 75% rispetto al gasolio mentre il B20 le riduce del 15%. Inoltre, l'analisi del ciclo di vita di tali carburanti compilato dal National Renewable Energy Laboratory e più tardi da Argonne National Laboratory, ha scoperto che le emissioni di gas a effetto serra prodotte da un'auto equipaggiata con il B100 potrebbero essere inferiori di oltre il 52% rispetto a quelle del diesel. Queste analisi hanno inoltre dimostrato che il biodiesel può ridurre l'uso di petrolio per più dell'88% in tutto il suo ciclo di vita.

- 2. IDROGENO:** è un carburante alternativo senza emissioni che può essere prodotto da diverse fonti energetiche. Gli sforzi della ricerca sono in corso per costruire le infrastrutture di rifornimento e produrre veicoli a celle di combustibile ad H.

Tali veicoli emettono vapore acqueo, aria calda, idrogeno e NOx, in quantità non così preoccupanti per la qualità dell'aria.

ANL ha esaminato gli effetti sull'uso del petrolio, mettendo in luce come l'utilizzo dell'idrogeno riduca la diffusione del petrolio per quasi il 100%.

I benefici ambientali e sanitari sono ancora maggiori quando l'idrogeno è prodotto da fonti a basse o zero emissioni, come l'energia solare, eolica, nucleare e dai combustibili fossili con controlli avanzati delle emissioni e dotati di sistemi di sequestro di carbonio. Il problema nasce quando si parla di stoccaggio del combustibile dal momento che richiede alte pressioni, basse temperature o processi chimici per un compatto immagazzinamento.

Le capacità di stoccaggio dell'idrogeno in veicoli leggeri dovrebbero consentire un'autonomia di oltre 480 km per soddisfare le esigenze dei consumatori. Poiché l'idrogeno ha una densità di energia volumetrica bassa rispetto alla benzina, portarlo su un veicolo

richiede attualmente un serbatoio molto più grande rispetto a quelli utilizzati per i combustibili tradizionali.

- 3. NATURAL GAS:** il gas naturale rinnovabile, noto anche come Bietanolo, è essenzialmente un prodotto gassoso della decomposizione della materia organica cioè miscele di idrocarburi di cui prevalentemente metano (CH₄). Si qualifica come un biocarburante avanzato sotto il Renewable Fuel Standard, chimicamente identico ai gas naturali convenzionali che viene compresso (CNG) o liquefatto (LNG) per utilizzarlo nei veicoli.

Entrambe le tipologie sono di produzione nazionale, relativamente a basso prezzo e disponibili in commercio.

Gas naturale compresso (CNG): si ottiene comprimendo il gas naturale a meno dell'1% del suo volume a pressione atmosferica. Per fornire un adeguato utilizzo pratico, il metano è immagazzinato a bordo del veicolo allo stato gassoso compresso all'interno di cilindri ad una pressione tra 21 MPa e 25 MPa. Il CNG è utilizzato nelle applicazioni sia di veicoli leggeri che pesanti.

Gas naturale liquefatto: detto anche LNG, è il gas naturale nella sua forma liquida. Il LNG viene prodotto purificando il gas naturale attraverso un super-raffreddamento a -163°C per trasformarlo in un liquido. Durante il processo noto come liquefazione, il gas naturale viene raffreddato eliminando la maggior parte dei composti presenti nel carburante. Il gas restante è principalmente metano, con piccole quantità di altri idrocarburi. A causa del costo di produzione relativamente elevato, nonché la necessità di memorizzarlo in costosi serbatoi criogenici, ne è stato limitato un uso diffuso.

L'autonomia di veicoli a gas naturale è in genere inferiore a quella dei veicoli a benzina e a diesel perché, un minor contenuto energetico complessivo può essere memorizzato nello stesso serbatoio.

Sono però in grado di produrre livelli più bassi di alcune emissioni e poiché sistemi di alimentazione a metano sono completamente sigillati, non producono emissioni evaporative. Il gas naturale produce circa dal 6% all'11% in meno di gas serra rispetto alla benzina in tutto il ciclo di vita del combustibile. Le basse emissioni di gas serra prodotte da CNG e LNG sono prevalentemente il risultato di perdite di carburante, non avendo comunque sostanziali differenze sulla quantità prodotta tra l'uno e l'altro. La produzione di metano consuma meno petrolio ed emette meno gas serra rispetto al LNG perché la compressione di gas naturale richiede meno energia di liquefazione.

Inoltre per il gas naturale rinnovabile (RNG), essendo chimicamente identico al gas naturale di origine fossile e producendo però molte meno emissioni di gas serra, si è pensato alla fusione di quantità relativamente piccole con gas naturale fossile, così da fornire benefici in termini di emissione. Nel complesso il CNG e LNG sono entrambi carburanti puliti e buone soluzioni contro gli attuali standard sulle emissioni dei veicoli.

- 4. ETANOLO:** (CH₃CH₂OH) noto anche come alcol etilico; combustibile rinnovabile costituito da vari materiali vegetali noti collettivamente come "biomassa". Più del 95% di una miscela a benzina contiene etanolo, tipicamente E10 (10% etanolo, 90% benzina) non classificato come combustibile alternativo dall'EPA per ossigenare il carburante e ridurre l'inquinamento atmosferico.

L'etanolo è disponibile come E85 (51% etanolo, 83% benzina) che non può essere legalmente utilizzato in veicoli a benzina convenzionali o per miscele di alto livello; recentemente è stato approvato l'E15 (10% -15%) per l'uso in veicoli più nuovi, diventando lentamente disponibile.

L'etanolo come carburante, non è un concetto nuovo e tutt'ora i ricercatori concordano sul fatto che potrebbe compensare sostanzialmente l'uso di petrolio, fino ad un 30% entro il 2030.

Ha un numero di ottano più elevato rispetto alla benzina che aiuta a prevenire il fenomeno del "battito in testa" e garantisce una buona guidabilità; ecco perché benzine con un basso numero di ottano sono miscelate con il 10% di etanolo per ottenere così il valore ottimale di 87.

Come per i carburanti convenzionali, l'utilizzo e lo stoccaggio di miscele di etanolo può provocare emissioni di sostanze inquinanti regolamentate, sostanze chimiche tossiche e gas serra. Tuttavia, rispetto alla benzina, l'uso di miscele di etanolo di alto livello come E85, generalmente comporta livelli di emissioni inferiori di CO₂ nonché di molte sostanze tossiche nocive quali il benzene ma aumenta le emissioni di acetaldeide. L'anidride carbonica rilasciata quando l'etanolo è utilizzato sui veicoli è compensata dalla CO₂ catturata dalle colture utilizzate per rendere possibile la produzione dell'etanolo stesso; di conseguenza si produce meno CO₂ rispetto ai veicoli convenzionali.

Argonne National Laboratory ha dimostrato che in un intero ciclo di vita del combustibile, utilizzando l'etanolo al posto della benzina, si riducono le emissioni di gas serra dal 19% - 52%, a seconda della fonte di energia utilizzata durante la produzione di etanolo. L'utilizzo di etanolo cellulosico offre ancora più benefici, fino ad una riduzione delle emissioni dell'86%.

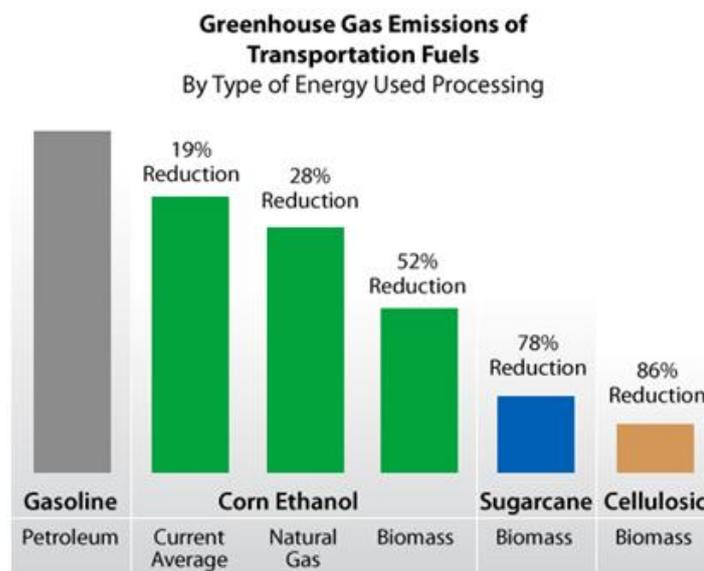


Figura 42: riduzione della CO₂ rispetto ai combustibili fossili tradizionali e per differenti modalità di produzione dell'etanolo.

5. PROPANO: conosciuto anche come gas di petrolio liquefatto (GPL), è un combustibile alternativo ad alta energia di combustione pulita, permettendo inoltre al motore di avere una maggiore durata di vita; specificato anche come HD-5 cioè una miscela di propano con piccole quantità di altri gas, che secondo la Gas Processors Association non devono eccedere il 10%, di cui non più del 5% di propilene e il restante 5% di altri gas, principalmente butano e butilene. Il propano è chimicamente formato da tre atomi di carbonio alcano (C_3H_8) ed è conservato sotto pressione a poco più di 1MPa all'interno di un serbatoio; quando la pressione viene rilasciata, il propano liquido evapora e si trasforma in gas che viene utilizzato nella combustione. Possiede un alto numero di ottano che lo rende una scelta eccellente per motori a combustione interna ad accensione comandata. L'interesse per il propano come combustibile alternativo di trasporto deriva principalmente dalla disponibilità, dall'elevata densità di energia e dal suo costo relativamente basso infatti è il terzo carburante per il trasporto più comune al mondo.

Essendo un combustibile a basso tenore di carbonio, può portare a sostanziali riduzioni di idrocarburi, monossido di carbonio, ossidi di azoto e gas serra.

Le analisi del ciclo di vita, una tecnica utilizzata per valutare l'impatto ambientale di tutte le fasi della vita di un prodotto, ha messo in luce che le emissioni di gas serra si riducono di circa il 10% e, quando è un sottoprodotto della produzione di gas naturale, riduce l'uso di petrolio dal 98% al 99%.

6. ELETTRICITÀ: è considerata un combustibile alternativo sotto emendamento dell'EPA. L'elettricità può essere prodotta da una varietà di fonti di energia in particolare: dal petrolio, dal carbone, dall'energia nucleare e da fonti di energia rinnovabili compresa l'energia idroelettrica, eolica, geotermica, solare, da biomasse e da idrogeno immagazzinato. Si fornisce energia alla rete a bassa tensione pari a 480 V in piccoli impianti di generazione e fino a 22 KV nelle centrali elettriche più grandi; una volta che l'elettricità lascia l'impianto di generazione, la tensione viene aumentata da un trasformatore per minimizzare le perdite di potenza su lunghe distanze. Non appena viene trasmessa attraverso la rete e arriva nelle zone di carico, la tensione è abbassata da trasformatori in cabine di distribuzione (da 69 kV a 4.16 kV) ed infine, per l'utilizzo da parte dei clienti, portata a 120 V e 240 V. I costi dell'energia elettrica possono variare in funzione della zona, del tipo di generazione e del tempo di utilizzo.

I veicoli plug-in sono in grado di trarre energia elettrica da fonti off-board di alimentazione e riparla in batterie; anche se non ancora ampiamente disponibili, i veicoli a celle di combustibile utilizzano l'idrogeno per generare elettricità a bordo del veicolo.

Gli ibridi e i plug-in possono contribuire ad aumentare la sicurezza energetica, migliorare il risparmio di carburante, ridurre i consumi e le emissioni. A seconda della modalità di guida, i veicoli elettrici di oggi (EV) o PHEV in modalità elettrica, possono avere autonomia per più di 160 km consumando solo dai 25 ai 40 kWh, nonostante il risparmio di carburante dei PHEV sia fortemente dipendente dal carico trasportato e dal ciclo di lavoro. Anche se i costi del carburante per le ibride e per i veicoli plug-in sono generalmente inferiori, i prezzi di acquisto possono essere significativamente più alti; tuttavia tenderanno a diminuire con l'aumentare dei volumi di produzione e possono essere in parte compensati sia dai risparmi sui costi di carburante sia dagli incentivi statali.

I veicoli che funzionano solo con l'elettricità non producono emissioni di scarico, sono però da considerare le emissioni associate alla produzione di una quantità maggiore di energia elettrica.

Per i veicoli HEV i benefici in termini di emissioni variano a seconda del modello e del tipo di sistema di alimentazione ibrido.

- Veicoli elettrici ibridi (HEV): motori ibridi convenzionali per i quali l'energia primaria proviene da un motore a combustione interna (ICE). In tali veicoli il surplus di energia e l'energia di recupero derivanti dal movimento del veicolo e dal motore a combustione interna sono catturati elettricamente e riutilizzati. Il veicolo cattura energia normalmente persa durante la frenata mediante il motore elettrico usato come generatore e la immagazzina nella batteria che fornisce energia supplementare durante l'accelerazione.

Il risultato è quello di migliorare l'efficienza energetica del veicolo (in termini di consumi di benzina o gasolio) e quindi ridurre le emissioni di CO₂ del 30% o più rispetto ad un veicolo tradizionale. Gli HEV possono quindi combinare i vantaggi economici del carburante alternativo con la potenza dei veicoli convenzionali.

La potenza extra fornita dal motore elettrico permette di avere motori più piccoli e alimentare carichi ausiliari come sistemi audio e fari. Gli HEV possono essere ibridi parziali o totali, quest'ultimi vengono progettati in configurazioni in serie o in parallelo. Gli ibridi parziali chiamati anche micro ibridi, utilizzano una batteria e un motore elettrico per contribuire ad alimentare il veicolo e per permettere al motore a combustione di spegnersi in fase di sosta (come ad esempio al semaforo), migliorando ulteriormente l'economia di carburante. Questi veicoli in genere costano meno dei veicoli totalmente ibridi ma forniscono meno benefici.

Gli ibridi completi hanno motori elettrici più potenti e batterie più grandi, in grado di guidare l'auto solo per brevi distanze e a basse velocità. Questi sistemi ibridi costano di più, ma offrono più risparmio di combustibile.

Ci sono diversi modi per combinare la potenza del motore elettrico con il motore tradizionale. La modalità in parallelo: collegare il motore e il motore elettrico alle ruote tramite accoppiamento meccanico. Sia il motore elettrico che quello a combustione interna guidano direttamente le ruote. La modalità in serie: utilizza solo il motore elettrico per azionare le ruote ed è tipica dei sistemi plug-in.

- Veicoli elettrici ibridi Plug-in (PHEV): utilizzano batterie per alimentare un motore elettrico ed un secondo a benzina o diesel; usando elettricità dalla rete per una parte o per il tragitto completo, si riducono i costi operativi ed il consumo di petrolio in maniera evidente.

Hanno generalmente batterie più grandi dei veicoli elettrici ibridi, ciò consente di guidare distanze moderate utilizzando solo energia elettrica (da 16 a oltre 64 km); per la guida in città ad esempio, la maggior parte della potenza proviene dal combustibile alternativo. Le potenze dei motori a combustione interna sono sfruttate quando la batteria è in gran parte esaurita, durante una rapida accelerazione o quando è richiesto un riscaldamento intensivo o aria condizionata; altre Plug-in invece

possono funzionare anche in senso opposto, usando l'elettricità per alimentare le apparecchiature "secondarie" del veicolo.

Le batterie possono essere caricate da una sorgente di energia elettrica esterna, dal motore a combustione interna, oppure attraverso la frenata rigenerativa.

il consumo di carburante dipende dalla distanza percorsa tra due ricariche successive della batteria e dalla fonte da cui proviene l'energia elettrica.

Alcune PHEV usano trasmissioni che permettono loro di operare sia in configurazioni in parallelo che in serie.

Infine a fianco a questa tipologia di veicoli vi sono anche le auto elettriche ad autonomia estesa (EREV); per entrambe, la batteria è ricaricata collegandosi con una presa alla rete elettrica (plug-in) che è la fonte primaria di energia.

- Veicoli elettrici (EV): utilizzano una batteria ricaricabile collegandosi alla rete elettrica per immagazzinare l'energia che alimenta il motore, indipendentemente dalla presenza di un motore a combustione interna ausiliare per mantenere carica la batteria o per spostamenti su lunghe distanze. Sebbene la maggior parte della produzione di energia elettrica degli Stati Uniti contribuisce all'inquinamento dell'aria, l'Agenzia di Protezione Ambientale degli Stati Uniti classifica tutti i veicoli elettrici come veicoli ad emissioni zero perché non producono gas di scarico diretto o emissioni. Poiché i veicoli elettrici non usano altro combustibile, il loro uso diffuso potrebbe ridurre drasticamente il consumo di petrolio.

I veicoli elettrici sono in genere più costosi dei veicoli convenzionali ed ibridi, una parte del costo può essere però recuperata attraverso il risparmio di carburante, dal credito d'imposta federale o da incentivi statali.

Attualmente i veicoli elettrici disponibili hanno un intervallo più breve di carica rispetto alla durata di un pieno di veicolo a gas, ad esempio; tipicamente una batteria carica dura per un raggio di oltre 160 km, per i viaggi più lunghi è necessario ricaricarla o sostituirla.

L'efficienza di questo tipo di veicoli varia notevolmente in base alle condizioni di guida: estreme temperature esterne tendono a ridurre la durata della carica perché più energia deve essere utilizzata per riscaldare o raffreddare, alte velocità inducono una richiesta maggiore di energia per vincere una resistenza superiore così come accade per rapide accelerazioni o carichi.

Nonostante i necessari sviluppi e miglioramenti da introdurre al fine di incrementare il tempo di carica e le prestazioni, questi veicoli sono indubbiamente una delle soluzioni che comporterebbe il minor consumo di carburante e quindi emissioni di CO₂.

Secondo la FIA [20], la questione più rilevante dal punto di vista del consumatore è indubbiamente il costo. Attualmente il prezzo d'acquisto della maggior parte dei veicoli elettrici costituisce un ostacolo significativo alla loro commercializzazione azzerandone la competitività di mercato. Non si devono tuttavia dimenticare i vantaggi economici a lungo termine derivanti dalla gestione e manutenzione dei veicoli elettrici.

Ulteriori incertezze per il consumatore riguardano l'efficienza dei veicoli elettrici negli anni, la loro durata e le garanzie disponibili, così come il valore residuo dell'usato. Una delle questioni più importanti in futuro potrebbe proprio essere il rapporto tra la vita utile della batteria e il prezzo del veicolo elettrico usato. Anche il costo dell'energia necessaria per la ricarica dei veicoli elettrici è destinato a crescere nei prossimi anni e potrebbe rappresentare un fattore di incertezza, in particolar modo se accompagnato da una tassa specifica (l'equivalente della tassa sul carburante). Un altro aspetto cruciale è l'autonomia dei veicoli elettrici; sebbene diversi studi e ricerche abbiano messo in luce come l'autonomia dei BEV (Veicoli Elettrici a Batteria detti anche Veicoli Elettrici Puri FEV o più comunemente conosciuto come EV) sia teoricamente sufficiente per molti spostamenti quotidiani, le ricerche di mercato mostrano chiaramente la richiesta da parte dei consumatori di ampliare la capacità di autonomia. Questo è l'obiettivo per cui sono stati progettati i PHEV e i concettualmente simili EREV, veicoli potenzialmente in grado di attrarre una più ampia fetta di mercato rispetto ai BEV. La maggior parte dei BEV restano infatti veicoli con un obiettivo specifico: brevi spostamenti quotidiani e sistematici e all'interno di aree urbane. La questione più importante in questo senso, è quella dell'interfaccia delle stazioni di ricarica che devono ovviamente essere standardizzate per evitare che il consumatore trasporti cavi diversi a seconda del paese o della città in cui utilizza il veicolo. La Commissione Europea ha autorizzato gli enti di standardizzazione europei a definire un sistema comune di ricarica per le auto elettriche così da ampliarne l'ingresso sul mercato.

L'ibrido apre grandi opportunità per il rispetto degli attuali ma soprattutto futuri limiti sulle emissioni inquinanti, specie la CO₂. Oggi scegliere di fare ibridi con motori benzina oppure diesel è una questione di rapporto fra benefici e costi. Le automobili future diventeranno più pulite e non per forza il costo per il raggiungimento dei nuovi obiettivi sarà trasmesso dai produttori agli acquirenti; dipenderà da quanto i costi aggiuntivi di produzione graveranno sui produttori.

Il costo di produzione aggiuntivo medio è stimato a circa € 1100 per le auto nel 2020 e anche se si traduce in un aumento dei prezzi, la valutazione d'impatto della Commissione Europea dimostra che questo incremento verrà superato diverse volte dal risparmio sui costi del carburante nel corso della vita del veicolo.

L'obiettivo del 2020 per le auto, comporta riduzioni di consumi annui per gli utenti del 27% rispetto al target del 2015. Per una vettura media si stima che il consumatore risparmierà fino a 340 € per il primo anno e un totale di € 2904-3836 (a seconda del prezzo del carburante) nel corso della vita della vettura (13 anni). Più alto è il prezzo del petrolio maggiore sarà il risparmio complessivo.

Il "periodo di ammortamento" cioè il tempo necessario per il recupero dei costi aggiuntivi relativi all'acquisto di un veicolo a minori emissioni, in termini di risparmio sui costi del carburante, è inferiore a cinque anni.

Il tutto in termini più globali si traduce, rispetto al 2015/2017, ad un risparmio di quasi € 27 miliardi all'anno nei costi del carburante fino al 2025, salendo a € 36 miliardi nel 2030. Si riuscirebbero a risparmiare quasi 160 milioni di tonnellate di petrolio entro il 2030, un valore di circa € 70 miliardi ai prezzi di oggi. Si eviterebbe anche l'emissione di circa 420 milioni di tonnellate di CO₂ rispetto allo stesso periodo.

Numeri che incentivano sia a migliorare i motori a combustione interna che utilizzano benzina e

diesel, sia il passaggio all'elettrico, agli ibridi plug-in, a celle di combustibile e a veicoli alimentati a gas naturale e a GPL. I produttori saranno liberi di ridurre le emissioni nel modo più conveniente.

Se da un lato sono state acquisite misure per incentivare l'economia di carburante e quindi, indurre un adattamento a tecnologie alternative, dall'altro risulta indispensabile fornire normative e cicli di omologazione che si adattino al progresso. La manipolazione degli obsoleti sistemi di test NEDC utilizzati attualmente produce un allargamento del gap tra le emissioni misurate nei test ufficiali e le performance reali; solo metà dei miglioramenti misurati nelle emissioni e nel consumo di carburante è stato infatti riportato sulla strada.

L'eccesso di flessibilità nei test ha creato un enorme vantaggio per i produttori di automobili che per il raggiungimento dei loro target possono impiegare sui veicoli molte meno tecnologie per il risparmio di carburante. Dal 2008 al 2021 è previsto un miglioramento reale di soli 31 g/km.

