

13 Riduzione delle emissioni di sostanze nocive

13.1 Impianto dei gas di scarico

Compiti

- Attuare e ridurre le pulsazioni dei gas di scarico che fuoriescono dalla camera di combustione sotto forma di forti impulsi (scoppi), in modo da non superare un determinato livello di rumore.
- Scaricare i gas di scarico in modo sicuro e impedire che entrino nell'abitacolo.
- Mediante un catalizzatore, ridurre i valori limite, le sostanze nocive contenute nei gas di scarico.
- Durante l'attenuazione del rumore, influenzare il flusso dei gas di scarico in modo da ridurre il più possibile la perdita di potenza del motore.
- Produrre una rumorosità (sound) adeguata alle caratteristiche del veicolo.

Livello sonoro (tab. 1). Al momento dell'apertura della valvola di scarico, i gas di scarico nel cilindro sono ancora sottoposti ad una sovrappressione compresa tra 3 e 5 bar. Senza silenziatore, i gas di scarico uscirebbero con un forte scoppio. Il livello sonoro misura l'intensità del rumore; l'unità di misura è il decibel (A). La soglia di udibilità dell'uomo corrisponde ad un livello sonoro di 0 dB (A). Si percepiscono come dolorosi i rumori superiori a 120 dB (A). Un rumore continuo superiore a 130 dB (A) può avere effetti letali.

Tabella 1: Livello sonoro

Martello pneumatico	130 dB (A)
Soglia del dolore	120 dB (A)
Discoteca	110 dB (A)
Motore senza silenziatore	100 dB (A)
Sala macchine	90 dB (A)
Strada trafficata	80 dB (A)
Rumore al passaggio di un'auto	74 dB (A)
Conversazione	70 dB (A)
Musica di sottofondo	50 dB (A)
Bisbiglio	30 dB (A)
Fruscio molto tenue di foglie	10 dB (A)
Soglia di udibilità (0 decibel)	0 dB (A)

Rumore prodotto dal veicolo in marcia. Il rumore dello scarico è una parte fondamentale del rumore prodotto dal veicolo in movimento. Ne fanno parte anche altri rumori, quali per esempio i rumori del motore e della trasmissione, i rumori di rotolamento, i rumori della carrozzeria e del vento. L'intensità del rumore generato dal veicolo in movimento non deve superare l'intensità che con l'attuale sviluppo tecnologico si può evitare. L'ordinanza concernente le esigenze tecniche per i veicoli stradali e le norma-

Tabella 2: Rumori di crociera degli autoveicoli

Motorino	70 dB (A)
Ciclomotore	72 dB (A)
Motocicletta leggera	75 dB (A)
Motocicletta	fino a 80 cm ³ 75 dB (A) fino a 175 cm ³ 77 dB (A) oltre 175 cm ³ 80 dB (A)
Autovettura	con motore Otto o Diesel 74 dB (A) con motore Diesel a iniezione diretta 75 dB (A)
Autobus e autocarro	fino a 2 t 74 dB (A)* da 2 t fino a 3,5 t 75 dB (A)*
Autocarro 75 kW	77 dB (A)
Autobus, autocarro	fino a 150 kW 78 dB (A) oltre 150 kW 80 dB (A)

* con motore Diesel a iniezione diretta, maggiore di 1 dB

tive emanate dalla UE, stabiliscono i valori limite per la rumorosità dei singoli autoveicoli (tab. 2). Tali valori limite sono stati abbassati più volte nel corso degli ultimi anni.

Sollecitazioni

- Temperature elevate e grandi sbalzi di temperatura, soprattutto nella parte anteriore dell'impianto di scarico.
- Corrosione esterna su tutta la lunghezza dell'impianto di scarico, dovuta a influssi atmosferici e al sale antigelo utilizzato in inverno.
- Corrosione interna, dovuta alla condensazione dei gas di combustione (acqua, acido solforoso), soprattutto sulle parti posteriori più fredde.
- Forti sollecitazioni meccaniche dell'impianto di scarico, dovute a urti contro ostacoli (sassi), scuotimenti della carrozzeria e oscillazioni del motore.

Per resistere a tali sollecitazioni, le singole parti sono realizzate in materiali diversi. A causa delle alte temperature di esercizio, le parti anteriori dell'impianto di scarico sono realizzate principalmente in acciaio inossidabile refrattario, resistente all'ossidazione e alla corrosione da alte temperature. I silenziatori sono, in genere, realizzati a doppia parete con una struttura a sandwich. A causa dell'elevata aggressività dei condensati dei gas di combustione, l'involucro interno è realizzato in lamiera di acciaio inossidabile. L'involucro esterno è invece realizzato in lamiera di acciaio non legato, rivestito di uno strato in alluminio per proteggerlo dalla corrosione esterna. Questo rivestimento è applicato anche ai tubi della parte terminale dell'impianto dei gas di scarico.

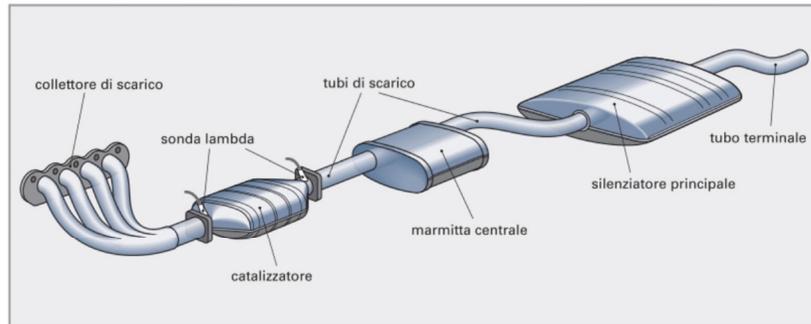


Figura 1: Struttura dell'impianto dei gas di scarico

Struttura dell'impianto dei gas di scarico

L'impianto dei gas di scarico (fig. 1) è composto da tubi, dal catalizzatore e da una o più marmitte, per esempio la marmitta centrale e il silenziatore principale. Il tubo di scarico anteriore è accoppiato per mezzo di flange al collettore di scarico e termina in prossimità del catalizzatore. Quest'ultimo è collegato alle marmitte mediante tubi di raccordo.

Il tubo terminale, infine, conduce i gas di scarico verso l'esterno. Per evitare l'entrata dei gas di combustione nell'abitacolo del veicolo e il calo dell'attenuazione del rumore, l'impianto di scarico deve essere costruito a tenuta stagna su tutta la sua lunghezza. Per mantenere il livello di rumore generato dai gas di combustione entro il valore consentito, il costruttore adatta accuratamente, a seconda del veicolo, sia la disposizione e il tipo delle marmitte, sia la lunghezza e il diametro dei tubi di collegamento. Particolare attenzione deve essere rivolta anche alla resistenza che il flusso di gas incontra durante l'attraversamento del sistema di scarico, in quanto all'insorgere di una contropressione nell'impianto, la potenza del motore diminuisce. Il rumore di scarico è prodotto dai gas che fuoriescono dai cilindri sotto forma di impulsi. La sua energia sonora può essere attenuata tramite riflessione o assorbimento.

Riflessione. Nell'attenuazione acustica per riflessione, si inseriscono degli ostacoli alle onde sonore, le quali vengono di conseguenza riflesse e deviate, annullandosi in parte una con l'altra come un'eco che si affievolisce. Anche improvvisi cambiamenti di diametro dei tubi o delle camere producono una riflessione.

Silenziatore a riflessione (fig. 2). Camere di diversa grandezza sono collegate fra loro da tubi aperti su entrambe le estremità e disposti su assi diversi. In tal modo, si impone una deviazione al flusso dei gas che attraversa il silenziatore. Il flusso dei gas di scarico è costretto, quindi, a compiere una gran quantità di cambi di direzione, durante i quali le onde sonore

vengono riflesse e infine attenuate. I silenziatori a riflessione, dotati a volte di tubi forati, sono particolarmente indicati per l'attenuazione di frequenze medie e basse.

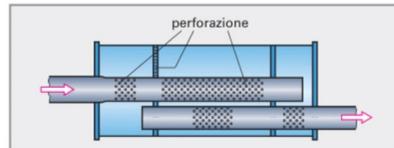


Figura 2: Silenziatore a riflessione

Effetto di risonanza. Tra un cambio e l'altro di sezione, le onde sonore si muovono più volte in avanti e indietro e possono in certe condizioni produrre una risonanza. A seconda che le oscillazioni di risonanza si producano nel condotto principale o in una derivazione, si parla di un risonatore in serie o di un risonatore di derivazione (fig. 1, pag. 338). Questi risonatori permettono una forte attenuazione di determinate frequenze.

Effetto di interferenza (fig. 3). Suddividendo il flusso dei gas di scarico e riunendolo in seguito, si ricavano all'interno del silenziatore due percorsi di diversa lunghezza. La diversa lunghezza dei due canali permette di ottenere, in prossimità del ricongiungimento dei due flussi, l'annullamento reciproco delle onde sonore.

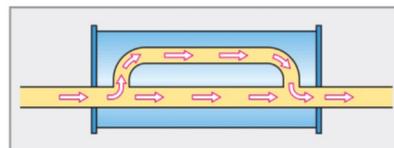


Figura 3: Effetto di interferenza

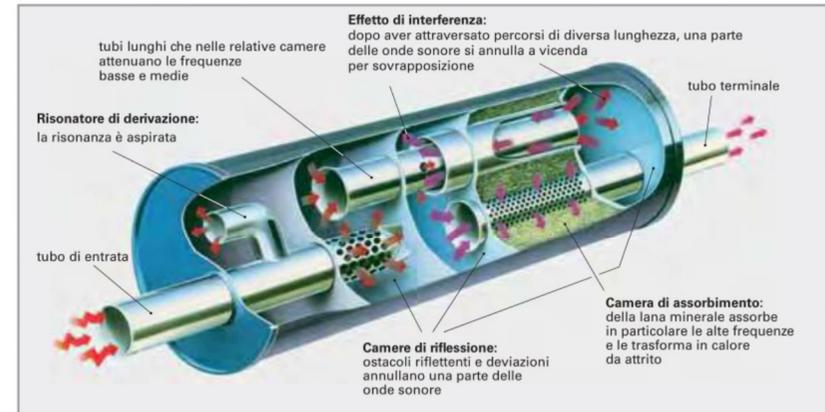


Figura 1: Silenziatore combinato a riflessione e ad assorbimento

Assorbimento. Nell'attenuazione acustica per assorbimento, le onde sonore sono messe a contatto con un materiale poroso fonoassorbente. L'energia sonora è, in pratica, assorbita e trasformata per attrito in calore.

I silenziatori ad assorbimento (fig. 2) sono composti da una o più camere riempite di un materiale fonoassorbente quale la lana minerale o il filato di vetro. Il flusso dei gas di scarico è condotto attraverso un tubo perforato e può attraversare il silenziatore in modo pressoché indisturbato. Le onde sonore pas-

sano attraverso le perforazioni fino a raggiungere il materiale fonoassorbente, grazie al quale è possibile assorbire soprattutto le frequenze più alte. I silenziatori ad assorbimento sono in genere utilizzati come silenziatori principali.

Silenziatore combinato riflessione-assorbimento (fig. 1). I silenziatori a riflessione si prestano in modo particolare all'attenuazione dei suoni a bassa frequenza, mentre i silenziatori ad assorbimento sono efficaci principalmente in presenza di suoni ad alta frequenza. Per tale motivo, in genere, si utilizza una combinazione di entrambi i sistemi di attenuazione riuniti all'interno di un unico silenziatore.

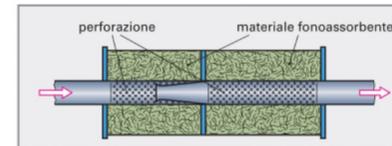


Figura 2: Silenziatore ad assorbimento

INDICAZIONI PER LE OFFICINE

- Ad ogni ispezione, controllare la tenuta dell'impianto dei gas di scarico. Tracce di fuliggine indicano punti non ermetici o difettosi.

- Controllare le lamiere termoisolanti.
- Rinnovare le parti arrugginite.
- Controllare i supporti dell'impianto di scarico.

DOMANDE DI RIPASSO

- 1 Quali sono i compiti dell'impianto dei gas di scarico?
- 2 Qual è l'unità di misura del livello sonoro?
- 3 Per quale motivo non deve essere modificato il sistema di attenuazione acustica di un autoveicolo?
- 4 Qual è il rumore di crociera massimo consentito per un'autovettura?

- 5 Qual è il rumore di crociera massimo consentito per una motocicletta leggera?
- 6 A quali sollecitazioni è sottoposto l'impianto dei gas di scarico?
- 7 Di quali parti è composto un impianto dei gas di scarico?
- 8 Per quale motivo un impianto di gas di scarico deve essere ermetico?

