

ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITA' DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA  
Sede di Forlì

Corso di Laurea in  
INGEGNERIA MECCANICA

Classe L-9

ELABORATO FINALE DI LAUREA

In MACCHINE

**SOLUZIONI PER I SISTEMI DI POST-TRATTAMENTO  
DEI GAS DI SCARICO IN VISTA DELLA NUOVA  
NORMATIVA ANTINQUINAMENTO EURO 7**

CANDIDATO

Edoardo Badiali

RELATORE

Enrico Corti

Anno Accademico 2021/2022

## **Indice:**

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Quadro generale sulle normative</b>	<b>3</b>
	2.1 Definizione ed evoluzione delle normative	3
	2.2 Prove per i veicoli	4
	2.3 Specie controllate dalle attuali normative	5
	2.4 Prospettiva post Euro 6	6
	2.5 Obiettivi della norma Euro 7	6
	2.6 Proposta della normativa Euro 7	13
	2.7 Condizioni operative critiche dei veicoli	15
	2.8 Problema basse temperature	19
<b>3</b>	<b>Confronto di varie configurazioni</b>	<b>21</b>
	3.1 Introduzione	21
	3.2 Sistema	22
	3.3 Analisi risultati	24
	3.3.1 Ciclo di prova CLTC – P	24
	3.3.2 Ciclo di prova WLTP	26
	3.4 Conclusioni	27
<b>4</b>	<b>Soluzione 1: bruciatore</b>	<b>29</b>
	4.1 Introduzione	29
	4.2 Procedimento	29
	4.3 Sistema	29
	4.4 Simulazioni	32
	4.5 Test con preriscaldamento	33
	4.6 Test con preriscaldamento e transitorio	36
	4.6.1 Ciclo di prova – FTP	36
	4.6.2 Ciclo di prova – WHTC	39
	4.7 Osservazioni	40
	4.8 Conclusioni	41

<b>5</b>	<b>Soluzione 2: TATH (ATEG+EGH)</b>	42
5.1	Introduzione	42
5.2	Sistema	42
5.3	Configurazione motore	45
5.4	Risultati prove	46
5.5	Confronto risultati	50
5.6	Ottimizzazione EGH	50
5.7	ATEG per veicoli pesanti	52
5.7.1	Sistema	53
5.7.2	Risultati prove	54
5.8	Conclusioni	56
5.9	ATEG per veicoli leggeri	56
5.9.1	Sistema	56
5.9.2	Test	59
5.9.3	Risultati test	60
5.10	Conclusioni	65
<b>6</b>	<b>Conclusioni finali</b>	67
<b>7</b>	<b>Bibliografia</b>	69

# 1 Introduzione

Nelle aree urbane i trasporti costituiscono la maggior fonte di emissione di inquinanti come ossidi di azoto, composti organici volatili tra cui il benzene, monossido di carbonio e particolato (come ad esempio PM10 che è responsabile di danni alla salute). Nonostante nel corso del tempo ci siano stati notevoli sviluppi e innovazioni tecnologiche, che ad esempio hanno ridotto le emissioni di NOx dell'84% e del 60% rispettivamente per i veicoli diesel e benzina in Euro 6, il trasporto su strada rimane una delle principali fonti di inquinamento atmosferico. In particolare in Europa il trasporto su strada è responsabile del 39% delle emissioni di NOx e dell'11% di PM2,5, mentre rappresenta il 26% delle emissioni di HC e il 20% delle emissioni di CO. Oltre agli inquinanti, il trasporto su strada è anche una delle principali fonti di emissioni di GHG, con un contributo di circa il 20%. [2]

Quindi per fare fronte a questo problema le normative europee imporranno un ulteriore abbassamento del limite sulle emissioni con l'arrivo della nuova norma Euro7.

Dunque questo studio ha lo scopo di analizzare varie soluzioni tecnologiche per creare innovativi sistemi di post-trattamento per abbattere le emissioni, e per riuscire a far rientrare i veicoli all'interno della nuova proposta Euro7.

## 2 Quadro generale sulle normative

### 2.1 Definizione ed evoluzione delle normative:

Le normative europee sul controllo dell'emissione dei gas di scarico indicano la quantità massima, in grammi per chilometro, di inquinanti che il motore di un veicolo può emettere durante il suo funzionamento.

La prima normativa europea che introdusse limiti per le emissioni dei veicoli a motore fu la 70/220/CEE (Regolamento ECE 15), con il ciclo di prova ECE-UDC. Questo regolamento fu modificato negli anni creando normative sempre più restrittive fino alla 91/441/CEE, nota anche come Euro 1, nel 1991, che ha visto introdurre per la prima volta il catalizzatore all'interno del sistema di post-trattamento. Da allora la sigla Euro 0 identifica i veicoli sprovvisti di catalizzatore, immatricolati prima del dicembre 1992. In seguito, la Euro 1 fu negli anni superata dalle normative seguenti fino all'attuale Euro 6, dove sono state di volta in volta abbassate le soglie per le emissioni e introdotte nuove prove per veicoli, come per esempio il controllo delle emissioni allo scarico dopo una partenza a freddo. Una lista delle normative che si sono susseguite nel tempo e delle innovazioni da esse apportate è riportata di seguito:

- Euro 1: la normativa è in vigore dal 1993 e ha di fatto reso obbligatoria la marmitta catalitica e l'iniezione elettronica nei motori a benzina, determinando la scomparsa dei carburatori.

- Euro 2: la normativa è in vigore dal 1997 e ha imposto limiti differenti tra i motori a benzina e i diesel.
- Euro 3: la normativa è in vigore dal 2001 e ha introdotto l'installazione a bordo delle autovetture di un sistema di monitoraggio delle emissioni noto con l'acronimo di OBD (On Bord Diagnostic). Con questo sistema vengono stabiliti dei nuovi limiti al di sopra dei quali deve accendersi una spia di malfunzionamento che avverta il conducente della presenza di un problema ai sistemi di post-trattamento del mezzo.
- Euro 4: la normativa è in vigore dal 2006 e ha di fatto imposto l'adozione del filtro antiparticolato (DPF) per i motori diesel.
- Euro 5: la normativa è in vigore dal 2008 e ha reso necessario ai motori Diesel di essere provvisti di un filtro antiparticolato e del catalizzatore SCR, riducendo inoltre anche i livelli di emissione permessi alle auto a benzina.
- Euro 6: obbligatoria per i veicoli immatricolati da gennaio 2016. I limiti per le emissioni di CO sono 0,5 g/km per i diesel e 1 g/km per i benzina, quelle di NOx sono 0,080 g/km per i diesel e 0,060 per i benzina, quelle di particolato (PM) 0,005 g/km per entrambe. [1]

Si nota che già dall'Euro 1, il TWC (catalizzatore trivalente) era un componente standard nei motori SI, mentre i veicoli moderni conformi ai limiti Euro 6d sono dotati anche di GPF (filtro antiparticolato benzina). Nei motori CI il sistema di post-trattamento dei gas di scarico è diventato via via più complesso, a partire da un DOC (catalizzatore di ossidazione diesel) in Euro 2, introducendo un DPF (filtro antiparticolato diesel) in Euro 5 e vari sistemi deNOx come la SCR (riduzione catalitica selettiva) e LNT (trappola per NOx) in Euro 6, fino a quando l'EGR (ricircolo dei gas di scarico) è diventata la principale tecnologia di controllo delle emissioni.

Quindi l'attuazione degli standard di emissione ha portato significative riduzioni delle emissioni dei veicoli nell'UE, ma il trasporto su strada continua a essere una delle principali fonti di inquinamento atmosferico. Per questo motivo le future norme sulle emissioni mireranno a rendere i veicoli stradali il più puliti possibile in un'ampia gamma di condizioni di guida, e per tutto il loro ciclo di vita.

## **2.2 Prove per veicoli:**

Le procedure di prova nell'attuale quadro di regolamentazione delle emissioni dell'UE per i veicoli commerciali leggeri comprendono prove di laboratorio WLTP (Worldwide Harmonised Light vehicles Test Procedure) e su strada RDE (Real Driving Emissions). L'introduzione di quest'ultimo nella fase Euro 6d mirava ad affrontare le significative discrepanze tra le emissioni di NOx ufficiali e reali, in particolare dei veicoli diesel. In

effetti i test di veicoli su strada in condizioni reali hanno portato a riduzioni significative delle emissioni reali dei veicoli. Tuttavia permangono alcune condizioni operative, associate a emissioni molto elevate, che non sono completamente coperte dall'attuale regolamento.

La prima procedura citata (WLTP) è condotta su un banco dinamometrico, in specifiche condizioni ambientali e seguendo i profili di velocità e cambio marcia WLTC. Gli attuali limiti di emissione di inquinanti si applicano ai risultati di questa procedura di prova, che viene utilizzata anche per la determinazione del consumo di carburante/energia e delle emissioni di CO<sub>2</sub>.

Invece nella seconda tipologia di test condotta su strada (RDE) le emissioni vengono misurate con un sistema portatile di misurazione delle emissioni (PEMS). In tal caso, le emissioni di NO<sub>x</sub> e PN devono rispettare i limiti NTE, che sono definiti dai limiti di emissione moltiplicati per il corrispondente fattore di conformità (CF). Quest'ultimo tiene conto delle ulteriori incertezze di misura introdotte dalle apparecchiature PEMS ed è pari a 1,43 e 1,5 rispettivamente per le emissioni di NO<sub>x</sub> e PN.

### **2.3 Specie controllate dalle attuali normative:**

Per quanto riguarda l'elenco delle specie di emissione controllate dall'attuale regolamento, questo include NO<sub>x</sub>, CO, HC, PM e PN(SPN23). In particolare per quest'ultimo vengono considerate particelle solide con una dimensione superiore a 23 nm, sebbene le particelle più piccole e le sostanze volatili (compresi i semivolatili) costituiscano una parte significativa delle emissioni totali di particelle di un veicolo. Nel caso dei motori PI, il limite di emissione di particelle si applica solo ai motori a iniezione diretta GDI, sebbene sia stato riscontrato che anche i motori ad iniezione indiretta PFI possono emetterne livelli elevati. Nel complesso grazie alle tecnologie esistenti è possibile raggiungere emissioni molto basse, significativamente inferiori agli attuali limiti applicabili, anche in condizioni difficili.

Quindi la Commissione Europea ha identificato due grandi ostacoli che impediscono all'Euro 6 di apportare un'effettiva riduzione delle emissioni:

- I valori limite adottati fino a qui sono obsoleti e non prendono in considerazione la totalità delle sostanze inquinanti che mettono a rischio la salute dell'ambiente e dell'uomo, come ad esempio i gas serra (GHG).
- Le emissioni non vengono attualmente misurate in tutte le condizioni di guida e non sono monitorate per l'intero ciclo di vita dei veicoli.

## **2.4 Prospettive post Euro 6:**

La Commissione Europea si propone quindi di elaborare un nuovo standard sulle emissioni che risolverà i problemi presentati precedentemente, e che nello specifico mirerà principalmente ai seguenti propositi:

- Migliore controllo delle emissioni di inquinanti atmosferici ampliando la gamma di condizioni di guida coperte dai test delle emissioni su strada. In particolare queste prove considereranno il funzionamento del veicolo a temperature critiche e brevi viaggi tipici degli spostamenti quotidiani.
- Semplificare la normativa in modo da rendere più agevole, veloce e meno oneroso l'adeguamento da parte di case costruttrici e consumatori. Uno dei punti forti della proposta è l'applicazione dello standard a tutte le categorie di veicoli senza più distinguere tra auto/furgoni e camion/autobus.
- Inasprire le restrizioni attuali sulle emissioni ed ampliare le tipologie di sostanze inquinanti misurate, al fine di includere anche altri agenti contaminanti che ad oggi non sono regolati: l'ossido di diazoto, l'anidride carbonica, la formaldeide e l'acetaldeide, e molte altre.
- Integrare misure di controllo e di raccolta dei dati durante tutto il ciclo di vita dei veicoli, e non solamente in fase di omologazione, attraverso sistemi OBM ("on board monitoring") installati nei mezzi.
- Garantire che le auto rimangano pulite più a lungo, ovvero tutti i veicoli dovranno rispettare le regole per un periodo più ampio rispetto ad ora.

## **2.5 Obbiettivi della norma Euro 7:**

In sostanza, per raggiungere i propositi appena elencati, l'obiettivo delle future norme europee sulle emissioni è garantire che i veicoli stradali:

1. Siano il più pulito possibile in un'ampia gamma di condizioni di guida.
2. Rimangano puliti per tutta la loro vita effettiva.
3. Emettano bassi livelli di inquinanti aggiuntivi, oltre a quelli attualmente regolamentati.

Facendo riferimenti a questi tre obiettivi sono elencati per ciascuno le problematiche che mirano a risolvere:

### **1.1) Quantità inquinanti emessi da veicoli Euro 6 in confronto alle soglie proposte da Euro 7:**

Di seguito sono proposti alcuni test, eseguiti dallo studio analizzato [3], per confrontare la quantità di sostanze inquinanti di veicoli che rispettano le attuali norme Euro 6 rispetto al valore soglia che fisserà la futura norma Euro 7.

In particolare la figura 1 seguente presenta la proposta di limitazione di NOx su strada fatta dal CLOVE nei suoi vari scenari.

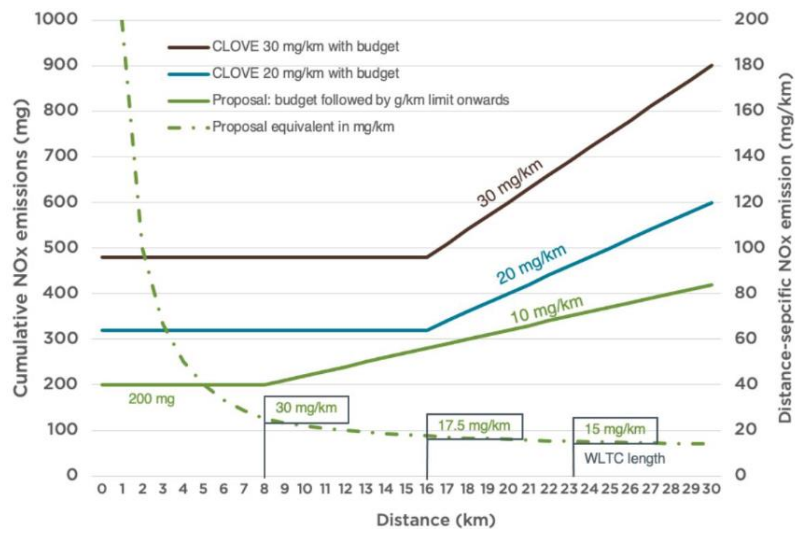


Figura 1. Proposta del limite di emissione Euro7 fatta dal CLOVE.