Il nuovo test WLTC rimpiazzerà l'ormai screditato sistema corrente, auspicabilmente dal 2017 e richiederà la rivisitazione dei target per puntare ad un obiettivo ambizioso per il 2025, contribuendo ad ottenere i risparmi effettivi di carburante attesi. Una proposta nel 2016 per il 2025, fornirà un periodo sufficiente per l'industria automobilistica a sviluppare e mettere in opera le tecnologie necessarie a centrare i suoi obiettivi.

CICLI DI OMOLOGAZIONE

Il Driving Cycle comunemente rappresenta un insieme di punti di velocità del veicolo esaminato in funzione del tempo, viene utilizzato per valutare il consumo di carburante e le emissioni di inquinanti ed è svolto in maniera normalizzata per essere applicabile a differenti vetture e farne un confronto. Il Driving Cycle è svolto su un banco prova essenzialmente costituito da un dispositivo detto "freno dinamometrico" in grado di applicare una coppia resistente all'asse del motore in prova. Viene così simulato il comportamento dell'effettivo utilizzatore, ossia le ruote del veicolo.

Schematicamente il freno dinamometrico è composto da un rotore collegato all'albero di uscita del motore ed accoppiato ad uno statore tramite forze di natura elettromagnetica od idraulica. Il motore sottoposto alla prova trascina il rotore del freno che a sua volta tende a porre in rotazione lo statore; è dunque determinata la coppia che deve essere applicata allo statore per impedirne la rotazione e che risulta uguale ed opposta a quella sviluppata dal motore.

Nell'ambito dei veicoli commerciali il test di guida viene fatto sul motore misurandone il momento torcente e i punti di velocità, piuttosto che sul veicolo.

Prima che le automobili vengano immesse sul mercato sono testate da un servizio tecnico nazionale in conformità con le normative UE. L'autorità di omologazione nazionale (TAA) concede l'approvazione sulla base di questi Driving Cycle test; una volta che un veicolo è stato approvato in uno Stato membro tutti gli altri appartenenti a questa tipologia possono essere registrati nell'UE. La normativa di omologazione prevede che le auto incontrino i valori limite degli inquinanti nelle normali condizioni d'uso, questo requisito viene attuato tramite l'istituzione di un ciclo di prova che riproduca un reale comportamento di guida così da poter registrare le emissioni e verificare se soddisfano i limiti. Lo stesso sistema di monitoraggio continuerà ad applicarsi per la sperimentazione RDE cioè per il sistema di misurazione portatile delle emissioni.

La sorveglianza e il controllo del rispetto della normativa di omologazione è di competenza degli Stati membri che possono adottare tutte le misure necessarie per garantire che i veicoli siano conformi alla loro omologazione, se ritengono che ci sia stata una violazione della medesima. In concordanza con la legislazione di omologazione i veicoli sono soggetti a controlli di conformità della produzione e anche a misure secondarie volte ad assicurarne la validità in servizio; dove per conformità delle prove di produzione si intendono verifiche su campioni di veicoli di recente fabbricazione per garantire che i loro valori di emissione siano in linea con quelli misurati. Possono essere svolte anche in servizio, quindi su veicoli che sono stati in uso per un certo numero di chilometri o anni per assicurarne performance discrete in termini di produzione di inquinanti. La procedura utilizzata per entrambe le prove è la stessa dei test di laboratorio fatti per l'omologazione.

Sotto alle normative Euro, spetta allo Stato membro che ha testato un veicolo stabilire a quanto ammonta la sanzione per la violazione della procedura di omologazione. In particolare, se venisse accertato che un tipo di veicolo omologato è stato modificato per "aggirare" il ciclo, lo Stato membro che lo ha precedentemente approvato sarebbe responsabile e a suo carico verserebbe la pena. Più in particolare si stabilisce che se uno Stato membro che ha rilasciato l'omologazione CE constata che nuovi veicoli dello stesso tipo non sono conformi, deve adottare i provvedimenti necessari compresa, se necessario, la revoca dell'omologazione.

Cicli di omologazione utilizzati fino al 2016:

Ci sono due tipi di Driving Cycle utilizzati ad oggi, i cicli modali come lo standard NEDC europeo o giapponese JC08 e i cicli transitori come il FTP -75 o Artemide. La differenza sostanziale consiste nel fatto che i cicli modali non sono rappresentativi della guida su strada in quanto caratterizzati da periodi di velocità e accelerazioni costanti, mentre i transitori sono sviluppati con variazioni di velocità tipici delle reali condizioni di guida su strada [21].

1. NEDC: New European Driving Cycle.

	Unità	ECE 15	EUDC	NEDC ^[*]
Distanza	km	0.9941	6.9549	10.9314
Tempo totale	s	195	400	1180
Tempo di inattività	s	57	39	267
Velocità media (inclusi gli stop)	km/h	18.35	62.59	33.35
Velocità media di guida (esclusi gli stop)	km/h	25.93	69.36	43.10
Velocità massima	km/h	50	120	120
Accelerazione media	m/s ²	0.599	0.354	0.506
Accelerazione massima	m/s ²	1.042	0.833	1.042

Tabella 2: valori caratteristici del ciclo NEDC.

[*]: Quattro ripetizioni di ECE 15 seguite da una di EUDC.

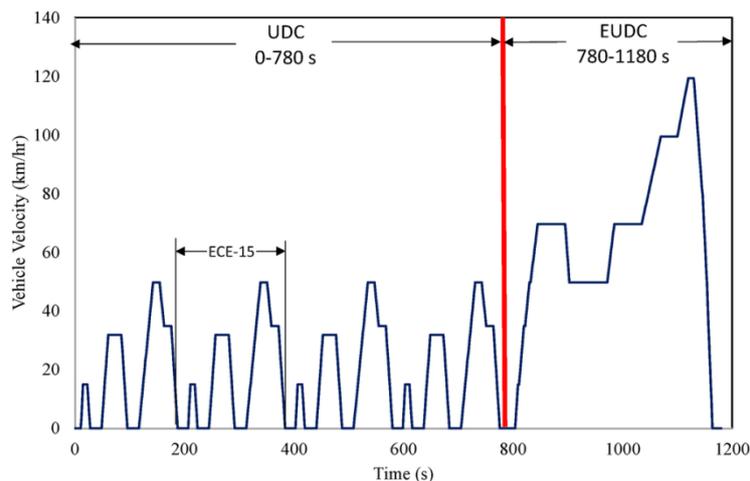


Figura 43: ciclo NEDC.

Il NEDC è utilizzato come ciclo di riferimento per omologare i veicoli in Europa fino alla normativa EURO 6. Prevede una sessione di prova di 1180 secondi (20 minuti) che avviene appunto, sul banco a rulli; 780 secondi sono dedicati al percorso urbano (ECE), ripetuto quattro

volte, che risulta quindi essere la parte del ciclo caratterizzata da bassa velocità del veicolo, basso carico del motore e basse temperature dei gas di scarico.

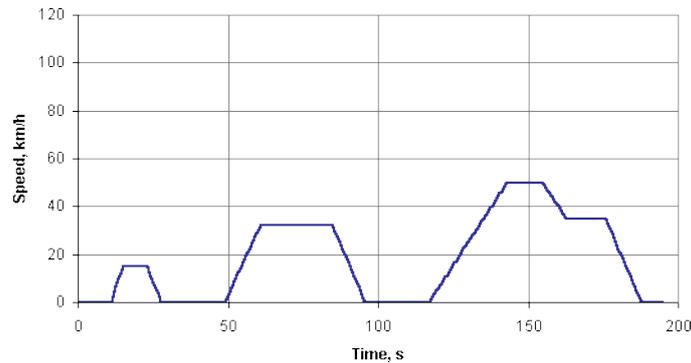


Figura 44: parte ECE.

A ciò seguono 400 secondi dedicati a quello extraurbano (EUDC) durante il quale la velocità massima di 120 km/h viene raggiunta per 10 secondi con una media finale di 33.6 km/h.

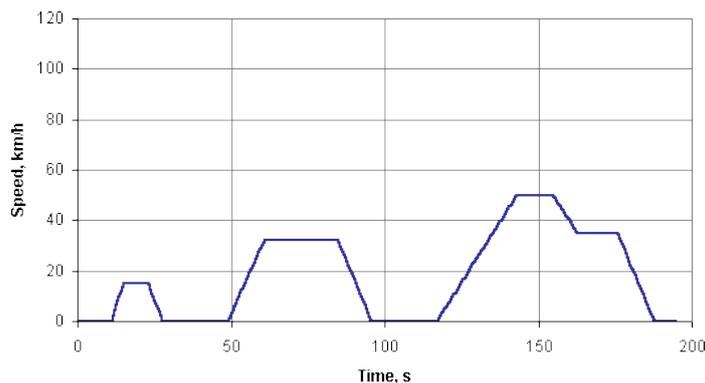


Figura 45: parte EUDC.

Non è un ciclo conforme alle reali condizioni di guida poiché sottostima in maniera rilevante le emissioni inquinanti e i consumi. Infatti:

- le emissioni di CO₂ da cui poi viene calcolato il corrispettivo consumo di carburante, vengono misurate con la vettura su di un banco prova a rulli, rendendo di fatto impossibile replicare gli effetti della resistenza al rotolamento degli pneumatici ed "addolcendo" i valori d'inerzia legati alla massa dell'auto. La vettura utilizzata per le omologazioni può anche essere un veicolo prototipale, non proprio vicino a quello che sarà il modello di serie. I lubrificanti utilizzati nel motore sono specifici per il rilevamento e non corrispondono a quelli poi impiegati dai consumatori. L'aria condizionata non è accesa e talvolta nemmeno installata nel veicolo. La batteria è completamente carica di modo che l'alternatore non si attivi durante i test, tanto da essere il più delle volte addirittura scollegato. Gli pneumatici: strette coperture a basso attrito, peraltro gonfiate con pressioni elevatissime; si sigillano gli spazi tra le lamiere e i componenti rilevanti per l'aerodinamica con nastro adesivo.
- Acceleratore, cambio e freni sono gestiti automaticamente.

2. FTP-75 CYCLE: Federal Test Procedure.

Distanza	11.04 miles (17.77 km)
Durata	1874 s
Velocità media	21.2 mph (34.1 km/h)
Velocità massima	56.7 mph (91.25 km/h)

Tabella 3: valori caratteristici del ciclo FTP-75.

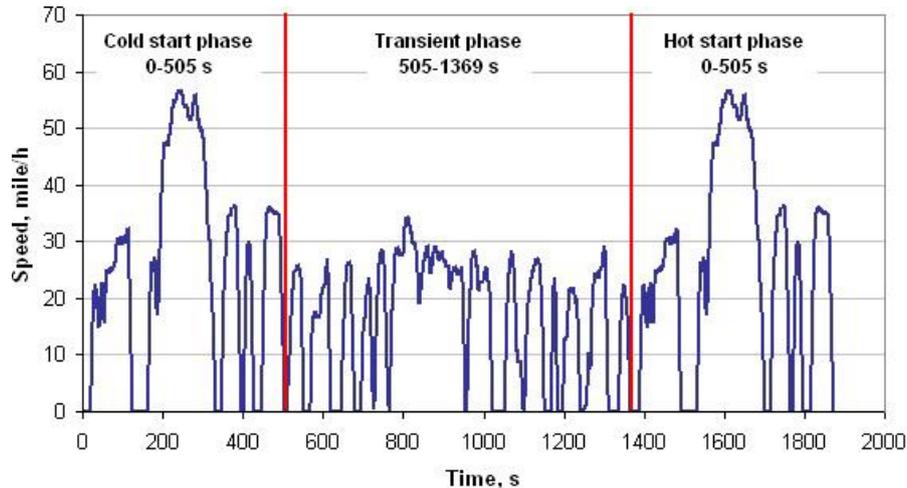


Figura 46: ciclo FTP-75.

È stato creato dall'EPA per rappresentare un ciclo di guida non lineare che include cioè, una parte urbana con alcune fermate e una parte di guida autostradale; sempre utilizzato per certificare il consumo di carburante e le emissioni dei veicoli leggeri. Si riconoscono tre fasi principali: una partenza a freddo transitoria (temperatura ambiente 20 - 30°C) che copre un intervallo di tempo di 505 s, successivamente si incontra un tratto stabile da 506 a 1372 s, poi una sosta a caldo fino ad un minimo di 540 s o ad un massimo di 660 s, infine il ciclo si conclude con una porzione di percorso transitorio con partenza a caldo della durata di 505 s.

Le emissioni sono considerate separatamente in funzione delle tre parti del ciclo ed espresse in g/km. I fattori di ponderazione sono 0.43 per la prima parte, 1.0 per la seconda e 0.57 per la fase finale.

L'EPA ha aggiunto successivamente altri tre cicli per poter garantire di coprire le diverse modalità di guida: US06 è complementare al precedente andando a rappresentare un comportamento di guida molto più aggressivo, raggiungendo una velocità massima di 130 km/h e una più alta curva di accelerazione; il SC03 ha la particolarità di svolgersi alla temperatura ambiente di 35°C per poter valutare le emissioni e i consumi con l'aria condizionata accesa e infine, vi è il "cold cycle" ovvero la versione a temperatura esterna di -7°C del FTP-75.

3. JC08 CYCLE: Japanese Driving Cycle.

Distanza	8.17 km
Durata	1204 s
Velocità media	24.4 km/h
Velocità media:	24.4 km/h (34.8 km/h escluso di inattività)
Velocità massima:	81.6 chilometri all'ora
Rapporto di carico:	29.7%

Tabella 4: valori caratteristici del ciclo JC08 CYCLE.

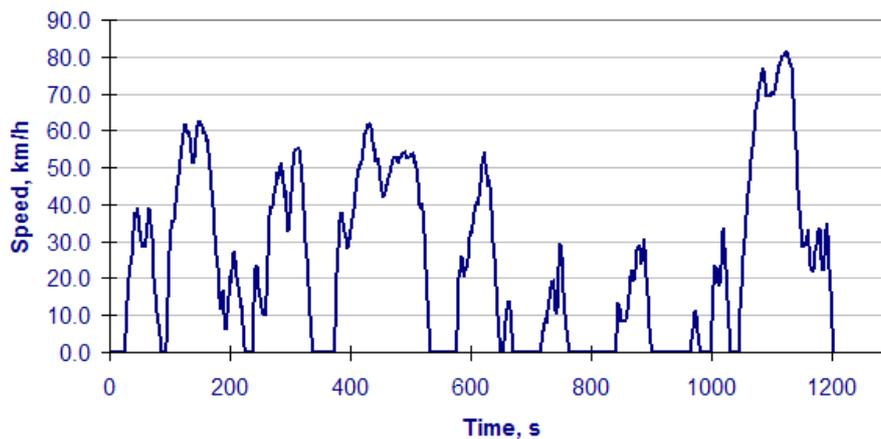


Figura 47: ciclo JC08 CYCLE.

È un ciclo transitorio molto più esigente dei precedenti. Il test rappresenta la guida in una situazione di traffico congestionato, compresi periodi di funzionamento del motore al minimo e frequenti alternanze di accelerazioni e decelerazioni. La misurazione viene effettuata due volte, sia con un avviamento a freddo sia con uno a caldo. Il ciclo viene utilizzato per la misurazione delle emissioni e determinazione del consumo di combustibile per i veicoli a benzina e a diesel.

Produttori e standard di emissioni dei veicoli sono spesso sotto il microscopio, il problema di solito ruota intorno a quanto accuratamente test e cifre dei costruttori riflettono i reali standard di guida; oggi infatti si discute di due nuove procedure di omologazione che da qui a poco sostituiranno gli ormai invalidanti test in laboratorio usati nonostante le lacune, si tratta dell'RDE e più avanti, del WLTP. Strumenti pratici e chiari che mirano a portare conformità tra realtà e sperimentazione ma soprattutto a contenere ulteriormente gli inquinanti maggiormente sotto mirino quali ossidi di azoto, particolato ultrafine e anidride carbonica. I test RDE all'inizio si abbineranno al classico ciclo NEDC, per poi abbandonarlo e rimanere come verifica aggiuntiva con la completa adozione del ciclo WLTC. Nella fase iniziale di implementazione e perfezionamento, le prove in strada non

avranno valore di omologazione ma di semplice monitoraggio e analisi, come spiega l'Unione Europea. La procedura RDE integrerà la macchina testata, guidata all'esterno e su una strada vera secondo schemi di accelerazione e decelerazione casuali, con sistemi portatili di misura delle emissioni (PEMS) che verranno su di essa installati. L'obiettivo è ridurre le differenze attualmente osservate tra emissioni misurate in laboratorio e quelle ottenute in condizioni reali.

Altro problema consiste proprio nella standardizzazione delle procedure di omologazione: temperatura, pressione atmosferica, umidità, percorso devono assumere valori costanti per tutti. Per questo allo studio ci sarebbero dei fattori correttivi da applicare ogni volta in cui si verificano delle variazioni in modo da uniformare le condizioni al contorno dei test. A questo risponderà il WLTP Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedures o WLCT Worldwide harmonized Light duty Test Cycle sviluppato dall'UNECE con l'obiettivo di stabilire delle norme uguali in tutto il mondo. L'Europa, come gli altri Paesi, dovrà quindi adottarlo dal 2017. A differenza del NEDC fornirà pure un valore realistico della CO₂ emessa per poter quantificare quanto le autovetture si discostino dai target da raggiungere entro il 2021. Anche con l'arrivo del WLTP, ogni Paese potrà comunque mantenere le proprie verifiche post-omologazione in strada, nel caso europeo l'RDE [22].

Normativa RDE e test di prova con PEMS on board:

Affinché si rendano le prove di emissione più riflessive del modo reale di guida, le nuove procedure di test sono attualmente in fase di studio per essere introdotte già dal prossimo anno.

Le nuove proposte sono incluse sotto la sigla RDE Real Driving Emissions, le quali incorporano ai tradizionali test di laboratori anche una prova su strada utilizzando un sistema di misura portatile PEMS Portable Emission Measuring Systems per registrare le emissioni reali; il tutto condotto sotto il concetto regolatore del "non superamento" (Not to Exceed o NTE). Si vuole quindi introdurre un approccio più realistico e rigoroso per le prove sulle emissioni in futuro.

La Commissione europea attualmente sviluppa test complementari per poter verificare le emissioni nel corso di una vasta gamma di condizioni operative normali. Sono stati indagati cicli di guida random in laboratorio con condizioni dinamiche casuali e test per le emissioni su strada. Un generatore di ciclo random (RCG) in base alla combinazione di tratti brevi di percorso scelti tra quelli contenuti nel data-base utilizzato per sviluppare il WLTC, riproduce normali dinamiche di guida per quanto riguarda accelerazione, decelerazione, condizioni di minimo e velocità. Tuttavia, test con PEMS su strada sono in grado di coprire una gamma più ampia di condizioni di guida e risultano più efficaci per limitare l'applicazione di strategie di manomissione e rilevazione delle emissioni.

Per consentire ai costruttori di adeguarsi gradualmente alle prescrizioni RDE, le relative procedure di prova dovrebbero essere introdotte in due fasi, come concordato nel processo "CARS 2020". In un primo periodo transitorio le procedure di prova dovrebbero applicarsi esclusivamente ai fini del monitoraggio, non avendo quindi implicazioni sul certificato di conformità rilasciato dall'autorità di omologazione nazionale (TAA). Successivamente all'arrivo della normativa WLTP, ogni Paese potrà comunque mantenere verifiche secondarie in strada, nel caso europeo l'RDE. È tutt'ora in corso un'analisi per stabilire limiti regolamentari di emissioni (NTE) applicabili nei test, questi limiti definiscono il piccolo grado di deviazione accettabile per poter tenere conto anche delle incertezze di misura presenti nella prova su strada. Un'unica prova RDE alla prima omologazione

non può coprire l'intera gamma di condizioni di guida ecco perché sono dunque necessarie le prove di conformità in servizio per avere una panoramica globale di tutte le varianti. Si mira infatti a convalidare l'omologazione di un veicolo solo se, farà parte di una famiglia di prove PEMS; applicabile tra l'autunno 2017 e l'autunno 2018 come secondo passo del progetto RDE. Diversi aspetti chiave devono ancora essere messi a punto, in particolare le date esatte di attuazione, i limiti NTE per tutti gli inquinanti e diverse condizioni sotto cui testare i veicoli [22, 23].

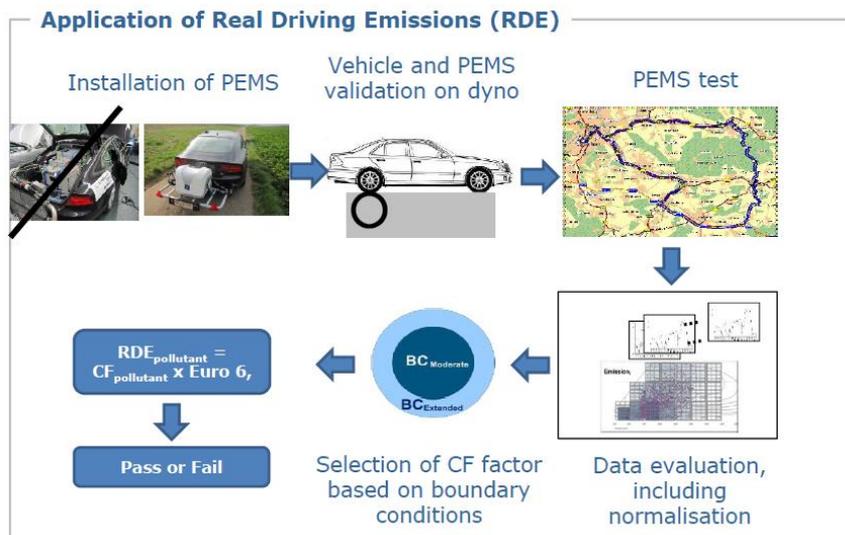


Figura 48: procedura RDE.

Next Steps	Targets
Definition of NTE limits for gaseous pollutants	2015 *
Drafting of in-service-conformity RDE procedure for gaseous emission	2015 *
Drafting of PN RDE test procedure	2015 *
PN NTE Limits	2015 *
Monitoring period	January 2016 *
Application of NTE limits for gaseous emissions (NO _x) and PN	September 2017/2018 *

* still under discussion

Tabella 5: implementazione della procedura RDE.

La Commissione prevede di adottare la normativa RDE attraverso la graduale introduzione in quattro step di azioni e normative [24].

1. La prima parte consta di una serie di prove di sperimentazione per misurazione gli inquinanti gassosi sulla base della procedura stessa.
2. Si procede poi al completamento di alcune specifiche quali:
 - ✓ limiti NTE ($NTE = Euro\ 6 \times CF \times TF$);
 - ✓ valutazioni dei fattori di conformità CF e delle funzioni di trasferimento TF (entrambi sono dipendenti dalla probabilità di avere specifiche condizioni di guida);
 - ✓ analisi degli errori (strumenti di misura e variazioni del tragitto);
 - ✓ condizioni complementari dinamiche al contorno.