13.2 Riduzione delle sostanze nocive nei motori a ciclo Otto

13.2.1 Composizione dei gas di scarico

Dato l'elevato carico di sostanze nocive presenti nell'aria, a causa dei gas di scarico del traffico stradale, il legislatore ha imposto una limitazione delle sostanze nocive emesse.

I carburanti sono generalmente costituiti da composti di idrocarburi. In caso di combustione completa vengono prodotti anidride carbonica (biossido di diossido di carbonio), vapore acqueo, azoto e gas nobili.

La grande quantità di anidride carbonica è considerata concausa dei cambiamenti climatici (effetto serra). A causa dell'incompleta combustione del carburante nel motore, vengono anche prodotti:

- monossido di carbonio, CO;
- idrocarburi incombusti, HC;
- ossidi di azoto, NO_x.
- particolato.

Per un motore a ciclo Otto in temperatura d'esercizio, a monte del catalizzatore, a carico e regime di giri motore medi, la parte di CO, HC e NO_x rappresenta circa l'1% del quantitativo complessivo dei gas di scarico (fig.1).

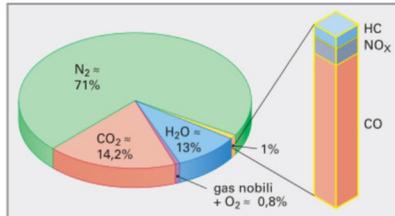


Figura 1: Composizione dei gas di scarico

Sostanze tossiche

Il contenuto delle singole sostanze tossiche nei gas di scarico è fortemente influenzato dal rapporto aria-carburante λ (fig. 2).

I motori a ciclo Otto forniscono la loro massima potenza con una carenza d'aria del 5-10% ($\lambda = 0,95-0,90$; miscela grassa) (fig. 3). In condizioni di carenza d'aria, il carburante non è completamente utilizzato. Inoltre, aumentano il consumo specifico di carburante e le componenti nocive dei gas di scarico, come il monossido di carbonio e gli idrocarburi incombusti. I motori a ciclo Otto ottengono il loro più basso consumo di carburante con un eccesso d'aria del 5-10%

($\lambda = 1,05-1,1$; miscela magra). La potenza del motore è però minore ed è più alta la temperatura di picco del motore, a causa della mancanza dell'effetto dell'evaporazione del carburante. Le quantità di monossido di carbonio e di idrocarburi incombusti è bassa, mentre è molto alta quella degli ossidi di azoto.

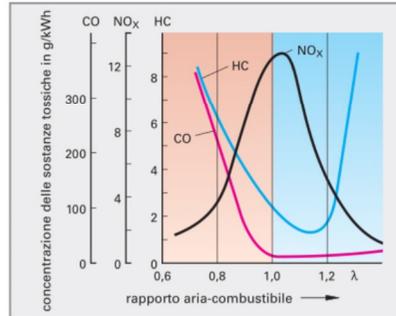


Figura 2: Sostanze tossiche nei gas di scarico in relazione al rapporto aria-carburante

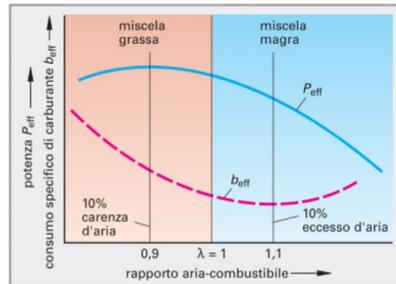


Figura 3: Potenza e consumo di carburante in relazione al rapporto aria-carburante

Proprietà nocive dei gas di scarico

Monossido di carbonio, CO. Il monossido di carbonio è un gas incolore e inodore. Se è inspirato, blocca il trasporto di ossigeno nel sangue. In concentrazioni superiori a 0,3% del volume e, in caso di esposizione prolungata, può essere letale. Concentrazioni minori possono provocare mal di testa, stanchezza e disturbi percettivi. Il monossido di carbonio nasce dalla combustione incompleta in seguito a carenza d'aria. La percentuale di monossido di carbonio sarà tanto più elevata quanto più ricca è la miscela aria-carburante. A causa della miscelazione incompleta del carburante e dell'aria nel cilindro (presenza di zone con miscela grassa), anche in condizioni di eccesso d'aria si producono delle piccole quantità di monossido di carbonio.

Idrocarburi incombusti, composti HC (dall'inglese: hydrocarbon). Sono composti da una moltitudine di legami di carbonio e idrogeno. Gli idrocarburi, in parte, sono ritenuti cancerogeni. Essi sono la causa del cattivo odore dei gas di scarico e, insieme agli ossidi di azoto, sono corresponsabili della formazione dello smog. Gli idrocarburi incombusti sono prodotti dalla combustione incompleta della miscela aria-carburante in seguito a carenza d'aria ($\lambda < 1$) oppure in presenza di miscela molto magra ($\lambda > 1,2$). In particolare, si formano idrocarburi incombusti nelle zone della camera di combustione non completamente raggiunte dal fronte di fiamma, come nella fessura posta tra il collettore rompifiamma e la parete del cilindro.

Ossidi di azoto, NO_x. Il termine generale ossidi di azoto è usato per indicare i diversi ossidi dell'azoto (monossido di azoto NO, biossido di azoto NO₂, ossido di diazoto N₂O). A seconda del loro legame, gli ossidi di azoto possono essere incolore e inodore oppure avere un colore rossastro e un odore pungente; irritano le vie respiratorie e conducono, ad elevate concentrazioni, a paralisi. Sono corresponsabili della formazione dell'ozono e del deperimento delle foreste. Gli ossidi di azoto sono prodotti in presenza di elevate temperature e pressioni di combustione.

Sostanze solide. Sono originate dalla combustione incompleta sotto forma di particelle o così detto particolato (nucleo di carbonio/nucleo di fuliggine con agglomerazione di depositi). Questi agglomerati di composti HC al nucleo di carbonio sono considerati cancerogeni. Al momento dell'omologazione di nuovi veicoli a motore, la massa di particolato (PM), così come il suo numero (PN), non devono superare determinati limiti.

Disposizioni legali sull'emissione di sostanze tossiche presenti nei gas di scarico dei motori a ciclo Otto

Il legislatore, con l'entrata in vigore delle normative (tab. 1), definisce i valori limite delle sostanze tossiche contenute nei gas di scarico, il tipo di ciclo di prova e le direttive inerenti il controllo periodico o istantaneo dei dispositivi antinquinamento (OBD). Solo i veicoli che rispettano quanto imposto dalla legge possono circolare.

M1 ($\leq 2,5 t \leq 6$ posti)	CO	HC	NO _x	PM	PN
Euro 3 dal 2000	2,30	0,20	0,15	-	-
Euro 4 dal 2005	1,00	0,10	0,08	-	-
Euro 5 dal 2009	1,00	0,10	0,06	0,005*	-
Euro 6 dal 2014	1,00	0,10	0,06	0,005*	6×10^{11}

* con iniezione diretta 0,0045

Misurazione dei valori dei gas di scarico

Per l'ottenimento dell'omologazione (certificato tipo), i valori dei gas di scarico sono misurati su un

banco prova a rulli. La prova prevede la simulazione di percorsi di marcia caratteristici con relativa analisi delle sostanze tossiche emesse.

Test europeo (ciclo di prova europeo, fig. 1) per automobili fino a 2500 kg di peso complessivo consentito e autocarri leggeri fino a 3,5 t. La prima parte corrisponde a un viaggio nel traffico cittadino con una velocità da 0 a 50 km/h; a partire dai modelli Euro 3, questa parte del test è eseguita, partendo con motore freddo (20 °C), per quattro volte in 13 minuti senza pausa. La seconda parte corrisponde a un viaggio di 7 minuti nel traffico extraurbano durante il quale si raggiunge una velocità massima di 120 km/h. I gas di scarico emessi durante l'intero test si raccolgono secondo le condizioni prescritte e, in seguito, sono analizzati. I valori limite espressi in g/km inerenti alle sostanze tossiche non devono essere superati, indipendentemente dalla cilindrata. A partire dal 2002, i veicoli della classe M1, equipaggiati con un motore a ciclo Otto, sono sottoposti ad un ulteriore test che prescrive la messa in moto del motore alla temperatura di -7 °C. In questo caso gli HC devono risultare < 1,8 g/km, mentre il CO < 18 g/km.

Esame dei gas di scarico (EGS). Per i veicoli a motore già immessi in circolazione, l'esame dei gas di scarico è prescritto in intervalli di tempo ben definiti. In questi esami vengono verificati i valori di CO, al minimo e con regime accelerato, a seconda dei diversi parametri di funzionamento (temperatura d'esercizio, numero di giri motore). Inoltre, sono effettuati altri esami visivi e funzionali, per esempio:

- verifica di componenti costruttive che producono le emissioni nocive;
- verifica del circuito di regolazione;
- verifica del punto di accensione (per quanto raffigurabile).

On-Board-Diagnosis (OBD). In questa diagnosi, la centralina "gestione motore" memorizza gli errori che si presentano nel sistema di iniezione, di accensione, di trattamento dei gas di scarico (funzionamento del catalizzatore) e di alimentazione del carburante. Una spia di controllo, posta all'interno del veicolo, indica al conducente la presenza di eventuali anomalie. In base alle norme vigenti, i difetti di funzionamento sono da riparare immediatamente.

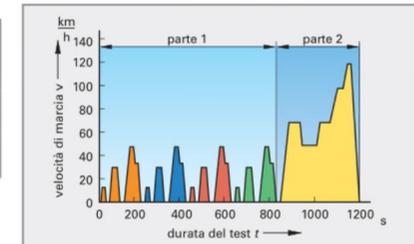


Figura 1: Test europeo (ciclo di prova europeo)

13.2.2 Procedimenti per la riduzione delle sostanze tossiche

Le percentuali di sostanze tossiche nei gas di scarico possono essere ridotte mediante l'utilizzo di un carburante idoneo (povero di zolfo, senza piombo), mediante interventi sul motore o mediante post-trattamento dei gas di scarico (immissione di aria secondaria, catalizzatore).

Interventi sul motore. Hanno lo scopo di ridurre l'emissione di sostanze tossiche e il consumo di carburante tramite una più completa combustione della miscela. I seguenti interventi sul motore possono migliorare la qualità dei gas di scarico.

- **Ottimizzazione del motore:** riguarda disposizione e forma della camera di combustione, rapporto di compressione, alzata e fasatura variabile delle valvole, lunghezza e sezione del collettore di aspirazione variabile e riduzione dell'attrito dell'aria in fase di aspirazione.
- **Tipo e qualità della preparazione della miscela:** formazione della miscela interna o esterna, miscela omogenea o a carica stratificata.
- **Ricircolo dei gas di scarico:** interno, tramite incrocio delle valvole; esterno, tramite impianto di ricircolo con valvola EGR.
- **Gestione elettronica del motore:** comprende calcolo del punto di accensione tramite diagramma caratteristico, taglio del carburante in rilascio, regolazione della pressione di sovralimentazione, disattivazione selettiva dei cilindri, comando e controllo dei componenti del sistema per il trattamento dei gas di scarico (catalizzatore, sonde lambda).
- **Sovralimentazione con scambiatore di calore (intercooler):** aumenta la potenza specifica del motore e, contemporaneamente, riduce i picchi di temperatura nella camera di combustione con conseguente diminuzione della formazione di NO_x .

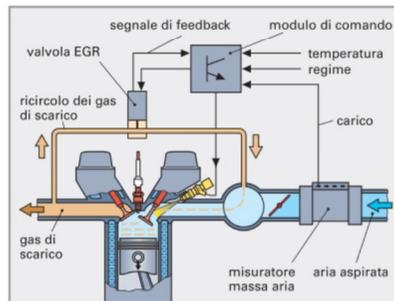


Figura 1: Ricircolo esterno dei gas di scarico

Ricircolo esterno dei gas di scarico (EGR, fig. 1)

Il ricircolo esterno dei gas di scarico consiste nel prelevare, a valle del collettore di scarico, una parte dei gas combusti e di immetterli nel collettore d'aspirazione in modo che vengano riaspirati nel cilindro assieme alla miscela aria-carburante.

Il ricircolo dei gas di scarico consente di ridurre il riempimento di miscela aria-carburante dei cilindri. Poiché i gas di scarico riaspirati non possono più partecipare alla combustione, diminuisce la temperatura di combustione e, di conseguenza, si forma una quantità significativamente minore di ossidi di azoto (fino a 60% in meno). All'aumentare del tasso di ricircolo, aumentano sia il contenuto di idrocarburi incombusti sia il consumo di carburante. Tali fattori determinano il limite massimo del tasso di ricircolo (max. 15-20%). Inoltre, un tasso di ricircolo dei gas di scarico troppo elevato impedirebbe un funzionamento fluido e regolare del motore.