Tale proposta è stata confrontata con i test sulle emissioni eseguiti sulle 3 vetture mostrate nella tabella 1: una mild-hybrid a benzina, una ibrida plug-in a benzina e un veicolo diesel. Tutti i veicoli sono stati omologati secondo l'ultimo standard sulle emissioni Euro 6d-ISC-FCM.



Parameter	BMW X1 xDrive 25e	Mercedes C220d T	Audi A3 30 TFSI
			
Powertrain architecture	Plug-in Hybrid	ICE only	Mild Hybrid
Fuel type	Gasoline (E10)	Diesel (B7)	Gasoline (E10)
Transmission	DCT - 6 gears	Automatic - 9 gears	DCT - 7 gears
Powered axle(s)	Front: ICE+BSG <sup>3)</sup> Rear: EM	Rear	Front
Chassis type	SUV	Station Wagon	Hatchback
Emission standard (EU) 2018/1832	Euro 6d-ISC-FCM (Euro 6 AP)	Euro 6d-ISC-FCM (Euro 6 AP)	Euro 6d-ISC-FCM (Euro 6 AP)
ICE capacity	1499 cm <sup>3</sup>	1950 cm <sup>3</sup>	999 cm <sup>3</sup>
Cylinder configuration	In-line 3	In-line 4	In-line 3
Rated power – ICE <sup>1)</sup>	92 kW	143 kW	81 kW
Rated power – EM <sup>2)</sup>	BSG 15 kW Rear axle 70 kW	N/A	BSG 9.4 kW
Exhaust aftertreatment system configuration	Close-coupled TWC <sup>4)</sup> Underfloor GPF <sup>5)</sup>	Close-coupled DOC <sup>6)</sup> Close-coupled SCR <sup>8)</sup> /SCR <sup>7)</sup> Underfloor SCR + AOC <sup>9)</sup>	Close-couple coated GPF Underfloor TWC

Tabella 1. Schede tecniche dei veicoli testati per il confronto di sostanze inquinanti emesse rispetto ai limiti imposti dalla norma Euro7.

Abbreviazioni: 1) Motore a combustione interna; 2) Motore elettrico; 3) Generatore di avviamento a cinghia; 4) catalizzatore trivalente; 5) Filtro antiparticolato benzina; 6) Catalizzatore ossidante diesel; 7) Catalizzatore di riduzione catalitica selettiva 8) Filtro rivestito in SCR; 9) Catalizzatore di ossidazione dell'ammoniaca.

I veicoli sono stati testati su strada utilizzando un AVL MOVE PEMS per misurare le emissioni inquinanti. I test sono stati eseguiti su due percorsi diversi applicando uno stile di guida normale e dinamico, entrambi normalmente carichi e sfruttando il massimo carico utile RDE. I test con elevata dinamica sono stati al di fuori dei limiti RDE a causa del superamento dei requisiti in ambito urbano, rurale e per la maggior parte dei test anche per la guida in autostrada.

La figura 2 seguente mostra le emissioni di NOx, CO e PN di ciascuna prova confrontandole con i limiti di emissione Euro 7 proposti dal consorzio CLOVE come scenario 1 e 2, rappresentati dalle linee gialle nel grafico.

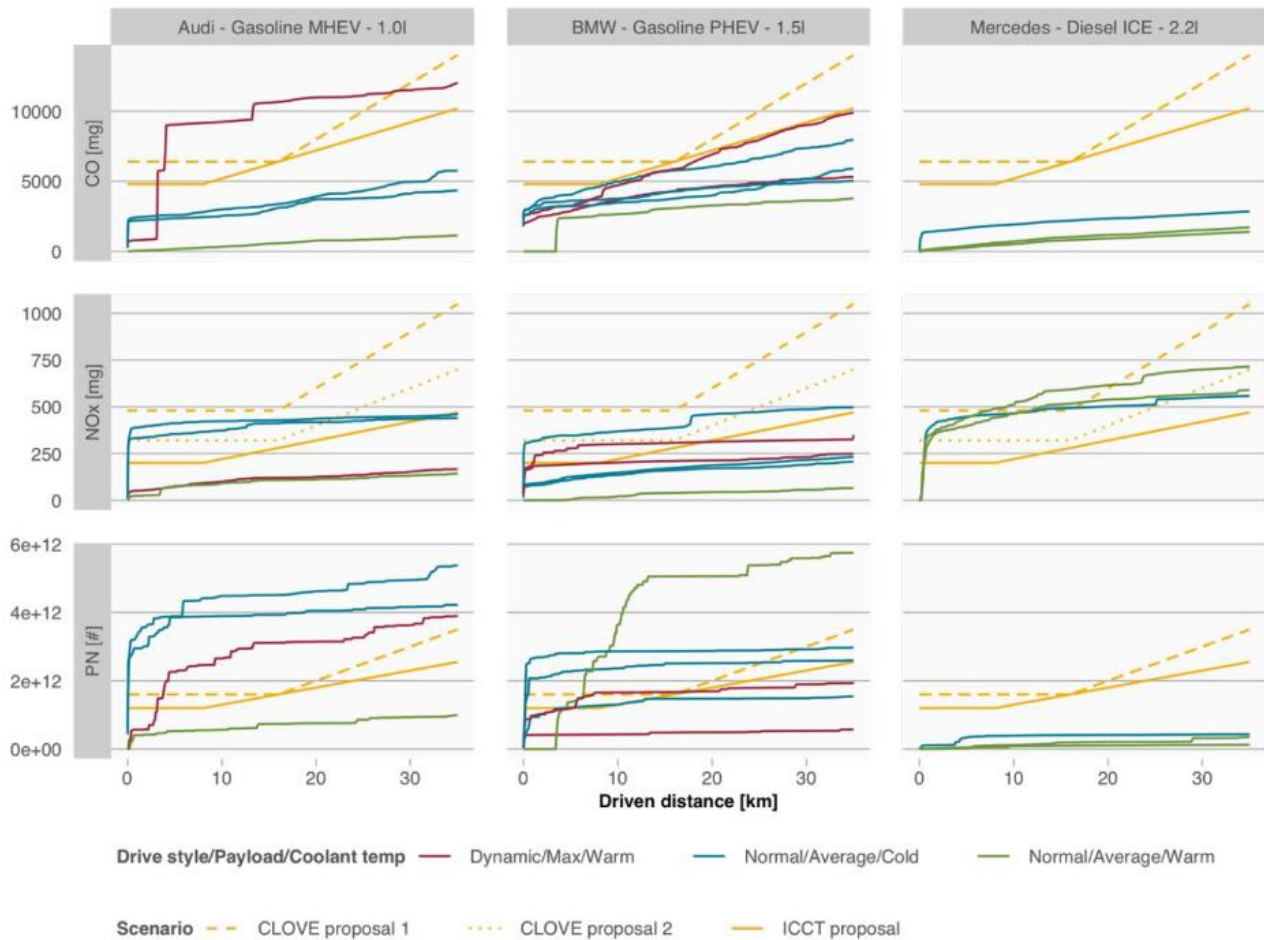


Figura 2. Emissioni cumulative misurate con PEMS durante prove su strada per i 3 differenti veicoli Euro 6d-ISC FCM. Le linee gialle presentano i due diversi scenari limite di emissione.

I grafici mostrano che i limiti di emissione CLOVE scenario 1 per CO e NOx sono rispettati o prossimi a essere raggiunti dai veicoli con tecnologia Euro6d. In particolare si nota che per la BMW questo vale anche per il test dinamico con alto carico utile, mentre l'Audi mostra per questo test emissioni di CO al di sopra del limite proposto. Infatti per tale veicolo questo ciclo è particolarmente severo a causa della cilindrata molto ridotta di solo 1 litro, e le elevate emissioni di CO coincidono probabilmente con l'arricchimento del carburante.

In più si può notare che nonostante entrambi i veicoli a benzina siano dotati di filtri antiparticolato, superano i limiti PN proposti. Ciò potrebbe essere dovuto al breve periodo di rodaggio dei veicoli.

Dunque questi risultati suggeriscono che i moderni motori diesel e benzina sono quasi idonei a soddisfare i limiti proposti CLOVE scenario 1, e quindi è ragionevole porre un obiettivo ancora più ambizioso in modo tale da avere in circolazione di veicoli ancora più puliti.

## 1.2) Influenza bassa temperatura sulle sostanze emesse:

Gli stessi 3 veicoli considerati nel punto precedente sono stati ulteriormente testati dallo stesso studio [3] anche sul banco prova per i cicli e le condizioni mostrati nella tabella 2 seguente.

Cycle Type	Ambient temp. [°C]	AC status (on/off) [°C]	Coolant at start	BMW X1	Mercedes C-class	Audi A3
WLTC	23	Off	Cold	1x CS <sup>1</sup> , 1x CI <sup>2</sup>	2	2
WLTC	23	Off	Hot	1x CS <sup>1</sup>	1	1
WLTC	-5	On, 22	Hot	1x CS <sup>1</sup>	1	1
WLTC	35 + solar radiation	On, 22	Hot	1x CS <sup>1</sup>	1	1
3x NYCC	23	On, 22	Cold	1x CS <sup>1</sup>	1	1
3x NYCC	-15	On, 22	Cold	-	-	1
CADC 150	23	On, 22	Cold	1x CS <sup>1</sup>	1	1
CADC 150	-15	On, 22	Cold	-	-	1
3x US 06	23	On, 22	Hot	1x CS <sup>1</sup>	1	1

Tabella 2. Condizioni dei test per mostrare l'influenza della temperatura.

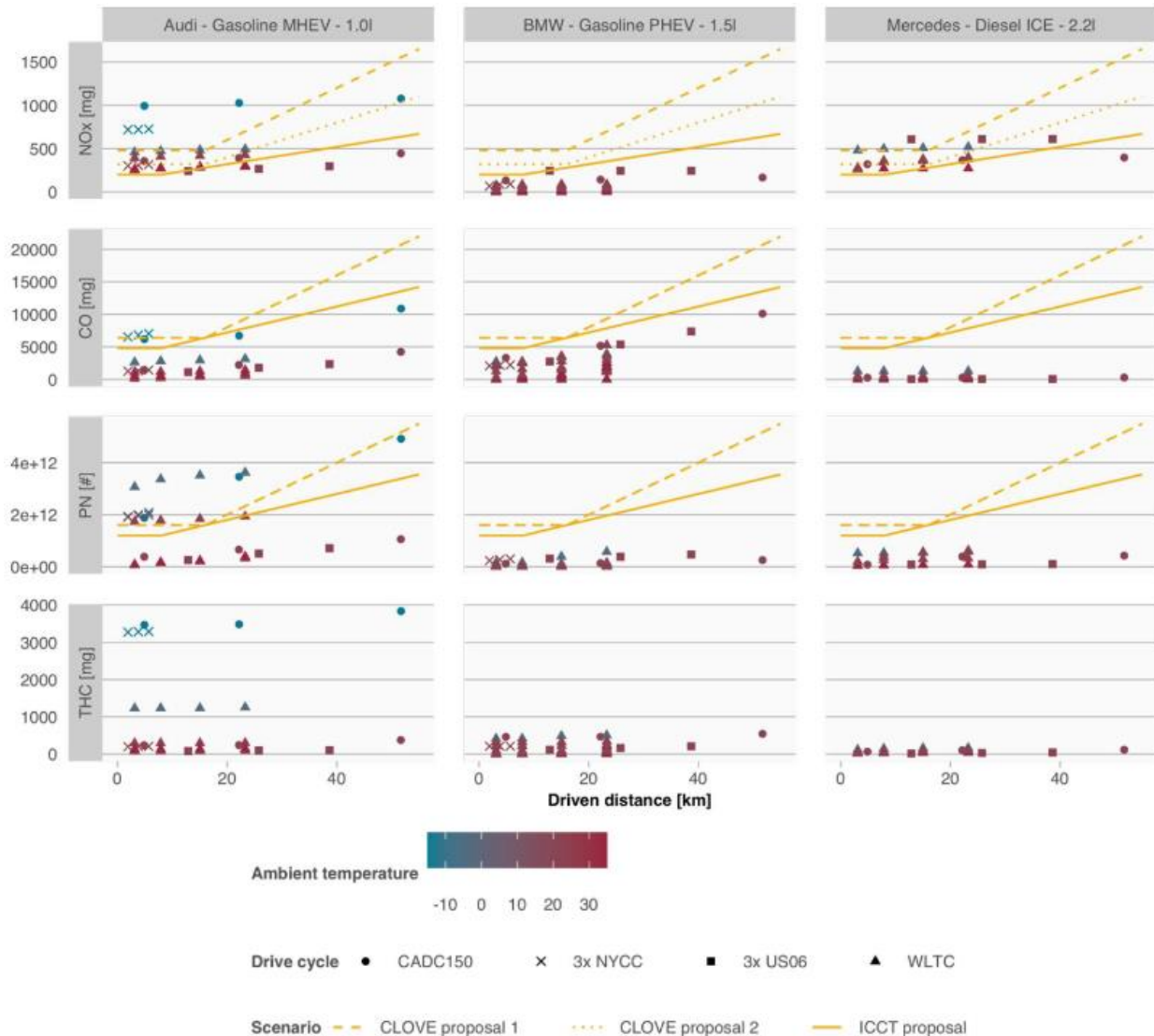


Figura 3. Risultati dei test condotti sui 3 veicoli per mostrare l'influenza della temperatura sulle emissioni.