3. Definizione della modalità di misurazione e dei parametri necessari per valutare il numero di particelle di particolato:
- ✓ uso del ciclo PN-PEMS o di un ciclo random (novembre 2015);
 - ✓ fattori di conformità: inizialmente valutati sulla base dell'incertezza di misura degli strumenti adottati e in seguito invece, rispetto alla miglior tecnologia disponibile (dicembre 2015);
 - ✓ partenza a freddo: tutt'ora sotto indagine se incorporarla nel test.
4. Conformità in servizio:
- ✓ ordinamento amministrativo (marzo 2016);
 - ✓ regole tecniche (ottobre 2016);
 - ✓ determinazione delle funzioni di trasferimento.

Si prospetta di applicare tale regolamentazione non più tardi di settembre 2017, per quanto riguarda l'utilizzo di prove PEMS su strada ed entro il 2019 per l'implementazione dei limiti NTE per tutti gli inquinanti e per ogni nuovo veicolo.

La Tabella 6 riassume i passaggi effettuati dall'emanazione della procedura RDE fino alla sua imminente applicazione e ai possibili sviluppi futuri della normativa.

DATA DI INIZIO	AZIONE	NOTE
2015	Test RDE per gli NOx a scopo di monitoraggio e analisi dati.	1
2016	Conclusione del metodo di prova per la misurazione del PN e inizio del collaudo per il monitoraggio e analisi dati. Procedura per tenere conto di partenze a freddo e di fenomeni di rigenerazione durante i test.	2,3
2017	Fase 1: fattore di conformità di 2.1 per gli NOx, applicato a tutte le automobili diesel recentemente omologate e passaggio alle limitazioni sul numero di particelle per tutti i veicoli. Procedura di prova RDE conclusa anche per tutti gli altri inquinanti compresa la CO ₂ .	4,5
2018	Fase 1: il fattore di conformità si applica a tutte le auto diesel registrate e il limite su PN si applica a tutti i veicoli immatricolati.	3
2019	Fase 2: il fattore di conformità	4

	1.5 per gli NOx si applica a tutte le automobili recentemente omologate e il limite su PN per tutti i veicoli. Test RDE svolti per tutti gli inquinanti.	
2020	Fase 2: fattore di conformità 1 si applica a tutte le auto diesel registrate e il limite su PN si applica a tutti i veicoli immatricolati. Test RDE per tutti gli inquinanti. Proposta della Commissione per la normativa Euro 7 rivolta ai veicoli leggeri e pesanti a diesel e alle auto a benzina.	5
2025	Limiti Euro 7 applicati a tutti i nuovi veicoli omologati.	6
2026	Limiti Euro 7 applicati a tutti i nuovi veicoli registrati.	6

Tabella 6.

Note:

1. A partire dalla fine del 2015, i risultati dei test dovrebbero essere pubblicati per tutti i modelli.
2. Questa è stata la data accettata dalla Commissione del progetto "Cars 2020".
3. L'esclusione di questi fattori porta ad una sottostima delle emissioni nei test RDE.
4. AECCA ha dimostrato che questo limite può essere soddisfatto dai sistemi SCR senza modifiche hardware, i quali dovrebbero essere montati su tutte le auto diesel in quanto solo così possono rispettare i test RDE e i limiti di Euro 6.
5. Le procedure di prova RDE devono essere estese a tutti gli inquinanti dell'aria e alla CO₂ al fine di garantire che tutte le emissioni siano al di sotto dei limiti imposti da normativa.
6. Euro 7 dovrebbe dare un contributo a garantire che i limiti possono soddisfare EUwide [25].

I fattori di conformità temporanei introdotti dal 2017 rientrano nella normativa Euro 6d-TEMP, che riprende i limiti sugli inquinanti stipulati da Euro 6b con l'aggiunta di test RDE a fianco del tradizionale NEDC, almeno inizialmente; portando il valore di CF a 1.5 si passa ad Euro 6d, dal 2019 in poi. Alla normativa Euro 6 tra il 2017 e il 2020 quindi, si aggiungerà il ciclo WLTC e come fabbisogno supplementare, un test su strada con valori limite da rispettare in funzione dei CF. Una volta che il veicolo è testato sotto il ciclo armonizzato, viene approvato se rispetterà i limiti imposti dalla normativa vigente in quel dato periodo. Successivamente viene ulteriormente valutato su strada quindi in base alla procedura RDE e potrà essere omologato se rispetterà gli NTE limits, i quali vengono definiti a partire dai valori imposti dalla normativa presente (tipo Euro 6) e maggiorati dei fattori CF per poter tenere conto del fatto che su strada si avranno comunque emissioni lievemente maggiori di quelle ottenute in laboratorio.

Requisiti generali per la verifica con PEMS:

- Le prestazioni sotto normativa RDE dovrebbero essere valutate tramite veicoli di prova operanti su strada quindi in normali schemi di guida, condizioni e carichi. La prova RDE deve essere rappresentativa della realtà.
- Il costruttore deve dimostrare all'autorità di omologazione che il veicolo scelto, il modello di guida, le condizioni e i carichi utili sono rappresentativi per tutta la famiglia di veicoli. Il carico utile e l'altitudine devono essere analizzati ex-ante per stabilire se le condizioni sono accettabile per il test RDE.
- L'autorità di omologazione propone un viaggio di prova completo con lo scopo di selezionare correttamente la parte di tracciato in zona rurale, urbana e in autostrada, basandosi anche su dati cartografici.
- Veicoli dove la raccolta di dati ECU influenza le emissioni o le prestazioni sono considerati non conformi.

Procedura di prova per testare le emissioni di veicoli con sistema portatile on-board (PEMS):

Componenti costituenti il PEMS:

- analizzatori per determinare la concentrazione di sostanze inquinanti nei gas di scarico;
- uno o più strumenti/sensori per stimare la massa del flusso allo scarico;
- un sistema di posizionamento globale per determinare posizione, altitudine e velocità del veicolo;
- eventuali altri sensori non appartenenti al veicolo che valutano la temperatura ambiente, l'umidità relativa e la pressione dell'aria;
- fonte di energia autonoma per alimentare il PEMS.

L'installazione del PEMS deve essere in posizione tale da ridurre, durante la verifica, perdite di calore, interferenze elettromagnetiche, l'esposizione a shock, vibrazioni e variazioni di temperatura e non indurre una pressione maggiore allo scarico. È necessario che la strumentazione sia ragionevolmente piccola e leggera per facilitare l'installazione e l'ancoraggio al veicolo, minimizzando allo stesso momento modifiche sulla massa e sulle prestazioni aerodinamiche. Inoltre è opportuno che non venga modificata la natura dei gas di scarico né la geometria del tubo di scappamento. Altro accorgimento riguarda i connettori, i quali devono essere termicamente stabili alle temperature dei gas di scarico previste durante la prova. Si raccomanda di non utilizzare connettori in elastomero per colmare il collegamento tra lo scarico del veicolo e il tubo di collegamento. Se tecnicamente fattibile, qualsiasi estensione per facilitare il collegamento con il misuratore di portata massica dello scarico deve avere un'equivalente, o più grande sezione trasversale, rispetto al tubo di scarico.

Grandezze misurate durante una prova:

- concentrazione in Ppm di THC, CH₄, NMHC, CO, CO₂, NO_x, PN (numero di particelle/m³) e portata del flusso dei gas di scarico in kg/s;
- umidità (%), temperatura (K) e pressione ambiente (kPa);
- velocità (km/h), latitudine (gradi), longitudine (gradi) e altitudine (M) del veicolo;

- temperatura dei gas di scarico e del refrigerante* (K),
- velocità* e momento torcente* del motore e coppia sugli assi motori (Nm);
- posizione del pedale (%)*;
- flusso di combustibile* e di aria aspirata* (g/s);
- temperatura dell'aria* di mandata e dell'olio* motore (K).

Tutti i dati sono misurati e registrati ad una costante frequenza di 1.0 Hz o eventualmente, superiore. I valori dei parametri contrassegnati da *, sono emessi dalla ECU e resi disponibili ad una frequenza maggiore per evitare problemi di campionamento.

[Prima dell'avvio del test, è prelevato sia un campione di carburante sia di lubrificante per verificare che siano accettabili dalle normative RDE. Campioni che vengono conservati per almeno un anno.]

Selezione dei veicoli sulla base di criteri tecnici:

- Tipo di propulsione (ad esempio ICE, HEV, PHEV);
- tipo di carburante (benzina, gasolio, GPL..);
- processo di combustione (due tempi, quattro tempi);
- numero di cilindri e loro configurazione (ad esempio in linea, a V, radiale..);
- cilindrata del motore: il costruttore del veicolo deve specificare un valore V_{max} (= massima cilindrata del motore di tutti i veicoli all'interno della famiglia di prova PEMS). Le cilindrature dei motori dei veicoli della famiglia di prove PEMS non devono differire più del -22% dal V_{max} , se tale valore è ≥ 1500 ccm e -32% se $V_{max} < 1.500$ ccm.
- Tipologia di alimentazione del motore (ad esempio iniezione indiretta, diretta o in combinazione);
- tipo di sistema di raffreddamento (aria, acqua, olio);
- metodo di aspirazione (come aspirazione naturale, sovralimentazione);
- sistema di post trattamento;
- ricircolo dei gas di scarico (con o senza, interno/esterno, raffreddato/non raffreddato, bassa/alta pressione).

Test run:

La sequenza di viaggio effettuata esclusivamente durante giorni lavorativi e su strade asfaltate, comprende un tratto urbano, uno rurale e uno autostradale. L'operazione è eseguita, in buona parte, in maniera continua, se non che il tragitto rurale può essere interrotto da brevi periodi di funzionamento in condizioni di guida urbana, così come il transitorio in autostrada è caratterizzato da interruzioni dovute all'attraversamento dei caselli.

- Tratto urbano: copre circa il 34% del tragitto totale a velocità < 60 km/h. Circa poiché può variare dell'ordine di $\pm 10\%$ non scendendo mai sotto al 29% del totale. La velocità media (comprese le soste) deve mantenersi tra 15 e 40 km/h mentre i periodi di arresto, definiti per velocità inferiori a 1 km/h, è opportuno che rappresentino almeno tra il 6 e il 30% della durata del servizio urbano per tempistiche pari a 10 s o più. Se un periodo di sosta dura più di 180 s le emissioni registrate sono escluse dalla valutazione.

- Tratto rurale: copre il 33% del tragitto totale a velocità compresa tra 60 e 90 km/h.
- Tratto autostradale: copre il 33% del tragitto totale a velocità > 90 km/h non superando di norma i 145 km/h e coprendo comunque un range di velocità tra il limite inferiore e i 110 km/h, poiché la velocità del veicolo deve essere superiore a 100 km/h per almeno 5 minuti. Il limite superiore può essere valicato per una tolleranza di 15 km/h e per non più del 3% della durata totale del tratto autostradale.

I limiti di velocità locali restano ovviamente in vigore durante un test con PEMS, nonostante le violazioni dei limiti di velocità locali di per sé, non facciano invalidare i risultati.

La durata del viaggio è compresa tra i 90 e i 120 minuti e la distanza minima di ogni tratto è di 16 km.

L'inizio e il punto finale non devono differire, nella loro altezza sul livello del mare, di oltre 100 m.

Campionatura:

- Il campionamento delle emissioni deve essere rappresentativo e condotto in posizioni dello scarico dove i gas sono ben miscelati e l'influenza dell'aria ambiente a valle del punto di campionamento è minima. Se possibile, le emissioni devono essere campionate a valle del misuratore di portata massica dello scarico, rispettando una distanza di almeno 150 mm. Se il motore è dotato di un sistema di post trattamento il campione di scarico deve essere prelevato a valle del sistema.
Durante il test di un veicolo pluricilindrico e collettore di scarico ramificato, l'ingresso della sonda di campionamento deve essere verso valle in modo da assicurare che il campione sia rappresentativo delle emissioni medie allo scarico di tutti i cilindri. In motori pluricilindrici aventi gruppi distinti di collettori, questi sono combinati a monte della sonda di campionamento.
Per le rilevazioni sulle particelle inquinanti i campioni devono essere prelevati dal centro del flusso di gas di scarico. Se si utilizzano più sonde per il campionamento delle emissioni quella relativa alle particelle deve essere posta a monte delle altre.
- La linea di campionamento deve essere riscaldata a 463 ± 10 K (190 ± 10 °C) per la misura degli idrocarburi e/o a circa di 333 K (60 °C) per la misura di altri componenti gassosi con o senza intercooler, così da evitare condensazione e garantire adeguate efficienze di penetrazione dei vari gas. Il tempo di permanenza del campione nella linea di campionamento deve essere inferiore a 3 s fino a raggiungere la prima diluizione o il contatore di particelle.
- Sono escluse dalla valutazione finale le emissioni generate al cold start cioè entro i primi 5 minuti dall'inizio della combustione del motore. Se la temperatura del liquido refrigerante può essere attendibilmente determinata, il periodo di avviamento a freddo si conclude una volta che tale liquido ha raggiunto i 343 K (70 °C), in ogni caso senza superare i 5 minuti.

- Non è consentito combinare dati appartenenti a test diversi o modificare e/o rimuoverne parti di uno stesso test.
- Dopo aver stabilito la validità dei risultati delle emissioni ottenuti da una singola prova, si procede utilizzando i metodi di normalizzazione EMROAD o CLEAR.
- Se durante un determinato intervallo di tempo le condizioni ambientali si riferiscono ai valori di alta temperatura e altitudine, le emissioni vengono divise per un valore di 1.6.
- Nel caso in cui un viaggio sia stato condotto al di sopra della quota consentita e l'altitudine è stata misurata solo con un GPS, ne risulta necessaria la verificata della coerenza dei dati ed eventualmente la correzione. La coerenza deve essere valutata confrontando altitudine, longitudine ottenute dal GPS con valori indicati da un modello digitale del terreno o mappa topografica in scala adeguata. Misure che si discostano di oltre 40 metri dall'altitudine raffigurata nella mappa devono essere corrette e contrassegnate manualmente. Della velocità del veicolo determinata dal GPS ne è verificata la coerenza, calcolando e confrontando la distanza totale del viaggio con misure di riferimento ottenute, da un sensore certificato dal regolamento, dalla centralina convalidata o alternativamente da una rete stradale digitale o carta topografica. Il file originale deve essere conservato e tutti i dati corretti devono essere contrassegnati. La distanza totale del viaggio con correzione deve differire in misura non superiore al 4% dal valore di riferimento. Se i dati del GPS non soddisfano questo requisito e nessuna altra fonte affidabile di velocità è disponibile, i risultati del test devono essere annullati.
- Il campionamento, la misurazione e la registrazione dei parametri devono iniziare prima dell'avvio del motore e continuare per tutta la durata della prova del veicolo, dovendo raggiungere una completezza superiore al 99%. Il motore può essere fermato e riavviato senza però fermare il campionamento delle emissioni. Eventuali segnali di allarme o di malfunzionamento del PEMS devono essere documentati e verificati. La misurazione e registrazione dei dati può essere interrotta per non più dell'1% della durata totale del viaggio quindi per un periodo consecutivo inferiore o uguale a 30 s, solo ed esclusivamente in caso di perdita di segnale o di manutenzione del sistema. La fine della prova è raggiunta quando il veicolo ha completato il viaggio e la combustione del motore ha fine. Il motore è considerato "disattivo" se una delle seguenti condizioni è verificata: velocità del motore < 50 rpm e/o portata massica dei gas di scarico < 3 kg/h. Ogni emissione istantanea o ciascuna misura del flusso di scarico ottenuta a combustione spenta deve essere registrata.
- Prima di normalizzare i risultati sono effettuate procedure di correzione per un adeguato calcolo delle emissioni a distanza specifica, delle concentrazioni dei componenti inquinanti, della portata massica allo scarico, della velocità del veicolo e di altri dati.

- Correzione delle concentrazioni dei componenti inquinanti sulla base del tempo di trasformazione dei relativi analizzatori:

$$c_{i,c}(t - \Delta t_{t,i}) = c_{i,r}(t)$$

dove: $C_{i,c}$ concentrazione dell'i-esimo componente completo di correzione, $C_{i,r}$ concentrazione grezza del medesimo componente e $\Delta t_{t,i}$ è il coefficiente temporale di trasformazione della componente di misurazione dell'analizzatore.

- Correzione della portata massica allo scarico sulla base del tempo di trasformazione del misuratore di flusso:

$$q_{m,c}(t - \Delta t_{t,m}) = q_{m,r}(t)$$

dove: $q_{m,c}$ e $q_{m,r}$ sono i valori di portata del flusso di scarico corretto e grezzo rispettivamente, $\Delta t_{t,m}$ rappresenta il coefficiente temporale di trasformazione del flussometro di massa.

- Correzioni delle emissioni in funzione dell'umidità dell'aria:

se le misurazioni sono fatte in ambiente secco, i dati registrati devono essere convertiti nei relativi valori in ambiente umido.

$$C_{wet} = k_w * C_{dry}$$

dove: C_{wet} e C_{dry} sono rispettivamente la concentrazione di un inquinante in ambiente umido in ppm o %/volume e in ambiente secco, k_w è invece il fattore di correzione che risulta essere in funzione dell'umidità dell'aria, del rapporto molare di H e della concentrazione di CO_2 in ambiente secco e umido.

Le emissioni di NO_x non subiscono correzioni per temperatura e umidità ambiente.

- Formule per la determinazione della concentrazione delle specie inquinanti:

Nel caso di taratura dello strumento NMC-FID (Non-Methane Cutter in combination with a Flame-Ionisation_Detector) con propano:

$$C_{CH_4} = \frac{C_{HC(w/oNMG)} \times (1 - E_M) - C_{HC(w/NMG)}}{(E_E - E_M)}$$

$$C_{NMHC} = \frac{C_{HC(w/NMG)} - C_{HC(w/oNMG)} \times (1 - E_E)}{r_h \times (E_E - E_M)}$$

Nel caso di taratura con metano:

$$c_{CH_4} = \frac{c_{HC(w/NMC)} \times r_h \times (1 - E_M) - c_{HC(w/oNMC)} \times (1 - E_E)}{r_h \times (E_E - E_M)}$$

$$c_{NMHC} = \frac{c_{HC(w/oNMC)} \times (1 - E_M) - c_{HC(w/NMC)} \times r_h \times (1 - E_M)}{(E_E - E_M)}$$

dove: $C_{HC(w/oNMC)}$ e $C_{HC(w/NMC)}$ sono rispettivamente la concentrazione di idrocarburi incombusti sorvolando il NMC e fluendoci attraverso, r_h fattore di risposta, E_M e E_E efficienze del metano e dell'etanolo.

- La portata massica istantanea allo scarico può essere calcolata in base alla portata d'aria e di carburante come segue:

$$Q_{mew,i} = Q_{maw,i} + Q_{mf,i}$$

dove: i tre termini rappresentano in ordine, la portata massica istantanea allo scarico, la portata d'aria istantanea in aspirazione e la portata istantanea di combustibile.

- Le emissioni massiche istantanee [g/s]:

sono determinate moltiplicando la concentrazione istantanea della sostanza inquinante in esame [ppm] con la portata istantanea in massa allo scarico [kg/s], entrambe dotate delle relative correzioni sopra descritte. L'equazione risultante è:

$$m_{gas,i} = u_{gas,i} * C_{gas,i} * Q_{mew,i}$$

dove: $m_{gas,i}$ massa dell'i-esima misurazione del componente inquinante gassoso, $u_{gas,i}$ rapporto tra la densità del singolo componente e la densità totale, $C_{gas,i}$ concentrazione dell'inquinante [22, 26, 27].

NTE limits:

Le emissioni di un veicolo, in seguito a quanto stabilito dalla Regolazione (EC) No 715/2007, per tutta la sua durata di funzionamento non devono essere superiori ai not-to-exceed NTE limits [25]:

$$NTE_{pollutant} = CF_{pollutant} \times TF(p_1, \dots, p_n) \times \text{EURO 6} \quad (1)$$

- Euro 6: valore dei limiti imposti da tale normativa;
- CF: l'uso di fattori di conformità indebolisce la regolazione Euro fino a quando non verranno posti a valori < 1 consentendo quindi di soddisfare gli obiettivi. La ricerca dimostra che i sistemi SCR esistenti possono permettere di configurare i limiti con un fattore di conformità del 1.5.

Pollutant	Mass of oxides of nitrogen (NO _x)	Number of particles (PN)	Mass of carbon monoxide (CO) ⁽¹⁾	Mass of total hydrocarbons (THC)	Combined mass of total hydrocarbons and oxides of nitrogen (THC + NO _x)
$CF_{pollutant}$	2,1	to be determined	-	-	-

(1) CO emissions shall be measured and recorded at RDE tests.

Valori applicabili da settembre 2017.

Mass of oxides of nitrogen (NO _x)
$1 + margin$ with $margin = 0,5$

Da gennaio 2020.

Margin: è un parametro che tiene conto delle incertezze di misura aggiuntive introdotte dalle apparecchiature PEMS, modificato a seguito del miglioramento della qualità della procedura stessa o del progresso tecnico.

- Le funzioni di trasferimento (TF) sono un concetto nuovo introdotto sulla base della legislazione europea RDE per poter attribuire differenti fattori di conformità ad un test o a parti di esso, a seconda di alcune caratteristiche ambientali o dinamiche misurabili (ad esempio la guida transitoria descritta da parametri quali il prodotto tra velocità del veicolo e l'accelerazione $v * a$, carico del veicolo, temperatura ambiente ecc..).
- La funzione di trasferimento TF (p_1, \dots, p_n) è impostata ad 1 per l'intera gamma di parametri p_i ($i = 1, \dots, n$).

Se la funzione di trasferimento TF (p_1, \dots, p_n) è modificata, ciò dev'essere fatto in maniera tale da non essere dannoso per l'impatto ambientale e per l'efficacia delle procedure di prova RDE.

$$\int TF(p_1, \dots, p_n) * Q(p_1, \dots, p_n) dp = \int Q(p_1, \dots, p_n) dp$$

- dp rappresenta l'integrale su tutto lo spazio dei parametri p_i ($i = 1, \dots, n$);

- $Q(p_1, \dots, p_n)$ è la densità di probabilità di un evento corrispondente ai parametri p_i ($i = 1, \dots, n$) in guida reale.

I valori sanciti dalla formula (1) devono essere rispettati per tutto il test e le condizioni di almeno uno dei due punti di seguito devono essere soddisfatte:

$$M_{gas,d,t} \leq NTE_{pollutant} \text{ e } M_{gas,d,u} \leq NTE_{pollutant} \quad (*)$$

$$M_{w,gas,d} \leq NTE_{pollutant} \text{ e } M_{w,gas,d,U} \leq NTE_{pollutant}$$

[*]: la prima relazione è in riferimento al metodo EMROD mentre la seconda al metodo CLEAN.]