Di norma, il ricircolo dei gas di scarico è attivato solo a motore caldo e in condizioni di carico parziale ($\lambda \approx 1$), mentre è interrotto in presenza di miscele grasse, che producono poco NO_x , per esempio durante l'avviamento a freddo, nella fase di riscaldamento, in accelerazione e a pieno carico. Durante il funzionamento al minimo, il ricircolo dei gas di scarico è disattivato, per consentire un funzionamento fluido del motore. Una valvola di ricircolo dei gas di scarico, montata sul tubo che collega il collettore di scarico con il collettore di aspirazione, controlla il tasso di ricircolo in relazione alla temperatura, al carico e al regime del motore.

Post-trattamento dei gas di scarico nel catalizzatore

Il post-trattamento dei gas di scarico consiste nel convertire le sostanze tossiche prodotte durante la combustione in sostanze completamente o parzialmente innocue.

È il procedimento che fino ad oggi si è dimostrato più efficace. Il catalizzatore effettua la conversione chimica delle sostanze tossiche in sostanze atossiche, senza che in esso vi sia un processo di usura.

Struttura del catalizzatore. Le parti fondamentali del catalizzatore (fig. 1, pag. 342) sono:

- il supporto in ceramica (silicato di alluminio-magnesio) o metallo;
- lo strato intermedio (washcoat), detto anche strato portante;
- lo strato ad azione catalitica.

Il supporto è composto da alcune migliaia di piccoli canali, attraverso i quali passano i gas di scarico. La superficie del supporto è rivestita di uno strato intermedio molto poroso, che aumenta la superficie efficace del catalizzatore di circa 7000 volte. Sullo strato intermedio è depositato, per vaporizzazione, lo strato ad azione catalitica in platino, rodio e palladio (≈ 2 g).

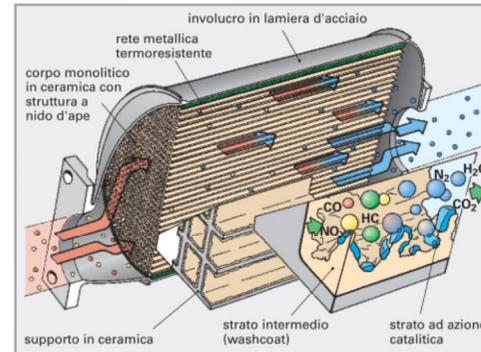


Figura 1: Struttura e funzionamento di un catalizzatore con corpo portante in ceramica

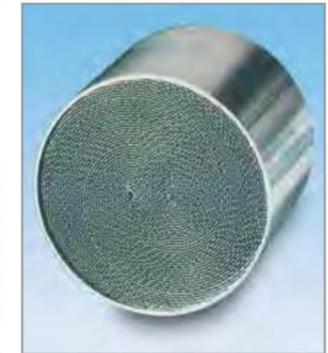


Figura 2: Catalizzatore con supporto in metallo

Vantaggi e svantaggi del supporto in ceramica rispetto al supporto in metallo

Vantaggi: rispetto al supporto in metallo, quello in ceramica consente un più facile recupero dei metalli nobili, ha una temperatura d'esercizio molto costante ed è più economico.

Svantaggi: il corpo monolitico in ceramica è molto sensibile a urti e sollecitazioni meccaniche. Per tale motivo deve essere alloggiato in una rete metallica resistente alle alte temperature, che è a sua volta circondata da un involucro in lamiera d'acciaio. Inoltre, necessita di un tempo di riscaldamento più lungo, ha una minore resistenza alle elevate temperature di funzionamento e genera una contropressione nell'impianto di scarico più elevata, con la conseguenza che la potenza del motore si riduce.

Funzionamento del catalizzatore

I catalizzatori più utilizzati sono i cosiddetti catalizzatori monolitici a tre vie. Questa denominazione indica che all'interno di un solo involucro avvengono contemporaneamente tre trasformazioni chimiche.

- Riduzione dei NO_x in azoto (con liberazione di ossigeno).
- Ossidazione del CO in CO_2 (con consumo di ossigeno).
- Ossidazione degli HC in CO_2 e H_2O (con consumo di ossigeno).

Affinché queste trasformazioni chimiche possano iniziare, è necessario che il catalizzatore raggiunga la sua temperatura di attivazione e che la miscela aria-carburante corrisponda all'incirca al rapporto stechiometrico teorico ($\lambda = 1$). Il catalizzatore, infatti, è in grado di convertire al meglio le sostanze tossiche soltanto se la combustione avviene con coefficiente d'aria prossimo a $\lambda = 1$. Tale rapporto aria-carburante

è detto finestra λ o finestra catalizzatore e si situa tra i valori $\lambda = 0,995$ e $\lambda = 1,005$. Il funzionamento del motore con un tale rapporto aria-carburante consente di ottenere una composizione dei gas di scarico in cui l'ossigeno, liberato durante la riduzione degli ossidi di azoto, è sufficiente per ossidare quasi completamente gli HC e il CO in CO_2 e H_2O . La combustione di una miscela ricca ($\lambda < 1$), comporta un aumento di CO e HC nei gas di scarico, mentre la combustione di una miscela povera ($\lambda > 1$) comporta un aumento degli ossidi di azoto (fig. 3).

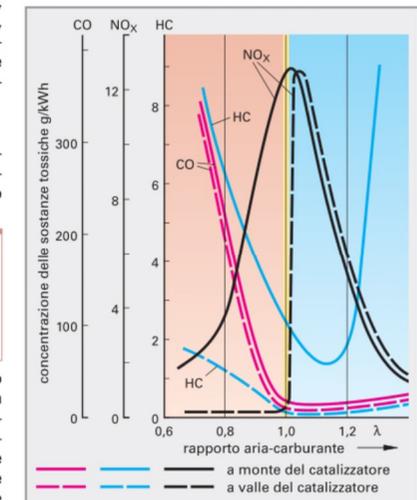


Figura 3: Riduzione delle sostanze tossiche

Condizioni di funzionamento di un catalizzatore monolita a tre vie

Il campo d'esercizio e di temperatura di un catalizzatore si situa tra 400-800 °C.

Solo quando le temperature superano i 300 °C, il catalizzatore possiede una percentuale di conversione (quota di trasformazione) superiore al 50% (punto "light off"/temperatura di inizio funzionamento). Il raggiungimento di questa temperatura dopo la messa in moto può essere sensibilmente accorciato tramite installazione del catalizzatore in vicinanza del motore, collettori di scarico isolati con intercapedine d'aria, forte riduzione del punto di accensione (fino a 15°) e immissione di aria secondaria. A temperature superiori a 800 °C, interviene un fenomeno di invecchiamento termico dello strato catalitico. Nel caso la temperatura sia superiore a 1000 °C, il catalizzatore si fonde.



Figura 1: Catalizzatore fuso

Affinché lo strato catalitico attivo non venga reso inefficiente dai depositi, è necessario utilizzare unicamente benzina senza piombo e povera di zolfo. Anche i residui di combustione dei lubrificanti, per esempio in presenza di pistoni con fascia elastica diftosa oppure di usura dei cilindri, si depositano sullo strato attivo catalitico e, in questo modo, finiscono per diminuire l'efficacia del catalizzatore.

Catalizzatore con sistema di preparazione regolato della miscela (catalizzatore regolato)

In questo sistema, una sonda lambda, mediante il contenuto di ossigeno residuo nel gas di scarico, sorveglia la composizione della miscela con tolleranze di $\lambda = 1 \pm 0,005$ (finestra λ).

Se con sistemi di formazione regolata della miscela si possono ottenere nel catalizzatore quote di conversione del 94-98%, per veicoli a motore più datati, con sistemi di miscelazione non regolati, è possibile raggiungere in media quote di conversione del 60%.

Ciclo di regolazione lambda (λ) (fig. 2). La sonda λ è installata a monte del catalizzatore in funzione del rilevatore di misura (sensore, generatore di segnale). A seconda del residuo di ossigeno presente nei gas di scarico, la sonda λ dà un corrispondente segnale di tensione al regolatore della centralina gestione motore, che attiva, per piccole quantità di ossigeno residuo (miscela grassa), una diminuzione del tempo di iniezione. In caso di grandi quantità di ossige-

no (miscela magra), il tempo di iniezione, invece, aumenta. La regolazione si ripete con frequenza prefissata, in modo tale da non influire sulla rotazione omogenea del motore.

Condizioni per la regolazione λ .

- Temperatura della sonda superiore a 300 °C.
- Motore al regime minimo o a carico parziale.
- Temperatura motore superiore a 40 °C.

Una seconda sonda λ (sonda di monitoraggio), installata a valle del catalizzatore, serve per sorvegliare il funzionamento del catalizzatore stesso.

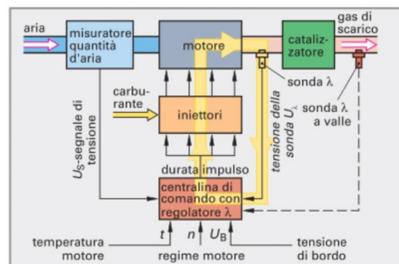


Figura 2: Schema di funzionamento di un sistema di iniezione a intermittenza con regolazione λ .

Regolazione λ adattiva. Se, per esempio, il valore di ossigeno residuo in una data fascia di carico motore è costantemente troppo basso, ossia la miscela è troppo grassa, viene opportunamente ridotta la quantità di iniezione, che viene segnalata e, conseguentemente, registrata dalla centralina gestione motore. In questo modo si possono correggere, in un determinato campo di regolazione, valori perturbanti quali una non corretta pressione del sistema di alimentazione, valori di temperatura non corretti, usura del motore, immissione di aria falsa. Allo stesso modo, il tempo di reazione della regolazione λ è accorciato, con conseguente miglioramento della qualità dei gas di scarico.

Tipi costruttivi di sonda λ .

Sonda a salto di tensione (fig. 1, pag. 344)

Struttura. La sonda è costituita da un corpo ceramico di biossido di zirconio, il quale è rivestito all'interno e all'esterno da una sottile pellicola microporosa di platino. La sonda è riscaldata elettricamente affinché possa raggiungere nel minor tempo possibile la temperatura di funzionamento. La superficie esterna della sonda è esposta al flusso dei gas di scarico ed è collegata al corpo della sonda mediante uno strato di platino, formando il polo meno (-). La parte interna, invece, è a contatto con l'aria esterna. Attraverso lo strato di platino, la sonda è collegata al cablaggio elettrico, costituendo il polo positivo (+).

Sonda a salto di resistenza (fig. 3)

Il corpo ceramico della sonda è costituito da biossido di titanio, rivestito da elettrodi porosi al platino.

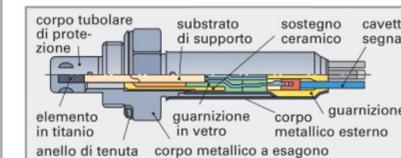


Figura 3: Sonda al biossido di titanio

Funzionamento (fig. 4). Il biossido di titanio modifica la propria conduttività in funzione della concentrazione di ossigeno nei gas di scarico e della temperatura del corpo ceramico. Per una miscela magra ($\lambda > 1$), il biossido di titanio ha meno conducibilità di quella per una miscela grassa ($\lambda < 1$).

Il valore di resistenza di una sonda al biossido di titanio a valore $\lambda = 1$ si modifica a salti di tensione tra 1 k Ω (miscela grassa) e 1 M Ω (miscela magra).

La sonda è collegata alla centralina motore con una resistenza in serie. La caduta di tensione alla resistenza si modifica in funzione della concentrazione di ossigeno residuo nei gas di scarico tra 0,4 V (miscela magra) e 3,9-5 V (miscela grassa). Rispetto alla sonda al biossido di zirconio, non necessita del riferimento con l'aria esterna. Per una sonda funzionante, la frequenza di regolazione è superiore a 1 Hz. La sonda è pronta a funzionare a partire da 200 °C, tuttavia la frequenza di regolazione per una precisa correzione della miscela è ancora troppo bassa. La temperatura ottimale di esercizio è 600-700 °C. Per il mantenimento di tale temperatura, viene richiesto un riscaldamento regolabile della sonda. A temperature superiori a 850 °C, la sonda è distrutta.

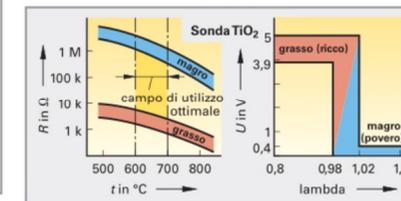


Figura 4: Diagrammi di sonda a salto di resistenza

Sonda λ a banda larga

Per mezzo della sonda λ a banda larga si possono misurare valori $\lambda > 0,7$ in modo continuo. È di conseguenza adatta anche per la regolazione costante dei motori a ciclo Otto a miscela magra, dei motori Diesel e dei motori a gas.