Dai test in figura 3 si osserva che il funzionamento a basse temperature ha un impatto negativo sulle emissioni, infatti quest'ultime sono sempre superiori rispetto alle prove ad alta temperatura, portandole in alcune condizioni al di sopra del valore soglia imposto dalla normativa proposta.

Si nota anche che i risultati di CO e NOx per tutti i test in un intervallo di temperatura ambiente compreso tra -5 e 23°C rientrano o sono vicini ai limiti dello scenario 1. Inoltre anche per le due prove a -15 °C eseguite con l'Audi le emissioni di CO sono entro il limite, e le emissioni di NOx sono ampiamente entro la proposta di tolleranza di 3 volte. In più, fatta eccezione per la BMW Test WLTC a -5 °C, tutti i veicoli sono vicini al limite PN proposto per tutti i test. Quindi i risultati del banco prova, oltre a dimostrare la criticità del funzionamento alle basse temperature, confermano anche che i limiti dello scenario 1 sono vicini ai livelli di emissione che possono essere raggiunti oggi con la più recente tecnologia Euro 6d.

## **2) Problema deterioramento dei sistemi di post-trattamento:**

Per garantire che i sistemi di controllo delle emissioni mantengano le loro prestazioni con l'invecchiamento dei veicoli, è importante stabilire requisiti di durata e garanzia adeguati come parte delle norme sulle emissioni inquinanti. In particolare, gli ossidi di zolfo, gli idrocarburi incombusti e le ceneri di olio lubrificante sono noti per avere un effetto avvelenante sui catalizzatori, ovvero hanno un impatto deteriorante sulla sua durata. In più i catalizzatori tendono anche a mostrare un deterioramento con l'invecchiamento ad alte temperature di esercizio, sebbene queste aumentino anche la loro efficienza di conversione, richiedendo quindi un attento compromesso. A tal fine l'attuale standard Euro 6 richiede che siano soddisfatti i limiti di emissione di inquinanti per un certo valore di vita utile, ma si prevede che gli standard Euro 7 aumenteranno questi requisiti.

### **3.1) Gas inquinanti non attualmente considerati dalle norme:**

Saranno inclusi nella normativa Euro 7 altri gas inquinanti che sono stati considerati pericolosi dalla comunità scientifica, ovvero i gas serra GHG diversi dall'anidride carbonica, che includono quindi CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, e NH<sub>3</sub>. Infatti il Metano (CH<sub>4</sub>) e l'Ossido di diazoto (N<sub>2</sub>O) sono entrambi gas serra dannosi che si possono trovare in quantità significative nei gas di scarico degli autoveicoli.

Per quanto riguarda il CH<sub>4</sub> sono già in commercio catalizzatori ossidanti con sostanze chimiche specifiche per potenziare l'ossidazione di questa sostanza. Tuttavia, anche se ci sono stati progressi, la reattività alle basse temperature e la disattivazione da parte dell'acqua e dello zolfo devono essere ulteriormente sviluppate. I ricercatori hanno già identificato percorsi per realizzare tali miglioramenti, come substrati con strutture

macro-pori ordinate tridimensionalmente e setacci molecolari per massimizzare l'area superficiale, l'uso di nuovi ossidi metallici per supportare i metalli attivi del gruppo Pd e l'applicazione di catalizzatori avanzati a base di Pd.

Mentre la formazione di  $N_2O$  nei sistemi di controllo delle emissioni dei motori diesel è un problema ben noto. Tuttavia è possibile apportare miglioramenti alla selettività dell'SCR e del catalizzatore di scorrimento dell'ammoniaca (ASC). In un ASC all'avanguardia con architetture a doppio strato, composto da uno strato inferiore a base di Pt e uno strato superiore in zeolite, la composizione dello strato a base di Pt può essere regolata riducendone il contenuto, e quindi riducendo la selettività di  $N_2O$  e  $NO_x$ , però con un leggero impatto sulle prestazioni di ossidazione della  $NH_3$ . Questo compromesso può essere affrontato con miglioramenti nel controllo del dosaggio dell'urea riducendo lo slittamento di  $NH_3$  dall'SCR.

### 3.2) Test che mostrano la quantità di gas non normati emessi da veicoli che rispettano l'attuale norma Euro 6:

Nella figura 4 sono riportati i risultati di test sperimentali al banco prova che mirano alla valutazione della quantità emessa di  $NH_3$ ,  $N_2O$  e  $CH_4$  per le stesse tipologie di veicoli testati nella sezione precedente (1.2) e per diverse modalità di guida. [3]

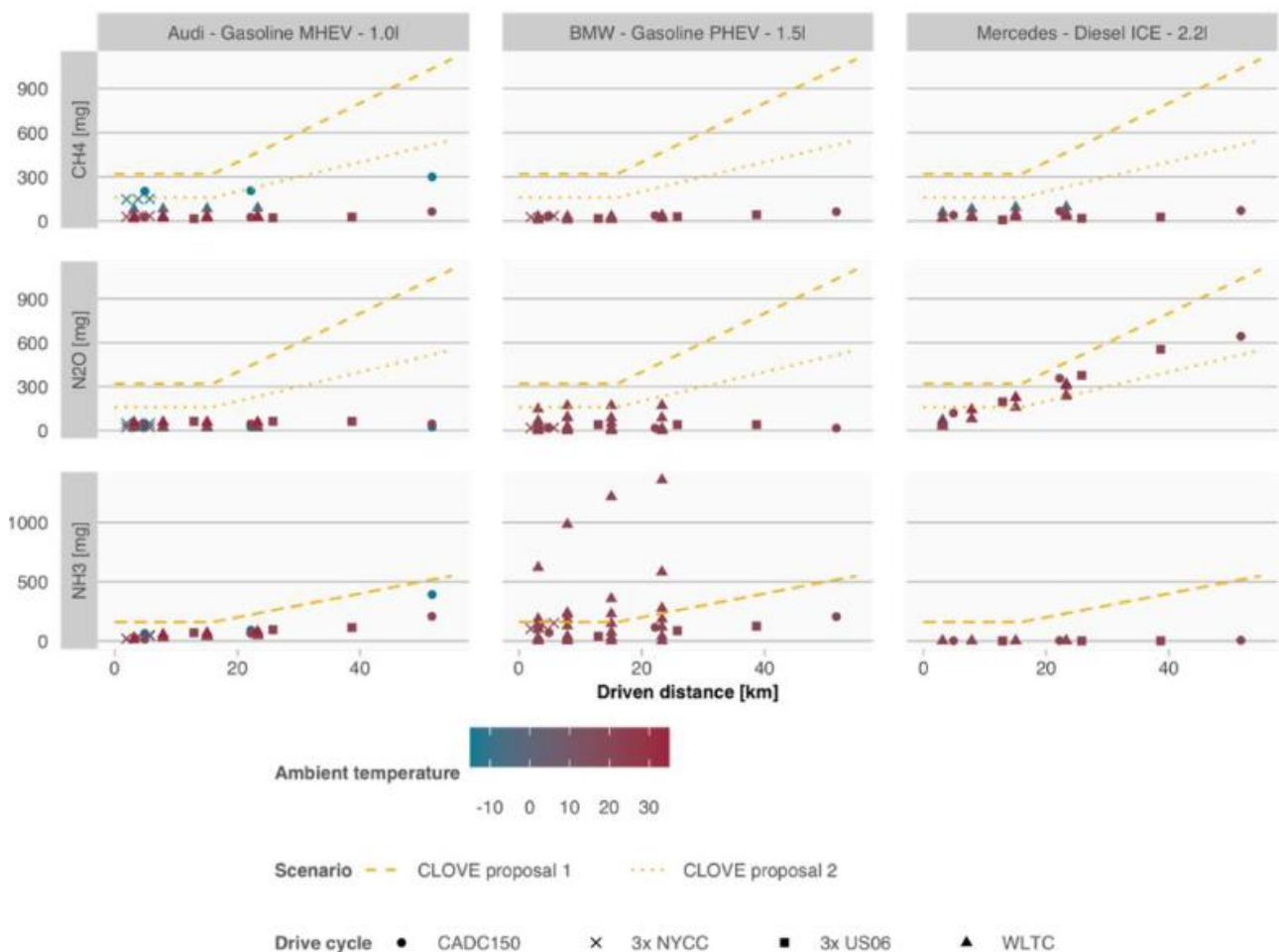


Figura 4. Risultato del test di emissione per inquinanti non regolamentati dalla norma Euro 6.



Dai risultati si nota che per le prove a -15°C le emissioni di CH<sub>4</sub> sono risultate inferiori o pari a quelle proposte dal CLOVE scenario 1. Le emissioni di N<sub>2</sub>O di tutti e tre i veicoli sono al di sotto del limite CLOVE scenario 1, e i due veicoli a benzina erano pari o inferiori alla proposta CLOVE scenario 2. In più sia l'Audi che la Mercedes hanno emesso livelli di NH<sub>3</sub> al di sotto del limite proposto, mentre la BMW ha mostrato emissioni al di sopra del limite solo per due test a 23 °C.

## **2.6 Proposta della normativa Euro 7**

Il CLOVE, che sta per “Consortium for ultra low Vehicle Emissions”, e che comprende organizzazioni dell'industria, del mondo accademico e della comunità di ricerca, è stato incaricato dalla Commissione Europea di fornire assistenza tecnica nello sviluppo della nuova proposta Euro 7. Il lavoro fatto da questa associazione per garantire gli obiettivi elencati precedentemente ha portato alle seguenti proposte:

- Applicazione delle norme Euro 7 sia ai veicoli leggeri (auto e furgoni) che a quelli pesanti (autocarri e autobus) venduti nell'UE; in più queste regole sono neutre dal punto di vista tecnologico e di carburante. Ciò significa che gli stessi limiti di emissione si applicano a tutti i veicoli della stessa categoria, indipendentemente dalla tecnologia (ad esempio motore a combustione interna convenzionale, ibrido o plug-in) o dal carburante utilizzato (benzina, diesel o altro).
- Limiti di emissione inferiori (tabella 3). In particolare sono stati presentati due scenari differenti, tra cui il secondo risulta essere più ambizioso e prevede la maggior riduzione di inquinanti allo scarico.

<b>Pollutant</b>	<b>NOx (mg/km)</b>	<b>PN (#/km)</b>	<b>PM (mg/km)</b>	<b>CO (mg/km)</b>	<b>NMOG (mg/km)</b>
<b>Euro 6</b>	80/60 (Diesel/petrol)	6x10 <sup>11</sup> inc. all >23 nm PN	4.5	500/1000 (Diesel/petrol)	68 (petrol) as non-methane hydrocarbon limit
<b>CLOVE Scenario 1</b>	30	1x10 <sup>11</sup> inc. all >10nm PN	2	400	45
<b>CLOVE Scenario 2</b>	20	1x10 <sup>11</sup> inc. all >10nm PN	2	400	25

Tabella 3. Confronto tra la normativa Euro 6 e i due scenari proposti dal CLOVE. [4]

- Regolamentazione di ulteriori inquinanti non presi in considerazioni dalla normativa Euro 6: particelle molto piccole di 10-23 nm, ammoniaca (inquinante

con un ruolo chiave nella formazione dello smog urbano), formaldeide (gas irritante e cancerogeno), protossido di azoto (gas a effetto serra) e gas organici non metanici (NMOG). Nella figura 5 sono indicati i sistemi da cui vengono originate queste sostanze.

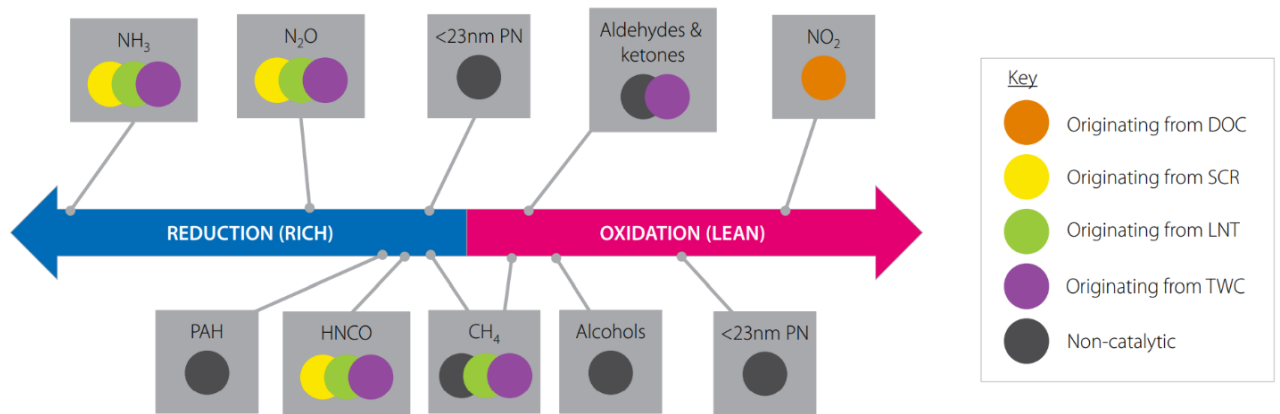


Figura 5. Origine delle nuove sostanze normate da Euro 7. [5]

- Introduzione di nuovi requisiti di prova che andranno così a modificare gli attuali test RDE (tabella 4). In particolare sono state estese le condizioni limite di guida e ambientali per le prove al fine di garantire che le emissioni rimangano basse in una gamma più ampia di condizioni. Queste comprendono ad esempio l'avviamento a freddo e il funzionamento alle basse temperature.