Condizioni al contorno per PEMS Testing:

- Carico utile del veicolo e massa di prova:
il carico utile del veicolo è costituito dal guidatore e dalle attrezzature per il test, compreso il montaggio e i dispositivi di alimentazione. Allo scopo di testare differenti situazioni, possono essere aggiunti alcuni "pesi" purché la massa totale del carico utile di base e di quello aggiuntivo non superi il 90% della somma della massa dei passeggeri e del "pay-mass".
 - **Massa dei passeggeri:** da intendersi una massa nominale di 75 kg a seconda della categoria del veicolo, moltiplicata per il numero di posti a sedere compreso, in caso ci siano, le postazioni per i membri dell'equipaggio e il numero di posti in piedi ma non comprendendo il conducente.
 - **Massa del conducente:** massa nominale di 75 kg localizzati alla guida.
 - **Pay-mass:** differenza tra il massimo tecnicamente ammissibile e la massa in ordine di marcia aumentata di quella dei passeggeri e delle attrezzature opzionali.
- Condizioni ambientali:
 - **Altitudine**
Condizioni di moderata altitudine: ≤ 700 m (livello del mare).
Condizioni di elevata altitudine: > 700 m e ≤ 1300 m (livello del mare).
 - **Temperatura**
Condizioni di temperatura moderata: ≥ 0 °C e ≤ 30 °C.
Condizioni di elevata temperatura: ≥ -7 °C e < 0 °C oppure > 30 °C e ≤ 35 °C.
- Condizioni dinamiche:
ivi compreso l'effetto della pendenza della strada, del vento, della dinamica della guida (come accelerazioni e decelerazioni) e di sistemi ausiliari per le emissioni e per i consumi del veicolo. La verifica delle normali condizioni dinamiche è effettuata dopo il test utilizzando i dati registrati dal PEMS ed è condotta in due fasi:
 - verifica della dinamica del test nel complesso [27]: condizioni al contorno supplementari per l'assenza/eccesso di dinamica nella guida.
 - Troppo dinamica/aggressiva \longrightarrow limite del 95% percentile di $v \cdot a$.
 - Troppo dolce \longrightarrow RPA (relative positive acceleration) = $\int v \cdot a + dt / D >$ valore minimo.
 1. Determinazione dei dati di pre-elaborazione, controllo della qualità, filtraggio dei valori di velocità:
I parametri dinamici come l'accelerazione, $v \cdot a_{pos}$ (= velocità effettiva del veicolo per l'accelerazione positiva superiore a $0,1 \text{ m/s}^2$) o l'accelerazione

relativa positiva (RPA), sono determinati con una precisione dello 0.1% sopra ai 3 km/h e ad una frequenza di campionamento di 1 Hz. Tale precisione richiesta è generalmente soddisfatta dai segnali di velocità della ruota.

La traccia della velocità dev'essere controllata per le sezioni "difettose" o non plausibili, poiché risulterebbe caratterizzata da salti e valori mancanti. In una seconda fase i valori di accelerazione sono classificati in ordine crescente per determinarne il valore di risoluzione a_{res} (valore minimo di accelerazione >0). Se $a_{res} \leq 0.01 \text{ m/s}^2$ la velocità del veicolo è abbastanza accurata; se compresa tra tale valore e la soglia di risoluzione sarà necessario filtrare i dati; mentre il test risulterà non valido se a_{res} è maggiore della soglia di risoluzione.

2. Calcolo della distanza, accelerazione e $v * a$:

Incremento della distanza per campione di dati: $d_i = v_i / 3.6$ (i : time step, 1 to N , numero totale di campioni, v_i : velocità attuale all' i -esimo time step).

$a_i = (v_{i+1} - v_{i-1}) / (2 * 3.6)$ con a_i accelerazione all' i -esimo time step (per $i=0$, $v_{i-1} = 0$; mentre per $i = N$, $v_{i-1} = 0$).

$(v * a)_i = v_i * a_i / 3.6$ prodotto tra l'accelerazione e la velocità attuale del veicolo al i -esimo step time (m^2/s^3 o W/kg).

3. Categorizzazione dei risultati e classificazione in ordine crescente della velocità del veicolo:

v_i : velocità all'intervallo temporale i .

Tutti i set di dati con $v_i \leq 60 \text{ km/h}$ appartengono al range urbano, quelli con $60 \text{ km/h} < v_i \leq 90 \text{ km/h}$ al rurale e infine per $v_i \geq 90 \text{ km/h}$ si rientra nel range autostradale.

Il numero di set di dati con i valori di accelerazione $a_i > 0,1 \text{ m/s}^2$ deve essere più grande o uguale a 150 in ogni range di velocità.

v_k è la velocità media del veicolo calcolata per ogni range di velocità = $(\sum_i v_{i,k}) / N_k$ con $k = \text{rurale, urbano, autostradale}$.

4. Calcolo di RPA e di $v * a_{apos}$ [95] per range di velocità (95th percentile di $v * a_{apos}$):

i valori di $(v * a)_{i,k}$ per ogni range di velocità devono essere classificati in ordine crescente per ogni set di dati con $a_{i,k} \geq 0.1$ e il numero totale di questi campioni è pari a M_K .

I valori percentili sono così assegnati:

il valore più basso di $v * a_{apos}$ ottiene il percentile pari a $1 / M_K$, il secondo $2 / M_K$, il terzo $3 / M_K$ e i valori più alti $M_K / M_K = 100\%$.

$(v \cdot a_{\text{apos}})_{k_95}$ è associato al $(v \cdot a_{\text{apos}})_{j,k}$ per $j/M_k = 95\%$ non può essere soddisfatto, $(v \cdot a_{\text{apos}})_{k_95}$ è calcolato per interpolazione lineare tra due valori consecutivi: j e $j+1$ per $j/M_k < e >$ del 95% rispettivamente.

$RPA_k = \sum_j (\Delta t \cdot v \cdot a_{\text{apos}})_{j,k} / \sum_i d_{i,k}$ (con $j = 1$ to M_k , $i = 1$ to N_k e Δt differenza di tempo pari a 1 secondo, M_k il numero di campioni con accelerazione positiva per azioni rurali, autostradali ed urbane e N_k il numero totale di campioni).

5. Verifica della validità del test:

risulta non valido:

se $v_k \leq 74.6$ km/h e $(v \cdot a_{\text{apos}})_{k_95} > (0,136 \cdot v_k + 14,44)$;

se $v_k > 74.6$ km/h e $(v \cdot a_{\text{apos}})_{k_95} > (0,0742 \cdot v_k + 18,966)$.

Oppure:

se $v_k \leq 94.05$ km/h e $RPA_k < (-0,0016 \cdot v_k + 0,1755)$;

se $v_k > 94.05$ km/h e $RPA_k < 0,025$.

Per prove valide si può procedere alla normalizzazione dei dati [26, 27].

- L'elaborazione dei dati per poter essere confrontati con i valori imposti dalla normativa (NTE) può essere svolta tramite due diversi metodi; entrambi sono progettati per ridurre l'influenza del conducente, del percorso e del traffico sul risultato del test.

EMROAD: Moving Averaging Window Method [28, 30, 31, 32];

CLEAR: Power Based Method [29, 30, 31, 32].

EMROAD:

Il metodo di calcolo EMROAD basato sulla Moving Averaging Window (MAW) fornisce una panoramica reale delle emissioni prodotte durante un test su strada con dispositivo PEMS. Il test è diviso in sottosezioni (finestre) e il trattamento statistico successivo mira ad individuare quali finestre sono adatte per valutare le prestazioni del veicolo sotto normativa RDE.

La normalizzazione delle finestre è condotta confrontando le relative emissioni di CO₂ a distanza specifica con una curva di riferimento. Il test è completo quando comprende un numero sufficiente di finestre che coprono differenti aree di velocità (urbane, rurali, autostradali).

Fase 1. Segmentazione dei dati ed esclusione delle emissioni ad avviamento a freddo;

Fase 2. calcolo delle emissioni di sottoinsiemi o "finestre " (punto 1);

Fase 3. identificazione delle finestre normalizzate (punto 2);

Fase 4. verifica della completezza e normalizzazione della prova (punto 3);

Fase 5. calcolo delle emissioni usando le finestre normalizzate (punto 4).

Punto 1:

Il principio del calcolo è il seguente: la massa delle emissioni o emissioni massiche non sono calcolate per la serie completa di dati ma per sottoinsiemi, la cui lunghezza è determinata in modo che si abbia una corrispondenza con la massa di CO₂ emessa dal veicolo durante il ciclo di laboratorio di riferimento, per una stessa distanza percorsa. Questi sottoinsiemi utilizzati poi per il calcolo della media dei dati relativi alle emissioni, vengono indicati come "finestre medie"; il trattamento statistico ha lo scopo di scegliere tra queste, quelle utili e normalizzate e lo si fa effettuando un confronto con la curva caratteristica di CO₂.

Dati di emissioni relativi alle partenze a freddo o a tratti a motore spento, alla taratura degli strumenti e a tratti a velocità minore di 1m/s, non sono considerati per il calcolo della massa di CO₂ e per la distanza delle finestre medie. La massa (o il numero di particelle) delle emissioni devono essere determinate integrando le emissioni istantanee in g/s (o #/s per PN) calcolate come specificato al sottotitolo: Campionamento.

Vehicle speed versus time - Vehicle averaged emissions versus time, starting from the first averaging window

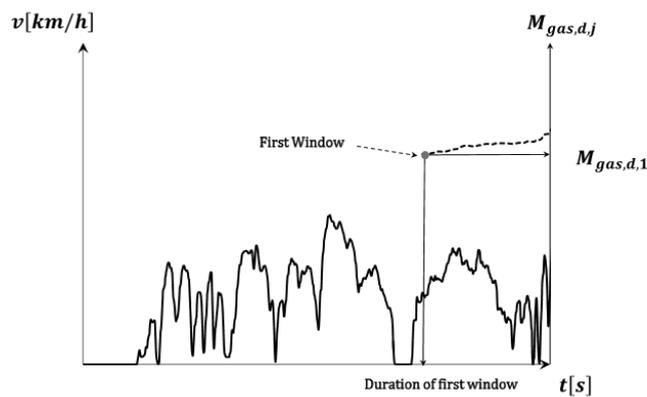


Figura 49: grafico per l'individuazione delle finestre medie.

La durata ($t_{2,j} - t_{1,j}$) della j -esima finestra media è determinata nel seguente modo:

$$M_{CO_2}(t_{2,j}) - M_{CO_2}(t_{1,j}) \geq M_{CO_2,ref}$$

dove: (j -esima finestra, i -esimo time step);

$M_{CO_2}(t_{i,j})$ è la massa di CO₂ in grammi misurata tra l'inizio del test e il tempo $t_{i,j}$, il tutto in funzione della finestra a cui ci si riferisce;

$M_{CO_2,ref}$ è metà della massa di CO₂ emessa dal veicolo durante un ciclo WLTC;

$t_{2,j}$ è così selezionato:

$$M_{CO_2}(t_{2,j} - \Delta t) - M_{CO_2}(t_{1,j}) < M_{CO_2,ref} \leq M_{CO_2}(t_{2,j}) - M_{CO_2}(t_{1,j})$$

dove Δt è il periodo di campionamento dei dati.

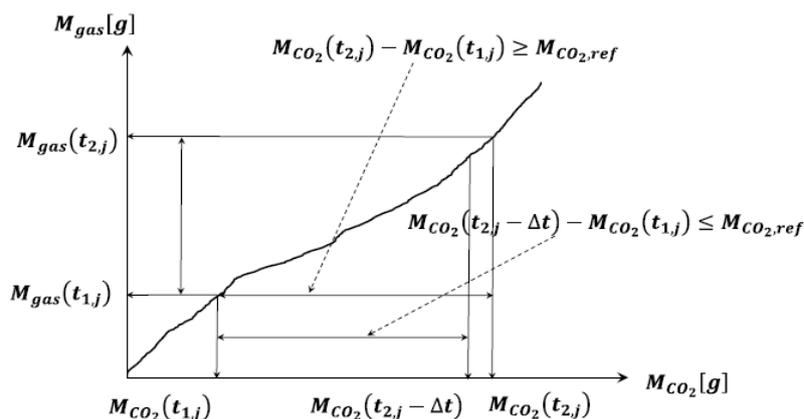


Figura 50: grafico per l'individuazione dei parametri sopra definiti.

Per ogni finestra verranno calcolati i valori: $M_{gas, d, j}$ massa o numero di particelle di un inquinante gassoso a distanza specifica nella j -esima finestra, $M_{CO_2, d, j}$ massa di CO_2 a distanza specifica e la velocità media del veicolo v_j , determinati in accordo al punto 1.

$M_{gas, d, j} = M_{gas, j} / d_i$ dove d_i : distanza percorsa nell'intervallo di tempo che delimita la finestra j .

Punto 2:

Le condizioni dinamiche di riferimento del veicolo di prova sono stabilite dalle emissioni di CO_2 in funzione della velocità media misurata al momento dell'omologazione e indicate come "Curva caratteristica di CO_2 del veicolo".

Per ottenere le emissioni di CO_2 a distanza specifica, il veicolo deve essere provato con le impostazioni di carico stradale prescritte ne: UNECE Regolamento Tecnico Globale n°15 - WLTP Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedures (ECE/TRANS/180/Add.15).

Per definire tale curva è opportuno stabilirne alcuni punti caratteristici P_1, P_2, P_3 :

P_1 : definito da $v_{p1} = 19$ km/h (valore medio relativo alla zona a bassa velocità nel ciclo WLTC) e dal valore di massa di CO_2 nel medesimo tratto moltiplicato per il fattore 1.2.

P_2 : definito da $v_{p2} = 56.6$ km/h (valore medio relativo alla zona ad alta velocità del ciclo WLTC) e dal valore di massa di CO_2 nello stesso tratto moltiplicato per il fattore 1.1.

P_3 : definito da $v_{p3} = 92.3$ km/h (valore medio nella zona a super velocità del ciclo WLTC) e dal valore di massa di CO_2 in tale tratto moltiplicato per il fattore 1.05.

Utilizzando i punti di riferimento appena definiti, la curva di emissioni di CO_2 caratteristica è calcolata in funzione della velocità media tramite due sezioni lineari (P_1, P_2) e (P_2, P_3) e definita come segue:

sezione (P₁, P₂):

$$M_{CO_2,d,CC}(\bar{v}) = a_1 \bar{v} + b_1$$

$$a_1 = (M_{CO_2,d,P_2} - M_{CO_2,d,P_1}) / (\bar{v}_{P_2} - \bar{v}_{P_1})$$

$$b_1 = M_{CO_2,d,P_1} - a_1 \bar{v}_{P_1}$$

sezione (P₂, P₃) limitata a 145 km/h sull'asse delle velocità del veicolo:

$$M_{CO_2,d,CC}(\bar{v}) = a_2 \bar{v} + b_2$$

$$a_2 = (M_{CO_2,d,P_3} - M_{CO_2,d,P_2}) / (\bar{v}_{P_3} - \bar{v}_{P_2})$$

$$b_2 = M_{CO_2,d,P_2} - a_2 \bar{v}_{P_2}$$

La curva di CO₂ caratteristica del veicolo risulta avere tale andamento:

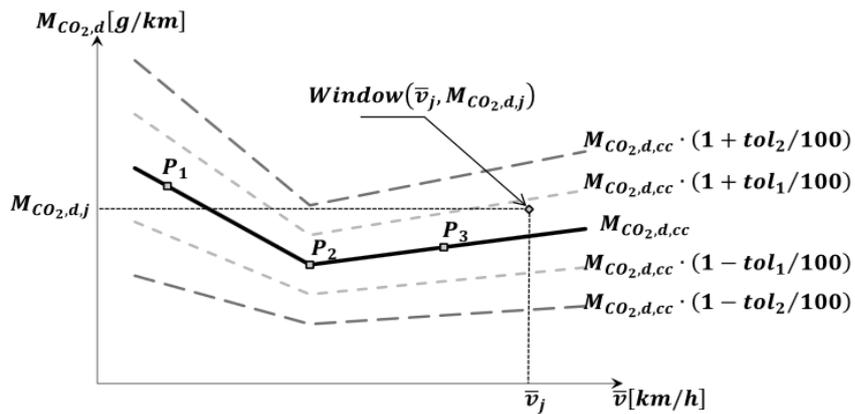


Figura 51: curva caratteristica di CO₂.

La curva caratteristica di CO₂ può essere suddivisa in tre zone a velocità di percorrenza differenti come illustra la Figura 52: un tratto urbano con una velocità media inferiore ai 45 km/h (v_j), uno rurale a cui è associata una velocità media compresa tra i 45 km/h e 80 km/h ed infine un percorso in autostrada che comprende un range di velocità tra gli 80 km/h e 145 km/h.

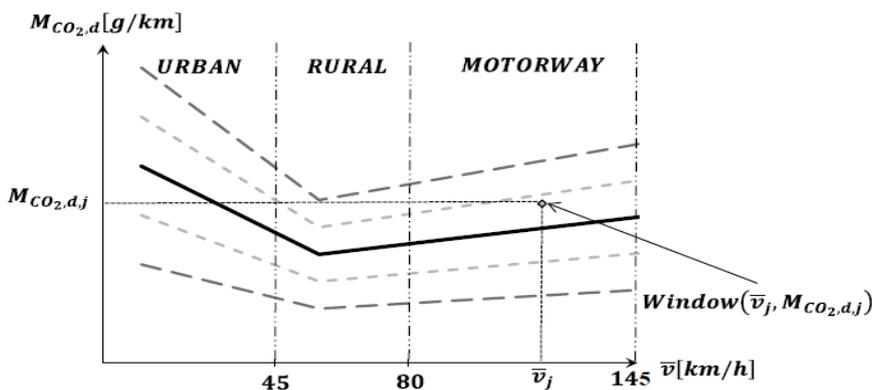


Figura 52.

Punto 3:

Verifica della completezza del test:

La prova è completa quando comprende almeno il 15% delle zone urbane, rurali e autostradali rispetto al numero totale di finestre.

Verifica della normalità del test:

La prova risulta normalizzata quando almeno il 50% delle finestre rurali, autostradali e urbane sono entro la tolleranza primaria definita per la curva caratteristica (tra $1 + tol_1/100$ e $1 - tol_1/100$).

Se il requisito minimo specificato del 50% non è soddisfatto, l'estremo superiore della tolleranza tol_1 può essere aumentato a passi dell'1% fino a che non sia raggiunto il 50% del target delle finestre normali. Tol_1 non può eccedere, con questo meccanismo, il 30 %.

Le tolleranze della curva caratteristica di CO₂ del veicolo:

La tolleranza primaria e secondaria della curva caratteristica sono rispettivamente $tol_1 = 25\%$ e $tol_2 = 50\%$, Figura 53. Ad una data velocità media, il rapporto tra le emissioni di CO₂ della MAW considerata e il corrispondente valore sulla curva rappresenta la severità delle condizioni di prova: i rapporti vicino a 1 (cioè i valori MAW vicino alla curva caratteristica) indicano condizioni di prova normali.

Tutti i test sono stati effettuati sullo stesso veicolo. Le linee arancio, viola e azzurra rappresentano rispettivamente le emissioni di CO₂ sotto ciclo WLTC, in condizioni di guida moderate e aggressive, mentre la linea nera delinea la curva caratteristica; il tutto in relazione ad una stessa finestra. La regione che è compresa tra le due linee tratteggiate verdi rappresenta la zona a guida normale; la zona a modalità di guida più severa è delimitata dalle linee tratteggiate verde e rosso superiore. Come previsto, livelli più elevati di CO₂ sono stati rilevati nel caso di guida aggressiva rispetto alla guida moderata e a quella sotto WLTC, soprattutto in condizioni di velocità rurali ($45 \leq v < 85$ km/h) [30].

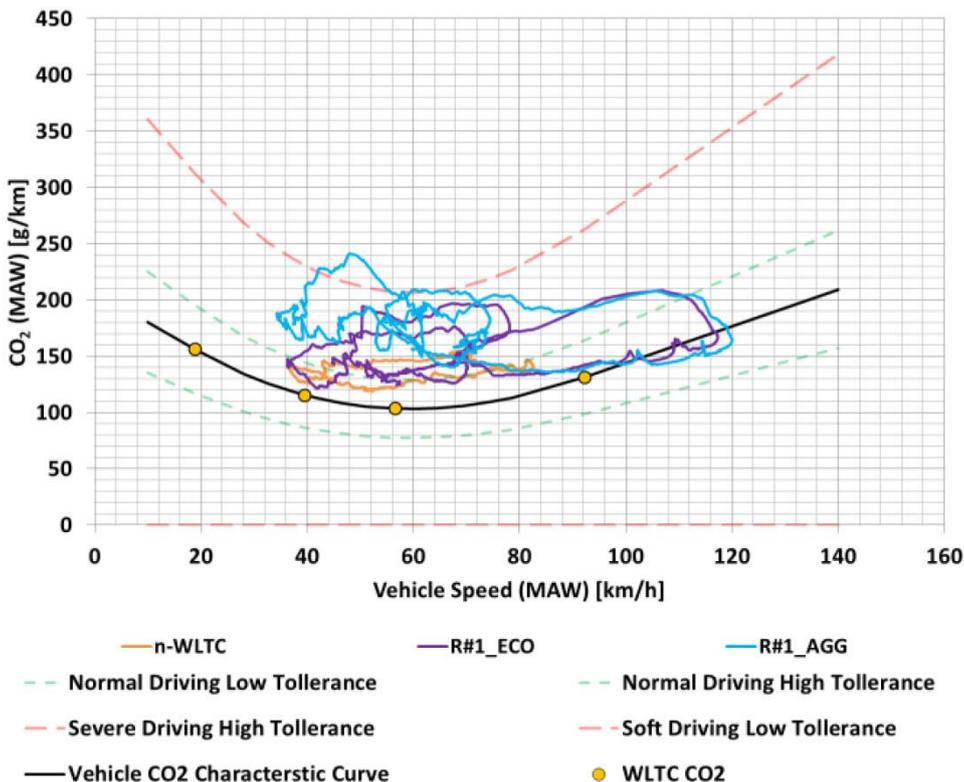


Figura 53.