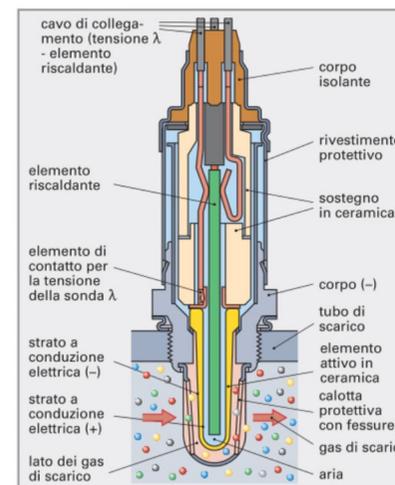


Figura 1: Struttura della sonda a salto di tensione

Funzionamento (fig. 2). A partire da circa 300 °C, il materiale ceramico della sonda diventa conduttore di ioni di ossigeno. In base alla quantità di ossigeno nell'aria di aspirazione e alle differenti quantità di ossigeno residuo nei gas di scarico, si ottiene, a $\lambda = 1$, un salto di tensione tra 100 mV (miscela magra) e 800 mV (miscela grassa). Per $\lambda = 1$, la tensione si situa a 450-500 mV. La temperatura massima della sonda non deve superare 800-900 °C.

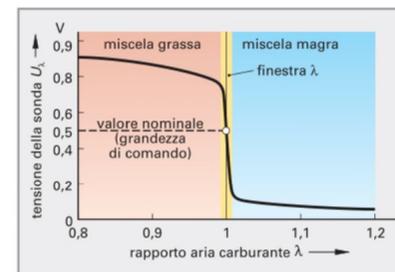


Figura 2: Diagramma di una sonda a salto di tensione in funzione di λ .

Frequenza di regolazione. A sonda perfettamente funzionante e a un regime motore di circa 2000 giri/min è di regola maggiore a 1 Hz. Ciò significa che il segnale di tensione deve oscillare tra 0,1 V (miscela magra) e 0,9 V (miscela grassa) almeno una volta al secondo.

La temperatura di esercizio ottimale di questa sonda si situa tra 700-800 °C.

Struttura (fig. 1). La sonda si compone di due sonde a salto di tensione al biossido di zirconio, di cui una agisce come cella di misurazione (cella sensore) e l'altra come cella di pompaggio (cella pompa). Queste due unità sono configurate in modo tale che fra le stesse viene a realizzarsi una minima intercapedine di diffusione (10-50 μm), la quale serve come camera di misurazione. L'intercapedine è collegata ai gas di scarico con un passaggio di entrata. Nella cella di misurazione (cella sensore) si trova un passaggio d'aria di riferimento in collegamento con l'aria esterna.

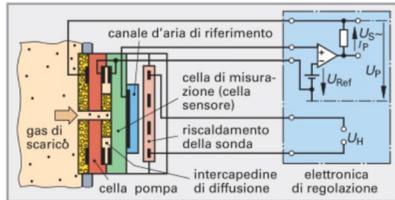


Figura 1: Sonda λ a banda larga

Funzionamento della cella pompa. Per mezzo dello scorrimento del flusso sul corpo solido dell'elettrolita della sonda a salto di tensione, è possibile, a partire da una determinata temperatura, originare un flusso di ioni di ossigeno (= flusso pompa). La direzione del flusso di ioni di ossigeno dipende, in questo caso, dalla polarità (±) della tensione elettrica collegata.

Unità di misurazione della cella pompa. Mediante la cella di misurazione (cella sensore), che agisce secondo il principio della sonda a salto di tensione, è determinato l'ossigeno residuo dei gas di scarico. Nel caso di miscela magra ($\lambda > 1 \rightarrow U_s < 300$ mV), l'elettronica di regolazione imposta una tensione alla cella pompa ($U_{\text{ lato gas di scarico } +}; U_{\text{ cella di misurazione } -}$) in modo tale che gli ioni di ossigeno si muovano attraverso l'intercapedine di diffusione in direzione lato gas di scarico. Questo succede fino a quando nella cella di misurazione $\lambda = 1$. Il flusso di corrente della pompa richiesto risulta così proporzionale sia alla concentrazione di ossigeno residuo nel gas di scarico (fig. 1), sia al valore λ istantaneo. La centralina gestione motore fornisce così il rapporto di miscela desiderato in funzione del campo di valori impostato.

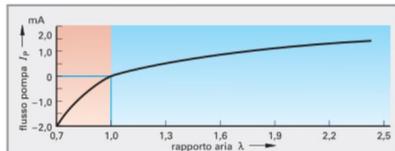


Figura 2: Diagramma valori della sonda λ a banda larga

Catalizzatore ad accumulo di NO_x

Nei motori a ciclo Otto a iniezione diretta che, a determinate condizioni d'esercizio, funzionano a cariche d'aria stratificate e $\lambda > 1$, non è possibile ottenere una conversione di tutti gli ossidi d'azoto solo mediante il catalizzatore a tre vie. Accanto al catalizzatore a tre vie è impiegato quindi uno speciale catalizzatore ad accumulo di NO_x per il trattamento successivo degli ossidi di azoto, installato sotto il pianale, in vicinanza del motore (fig. 2).

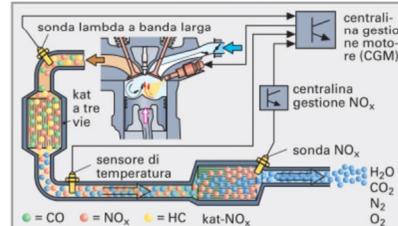


Figura 3: Impianto di depurazione dei gas di scarico di un motore a ciclo Otto a iniezione diretta con $\lambda > 1$

Struttura. Su un supporto in ceramica viene applicato uno strato intermedio, ricoperto con ossido di bario (BaO) oppure ossido di potassio (KO), che funge da materiale di accumulo.

Funzionamento (fig. 4), accumulo di NO_x. Nella fase di utilizzo a miscela magra, il materiale di accumulo è in grado di legare (assorbire) gli ossidi di azoto. Quando la capacità di assorbimento è esaurita, la situazione viene riconosciuta da un sensore NO_x.

Riduzione di NO_x. Mediante "arricchimento" periodico (1-5 secondi), gli ossidi di azoto sono liberati e, con l'aiuto delle componenti incombuste di HC e CO, sono ridotte ad azoto per mezzo del rodio, un metallo nobile.



Figura 4: Accumulo e rigenerazione di NO_x

Condizioni di esercizio per l'accumulo di NO_x

Per temperature d'esercizio tra 250 e 500 °C viene ridotto l'80-90% degli ossidi di azoto.

Con temperature superiori a 500 °C, il catalizzatore è soggetto a invecchiamento precoce. Per questo motivo, i gas di scarico devono essere raffreddati mediante una canale di by-pass. Inoltre, la quantità di zolfo nel carburante non deve superare 0,050 mg (< 0,050 ppm), altrimenti la capacità di accumulo risulta essere sensibilmente ridotta ("avvelenamento da zolfo").

Sensore NO_x (sensore di ossido di azoto)

Compito. Nei sistemi di post-trattamento dei gas di scarico, il sensore NO_x è necessario per sorvegliare la riduzione degli ossidi di azoto, in modo che i valori limite richiesti vengano rispettati. Per questo motivo, il sensore NO_x misura con alta precisione NO_x e O₂ nei gas di scarico con $\lambda \geq 1$. Il sensore NO_x è localizzato subito a valle del catalizzatore ad accumulo. Possiede una propria centralina di gestione, che comunica con la centralina gestione motore, e trasmette i dati di misurazione elaborati tramite il sistema CAN-bus (fig. 1).



Figura 1: Sensore NO_x con relativa centralina di gestione

Struttura (fig. 2). L'elemento sensore NO_x è composto da tre strati di elettrolita solido a base di biossido di zirconio (ZrO₂), i quali sono, a loro volta, ricoperti da elettrodi. La camera 1 e la camera 2 (sensore a doppia camera) sono divise dalla barriera di diffusione 2. Lo strato superiore e inferiore dell'elemento sensore sono costituiti da ossido di alluminio (Al₂O₃) al fine di ottenere un miglior isolamento possibile e una resistenza alle variazioni di temperatura dell'elemento sensore stesso. Un riscaldamento della sonda rende possibile il raggiungimento della propria temperatura d'esercizio nel più breve tempo possibile e il suo mantenimento a circa 700 °C. L'elemento sensore è ricoperto da un rivestimento protettivo contro le componenti aggressive dei gas di scarico ed è racchiuso in un corpo metallico.

Funzionamento (fig. 2). I gas di scarico passano dapprima attraverso la barriera di diffusione 1 per entrare nella camera 1. In questa camera l'ossigeno, che nella seconda camera andrebbe a influenzare la misurazione di azoto, è completamente eliminato. Per fare ciò, le molecole di O₂, negli elettroliti di camera 1, vengono scomposte in ioni di ossigeno a doppia carica (2⁻). Applicando una tensione di pompaggio, gli ioni di ossigeno sono spinti fuori dalla camera 1 mediante gli elettroliti solidi di ZrO₂ fino a quando λ supera di poco il valore 1; in questo caso, la tensione di misurazione dell'elettrolita centrale è impiegata come valore di regolazione per la camera 1. Il flusso pompa I_{p1} è conseguentemente proporzionale alla concentrazione di ossigeno nei gas di scarico. In camera 2, attraverso la seconda barriera di diffusione, arrivano NO_x e i residui di O₂, che si diffondono verso l'esterno attraverso condotti e passaggi. In camera 2, all'elettrodo, l'ossido di azoto (2NO) viene scomposto in azoto (N₂) e ioni di ossigeno (2O⁻). Questi ioni di ossigeno, mediante l'attuazione di una tensione all'elettrolita solido, sono spinti fuori dalla camera 2 e immessi nella camera di riferimento, dove gli ioni di ossigeno si trasformano in O₂ per poi diffondersi all'esterno attraverso condotti appositi.

Il flusso pompa I_{p2} (in μA) misurato in questo modo è proporzionale alla concentrazione di ossido di azoto nei gas di scarico. I_{p2} è calcolato nella centralina di gestione NO_x e trasmesso come segnale preimpostato alla centralina gestione motore. Il campo di misurazione di NO_x è di 0-500 ppm con una precisione di misurazione di ±10 ppm (parti per milione).

Lo spostamento (offset) delle curve di misurazione per I_{p2} è dovuto alla quantità di ossigeno residuo nella camera 2.

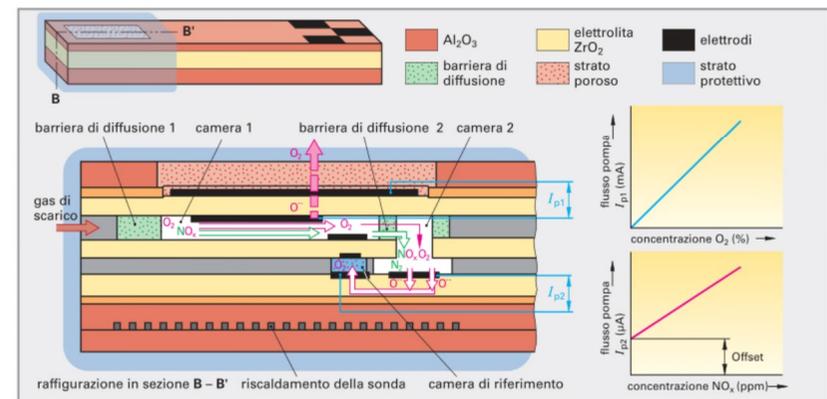


Figura 2: Struttura e funzionamento del sensore NO_x

Il sistema dell'aria secondaria (SAS, fig. 1)

L'immissione di aria secondaria riduce i valori delle sostanze tossiche HC e CO a motore freddo e durante la fase di riscaldamento del motore ($\lambda < 1$) tramite un processo di post-combustione termica.

L'immissione di aria secondaria è necessaria perché, durante l'avviamento a freddo, il catalizzatore non è ancora entrato in funzione; consiste nel convogliare aria nel collettore di scarico a monte del catalizzatore.

Vantaggi

- Dopo l'avviamento a freddo, il catalizzatore raggiunge più rapidamente la temperatura di funzionamento.
- Il catalizzatore può essere posizionato ad una maggiore distanza dal collettore di scarico, con conseguente aumento della sua durata di vita.

Esempio. Sistema dell'aria secondaria (fig. 1). Questo sistema prevede che la centralina di comando controlli un'elettropompa dell'aria secondaria e una valvola elettropneumatica di commutazione. Tramite una valvola di blocco e una di antiritorno, l'aria fornita dalla pompa si aggiunge ai gas di scarico prima che questi raggiungano il catalizzatore. La

valvola di blocco impedisce il flusso d'aria una volta terminata la fase di riscaldamento ed è pilotata dalla valvola elettropneumatica di commutazione. La valvola antiritorno impedisce che i gas di scarico caldi raggiungano la pompa dell'aria secondaria, danneggiandola.

