



Università Politecnica delle Marche
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Civile e Ambientale

Tesi di laurea di: HASSAN EL KASSAR

TITOLO: Riduzione del particolato respirabile da motore diesel in ambiente di lavoro

Reduction of Occupational Respirable Diesel Particulate Matter

RELATRICE: PROF. SSA MARIA LETIZIA RUELLO

CANDIDATO: HASSAN EL KASSAR

Anno Accademico: 2019-2020

Sommario

La crescente preoccupazione per gli effetti dell'inquinamento sull'ambiente e sulla salute umana ha indotto negli anni ad adottare normative sempre più stringenti. Un ruolo fondamentale nei motori a combustione interna è stato ricoperto dai sistemi di posttrattamento dei gas di scarico. Per soddisfare le nuove normative sulle emissioni, i motori richiedono la combinazione di diversi dispositivi di posttrattamento posizionati a monte nella linea di scarico, il più vicino possibile al motore, per accelerare il riscaldamento e aumentare la temperatura operativa del sistema. L'utilizzo di modelli numerici affidabili risulta indispensabile per identificare la tecnologia più promettente per rispettare le normative. Una delle tecnologie di post-trattamento per applicazioni diesel più promettenti, denominata SCR on Filter o SCRF, prevede l'integrazione di catalizzatori per la Riduzione Catalitica Selettiva (SCR) su Filtri Antiparticolato Diesel (DPF), come strumento per abbattere contemporaneamente le emissioni di ossidi di azoto (NOx) e di particolato (PM). Lo scopo di questo lavoro di tesi è quello di sviluppare un modello affidabile di tale tecnologia e di trovare il set di parametri cinetici, che meglio riproduce le misurazioni sperimentali. È stato quindi costruito un modello numerico monodimensionale di un catalizzatore SCRF, e lo schema cinetico calibrato a partire dai test di laboratorio SGB (Synthetic

Gas Bench), per stimare la capacità di stoccaggio dell'ammoniaca e l'efficienza di riduzione degli NOx. È stato utilizzato un codice fluidodinamico di simulazione del motore monodimensionale (1D), GTSUITE attraverso il quale è stato definito un modello cinetico globale che include le reazioni di ossidazione di ammoniaca, di ossidazione del monossido di azoto e le reazioni, standard, fast e slow, caratteristiche di un SCR. Il modello è stato inoltre validato per due diversi carichi di particolato (0 g/l e 8 g/l). Come risultato, il modello è stato in grado di predire le concentrazioni di inquinanti con elevata accuratezza, come mostrato dal confronto con i dati misurati, per entrambi i carichi di particolato analizzati. A questo punto il modello è stato riportato alle dimensioni del componente reale e successivamente validato sul ciclo guida WLTP ottenendo anche in tal caso risultati soddisfacenti.

Sommario

Introduzione
4

1. Normative
5

 1.1 La nuova norma UNI EN 689:2018
7

 1.2 La strategia di valutazione del rischio
occupazionale di esposizione ad agenti chimici
aerodispersi
7

 1.3 Le principali novità introdotte dalla nuova
norma UNI EN 689:2018
8

2. Particolato (PM)
9

3. Motori diesel
10

4. Tecnologie di post-trattamento
13

 4.1 Three Way Catalyst (TWC)
13

 4.2 Lean Trap (LNT)
13

 4.3 Diesel Oxidation Catalysts (DOC)
14

 4.4 Diesel Particulate Filter (DPF)
15

 4.5 Selective Catalytic Reduction (SCR)
16

**5. Selective Catalytic Reduction coated on filter
(SCR-F)**
16

 5.1 Tecnologie utilizzate
17

 5.2 Dove va il progresso tecnico
19

5.3 L'adBlue in agricoltura	20
5.4 La rigenerazione dei dispositivi DPF	20
5.5 Motori adiesel, filtro DPF e FAp	21
6. PROVE IN CANTIERE	24
6.1 TEST 021	25
6.2 DISCUSSIONE	39
7. SITUAZIONE FUTURA	39
7.1 Strategia EUROPA 2020 [*]	40
8. SITOGRAFICA	42
9. BIBLIOGRAFICA	42

Introduzione:

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

I gruppi di inquinanti emessi in quantità maggiore e limitati dalle normative sono notevoli: idrocarburi incombusti o parzialmente ossidati (HC), costituiti da quella parte del combustibile che non è bruciata o si è decomposta solo in parte; ossido di carbonio (CO), dovuto alla presenza di zone di combustione in difetto di ossigeno;

ossidi di azoto (NO_x), derivanti da reazioni tra l'azoto e l'ossigeno dell'aria, i quali a temperatura ambiente sono del tutto trascurabili, ma che divengono importanti alle alte temperature dovute alla combustione; particolato (PM, Particulate Matter), il cui principale costituente è la fuliggine, materiale ad altissimo contenuto di carbonio, sulla quale vengono adsorbiti idrocarburi pesanti, tra cui I.P.A. (idrocarburi policiclici aromatici) e sostanze

inorganiche, tra le quali i solfati provenienti dallo zolfo del combustibile; ossidi di zolfo (SO_x); anidride carbonica (CO₂, inquinante termico).

I motori a combustione interna, soprattutto nel caso dei motori Diesel e ad iniezione diretta di benzina, nei quali i tempi disponibili per la miscelazione tra l'aria e il combustibile sono estremamente ridotti, non riescono a miscelare perfettamente l'aria al combustibile prima della combustione; ciò dà luogo alla formazione di fuliggine, il principale costituente del particolato. In entrambi i casi, inoltre, il biossido di carbonio (CO₂) costituisce il principale prodotto di reazione, non nocivo come impatto diretto sulla salute, ma costituente importantissimo dei cosiddetti gas serra. Altre sostanze partecipano poi a fenomeni di inquinamento secondario (reazione degli inquinanti primari con altre specie chimiche presenti nell'ambiente sotto l'azione catalitica di un agente atmosferico), come lo smog fotochimico e le piogge acide. La principale fonte di emissione per inquinanti è costituita dai trasporti, in corrispondenza delle aree urbane, e dunque vanno adottati e previsti provvedimenti strutturali che possano consentire il rispetto dei limiti. Il contributo dei mezzi di trasporto all'inquinamento atmosferico di aree urbane mediamente industrializzate è riportato in Tabella 1.

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

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

* con iniezione diretta

Tabella 1 variazione dei limiti delle emissioni inquinanti attraverso le norme Euro, rispettivamente dei motori diesel e benzina.

Per affrontare il problema dell'inquinamento atmosferico dovuto al traffico veicolare, la strategia dell'Unione Europea si è basata su prescrizioni concernenti le autovetture di nuova immatricolazione, i veicoli commerciali leggeri ed i veicoli pesanti, sul miglioramento dei combustibili e su una verifica più accurata delle emissioni inquinanti.

Oltre all'applicazione di tecnologie motoristiche più avanzate e di dispositivi di posttrattamento dei gas di scarico, anche le specifiche ecologiche della benzina e del combustibile diesel costituiscono uno dei tanti elementi mirati al contenimento delle emissioni in atmosfera. Combustibili più puliti sono stati ottenuti nel tempo attraverso la messa al bando del piombo, la riduzione successiva dei limiti dello zolfo e del contenuto degli aromatici.

1. Normative:

Dal 1991 l'Unione Europea ha progressivamente introdotto una serie di normative finalizzate a ridurre le emissioni prodotte dai veicoli rispettivamente Euro 1, 2, 3, 4, 5, 6.

Euro 0: categoria a cui appartengono i veicoli immatricolati prima del 31/12/1992; data dopo la quale per via delle eccessive emissioni è diventata obbligatoria l'omologazione alla classe Euro 1.

Euro 1: indica i veicoli immatricolati dopo il 31/12/1992, obbligando a dotare i nuovi veicoli di marmitta catalitica e ad utilizzare l'alimentazione ad iniezione nei motori a benzina.

Euro 2: adottata per i veicoli immatricolati dopo il 01/01/1997, prevede una maggiore riduzione delle emissioni anche per i motori diesel.

Euro 3: identifica i veicoli immatricolati dopo il 01/01/2001, imponendo l'adozione di un sistema chiamato EOBD per tenere sotto controllo il sistema antinquinamento. Euro 4: per i veicoli immatricolati dopo il 01/01/2006 comincia a diffondersi il filtro antiparticolato.

Euro 5: normativa in vigore dal 2008 impone l'uso di filtri anti-particolato sui veicoli diesel e riduce i livelli di emissioni sui motori benzina.

Euro 6: norma in vigore dal 2014 per l'omologazione di nuovi modelli e obbligatoria dal 01/01/2015 per tutte le vetture di nuova immatricolazione.

			+			
		/				#/
Euro 1	1992.07	2.72 (3.16)	0.97 (1.13)	-	0.14 (0.18)	-
Euro 2 IDI	1996.01	1.0	0.7	-	0.08	-
Euro 2 DI	1996.01	1.0	0.9	-	0.10	-
Euro 3	2000.0	0.64	0.56	0.5	0.05	-
Euro 4	2005.01	0.5	0.3	0.25	0.025	-
Euro 5a	2009.09	0.5	0.23	0.18	0.005	-
Euro 5b	2011.09	0.5	0.23	0.18	0.005	6.0 10
Euro 6	2014.09	0.5	0.17	0.08	0.005	6.0 10

Tabella 2: Limiti imposti dalle normative negli anni.

Le nuove normative Euro 6 prevedono per le auto diesel un calo drastico del livello consentito di emesso fino a un massimo di 0.08 / rispetto ai più alti livelli necessari per soddisfare la normativa Euro 5 e quelle precedenti.