Punto 4:

Le emissioni sono calcolate come media ponderata dei valori relativi alle singole finestre, separatamente per le categorie rurali, urbane, autostradali e per il viaggio completo.

$$M_{gas,d,k} = \frac{\sum(w_j M_{gas,d,j})}{\sum w_j} \quad k = u, r, m$$

Per la valutazione del fattore di ponderazione w_j si veda la Tabella 7 seguente.

condizione	w_j = fattore di ponderazione	parametri
$M_{CO2,d,CC}(\bar{v}_j) \cdot (1 - tol_1/100) \leq M_{CO2,d,j} \leq M_{CO2,d,CC}(\bar{v}_j) \cdot (1 + tol_1/100)$	1	
$M_{CO2,d,CC}(\bar{v}_j) \cdot \left(1 + \frac{tol_1}{100}\right) \leq M_{CO2,d,j} \leq M_{CO2,d,CC}(\bar{v}_j) \cdot \left(1 + \frac{tol_2}{100}\right)$	$k11 \cdot h_j + k12$	$k11 = 1/(tol_1 - tol_2)$ $k12 = tol_2/(tol_2 - tol_1)$ $h_j = \frac{100 \cdot M_{CO2,d,j} - M_{CO2,d,CC}(v_j)}{M_{CO2,d,CC}(v_j)}$
$M_{CO2,d,CC}(\bar{v}_j) \cdot (1 - tol_2/100) \leq M_{CO2,d,j} \leq M_{CO2,d,CC}(\bar{v}_j) \cdot (1 - tol_1/100)$	$k21 \cdot h_j + k22$	$k21 = 1/(tol_2 - tol_1)$ $k22 = k12$
$M_{CO2,d,j}(\bar{v}_j) \leq M_{CO2,d,CC}(\bar{v}_j) \cdot (1 - tol_2/100)$ $M_{CO2,d,j}(\bar{v}_j) \geq M_{CO2,d,CC}(\bar{v}_j) \cdot (1 + tol_2/100)$	0	

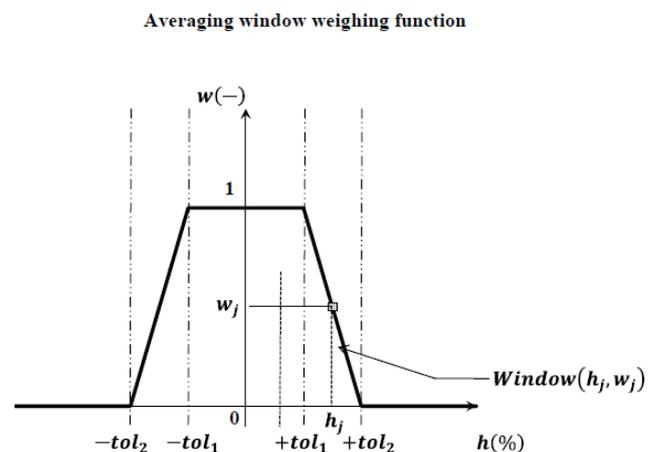
Tabella 7: valori del fattore di ponderazione.

Indici di severità per le singole categorie, urbane, rurali e autostradali e per il viaggio nel complesso, rispettivamente:

$$\bar{h}_k = \frac{1}{N_k} \sum h_j, \quad k = u, r, m$$

$$\bar{h}_t = \frac{f_u \bar{h}_u + f_r \bar{h}_r + f_m \bar{h}_m}{f_u + f_r + f_m}$$

i parametri $f_{u,r,m}$ valgono rispettivamente: 0,34/0,33/0,33.



Infine, considerando la formula di $M_{gas,d,k}$ precedentemente definita, è possibile calcolare le emissioni a distanza specifica sia per inquinanti gassosi [mg/km] che per il numero di particelle:

$$M_{gas,d,t} = 1000 \cdot \frac{f_u \cdot M_{gas,d,u} + f_r \cdot M_{gas,d,r} + f_m \cdot M_{gas,d,m}}{(f_u + f_r + f_m)}$$

$$M_{PN,d,t} = \frac{f_u \cdot M_{PN,d,u} + f_r \cdot M_{PN,d,r} + f_m \cdot M_{PN,d,m}}{(f_u + f_r + f_m)}$$

Riassumendo: affinché si possa calcolare $M_{PN,d,t}$ e $M_{gas,d,t}$ è opportuno innanzitutto determinare le finestre medie rispetto a cui verranno fatte tutte le successive operazioni. In seguito si procede alla definizione della curva caratteristica così da ottenere il valore di massa di CO₂ a distanza specifica relativa alla velocità media che si ha nella finestra considerata. In base a quest'ultimo valore si riconosce l'intervallo in cui si ricade per scegliere il fattore di ponderazione e poter calcolare la media delle emissioni degli inquinanti per ciascun tratto di percorso.

CLEAR:

Questo metodo Classification of Emissions from Automobiles in Real driving definito anche POWER BINNING METHOD, normalizza la potenza effettiva di ogni veicolo tramite la divisione per un valore di potenza standardizzato (SPF). Si analizzano le emissioni istantanee $m_{gas,i}$ (g/s), classificate in range di potenza alle ruote, i cui i relativi valori medi devono essere ponderati per ottenere valori di emissioni che rispondano ad una distribuzione normale, in accordo con i seguenti punti.

- Potenza effettiva:
 $P_{r,i}$ è il valore di potenza necessario a superare la resistenza dell'aria, la resistenza al rotolamento, l'inerzia longitudinale del veicolo e l'inerzia di rotazione delle ruote. Il segnale di potenza lo si ottiene o da un segnale di coppia che soddisfi requisiti di linearità oppure viene determinato attraverso le emissioni istantanee di CO₂.
- Classificazione delle medie mobili per tratto urbano, rurale e autostradale:
 le frequenze standard di potenza (%) sono definite per la guida urbana e per il viaggio totale, quindi si devono svolgere due valutazioni separate delle emissioni. Le medie mobili ad intervalli di tre secondi delle grandezze $m_{gas,i}$, v_i e $P_{w,i}$, vengono assegnate a condizioni di guida urbana ed extra-urbana in base al segnale di velocità $V_{3S,k}$ (sommatoria su intervalli di campionamento di tre secondi in riferimento a tre campioni successivi della reale velocità del veicolo) come indicato nella Tabella 8.

	Urbano	Rurale *	Autostradale *
$V_{3s,k}$ [km/h]	0 to ≤ 60	> 60 to ≤ 90	> 90

Tabella 8: range di velocità per l'allocazione dei dati del test per condizioni di guida urbana, rurale e autostradale.

[*]: le medie mobili ottenute dai dati urbani è necessario che siano classificate solo sotto condizioni di velocità urbana. Mentre per i valori del viaggio totale, tutte e tre le medie mobili possono essere utilizzate indipendentemente dalla velocità.]

- Calcolo delle medie mobili dei dati istantanei del test:

tre medie mobili ad intervalli di raccolta dati di tre secondi relativi ai agli ultimi tre campioni vengono calcolate su tutti i valori significativi e istantanei dei test, alla frequenza di 1 Hz:

$$m_{gas,3s,k} = \frac{\sum_{i=k}^{k+3} m_{gas,i}}{3} \quad P_{w,3s,k} = \frac{\sum_{i=k}^{k+3} P_{w,i}}{3} \quad v_{3s,k} = \frac{\sum_{i=k}^{k+3} v_i}{3}$$

(i = intervallo di tempo di campionamento di valori istantanei, k = intervallo di tempo per il calcolo dei valori di media mobile, P_w potenza richiesta per vincere la resistenza alla guida).

- Impostazione delle classi di potenza per la classificazione delle emissioni:

per ridurre le influenze di un allineamento temporale imperfetto tra il flusso massico delle emissioni registrato secondo per secondo e i valori di potenza alla ruota, si ha la categorizzazione in classi di potenza definite per valori normalizzati $P_{c,norm,j}$ tali da essere rappresentativi per qualsiasi LDV (veicoli di distribuzione leggeri).

Le Tabelle 9 e 10 si riferiscono a frequenze di potenza standard e normalizzate per guida urbana e per un tragitto completo composto da 1/3 a chilometraggio urbano, 1/3 su strada ed 1/3 in autostrada:

$P_{c,norm,j}$ viene de-normalizzata tramite una moltiplicazione per P_{drive} ovvero la potenza effettiva della ruota ottenuta da vettura testata sotto impostazioni di omologazione presso il banco dinamometrico a V_{ref} e a_{ref} (velocità e accelerazione di riferimento rispettivamente 70 km/h e 0.45 m/s²).

$$P_{c,j} [\text{kW}] = P_{c,norm,j} * P_{drive}$$

$$P_{drive} = \frac{v_{ref}}{3.6} \times (f_0 + f_1 \times v_{ref} + f_2 \times v_{ref}^2 + TM_{NEDC} \times a_{ref}) \times 0.001$$

TM_{NEDC} : classe di inerzia del veicolo sotto procedura di omologazione,

j : numero di classe di potenza,

$P_{c,j}$: valori limite della classe di potenza j-esima ($P_{c,j}$ lower e upper bound, rispettivamente il limite inferiore e superiore), f : coefficienti di resistenza alla guida e $P_{c,norm,j}$: valori limite normalizzati della classe di potenza j-esima.

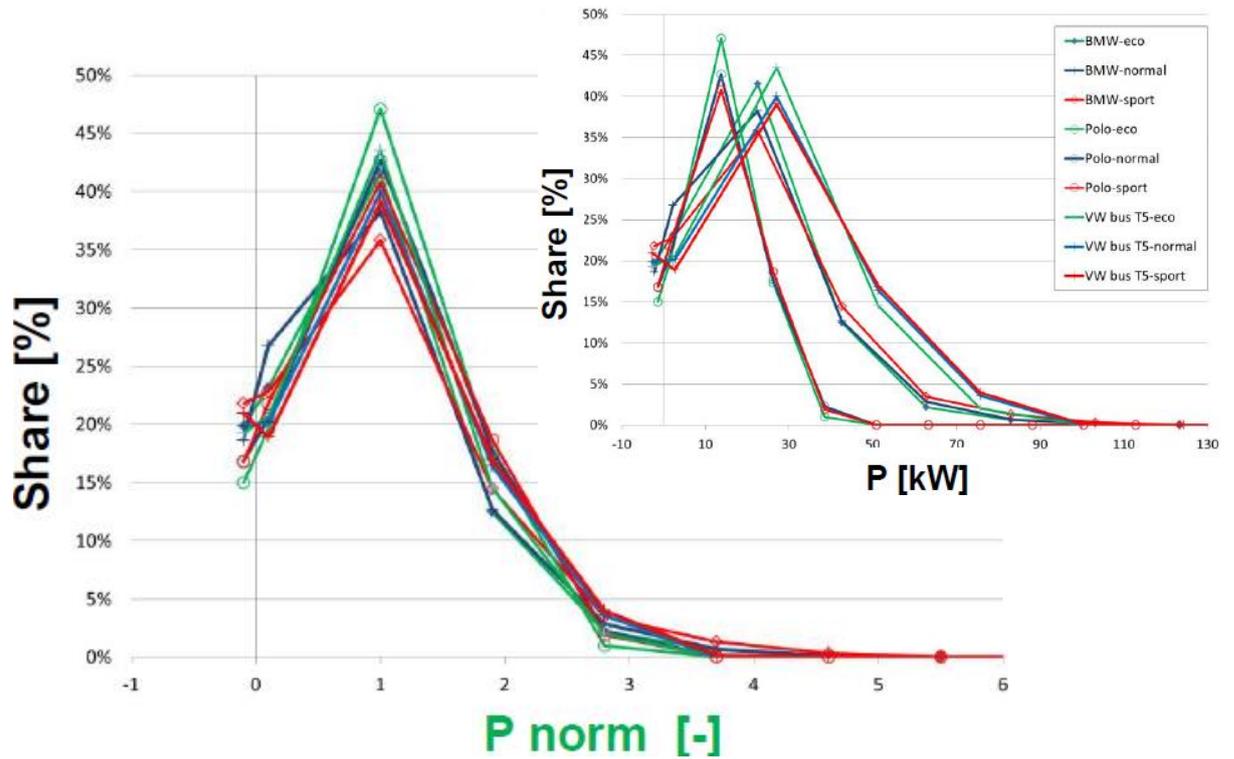


Figura 54: mostra l'effetto del passaggio dal valore di potenza in kW al valore normalizzato, in funzione della quota di tempo (%) durante cui ci si mantiene ad una data classe di potenza,.

Power class No.	P _{cj} [kW]		Urban Time share, t _{cj} [%]	Total trip
	From >	to ≤		
1	All < -1.825	-1.825	21.97%	18.5611%
2	-1.825	1.825	28.79%	21.8580%
3	1.825	18.25	44.00%	43.4583%
4	18.25	34.675	4.74%	13.2690%
5	34.675	51.1	0.45%	2.3767%
6	51.1	67.525	0.045%	0.4232%
7	67.525	83.95	0.004%	0.0511%
8	83.95	100.375	0.0004%	0.0024%
9 ⁽¹⁾	100.375	All > 100.375	0.00025%	0.0003%

Power class No.	P _{c,norm,j} [-]		Urban Time share, t _{cj}	Total trip
	From >	to ≤		
1		-0.1	21.9700%	18.5611%
2	-0.1	0.1	28.7900%	21.8580%
3	0.1	1	44.0000%	43.4583%
4	1	1.9	4.7400%	13.2690%
5	1.9	2.8	0.4500%	2.3767%
6	2.8	3.7	0.0450%	0.4232%
7	3.7	4.6	0.0040%	0.0511%
8	4.6	5.5	0.0004%	0.0024%
9	5.5		0.0003%	0.0003%

Tabelle 9, 10: sviluppo delle classi di potenza. Dati di uno stesso veicolo con P_{rated} definita, cioè la potenza massima nominale del motore dichiarata dal costruttore in kW, rispettivamente considerando P_{c,j} e P_{c,norm,j}.

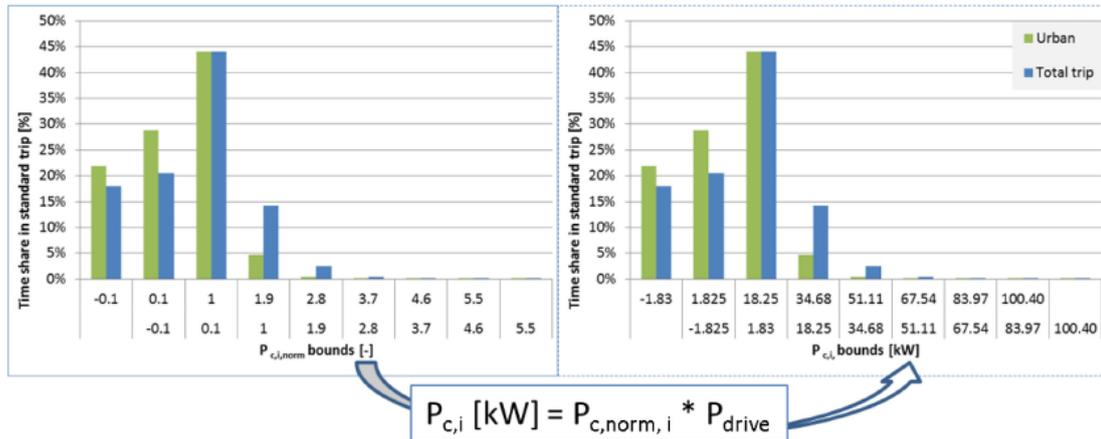


Figura 55: conversione della frequenza standard di potenza normalizzata, in frequenza di potenza specifica del veicolo in esame.

La classe di potenza massima alla ruota da considerare è la classe più alta che include il valore $P_{rated} \times 0,9$. In tal senso la classe 9 nella prima tabella rappresenta la classe a potenza maggiore in quanto è l'unica contenente, per questo tipo di veicolo il prodotto $P_{rated} \times 0,9$. Per ogni $P_{c,norm,j}$ viene calcolata la corrispondente $P_{c,j}$ per definire i limiti superiori ed inferiori in kW della classe.

- Classificazione dei valori della media mobile:

ogni valore di media mobile calcolato, deve essere ordinato nella classe di potenza della ruota de-normalizzata in cui l'attuale $P_{w,3s,k}$ si adatta. La classificazione è fatta per le tre medie mobili riferite a tutti i dati validi del viaggio complessivo così come per tutte le parti urbane. Poi la media di tutti i valori delle tre medie mobili all'interno di una classe di potenza deve essere calcolata per ogni range. Le equazioni sono descritte di seguito e devono essere applicate una volta per i dati urbani e una volta per il set di dati del percorso totale.

Classificazione in classe di potenza j (1 to 9):

se

$$if P_{C,j \text{ lower bound}} < P_{w,3s,k} \leq P_{C,j \text{ upper bound}}$$

allora l'indice di classe per le emissioni e la velocità è j .

Il numero di valori di media mobile viene conteggiato per ogni classe di potenza, se le disequaglianze sono verificate allora: $counts_j = n + 1$ (è il contatore del numero di valori di media mobile delle emissioni in una classe di potenza per controllare le richieste di copertura minima).

Oltre ai requisiti di limite inferiore e superiore, una copertura minima di 5 conteggi è richiesta per il viaggio totale di ogni classe, fino a quella contenente il 90% della potenza nominale per fornire un campione di dimensioni sufficienti. Una copertura minima di 5

punti è necessaria per la parte urbana in ogni classe di potenza fino alla classe No. 5. Se i conteggi in classi di potenza sopra il numero 5 sono meno di 5, il valore medio di emissioni per classe deve essere impostato a zero.

- La media dei valori misurati per ogni classe di potenza:
delle medie mobili ordinate in ogni classe di potenza viene fatta la media finale come segue:

$$\bar{m}_{gas,j} = \frac{\sum_{\text{all } k \text{ in class } j} m_{gas,3s,k}}{counts_j}$$

$$\bar{v}_j = \frac{\sum_{\text{all } k \text{ in class } j} v_{3s,k}}{counts_j}$$

Rispettivamente il valore medio delle emissioni di un inquinante (valore separato per dati sul totale del viaggio e per le parti urbane) in g/s e la velocità media km/h, entrambi per classi di potenza.

- Ponderazione dei valori medi per ogni classe di potenza:
i valori medi di ciascuna classe di potenza sono moltiplicati per $t_{c,j}$ e sommati per produrre il valore medio ponderato per ogni parametro. Questo valore rappresenta il risultato ponderato per un viaggio con frequenze di potenza standardizzati. Le medie ponderate saranno calcolate per i dati della parte urbana usando le porzioni di periodo per la distribuzione urbana di potenza; stesso discorso se si considera il viaggio nel totale.

$$\bar{m}_{gas} = \sum_{j=1}^9 \bar{m}_{gas,j} \times t_{c,j}$$

$$\bar{v} = \sum_{j=1}^9 \bar{v}_j \times t_{c,j}$$

- Calcolo del valore di emissioni ponderato a specifica distanza:
il periodo basato sulle medie ponderate delle emissioni durante la prova, deve essere convertito in distanza, una volta per i dati urbani e una volta per i dati totali come segue:

$$M_{w,gas,d} = 1000 \cdot \frac{\bar{m}_{gas} \times 3600}{\bar{v}}$$

utilizzabile per determinare le medie ponderate di CO e NOx in [mg/km].

L'applicazione di questo metodo è indicata soprattutto per i percorsi durante i quali la distribuzione di potenza si discosta molto dai target del modello, infatti l'obiettivo principale è proprio normalizzare i risultati per differenti stili di guida così da poterli migliorare nel caso di una guida moderata e abbassarli nel caso di una guida aggressiva.

Riassumendo: viene inizialmente calcolata la media mobile delle emissioni inquinanti compresa la CO₂ così come la velocità del veicolo e la potenza alle ruote su intervalli di 3 secondi. Poi, al fine di eliminare disallineamenti tra dati di potenza e valori di emissione registrati secondo per secondo, si esegue una classificazione in classi di potenza. La media di emissioni inquinanti per ogni intervallo di potenza è pesata moltiplicandola per un fattore di ponderazione. Infine, le emissioni ponderate a distanza specifica di CO₂ su tutte le categorie di potenza vengono sommate per calcolare un singolo valore, espresso in g/h o g/km. Ad ogni classe di potenza è associata una frequenza di occorrenza riportata come percentuale [%] il cui range dipende da parametri di inerzia e massa del veicolo.

In presenza di situazioni in cui i requisiti richiesti, sia dal metodo EMROAD che dal CLEAR, sono soddisfatti solo per uno dei due metodi, devono essere eseguite le seguenti procedure:

(I) un test RDE addizionale;

(II) dove tali requisiti saranno nuovamente soddisfatti per un solo metodo, la valutazione della completezza e della normalizzazione del procedimento può essere limitata solo a quella modalità di analisi.

I dati di entrambi i test RDE e l'analisi successiva, devono essere registrati e resi disponibili per l'esame della differenza tra i risultati ottenuti dai due metodi di valutazione dei dati.

Normativa WLTP e ciclo di omologazione WLTC:

La presenza di un ciclo omologativo obsoleto non conforme alle reali condizioni di guida e altamente lontano da stimare correttamente i consumi e le emissioni generate, ha indotto la Comunità Europea a formulare nuove procedure di omologazione con la conseguente applicazione di un ciclo di guida universale. L'altro requisito fondamentale che viene richiesto nella stesura di queste nuove normative sotto cui testare i veicoli è proprio l'unificazione a livello globale, in modo che si possa rispondere agli stessi parametri.

Il lavoro in questa direzione sta progredendo con lo sviluppo del WLTP, Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure, nell'ambito della Commissione Economica delle Nazioni Unite per l'Europa, per assicurare un maggiore allineamento delle emissioni specifiche di CO₂ indicate per le nuove autovetture al loro effettivo valore in normali condizioni di utilizzo.

I limiti sulle emissioni inquinanti e gli obiettivi di riduzione di anidride carbonica prospettati per gli anni a venire, dovrebbero essere adeguati al fine di garantire un passaggio graduale e obiettivo per costruttori e categorie di veicoli. Di conseguenza, la Commissione dovrà svolgere uno studio di correlazione approfondito tra il nuovo ciclo di guida europeo (NEDC) e il nuovo ciclo di prova WLTC al fine di introdurre eventuali fattori correttivi per adeguare valori vecchi dei parametri di guida alle nuove procedure.

Per valutare le prestazioni del veicolo in termini di emissioni di CO₂ e consumi di carburante/energia, test di laboratorio e procedure di definizione delle metodologie che da qui a pochi anni saranno adottate, sono tutt'ora in atto. Durante queste prove un veicolo è guidato su un banco a rulli (che simula le resistenze che incontra durante il suo moto reale) per seguire un ciclo di prova predefinito. In aggiunta, tutte le condizioni implicate durante l'esecuzione di un test devono rispettare rigorosamente condizioni reali di guida unificate; ciò è necessario per garantire che tutte le prove vengano effettuate in modo analogo seguendo i requisiti stabiliti dalla normativa in materia. I risultati dei test saranno infatti utilizzati per valutare la conformità del veicolo per quanto riguarda, limiti di emissioni e consumo di carburante così da renderne disponibili i valori al cliente.