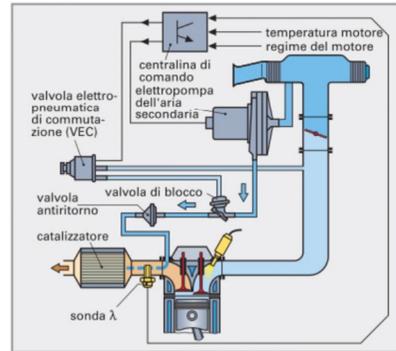


Figura 1: Schema del sistema dell'aria secondaria

13.2.3 Diagnosi e manutenzione (EGS)

In generale. I veicoli a motore a ciclo Otto (ad accensione per scintilla) oppure a motore Diesel (ad accensione per compressione) devono sottoporsi ad un esame dei gas di scarico ad intervalli pre-stabiliti.

L'esame dei gas di scarico costituisce una parte specifica del controllo principale, che viene eseguito e certificato da officine certificate.

Esame dei gas di scarico (EGS) per veicoli ad accensione per scintilla

A seconda del tipo di certificato e della tipologia di costruzione, per l'applicazione della procedura di esame si distinguono: veicoli senza sistema di miscelazione regolata, veicoli con sistema di miscelazione regolata e veicoli con sistema di miscelazione regolata e sistema di diagnosi On-Board.

a) Lavori preparatori (vale per tutti i processi)

- Verificare la corrispondenza dei documenti del veicolo con il medesimo.
- Scelta della procedura di esame da applicare.
- Rilevazione dei dati identificativi del veicolo: numero di targa, km di percorrenza, entrata in circolazione, costruttore del veicolo, tipo e versione, numero di identificazione veicolo, tipo di carburante (benzina, gpl, ecc.).

b) Attuazione dell'esame dei gas di scarico

Esempio: veicolo con sistema di miscelazione regolato. Dopo aver messo a regime termicamente il motore (temperatura di almeno 60 °C) sono da esaminare le seguenti corrispondenze dei valori reali con i valori prescritti mediante strumenti e procedure certificate:

- valori di regolazione relativi alle emissioni di sostanze nocive, come il punto di accensione e il numero di giri motore al minimo;
- verifica del CO al regime minimo e a quello di minimo aumentato;
- valore λ a regime minimo aumentato;
- verifica del circuito di regolazione.

Esame del circuito di regolazione. Viene messo in atto con una procedura, definita dal costruttore, mediante l'attivazione di grandezze di disturbo, dette anche perturbatrici (procedura base), oppure mediante procedure sostitutive o alternative. Condizione per l'esame: il motore deve avere la corretta temperatura di esercizio. Con l'esempio relativo alla procedura base, l'esame del circuito di regolazione viene descritto mediante due semicurve (fig. 1, pag. 348). Per l'impiego di un motore regolato da λ , il valore λ deve collocarsi tra i valori limite imposti dal legislatore di $\lambda = 1,03$ e $\lambda = 0,97$. Per il calcolo del valore λ utilizzando lo strumento di misurazione EGS, è necessario rilevare, al terminale dell'impianto e in modo continuo, le quattro componenti del gas di scarico: CO, CO₂, HC e O₂. Nel momento in cui sono raggiunti valori stabili di gas di scarico, a un determinato

regime di rotazione, per esempio al minimo, il valore λ misurato dallo strumento viene registrato a 0,997. Questo è il valore di riferimento per il controllo del circuito di regolazione.

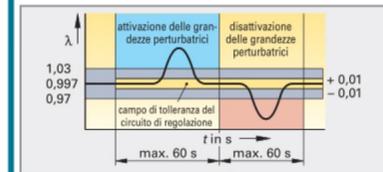


Figura 1: Variazione del valore λ durante il controllo del circuito di regolazione

Attivazione delle grandezze perturbatrici. Per esempio, mediante inserimento di aria falsa. In questo caso, la miscela si impoverisce. Si può ottenere distaccando il tubicino a valle della farfalla (osservare le prescrizioni del costruttore). A causa dell'attivazione della grandezza perturbatrice, il va-

lore limite superiore stabilito di $\lambda = 1,03$, in un primo momento è superato. Entro 60 secondi dall'attivazione, λ deve ritornare al valore di riferimento ($\lambda = 0,997 \pm 0,01$).

Disattivazione delle grandezze perturbatrici. Nel momento in cui il tubicino è ricollegato, la grandezza perturbatrice è disattivata e la miscela si arricchisce. Nel contempo, il valore limite inferiore $\lambda = 0,97$ deve subire un calo. Entro 60 secondi dalla disattivazione della grandezza perturbatrice, λ deve riprendere il valore di riferimento ($\lambda = 0,997 \pm 0,01$). In questo modo il funzionamento del circuito di regolazione rispetta la norma di legge.

Procedure sostitutive/alternative. Queste procedure sono applicate nel caso in cui non sia possibile attivare una procedura di base mediante una grandezza perturbatrice.

In questo caso, il funzionamento del circuito di regolazione è esaminato attraverso un apparecchio diagnostico (per esempio, tester) secondo le prescrizioni del costruttore.

13.2.4 Diagnosi Europea On Board (EOBD)

È una modalità di diagnosi integrata nella centralina gestione motore, nella quale sono monitorati i sistemi che influenzano le emissioni dei gas di scarico durante l'utilizzo dell'autoveicolo. Eventuali anomalie sono registrate nella centralina e possono essere rilevate tramite un'interfaccia. Inoltre, una spia di controllo, segnala la presenza di una o più anomalie al conducente.

Avviso di anomalia (MIL = Malfunction Indicator Lamp). Anomalie che portano a un innalzamento eccessivo dei valori di gas di scarico (tab. 1) oppure anomalie che superano i limiti di tolleranza durante l'autoesame della centralina gestione motore e della centralina gestione cambio sono segnalate al conducente mediante un indicatore ottico di color giallo.

Se l'anomalia è tale per cui verrebbe pregiudicata l'integrità del catalizzatore, la spia MIL lampeggia.

Anomalie che portano all'accensione della spia MIL sono da eliminare al più presto. Il percorso fatto dopo l'accensione della spia di allarme viene registrato.

Tabella 1: Valori limiti EOBD per veicoli a motore

$m_{perm} \leq 2500$ kg; ≤ 6 posti	CO	HC	NO _x	PM ¹⁾
Motore a ciclo Otto Euro 5	1,90	0,25	0,30	0,05
Motore Diesel Euro 5	1,90	0,25	0,54	0,05

¹⁾ Particolato = polveri sottili

Sorveglianza (monitoraggio) del sistema

I seguenti sottosistemi e sensori, quando presenti, sono monitorati in modo permanente o ciclicamente:

- funzionamento e riscaldamento del catalizzatore;
- funzionamento della sonda lambda;
- mancate accensioni;
- funzionamento del ricircolo dei gas di scarico (EGR);
- funzionamento del sistema ad aria secondaria;
- sistema di ventilazione del serbatoio del carburante;
- tutti i circuiti elettrici relativi a componenti di rilevanza per i gas di scarico;
- chiusura del serbatoio del carburante.

Un ciclo di prova si compone di avviamento, corsa con un regime di rotazione e una velocità definiti e di una fase di rilascio e arresto del motore. La temperatura motore deve essere compresa tra i 22 e i 70 °C.

Monitoraggio del catalizzatore

La sonda λ (fig. 2) a valle del catalizzatore serve a sorvegliare il funzionamento del catalizzatore. La centralina gestione motore confronta i segnali delle due sonde λ . La regolazione λ della prima sonda produce un'oscillazione grasso/magro.

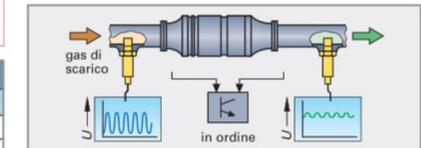


Figura 2: Segnali delle sonde (a monte e a valle) per un catalizzatore con alto grado di efficienza

Considerando l'alta capacità di accumulo di ossigeno di un catalizzatore ad alto grado di efficienza, la tensione della seconda sonda oscilla attorno a un valore medio. A causa dell'usura, il catalizzatore perde le proprie capacità di accumulo di ossigeno ed è così in grado di ossidare una minor quantità di CO e HC. Per questo motivo, le oscillazioni della sonda a valle risultano simili a quelle della sonda a monte (fig. 1). La centralina gestione motore riconosce l'efficienza troppo bassa del catalizzatore e fornisce l'indicazione di anomalia alla spia di allarme EOBD (MIL).

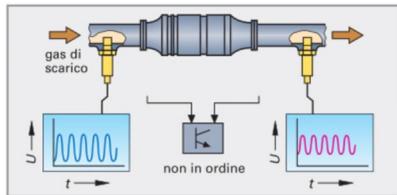


Figura 1: Segnali delle sonde (a monte e a valle) per un catalizzatore con scarso grado di efficienza

Monitoraggio della sonda

In una sonda usurata e difettosa a monte del catalizzatore, la frequenza di regolazione diminuisce. Inoltre, l'ampiezza dell'oscillazione si abbassa, non rendendo più riconoscibile una fase grasso/magro. Quando nella centralina di gestione motore sono superati i valori limite impostati, è segnalata un'anomalia. Inoltre, dall'ampiezza della tensione si può riconoscere se si è in presenza di un cortocircuito al polo positivo oppure alla massa, oppure di un'interruzione di corrente. Il funzionamento del riscaldamento della sonda può essere esaminato mediante la misurazione della caduta di tensione a una resistenza posta in serie.

Monitoraggio delle mancate accensioni (misfiring)

Ogni singola combustione genera sul volano motore un'accelerazione ben precisa, alla cui sorveglianza sono preposti una ruota incrementale (ruota fonica), costituita da un disco segmentato e posizionata sull'albero motore, e un trasmettitore, che invia i segnali alla centralina gestione motore per l'elaborazione. Se la combustione è in ordine per tutti i cilindri, la distanza di accensione tra i segmenti di rilevazione è uguale. Quando avviene una mancata accensione, si producono mutamenti di coppia motore, i quali originano una irregolarità di funzionamento del motore (fig. 2). In tal modo, la massa del volano e la ruota fonica decelerano fino all'accensione del cilindro successivo. Il tempo di intervallo fra un segmento e l'altro della ruota fonica si allunga di una frazione di secondo. Quando le mancate accensioni oltrepassano un determinato valore limite, si attiva la spia MIL. Nel caso sussista il pericolo di danneggiamento del catalizzatore, l'iniezione del cilindro interessato viene interrotta.

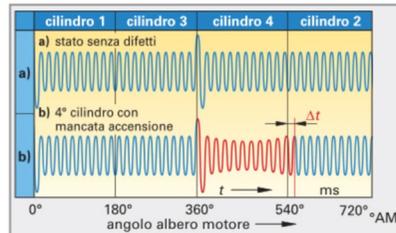


Figura 2: Riconoscimento delle mancate accensioni in motori a quattro cilindri

Monitoraggio del funzionamento del sistema ad aria secondaria

Il sistema ad aria secondaria può essere sorvegliato mediante la tensione della sonda λ . A motore freddo, nella fase di riscaldamento e a seconda del carico di esercizio e del numero di giri motore è attivata una pompa d'aria secondaria. Per una perfetta immissione d'aria, la tensione della sonda λ rimane nel campo magro ($\approx 300-100$ mV). Questa misurazione viene ripetuta regolarmente nella fase di avviamento a freddo (circa 90-150 secondi). Nel caso in cui la centralina gestione motore rilevi un numero sufficiente di bassi valori di tensione della sonda λ , il sistema ad aria secondaria viene giudicato funzionante.

Monitoraggio del funzionamento del ricircolo dei gas di scarico

Può avvenire mediante l'apertura della valvola di ricircolo dei gas di scarico in fase di rilascio e la rilevazione dello stato di pressione nel collettore di aspirazione. Se il sistema di ricircolo è in ordine, si registra una mutazione di pressione nel collettore di aspirazione in quanto si è creato un collegamento diretto fra collettore di scarico e di aspirazione. In caso contrario, viene attivata la segnalazione di errore.

Monitoraggio del sistema di ventilazione del serbatoio

Il controllo del sistema di ventilazione del serbatoio avviene tramite il segnale di tensione della sonda λ in condizioni di funzionamento al minimo. Inizialmente, la centralina chiude la valvola di ventilazione del filtro a carboni attivi e determina il valore λ . Successivamente, riapre la valvola di ventilazione e, se il filtro a carboni attivi è pieno, la miscela aria-carburante si arricchisce ($U_\lambda = 800-900$ mV); se, invece, il filtro a carboni attivi non contiene idrocarburi, la miscela aria-carburante si impoverisce ($U_\lambda = 300-100$ mV). La centralina di comando registra tali valori e se, dopo aver ripetuto la prova per un determinato numero di volte, riscontra dei risultati plausibili, considera il sistema funzionante.

