

# **Stima dell'efficienza del sistema Titano**

## **per l'abbattimento sull'emissione di polveri aerodisperse di un motore diesel applicato su un generatore modello Baudouin 6M16G275/5e2**

### **Premessa**

Il presente documento è il rapporto delle attività condotte dai ricercatori del Dipartimento di Ingegneria Civile e Meccanica (DICeM) dell'Università di Cassino e del Lazio Meridionale (UNICAS) secondo quanto previsto dalla convenzione di ricerca stipulata con la società URANO S.r.L. socia di maggioranza della Titano S.r.l. volta alla determinazione dell'efficienza in termini di riduzione di polveri aerodisperse sub-micrometriche di un sistema ideato da Fabrizio Bove e Alessandro Bove e di proprietà della Titano S.r.L..

### **1 Introduzione: definizione e classificazione delle polveri aerodisperse**

L'aerosol si definisce come una sospensione metastabile di particelle solide o liquide in un gas portante. Tale espressione è stata introdotta in contrapposizione al termine inglese hydrosol con il quale si indica la sospensione di particelle nei liquidi nota anche come sospensione colloidale. A differenza delle sospensioni colloidali, però, l'aerosol non può essere trattato come un sistema stazionario. Infatti, le scale dei tempi che interessano i fenomeni dinamici e termodinamici delle particelle sospese sono molto brevi e conferiscono, pertanto, la caratteristica di instazionarietà all'aerosol cui l'aggettivo "metastabile" fa riferimento.

La classificazione più rilevante delle particelle di aerosol è quella che fa riferimento alla dimensione delle particelle stesse. Considerando che mediamente le molecole di aria hanno una dimensione caratteristica media di 0.37 nm, l'intervallo dimensionale delle particelle di aerosol va da pochi nanometri alle decine, o centinaia, di micrometri. Le particelle di dimensione caratteristica compresa tra 2.5 e 10  $\mu\text{m}$  sono comunemente definite polveri grossolane, quelle inferiori a 2.5  $\mu\text{m}$  polveri fini e quelle inferiori a 100 nm polveri ultrafini (*ultrafine particles*, UFP<sub>s</sub>). PM<sub>10</sub> e PM<sub>2.5</sub> rappresentano, invece, le frazioni in massa delle particelle di diametro aerodinamico inferiore, rispettivamente, a 10 e 2.5  $\mu\text{m}$ .



In Italia il concetto di qualità dell'aria in tema di concentrazione di particelle è stato introdotto, riferendosi al solo parametro  $PM_{10}$ , nel 1994. La normativa oggi vigente in tema di qualità dell'aria outdoor è la Direttiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 21 maggio 2008, recepita in Italia dal Decreto Legislativo 13 agosto 2010, n. 155 (relativa alla qualità dell'aria ambiente e per un'aria più pulita in Europa). Tale direttiva stabilisce un valore limite giornaliero di  $PM_{10}$  pari a  $50 \mu g m^{-3}$  da non superarsi più di 35 volte l'anno. La Direttiva 2008/50/CE ha inoltre individuato un valore limite anche per il  $PM_{2.5}$ : tale concentrazione limite annuale è fissata a  $25 \mu g m^{-3}$  al 2015 per poi diminuire a  $20 \mu g m^{-3}$  nel 2020.

La concentrazione di PM in ambiente, regolamentata dalle norme in materia di protezione della salute umana appena mostrate, è direttamente collegata all'emissione di particelle da sorgenti il cui effetto è immediatamente riscontrabile su scala locale. Nelle aree urbane la principale sorgente emissiva di polveri è costituita dal traffico veicolare. Le emissioni di particelle, in termini di massa delle stesse, sono imputabili principalmente ai motori diesel che, almeno in Italia, costituisce il 50% dell'intero parco automobilistico in circolazione. Il materiale particolato emesso da tali motori si presenta sotto forma di agglomerati di particelle carboniose (*soot*) costituite da carbonio elementare ed organico (EC, OC). Solitamente la dimensione delle particelle primarie varia tra 20-30 nm e la densità è pari a circa  $2 g cm^{-3}$ . Le dinamiche di formazione di tali nuclei carboniosi, anche se ad oggi non completamente comprese, sembrerebbero essere dovute non a reazioni di nucleazione omogenea quanto, più che altro, alle reazioni di polimerizzazione in fase gassosa che si manifestano durante la combustione: esse danno anche vita a composti intermedi quali acetilene ed Idrocarburi Policiclici Aromatici (*Polycyclic Aromatic Hydrocarbons*, PAH).