Nel 2011 con la normativa Euro 5b si introduce il limite sul numero di particelle (PN) ponendo il limite a 6.0 10 / per i motori diesel. La necessità di affiancare il PN al PM, sorge dal momento in cui è stato osservato che le particelle più sottili sono anche le più numerose anche se non danno un grosso contributo in termini di massa. Queste particelle possono passare più facilmente attraverso il DPF, e a causa dell'effetto dannoso alle vie respiratorie che esse possono avere, le normative sulle emissioni sono diventate sempre più severe. [1]

La valutazione del rischio chimico alla luce della nuova versione della norma UNI EN 689:2018

1.1 La nuova norma UNI EN 689:2018:

La norma **UNI EN 689:2018** apporta questi tre principali cambiamenti:

delinea la strategia per la valutazione del rischio occupazionale di esposizione ad agenti chimici aerodispersi; aggiorna in maniera sostanziale le modalità di effettuazione dei campionamenti; aggiorna le modalità di confronto dei risultati dell'indagine ambientale con i valori limite di riferimento.

1.2 La strategia di valutazione del rischio occupazionale di esposizione ad agenti chimici aerodispersi>

La strategia di valutazione secondo la nuova norma **UNI EN 689:2018**, si basa sulle seguenti fasi:

Analisi delle postazioni di lavoro;
Costituzione dei gruppi omogenei di lavoratori esposti (cosiddetti SEG: Similar Exposure Group);
Selezione della procedura di misurazione;
Misurazione;
Validazione risultati e SEG;
Comparazione con i valori limite;
Documentazione formale dell'intero processo; Rivalutazione periodica.

Tale strategia deve essere elaborata a più mani, coinvolgendo personale interno all'azienda con una conoscenza approfondita del ciclo di lavoro nonché personale che la norma definisce come il "valutatore": *persona sufficientemente formata ed esperta nei principi dell'igiene industriale, nelle attività e nelle tecniche di misurazione, in grado di effettuare la parte della valutazione assegnata secondo lo stato dell'arte*. Questa figura del "valutatore" è tra l'altro una delle novità introdotte dalla nuova norma **UNI EN 689:2018**.

1.3 Le principali novità introdotte dalla nuova norma UNI EN 689:2018:

Tra le numerose novità introdotte dall'aggiornamento della norma, le principali sono:

Introduzione della figura del valutatore, come sopra indicato;

Abolizione della valutazione formale che forniva indicazioni sulla conformità ai valori di riferimento anche in presenza di una sola misurazione;

Introduzione del concetto di valutazione preliminare di conformità con un numero di misure che va da minimo 3 a massimo 5;

Utilizzo di modelli statistici per la valutazione approfondita del rispetto dei valori limite a partire da un numero minimo di 6 campionamenti;

Differenti approcci per la valutazione delle esposizioni anomale, inferiori al turno di lavoro;

Approccio alla valutazione del TLV miscela più approfondito.

Cosa devono fare le aziende in riferimento alla nuova norma UNI EN 689:2018

È necessario che le aziende rimettano mano alla valutazione dell'esposizione al rischio chimico? La valutazione degli agenti chimici nel posto di lavoro è un processo dinamico perché possono cambiare sia gli agenti chimici che le condizioni al contorno, per cui: Sì, è necessario che le aziende rimettano mano alla valutazione dell'esposizione al rischio chimico. Vediamo i due casi.

Caso 1. Le aziende che si troveranno a dover ripetere i campionamenti per la valutazione dell'esposizione agli agenti chimici aerodispersi, perché previsto, li ripeteranno secondo la nuova norma **UNI EN 689:2018**.

Caso 2. Per tutte le altre aziende in cui non sarà necessariamente indispensabile ripetere subito i campionamenti in ambiente di lavoro, sarà però fondamentale effettuare una caratterizzazione di base, per mezzo della quale decidere se i dati a disposizione sono completi ed esaustivi o se si devono ripetere i campionamenti per avere dati sufficienti a verificare la conformità con i valori limite di esposizione occupazionale dei lavoratori.

Conclusioni

Viste le novità introdotte dalla nuova norma **UNI EN 689:2018**, si consiglia un percorso di formazione e di aggiornamento specifico, al fine di verificare la situazione, il contesto e le relative azioni da intraprendere.

2. Particolato (PM):

Con questo termine si vuole indicare l'insieme delle particelle solide e liquide che vengono generate in fase di combustione e successivamente portate in sospensione dai gas di scarico. Nei motori a benzina ci sono tre classi di emissioni di particolato: da piombo, solfati e particolato organico. Il primo deriva dai composti metallo-organici, come il piombo tetraetile o tetrametile, utilizzati come additivi delle benzine (aumentandone così il potere antidetonante), e oggi vietati dalle normative dei paesi maggiormente sviluppati. I solfati derivano dallo zolfo presente nel combustibile, anche se oramai grazie alle direttive in vigore le benzine sono quasi depurate totalmente da questo elemento. Infine il particolato organico, riguardante soprattutto i motori Diesel, è costituito per la maggior parte da particelle carboniose che hanno adsorbito superficialmente idrocarburi di vario tipo e sono emesse solo in presenza di miscele molto ricche. Se nei motori a benzina regolati correttamente il particolato totale non costituisce un grosso problema (10 mg/km), altrettanto non si può dire per i motori

Diesel, dove il particolato organico è costituito per lo più da particelle carboniose ("fuliggine" o "fumo nero") su cui si sono condensati composti organici ad alto peso molecolare (aldeidi, chetoni), e le emissioni variano tra 0.05 e 0.2 g/km. La struttura base del PM emesso dai

motori Diesel consiste di particelle primarie (diametro medio $10\div 60$ nm) aggregate a migliaia in agglomerati di diverse dimensioni chiamati appunto “particelle”. Un percorso probabile della loro formazione, è quello della decomposizione termica o deidrogenazione ad alta temperatura ($1000\div 3000$ K nelle fiamme di diffusione di un Diesel), dove le molecole del combustibile si decompongono in prodotti intermedi del tipo acetilene o poliacetilene, considerati i principali precursori dei nuclei carboniosi; questi poi crescono, per adesione superficiale con altre specie povere di idrogeno, e la maggior parte di essi sono bruciati in presenza di ossigeno, dando luogo a prodotti gassosi come CO e CO₂. Quando invece le temperature si abbassano, i nuclei carboniosi si coagulano e danno forma a particelle di dimensioni maggiori. Nella formazione del particolato hanno grande influenza la struttura delle molecole di combustibile (soprattutto gli idrocarburi a catena ramificata e gli aromatici), ma anche il rapporto aria/combustibile, il quale se è basso (zona ricca di combustibile), ne favorisce la comparsa.

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

3. Motori diesel:

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

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

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

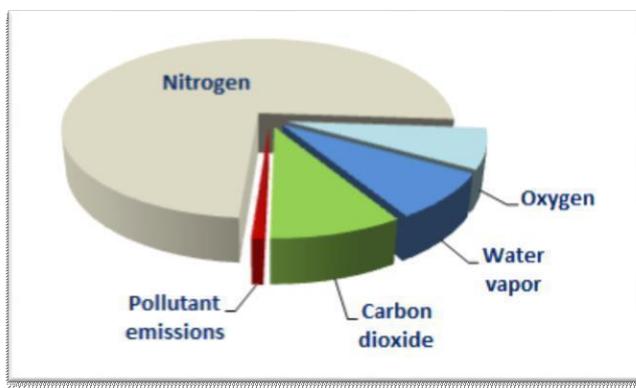


Figura 1: elementi costituenti l'output di una combustione diesel.

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

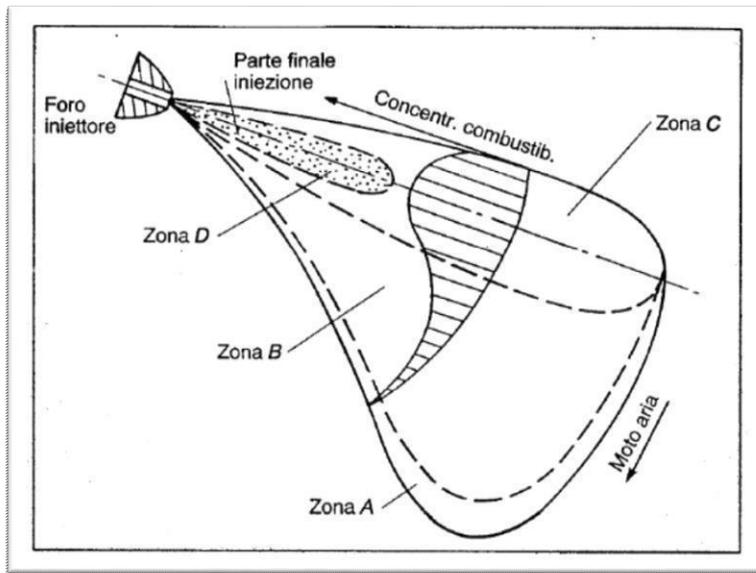


Figura 2: rappresentazione schematica della modalità durante la combustione

di formazione degli inquinanti di un getto di combustibile.

Dalla Figura 2:

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

Zona B: prodotti di una completa combustione;

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

Zona D: prodotti di ossidazione incompleta e particolato. Gli

HC possono avere ragioni diverse per la loro formazione:

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

i fori di iniezione) dell'iniettore può essere aspirata in camera di combustione dopo che l'iniettore è stato chiuso e scaricata ancora incombusta.

Gli **NOx** derivano dalla dissociazione di N_2 e O_2 : i combustibili non contengono azoto ma è il 76% di N_2 che compone il comburente unito al 21% di O_2 , i quali alle alte temperature si dissociano e formano ossidi di azoto;

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

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

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

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

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

zone a miscela ricca e a temperature relativamente basse. Tale condizione, risulta essere funzione del tempo di ritardo, della portata iniettata, della durata dell'iniezione e del tipo di combustibile;

da un basso miscelamento fra combustibile e ossigeno. I fattori che possono ostacolare un corretto miscelamento e quindi incentivare la formazione di particolato sono il numero di fori dell'iniettore, bassa pressione di iniezione e bassa intensità del moto di swirl così come l'impatto del combustibile sulle pareti fredde del cilindro.