A seconda del costruttore, possono essere eseguiti solo dei controlli elettrici al sistema ad aria secondaria, alla valvola di ricircolo dei gas di scarico e alla valvola di ventilazione del serbatoio.

INDICAZIONI PER LE OFFICINE

Memoria guasti – EOBD

- Anomalie che si manifestano una volta sola sono cancellate nel ciclo di prova successivo.
- In caso di ripetizione dell'anomalia, questa viene memorizzata con i relativi valori, per esempio regime di rotazione e temperatura del motore.
- Nel caso in cui l'anomalia sia già in memoria, l'indicatore ottico MIL si accende.
- Nel caso in cui l'anomalia non si manifesti più per altri tre cicli di esercizio, la spia di controllo si spegne.
- Anomalie che non ricompaiono più dopo 40 cicli sono cancellate.

Letture guasti – EOBD

Per la lettura guasti relativi alle emissioni dei gas di scarico sono stati stabiliti degli standard unificati: un'interfaccia, un protocollo di diagnosi e una relazione di diagnosi (certificato).

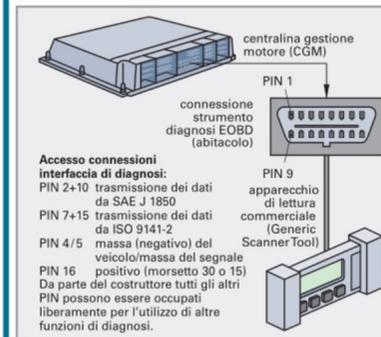


Figura 1: Lettura guasti EOBD

Mediante l'apparecchio di lettura, si possono scegliere diverse modalità di esame.

Mod. esame	Funzione di diagnosi
1	Letture valori reali di rilevanza per emissione dei gas
2	Letture guasti dati ambientali presenti nella memorizzazione di errori di rilevanza per i gas di scarico ("freeze frame")
3	Guasti rilevanti per le emissioni nocive che si sono ripetuti nei due cicli successivi
4	Cancellazione codici dei guasti di rilevanza dei gas
5	Valori di misurazione della sonda λ
6	Valori di misurazione dei sistemi non sorvegliati in permanenza (immissione di aria secondaria)
7	Letture di guasti sporadici di rilevanza per i gas
8	Indicazione di stato, se sono terminati i controlli di sistema o di componenti costruttive (Readiness-Code: si = 0; no = 1)
9	Informazioni relative al veicolo e al sistema

Codice dei guasti. Si tratta di codici alfanumerici a 5 posizioni, per esempio P 0 150.

P 0 150	P: powertrain (linee di trazione)
P 0 150	0: codici normalizzati indipendentemente dal costruttore (1: codice stabilito dal costruttore)
P 0 150 1:	componente costruttiva in cui si presenta il guasto
1/2	misurazione immissione carburante e aria
3	mancate accensioni o combustioni
4	sistemi aggiuntivi riduzione emissioni gas
5	sistemi regolazione velocità e regime minimo
6	computer e segnali iniziali
7	cambio
P 0 1 50	componente che causa il guasto
50	sonda O ₂ a monte del catalizzatore

Ricerca guasti nel sistema di regolazione λ

Nel caso in cui, durante l'esame del circuito di regolazione con la misurazione della composizione dei gas di scarico, venisse rilevato che la regolazione λ non è in ordine, il guasto può essere ricercato sia nel circuito di regolazione elettrico, sia nel catalizzatore. Per circoscrivere un possibile guasto elettrico nel circuito di regolazione, esistono diverse possibilità di verifica.

Controllo elettrico della regolazione λ con circuito di regolazione chiuso mediante sonda λ a salto di tensione (fig. 2).

Ad accensione disinserita, è connesso in parallelo alla sonda λ un voltmetro oppure un oscilloscopio. Dopo l'avviamento del motore, a freddo è indicata una tensione stabile di 0,4-0,6 V (a seconda del costruttore). Nel momento in cui motore e sonda hanno raggiunto la temperatura d'esercizio, la tensione oscilla tra 0,1-0,8 V.

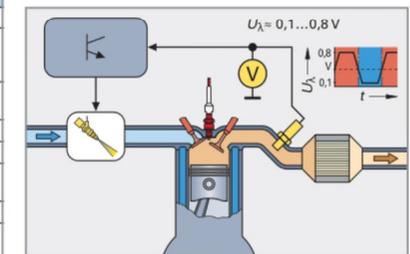


Figura 2: Diagnosi elettrica della regolazione λ nel circuito di regolazione

INDICAZIONI PER LE OFFICINE

Se compare un'anomalia quando la tensione della sonda indica costantemente un valore fisso, per esempio $\approx 0,1 \text{ V}$, $\approx 0,5 \text{ V}$ oppure $\approx 0,8 \text{ V}$, è necessario verificare in un primo tempo se sono in ordine la temperatura del motore e quella della sonda, il sensore di temperatura e i collegamenti elettrici. Se è il caso, il guasto può essere ulteriormente circoscritto mediante l'interruzione del circuito di regolazione e con l'attivazione elettrica di grandezze perturbatrici.

Controllo elettrico della regolazione λ con circuito di regolazione interrotto (fig. 1). Il motore e la sonda λ sono in temperatura d'esercizio e il riscaldamento della sonda è attivo. Staccare la connessione mobile tra sonda λ e centralina gestione motore e inserire al suo posto una presa adattativa. Collegare l'apparecchio di misurazione.

Simulazione: miscela grassa. Mediante uno strumento di prova (tester) al PIN della centralina gestione motore è attivata una tensione di circa

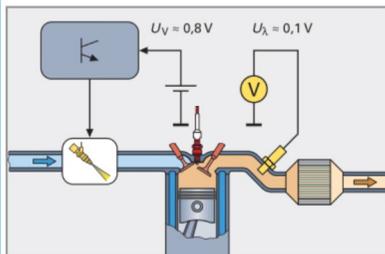


Figura 1: Controllo elettrico della regolazione λ con circuito di regolazione aperto

DOMANDE DI RIPASSO

- 1 Quali sostanze nocive si producono nel motore a causa della combustione incompleta del carburante?
- 2 Quali effetti producono l'insufficienza e l'eccesso di aria sulla composizione dei gas di scarico?
- 3 Quali procedimenti esistono per la riduzione delle emissioni nocive?
- 4 Con quali interventi al motore vengono ridotte le emissioni nocive?
- 5 Spiegate la struttura e il funzionamento di un impianto di ricircolo dei gas di scarico.
- 6 Cosa si intende per un catalizzatore monolita a tre vie?
- 7 Come è strutturato un catalizzatore con supporto ceramico?
- 8 Quali trasformazioni chimiche avvengono in un catalizzatore a tre vie?
- 9 Per quale motivo negli impianti di scarico con catalizzatore a tre vie, λ deve essere uguale a 1?
- 10 Spiegate il circuito di regolazione λ .
- 11 Cosa misura la sonda λ ?

0,8-0,9 V. Se la centralina e la connessione sono in ordine, la miscela si impoverisce: il motore gira male ("zoppica"). Se la sonda λ è in ordine, la tensione della stessa scende fino a 0,1 V. Diversamente, si possono presentare le seguenti anomalie: sensore temperatura motore difettoso, difetto nel cablaggio elettrico o nella centralina gestione motore. Se la miscela si impoverisce per la centralina gestione motore, ma la tensione di sonda non cala, il guasto è da ricercare a livello della sonda λ (guasto di massa; riscaldamento della sonda difettoso; sonda usurata/difettosa).

Simulazione: miscela magra

Anche in questo caso nella presa PIN corrispondente viene attivata una tensione di 0,1 V. I giri motore dovrebbero aumentare per un breve lasso di tempo a causa della miscela ricca. La tensione della sonda λ dovrebbe attestarsi a 0,8-0,9 V.

In caso contrario, si è in presenza dei medesimi guasti visti con la simulazione di miscela grassa, oppure si è in presenza di aspirazione di aria falsa per la mancanza di ermeticità nel sistema.

Attenzione. Per sonde in ossido di titanio, i valori di tensione oscillano tra un minimo di 0,3 V e un massimo di 3,9 V con la sonda in buono stato.

Controllo del riscaldamento della sonda λ . Può essere controllato misurando la resistenza (continuità). Valori usuali a temperatura ambiente: 2-14 Ω ; per valori superiori a 30 Ω , il riscaldamento della sonda è difettoso. Conseguenze possibili: diminuzione della potenza, aumento del consumo di carburante oppure il motore funziona a strappi.

Controllo della sonda a banda larga, sonda NO_x . Il funzionamento di queste sonde è controllato con l'ausilio di strumenti di prova (tester).

- 12 Tra quali valori si situa la tensione per una sonda all'ossido di titanio?
- 13 Come viene definito il valore λ per una sonda a banda larga?
- 14 Quale compito ha un catalizzatore NO_x ?
- 15 Spiegate per quale tipo di motore è eventualmente necessario un catalizzatore NO_x .
- 16 Spiegate la struttura e il funzionamento del sistema ad aria secondaria.
- 17 Come viene effettuato l'esame del circuito di regolazione in EGS (diagnosi e manutenzione)?
- 18 Come viene sorvegliato il funzionamento del catalizzatore nella diagnosi EOBD?
- 19 In quali condizioni lampeggia la spia di allarme MIL?
- 20 Come vengono riconosciute le mancate accensioni?
- 21 In quali condizioni il codice di guasto è spontaneamente cancellato nella diagnosi EOBD?
- 22 Come può essere diagnosticato il riscaldamento della sonda λ ?

13.3 Riduzione delle emissioni nocive nei motori Diesel**13.3.1 Composizione dei gas di scarico**

I gas di scarico di un motore Diesel contengono, oltre ad azoto (N_2) e ossigeno (O_2), diversi altri prodotti di reazione costituiti da carbonio C, idrogeno H, ossigeno O e azoto N.

Combustione completa. Nel caso puramente teorico di una combustione completa, otterremmo allo scarico solo anidride carbonica (CO_2) e vapore acqueo (H_2O).

Combustione incompleta. Il motore Diesel lavora sempre con eccesso d'aria ($\lambda > 1$). A seconda del carico motore, esso può infatti variare da $\lambda \geq 1,3$ a pieno carico, fino a $\lambda \leq 1,8$ a carico parziale e al regime minimo. Per questo motivo, i gas di scarico dei motori Diesel contengono meno idrocarburi incombusti rispetto a quelli dei motori a ciclo Otto. A seguito però di un'elevata presenza di azoto e ossigeno, dato da miscele estremamente magre, vi è una forte produzione di ossidi d'azoto.

La composizione dei gas di scarico è fortemente influenzata dalle condizioni di esercizio e di carico, aspetto che pone elevate esigenze al trattamento dei gas.

Nella fig. 1 è rappresentata, a titolo di esempio, una possibile composizione dei gas di scarico.

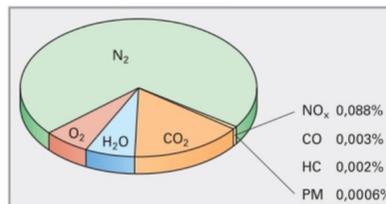


Figura 1: Esempio di composizione dei gas di scarico

Nonostante l'eccesso d'aria, la combustione non è mai completa (cfr. pag. 312): condizione che porta alla produzione di particolato.

Si generano pertanto le seguenti sostanze nocive.

Monossido di carbonio (CO), idrocarburi incombusti (HC) e particolato

Il particolato si compone di un nucleo di fuliggine con aderenze di impurità, come per esempio ossidi di metallo. Le componenti solide dei gas di scarico sono definite, prese assieme, con il termine particolato (dall'inglese particulate matter, polveri fini). A questo si aggiungono sostanze risultanti da impurità o additivi contenuti nel carburante o nei lubrificanti, come per esempio legami di metalli e di azoto.

Ossidi di azoto NO_x (monossido di azoto NO, biossido di azoto NO_2 , ecc.). Si producono a seguito delle elevate pressioni e temperature raggiunte in camera di combustione e a causa delle elevate velocità di propagazione di fiamma. Sempre a seguito dell'eccesso d'aria, a regime minimo e a carico parziale, si assiste a un aumento delle emissioni di NO_x .

Valori limite dei gas di scarico per motori ciclo Diesel di autoveicoli leggeri

Malgrado le limitazioni delle emissioni nocive siano in vigore dalla metà degli anni Settanta, le emissioni sono state ridotte in misura relativamente lenta a causa dell'aumento delle vetture immatricolate, motivo per cui i limiti per le emissioni dei gas di scarico sono sempre più severi. Questi limiti sono fissati in modo unificato dall'Unione Europea. La tab. 1 mostra quelli fissati per autovetture leggere e combi.