Dagli inizi degli anni '90, con l'introduzione della normativa Euro 1, le emissioni di agenti inquinanti da autoveicoli sono state regolamentate imponendo valori limite nel tempo sempre più stringenti: ciò ha comportato un forte innovamento tecnologico nello sviluppo di motori e dei sistemi di abbattimento degli inquinanti. Dal 1° settembre 2011 il limite di emissione in termini di massa totale di particolato per veicoli leggeri sia benzina che diesel (normativa Euro 5b) è fissato a  $4.5 mg km^{-1}$  rendendo, di fatto, obbligatoria l'installazione di filtri antiparticolato su tutti i motori diesel: rispetto alle emissioni degli autoveicoli omologati prima dell'introduzione della normativa Euro 1 (1° gennaio 1992), la riduzione delle emissioni è superiore al 90%.



Se le concentrazioni in massa di particelle emesse dagli autoveicoli (PM) sono state progressivamente ridotte nell'arco degli ultimi venti anni, non si può affermare lo stesso in termini di numero di particelle. Il miglioramento della combustione nel motore e le tecniche di abbattimento sviluppate sarebbero, infatti, particolarmente efficaci per l'abbattimento della frazione in massa delle polveri non garantendo, invece, un'altrettanta elevata efficienza nell'abbattimento delle polveri ultrafini. Tali polveri ultrafini sono costituite sia dalla frazione di *soot* che non ha subito particolari fenomeni di accrescimento sia dalle particelle che si formano nei gas esausti caldi in emissione che presentano condizioni termoigrometriche particolarmente favorevoli ai fenomeni di nucleazione e condensazione. Pertanto, le normative Euro 5b ed Euro 6 hanno introdotto un limite di emissione in termini di numero di particelle (PN) per motori diesel e benzina di  $6.0 \times 10^{11}$  part. km<sup>-1</sup> (considerando però le sole particelle di diametro maggiore a 23 nm).

## **2 Descrizione delle attività della convenzione di ricerca**

Oggetto del task di competenza del LAMI (Laboratorio di Misure Industriali) nell'ambito della Convenzione di Ricerca stipulata tra il Dipartimento di Ingegneria Civile e Meccanica (DICeM) e la Società URANO S.R.L. è la misura delle polveri emesse allo scarico di un motore in diverse condizioni di funzionamento installando o meno il sistema Titano di abbattimento delle emissioni non invasivo ideato da Fabrizio Bove e Alessandro Bove di proprietà della Titano S.r.L. ed installato durante la campagna di misura dal personale della URANO S.r.L. Il sistema di abbattimento consta del trattamento del carburante e di una serie di magneti installati sul condotto di aspirazione del comburente (aria), del combustibile e del liquido di raffreddamento. La scelta dei punti di installazione dei magneti sui condotti del combustibile e del comburente è stata operata dalla società committente l'attività di ricerca.

Sono state condotte misure di concentrazioni in numero di particelle in emissione dallo scarico del motore. A tale scopo il LAMI ha effettuato un'attività di misura con strumenti che garantissero di seguire con i propri tempi di risposta le dinamiche di processi molto veloci quali quelli legati alla combustione.

L'obiettivo di tale attività di misura è stato:

- i) la misura di concentrazioni in numero delle polveri a diversi regimi del motore (numero di giri, carico) in assenza del sistema di abbattimento;



- ii) la misura di concentrazioni in numero delle polveri, ad un determinato punto di funzionamento, a seguito dell'aggiunta del sistema di abbattimento in esame.

Nel seguito sono presentate metodologia e risultati delle attività svolte dai ricercatori del LAMI del DICeM per la caratterizzazione dell'aerosol emesso allo scarico da un motore diesel con e senza l'installazione del sistema di abbattimento.

### 3 Descrizione della metodologia di misura

La campagna sperimentale è stata effettuata c/o la Coelmo S.p.a. su di un gruppo di generazione di corrente modello Baudowin 6M16G275/5e2 da circa 200 kW alimentato a gasolio in grado di modulare la generazione in funzione del carico imposto (Figura 1).



**Figura 1** – Motore analizzato e installazione dei magneti.

L'apparato sperimentale per la caratterizzazione dell'aerosol in emissione dal motore è costituito dagli strumenti di misura di seguito brevemente descritti e riportati in Figura 2.