È generalmente diviso in tre frazioni:

SOLIDA - costituita da particelle di carbonio secco, comunemente note come fuliggine;

SOF - idrocarburi pesanti assorbiti e condensati sulle particelle di carbonio, chiamata frazione organica solubile;

SO4 - frazione di solfato, acido solforico idratato.

4. Tecnologie di post-trattamento:

I principali componenti di post-trattamento che sono generalmente utilizzati per il controllo delle emissioni dei motori diesel e benzina, possono essere elencati come segue

4.1 Three Way Catalyst (TWC)

Il TWC, che ossida gli idrocarburi incombusti e CO mentre contemporaneamente riduce NO, è usato per trattare i gas di scarico dei motori a benzina. Esso risulta piuttosto efficace in condizioni stechiometriche e quindi i motori a benzina sono azionati in condizioni stechiometriche facilitate da un sensore lambda.

4.2 Lean Trap (LNT)

Alle soluzioni di abbattimento delle emissioni inquinanti si aggiunge la trappola per gli ossidi di azoto. Il principio di funzionamento di un LNT può essere descritto sulla base di processi ciclici magri / ricchi [2]. La trappola di NOx combina l'effetto di un catalizzatore ossidante (ad es. Platino), un materiale adsorbente (BaO) e un catalizzatore riducente (Rodio). Lo scarico è ricco di NO (una specie termodinamicamente stabile alle alte temperature), ma le trappole sono più efficaci per l'intrappolamento di NO₂. Pertanto, il passaggio immediatamente prima

dell'adsorbimento di dovrebbe essere l'ossidazione a , che viene promossa dal DOC. L'accumulo di viene effettuato durante la fase magra determinando la

formazione di nitriti e nitrati (), sulla superficie solida continuando fino alla saturazione della capacità di adsorbimento dei siti attivi. A questo punto la trappola viene rigenerata iniettando un agente riducente come , e attraverso iniezioni di combustibile. Gli idrocarburi iniettati riducono l'ossigeno in eccesso e riducono i nitrati in .

Tra i principali inconvenienti, va sottolineato che la fornitura di combustibile aggiuntivo alla bombola o direttamente al tubo di scarico, causa emissioni di PM, e , la cui concentrazione deve essere conforme agli attuali limiti di legge. [2]

4.3 Diesel Oxidation Catalysts (DOC)

A temperature di scarico sufficientemente elevate, i catalizzatori di ossidazione diesel

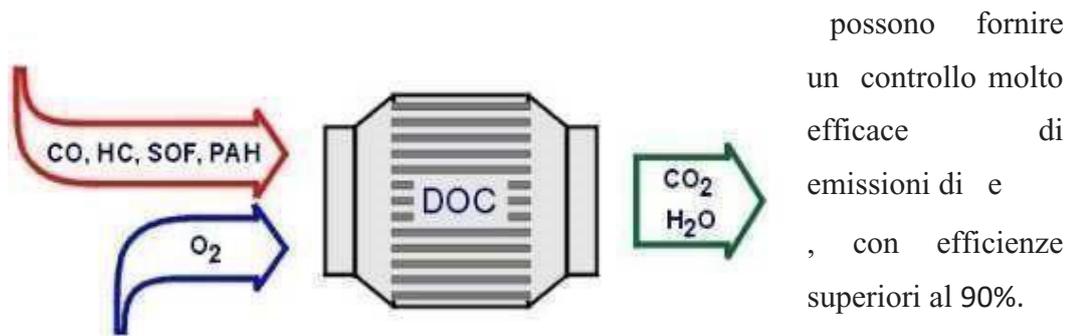
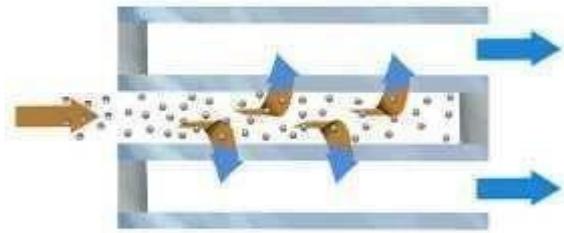


Figura 1: Diesel Oxidation Catalysts (DOC)

Il meccanismo di reazione in tali catalizzatori, si spiega con la presenza di siti catalitici attivi sulla superficie del supporto del catalizzatore che hanno la capacità di assorbire ossigeno. Dall'introduzione delle norme sulle emissioni Euro 2 a metà degli anni '90, il DOC è diventato un componente standard per le auto diesel in Europa con l'ulteriore scopo di diminuire la massa delle emissioni di particolato ossidando alcuni degli idrocarburi che vengono assorbiti sulle particelle di carbonio [3], e di convertire NO in NO₂ per facilitare il lavoro ai componenti di posttrattamento a valle come la rigenerazione dei filtri antiparticolato o per migliorare le prestazioni di alcuni tipi di catalizzatori come gli SCR [4].

4.4 Diesel Particulate Filter (DPF)

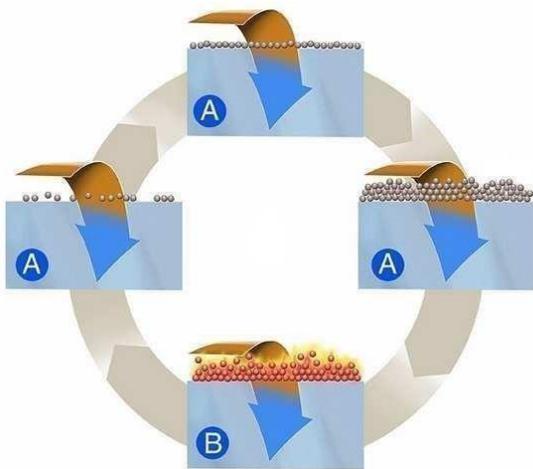
I filtri antiparticolato diesel sono una tecnologia standard utilizzata nei motori diesel per conformarsi alle normative attuali e future, relative alle emissioni di particolato e alle particelle nei gas di scarico. Essi sono usati per filtrare le particelle prodotte dal



motore, con efficienze dell'ordine del 90%. Il PM accumulato sul filtro deve essere rimosso periodicamente mediante eventi di rigenerazione per recuperare la capacità di filtraggio del DPF. Il processo di rigenerazione consiste nell'ossidazione delle particelle

depositatesi nelle strutture del filtro. Esso è costituito da una matrice in ceramica porosa a nido d'ape all'interno del quale viene fatto passare il gas. Per innalzare la temperatura dei gas di scarico fino a 600-650°C vengono effettuate una serie di postiniezioni con conseguenti post-combustioni, che in parte avvengono nei collettori di scarico e nei catalizzatori ossidanti; tali valori di temperatura sono più che sufficienti a bruciare completamente il particolato accumulato nel filtro. La struttura del DPF è realizzata da canali ostruiti alternativamente che permette di ottenere una superficie filtrante estesa. Lo scopo del filtro è quello di forzare il moto dei gas di scarico attraverso le pareti porose dell'elemento filtrante

permettendo così la rimozione meccanica delle particelle di particolato.



La filtrazione avviene dapprima attraverso la parete porosa mediante la cosiddetta filtrazione a letto (deep bed). Successivamente, una volta saturato il primo strato del

mezzo poroso, il soot inizia ad accumularsi sulla superficie della parete: lo strato di soot sulla parete

che cresce

DPF.

progressivamente contribuisce significativamente al meccanismo di filtrazione attraverso la cosiddetta filtrazione a torta (cake).

A mano a mano che si procede con l'accumulo di soot si ha un aumento di perdita di carico attraverso il filtro che se raggiunge valori molto elevati porta al danneggiamento del DPF [5].

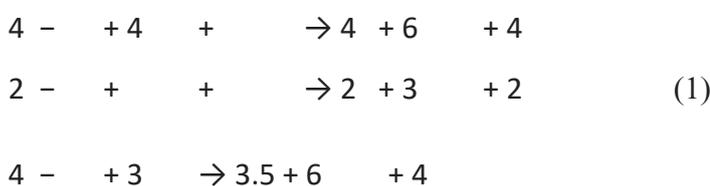
4.5 Selective Catalytic Reduction (SCR)

L'SCR viene utilizzato per ridurre gli dai gas di scarico del diesel con l'aiuto di un agente riducente. La soluzione acquosa di urea iniettata all'ingresso del sistema SCR è comunemente usata come agente riducente. Il fluido iniettato, attraverso processi di termolisi e di idrolisi, dà vita all'ammoniaca che provvede a ridurre le emissioni di . La riduzione del è controllata da varie reazioni come espresso dalla (1).

In base alle temperature di scarico riscontrate, vengono utilizzati catalizzatori a base di vanadio o zeolite. I catalizzatori di zeolite sono attivi su una finestra di temperatura operativa più ampia rispetto ai catalizzatori a base di vanadio [5][6].

5. Selective Catalytic Reduction coated on filter (SCR-F):

I catalizzatori Selective Catalytic Reduction (SCR) rivestiti su filtri antiparticolato diesel (DPF), SCR-F, mostrati in figura 9, sono stati introdotti, per applicazioni automobilistiche, per la loro capacità di ridurre contemporaneamente le emissioni di e di particolato (PM). Questi catalizzatori presentano un'efficienza accettabile in un ampio intervallo di temperature, utilizzando l'ammoniaca per la riduzione di . L'ammoniaca è fornita al sistema attraverso la decomposizione dell'urea, la quale è iniettata nella linea di scarico a monte del catalizzatore. La riduzione di con l'ammoniaca è principalmente controllata da tre reazioni, indicate come standard, veloce e lenta, nella (1).



L'integrazione delle due tecnologie in un unico sistema compatto, offre riduzione dei costi e del peso e un miglioramento delle prestazioni dei sistemi di posttrattamento.