Parameter	Euro 6 RDE boundaries	Euro 7 normal boundaries	Euro 7 extended boundaries
Temperature (°C)	Moderate: 0 –30 °C   Extended: -7 –0 °C & 30 –35 °C	-7 to 35 °C	-10 to +45 °C
Maximum altitude (m)	Moderate: 0 –700   Extended: 700 –1300	1600	2200
Speed(km/h)	Maximum: 145 km/h with maximum 5 minutes at 160 km/h   Average urban: 15-40 km/h	Maximum: <160km/h   Average urban: as per normal use	Maximum: All EU conditions   Average urban: as per normal use
Trip distance (km)	Min. 16km in each segment (urban, rural, motorway), restrictions on trip composition	Any	Any
Driving dynamics and altitude gain	Restrictions on acceleration and positive altitude gain	Restrictions the first 1-2km	As per normal use
Towing/ aerodynamic modifications	Not allowed	Not allowed	Allowed

Tabella 4. Test RDE della norma Euro 6 ed Euro 7 a confronto. [4]

- Introduzione del monitoraggio a bordo degli inquinanti (OBM) al fine di monitorare costantemente le concentrazioni di inquinanti allo scarico, e quindi verificare il rispetto dei limiti per tutta la vita del veicolo.
- Requisiti di durabilità migliorati. Infatti attualmente le auto standard Euro 6 devono soddisfare i requisiti sulle emissioni solo fino a 100.000 chilometri o 5 anni di utilizzo, mentre l'età media delle auto in Europa è vicina ai 12 anni. Invece, con le nuove regole, i limiti Euro 7 devono essere rispettati fino a 200.000 chilometri e 10 anni di utilizzo, riflettendo meglio il normale ciclo di vita dei veicoli (compresi i veicoli di seconda mano).

## **2.7 Condizioni operative critiche:**

Il Consorzio CLOVE, oltre a fornire i valori che la nuova normativa dovrà imporre, ha fornito un grande contributo anche alla ricerca delle principali condizioni critiche di funzionamento del veicolo. I risultati dei test condotti dall'associazione hanno portato ad identificare tali condizioni che portano ad emissioni elevate elencate di seguito.



- **Effetto avviamento a freddo, in particolare nei viaggi brevi:** I grafici sottostanti in figura 6 presentano l'effetto dell'avviamento a freddo sulle emissioni di NOx, CO e SPN23.

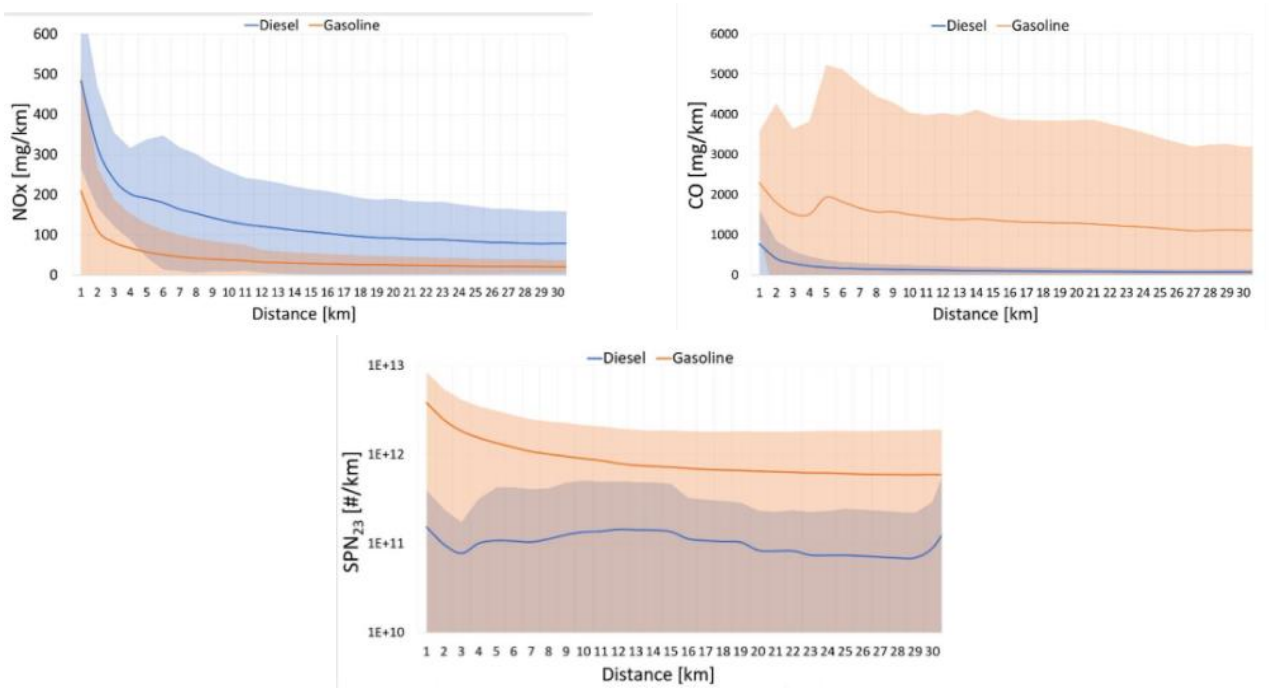


Figura 6. Emissioni medie di NOx, CO e SPN23 di tutti i veicoli diesel e benzina del database durante i primi 30 km di tutti i test su strada con partenza a freddo. [2]

Si può osservare che le emissioni di NOx sono significativamente più elevate nei primi 3-5 km del viaggio rispetto al resto del ciclo (ad esempio, le emissioni di NOx diesel a 3 km sono 2,1 volte superiori rispetto a 16 km), rivelando l'elevata impatto dello stato freddo del motore e del sistema di post-trattamento. Una tendenza simile, ma non così chiara, si osserva anche nel caso delle emissioni di CO e SPN23. Elevate emissioni di CO si osservano nei veicoli a benzina anche dopo i primi 5 km, cosa che può essere attribuita allo scarso controllo lambda in alcuni veicoli con un carico motore elevato.

- **Test a bassa temperatura ambiente:** I grafici sottostanti nella figura 7 mostrano l'effetto della bassa temperatura ambiente su NOx, CO e SPN23 messo in luce dai test condotti dallo studio analizzato [2]. In particolare tutte le prove sono state eseguite su un banco dinamometrico climatico a due livelli di temperatura,  $-7^{\circ}\text{C}$  e  $+23^{\circ}\text{C}$ .

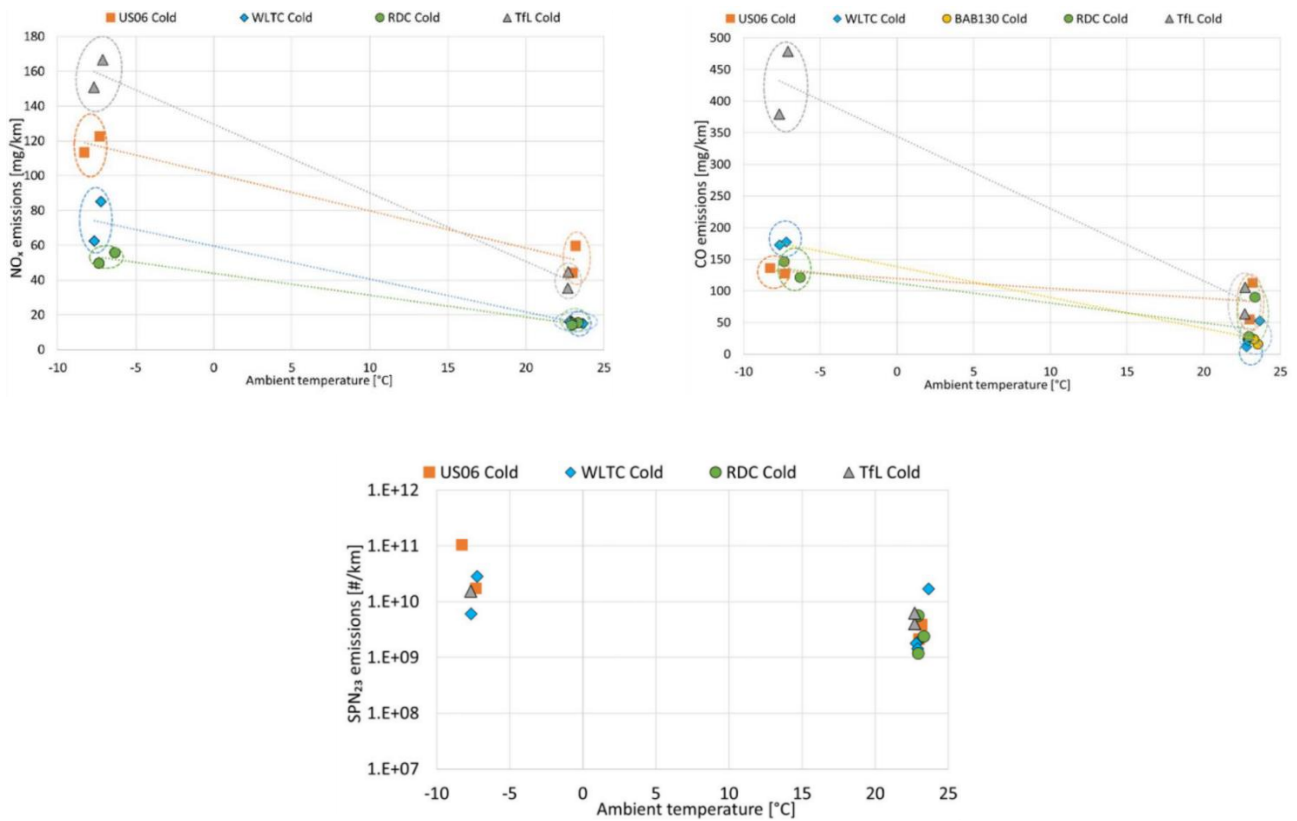


Figura 7. Emissioni di NOx, CO e SPN23 di un veicolo diesel Euro 6d testato al variare della temperatura ambiente. [2]

Dai grafici si può notare quindi che le emissioni di NOx e CO nei test a bassa temperatura sono rispettivamente fino a 4,7 e 6,4 volte superiori rispetto ai test a temperatura moderata.

- **Periodi di alta potenza del motore:** brusche accelerazioni, guida in salita, carico utile del veicolo elevato e/o traino del rimorchio e alta velocità del veicolo.

Per dimostrare questo sono riportati nella figura 8 i livelli di emissioni di NOx e CO di un veicolo a benzina Euro 6d in correlazione alla domanda di potenza normalizzata su diversi cicli di prova condotti sempre dallo stesso studio del punto precedente [2]. I grafici rilevano una chiara tendenza crescente tra emissioni e domanda di potenza, sottolineando quindi l'effetto negativo che hanno le configurazioni elencate precedentemente sulle emissioni.

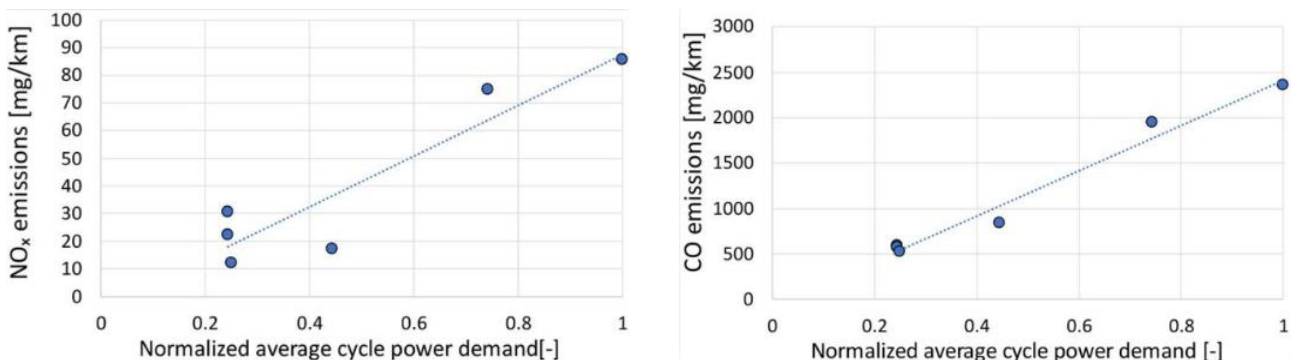


Figura 8. Correlazione tra la domanda di potenza del ciclo e le emissioni di NOx e CO per un veicolo a benzina Euro 6d.

- **Test con emissioni PN elevate:** L'analisi del CLOVE hanno rivelato che si possono osservare emissioni PN elevate principalmente durante e subito dopo la rigenerazione del DPF, quando il filtro è pulito, e da tecnologie per le quali non si applica un limite di emissione PN (vale a dire benzina PFI). La figura 9 sottostante mostra i livelli medi di emissione SPN23 di quattro veicoli diesel di ultima tecnologia con (barra arancione) e senza (barra blu) rigenerazione DPF. La barra grigia inoltre mostra le emissioni solo durante il periodo di rigenerazione del DPF. Nei test con rigenerazione del DPF si osserva un netto aumento fino a tre ordini di grandezza.

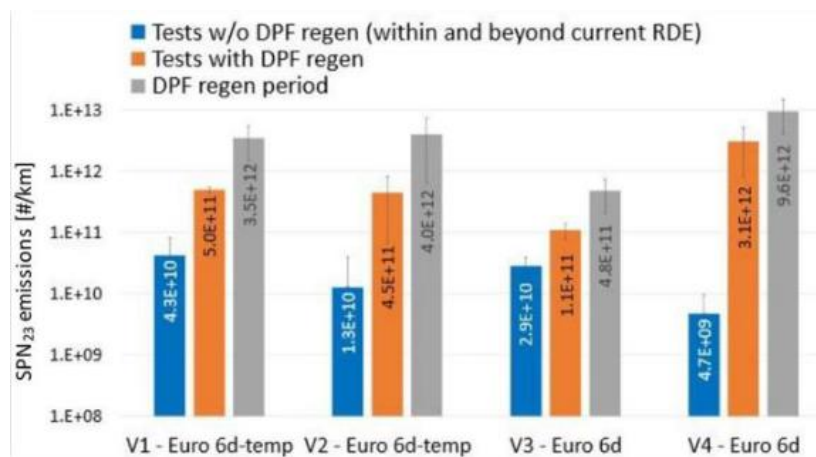


Figura 9. Emissioni SPN23 di 4 veicoli diesel in prova con e senza rigenerazione e durante il periodo di rigenerazione DPF. [2]

- **Funzionamento a basso carico:** tale condizioni principalmente si riscontrano durante la guida a basse velocità che può verificarsi in presenza di traffico cittadino (gravi situazioni di stop-and-go). Ciò è stato osservato principalmente nelle emissioni di NOx dei veicoli diesel ed è attribuito al raffreddamento del post-trattamento dei gas di scarico durante il funzionamento in queste condizioni. Oppure le elevate emissioni di NOx possono essere attribuite anche al catalizzatore che si sovraccarica di O<sub>2</sub> durante gli eventi di interruzione del carburante.