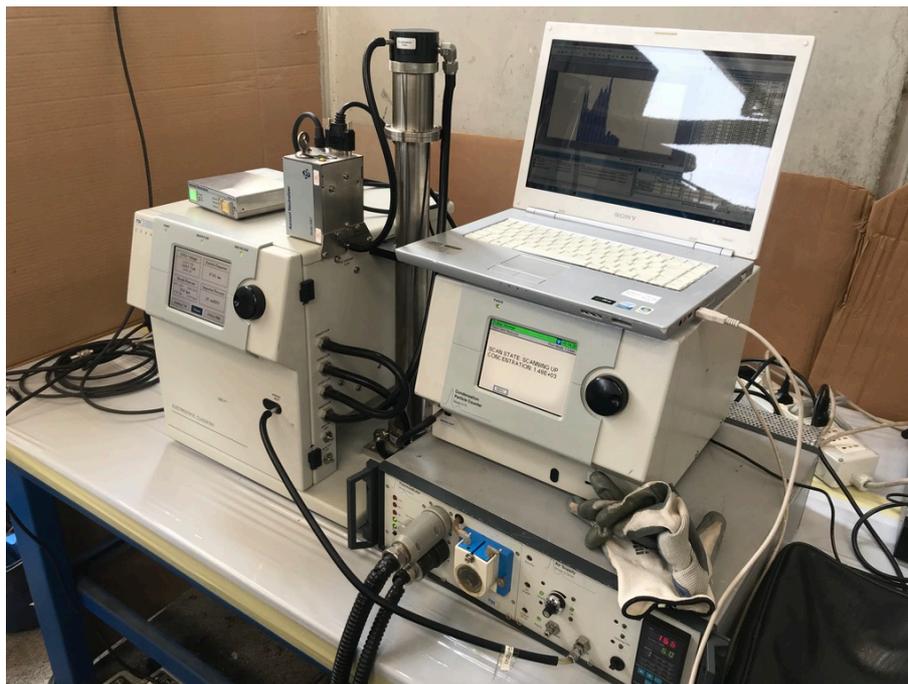
- a. Un contatore di particelle con tecnica di condensazione (Condensation Particle Counter, CPC 3775, TSI Inc.) in grado di misurare la concentrazione totale di particelle a partire da particelle di 4 nm di diametro con risoluzione temporale di 1 s e concentrazioni massime rilevabili fino a  $10^7$  part.  $\text{cm}^{-3}$ . La possibilità di rilevare particelle anche dell'ordine dei nanometri è dovuta alla tecnica mediante la quale le particelle vengono

“ingrandite” per effetto della condensazione di un fluido di lavoro (butanolo) fino a qualche micrometro e, quindi, rilevabili dal laser ottico;

- b. Un termo-diluitore costituito dal Rotating Disk Thermodiluter (Model 379020, Matter Engineering AG) e dal Thermal Conditioner (Model 379030, Matter Engineering AG). Il termo-diluitore è caratterizzato dalla possibilità di variare il fattore di diluizione e la temperatura della linea di campionamento e dalla possibilità di diluire la portata di aerosol campionata.

Nel caso di misura di polveri in emissioni da sorgenti (emissione motori, camino di impianti di potenza fissi, ecc.), infatti, il semplice campionamento dell'aerosol mediante sonde direttamente collegate agli strumenti di misura (es. CPC) può comportare degli artefatti di misura tali da inficiare la qualità del dato in maniera non trascurabile. Nello specifico il campionamento di aerosol da gas caldi e con elevate concentrazioni di polveri può comportare: a) condensazione di vapori sulle particelle preesistenti, b) nucleazione di nuove particelle a partire da fase vapore condensata, c) coagulazione delle particelle se in elevate concentrazioni. Infatti, lungo la linea di campionamento (se non opportunamente riscaldata) la portata di aerosol campionata si raffredda innescando, quindi, fenomeni di nucleazione e condensazione; inoltre, la riduzione di volume a cui l'aerosol è costretto nei condotti di campionamento comporta un aumento delle concentrazioni di polveri attivando dei fenomeni di coagulazione. Nucleazione, condensazione e coagulazione modificano sensibilmente la curva di distribuzione dimensionale delle polveri e la relativa concentrazione totale.