L'approccio tipico alla modellazione dell'SCR-F consiste nell'incorporare le reazioni dell'SCR su un modello DPF.

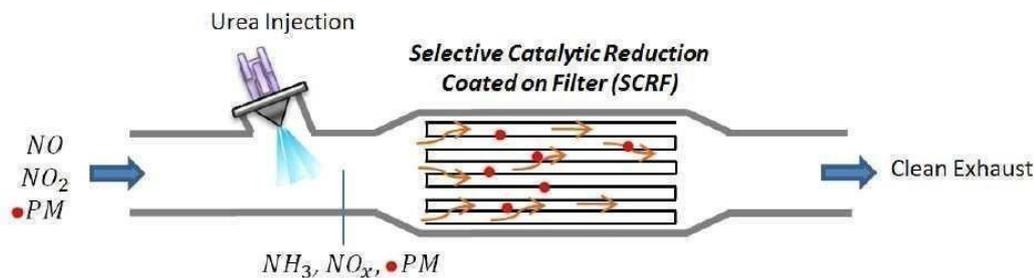


Figura 1: Principio di funzionamento di un Selective Catalytic Reduction coated on filter (SCR-F).

In questo capitolo sono state analizzate sia sperimentalmente che numericamente, le prestazioni di uno SCR-F, e cioè le prestazioni di un carburo di silicio rivestito con Cu / Zeolite, con lo scopo di controllare le emissioni di per applicazioni diesel per autoveicoli. È stato fatto per diversi carichi di Soot per indagare sulle sue proprietà catalitiche e costruire un modello di simulazione del dispositivo di posttrattamento in grado di prevedere la capacità di stoccaggio dell'ammoniaca, e l'efficienza di conversione del [6].

5.1 Tecnologie utilizzate

Per rientrare nei limiti di emissioni è stato necessario ricorrere a dispositivi di trattamento dei gas di scarico. Negli ultimi decenni i catalizzatori e i filtri antiparticolato sono così diventati una costante. Diverso è stato il mix tecnologico adottato dall'Euro 4 all'Euro 6 per abbattere gli inquinanti dei motori diesel.

EURO 4



Figura 2: Schema di un tipico sistema di post-trattamento negli Euro 4.

Per ossidare gli idrocarburi incombusti (HC) e il monossido di carbonio (CO), in posizione Closed Coupled è localizzato il DOC (Diesel Oxidation Catalysts), il quale risulta necessario anche per creare calore utilizzato per la rigenerazione. In posizione Underfloor è collocato invece un sistema di DOC + DPF, dove il Diesel Particulate Filter (DPF) rimuove il particolato dallo scarico mediante un processo di filtrazione.

EURO 5



Figura 3: Schema di un tipico sistema di post-trattamento negli Euro 5.

Le più ristrette limitazioni introdotte nel 2008, per essere rispettate, richiedono un sistema integrato di DOC più filtro antiparticolato (DPF). Il DOC viene posizionato prima del DPF allo scopo di utilizzare l' prodotto nel primo per favorire l'ossidazione del particolato nel secondo. I vantaggi di questa configurazione sono:

- Perdite di calore limitate → miglioramento del controllo della temperatura
- Rapido tempo di risposta del sistema → riduzione della fase di riscaldamento durante la rigenerazione

EURO 6

Il passaggio da Euro 5 a Euro 6 ha promosso cambiamenti tecnologici, nel controllo delle emissioni di NOx per soddisfare il più basso limite, per lo più sotto forma di sistemi di post trattamento di gas di scarico.



Figura 4: Schema di un tipico sistema di post-trattamento negli Euro 6 con l’LNT.

Una delle principali tecnologie disponibili per questo scopo è quella che utilizza trappole di NOx dette LNT (Lean NOx Trap) che sostituiscono l’SCR e il DOC, le quali ossidano gli HC e CO riducendo contemporaneamente gli NOx.

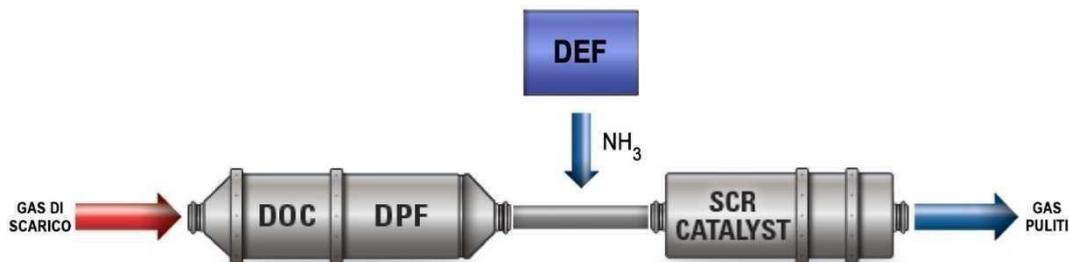


Figura 5: Schema di un tipico sistema di post-trattamento negli Euro 6 con l’SCR.

In altre situazioni risulta più conveniente un altro tipo di architettura, costituita in posizione underfloor da un SCR (Selective Catalytic Reduction) per ridurre le emissioni di NOx mediante l'iniezione di un fluido specifico in uno specifico catalizzatore posto sulla linea di scarico, solitamente denominato Diesel Exhaust Fluid (DEF). In posizione Closed Coupled è posto il DOC per una migliore conversione HC / CO, per promuovere l'ossidazione di NO in e per migliorare l'efficienza dell’SCR. A valle di quest’ultimo è posizionato il DPF per migliorare la rigenerazione.

5.2 Dove va il progresso tecnico

L’applicazione, spesso singola e in alternativa, dei dispositivi descritti ha finora consentito il rispetto dei limiti imposti dalle normative fino allo Stage 4 / Tier 4 final. Il progressivo irrigidimento dei limiti emissivi imposti dagli step più recenti ha però obbligato i costruttori a mutare la strategia di intervento.

È indubbio che la soluzione migliore si è rivelata quella di progettare e mettere a punto nuovi motori con emissioni meno inquinanti, puntando soprattutto sul miglioramento della combustione. Da questo punto di vista un formidabile contributo è stato offerto dall’evoluzione del common rail, che ha raggiunto altissime pressioni di iniezione (superiori a 2000 bar) e da un sempre più accurato studio della conformazione della camera di combustione (per favorire una miscelazione ottimale tra combustibile e comburente), oltre naturalmente alla più precisa gestione, ovviamente elettronica, dell’iniezione stessa (ad esempio con la tecnologia delle immissioni parziali multiple).

Sui motori destinati ai trattori di potenza medio-piccola, anche per la citata carenza di spazio sottocofano ora viene installato solo il DOC o il DPF (oppure una combinazione dei due dispositivi); per i motori più potenti ciò non è però sufficiente, per cui spesso è necessario applicare al contempo due o più differenti dispositivi, che abbattano contestualmente PM e NOx. Le combinazioni maggiormente adottate sono EGR+DOC, EGR+DPF, o SCR+DPF; per poter rientrare nei limiti emissivi più restrittivi, in alcuni casi (particolarmente complessi) è possibile trovare anche combinazioni costituite, da monte a valle, da DOC, DPF, SCR e AOC (Ammonia Oxidation Catalyst).

5.3. L'AdBlue in agricoltura

Con l'introduzione dell'SCR (Selective Catalytic Reduction) sui veicoli del settore automotive, la disponibilità dell'AdBlue (ossia la denominazione commerciale del fluido necessario per la conversione degli ossidi di azoto in componenti innocui per l'ambiente) ha raggiunto una diffusione capillare, tanto che oggi è facile acquistarla presso molti distributori di carburanti, ma anche in alcune catene di negozi specializzati e supermercati. Il rifornimento di AdBlue avviene direttamente mediante un'apposita pompa (del tutto analoga a quella del gasolio, anche se con una portata inferiore) nei distributori, mentre presso i rivenditori autorizzati e i supermercati è disponibile in taniche da 5-15 litri.

Per poter disporre di un'adeguata autonomia (e ma anche per abbattere i costi), nell'ambito agricolo l'AdBlue viene gestita in modo differente. Infatti, tipicamente le aziende agricole acquistano tale fluido in un serbatoio cubico di polietilene, spesso protetto da una griglia metallica, di capacità variabile (ma solitamente da 1000 litri) già corredato da una pompetta elettrica autonoma alimentata a 12 V e una pistola per effettuare facilmente il rifornimento presso il centro aziendale.

5.4. La rigenerazione dei dispositivi DPF

Si tratta di un intervento necessario per il DPF (Diesel Particulate Filter): infatti, essendo questo un filtro di tipo fisico, è inevitabilmente soggetto ad un progressivo intasamento, fattore che ne pregiudica le prestazioni. Occorre quindi ripristinarne l'efficienza con un intervento di manutenzione straordinaria, che può essere eseguito con lo smontaggio del componente e una pulizia mediante solventi oppure, molto più di rado, con la completa sostituzione del filtro (una pratica peraltro piuttosto costosa).

Viceversa, la cosiddetta "rigenerazione" può avvenire "on site", ed essere sostanzialmente di due tipi, attiva o passiva. Nel primo caso, il processo è periodico, e gestito da una centralina, che tramite sensori dedicati controlla la differenza di pressione tra entrata e uscita del DPF: se viene rilevato un valore superiore ad una soglia prefissata, si innesca in automatico il processo di pulizia. In pratica, per un limitato periodo di tempo (di solito circa 10-15 minuti) viene aumentata la mandata di gasolio in camera di combustione, in modo da causare un incremento della temperatura dei fumi di scarico, tale da consentire la gassificazione delle particelle carboniose che occludono le maglie del filtro.