## **2.8 Problema basse temperature:**

Tra le condizioni critiche appena presentate questo studio si concentrerà su quella che produce più alte emissioni, ovvero dove i sistemi di post-trattamento non lavorano nelle condizioni ottimali. Queste condizioni si verificano con basse temperature dei gas di scarico dei motori a combustione interna, risultanti da partenze a freddo, bassi carichi o condizioni ambientali a bassa temperatura, che possono compromettere le prestazioni del sistema di post-trattamento delle vetture. In questa situazione infatti il motore funziona lontano dal suo punto di progettazione e con prestazioni molto basse del catalizzatore, poiché non ha raggiunto la sua temperatura ottimale di funzionamento. Questo effetto può comportare oltre il 20% delle emissioni totali di ossidi di azoto (NOx), idrocarburi (HC) e monossido di carbonio (CO) durante un ciclo di guida rispetto ai valori che si avrebbero per cicli ad alte temperature. [6]

Come mostrato nella figura 10 sottostante, una conversione efficiente nel TWC richiede temperature dei gas di scarico elevate per riscaldare il catalizzatore, in particolare per la conversione di CO richiede un valore di 280°C. Invece considerando il sistema SCR è necessaria una temperatura pari a 200/250°C per avere una riduzione ottimale degli NOx. Sebbene tali temperature possano essere raggiunte con operazioni ad alto carico (sono state misurate temperature dei gas di scarico all'uscita del catalizzatore fino a 700 °C in un motore stechiometrico SI), si ottengono valori inferiori all'avvio del motore. Questo è il cosiddetto effetto di avviamento a freddo.

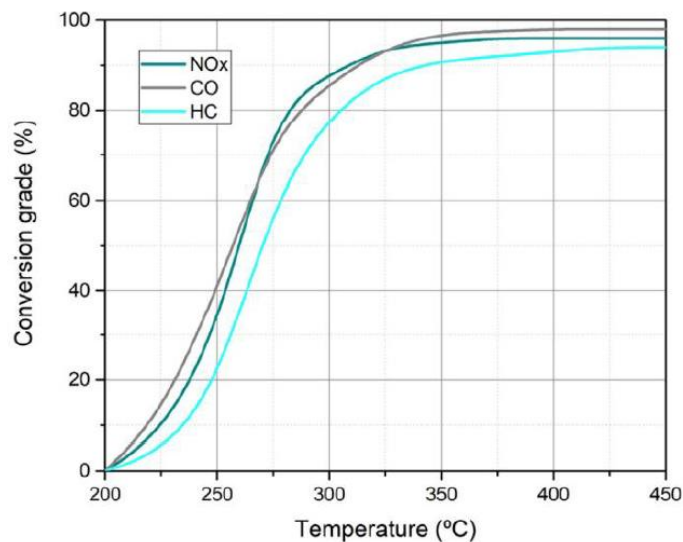


Figura 10. Conversione di CO, NOx e HC in funzione della temperatura catalizzatore TWC.

Il regolamento della Commissione UE 2016/427 definisce l'avviamento a freddo, nel contesto della procedura di prova delle emissioni di guida reale (RDE), come i primi 5 minuti dopo l'avvio iniziale del motore a combustione. In questa situazione il motore gira lontano dal punto di progetto, con basse temperature del liquido di raffreddamento

e del blocco motore che portano a una combustione incompleta e prestazioni molto basse del catalizzatore poiché non ha raggiunto la sua temperatura ottimale di funzionamento, ovvero la temperatura di attivazione del catalizzatore.

Quindi l'avviamento a freddo può contribuire in modo sostanziale alle emissioni complessive del veicolo, in particolare nelle aree urbane, dove i viaggi sono brevi, le partenze a freddo frequenti e i problemi di qualità dell'aria più gravi. Pertanto questo problema è di grande preoccupazione nei veicoli a combustione e si stanno sviluppando varie strategie per risolverlo. Queste possono essere suddivise in due categorie:

1. Controllo del motore per aumentare le temperature dei gas di scarico in uscita da esso il più velocemente possibile. Per fare ciò si adottano vari metodi come ritardare la fase dell'accensione della combustione, bypassare il turbocompressore per creare una miscela ricca di carburante, alternare condizione ricche e magre di carburante oppure iniettare più carburante nelle condizioni di partenza dei veicoli. Tuttavia queste tecniche appena presentate hanno la conseguenza di aumentare fortemente il consumo di carburante e quindi di ridurre l'efficienza del veicolo.
2. Controllo del catalizzatore per abbassare la temperatura necessaria per la conversione, sviluppando materiali catalitici alternativi, e per ridurre il tempo di raggiungimento delle temperature ottimali di funzionamento dei sistemi di post-trattamento. In questa direzione si considerano strategie come aumentare il trasferimento di calore all'interno del catalizzatore, utilizzando densità delle celle più elevate e design delle pareti più sottili, spostare l'SCR il più vicino possibile al blocco motore, utilizzare catalizzatore preriscaldati elettricamente (EHC) o attraverso un bruciatore.

Dunque a fronte di questo principale problema, che si vuole superare attraverso l'introduzione della normativa Euro 7, nel presente elaborato verranno presentate diverse strategie per risolverlo.

## 3 Confronto di varie configurazioni

### 3.1 Introduzione:

Questo primo capitolo mira a valutare diversi layout di post-trattamento per riuscire a trovare la migliore configurazione in grado di soddisfare i nuovi limiti richiesti dalla norma Euro 7 proposti dal CLOVE.

Innanzitutto occorre partire descrivendo i componenti degli attuali sistemi di post-trattamento per rispettare le normative Euro 6:

- SCR: catalizzatore dove avviene la reazione di riduzione di NO<sub>x</sub> facendolo reagire questo inquinante con un agente riducente (ammoniaca o una soluzione composta da H<sub>2</sub>O e Urea chiamata AdBlue). La composizione chimica dei sistemi SCR comunemente usati sono le zeoliti a base di rame oppure a base di vanadio.
- EGR: ricircolo dei gas di scarico ad alta pressione raffreddati utilizzato per ridurre le emissioni di NO<sub>x</sub> con il sistema SCR. Infatti grazie a questo ricircolo si ottiene un'efficace conversione degli NO<sub>x</sub> visto che si abbassa la temperatura massima di combustione, da cui dipende la dissociazione della molecola, e si riduce la concentrazione di ossigeno nella miscela reagente, favorendo quindi un ambiente riducente.
- AOC: catalizzatore per l'ossidazione di ammoniaca.
- DPF: filtro anti particolato diesel per la riduzione del PM. Questo avviene grazie alla sua struttura composta da una serie di canali porosi aperti all'ingresso e chiusi all'uscita. Infatti in questo modo i gas di scarico nei canali chiusi dovranno uscire attraversando le pareti che funzioneranno da filtro per il particolato.
- DOC: catalizzatore di ossidazione diesel, ovvero il sistema dove avviene l'ossidazione dei prodotti di combustione incompleti CO e HC.

Quindi partendo da un layout di post-trattamento compatibile con Euro 6d, caratterizzato da un DOC (Diesel Oxidation Catalyst), SCRoF (Selective Catalytic Reduction on Filter), SCR (Selective Catalytic Reduction) e AOC (Ammonia Oxidation Catalyst) a pavimento, sono stati valutati diversi layout di post-trattamento per riuscire a rientrare nei limiti di emissione.

### 3.2 Sistema

Nello studio [7] preso in considerazione le misure adottate per migliorare le prestazioni dei sistemi di post-trattamento comprendono:

1. Strategie di riscaldamento elettrificato del sistema di post-trattamento.
2. Catalizzatori di stoccaggio di NOx (NSC) attivi o passivi.
3. Multi punto iniezione del liquido AdBlue (DEF).

In particolare il primo punto e il secondo hanno lo scopo di aumentare l'efficienza del post-trattamento all'avviamento a freddo, mentre il terzo si applica alle condizioni di alta velocità e carico.

In più è necessario precisare che l'inclusione di un elemento riscaldante elettrificato implica un attento bilancio energetico sia dal lato propulsore che dal lato del veicolo, che può essere critico soprattutto per i dispositivi a 12 V, che portano ad un aumento del consumo di carburante.

Quindi le diverse architetture proposte sono state generate partendo dal sistema di post-trattamento base dei veicoli Euro 6 variando:

- La chimica del primo componente della linea (DOC e NSC)
- Il volume del catalizzatore SCR monoblocco (base e +30%)
- La posizione di un elemento riscaldato elettricamente (prima o dopo il primo dispositivo della linea)
- I livelli di potenza dell'elemento riscaldato elettricamente (12V e 48V)



Figura 11. Linea base sistema post-trattamento secondo le norme Euro 6d.

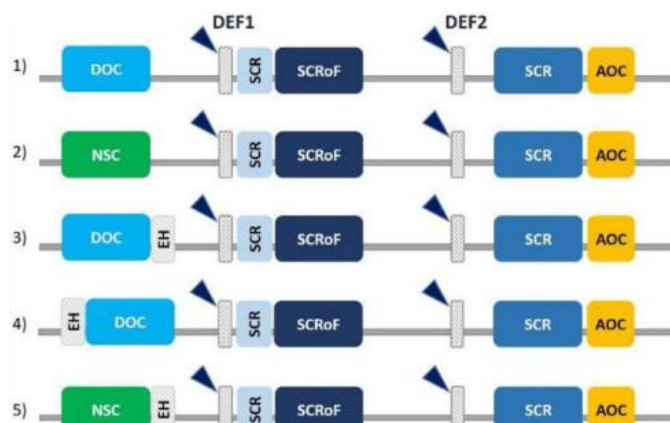


Figura 12. Architetture di post-trattamento simulate.



Come si nota dalle figure 11 e 12, le architetture analizzate differiscono solo per il primo catalizzatore. Nell'opzione 1 viene considerato un DOC il quale è accoppiato con un elemento riscaldante (EH) a valle o a monte nell'opzione 3 e 4. L'opzione 2 e 5 sono rispettivamente simili alla 1 e alla 3, ma in questo caso viene utilizzato un NSC (“NOx storage catalys”) per l’abbattimento di NOx. Tutte le configurazioni condividono la restante porzione della linea di scarico che è costituita dalla serie di un primo catalizzatore SCR monoblocco, un SCRoF monoblocco, un secondo SCR e un AOC entrambi in posizione sottopavimento. È stata considerata una configurazione a doppia iniezione di DEF con gli iniettori posti prima dei catalizzatori SCR.

In particolare il riscaldatore elettrico (EH), la cui struttura è mostrata nella figura 13, è un elemento riscaldante resistivo costituito da due sottili lamine metalliche che formano una struttura a nido d'ape con canali che hanno una forma sinusoidale. L'energia elettrica dunque viene convertita in calore grazie all'effetto Joule, e questo calore viene quindi trasferito principalmente per convezione al gas che scorre attraverso il sistema. Il riscaldatore elettrico è stato gestito con una strategia ON/OFF basata sulla temperatura media SCR+SCRoF:

- Riscaldatore attivo fino al raggiungimento della temperatura di 230°C.
- Riattivazione del riscaldatore se la temperatura scende sotto i 200°C.

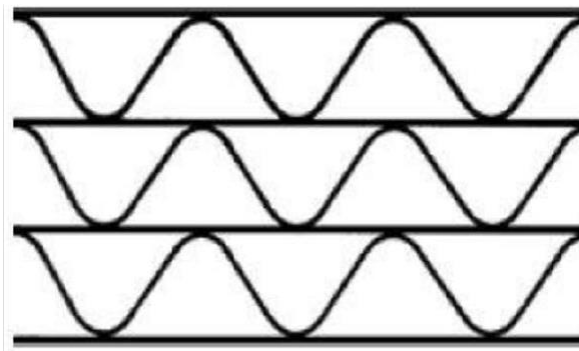


Figura 13. Forma delle celle sinusoidali in substrato metallico dell'EH.

Quindi per ogni ciclo di simulazione è stata misurata la traccia di uscita del motore (temperatura, flusso massico di scarico, NOx, THC, CO, CO2) al banco prova ed è stato simulato il comportamento termico e chimico del post-trattamento.

	Combustion Strategy	1 <sup>st</sup> catalyst	ccSCR Volume	Heater voltage & power [V] & [W]	Heater position w.r.t. 1 <sup>st</sup> catalyst
Baseline	S1	DOC	baseline	-	-
Case 1	S1	NSC	baseline	-	-
Case 2	S1	NSC	baseline	12V - 1700W	After
Case 3	S2	NSC	baseline	12V - 1700W	After
Case 4	S2	DOC	baseline	12V - 1700W	After
Case 5	S2	DOC	baseline	12V - 1700W	Before
Case 6	S2	NSC	+30%	12V - 1700W	After
Case 7	S2	DOC	+30%	48V - 4000W	After

Tabella 5. Elenco configurazioni testate.



### **3.3 Analisi risultati:**

I risultati della simulazione sono suddivisi in due sezioni in base al profilo di guida utilizzato come input:

1. Ciclo di prova leggero cinese (CLTC-P), considerato rappresentativo del profilo di guida urbana pesante anche per l'Europa.
2. Ciclo omologazione WLTP (Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure)

I risultati sono normalizzati rispetto ai risultati di emissione ottenuti sul ciclo WLTP con l'architettura di post-trattamento Euro 6d. I valori accettabili nello scenario post Euro 6 sono stati definiti considerando le proposte CLOVE illustrate precedentemente, in particolare per quanto riguarda gli NOx si considerano accettabili risultati inferiori al 50% rispetto alla linea di base, invece per i gas organici non metanici (NMOG) si considera un aumento rispetto alla linea di base fino a un fattore di 2,5.

#### **3.3.1 Ciclo di prova CLTC-P:**

Come presentato nei paragrafi precedenti, il principale problema del sistema di post-trattamento base odierno basato sul DOC è che le temperature che consentono l'iniezione di DEF, e quindi consentendo un efficace funzionamento dell'SCR, non vengono raggiunte a carico/velocità del motore molto basso e alla modalità di funzionamento al minimo (o a motore spento) frequenti e prolungati, e questo si conclude con un'elevata emissione di inquinanti. Quindi il procedimento adottato dallo studio [7] è stato il seguente.