**Figura 2** – Strumentazione di misura utilizzata durante la campagna sperimentale.



**Figura 3** – Dettaglio installazione dei magneti.

La misura di concentrazioni in numero delle polveri a diversi regimi del motore (numero di giri, carico) in assenza del sistema di abbattimento è stata condotta variando il carico tra la

condizione di (i) “assenza di carico/regime minimo del motore”, (ii) carico applicato di 57 kW, (iii) carico applicato di 100 kW e (iv) carico applicato di 140 kW. Tale prova è stata condotta nell’ottica di scegliere un punto di funzionamento del motore sul quale effettuare il test di efficienza del sistema di abbattimento.

La misura di concentrazioni in numero delle polveri a seguito dell’aggiunta del sistema di abbattimento in esame (Figura 3) è stata condotta per uno dei punti di funzionamenti precedentemente analizzati: in particolare è stato scelto il punto di funzionamento a regime minimo del motore, ossia in assenza di carico esterno applicato.

Per entrambe le prove il punto di campionamento dell’aerosol è stato predisposto immediatamente a valle del motore utilizzando una sonda opportunamente coibentata al fine di ridurre eventuali punti freddi nella linea di campionamento. Per ogni punto di misura è stato effettuato un campionamento di 10 minuti. La misura è stata condotta nelle sole condizioni di funzionamento stazionario del motore, i ricercatori del LAMI sottolineano che tale aspetto è di fondamentale importanza per valutare in maniera appropriata l’eventuale variazione delle concentrazioni allo scarico a seguito della variazione del carico. Perseguire tali condizioni di stazionarietà di funzionamento ha comportato lunghi periodi di campionamento non effettivamente utilizzabili nel post-processamento dati in quanto il motore ha mostrato transitori molto lunghi sia in fase di accensione che al variare del carico applicato.

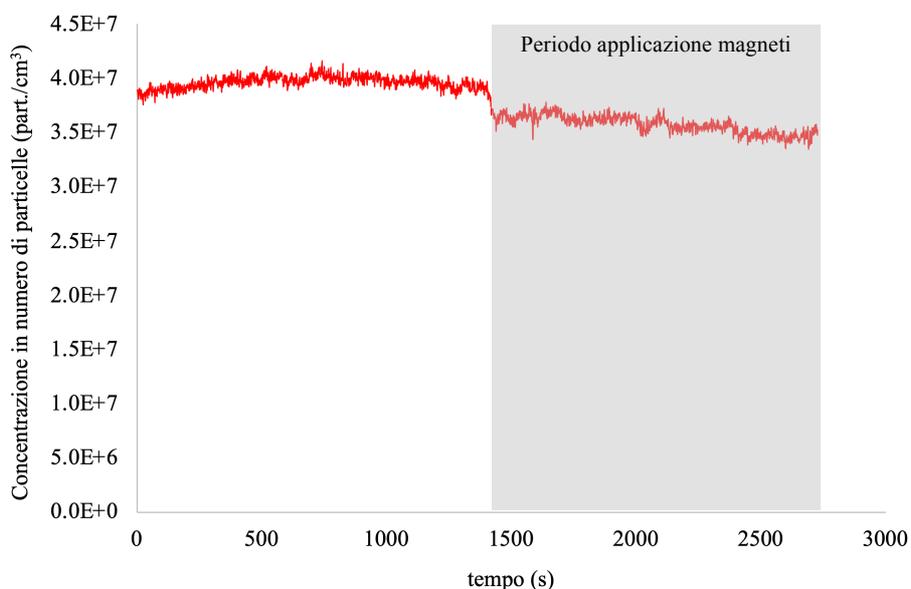
## **5 Risultati**

La misura di concentrazioni in numero delle polveri a diversi regimi del motore (numero di giri, carico) in assenza del sistema di abbattimento ha mostrato variazioni tra le diverse condizioni di carico inferiori al 10%. Tale risultato ha permesso di scegliere, e ritenere rappresentativo delle tipiche emissioni del motore, un solo punto di funzionamento del motore sul quale poi è stato effettuato il test di efficienza del sistema di abbattimento. Tale aspetto è di fondamentale importanza data i lunghi transitori del motore nel variare le condizioni di carico. Per tale motivo è stato scelto come punto di funzionamento per ulteriore approfondimento del sistema di abbattimento il punto a regime di minima potenza del motore.