Tabella 1: Limiti di emissioni dei gas di scarico per autovetture leggere e combi

	CO	HC + NO_x	NO_x	Particolato
Euro 3 dal 2000	0,64	0,56	0,5	0,05
Euro 4 dal 2005	0,5	0,30	0,25	0,025
Euro 5 dal 2009	0,5	0,23	0,18	0,005
Euro 6 dal 2014	0,5	0,17	0,08	0,005

13.3.2 Metodi per la riduzione delle emissioni nocive

Per il raggiungimento dei limiti di emissioni delle norme Euro 6, tutte le misure atte alla riduzione delle emissioni nocive devono essere coordinate tra di loro in modo ottimale. Sono distinte in misure motoristiche e misure di post-trattamento dei gas di scarico.

Misure motoristiche. Sono costituite, per esempio, da:

- ottimizzazione della camera di combustione;
- pilotaggio pre e post-riscaldamento;
- elevazione della pressione di iniezione;
- tecnologia plurivalvole;
- pilotaggio del flusso di aspirazione nei condotti;
- regolazione della pressione di sovralimentazione;
- ottimizzazione della pre-iniezione, dell'iniezione principale e della post-iniezione;
- EGR (Exhaust Gas Recirculation).

Post-trattamento dei gas di scarico. Sono applicati i seguenti sistemi:

- catalizzatore ad ossidazione;
- filtro antiparticolato (FAP);
- catalizzatore ad accumulo NO_x ;
- catalizzatore SCR;
- filtro DPNR.

Conflitto di obiettivi. Di regola, l'adozione di misure che portano a una diminuzione di una sostanza nociva, origina contemporaneamente la produzione di altre sostanze nocive.

In tal modo, per esempio, interventi atti alla diminuzione degli ossidi di azoto (NO_x) portano ad un aumento di idrocarburi incombusti (HC), di monossidi di carbonio (CO) e di particolato.

Mediante un'ottima calibratura di tutte le misure motoristiche, è possibile raggiungere le normative Euro 4. Dal momento che, per il raggiungimento delle norme Euro 5, i sistemi di post-trattamento dei gas di scarico sono irrinunciabili, è possibile intervenire sulla gestione motore in modo tale che, per mezzo di un anticipo del punto di iniezione, si possa raggiungere un minor consumo di carburante. Il conseguente aumento di ossidi di azoto può essere compensato da un sistema SCR.

Tabella 1: Misure atte alla riduzione delle emissioni di sostanze nocive ed effetti conseguenti

Misura	CO	HC	NO_x	PM	CO_2	Rimedio
Quota EGR alta	↑	↑	↓	↑	↑	FAP
Anticipo punto d'iniezione	↓	↓	↑↑	↓↓	↓	SCR
Ritardo punto d'iniezione	↑	↑	↓↓	↑↑	↑	FAP
Temperatura di combustione alta	↓	↓	↑	↑	↓↓	FAP, SCR

13.3.3 Ricircolo dei gas di scarico (EGR)

Il ricircolo dei gas di scarico (EGR) serve per la riduzione delle emissioni di NO_x . Mediante l'immissione di gas di scarico nella camera di combustione, la quantità di ossigeno aspirata diminuisce. Le componenti dei gas di scarico non partecipano più al processo di combustione e assorbono ulteriore calore. In questo modo, la temperatura massima di combustione diminuisce, riducendo l'emissione di NO_x fino al 60%. La quota di EGR può arrivare fino al 40% del suo volume.

Se la quota di ricircolo supera questo valore, da una parte l'emissione di NO_x diminuisce ulteriormente, ma, d'altra parte, il carburante non viene portato a combustione completa. In questa situazione la quantità di idrocarburi incombusti (HC) e di particolato (PM) aumenta fortemente a causa della scarsità di ossigeno.

I sistemi di EGR si possono suddividere in:

- sistemi interni o sistemi EGR interni al motore;
- sistemi esterni o sistemi EGR esterni al motore.

Sistemi EGR interni al motore. L'apertura anticipata della valvola di aspirazione, dopo la fase di lavoro, origina una miscelazione dei gas di scarico nell'aria di immissione (aspirazione). La parte di gas di scarico presente nella camera di combustione viene con-

siderata come ricircolo interno. Tuttavia, al fine di ridurre gli ossidi di azoto, questo aspetto non ha molta importanza nei motori a gasolio, in quanto essi sono sovralimentati e, di regola, possiedono limitati angoli di incrocio della fasatura delle valvole.

Sistemi EGR esterni al motore. Mediante un condotto supplementare dei gas di scarico e mediante una valvola EGR, parte di questi gas sono dapprima raffreddati e poi miscelati all'aria di immissione come gas inerti (dal latino, "che non reagisce"). La parte di gas inerte assorbe calore dal processo di combustione senza però parteciparvi. L'assorbimento di calore da parte della miscela provvede a diminuire la temperatura massima di combustione.

A seconda che i gas siano riciclati a monte oppure a valle della sovralimentazione, i sistemi si differenziano in:

- EGR ad alta pressione (AP);
- EGR a bassa pressione (BP).

EGR ad alta pressione (fig. 1)

La quantità di gas di scarico viene regolata mediante

I gas di scarico sono riciclati prima (a monte) della turbina del turbocompressore (TC) e immessi a valle del TC nell'aria di aspirazione già compressa.

una valvola EGR. Al fine di ridurre ulteriormente la temperatura di combustione, i gas di scarico immessi sono raffreddati.

I modelli Euro 3 non sono ancora provvisti di sistemi EGR raffreddati. I veicoli a motore a partire dagli Euro 4 in avanti sono dotati per lo più di scambiatori di calore per i gas di scarico da riciclare.

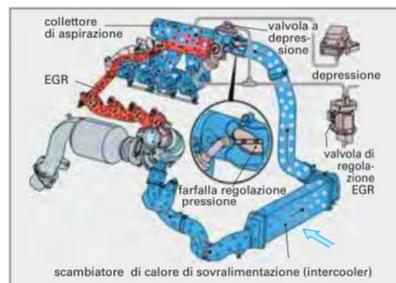


Figura 1: EGR ad alta pressione con farfalla di regolazione aggiuntiva

Per garantire una corretta aspirazione dei gas di scarico nei motori sovralimentati, sono installate delle farfalle di regolazione della pressione (fig. 1). La farfalla di regolazione della pressione provvede a mantenere una differenza tra la pressione della condotta di scarico e quella di aspirazione. In questo modo, mediante la chiusura della farfalla, si crea una

depressione che favorisce l'aspirazione dei gas di scarico da riciclare.

Al fine di ottenere la piena potenza e la massima coppia motrice, a pieno carico il sistema EGR è disinserito. Inoltre, l'emissione di particolato, a causa della scarsità di aria, verrebbe ad aumentare eccessivamente. Il regime del minimo può essere leggermente incrementato durante la fase EGR.

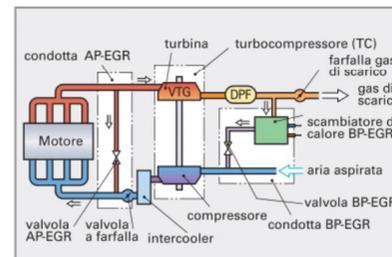


Figura 1: Schema EGR ad alta e a bassa pressione

EGR a bassa pressione

I gas di scarico da riciclare sono ripresi a valle della turbina e del FAP e, in seguito, miscelati all'aria di immissione a monte del turbocompressore.

Con il recupero dei gas a monte del filtro del particolato, i gas risultano meno caldi e più poveri di particolato. Si ottengono pertanto i seguenti vantaggi:

- maggior riduzione della temperatura in camera di combustione (gas meno caldi);
- il flusso dei gas di scarico che investe la turbina non subisce rallentamenti consentendo un miglior comportamento nei cambiamenti di carico;
- minor imbrattamento della valvola EGR dato che i gas di scarico contengono meno particolato.

Negli impianti con EGR a bassa pressione, il turbocompressore è dotato di una speciale girante del compressore per evitare che l'acidità residua dei gas di scarico legata all'umidità presente nell'aria fresca aspirata, la danneggino. I motori Euro 6 possono disporre sia di una valvola EGR a bassa pressione raffreddata, sia, in virtù di una miglior dinamica e di un miglior avviamento a freddo, di una valvola EGR a bassa pressione non raffreddata (fig. 1).

Quota EGR. Come rappresentato in fig. 2, la concentrazione di NO_x nei gas di scarico diminuisce con l'aumento della quota percentuale di EGR. Nel contempo, aumentano però le concentrazioni di PM, CO e HC.

In conseguenza della diminuita temperatura di combustione, aumenta anche il consumo di carburante. Ne risulta un limite massimo per l'EGR di circa il 40% del volume complessivo dei gas di scarico.

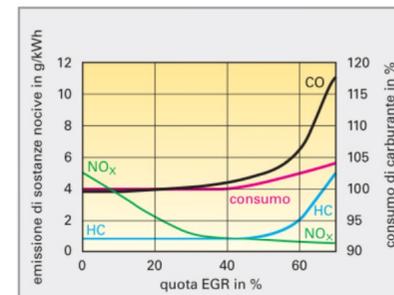


Figura 2: Influenza delle quote EGR sulle sostanze nocive

Regolazione della quota EGR. Viene messa a punto dalla centralina mediante una valvola a depressione oppure da un servomotore (attuatore elettrico). La regolazione dipende da:

- carico motore e regime di rotazione;
- temperatura motore;
- pressione di sovralimentazione;
- temperatura dell'aria aspirata.

Funzionamento. Nel campo della regolazione del motore, per ogni punto di utilizzo, è impostata la posizione degli attuatori, come l'attuatore EGR e la farfalla di regolazione di pressione. Per rientrare nei severi limiti delle norme Euro 5, il posizionamento della farfalla di regolazione è previsto nel circuito di regolazione invece che nel comando di gestione. In particolare, un potenziometro determina il posizionamento della farfalla e lo comunica alla centralina gestione motore. Inoltre, mediante un debimetro a film caldo, è determinata la massa d'aria aspirata. Il quantitativo di ossigeno residuo nei gas di scarico è rilevato mediante una sonda lambda a banda larga. Nei motori provvisti di candele a incandescenza con sensori di pressione (cfr. pag. 316) viene rilevato anche l'andamento della pressione nel cilindro. Da questi tre segnali, viene elaborata, da parte della centralina, la quota ottimale di EGR e, di conseguenza, è comandata l'azione degli attuatori.

13.3.4 Catalizzatore ad ossidazione

Nei motori Diesel portati a temperatura d'esercizio, l'EGR viene attivato al regime minimo e alle condizioni di carico parziale. In condizioni di pieno carico, l'EGR viene disattivato.

Il catalizzatore ad ossidazione corrisponde come struttura ad un catalizzatore a tre vie in cui sono ossidati gli idrocarburi incombusti HC e il monossido di carbonio CO. In conseguenza dell'alto tasso di ossigeno residuo nei gas di scarico dei motori Diesel, gli ossidi di azoto non possono essere ridotti. Per questo motivo, l'ossigeno residuo è utilizzato in qualità di catalizzatore ad ossidazione.

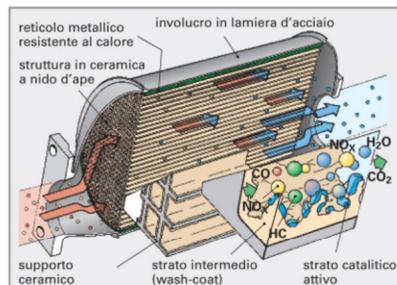


Figura 1: Struttura e funzionamento di un catalizzatore ad ossidazione con supporto in ceramica

Struttura. Al fine di aumentare la superficie attiva, al supporto ceramico e al supporto metallico è applicato un rivestimento superficiale di ossido di alluminio (fig. 1).

Su questo rivestimento, detto washcoat e composto da 1-2 g di platino e palladio, è posizionato il catalizzatore.

I metalli nobili in qualità di catalizzatori favoriscono i processi di ossidazione senza nel contempo consumarsi.

Le principali funzioni dei catalizzatori Diesel ad ossidazione sono le seguenti.

Ossidazione di HC e CO. Nel catalizzatore ad ossidazione (oxi-kat) il monossido di carbonio (CO) e gli idrocarburi incombusti (HC) vengono ossidati trasformandosi in biossido di carbonio (CO₂) e vapore acqueo (H₂O).

L'ossidazione avviene a partire da una determinata temperatura (temperatura light-off) che è di 170-200 °C a seconda della composizione dei gas, della velocità di flusso e della dotazione del catalizzatore. A questa temperatura, la quota di ossidazione sale sopra il 90%.