1. Al fine di migliorare l'efficienza complessiva di conversione degli NOx, il primo passo (caso 1 nella tabella 6) è stato quello di utilizzare come primo catalizzatore un elemento che permettesse di immagazzinare NOx a bassa temperatura (NSC), dove l'efficienza SCR è bassa, pur mantenendo la stessa strategia di riscaldamento. Come si nota dalla tabella 6 anche se gli NOx sono stati ridotti di quasi il 30%, non è stato sufficiente per avvicinarsi al limite ipotizzato, richiedendo un ulteriore miglioramento della conversione in una fase precedente del ciclo.
2. A questo punto la necessità di aumentare ulteriormente l'efficienza di conversione degli NOx è stata affrontata introducendo un elemento riscaldato elettricamente a 12 V (EH). Come primo tentativo, questo elemento è stato posizionato all'uscita dell'NSC mantenendo la strategia S1 standard del motore spento con un riscaldamento all'interno del cilindro (caso 2). In questo caso la logica era quella di riscaldare i gas di scarico il più vicino possibile all'SCR per costruire un sistema che potesse funzionare in maniera ottimale con NSC alle temperature più basse e raggiungere la finestra di efficienza ottimale SCR

- all'inizio del ciclo. Il risultato è stato un miglioramento rispetto all'impianto non elettrificato, ma il limite imposto era ancora lontano dall'essere raggiunto.
3. Poiché si è notato che la maggior parte degli NOx proveniva dalla strategia di riscaldamento interna al cilindro, che non era efficace nel riscaldare l'SCR, l'approccio è stato quindi spostato verso l'abbassamento degli NOx (S2) e la gestione del riscaldamento dell'SCR con il solo elemento elettrico (caso3). Questo approccio è stato molto efficace dal punto di vista degli NOx, ma non è ancora conforme agli scenari proposti da CLOVE. È stato anche misurato un aumento di NMOG poiché l'eliminazione di THC e CO è posticipato, e questo si traduce in un deterioramento dell'efficienza di conversione degli idrocarburi, leggermente al di sopra del limite di emissione.
  4. Al fine di massimizzare il potenziale di questo layout di post-trattamento e strategia di combustione, è stato testato un aumento di volume dell'SCR monoaccoppiato del 30% (caso 6). È risultato efficace nell'abbassare ulteriormente gli NOx senza deterioramento su NMOG (che rimane ancora leggermente al di sopra del limite di emissione). Grazie a questo aumento di volume è stato finalmente possibile soddisfare la conformità entro i limiti di emissione di NOx ipotizzati.
  5. Inoltre le simulazioni sono state eseguite anche con il sistema basato su DOC con riscaldatore alimentato a 12V. Sono state testate due configurazioni: elemento elettrico in ingresso e in uscita del DOC. Con il sistema basato su NSC, un riscaldatore all'ingresso dell'adsorbitore di NOx non è stato simulato perché un aumento più rapido della temperatura dell'NSC deteriora la sua capacità di accumulo di NOx durante il ciclo, riducendo così le prestazioni di conversione degli NOx nel complesso del sistema. In un sistema basato su DOC, poiché non esiste alcuna capacità di accumulo di NOx, si potrebbe prendere in considerazione la soluzione con un riscaldatore all'ingresso del DOC per aumentare ulteriormente la capacità di conversione di HC e CO e sfruttare anche un primo catalizzatore più caldo come dissipatore di calore durante motore spento o funzionamento a basso carico/bassa velocità. Nonostante il riscaldatore a 12 V, i risultati dei casi 4 e 5 mostrano che l'architettura basata su DOC non poteva rispettare il limite di NOx fissato. Inoltre il caso 4 mostra che le prestazioni di conversione di NMOG sono paragonabili alla linea di base, mentre la configurazione con riscaldatore all'ingresso DOC (caso 5) ha prestazioni leggermente migliori.
  6. Infine è stato testato un layout basato su DOC con riscaldatore a 48 V (Caso 7), senza alcuna strategia di riscaldamento all'interno del cilindro, mostrando

prestazioni simili in termini di riduzione di NOx al caso migliore con NSC con riscaldatore a 12 V e nessuna penalità su NMOG.

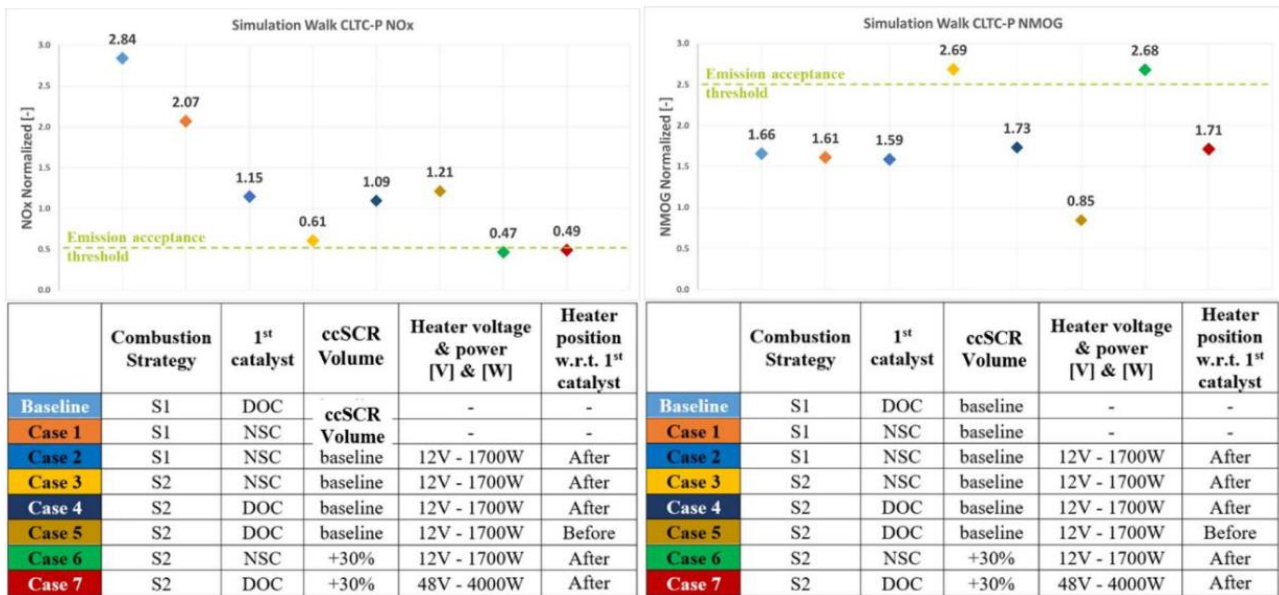


Tabella 6. Risultati CLTC-P per le varie configurazioni.

### 3.3.2 Ciclo di prova WLTP:

Dalle tabelle si nota che le emissioni di NOx del sistema base su WLTP sono inferiori rispetto alle prestazioni di base su CLTC-P di un fattore 2,8; questo conferma che la sfida più grande della regolamentazione post Euro 6 proverrà da condizioni che attualmente non sono regolamentate. In particolare all'avviamento a freddo, il ciclo di omologazione WLTP ha i punti di funzionamento del motore spostati verso un carico maggiore rispetto al CLTC-P; inoltre il regime del motore ha una porzione di minimo/motore spento meno frequente e più breve rispetto al ciclo urbano pesante. In questo caso, la strategia di riscaldamento della combustione interna al cilindro è molto efficace nel riscaldare il sistema per migliorare la funzionalità di abbattimento di NOx e NMOG.

La variazione di NOx nelle varie configurazioni ha una tendenza simile a quella vista nei test CLTC-P.

Quindi il sistema basato su NSC mostra un vantaggio incrementale sulle prestazioni di conversione degli NOx derivanti dall'elettrificazione, strategia di combustione e aumento del volume dell'SCR in monoblocco. Si può notare che l'ultimo non è strettamente necessario ma garantisce un sistema più robusto rispetto ai limiti di emissione ipotizzati.

Considerando invece un sistema di post-trattamento a base di DOC è obbligatoria l'elettrificazione a 48V per rispettare i limiti considerati.

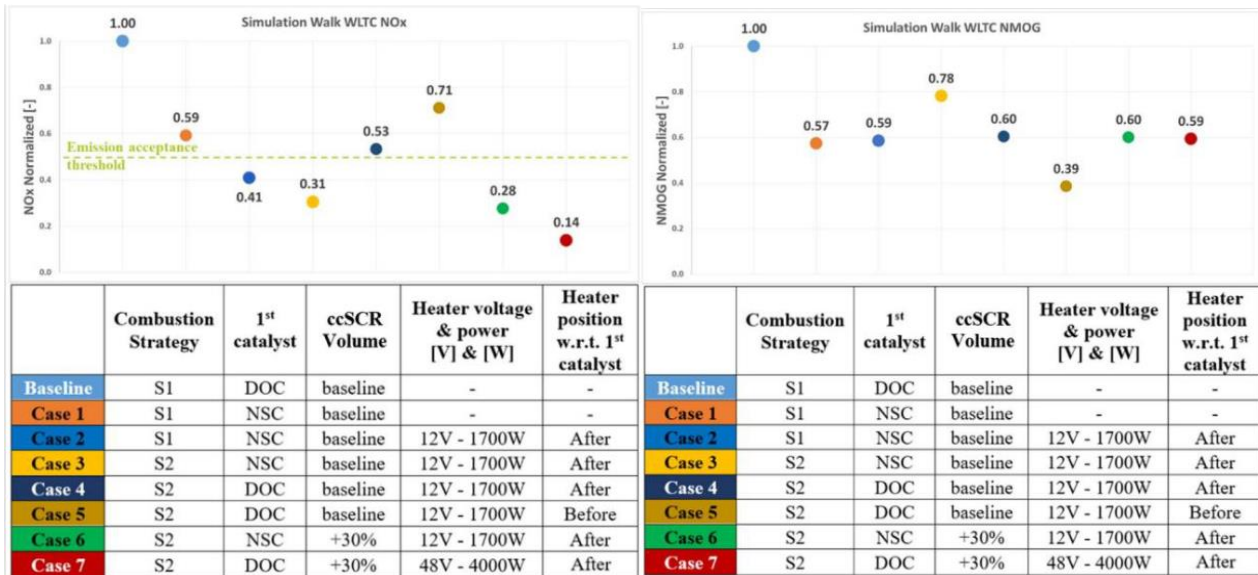


Tabella 7. Risultati CLTC-P per le varie configurazioni.

### 3.4 Conclusioni:

Analizzando i dati ottenuti dalle varie prove si possono trarre i seguenti risultati:

- Senza un elemento riscaldato elettricamente non è possibile raggiungere la riduzione delle emissioni ipotizzata.
- L'elemento riscaldato elettricamente nella versione ad alta potenza posto a valle del primo catalizzatore è sufficiente a garantire la necessaria riduzione delle emissioni per tutti i cicli di emissione. Tuttavia ciò richiede un'architettura del veicolo a 48 V che non è sempre disponibile.
- L'aggiunta del solo NSC non è sufficiente a garantire la necessaria riduzione delle emissioni per tutti i cicli di emissione.
- Nella versione a bassa potenza, l'elemento riscaldato elettricamente è sempre in grado di migliorare l'efficienza di conversione degli NOx. Inoltre nel caso con il DOC è anche molto efficace nel potenziarne la conversione. Tuttavia, per raggiungere i livelli di riduzione delle emissioni richiesti, deve essere utilizzato in combinazione con un NSC e posizionato dopo di esso.
- Quando viene utilizzato un NSC come primo catalizzatore, la strategia di combustione senza riscaldamento garantisce i migliori risultati di emissione perché riduce le emissioni di NOx fuori dal motore e la velocità spaziale durante la prima parte del ciclo. In questo modo si fornisce più tempo al riscaldatore per riscaldarsi sull'SCR monoblocco, conferendo una maggiore efficienza di stoccaggio dell'NSC e una migliore corrispondenza delle finestre di temperatura di esercizio dell'NSC-SCR.

- Nell'architettura basata su NSC con il riscaldatore elettrico posto dopo il primo catalizzatore, si osserva un deterioramento di NMOG. Comunque i valori registrati sono leggermente al di sopra del limite ma potrebbero essere migliorati mediante una raffinata calibrazione della combustione e quindi considerati non critici.
- L'aumento del volume SCR è vantaggioso per gli NOx e per le prestazioni di conversione, sebbene il suo contributo sia marginale e possa essere considerato solo per la robustezza delle emissioni.

## **4 Soluzione 1: bruciatore**

### **4.1 Introduzione:**

La seconda soluzione proposta per riuscire a soddisfare i limiti previsti dalla futura normativa Euro 7 prevede l'inserimento di un bruciatore nel sistema di post-trattamento. Dunque il seguente capitolo vuole dimostrare l'efficacia di questa soluzione per il preriscaldamento del sistema di post-trattamento al fine di soddisfare il nuovo limite sulle emissioni di NO<sub>x</sub>, risolvendo quindi il problema di avviamento a freddo. Infatti il preriscaldamento serve a preparare il catalizzatore SCR, facendolo arrivare alla temperatura ottimale di funzionamento, in modo che possa iniziare a convertire NO<sub>x</sub> quasi immediatamente dopo l'avvio del motore.

### **4.2 Procedimento:**

Lo studio analizzato [8] ha considerato un bruciatore installato tra un motore da 12,4 litri e un sistema di post-trattamento DOC/DPF/SCR in linea di dimensioni adeguate. Inizialmente, è stata esaminata un'ampia gamma di condizioni di funzionamento del bruciatore e della pompa dell'aria per determinare la portata massima di alimentazione e la corrispondente portata d'aria necessaria per completare la combustione e per convogliare il calore risultante a valle ai componenti di post-trattamento. Da questa indagine è emersa una condizione operativa realistica ottimale per il preriscaldamento. Questa condizione è stata quindi applicata per vari periodi di tempo prima dell'avvio del motore al fine di eseguire vari cicli normativi, inclusi FTP e WHTC, con avviamento a freddo e a caldo. Quindi è stato aggiunto al sistema un bruciatore di scarico in modo da fornire una gestione termica sufficiente anche per le condizioni di avviamento a freddo più difficili. Inoltre è stato proposto di utilizzare il bruciatore per riscaldare il sistema di post-trattamento prima dell'avvio del motore, processo che corrisponde al preriscaldamento.