Si tratta di una soluzione efficace per ridurre il PM emesso in atmosfera, che però evidenzia alcuni svantaggi, quali una limitata riduzione della potenza motore generata, dovuta alla resistenza che il filtro progressivamente intasato oppone all'espulsione dei gas di scarico e la maggior emissione di NOx dovuta all'incremento di temperatura in camera di combustione quando viene effettuata la rigenerazione. La gestione automatica della rigenerazione può

about:blank

essere rimandata (di solito per un massimo di 2-3 volte) se si verificano condizioni potenzialmente pericolose, come ad esempio un rischio di incendio della vegetazione secca eventualmente presente sotto al trattore, che potrebbe essere soggetta a combustione a causa delle elevate temperature cui è soggetto tutto il blocco motore durante la rigenerazione. In tal caso, è successivamente necessario intervenire manualmente, con la cosiddetta rigenerazione manuale o "da parcheggio". Se si trascura anche questa procedura, di solito anche per una sola volta, la rigenerazione potrà essere effettuata solo in officina.

Bisogna infine considerare che la rigenerazione periodica del DPF ha un impatto, seppur limitato, sui consumi globali del motore; si tratta di un dato non facile da quantificare, ma recenti e autorevoli studi hanno permesso di accertare che l'aggravio sui consumi di gasolio del trattore assomma mediamente all'1% circa del totale. Si sta invece diffondendo sempre più la cosiddetta rigenerazione passiva, che prevede l'impiego di filtri (coated DPF) sempre con struttura a nido d'ape, ma nei quali la superficie è ricoperta da un sottile strato di metalli nobili (spesso viene usato il platino) che funge da catalizzatore per la continua trasformazione chimica delle particelle di carbonio in molecole di CO₂.

In pratica, questo tipo di filtro (che viene talvolta combinato con il DOC, Diesel Oxidation Filter) viene collocato molto vicino all'uscita dei gas di scarico in modo da sfruttarne la temperatura ancora elevata (intorno a 300-350 °C), facilitando così in tempo reale la reazione chimica indicata, senza necessità di alcuna iniezione supplementare di gasolio per l'aumento temporaneo della temperatura dei gas di scarico.

5.5. Motori a diesel, filtro DPF e FAP:

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

Sistemi chiusi (Closed traps): l'intero flusso di gas esausti passa più volte attraverso i canali del filtro in maniera alternata da quelli chiusi a quelli aperti; le particelle di particolato vengono intrappolate nelle pareti dei canali, mentre il CO e gli HC vengono ossidati. L'ossidazione del particolato può essere effettuata mediante un processo discontinuo oppure continuo.

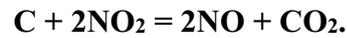
Sistemi aperti (Open traps): possono essere di diversa forma e materiale, ad esempio possono essere costituiti da una schiuma ceramica irregolare all'interno della quale il flusso passa e deposita il materiale carbonioso. La definizione "aperto" deriva dal fatto che, contrariamente a quanto avviene nei filtri chiusi, non tutto il flusso è soggetto a rimozione del particolato in quanto si possono creare dei cammini preferenziali nella schiuma senza che il particolato possa depositarsi; per tale motivo l'efficienza dei sistemi aperti è inferiore a quella dei sistemi chiusi. Il particolato viene ossidato per mezzo di NO₂, prodotto da un opportuno catalizzatore che avvolge la spugna. L'interesse verso i filtri di tipo aperto nasce dalla facilità con la quale essi possono essere montati su autovetture a diesel di vecchia fabbricazione.

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

Filtri a rigenerazione discontinua: prevedono un processo di rigenerazione periodica del filtro dovuto all'accumulo di particelle carboniose, dipendente fortemente dalle condizioni di utilizzo del motore. E' possibile dare un valore indicativo considerando necessaria la

rigenerazione dopo circa 400-500 km di utilizzo oppure quando si registra una caduta di pressione prefissata tra monte e valle del filtro. Il processo di rigenerazione consiste nell'ossidazione delle particelle depositatesi nelle strutture del filtro a temperature prossime a 600°C. Si possono avere due diversi meccanismi di rigenerazione: con aggiunta di additivo (cerina) o meno.

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



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

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

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

about:blank

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

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

Il sistema è costituito da due componenti principali: - catalizzatore ossidante;
- filtro per il particolato.

I materiali del filtro e la sua configurazione geometrica costituiscono un elemento chiave nei sistemi DPF, devono essere valutati in base alla contropressione allo scarico, l'efficienza di trattenimento del particolato, la facilità di rigenerazione, la durata nel tempo delle prestazioni offerte ed infine il costo. Normalmente il materiale utilizzato per realizzarli, è il carburo di silicio che consente: - elevata efficienza di filtrazione; perdita di carico ridotta;
buona resistenza alle sollecitazioni termiche, meccaniche e chimiche; grande capacità di immagazzinamento del particolato per limitare la frequenza della rigenerazione.

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

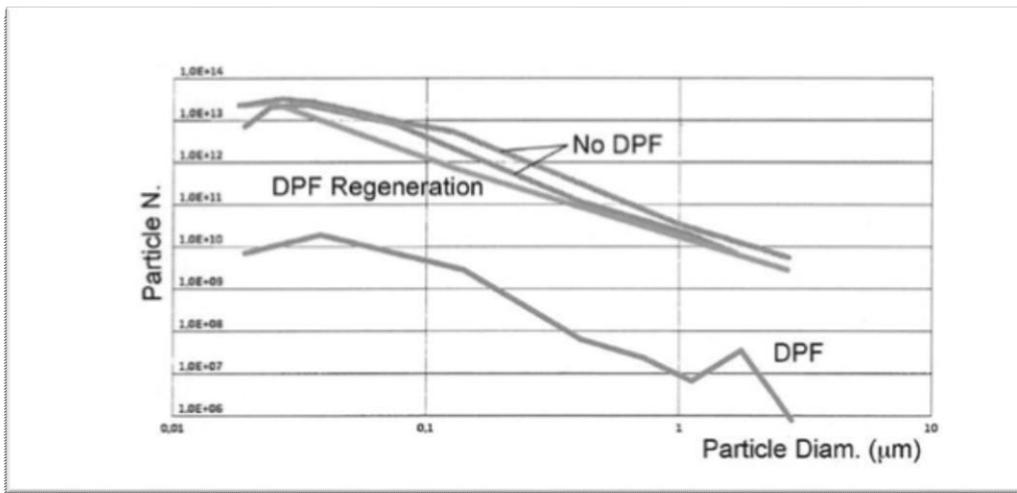
L'assenza della cerina crea un minore accumulo di cenere nel filtro e ciò è un grosso vantaggio pratico ed economico poiché evita di dover sostituire il DPF alle scadenze chilometriche previste invece per il FAP. Tuttavia, l'accumulo nel tempo di ceneri ineliminabili può ridurre l'efficienza del DPF al punto da rendere necessaria la sua sostituzione a percorrenze molto elevate. Resta peraltro da chiarire se il biossido di cerio espulso sia pure in minime quantità dallo scarico, (il tutto va moltiplicato per il numero dei veicoli circolanti), possa avere effetti dannosi a lungo termine per la nostra salute.

Un altro aspetto trascurato del funzionamento dei filtri antiparticolato riguarda l'aumento di emissione di CO₂, infatti tale gas viene prodotto dalla combustione del particolato secondo la reazione: $C+O_2 = CO_2$. Mentre un effetto positivo che si verifica nel DPF, è lo sfruttamento

del biossido d'azoto come ossidante per il carbonio (particolato), ottenendo anidride carbonica e ossido d'azoto: $\text{NO}_2 + \text{C} = \text{NO} + \text{CO}_2$.

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

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



del numero di particelle emesse in assenza e presenza

Figura 6: andamento del filtro DPF durante la rigenerazione; valori in scala logaritmica.

6. PROVE IN CANTIERE :

Cantiere navale a mondolfo

6.1. TEST 021

Utilizzando il monitor "SidePak Aerosol Monitor" per misurare li inquinanti provocate dal motore :



Figura 1: SIDEPAK PERSONAL AEROSOL MONITOR AM520

6.1.1. DETTAGLI DEL PRODOTTO

Il monitor per aerosol personale SidePak™ AM520 è un fotometro laser piccolo, monocanale, portatile, a batteria, con registrazione dati e diffusione della luce che fornisce letture della concentrazione di massa di aerosol in tempo reale di polveri, fumi, nebbie, fumo e nebbia all'interno una zona di respirazione dei lavoratori. I condizionatori di ingresso di nuova concezione aumentano la capacità di concentrazione di massa e forniscono punti di taglio per frazione dimensionale per PM10, PM4 (respirabile), PM5 (respirabile in Cina), PM2,5, PM1 e particolato diesel (DPM) da 0,8 µm. Questo monitor è la soluzione perfetta per il campionamento personale di aerosol in tempo reale in una varietà di ambienti di lavoro, tra cui industria generale, fonderie, cantieri, impianti chimici, raffinerie, petrolchimica, energia e servizi, trasporti, aerospaziale, marittimo, spazi ristretti e estrazione.

l'analizzatore è stato collocato sulle spalle dell'operatore:

Abbiamo misurato su diversi tipi di carelli:

- CARELLO 40 TONNELATA AL CHIUSO
- CARELLO 40 TONNELATA ALL'APERTO
- CARELLO 100 TONNELATA ALL'APERTO
- CARELLO 40 TONNELATA ALL'APERTO

Figura 2:CARELLO DA 100 TONNELATA:



Figura 3:CARELLO DA 40 TONNELATA:



Instrument		Data Properties	
Model	SidePak Aerosol Monitor	Start Date	07/09/2020
Meter S/N	11607010	Start Time	09:22:06
		Stop Date	07/09/2020
		Stop Time	11:30:06
		Total Time	0:02:08:00