Ossidazione di NO a NO₂. Il monossido di azoto NO e il biossido di azoto NO₂ sono definiti entrambi come NO_x. La parte di NO₂ in NO_x nei gas di scarico dei motori Diesel e negli stadi principali di utilizzo rappresenta circa il 10%. Il catalizzatore ossidante provvede già a basse temperature all'aumento della percentuale di NO in NO₂.

Un'elevata quota di NO₂ è importante per la funzione di altri componenti dell'impianto di scarico, come il filtro antiparticolato (FAP) e il catalizzatore SCR.

Riduzione della massa di particolato. Le particelle emesse da un motore Diesel sono composte da idrocarburi incombusti che, con l'aumento della temperatura, si separano dal nucleo della particella stessa. Mediante l'ossidazione di questi idrocarburi, la massa di particolato (PM) può essere ridotta del 15-30%.

Componente catalitica riscaldante (bruciatore catalitico)

Il bruciatore catalitico è impiegato per aumentare la temperatura del gas di scarico nel processo di rigenerazione del FAP.

Le emissioni di CO e HC sono aumentate a questo scopo mediante una post-iniezione al motore oppure mediante un iniettore a valle del motore posto sul collettore di scarico. In questo modo il calore di reazione che si libera dall'ossidazione di CO e HC è utilizzato per l'aumento della temperatura dei gas.

13.3.5 Filtro antiparticolato (FAP)

Si distinguono le seguenti tipologie di FAP per motori Diesel:

- FAP a flusso parziale;
- FAP a flusso completo.

FAP a flusso parziale. È impiegato di preferenza per installazioni di secondo equipaggiamento. La stuoia filtrante a rivestimento catalitico (fig. 2) trattiene il particolato e, nel contempo, assume la funzione del catalizzatore ad ossidazione. A seconda dell'apertura della sezione della strozzatura al centro del filtro e delle condizioni di esercizio del motore, si raggiunge una quota di separazione fra il 30% e il 70%. La rigenerazione del filtro avviene in modo catalitico senza l'intervento della centralina.

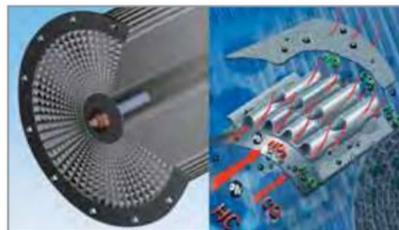


Figura 2: FAP a flusso parziale

Il FAP di secondo equipaggiamento può essere applicato al posto del catalizzatore ad ossidazione.

Funzionamento. Per mezzo di intagli a forma di palette in un foglio metallico ondulato, una parte dei gas di scarico è deviata su una superficie ricoperta da fibre di metallo sinterizzate, nella cui microstruttura sono trattenute le particelle di particolato. La rigenerazione avviene in modo continuo mediante ossidazione del carbonio con il biossido di azoto (NO₂). Per la rigenerazione è necessario un aumento della parte di NO₂ nei gas di scarico. Questo aumento si realizza mediante il contenuto di ossido di azoto (NO) presente nei gas. Per questo è richiesta una temperatura di circa 200-280 °C sulla superficie catalitica del FAP. Se questa temperatura non è rag-

giunta, le tasche del filtro si riempiono di particelle e i gas non filtrati si disperdono attraverso il FAP.

FAP a flusso completo. È impiegato come equipaggiamento di fabbrica ed è costituito principalmente da un corpo ceramico di carburo di silicio (SiC) strutturato a nido d'ape che filtra il 100% del flusso dei gas di scarico. Per la rigenerazione, è necessario un intervento della centralina gestione motore.

Funzionamento. I canali del FAP sono chiusi in modo alternato (fig. 1). In questa maniera, i gas di scarico fluiscono attraverso le pareti porose. Le particelle rimangono intrappolate e richiudono lentamente i pori delle pareti del filtro. La contropressione che si sviluppa nei gas aumenta così in continuazione, originando un aumento del consumo di carburante e una diminuzione della potenza. Il filtro deve essere rigenerato.



Figura 1: FAP

Rigenerazione in generale. Il contenuto di carbonio delle particelle può venire ossidato (bruciato) in CO₂ con l'ossigeno presente nei gas a temperature superiori a circa 600 °C. Queste temperature sono presenti solamente a pieno carico del motore. A carico parziale, la temperatura può scendere a valori inferiori a 200 °C. Per questo motivo, bisogna intervenire con procedimenti atti a diminuire la temperatura di combustione del particolato e/o a innalzare la temperatura dei gas di scarico.

- **Abbassamento della temperatura di combustione del particolato.** Ciò avviene mediante l'aggiunta di un additivo al carburante (cerina o composti di ferro). In questo modo la temperatura di combustione si abbassa a circa 450-500 °C. Mediante un rivestimento catalitico del filtro con metalli nobili, si può migliorare la combustione del particolato. L'effetto è però nettamente inferiore rispetto a quello ottenuto mediante l'utilizzo di un additivo.
- **Innalzamento della temperatura dei gas di scarico.** Mediante una post-iniezione mirata o mediante un aumento della richiesta di coppia motrice da parte di un compressore di climatizzazione oppure di un

generatore, è possibile innalzare la temperatura dei gas di scarico.

Regolazione del processo di rigenerazione. Il sensore di pressione differenziale rileva la differenza di pressione esistente a monte e a valle del FAP. Se il filtro è intasato, il sensore indicherà una differenza di pressione elevata (fig. 2).

Il filtro necessita, quindi, di una rigenerazione. La temperatura durante il processo di rigenerazione è rilevata dalla rispettiva sonda e non deve superare i 700 °C.

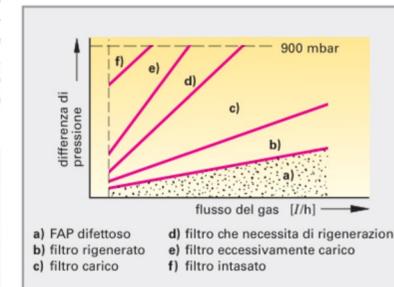


Figura 2: Andamento della pressione differenziale

Formazione di ceneri. Dopo la combustione, l'additivo aggiunto al carburante si fissa come rimanenza nel filtro come ceneri. Queste ceneri, così come quelle dovute ai residui dell'olio motore o ai sedimenti di carburante, ostruiscono gradualmente il filtro, provocando un aumento della contropressione (fig. 2).

A seconda del sistema e delle condizioni di utilizzo del veicolo, l'ostruzione del filtro avviene tra 120.000 e 240.000 km. Qualora si manifesti la necessità di un servizio di manutenzione, il conducente viene avvertito da una spia di controllo.

13.3.6 Catalizzatori ad accumulo NO_x

È simile come costruzione e funzionamento a quello per motori a ciclo Otto (cfr. pag. 345).

Il catalizzatore ad accumulo NO_x è in grado di trattenere gli ossidi d'azoto sulla sua superficie attiva. Ad un certo livello di saturazione avviene la rigenerazione mediante arricchimento della miscela. In tal modo, gli ossidi di azoto vengono ridotti (trasformati) in azoto (N₂) e acqua (H₂O).

Struttura. Sul corpo ceramico viene applicato uno strato intermedio (washcoat). Questo strato viene ricoperto con ossido di bario (BaO) come trappola per gli ossidi di azoto e con platino, rodio e palladio come strato catalitico attivo. Questo tipo di catalizzatore riduce gli ossidi di azoto in due fasi (fig. 1, pag. 357).

Fase di carico (30-300 s). È definita come fase di accumulazione continua di NO_x nelle componenti del catalizzatore.

Il platino provvede affinché gli ossidi di azoto vengano trasformati in NO_2 con l'ossigeno. NO_2 reagisce con il rivestimento di ossido di bario e si fissa in nitrato (NO_3) alla superficie come $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$.

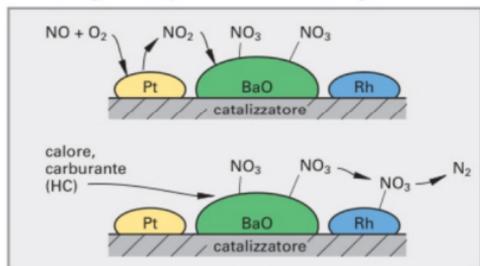


Figura 1: Fase di carico e rigenerazione di un catalizzatore NO_x ad accumulo di motore Diesel

Rigenerazione (2-10 s). Mediante arricchimento periodico, sono liberati gli ossidi di azoto depositatisi in precedenza come nitrato (disaccumulazione) e poi ridotti ad azoto N_2 con le componenti incombuste dei gas di scarico (HC, CO).

Rigenerazione dello zolfo. Dal momento che l'ossido di bario possiede una grande forza di legame con il solfato (SO_2), lo zolfo viene asportato dai gas di scarico in modo più consistente rispetto agli ossidi di azoto. Per ottenere un sufficiente accumulo di NO_x si deve intervenire regolarmente con una rigenerazione dello zolfo. Per carburanti esenti da zolfo (≤ 10 ppm) questa rigenerazione deve essere effettuata dopo circa 5000 km di percorrenza. Per questo motivo, il catalizzatore è ulteriormente riscaldato per un tempo di 5 minuti sopra i 650°C e, nel contempo, la miscela è arricchita ($\lambda < 1$), con conseguente aumento del consumo di carburante. Per l'innalzamento della temperatura sono utilizzati gli stessi interventi (post-iniezione) anche per la rigenerazione del FAP nei motori Diesel.

Catalizzatore SCR

Mediante il procedimento SCR continuo (Selective Catalytic Reduction) gli ossidi di azoto nei gas di scarico sono trasformati in azoto e acqua fino all'80%.

Struttura. Il sistema (fig. 2) è costituito da un catalizzatore SCR, da un dispositivo di dosaggio programmato, oltre che da un catalizzatore ad ossidazione e da un FAP. Il sistema di dosaggio inietta finemente la componente di riduzione a monte del catalizzatore SCR a seconda del carico e del numero di giri.

Agente di riduzione. L'ammoniaca necessaria per la reazione SCR non è utilizzata in forma diretta, ossia allo stato puro, bensì sotto forma di soluzione ac-

quosa di urea al 32%, denominata industrialmente in modo unificato AdBlue, e regolata da norme DIN 70070 e ISO 22241. Dalla soluzione urea-acqua si sviluppano ammoniaca (NH_3) e CO_2 . In un catalizzatore SCR, l'ammoniaca prodotta in questo modo reagisce a partire da 170°C trasformandosi in azoto (N_2) e acqua (H_2O). Il consumo di AdBlue è di circa 0,1 litri per 100 km o circa 1-3% del consumo di gasolio. A questo scopo occorre alloggiare un serbatoio adeguato, al cui rabbocco si deve provvedere in occasione della manutenzione.

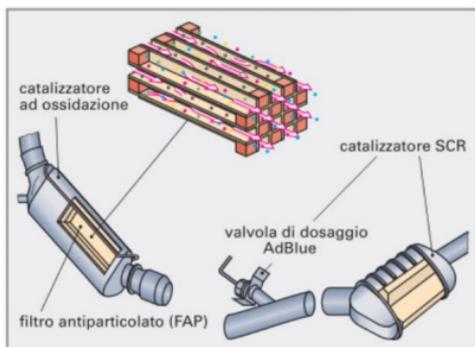


Figura 2: Depurazione gas di scarico con catalizzatore SCR

Filtro DPNR

Il sistema DPNR (Diesel Particulate and NO_x Reduction System) riduce nel medesimo tempo particelle di fuliggine e ossidi di azoto senza aggiunta di additivi di riduzione. Inoltre, non necessita di manutenzione.

Struttura. Il sistema di scarico DPNR è costituito da un catalizzatore ad accumulo per NO_x e particolato e da un catalizzatore ad ossidazione posto a valle. Inoltre, è previsto un iniettore adibito alla rigenerazione, posto sul collettore di scarico. Al fine di permettere basse temperature di combustione, l'EGR viene raffreddato ad acqua. In questo modo si ottiene una minor quantità di NO_x nei gas di scarico.

Funzionamento. Gli ossidi di azoto nei gas di scarico sono ossidati sulla superficie del catalizzatore in biossido di azoto NO_2 e poi accumulati nella struttura come nitrato di bario $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$. Da questa reazione si forma ossigeno attivo che brucia una parte del particolato, mentre la parte rimanente resta nel filtro. Appositi sensori riconoscono lo stato di carico (accumulo) del FAP e avviano, di conseguenza, automaticamente il processo di rigenerazione.

Rigenerazione. È effettuata con l'iniezione di carburante addizionale nel collettore di scarico per mezzo di un iniettore EPI (Exhaust Post Injection). In questo modo nel FAP la temperatura dei gas di scarico viene innalzata a circa 600°C per garantire la completa combustione del particolato.