Sfondo procedurale e sviluppo futuro del WLTP:

Un primo progetto del WLTP presentato nel giugno 2009 si componeva di tre fasi [33]:

- Fase 1 (2009-2015): sviluppo del WLTC (Worldwide harmonised Light duty Test Cycle) con relativa procedura di prova per le misurazioni della CO₂ quindi consumo di combustibile e di energia. Per motivazioni legate alle tempistiche di sviluppo dei seguenti punti, si è convenuto che il lavoro di questa prima sezione di implementazione fosse suddiviso in due sotto sezioni:
 - Fase 1a (2009-2013): sviluppo di un ciclo armonizzato e della procedura di test di base a livello mondiale da parte del DHC: costruzione di un nuovo ciclo di prova (WLTC), cioè della traccia della velocità sulla base di analisi statistiche dei dati reali di guida.
Il gruppo di DHC ha iniziato a lavorare nel settembre 2009, ha lanciato la raccolta di dati di guida nel 2010 e ha proposto una prima versione del ciclo di guida entro la

metà del 2011, che da allora è stato rivisto un certo numero di volte per prendere in considerazione questioni tecniche come la guidabilità e una migliore rappresentazione delle condizioni di guida. Il gruppo DHC si occupa anche del controllo delle marce e del downscaling in Wide Open Throttle (WOT).

- Fase 1b (2013-2015): ulteriore sviluppo e perfezionamento della procedura di prova. Questa fase punta soprattutto a delineare le condizioni di prova specifiche e le procedure di misurazione per i veicoli elettrici e ibridi.

Sviluppo delle procedure di prova (DTP) per:

- a) PM/PN massa di particolato e misurazione del numero di particelle;
- b) PA: ulteriori misure degli inquinanti, cioè procedure di misurazione per le sostanze di scarico che non sono ancora regolate ma possono esserlo in un prossimo futuro come NO₂, etanolo, formaldeide, acetaldeide e ammoniaca;
- c) condizioni di prova e procedure di misurazione di composti regolamentati esistenti per i veicoli con motore a combustione interna.
- d) EV-HEV: condizioni di prova e procedure di misurazione per i veicoli elettrici e ibridi specifici.
- e) Combustibili di riferimento: definizione.

- Il gruppo di DTP ha iniziato a lavorare nel mese di aprile del 2010. I temi principali esaminati ed aggiunti sono:

per veicoli convenzionali:

- a) metodi di normalizzazione e indice di traccia della velocità;
- b) numero di test;
- c) analisi in galleria del vento come metodo alternativo per la determinazione del carico su strada;
- d) famiglia matrice del carico su strada;
- e) famiglia di interpolazione e concetto di famiglia di carico su strada;
- f) anemometro a bordo e condizioni di velocità del vento;
- g) procedura alternativa per il warm-up del veicolo;
- h) calcolo e interpolazione del consumo di carburante.

Veicoli elettrici:

- a) procedura di prova per i veicoli a celle di combustibile;
- b) procedura di prova abbreviata per i test su i PEV;
- c) valutazione del consumo di carburante per la carica dei veicoli elettrici ibridi;
- d) completamento della gamma di criteri per gli EV;
- e) approccio con interpolazione per i consumi di OVC-HEV e PHEV;
- f) fattori di utilità.

Combustibili alternativi:

- a) metodo di misurazione per ammoniaca, etanolo, formaldeide e acetaldeide.

- Fase 2 (2014-2018): stesura di una procedura di prova a bassa temperatura/alta quota; definizione della conformità in servizio, di requisiti tecnici per i sistemi diagnostici di bordo (OBD), dell'uso di un condizionamento d'aria mobile (MAC), di un sistema di efficienza energetica e delle emissioni di ciclo reali;
- Fase 3 (2018 - ...): valori limite di emissione e valori limite per OBD, definizione dei carburanti di riferimento, confronto con i requisiti regionali.

Il WLTC è un ciclo transitorio per cui i dati di guida sono stati raccolti e ponderati in base al contributo relativo delle regioni chiamate a partecipare.

La guidabilità è stata valutata ampiamente durante il processo di sviluppo e sono state introdotte anche versioni del ciclo specifiche per determinati veicoli con capacità di guida limitate a causa di un basso rapporto potenza-massa o di un limite massimo di velocità. Inoltre, la traccia di velocità da seguire sarà ridimensionata secondo un metodo matematicamente prescritto, se il veicolo dovesse incontrare un'elevata percentuale del percorso di guida in condizioni di farfalla totalmente aperta. Nel progettare e convalidare il WLTP, forte accento è stato messo sulla sua fattibilità, essendo stato definito sulla base anche di una miglior tecnologia disponibile. A tal proposito, strutture senza le più recenti attrezzature dovrebbero essere in grado di eseguire certificazioni WLTP a tolleranze superiori.

La sostituzione di un ciclo di prova regionale con il WLTC inizialmente, comporterà alcuni costi per i produttori di veicoli, per i servizi tecnici e per le autorità, almeno considerato su scala locale, dal momento che alcune attrezzature e procedure di prova dovranno essere aggiornate. Tuttavia, tali costi dovrebbero essere limitati in quanto gli aggiornamenti sono effettuati regolarmente come adattamento al progresso tecnico.

Idealmente un ciclo di prova per l'omologazione dovrebbe essere pratico (cioè non troppo lungo o complicato per la sua esecuzione in laboratorio), ripetibile e riproducibile e soprattutto, dovrebbe fornire risultati rappresentativi del comportamento del veicolo in vita reale.

Il ciclo di prova di bassa potenza armonizzato è stato derivato utilizzando i dati raccolti in cinque diverse regioni: UE + Svizzera, Stati Uniti d'America, India, Corea e Giappone su diversi tipi di strada (urbana, rurale, autostradale) e in differenti condizioni di guida (picco, non di punta, week-end) coprendo una vasta gamma di categorie dei veicoli. I dati sul traffico veicolare sono stati raccolti da 441 veicoli muniti di sistemi di acquisizione dati on-board in grado di stimare la velocità e l'accelerazione, nonché rpm del motore ad una frequenza di almeno 1 Hz.

Un apposito software è stato sviluppato per elaborare l'enorme quantità di dati registrati (circa 815000 km di dati) e per l'analisi statistica dei parametri. Il trattamento dei dati grezzi inizialmente coinvolge il filtraggio e il diradamento; la filtrazione è stata applicata per rimuovere rumore a causa di errori di misura ed è stata eseguita utilizzando un algoritmo di livellamento standard (T4253H) mentre il diradamento consiste nella riduzione della frequenza dei dati da 10 Hz a 1Hz (necessario solo per una porzione limitata di valori).

Inoltre sono stati eliminati dati relativi a: periodi di minimo di durata maggiore di dieci minuti, percorsi con durata inferiore a dieci secondi, percorsi con velocità massima inferiore a 3.6 km/h e percorsi con accelerazioni superiori a 4 m/s² e inferiori a -4.5 m/s².

Le ragioni dell'esclusione di queste porzioni nascono sia da considerazioni di rappresentatività

statistica sia dalla praticabilità/fattibilità del test in un laboratorio. Dall'analisi dei risultati del database era chiaro che l'approccio usuale di divisione di un ciclo di prova in urbano, rurale, autostradale non era possibile a causa delle differenti categorizzazioni stradali e di velocità esistenti nel mondo. Divenne necessario sviluppare il ciclo in classi di velocità: fase a bassa (L), media (M), alta (H) e altissima (Ex-H) velocità. In pratica tratti a breve distanza, tali per cui la loro unione copre il percorso totale, sono stati assegnati a ciascuna delle diverse fasi di velocità in funzione della velocità massima verificatasi in esse, indipendentemente dal luogo di guida in cui erano stati raccolti i dati.

La versione finale del WLTC non è un singolo ciclo, ma un insieme di cicli da utilizzare su veicoli a caratteristiche diverse. La Tabella 11 mostra i profili di accelerazione e di velocità per le tre differenti categorie in cui vengono raggruppati i veicoli testati [34].

WLTC	Phase	Duration [s]	Stop duration [s]	Distance [m]	Stop percentage [%]	Maximum speed [km/h]	Avg speed without stop [km/h]	Average speed with stop [km/h]	Relative Positive Acceleration [kWs/(kg•km)]
Class 3	Low	589	156	3095	26.5	56.5	25.7	18.9	0.2046
	Medium	433	48	4756	11.1	76.6	44.5	39.2	0.1904
	High	455	31	7162	6.8	97.4	60.8	56.7	0.1223
	Ex-High	323	7	8254	2.2	131.3	94.0	92.0	0.1249
	WLTC	1800	242	23266					
Class 2	Low	589	155	3101	26.3	51.4	25.7	19.0	0.1605
	Medium	433	48	4737	11.1	74.7	44.3	39.4	0.1236
	High	455	30	6792	6.6	85.2	57.5	53.7	0.1218
	Ex-High	323	7	8019	2.2	123.1	91.4	89.4	0.0913
	WLTC	1800	240	22649					
Class 1	Low	589	154	3330	26.1	49.1	27.6	20.4	0.0908
	Medium	433	48	4767	11.1	64.4	44.6	39.6	0.0743
	WLTC	1022	202	8098					

Tabella 11: parametri tecnici del ciclo WLTC per le tre classi in cui sono stati suddivisi i veicoli.

Classificazione dei veicoli (*Mass in running order*) in base alla massa del veicolo, con il serbatoio riempito almeno per il 90 % della sua capacità, inclusa la massa del conducente, carburante e liquidi, montato con l'apparecchiatura standard in conformità con le specifiche del produttore e, quando sono montati, la massa della carrozzeria, la cabina, l'accoppiamento, la ruota di scorta e gli strumenti.

- classe 1: veicoli con massa in ordine di marcia ≤ 22 W/kg;
- classe 2: > 22 W/kg ma ≤ 34 W/kg;
- classe 3: > 34 W/kg.

A loro volta suddivisi in due sotto categorie in base alla loro v_{max} , il valore che delinea il passaggio dall'una all'altra categoria è 120 km/h.

La classe 3 è più dinamica e copre una vasta gamma di condizioni motoristiche, è cioè più rappresentativa della guida reale. Ha velocità più elevate, accelerazioni e decelerazioni più rapide e meno tempo al minimo rispetto al NEDC. La Figura 56 mostra nel primo grafico, il profilo di accelerazione in funzione della velocità dei cicli NEDC e WLTC, nel secondo si ha un confronto tra la copertura della mappa del motore in termini di velocità normalizzata (rpm %) e di potenza (normalizzata %) per un piccolo veicolo a benzina. È chiaro che l'area di funzionamento del motore

ricoperta in un WLTC è molto maggiore e completa. Inoltre, le condizioni più realistiche e impegnative del WLTC rispetto al ciclo di marcia europeo, determinano un incremento della domanda di energia totale durante il test su banco a rulli, in conformità con i nuovi requisiti (nuova massa di prova, diverso carico su strada, strategie di cambio specifiche ecc.). Sia l'energia cinetica che la resistenza attiva (resistenza aerodinamica all'avanzamento) sono significativamente più elevate nel WLTC rispetto al NEDC come illustrato nel terzo grafico.

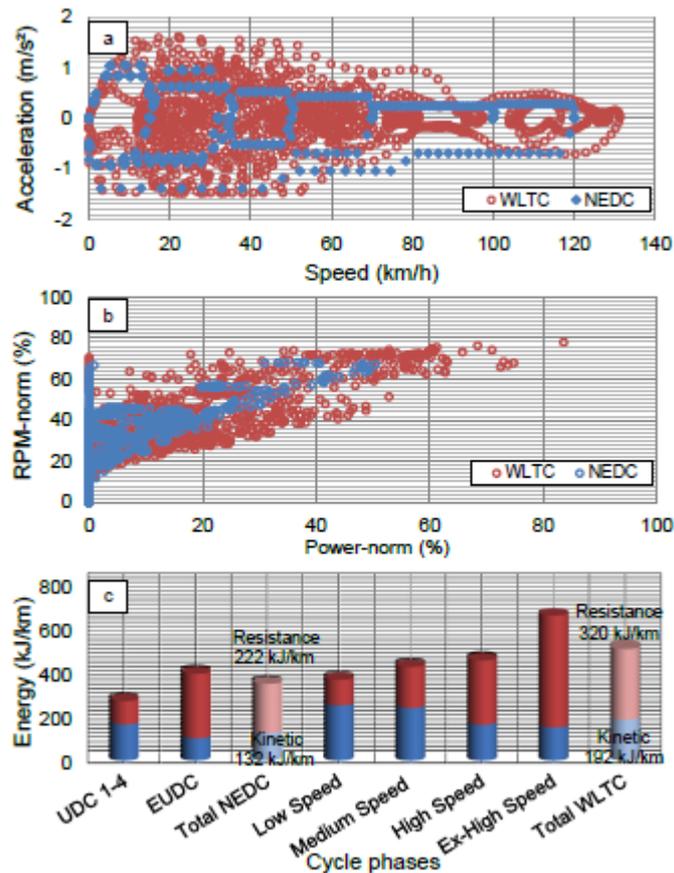


Figura 56: confronto tra il WLTC e il NEDC in termini di accelerazione, numero di giri del motore ed energia dissipata.

Per quanto riguarda le emissioni di CO₂, l'introduzione del WLTP per i veicoli leggeri colpisce i due regolamenti corrispondenti (443/2009 per le autovetture e 510/2011 per i veicoli commerciali leggeri), i quali non pongono limiti specifici sulle emissioni di CO₂ di un veicolo, ma hanno fissato un obiettivo a livello europeo (130 g/km nel 2015 e 95 g/km nel 2020 per le autovetture; 175 g/km nel 2015 e 147 g/km nel 2020 per i veicoli commerciali leggeri) e l'equazione di una retta (correla la quantità di CO₂ con la massa del veicolo) dove ogni produttore può identificare il proprio obiettivo annuale sulla base della massa media dei veicoli introdotti sul mercato nello stesso anno. Mentre non saranno influenzati i limiti di emissione degli inquinanti regolamentati, quelli sulla CO₂ dovranno essere adattati, come previsto nell'articolo 13 del Regolamento. I vincoli normativi fissati per l'adeguamento degli obiettivi rendono il processo estremamente impegnativo, la situazione è ulteriormente complicata dal fatto che, se un produttore non risulta in conformità con il suo obiettivo di emissione specifico di CO₂ dovrà pagare una tassa (fino a 95 euro) per ogni grammo di

CO₂ superiore al target e su ogni veicolo venduto in quell'anno. Quindi, eventuali imprecisioni nell'adattamento delle norme di CO₂ potrebbero, in linea di principio portare ad una notevole quantità di denaro risparmiato o perso dal produttore, con forti potenziali implicazioni di mercato [34].

Ciclo di guida:

- Un ciclo di guida WLTC, a seconda della classe di appartenenza del veicolo testato, può comprendere i seguenti tratti a velocità e durata differenti:
 - fasi a bassa velocità (Low): 589 s;
 - fasi a media velocità (Medium): 433 s;
 - fasi ad alta velocità (High): 455 s;
 - fasi a super alta velocità (Extra High): 323 s.
- Un ciclo completo per veicoli di Classe 1 è costituito da una fase a bassa velocità (Low 1), una fase a velocità media (Medium 1) e una fase a bassa velocità addizionale come mostrato in Figura 57.

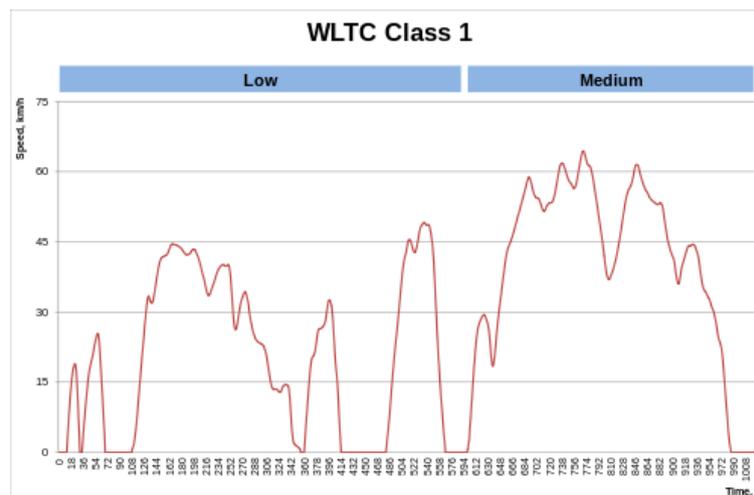


Figura 57: ciclo WLTC per veicoli di Classe 1.

- Un ciclo completo per veicoli di Classe 2 è costituito da una fase a bassa velocità (Low 2), una fase a media velocità (Medium 2), una fase ad alta velocità (High 2) ed una fase a super alta velocità (Extra High 2), come mostrato dalle Figure 58a, 58b, 58c, 58d.

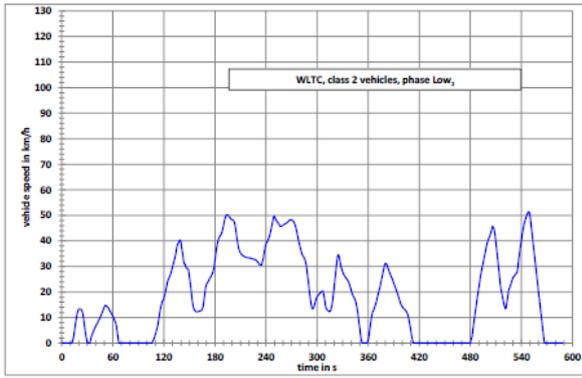


Figura 58a: ciclo WLTC per veicoli di Classe 2; parte Low.

Figura 58b: ciclo WLTC per veicoli di Classe 2; parte Medium.

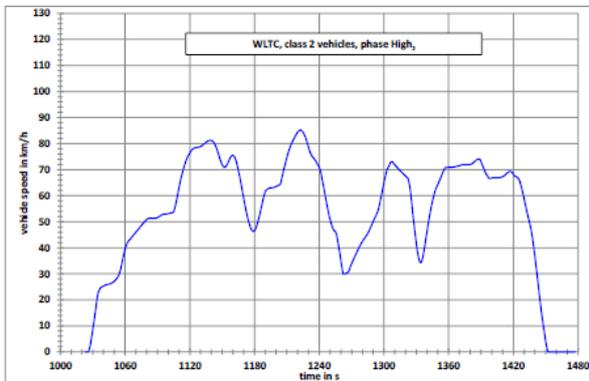
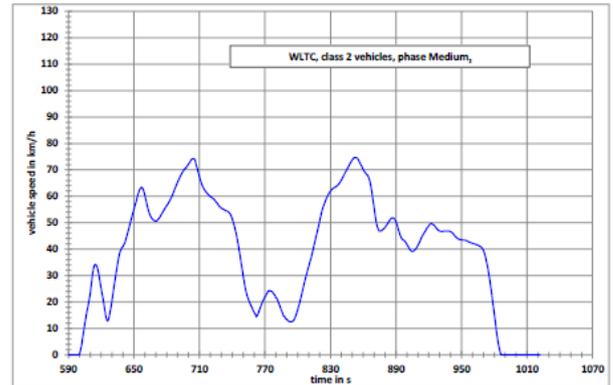
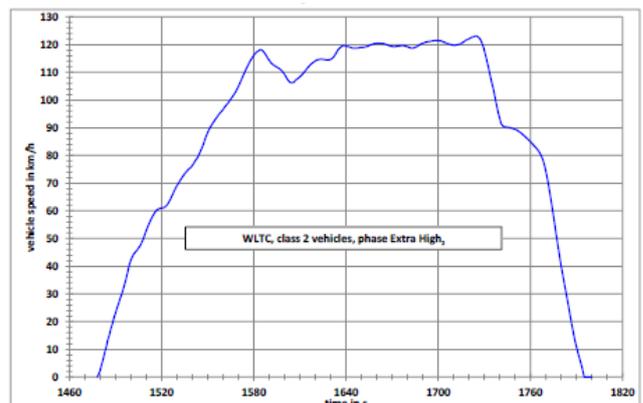


Figura 58c: ciclo WLTC per veicoli di Classe 2; parte High.

Figura 58d: ciclo WLTC per veicoli di Classe 2; parte Extra-High.



- Un ciclo completo per veicoli di Classe 3 è composto da una fase a bassa velocità (Low 3), una fase a media velocità (Medium 3), una fase ad alta velocità (High 3) e una fase a super alta velocità (Extra High 3), come mostrato in Figura 59. Le fasi Medium e High sono lievemente differenti a seconda della sottocategoria in funzione della velocità massima, a cui appartiene il veicolo testato; la differenza si ha in termini di velocità media raggiunta in queste fasi.

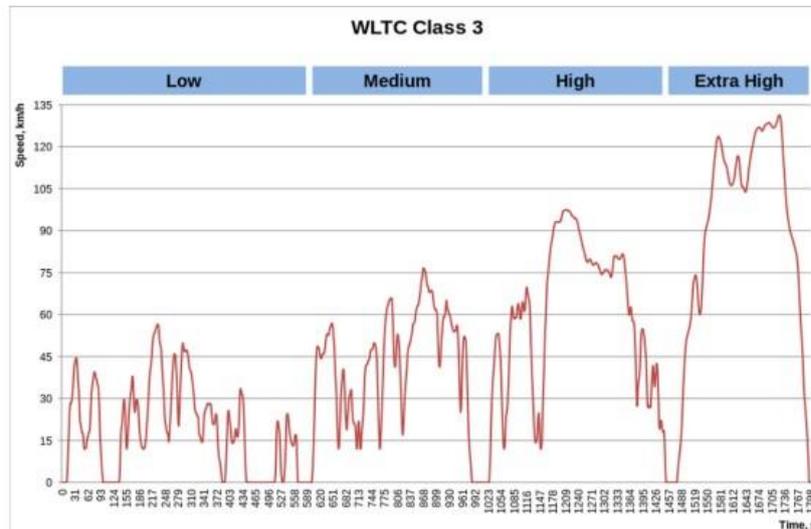


Figura 59: ciclo WLTC per veicoli di Classe 3.

A scelta dell'ente contraente, la parte a velocità Extra-High per i veicoli di Classe 2 e 3 può essere esclusa.