		Logging interval	60 seconds
--	--	------------------	------------

Statistics	
	Aerosol
Avg	0.032 mg/m ³
Max	0.349 mg/m ³
Max Date	07/09/2020
Max Time	10:51:06
Min	0.008 mg/m ³
Min Date	07/09/2020
Min Time	09:24:06
TWA (8 hr)	0.009
TWA Start Date	07/09/2020
TWA Start Time	09:22:06
TWA End Time	11:30:06

Test Data			
Data Point	Date	Time	Aerosol mg/m ³
1	07-09-20	9:23:06	0.014
2	07-09-20	9:24:06	0.008
3	07-09-20	9:25:06	0.011
4	07-09-20	9:26:06	0.034
5	07-09-20	9:27:06	0.048
6	07-09-20	9:28:06	0.048
7	07-09-20	9:29:06	0.066
8	07-09-20	9:30:06	0.031
9	07-09-20	9:31:06	0.03
10	07-09-20	9:32:06	0.034
11	07-09-20	9:33:06	0.046
12	07-09-20	9:34:06	0.043
13	07-09-20	9:35:06	0.023

about:blank

14	07-09-20	9:36:06	0.037
15	07-09-20	9:37:06	0.027
16	07-09-20	9:38:06	0.117
17	07-09-20	9:39:06	0.19
18	07-09-20	9:40:06	0.071
19	07-09-20	9:41:06	0.029
20	07-09-20	9:42:06	0.031
21	07-09-20	9:43:06	0.059
22	07-09-20	9:44:06	0.045
23	07-09-20	9:45:06	0.042
24	07-09-20	9:46:06	0.026
25	07-09-20	9:47:06	0.032
26	07-09-20	9:48:06	0.055
27	07-09-20	9:49:06	0.038
28	07-09-20	9:50:06	0.015
29	07-09-20	9:51:06	0.01
30	07-09-20	9:52:06	0.01
31	07-09-20	9:53:06	0.022

32	07-09-20	9:54:06	0.011
33	07-09-20	9:55:06	0.01
34	07-09-20	9:56:06	0.01
35	07-09-20	9:57:06	0.016
36	07-09-20	9:58:06	0.012
37	07-09-20	9:59:06	0.011
38	07-09-20	10:00:06	0.011
39	07-09-20	10:01:06	0.011
40	07-09-20	10:02:06	0.023
41	07-09-20	10:03:06	0.011
42	07-09-20	10:04:06	0.011
43	07-09-20	10:05:06	0.011

44	07-09-20	10:06:06	0.012
45	07-09-20	10:07:06	0.012
46	07-09-20	10:08:06	0.011
47	07-09-20	10:09:06	0.014
48	07-09-20	10:10:06	0.017
49	07-09-20	10:11:06	0.021
50	07-09-20	10:12:06	0.018
51	07-09-20	10:13:06	0.014
52	07-09-20	10:14:06	0.012
53	07-09-20	10:15:06	0.012
54	07-09-20	10:16:06	0.013
55	07-09-20	10:17:06	0.015
56	07-09-20	10:18:06	0.013
57	07-09-20	10:19:06	0.018
58	07-09-20	10:20:06	0.038
59	07-09-20	10:21:06	0.014
60	07-09-20	10:22:06	0.018
61	07-09-20	10:23:06	0.015
62	07-09-20	10:24:06	0.016
63	07-09-20	10:25:06	0.02
64	07-09-20	10:26:06	0.016
65	07-09-20	10:27:06	0.017
66	07-09-20	10:28:06	0.016
67	07-09-20	10:29:06	0.017
68	07-09-20	10:30:06	0.017
69	07-09-20	10:31:06	0.044

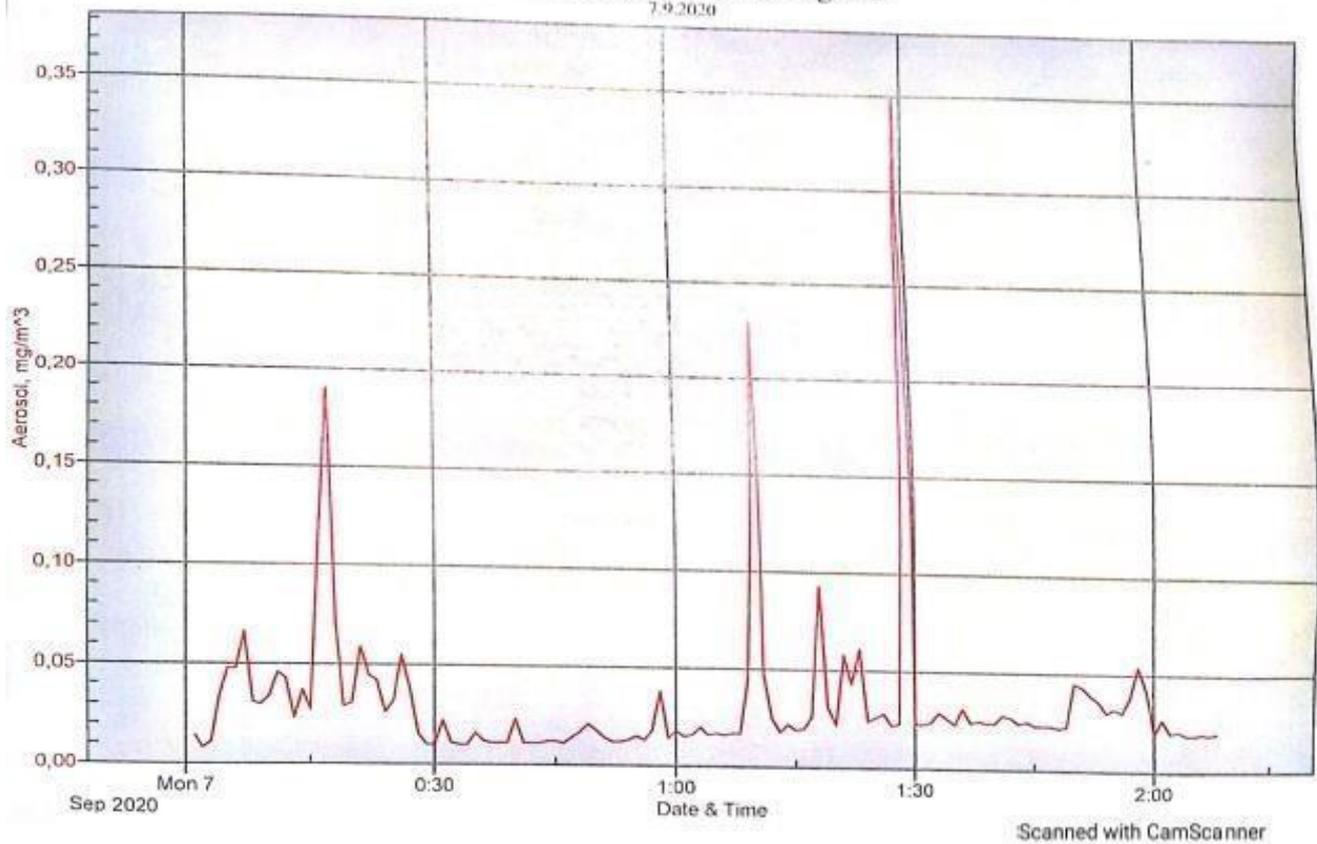
70	07-09-20	10:32:06	0.03
71	07-09-20	10:33:06	0.048
72	07-09-20	10:34:06	0.025
73	07-09-20	10:35:06	0.018
74	07-09-20	10:36:06	0.022
75	07-09-20	10:37:06	0.019

76	07-09-20	10:38:06	0.02
77	07-09-20	10:39:06	0.026
78	07-09-20	10:40:06	0.093
79	07-09-20	10:41:06	0.031
80	07-09-20	10:42:06	0.022
81	07-09-20	10:43:06	0.058
82	07-09-20	10:44:06	0.043
83	07-09-20	10:45:06	0.061
84	07-09-20	10:46:06	0.024
85	07-09-20	10:47:06	0.026
86	07-09-20	10:48:06	0.028
87	07-09-20	10:49:06	0.022
88	07-09-20	10:50:06	0.023
89	07-09-20	10:51:06	0.349
90	07-09-20	10:52:06	0.023
91	07-09-20	10:53:06	0.023
92	07-09-20	10:54:06	0.024
93	07-09-20	10:55:06	0.029
94	07-09-20	10:56:06	0.026
95	07-09-20	10:57:06	0.023
96	07-09-20	10:58:06	0.031
97	07-09-20	10:59:06	0.024
98	07-09-20	11:00:06	0.025
99	07-09-20	11:01:06	0.024
100	07-09-20	11:02:06	0.024
101	07-09-20	11:03:06	0.028
102	07-09-20	11:04:06	0.027
103	07-09-20	11:05:06	0.024
104	07-09-20	11:06:06	0.025
105	07-09-20	11:07:06	0.023
106	07-09-20	11:08:06	0.023
107	07-09-20	11:09:06	0.023

108	07-09-20	11:10:06	0.022
109	07-09-20	11:11:06	0.023
110	07-09-20	11:12:06	0.045
111	07-09-20	11:13:06	0.043
112	07-09-20	11:14:06	0.039
113	07-09-20	11:15:06	0.036
114	07-09-20	11:16:06	0.03
115	07-09-20	11:17:06	0.032
116	07-09-20	11:18:06	0.03
117	07-09-20	11:19:06	0.038
118	07-09-20	11:20:06	0.054
119	07-09-20	11:21:06	0.042
120	07-09-20	11:22:06	0.02
121	07-09-20	11:23:06	0.027
122	07-09-20	11:24:06	0.02
123	07-09-20	11:25:06	0.021
124	07-09-20	11:26:06	0.019
125	07-09-20	11:27:06	0.019
126	07-09-20	11:28:06	0.02
127	07-09-20	11:29:06	0.019
128	07-09-20	11:30:06	0.02