### **4.3 Sistema:**

Il motore di prova utilizzato in questo progetto [8] era un Navistar da 12.4 litri (2016) dotato di un sistema EGR Convenzionale. In più il sistema di prova include un sistema di post-trattamento per impieghi gravosi con tecnologie di catalizzatore risalenti al 2017 e un prototipo di bruciatore di scarico. Lo schema generale dell'impianto sono illustrati schematicamente nella figura 14 sottostante.

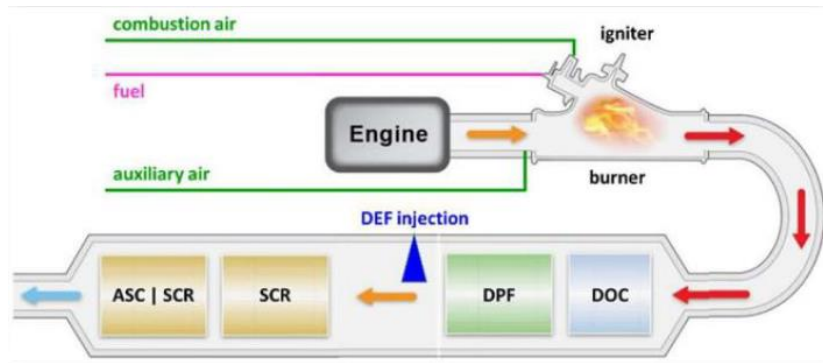


Figura 14. Schema del sistema preso in considerazione nello studio.

Per supportare il funzionamento del bruciatore nel sistema sono incluse anche le pompe ad aria; una forniva aria comburente al bruciatore e l'altro forniva aria ausiliaria che si è rivelata utile per il preriscaldamento. Il sistema di post-trattamento comprendeva un catalizzatore ossidante diesel (DOC), un filtro antiparticolato diesel (DPF) e un catalizzatore SCR in zeolite di rame, tutti disposti in un'unica configurazione a forma di tubo (architettura 'in-line'). I dettagli sui substrati sono forniti nella tabella 8 di seguito.

Substrate	Diameter	Length	Cell Density/ Wall Thickness
	inches (mm)	inches (mm)	cpsi/mil
DOC	13 (330)	5 (127)	400/4.5
DPF	13 (330)	7 (178)	200/8
SCR	13 (330)	13 (330)	600/3

Tabella 8. Dettagli del substrato del sistema di post-trattamento.

Un'immagine del sistema installato nella cella di prova del motore è presentata nella figura 15 sottostante.



Figura 15. Sistema di post-trattamento utilizzato nel test e bruciatore di scarico installato nella cella di prova.

Per consentire al sistema prototipo del bruciatore di essere "plug and-play", è stato creato un flusso di carburante pressurizzato con una pompa Fluid-o Tech MG304; questo è stato utilizzato per simulare una pressione di alimentazione dell'ordine di 4-10 bar prevista dal circuito del carburante a bassa pressione di un sistema di alimentazione diesel common rail. Per fornire l'aria comburente richiesta dal bruciatore

è stato utilizzato un ventilatore Eaton TVS Roots con una cilindrata di 180 cc, alimentato da un motore elettrico da 24 V standard. L'aria per la soffiante è stata prelevata dall'ambiente e fatta passare attraverso un filtro dell'aria (dimensionato per simulare la pressione e la pulizia sul lato pulito della scatola dell'aria del veicolo in un'applicazione di produzione) prima di entrare nella soffiante; la portata d'aria è stata misurata direttamente con un anemometro a filo caldo sul lato di aspirazione della soffiante.

Un secondo ventilatore TVS Roots dello stesso design di quello sopra è stato utilizzato per fornire "aria ausiliaria" quando il bruciatore è stato utilizzato per il preriscaldamento. Per comodità, tale soffiante è stata collegata ad un secondo corpo bruciatore installato immediatamente a monte di quello utilizzato per la produzione di calore. In questa configurazione il flusso d'aria massimo da questo secondo soffiante è risultato essere di 18 g/s. Per alcune prove il flusso di aria ausiliaria è stato ulteriormente incrementato attivando il sistema di aria comburente (CAS) per il motore; questo flusso d'aria aggiuntivo di 5 g/s è passato attraverso il motore prima di entrare nel sistema di scarico. È vantaggioso far funzionare il bruciatore in condizioni di combustione ricca quando anche il motore è in funzione poiché viene utilizzata meno energia del combustibile per riscaldare l'aria di combustione del bruciatore. Tuttavia, per il preriscaldamento è necessario far funzionare il bruciatore in condizioni magre per ridurre al minimo le emissioni.

Dunque per soddisfare entrambi questi requisiti sono state utilizzate due diverse tarature del bruciatore. Per il preriscaldamento, nella "Calibrazione 1" sono stati selezionati un tasso di alimentazione fisso di 0,3 g/s e il rapporto aria-combustibile ( $\lambda$ ) di 0,8, la pompa dell'aria che alimenta la combustione ha risposto di conseguenza. Per il funzionamento del bruciatore mentre il motore stava effettuando un test transitorio, la "Calibrazione 2" è stata attivata contestualmente all'avviamento del motore. La "Calibrazione 2" è stata tarata per consentire una portata massima di carburante corrispondente a 43 kW di energia (assumendo un potere calorifico inferiore per il gasolio di 11,9 kWh/kg), e mirava a un valore di  $\lambda$  variabile da 1,05 a 1,5 in funzione dell'O<sub>2</sub> libero nello scarico del motore.

Allo scopo di proteggere il DOC dai danni termici, entrambi i controller hanno utilizzato il controllo ad anello chiuso del bruciatore su un sensore di temperatura dei gas di scarico situato nel cono di ingresso del sistema di post trattamento (questa temperatura è denominata "DOC-in" di seguito). La temperatura di set-point per questo controllo era di 500°C per il preriscaldamento e quando il motore era in funzione.

Inoltre, il secondo controller utilizzava un interruttore on/off associato a un sensore della temperatura di scarico situato all'uscita del DPF. Questo interruttore, che provoca lo spegnimento del bruciatore al raggiungimento della soglia, è importante per gestire



il trade-off tra emissioni di NO<sub>x</sub> e CO<sub>2</sub>. Nel controllore questa soglia era a valore singolo di 200°C, ma nella cella di test era possibile modificare il valore manualmente una volta raggiunto il valore di soglia iniziale, abilitando una “soglia a 2 livelli” di 300°C /200°C.

Infine la cella di prova del motore è stata dotata di un banco emissioni Horiba Mexa che ha consentito di misurare NO<sub>x</sub>, monossido di carbonio (CO) e idrocarburi non metanici (NMHC) sia durante il preriscaldamento che quando il motore era in funzione.

#### **4.4 Simulazioni:**

Le prime simulazioni sono state condotte con un modello di sistema di post-trattamento che includeva l'oggetto bruciatore descritto nella sezione precedente e un sistema di post-trattamento che prevedeva un DOC e DPF nel primo convertitore e il catalizzatore SCR del tipo ferro-zeolite nel secondo convertitore, oltre a un DEF mixpipe che collega i due.

In queste simulazioni si presumeva che per il preriscaldamento il bruciatore dovesse funzionare in condizioni magre per ridurre al minimo le emissioni. Inoltre, dato l'elemento di “protezione DOC” dei comandi del bruciatore descritto nel paragrafo precedente, si sospettava che se si introducesse aria aggiuntiva, sia la potenza termica massima che la quantità totale di calore ceduto a valle sarebbero aumentate.

La temperatura massima all'interno del bruciatore deve essere vincolata per garantirne la durata (rispetto all'ossidazione ad alta temperatura della lega utilizzata per il rivestimento, una sottile lamiera metallica che scherma la fiamma dal flusso di scarico), e la temperatura dello scarico che entra nel DOC non deve essere così alto da accelerare significativamente l'invecchiamento termico del catalizzatore. Entrambi questi problemi sono attenuati se la temperatura di spegnimento viene mantenuta al di sotto di 600°C e la temperatura di ingresso del DOC viene mantenuta al di sotto di 500°C. Tali obiettivi vengono raggiunti con un valore  $\lambda$  totale pari o inferiore a 0,2.

In queste simulazioni è stato quindi considerato l'impatto del preriscaldamento del sistema di post-trattamento sul controllo degli NO<sub>x</sub> e sulle emissioni durante un ciclo WHTC con avviamento a freddo. Nella Figura 16 di seguito si nota che le emissioni cumulative di NO<sub>x</sub> allo scarico per il caso senza preriscaldamento (traccia rossa) si sovrappongono esattamente alle emissioni di NO<sub>x</sub> a motore spento (traccia blu, non visibile); ovvero non si è verificata alcuna conversione di NO<sub>x</sub> nella prima parte del ciclo di avviamento a freddo perché il catalizzatore SCR non era ancora caldo e attivo. Al contrario, per il caso con preriscaldamento (traccia verde), le emissioni di NO<sub>x</sub> si riducono drasticamente nei primi 200 secondi del WHTC. Questo risultato suggerisce che il preriscaldamento ha il potenziale per controllare le emissioni di NO<sub>x</sub> durante la prima parte di un avviamento a freddo.

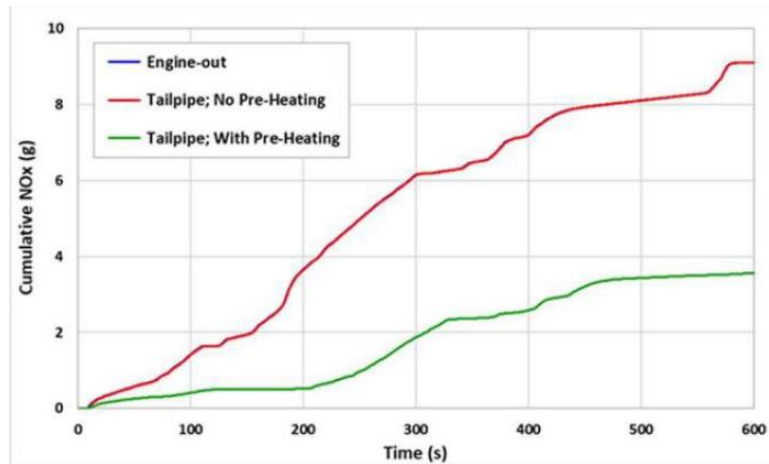


Figura 16. Andamento degli NOx rispetto al tempo misurati nei vari casi.

#### **4.5 Test con preriscaldamento:**

Le temperature del sistema di scarico di uno dei test di preriscaldamento sono presentate nella Figura 17 di seguito. Per questa prova sono state selezionate una velocità di alimentazione del bruciatore costante di 0,3 g/s, un valore  $\lambda$  specifico del bruciatore di 0,7 e una portata d'aria ausiliaria di 18 g/s.

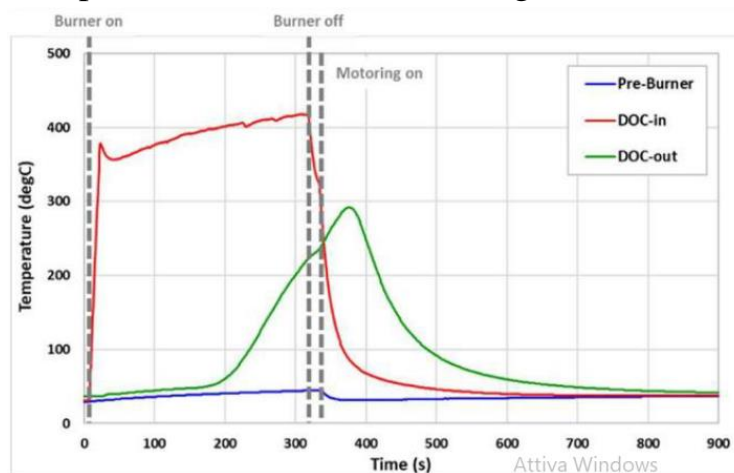


Figura 17. Andamento temperatura del sistema di scarico con preriscaldamento.

Si nota che la temperatura di ingresso del DOC è salita rapidamente a oltre 350°C durante i primi secondi di preriscaldamento, si è leggermente abbassata e poi è aumentata più gradualmente nel resto del periodo di preriscaldamento. Il calo di temperatura è dovuto al passaggio dello stato di controllo del bruciatore da “accensione”, in cui è mirata una combustione ricca, a “normale”, in cui è mirata una combustione magra. Il graduale aumento successivo è dovuto dal riscaldamento graduale del corpo bruciatore e del tubo di scarico alla stessa temperatura del gas in uscita dalla zona di combustione del bruciatore. Invece si osserva che la temperatura di uscita del DOC è aumentata solo leggermente durante i primi 180 secondi di preriscaldamento, ma in seguito è aumentata molto più velocemente. Questo

comportamento indica che il DOC assorbe quasi tutto il calore fornito dal bruciatore fino a quando non inizia a “saturare” rispetto alla temperatura di ingresso.

Le emissioni di monossido di carbonio (CO), idrocarburi non metanici (NMHC) e NO<sub>x</sub> durante l'inizio del preriscaldamento sono presentate nella Figura 18 di seguito.

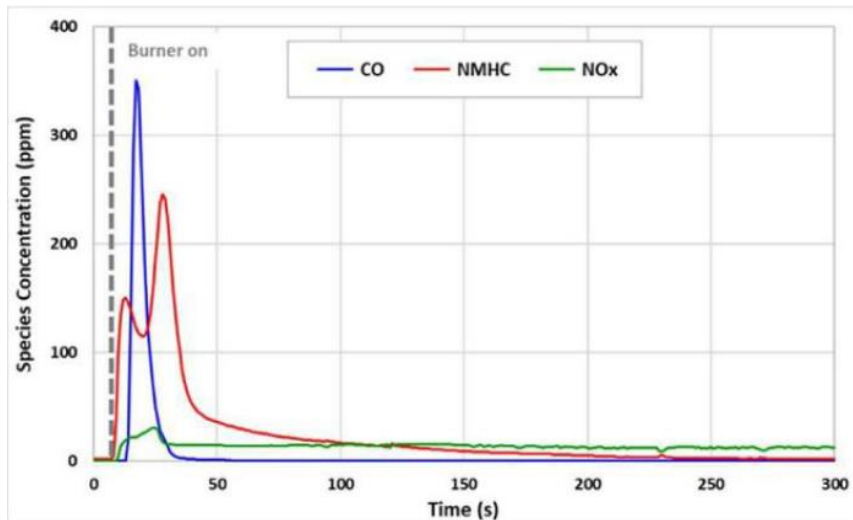


Figura 18. Andamento delle specie inquinanti emesse.