Veicoli elettrici e ibridi:

Nelle ricerche svolte dall'International Council of Clean Transportation (ICCT), si mette in luce che il divario tra dati ufficiali e dati reali sta crescendo progressivamente dal 2001, ma soprattutto che il gap più preoccupante appartiene ai veicoli ibridi. I mezzi elettrici a doppia alimentazione come i plug-in possiedono consumi fino al 215% superiori rispetto a quelli omologati. Lo studio considera ad esempio la Mitsubishi Outlander PHEV, vettura ibrida plug-in più diffusa in Europa; pur essendo omologata con emissioni di CO₂ pari a 49 g/km, nell'utilizzo reale sfiora i 150 g/km, cioè il triplo. Si attribuisce la discrepanza tra i valori omologati e i dati realmente registrati sempre al NEDC, il quale fornisce condizioni ottimali per ottenere consumi anche inferiori al 50% da quelli reali e nelle ibride plug-in il fenomeno potrebbe essere ulteriormente accentuato. Il punto debole secondo l'ente americano, risiede nella gestione della batteria, la quale sarebbe in grado di aiutare il motore e di diminuire i consumi nelle fasi più cruciali, come le partenze. Mentre nella guida reale l'accumulatore di un'auto ibrida non è mai carico al 100%, nei test di omologazione invece la batteria viene completamente pre-caricata non scaricandosi mai del tutto negli 11 km percorsi, il motore a combustione è acceso di conseguenza solo per pochissimo tempo. Nella guida reale dopo i primi 30-50 km è necessario passare al diesel o benzina, aumentando a dismisura consumi ed emissioni. Ecco perché nel caso delle plug-in il test risulta ancora più fallace. Il WLTC dovrebbe essere in grado di colmare tutte le lacune del ciclo NEDC e ridurre al minimo la forbice tra consumi dichiarati e reali; tuttavia, secondo l'ICCT potrebbe non essere sufficiente. Per l'ente americano

infatti, è assolutamente necessario aggiungere dei test sulle emissioni su strada e non solo in laboratorio come avviene ora. Inoltre, sarebbero fondamentali anche dei controlli a campione su veicoli già prodotti e circolanti, per verificarne la conformità rispetto alle specifiche tecniche con cui sono commercializzati.

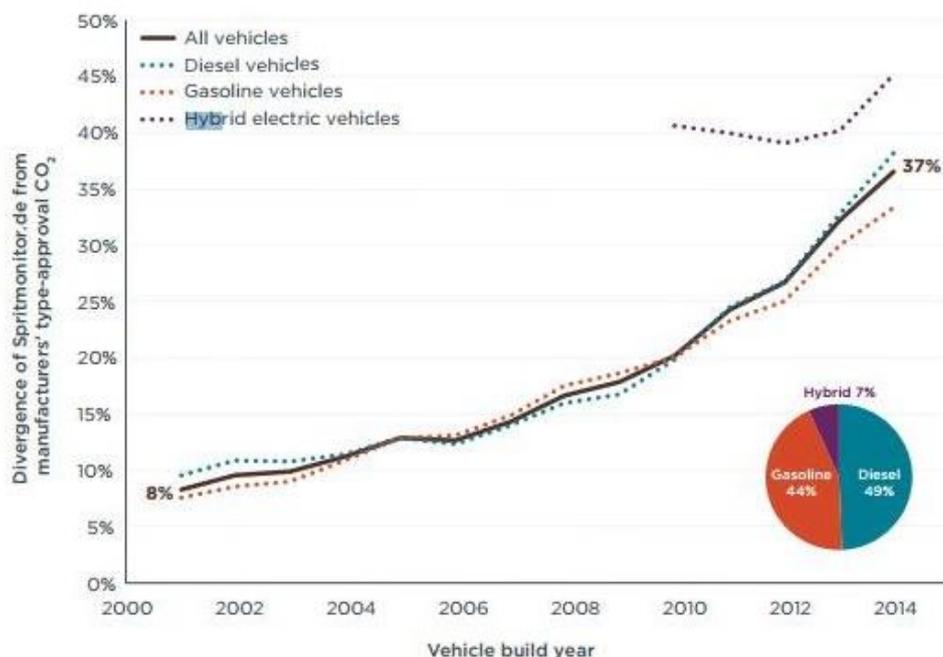


Figura 60: differenza in % tra i consumi reali per veicoli a diesel, benzina e ibridi, rispetto ai dati di omologazione.

La regolamentazione WLTP per l'omologazione di veicoli ibridi ed elettrici intende procedere concretamente come illustrato nel diagramma di flusso di Figura 61: la prova di tipo 1 viene utilizzata per verificare: le emissioni di composti gassosi, massa di particolato e numero di particelle (se applicabile), emissioni massiche di CO₂ quindi consumo di carburante, consumo di energia elettrica su tutto il ciclo di prova WLTC per veicoli elettrici, ibridi e ibridi a celle di combustibile ad idrogeno compresso. Si possono prevedere più prove per la convalida del veicolo, fino ad un valore limite pari al massimo consentito per i rispettivi criteri di inquinanti come definito dalla controparte. Se durante una delle prove, il limite di emissione di un inquinante viene superato, il veicolo è respinto.

A seconda del tipo di veicolo, il costruttore dichiara il valore totale su ciclo, delle emissioni massiche di CO₂ e il consumo di energia elettrica. Per veicoli OVC-HEV, il valore dichiarato del consumo di energia in condizioni di funzionamento a carica ridotta, deve essere considerato il valore di omologazione se il valore di CO₂ dichiarato viene accettato. Se così non fosse, il valore misurato del consumo di energia elettrica è preso come parametro di accettazione. La prova di una correlazione tra emissioni massiche di CO₂ dichiarate e il consumo di energia elettrica deve essere presentata all'autorità competente in anticipo, se applicabile.

Se dopo il primo test sono soddisfatti tutti i criteri, i valori dichiarati dal costruttore sono accettati

come valore di omologazione. Se uno dei requisiti non è soddisfatto, viene effettuata una seconda prova. A questo punto sono calcolati i risultati medi aritmetici delle due prove. Se tali valori medi soddisfano tutti i criteri, si procede all'omologazione; diversamente si esegue un'ultima prova. Di nuovo sono calcolati i risultati medi e per tutti i parametri soddisfacenti i requisiti, i rispettivi valori dichiarati sono presi come dati di omologazione.

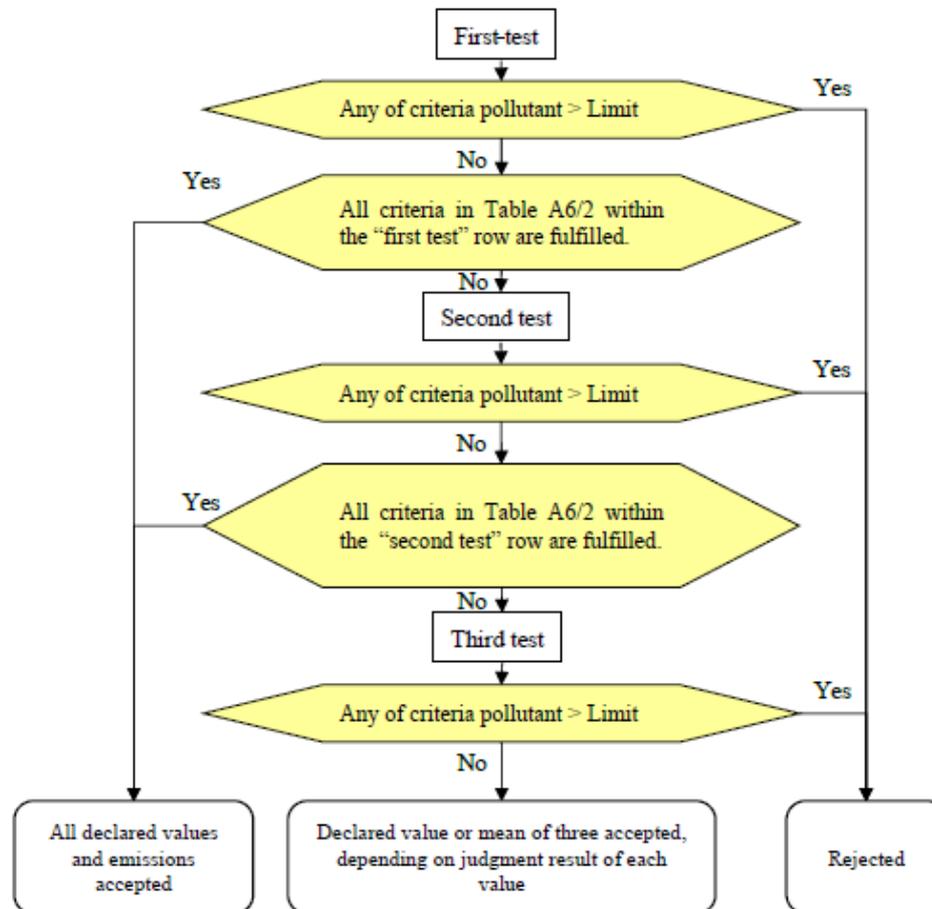


Figura 61: diagramma di flusso.

Dopo il ciclo complessivo, il valore dichiarato di CO₂ viene accettato e la media aritmetica dei valori del test in g/km è moltiplicata per il fattore di regolazione CO₂_AF per compensare la differenza tra il valore dichiarato e i risultati del test. Questo valore corretto, rappresenta il valore di omologazione per la CO₂.

$$CO_2_AF = \text{Valore dichiarato} / \text{Valore a fase specifica del test}$$

dove il denominatore è pari a: $CO_{2aveL} \times D_L + CO_{2aveM} \times D_M + CO_{2aveH} \times D_H + CO_{2aveexH} \times D_{exH}$

$$D_M + D_H + D_L + D_{exH}$$

con: CO_{2aveL} , CO_{2aveM} e CO_{2aveH} rappresentanti la media aritmetica di massa di CO_2 per la fase Low, Medium e High in g/km; D_M , D_H , D_L e D_{exH} distanze teoriche delle relative fasi in km. Se il valore dichiarato su ciclo totale di emissioni massiche di CO_2 non viene accettato, il valore relativo alle singole fasi di omologazione è calcolato come media aritmetica di tutti i risultati dei test svolti per quel tratto di percorso.

Il valore di consumo di carburante è calcolato attraverso le emissioni di CO_2 specifiche per fase utilizzando l'equazioni sopra descritta. Mentre il consumo di energia elettrica, sempre in riferimento ad una delle quattro fasi del ciclo è calcolato prendendo la media aritmetica dei valori ottenuti dai test senza fattore correttivo [33].

L'influenza della normativa WLTP sui consumi:

L'introduzione del WLTP porterà alcune fondamentali modifiche rispetto al NEDC. Parte di questi cambiamenti avranno influenza sulle emissioni di CO₂ e quindi sui valori di consumo di carburante; la Tabella 12 indica se l'impatto di uno dei parametri descritti nella prima colonna, deve essere quantificato e preso in considerazione per il calcolo di un fattore di conversione WLTP-NEDC [34].

Parameter	Definition in NEDC (Euro 6)	Definition in EU WLTP	To be considered for a WLTP-NEDC conversion factor?	
TEST CYCLE				
Driving cycle	NEDC	WLTC	YES	Revised driving cycle
Gear shift strategy for manual transmission vehicles	fixed gear positions	vehicle specific gear positions	YES	Part of revised driving cycle
ROAD LOAD DETERMINATION				
Tyre size and type	worst tyre (2nd worst if >3 tyres with different rolling resistances)	vehicle specific	NO	Equal demands of NEDC intention (NEDC slightly more stringent)
Tyre tread depth	>3,000 km running-in or 50%-90%	80%-100%	NO	Equal demands of NEDC intention (WLTP slightly more stringent)
Tyre pre-treatment	not defined	no heating or ageing	NO	Equal demands of NEDC intention
Tyre pressure	not defined	as specified	NO	Equal demands of NEDC intention
Wheel alignment	no definitions on adjustments of toe and camber	as production vehicle	NO	Equal demands of NEDC intention
Aerodynamics	worst bodywork, no definitions on movable parts	vehicle specific, use of movable parts as under test conditions	NO	Equal demands of NEDC intention (NEDC slightly more stringent)
Brakes	not defined	no manual adjustment	NO	Equal demands of NEDC intention
Calculation procedure	erroneous	corrected	NO	NEDC procedure deficient
Warm-up	not defined	>20 min at 118 km/h	NO	Effect on CO ₂ negligible
TEST TEMPERATURES				
Soak area	20 °C-30 °C	14 °C / 23 °C	YES/NO	Effect on CO ₂ negligible for 23 °C
Test cell	20 °C-30 °C	14 °C / 23 °C	YES/NO	Effect on CO ₂ negligible for 23 °C
VEHICLE MASSES				
Test mass	Kerb weight + 100 kg	Kerb weight + 100 kg + extras + payload	YES	Revised definition
Inertia	discrete classes	step-less, vehicle specific	NO	On fleet average: Effect on CO ₂ negligible
Rotating masses (wheels)	simulation of total inertia of the vehicle as driven on the road	+ 1.5% for 1-axle dynamometers	NO	Equal demands of NEDC intention
OTHER				
Vehicle running in	>3,000 km	3,000 km-15,000 km	NO	Effect on CO ₂ negligible
Pre-conditioning cycle	diesel: 3x EUDC petrol: 1x UDC, 2x EUDC (opt., only PFI)	WLTC	NO	Effect on CO ₂ negligible
Battery state of charge	not defined	no battery charging before emission test	NO	Equal demands of NEDC intention
Procedure for hybrids	not defined	not yet defined	NO	WLTP definitions to follow
Four wheel drive vehicles	1-axle dynamometer possible	2-axle dynamometer only	NO	Effect on CO ₂ negligible

Tabella 12: parametri relativi al ciclo, al carico del veicolo su strada, ai valori di temperatura durante il test, alla massa del veicolo e altri dati relativi a condizioni operative, che subiranno modifiche tramite fattore di correzione nel passaggio dal NEDC al WLTC.

- Effetto trascurabile sulla CO₂: ci sono differenze evidenti nelle procedure di prova, ma l'impatto di queste sulle emissioni di CO₂ dovrebbero essere piuttosto marginali (<1%).
- Alcuni parametri hanno ricevuto una definizione piuttosto precisa nel WLTP, mentre sotto il NEDC c'erano mancanze o valori non standardizzati. Per altri si ha invece un aumento di specifiche nel passaggio dall'uno all'altro ciclo: ad esempio il carico stradale sarà definito da parametri fisici (massa, resistenza aerodinamica, resistenza al rotolamento) che verranno misurati con precisione per ogni dato veicolo.

Le imprecisioni del ciclo NEDC consentono di effettuare modifiche sull'autovettura testata, come la sostituzione di normali pneumatici da strada con pneumatici a bassa resistenza e con atipiche pressioni alte, regolazione manuale di freni, ecc.. Queste variazioni non sono associate a condizioni di guida reali né tanto meno prospettate dalla regolazione del ciclo NEDC e di conseguenza fortemente escluse nel passaggio al WLTC.

- Alcuni errori nella regolazione NEDC sono stati corretti ed altri devono essere definiti in tappe future, come il miglioramento delle norme per i veicoli ibridi.
- Nell'ambito della procedura di determinazione della resistenza all'avanzamento (RLD) del veicolo in esame, ci sono diversi parametri di input che differiscono tra il NEDC e il WLTP. Due tra questi (tipo di pneumatico e aerodinamica) sono definiti in maniera meno stringente sotto il nuovo ciclo, dove saranno considerate le caratteristiche individuali del veicolo, mentre sotto il ciclo di marcia europeo veniva testato il veicolo "peggiore" all'interno della famiglia di appartenenza.

Lo standard WLTP per la minima profondità del battistrada del pneumatico è leggermente più rigoroso di quanto non si avesse prima e porterà ad una sovrastima media di circa lo 0.3% in termini di emissioni di CO₂. Complessivamente, si prevede che l'impatto delle nuove definizioni di questi parametri non contribuirà a un fattore di conversione WLTP-NEDC.

- Inoltre, il regolamento NEDC prevede tolleranze per alcune delle variabili che hanno anche impatti sulle emissioni di CO₂: la velocità programmata del ciclo di guida (± 2 km/h ± 1 secondo), tolleranze di controllo del dinamometro ($\pm 5\%$ e $\pm 10\%$), temperatura, differenze tra la CO₂ misurata e i valori ufficiali ($\pm 4\%$), tolleranze di dispositivi di misurazione. A causa di una tecnologia migliore e della correzione degli algoritmi usati, alcuni di questi intervalli di tolleranza saranno più stretti o addirittura eliminati.

Come risultato, vi sono tre elementi chiave che dovrebbero essere considerati per la derivazione di un fattore di conversione WLTP-NEDC per le emissioni di CO₂:

1. una lunghezza e dinamicità maggiore del ciclo di guida, tra cui una strategia di cambio marcia più flessibile per le trasmissioni manuali.
2. Una massa di prova del veicolo superiore;
3. una temperatura del motore a inizio prova inferiore.

Partenza a freddo: la guida di un veicolo a motore freddo aumenta le emissioni di CO₂ a causa del maggiore attrito meccanico e della viscosità superiore dei fluidi. L'impatto del "cold start" diminuisce con l'aumentare della distanza percorsa. Nel WLTC l'avviamento a freddo aggiunge un contributo al risultato totale delle emissioni (in g/km o litri/100 km) pari circa alla metà del contributo aggiuntivo che si avrebbe nel NEDC.

Carico del veicolo: il WLTC raggiunge alte velocità (131.3 km/h invece di 120 km/h) e ha una componente della forza di accelerazione elevata (in combinazione con una maggiore inerzia del veicolo) e in tal modo, in media, carichi del veicolo superiori al NEDC.

D'altra parte l'efficienza del motore aumenta con il carico, questo perché le perdite da attrito e di pompaggio sono relativamente più basse. Ciò vale in particolare per le tecnologie dei motori attuali che hanno bassa efficienza a bassi carichi in un ciclo NEDC.

Per il futuro, si prevede che l'efficienza del motore migliorerà a basso carico, rendendo il WLTC più impegnativo per questi veicoli.

Velocità del motore: oltre il carico del motore, la velocità ha un impatto diretto sulle emissioni di CO₂. Generalmente, regimi più elevati provocano maggiore attrito e un incremento delle perdite di pompaggio a scapito delle emissioni di CO₂. Pertanto, strategie di cambio marcia per trasmissioni automatiche sono progettate per ottenere bassi regimi spostandosi più rapidamente in rapporti di ingranamento più bassi.

Nel NEDC, i veicoli con cambio manuale devono seguire rigide specifiche che determinano in quale momento una certa posizione del cambio deve essere selezionata; questo cambierà sotto al WLTP dove i punti di cambiata saranno adattati alle caratteristiche individuali del veicolo.

L'arresto: nel WLTC ci sono meno fasi di arresto (12.6%) rispetto al ciclo di marcia europeo (23.7%). Quindi la presenza di dispositivi Start&Stop si traduce in un risparmio di CO₂ inferiore rispetto al NEDC.

La Tabella 13 confronta i parametri caratteristici del NEDC e del WLTC.

	Units	NEDC	WLTC
Start condition		cold	cold
Duration	s	1180	1800
Distance	km	11.03	23.27
Mean velocity	km/h	33.6	46.5
Max. velocity	km/h	120.0	131.3
Stop phases		14	9
Durations:			
• Stop	s	280	226
• Constant driving	s	475	66
• Acceleration	s	247	789
• Deceleration	s	178	719
Shares:			
• Stop		23.7%	12.6%
• Constant driving		40.3%	3.7%
• Acceleration		20.9%	43.8%
• Deceleration		15.1%	39.9%
Mean positive acceleration	m/s ²	0.59	0.41
Max. positive acceleration	m/s ²	1.04	1.67
Mean positive 'vel * acc' (acceleration phases)	m ² /s ³	4.97	4.54
Mean positive 'vel * acc' (whole cycle)	m ² /s ³	1.04	1.99
Max. positive 'vel * acc'	m ² /s ³	9.22	21.01
Mean deceleration	m/s ²	-0.82	-0.45
Min. deceleration	m/s ²	-1.39	-1.50

Tabella 13.

La massa di un veicolo: ha un impatto diretto sul consumo di carburante; una riduzione di massa del 10% porta con sé un decremento delle emissioni di CO₂ di circa il 4%, se il motore non viene regolato per mantenere costanti le prestazioni. La Tabella 14 riassume i risultati medi per i veicoli a benzina e a diesel a combustione interna convenzionale, per veicoli avanzati previsti per l'orizzonte 2020 e per gli ibridi.

Technology category	-10% mass*	-10% rolling resistance	-10% aero drag
Petrol—Current combustion engine	-3.0%	-1.2%	-2.5%
Petrol—Advanced combustion (2020)	-4.3%	-1.7%	-3.3%
Petrol—Advanced hybrid (2020)	-3.6%	-2.3%	-4.1%
Diesel—Current combustion engine	-3.6%	-1.4%	-2.6%
Diesel—Advanced combustion (2020)	-3.9%	-1.4%	-2.8%
Assumed fleet average 2020	-4%	-1.5%	-3%

Tabella 14: l'impatto percentuale sulla variazione dei consumi variando la massa, la resistenza al rotolamento e la resistenza aerodinamica; ipotizzando l'assenza di modifiche al motore per mantenere costanti le prestazioni.

In relazione ad una flotta media di auto del 2020, una riduzione generalizzata di massa del 10% comporterebbe una diminuzione del 4% sul consumo di carburante e quindi di CO₂ in un ciclo WLTC; l'1.5% potrebbe provenire da una riduzione della resistenza al rotolamento del 10% e il 2.5% di decremento dei consumi da un calo del 10% delle forze di accelerazione del veicolo. La procedura di prova NEDC consente di utilizzare la versione del veicolo più leggera per ottenere la conformità ai limiti della CO₂, versione che non ha alcun optional a bordo. A questo si aggiunge la massa di 75 kg per il peso del guidatore, più altri 25 kg. La massa risultante, chiamata massa di riferimento è il valore utilizzato per il test NEDC per determinare le emissioni di CO₂ di tutti i veicoli della stessa famiglia.

In contrasto con ciò, la procedura WLTP tiene conto di dispositivi opzionali e del carico utile del veicolo per determinare la massa reale. Per motivi pratici, l'UNECE ha deciso di testare solo due tipologie di veicoli: il primo tipo richiede la minor quantità di energia per guidare (cioè, nella maggior parte dei casi veicoli senza dispositivi opzionali, più resistenza al rotolamento e minima resistenza aerodinamica) e una seconda tipologia che ha la più alta domanda di energia (quel veicolo con tutte le attrezzature opzionali disponibili a bordo, il più alto tasso di resistenza al rotolamento e grande resistenza aerodinamica).

La Figura 62 ne illustra il confronto:

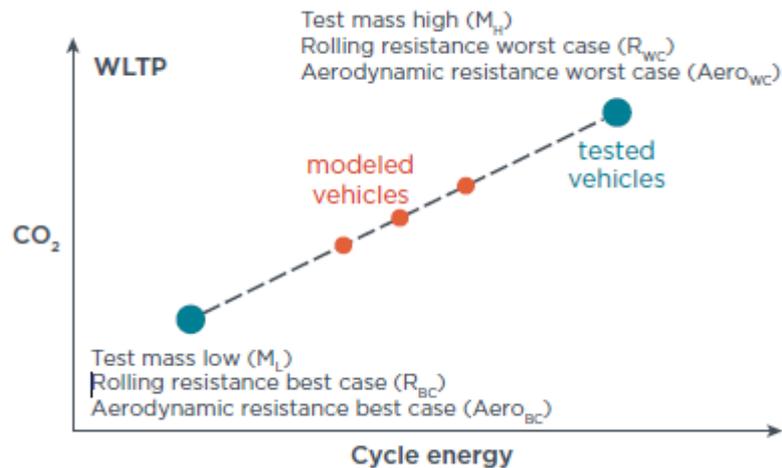


Figura 62: emissioni di CO₂ rispetto all'energia richiesta da tue tipologie di veicoli durante un ciclo di prova WLTC.