Emissioni diesel di mezzi logistici

7.9.2020



Scanned with CamScanner

Figura 4:diagramma rappresenta le emissioni diesel di mezzi logistici nell'anno 2020 (aerosol in funziona di tempo)

Test 019

Instrument		Data Properties	
Model	SidePak Aerosol Monitor	Start Date	26/11/2019
Meter	11607010	Start Time	
SIN		Stop Date	26/11/2019
		Stop Time	
		Total Time	02:01:00
		Logging Interval	60 seconds

Statistics

Aerosol	
Avg	0.063 mg/m ³
Max	0.639 mg/m ³
Max Date	26/11/2019
Max Time	11:33:08
Min	0.012 mg/m ³
Min Date	26/11/2019
Min Time	11:05:08
TWA (8 hr)	0.016
TWA Start Date	26/11/2019
TWA Start Time	10:12:08
TWA End Time	12:13:08

Test Data

Data Point	Date	Time	Aerosol mg/m ³
1	26/11/2019		0.032
2	26/11/2019		0.036
3	26/11/2019		0.038
4	26/11/2019		0.034
5	26/11/2019		0.028
6	26/11/2019		0.033
7	26/11/2019		0.029
8	26/11/2019		0.038
9	26/11/2019		0.037

10	26/11/2019		0.033
11	26/11/2019		0.037
12	26/11/2019		0.062
13	26/11/2019		0.234
14	26/11/2019		0.157
15	26/11/2019		0.160
16	26/11/2019		0.081
17	26/11/2019		0.106
18	26/11/2019		0.082
19	26/11/2019		0.062
20	26/11/2019		0.052
21	26/11/2019		0.055
22	26/11/2019		0.187
23	26/11/2019		0.056
24	26/11/2019		0.036
25	26/11/2019		0.032

17/01/2020

1 rack1-ro Keport

Yagma 2 dl 3

Test Data			
Data Point	Date	Time	Aerosol mg/mA3
26	26/11/2019	10:38:08	0.021
27	26/11/2019	10:39:08	0.049
28	26/11/2019	10:40:08	0.071
29	26/11/2019	10:41:08	0.077
30	26/11/2019	10:42:08	0.212
	26/11/2019	10:43:08	0.211
32	26/11/2019	10:44:08	0.100
33	26/11/2019	10:45:08	0.028
34	26/11/2019	10:46:08	0.021
35	26/11/2019	10:47:08	0.039
36	26/11/2019	10:48:08	0.130
37	26/11/2019	10:49:08	0.047
38	26/11/2019	10:50:08	0.032

about:blank

39	26/11/2019	10:51:08	0.022
40	26/11/2019	10:52:08	0.022
	26/11/2019	10:53:08	0.020
42	26/11/2019	10:54:08	0.018
43	26/11/2019	10:55:08	0.022
44	26/11/2019	10:56:08	0.021
45	26/11/2019	10:57:08	0.019
46	26/11/2019	10:58:08	0.028
47	26/11/2019	10:59:08	0.021
48	26/11/2019	11:00:08	0.049
49	26/11/2019	11:01:08	0.024
50	26/11/2019	11:02:08	0.212
	26/11/2019	11:03:08	0.024
52	26/11/2019	11:04:08	0.016
53	26/11/2019	11:05:08	0.012
54	26/11/2019	11:06:08	0.029
55	26/11/2019	11:07:08	0.093
56	26/11/2019	11:08:08	0.076
	26/11/2019	11:09:08	0.031
	26/11/2019	11:10:08	0.067
59	26/11/2019	11:11:08	0.106
60	26/11/2019	11:12:08	0.021
	26/11/2019	11:13:08	0.050
62	26/11/2019	11:14:08	0.036
63	26/11/2019	11:15:08	0.099
64	26/11/2019	11:16:08	0.045
65	26/11/2019	11:17:08	0.083
66	26/11/2019	11:18:08	0.073
67	26/11/2019	11:19:08	0.096
68	26/11/2019	11:20:08	0.023
69	26/11/2019	11:21:08	0.018

70	26/11/2019	11:22:08	0.284
	26/11/2019	11:23:08	0.461
	26/11/2019	11:24:08	0.453
73	26/11/2019	11:25:08	0.015
	26/11/2019	11:26:08	0.013
75	26/11/2019	11:27:08	0.016

17/01/2020

1 rakKro Kep 0

Yagma dl

0 est Data			
6	Date	Time	Aerosol mg/mA3
/	26/11/2019	11:28:08	0.018
--//	26/11/2019	11:29:08	0.014
78	26/11/2019	11:30:08	0.014
-9	26/11/2019	11:31:08	0.015
/	26/11/2019	11:32:08	0.013
80	26/11/2019	11:32:08	0.013
81	26/11/2019	11:33:08	0.639
8	26/11/2019	11:34:08	0.016
83	26/11/2019	11:35:08	0.014
8-4	26/11/2019	11:36:08	0.455
85	26/11/2019	11:37:08	0.016
86	26/11/2019	11:38:08	0.019
8/-	26/11/2019	11:39:08	0.014
88	26/11/2019	11:40:08	0.015
89	26/11/2019	11:41:08	0.015
90	26/11/2019	11:42:08	0.014
91	26/11/2019	11:43:08	0.014
9~	26/11/2019	11:44:08	0.014
90	26/11/2019	11:45:08	0.015
94	26/11/2019	11:46:08	0.014
95	26/11/2019	11:47:08	0.016
96	26/11/2019	11:48:08	0.017
9/-	26/11/2019	11:49:08	0.017
98	26/11/2019	11:50:08	0.034

about:blank

99	26/11/2019	11:51:08	0.039
100	26/11/2019	11:52:08	0.041
101	26/11/2019	11:53:08	0.043
102	26/11/2019	11:54:08	0.027
103	26/11/2019	11:55:08	0.038
104	26/11/2019	11:56:08	0.033
105	26/11/2019	11:57:08	0.033
106	26/11/2019	11:58:08	0.030
107	26/11/2019	11:59:08	0.037
108	26/11/2019	12:00:08	0.035
109	26/11/2019	12:01:08	0.025
110	26/11/2019	12:02:08	0.031
	26/11/2019	12:03:08	0.034
	26/11/2019	12:04:08	0.033
	26/11/2019	12:05:08	0.028
	26/11/2019	12:06:08	0.024
	26/11/2019	12:07:08	0.024
	26/11/2019	12:08:08	0.023
117	26/11/2019	12:09:08	0.032
118	26/11/2019	12:10:08	0.039
	26/11/2019	12:11:08	0.042
120	26/11/2019	12:12:08	0.028
	26/11/2019	12:13:08	0.022

17/01/2020

Sub Title

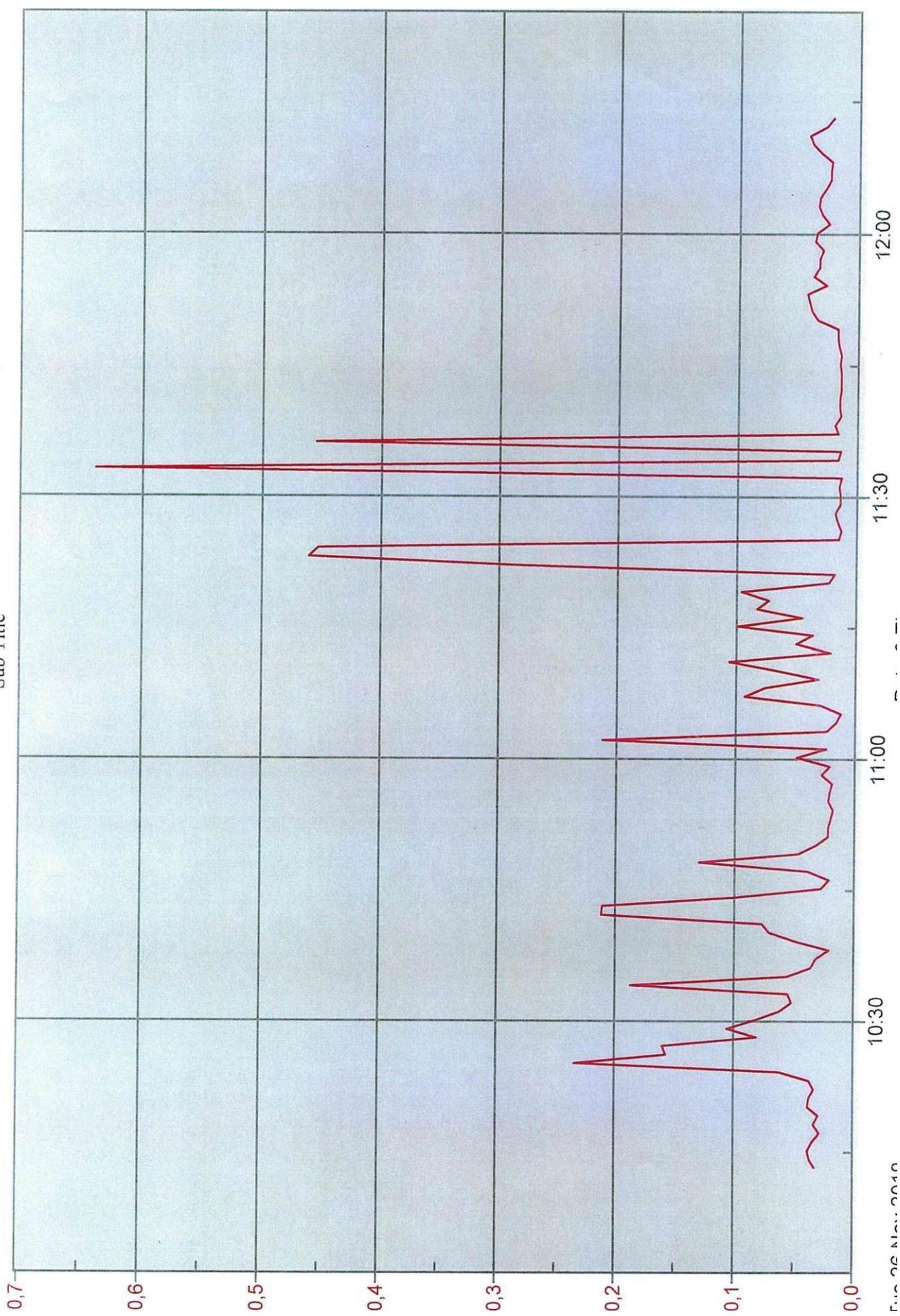


Fig. 05.10.2020

Figura 5:diagramma rappresenta le emissioni diesel di mezzi logistici nell'anno 2020 (aerosol in funziona di tempo) 17/01/2020