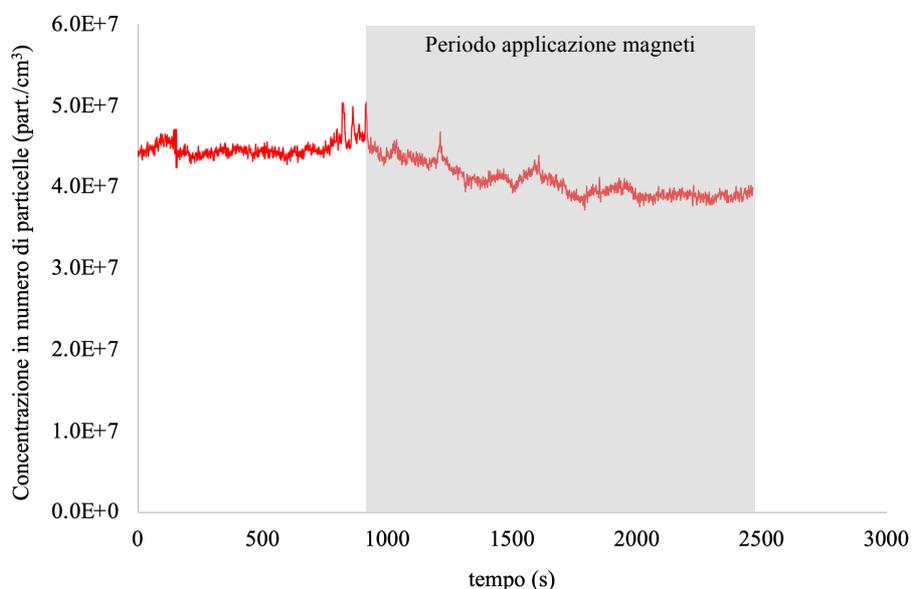
Per quanto concerne la misura di concentrazioni in numero delle polveri a seguito dell’aggiunta del sistema di abbattimento in esame, in Figura 4 ed in Figura 5 sono riportati i trend di concentrazione in numero di particelle per due test rappresentativi tra le diverse misure condotte. Tali trend mostrano una visibile riduzione della concentrazione a seguito



dell'applicazione del sistema di abbattimento. Tale riduzione, come riportato in Tabella 1, è risultata pari al 9% e al 10% nelle due prove in esame, rispettivamente. L'analisi statistica condotta sui trend (analisi ANOVA, livello di confidenza del 99%) ha evidenziato che la riduzione è da ritenersi statisticamente significativa.



**Figura 4** – Trend di concentrazione misurato durante il test 1.



**Figura 5** – Trend di concentrazione misurato durante il test 2.

**Tabella 1** – Concentrazione in numero di particelle prima e dopo l'applicazione del sistema di abbattimento per i due test riportati in Figura 4 ed in Figura 5.

test	Concentrazione allo scarico senza sistema di abbattimento (part./cm <sup>3</sup> )	Concentrazione allo scarico con sistema di abbattimento (part./cm <sup>3</sup> )	Riduzione percentuale
1	$3.97 \pm 0.06 \times 10^7$	$3.59 \pm 0.10 \times 10^7$	10%
2	$4.48 \pm 0.11 \times 10^7$	$4.06 \pm 0.19 \times 10^7$	9%

### Conclusioni

I risultati delle campagne di misura condotte dai ricercatori del DICeM, sulla base della convenzione di ricerca stipulata con la società URANO S.r.L., hanno mostrato una riduzione, statisticamente significativa, dell'ordine del 10% sulle emissioni allo scarico di polveri sub-micrometriche di un motore a gasolio a seguito dell'installazione di un sistema di abbattimento (ideato da Fabrizio Bove e Alessandro Bove di proprietà della Titano S.r.L. e installato della società URANO S.r.L.) costituito da un trattamento del carburante e dall'applicazione di magneti sui condotti di aspirazione dell'aria, del combustibile del motore stesso e del liquido di raffreddamento. I ricercatori del DICeM, sulla base di analoghe ricerche condotte (e.g. *Stabile, L., Massimo, A., Rizza, V., D'Apuzzo, M., Evangelisti, A., Scungio, M., Frattolillo, A., Cortellessa, G., Buonanno, G., 2019. A novel approach to evaluate the lung cancer risk of airborne particles emitted in a city. Science of The Total Environment 656, 1032-1042*), ipotizzano che tale riduzione della concentrazione di polveri sub-micrometriche nei gas di scarico potrebbe comportare una riduzione del rischio tumore al polmone per persone eventualmente esposte.