Inoltre, invece di aggiungere solo 100 kg (come nel NEDC) il WLTP richiede, oltre a questa quantità, un incremento del 15% pari al carico massimo supportato da un veicolo all'interno della famiglia di appartenenza.

Come risultato di questa procedura modificata, massa del veicolo ed emissioni di CO₂ saranno più realistici, questo perché invece di assumere la stessa massa (di solito quella del veicolo più leggero) per tutte le varianti di automobili della stessa famiglia, la massa reale sarà determinata per ogni versione con il relativo livello di emissioni.

Per quantificare l'effetto in termini di aumento di quantità di anidride carbonica emessa, è importante conoscere la massa aggiuntiva media per le attrezzature opzionali del veicolo. Sulla base di una precedente valutazione per una flotta di autovetture Volkswagen, si stima la massa massima media europea per apparecchiature aggiuntive pari a 175 kg. Non tutti i clienti ordinano la gamma completa di accessori ma generalmente, circa il 40% degli optional è richiesto (Massa media extra). La combinazione di queste due stime porta ad un atteso aumento del peso del veicolo, inoltre è aggiunto alla stima il 15% del carico del veicolo più pesante (L):

$$L = 0,15 * (\text{Max massa a pieno carico} - (\text{Massa in ordine di marcia} + 25 \text{ kg} + \text{Massa media extra})).$$

La massa media a pieno carico tecnicamente ammissibile nel 2012 è stata di 1.860 kg, mentre la massa media in ordine di marcia si attesta a 1.400 kg. Ciò si traduce in un carico medio massimo di 460 kg (in aggiunta al guidatore, ma senza considerare gli extra), da cui 25 kg e 70 kg (massa media extra) vengono sottratti per un payload utile di 365 kg e una massa rappresentativa del carico del veicolo di circa 55 kg.

L'aggiunta di due incrementi rilevanti (optional e payload aggiuntivo) inducono un aumento del peso di circa 125 kg con un incremento complessivo del 8.8% rispetto al NEDC (1550 kg rispetto a 1425 kg) pari ad un impatto sul consumo di carburante del 3.5%.

La temperatura: i valori tipici per i liquidi di raffreddamento e per i lubrificanti durante condizioni normali di funzionamento, si prospettano tra i 90°C e i 110°C. Dopo alcune ore di parcheggio, la temperatura del motore diminuirà lentamente verso la temperatura ambiente e dopo il riavvio richiederà tempo per riscaldarsi nuovamente. Durante questo periodo, i primi chilometri di guida comportano perdite di attrito superiori e quindi il consumo di carburante e le emissioni di CO₂ sono più elevati. L'effetto di questo avviamento "a freddo" è parte dell'omologazione regolamentare. Questa influenza sulla variazione di g/km di CO₂ dipende dalla temperatura iniziale del motore e la complessiva distanza guidata nel ciclo di prova; una temperatura più bassa significa livelli di emissione più elevati, ma il più lungo ciclo di prova livella questa dipendenza. La Figura 63 riassume i risultati dell'influenza della temperatura iniziale del motore sulle variazioni delle emissioni di CO₂ sotto ciclo NEDC. Una temperatura iniziale di 23°C viene impostata come linea di base; da questo valore si ha un aumento del 19% di CO₂ ai cold start, mentre temperature iniziali sotto a -7°C diminuiscono fino al 12% le emissioni all'avviamento.

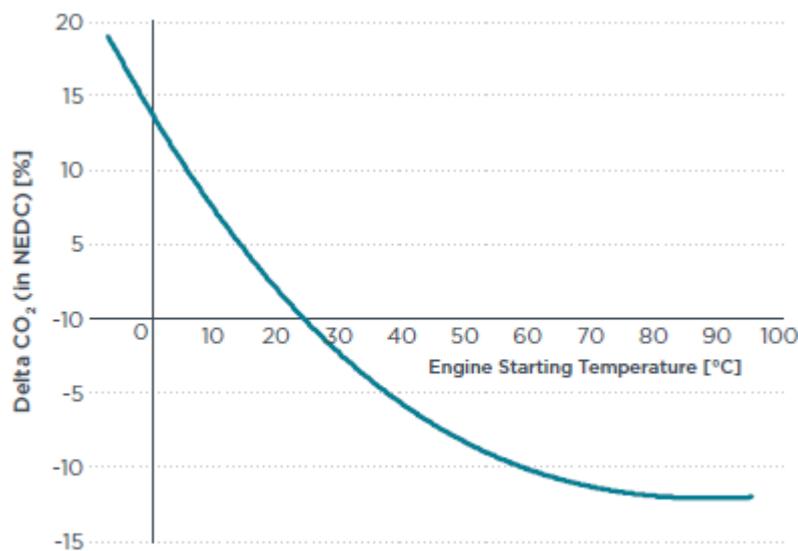


Figura 63: variazione della quantità di CO₂ emessa, per differenti temperature di avvio del motore.

Nel NEDC la temperatura di prova è impostata per variare tra 20°C e 30°C, il WLTP è più preciso poiché la pone a 23 ± 5°C. Se il valore di riferimento venisse abbassato ulteriormente, diventerebbe una nuova condizione per testare i veicoli; l'UE ha annunciato che prevede di introdurre una correzione sulla temperatura a livello europeo adattandola a 14°C, molto più rappresentativa della temperatura media in Europa. L'effetto stimato di questo ulteriore abbassamento su un test NEDC, comporta un aumento del livello di emissione del 4.5%; per convertire il risultato sotto al ciclo WLTC si applica un fattore correttivo:

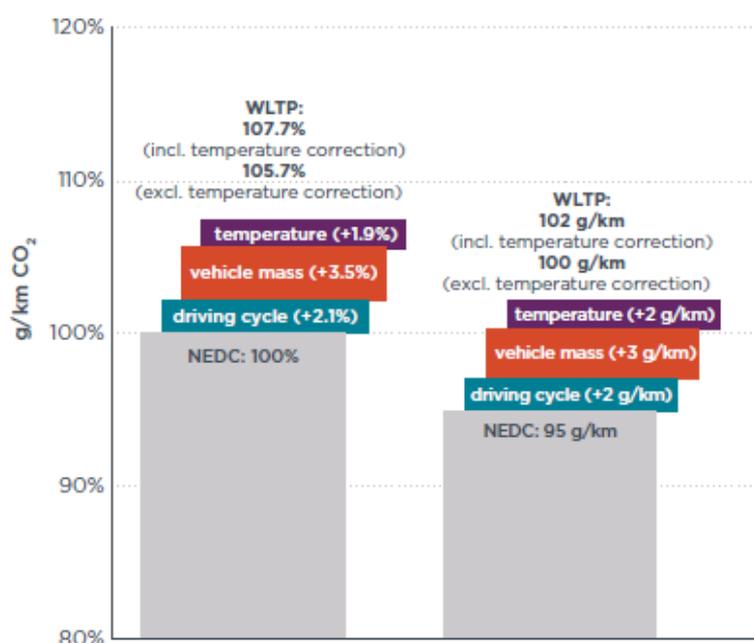
$$\text{Delta CO}_{2,\text{WLTC}} [\%] = \text{Delta CO}_{2,\text{NEDC}} [\%] * \frac{11.03 \text{ km}}{23.27 \text{ km}}$$

L'impatto complessivo del passaggio alla regolamentazione WLTP nel 2020 sulle emissioni di CO₂, per una flotta di veicoli, è riassunto nella Tabella 15:

Regulatory issue	NEDC	WLTP	Impact on CO ₂ emissions
Driving cycle	Operation at low loads with low engine efficiency, higher cold start effect (shorter distance), higher engine speeds (manual transmissions)	Higher speeds and acceleration forces, lower vehicle stop share (stop-start systems)	+ 2.1%
Vehicle mass	No optional equipment No additional payload	Optional equipment: 70 kg Additional payload: 55 kg	+ 3.5%
Temperature	Engine start temperature: 23 °C	Engine start temperature: 14 °C	+ 1.9%
Total impact 14 °C			+ 7.7%
Total impact 23 °C			+ 5.7%

Tabella 15: impatto totale stimato sulle emissioni di CO₂ nell'acquisizione delle procedure WLTP.

L'influenza della temperatura sulla quantità di anidride carbonica prodotta, arriva fino ad un totale di 5.7% se il test rimane a 23°C e del 7.7% se si abbassa a 14°C.



La Figura 64 illustra l'effetto stimato di vari fattori sulla quantità di anidride carbonica emessa nel passaggio al nuovo ciclo di omologazione, se applicato ad un obiettivo assoluto di 95 g/km nel ciclo di marcia europeo.

Figura 64.

Il valore ottenuto sotto la procedura WLTP sarebbe quindi 100 g/km (senza correzione della temperatura) e 102 g/km (compreso di correzione).

Va notato che dal punto di vista di un cliente, l'effetto del passaggio dal NEDC al WLTC sarà probabilmente superiore alla stima precedente. Questo perché i produttori oggi, in qualche misura, possono avvalersi delle flessibilità aggiuntive fornite nel ciclo di prova europeo; quando invece si risponderà al nuovo ciclo di omologazione e quindi alle nuove normative WLTP, che limitano tali

"agevolazioni", i valori di emissione di CO₂ diventeranno più rappresentativi della guida reale e conseguentemente più alti.

Le differenze osservate saranno probabilmente superiori ai fattori di conversione fino a qui esposti, poiché i veicoli odierni sono ottimizzati per il ciclo NEDC quindi le loro prestazioni subiranno un crollo quando si tratterà di rispondere a limiti più severi.

A partire dal 2020 in poi, i nuovi veicoli saranno testati solo sotto il ciclo WLTC, per cui è necessario tradurre l'obiettivo di 95 g/km basato sul ciclo NEDC in un valore equivalente attuabile per le nuove condizioni di verifica. Come mostrato in precedenza, si prospetta di raggiungere i 100 g/km (senza correzione di temperatura), per questo il regolamento dell'UE comprende un periodo di transizione di un anno richiedendo che solo il 95% delle auto nuove vendute nel 2020 siano conformi con l'obiettivo di CO₂, così che il 5% dei veicoli con livelli massimi di emissioni di CO₂ non saranno conteggiati per la verifica di conformità di ciascun produttore con i propri obiettivi di emissioni. Questa flessibilità, insieme con il periodo a doppio test tra il 2017 e il 2019, consentirà ai costruttori di adeguarsi coerentemente alle future normative per un tempo di sei anni, prima di passare completamente al WLTP dal 2021 in poi [35].

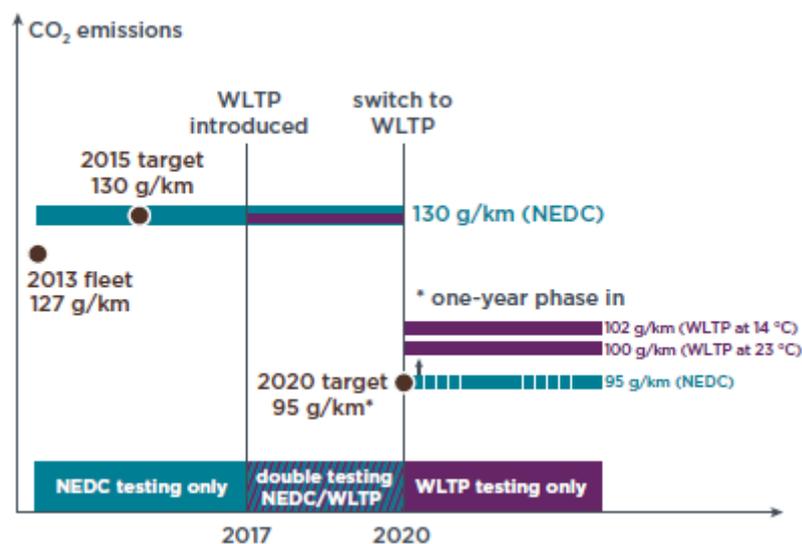


Figura 65: implementazione della procedura WLTP.

CONCLUSIONI

L'obiettivo era mettere in luce come, da un lato i veicoli possano soddisfare gli attuali e imminenti limiti imposti sulle emissioni inquinanti e dall'altro, quali saranno i futuri sviluppi delle normative e dei cicli di omologazione. La necessità di tenere sotto controllo soprattutto alcune specie inquinanti quali ossidi di azoto e particolato e nel contempo, ridurre i consumi, nasce dalla volontà di decrementare l'influenza del settore automobilistico sull'inquinamento atmosferico. La normativa Euro 6 in tal senso, provvede fortemente a ridurre le emissioni di NOx e di particolato, obbligando i costruttori ad adottare sistemi efficienti di abbattimento degli inquinanti e ad ottimizzare la combustione così come il sistema di iniezione per mantenere alte prestazioni e parallelamente, realizzare motori più puliti. Sistemi necessari per non eccedere i valori massimi consentiti sono per i diesel, catalizzatore SCR, filtro antiparticolato, catalizzatore ossidante DOC e tecnologia EGR, mentre per i benzina risulta indispensabile dotarli del catalizzatore a tre vie TWC e del sistema EGR a bassa pressione che apporta benefici di gran lunga maggiori rispetto ai convenzionali sistemi di ricircolo dei gas di scarico, diminuendo drasticamente sia gli NOx che il particolato, quindi sfavorendo il fenomeno della detonazione. Da qui a poco pure un filtro antiparticolato sarà montato sui motori ad accensione comandata in quanto è stato dimostrato essere fortemente utile per sopportare i futuri limiti sulle emissioni e soprattutto per tagliare il numero di nano particelle a dimensioni inferiori ai 23 nm, recentemente trovate in grande quantità allo scarico. Il particolato sub-23nm è tale da non essere intrappolato dai normali strumenti di conteggio o filtrazione ed è per questo che stanno sorgendo progetti per la messa a punto di un nuovo metodo di misurazione di particelle ultra fini che prende origine dal PMP con l'aggiunta di uno stripper catalitico caldo e di un doppio contatore di particelle a sensibilità maggiore. I primi test condotti su questi due approcci sperimentali, mettono in luce le loro alte potenzialità sul controllo del numero di particelle aprendo numerose ricerche per poterli ottimizzare e rendere disponibili per la produzione di serie nel minor tempo possibile. Questo primo approccio strumentale non potrebbe da solo sorreggere le imminenti e più restrittive limitazioni sia sugli inquinanti tradizionali che sui consumi, viene perciò affiancato da una drastica rimodernizzazione dei cicli di omologazione con normative annesse. Un rilevante deficit sul controllo delle emissioni inquinanti pone le radici sulla presenza di sistemi omologativi obsoleti e non conformi alle reali condizioni di guida che permettono la circolazione di veicoli di gran lunga più inquinanti di quanto non venga confermato dai test sul banco a rulli. Si aprono le porte a due nuovi approcci che rispondono al nome di RDE e WLTP. I requisiti proposti dal Real Driving Emissions impongono di testare i veicoli direttamente su strada e misurarne le emissioni attraverso il dispositivo PEMS on-board, così facendo si vogliono fornire valori di emissioni e di consumi più coerenti con la realtà. Le procedure RDE definiscono i limiti massimi sotto la sigla NTE limits e forniscono precise condizioni al contorno e dinamiche in modo tale da rendere questi test riproducibili e significativamente reali. Si inizierà a testare i veicoli seguendo queste procedure dal 2017. Ciò che invece introduce come novità assoluta il WLTP, è lo sviluppo di un ciclo di guida universale che possa sostituire i tre cicli principali fino ad oggi usati, il NEDC su sfondo europeo, l'FTP-75 in America e il JC08 in Giappone. Verrà integrato su un percorso più lungo che prevede una zona a bassa, media, alta ed extra alta velocità, subendo variazioni lievi a seconda della classe di appartenenza del veicolo testato. Altro concetto esposto dalla normativa WLTP è come testare e omologare i veicoli ibridi; ancora in fase di revisione e perfezionamento, saranno stabiliti limiti sulla quantità di energia elettrica consumata per km, le emissioni effettive di CO₂ e come rendere

universali le stazioni di ricarica della batteria.

Tutto in previsione del progetto CARS 2020 che porterà il limite massimo di anidride carbonica consentito a 95 g/km. Per poter soddisfare queste e più future regolamentazioni, sarà indispensabile ricorrere anche a combustibili alternativi e a veicoli ibridi o elettrici, in quanto i classici motori endotermici non hanno margini molto ampi di miglioramento in questo ambito. Si prospetta un futuro sempre più verde per le case automobilistiche a patto che riescano a conciliare basse emissioni inquinanti con alte prestazioni.

BIBLIOGRAFIA

1. G. Doornbos, S. Hemdal, D. Dahl; "Reduction of Fuel Consumption and Engine-Out NO_x Emissions in a Lean Homogeneous GDI Combustion System, Utilizing Valve Timing and an Advanced Ignition System." SAE Technical Paper, 2015-01-0776.
2. G. Ferrari; "MOTORI A COMBUSTIONE INTERNA", capitolo 12.
3. "The exhaust gas after-treatment system of a diesel Common Rail engine."
4. D. Takaki, H. Tsuchida, T. Kobara, M. Akagi, T. Tsuyuki, M. Nagamine; "Study of an EGR System for Downsizing Turbocharged Gasoline Engine to Improve Fuel Economy." SAE Technical Paper, 2014-01-1199.
5. European Commission, Sustainable Transport Unit Institute for Energy and Transport: B. Giechaskiel, G. Martini; "Review on engine exhaust sub-23 nm particles."
6. ScienceDirect: H. Yamada, K. Funato, H. Sakurai; "Application of the PMP methodology to the measurement of sub-23 nm solid particles: calibration procedures, experimental uncertainties, and data correction methods."
7. Y. Otsuki, K. Takeda, K. Haruta, N. Mori ; "A Solid Particle Number Measurement System Including Nanoparticles Smaller than 23 Nanometers." SAE Technical Paper, 2014-01-1604.
8. Magneti Marelli; "Spray Targeting Nei Motori Gdi".
9. Thewes M., Muther M., Brassat A., Pischinger S.; "Analysis of the Effect of Bio-Fuels on the Combustion in a Downsized DI SI Engine." SAE Technical Paper, 2011-01-1991.
10. Jin C.; "Progress in the production and application of n-butanol as a biofuel." Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2011, Vol. 15.
11. Bockhorn H.; "Soot Formation in Combustion." Berlin, Heidelberg, New York : Springer-Verlag, 1994.
12. Dageforde H., Koch T., Beck K., Spicher U.; "Influence of Fuel Composition on Exhaust Emissions of a DISI Engine during Catalyst Heating Operation." SAE Technical Paper, 2013-01-2571.
13. Berndorfer A.; "Diffusion Combustion Phenomena in GDi Engines caused by Injection Process." SAE Technical Paper, 2013-01-0261.
14. M. Bertsch, T. Koch, A. Velji, H. Kubach, Karlsruhe Institute of Technology: "Thermodynamic and Optical Investigations on Particle Emissions in a DISI Engine at Boosted Operation." SAE Technical Paper, 2015-01-1888.

15. Y. Ito, T. Shimoda, T. Aoki, K. Yuuki, H. Sakamoto, K. Kato, D. Thier, P. Kattouah, E. Ohara, C. Vogt: "Next Generation of Ceramic Wall Flow Gasoline Particulate Filter with Integrated Three Way Catalyst." SAE Technical Paper, 2015-01-1073.
16. European Commission, Climate Action; "Road transport: Reducing CO₂ emissions from vehicles."
17. Transport & Environment, Vehicles Programme Manager: G. Archer; "TARGET AL 2025 PER LE EMISSIONI DI CO₂ DELLE AUTOMOBILI. Un passo in avanti per affrontare le emissioni nel settore trasporti"; Giugno 2015.
18. D. Gruden, PORSCHE;" Technical Measures To Reduce Carbon Dioxide Emissions On The Road Traffic." SAE Technical Paper, 2006-01-3005.
19. EERE: Department of Energy, Energy Efficiency & Renewable Energy;"Alternative Fuels Data Center."
20. FIA, European Bureau; "VERSO LA E-MOBILITY: LE SFIDE DA AFFRONTARE."
21. DieselNet; "Emission Test Cycles."
22. AVL: S. Flitsch, W. Hofegger "EMISSION LEGISLATION, RDE"; 11 November 2015.
23. ICCT (The International Council of Clean Transportation); "REAL-WORLD EXHAUST EMISSIONS FROM MODERN DIESEL CARS."
24. AVL Emission Report; "EU Real Driving Emissions."
25. Transport & Environment; "Realistic real-world driving emissions tests: the last chance for diesel cars?" July 2015.
26. Council of the European Union; "Commission Regulation amending Regulation (EC) No 692/2008 as regards emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 6): Annexes."
27. Council of the European Union; "Commission Regulation amending Regulation (EC) No 692/2008 as regards emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 6): Annex I, part 1/3."
28. Council of the European Union; "Commission Regulation amending Regulation (EC) No 692/2008 as regards emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 6): Annex I, part 2/3."
29. Council of the European Union; "Commission Regulation amending Regulation (EC) No 692/2008 as regards emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 6): Annex I, part 3/3."
30. Laboratory of applied thermodynamics: Zissis Samaras: "Update on the European PEMS activities for the assessment of real driving emissions (RDE)."

31. Institute for Internal Combustion Engines and Thermodynamics; "Influence of RDE legislation on future emission factors and on fuel consumption."
32. Theodoros G. Vlachos, P. Bonnel, A. Perujo, M. Weiss, P. Mendoza Villafuerte, F. Riccobono; "In-Use Emissions Testing with Portable Emissions Measurement Systems (PEMS) in the Current and Future European Vehicle Emissions. Legislation: Overview, Underlying Principles and Expected Benefits." SAE Technical Paper, 2014-01-1549.
33. United Nations ECE/TRANS/WP.29/GRPE/2016/3, Economic and Social Council; "World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations. Working Party on Pollution and Energy"; seventy second session, Geneva 12-15 January 2016.
34. B. Ciuffo, J. Pavlovic, A. Marotta, S. Serra, M. Tutuianu, S. Tsiakmakis, K. Anagnostopoulos, N. Zacharof, G. Fontaras; "The development of the World-wide Harmonized Test Procedure for Light Duty Vehicles (WLTP) and the pathway for its implementation into the EU legislation."
35. ICCT (The International Council of Clean Transportation): P. Mock, J. Kühlwein, U. Tietge, V. Franco, A. Bandivadekar, J. German; "The WLTP: How a new test procedure for cars will affect fuel consumption values in the EU"; 29 October 2014.