6.2. DISCUSSIONE:

Il primo test che abbiamo fatto nel 07/09/2020 vediamo che la quantità minima di aerosol pari a 0,008 mg/m³ alle ore 09:24:06 e si aumenta fino a 0,349 mg/m³ alle ore 10:51:06 poi la quantità torna a diminuire entro (0,019 e 0,054) mg/m³ tra le ore 10:52:06 e 11:30:06

Mentre nel secondo test che hanno fatto il 26/11/2019 vediamo che la quantità minima pari 0,012 mg/m³ alle ore 11:05:08 e si aumenta fino a 0,639 mg/m³ alle ore 11:33:08 ma vediamo che la quantità di aerosol raggiunge un valore elevate in diverse tempo quindi possiamo introdurre che la quantità di aerosol nel secondo test è il doppio di quello primo allora il motori diesel con filter aiuta a diminuire l'inquinamento nell'ambiente

7. SITUAZIONE FUTURA:

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

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

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

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

Fissare standard di emissioni di CO₂ per i veicoli è una delle politiche di maggior successo dell'Unione Europea per quanto riguarda la lotta ai cambiamenti climatici. Così facendo si stimola l'innovazione e il mantenimento di un'alta competitività nell'industria automobilistica europea, attraverso la creazione di un mercato di tecnologie innovative e sofisticate che migliorino l'efficienza in termini di consumi. Attualmente il regime temporale degli standard per le automobili è al 2021, quello dei veicoli commerciali leggeri al 2020, mentre non esiste ancora uno standard per i camion. Nuovi standard al

2025 potrebbero fornire una quota significativa di tagli che dovranno essere fatti nel settore dei trasporti per centrare gli obiettivi Clima ed Energia posti al 2030. Tecnologie economicamente efficaci per ridurre le emissioni dei veicoli convenzionali da una media di 95 g/km a 70 g/km sono disponibili e promettono un ritorno dell'investimento entro tre anni grazie ai risparmi sull'acquisto di carburante. Un'intelligente regolamentazione che potrebbe essere in grado di promuovere i veicoli elettrici nel mercato stimolandone la scelta da parte dei possibili acquirenti [16].

7.1 Strategia EUROPA 2020[*]:

Tra il 1990 e il 2012 le emissioni di gas a effetto serra sono diminuite del 18% a livello dell'UE. Questi progressi sono in parte attribuibili alle politiche in vigore su Clima ed Energia e in parte alla crisi che ha inciso sensibilmente. Un lieve aumento delle emissioni di gas a effetto serra si è registrato durante la temporanea ripresa del 2010. Questo risultato, tanto più rilevante se si pensa che dal 1990 l'economia europea è cresciuta di circa il 45% in termini reali, mostra chiaramente che la crescita economica e le emissioni di gas a effetto serra vanno sempre più scindendosi. Di conseguenza nel 2012 l'economia europea presentava un'intensità di carbonio quasi dimezzata (l'intensità di carbonio = quantità di emissioni per unità di PIL) rispetto al 1990. Le ultime tendenze lasciano supporre che l'obiettivo Europa 2020 sulle emissioni di gas a effetto serra potrà essere raggiunto. In linea con gli incoraggianti sviluppi degli ultimi anni, la riduzione delle emissioni di gas a effetto serra potrebbe superare l'obiettivo attestandosi al 24% entro il 2020.

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

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

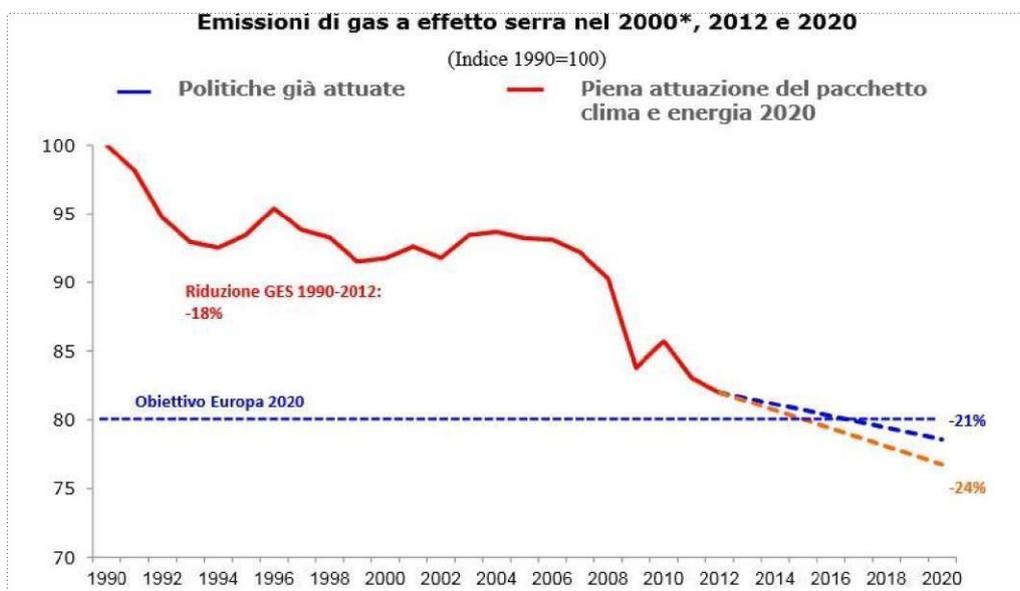


Figura 1: riduzione della CO₂ in presenza della piena attuazione del pacchetto Clima ed Energia 2020.

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

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

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

Il regolamento UE sulle autovetture è la misura principale della strategia volta a ridurre le emissioni di CO₂ dei veicoli leggeri (auto e furgoni). Ai sensi del regolamento, le emissioni medie di CO₂ delle automobili non dovevano superare i 130 grammi di CO₂ per km entro lo scorso 2015, introdotti gradualmente dal 2012. Ciò rappresenta una riduzione del 19% rispetto al livello del 2006 (161.3 g di CO₂ per km) e dovrebbe scendere ulteriormente a 95 g/km entro il 2020, una riduzione pari al 20% rispetto al 1990. Almeno il 95% delle nuove autovetture dovrà soddisfare tale requisito entro quell'anno e il 100% dal 2021 in poi. Questo approccio è simile alla legislazione sulle emissioni di CO₂ dei veicoli commerciali leggeri (furgoni) adottato nel 2011. Il raggiungimento di questi obiettivi

41
aiuterà gli Stati membri al conseguimento delle riduzioni di gas a effetto serra che hanno promesso di consegnare entro il 2020 nell'ambito del pacchetto Clima ed Energia. Ogni produttore ottiene un obiettivo annuale sulla base della massa media di tutte le sue nuove auto immatricolate in Europa in un dato anno. A partire dal 2012 i produttori devono garantire che il 65% delle autovetture nuove immatricolate in Europa ogni anno abbia emissioni medie che sono sotto i rispettivi obiettivi. La percentuale sale al 75% nel 2013, ad 80% nel 2014 e al 100% nel 2015; discorso analogo per il processo di ulteriore riduzione da oggi all'imminente 2020.

8. SITOGRAFICA:

<https://blog.ecolstudio.com/valutazione-rischio-chimico-nuova-uni-en-689-2018/>

<https://www.mondomacchina.it/it/la-riduzione-delle-emissioni-dei-motori-diesel-c2471>

<http://red-live.it/auto/motorpedia/euro-6-tutto-quello-che-ce-da-sapere>

https://it.qwe.wiki/wiki/Diesel_engine

<https://www.auto-doc.it/info/quello-che-c-e-da-sapere-sui-motori-diesel>

<https://www.newsauto.it/guide/normative-antiquinamento-guida-euro-1-2-3-4-5-6-2020-176063/>

9. BIBLIOGRAFICA:

- a. G. Doornbos, S. Hemdal, D. Dahl; "Reduction of Fuel Consumption and Engine-Out NO_x Emissions in a Lean Homogeneous GDI Combustion System, Utilizing Valve Timing and an Advanced Ignition System." SAE Technical Paper, 2015-01-0776.
- b. Libro di testo "Motori a combustione interna" Giancarlo Ferrari, anno 2008, editore Il Capitello
- c. "The exhaust gas after-treatment system of a diesel Common Rail engine." Szymkowicz, Patrick G. "After-treatment system and method for reducing emissions in diesel engine exhaust." U.S. Patent No. 6,915,629. 12 Jul. 2005.
- d. Cycles, Diesel Net Emission Test. "Summary of worldwide engine and vehicle test cycles." Accessed [16/1/2010] at <http://www.dieselnets.com/standards/cycles> (2008).
- e. Millo, F., Rafigh, M., Sapio, F., Barrientos, E.J. et al., "Application of Genetic Algorithm for the Calibration of the Kinetic Scheme of a Diesel Oxidation Catalyst Model," SAE Technical Paper 2018-01-1762, 2018, doi:10.4271/2018-011762.
- f. F. Millo, M. Rafigh, D. Fino, P. Miceli, Application of a global kinetic model on an SCR coated on Filter (SCR-F) catalyst for automotive applications, Fuel. (2016). doi:10.1016/j.fuel.2016.11.082.