Si può visualizzare che il comportamento di emissione di ciascuna specie è differente. Innanzitutto si osserva un solo forte impulso di CO, che corrisponde al passaggio del bruciatore dallo stato 2 (accensione) allo stato 1 (modalità normale). Durante l'accensione si prevede una CO significativa perché quella modalità punta a un valore di  $\lambda$  alto pari a 1,7. È previsto un certo ritardo nel raggiungimento del CO all'analizzatore perché l'aria/la portata di scarico è relativamente bassa in queste condizioni, e perché la linea di campionamento della cella di prova era relativamente lunga. Infine, il rapido aumento della temperatura DOC-in visto precedentemente nella Figura 16 suggerisce che almeno la regione anteriore della DOC è calda sufficiente per abilitare l'ossidazione di CO in CO<sub>2</sub> a questo punto iniziale del preriscaldamento.

Invece il comportamento NMHC visto nella Figura 17 indica che una piccola quantità di combustibile viene emessa dal bruciatore prima che la fiamma si accenda. Quando lo stato del bruciatore è passato alla normalità, il valore  $\lambda$  magro di 0,7 selezionato per questo test è stato raggiunto rapidamente. Sembra che questo valore non sia sufficientemente magro per eliminare l'emissione di idrocarburi dalla fiamma. La graduale diminuzione delle emissioni di NMHC dopo 30 s è coerente con il comportamento di un tipico DOC per impieghi gravosi: rispetto al CO, la eliminazione di NMHC si verifica a una temperatura più elevata e mostra un aumento molto più graduale verso la completa conversione.

Infine le emissioni di NO<sub>x</sub> viste nella Figura 18 (<25 ppm) indicano che la combustione povera si stabilizza entro pochi secondi dopo che lo stato del bruciatore è passato alla

modalità normale. Anche le emissioni di NO<sub>x</sub> durante l'accensione erano basse perché tale condizione di combustione è lontana dalla combustione stechiometrica.

Il passo successivo nello studio [8] è stato quello di considerare l'importanza dell'aria ausiliaria controllandone la portata mantenendo costanti gli altri parametri di preriscaldamento. Le temperature di ingresso del DOC risultanti da tre prove con diverse portate d'aria ausiliaria sono mostrate nella Figura 19 di seguito.

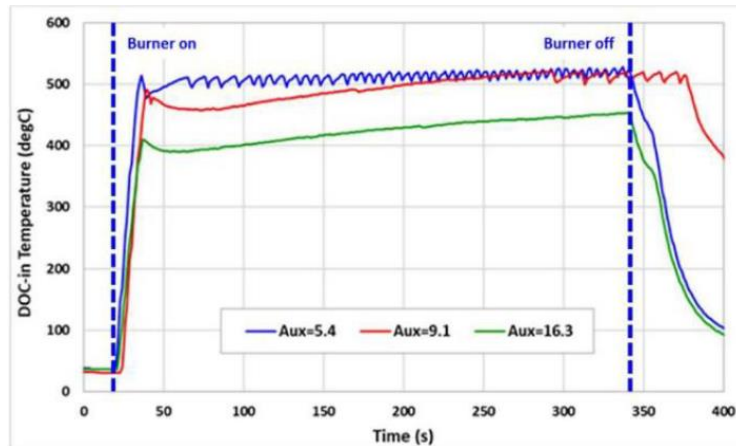


Figura 19. Temperatura DOC-in al variare della portata d'aria ausiliaria.

La portata d'aria ausiliaria più alta ha prodotto la temperatura media di ingresso DOC più bassa, mentre la portata più bassa ha fornito la temperatura media di ingresso DOC più alta ma anche un gran numero di oscillazioni. Tali oscillazioni derivano dall'elemento di controllo del bruciatore che è ad anello chiuso alla temperatura di ingresso del DOC che ha lo scopo di proteggere il sistema dal surriscaldamento. Questo indica che l'aria ausiliaria serve a diluire il gas caldo in uscita dalla camera di combustione del bruciatore, e se la portata ausiliaria è insufficiente, allora i comandi del bruciatore agiranno per limitare la combustione del combustibile da parte del bruciatore. Le oscillazioni della temperatura di ingresso DOC corrispondono alle oscillazioni del valore  $\lambda$  del bruciatore, e si verificano una volta che la temperatura raggiunge il valore di set-point della regolazione ad anello chiuso di 500°C. Infatti, ogni volta che viene raggiunto questo valore, il bruciatore effettua un ciclo in cui viene interrotta brevemente la fornitura di alimentazione ( $\lambda = 0$ ), ed inseguito viene riacceso con un valore di  $\lambda$  superiore (ricco).

I tre test sopra descritti hanno mostrato alcune differenze nelle emissioni di HC; in particolare la concentrazione di NMHC aumentava generalmente al diminuire della portata dell'aria ausiliaria. Questo comportamento è coerente con il riscaldamento del DOC, e quindi l'attivazione dell'ossidazione degli HC è più lenta a causa di una minore combustione di combustibile e di un minore trasferimento di calore a valle. La portata d'aria ausiliaria in definitiva limita la potenza di riscaldamento che si può ottenere durante il preriscaldamento.

#### **4.6 Test con preriscaldamento e transitorio:**

La fase successiva dello studio [8] è stata l'installazione dei componenti DPF e SCR nel sistema di post-trattamento, e quindi l'esecuzione di prove che includevano sia il preriscaldamento sia il funzionamento del bruciatore mentre il motore eseguiva un ciclo di prova transitorio. Per ogni ciclo transitorio (FTP o WHTC), sono state condotti quattro test. Il primo test è stato eseguito senza azionare in alcun modo il bruciatore ed è etichettato "Burner Off" nei grafici sottostanti. Nella seconda prova il bruciatore è stato utilizzato per il preriscaldamento (prima sia della fase di avviamento a freddo che di avviamento a caldo del transitorio) ma non è stato azionato a motore acceso; questo caso è stato etichettato come "solo preriscaldamento". Nella terza e quarta prova, il bruciatore è stato utilizzato per il preriscaldamento (PH) e il riscaldamento a motore acceso. Queste due prove differivano nella durata del preriscaldamento (3 o 5 min) e nel controllo del bruciatore durante il ciclo transitorio, in particolare il valore di soglia (Th) per l'interruttore on/off' del bruciatore associato al DPF -temperatura di mandata. Nel caso 3 ("PH=5min; Th=200°C") per questa soglia è stato utilizzato per tutto il ciclo il valore unico di 200°C, mentre nel quarto caso ("PH=3min; Th=300/200C") è stata utilizzata la strategia di attivazione/disattivazione della soglia a 2 livelli, con il valore iniziale di 300°C che poi scende a 200°C una volta raggiunto il valore di soglia iniziale.

##### **4.6.1 Ciclo di prova – FTP**

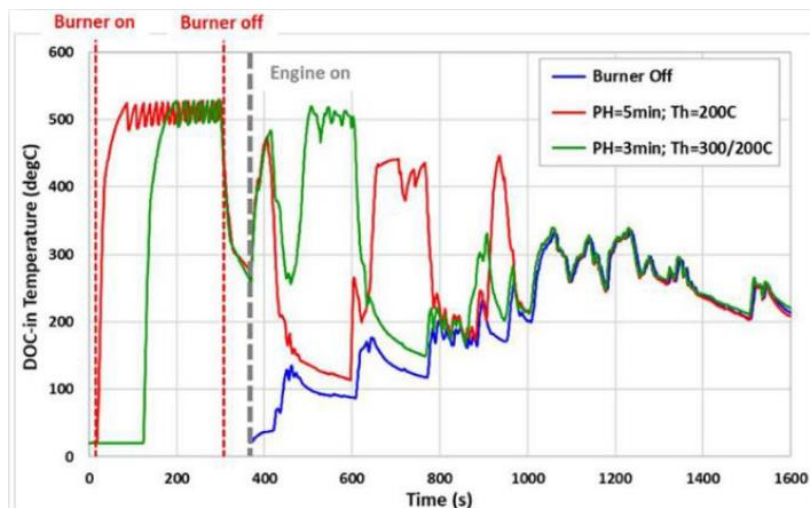


Figura 20. Andamento della temperatura DOC-in nei test FTP.

Nella Figura 20 si osserva che la temperatura DOC-in nel caso Burner Off è <200°C per i primi 400 secondi del ciclo (750 secondi nel grafico) a causa del funzionamento del motore solo in modalità di risparmio di carburante e della notevole capacità termica del lungo canale che comprendeva i due corpi bruciatori.

Per gli altri due casi è stato applicato il preriscaldamento prima dei 350 secondi. In entrambi i casi si può notare che la velocità di alimentazione di 0,6 g/s ha fatto sì che

il controller PID del bruciatore regolasse la temperatura di ingresso del DOC (cioè quella temperatura oscillava, come discusso sopra). Si può notare che questi due casi differiscono per la durata del preriscaldamento. Inoltre in entrambi i casi il bruciatore è stato riattivato subito dopo l'avviamento del motore perché la temperatura di uscita del DPF era al di sotto del suo valore di soglia, e questa operazione ha comportato un picco nella temperatura di ingresso del DOC a circa 400 secondi nel grafico. Nel caso “PH=5min; Th=200°C” il bruciatore in quel momento si è spento perché la temperatura di uscita DPF aveva raggiunto il valore di soglia di 200°C. Nel caso “PH=3min; Th=300/200°C” il bruciatore è rimasto acceso fino a 600s, e funzionava alla massima velocità di alimentazione subito dopo 400s. Quindi la diminuzione della temperatura di DOC-in dopo 400 s era dovuta all'elevato flusso di gas di scarico fresco proveniente dal motore che “diluisce” il calore prodotto dal bruciatore. In entrambi i casi il bruciatore è stato attivato almeno un'altra volta prima dei 1000 secondi nel diagramma (cioè prima dei 600 secondi nel ciclo FTP), a seguito della diminuzione della temperatura di uscita del DPF a 200°C.

I risultati corrispondenti per l'FTP “hot-start” sono presentati nella Figura 21 di seguito.

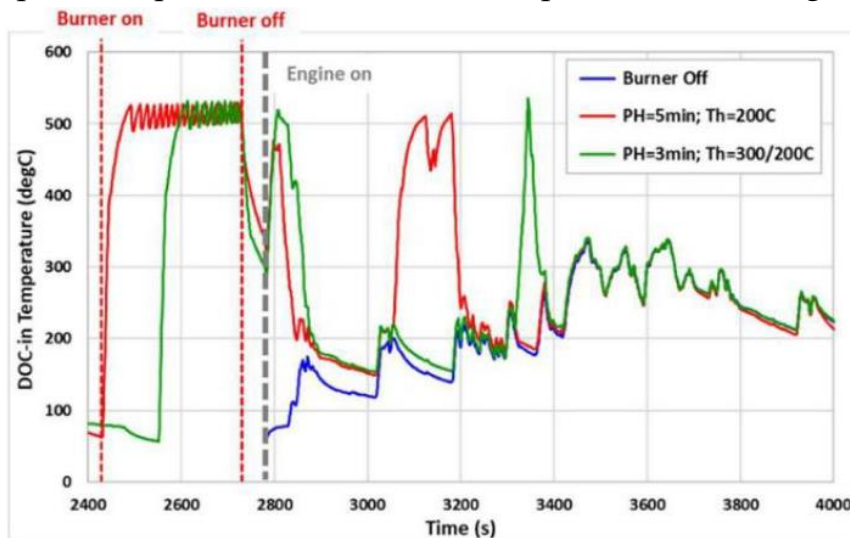


Figura 21. Andamento della temperatura DOC-in nei test con avviamento a caldo.

Per i due casi in cui il bruciatore preriscalda ed è acceso durante il funzionamento del motore, il bruciatore si è spento subito dopo l'avviamento iniziale a circa 2800 secondi, riaccendendosi poi più avanti nel ciclo. L'operazione relativamente breve dopo l'avviamento del motore è dovuta dal fatto che la temperatura di uscita del DPF ha raggiunto quasi immediatamente il valore di soglia; pertanto il calore accumulato nel DOC e DPF dal precedente ciclo di avviamento a freddo apporta un contributo significativo rispetto al calore aggiunto a quei componenti dal preriscaldamento.



Nella Figura 22 si può vedere che i due casi che includevano il preriscaldamento e il funzionamento del bruciatore mentre il motore era in funzione fornivano risultati molto diversi prima dei 900 secondi (~500 secondi nel ciclo FTP). I primi 300 secondi dell'FTP possono essere descritti come la combinazione di tre "impulsi di potenza" del motore separati da periodi significativi di minimo. I risultati indicano che il preriscaldamento per un periodo di tempo più lungo (5 min) ha consentito al massimo iniziale della temperatura di uscita del DPF di superare i 300°C, condizione che ha un effetto positivo significativo sulle emissioni di NOx associate a questo primo impulso di potenza. Viceversa, il caso con il preriscaldamento più breve (3 min) forniva una temperatura di picco più bassa che si verificava verso la fine del primo impulso di potenza.

Dunque il test più significativo dei 3 è quello con PH=3min e Th=300/200°C, che ha portato la temperatura di uscita del DPF a raggiungere i 300°C durante il primo impulso di alimentazione dell'FTP (~70 secondi nel ciclo). Questa condizione corrisponde ad una ottimale temperatura di funzionamento dell'SCR, elemento presente subito dopo il DPF, che produrrà una efficace conversione degli NOx riducendone il valore emesso in modo significativo.

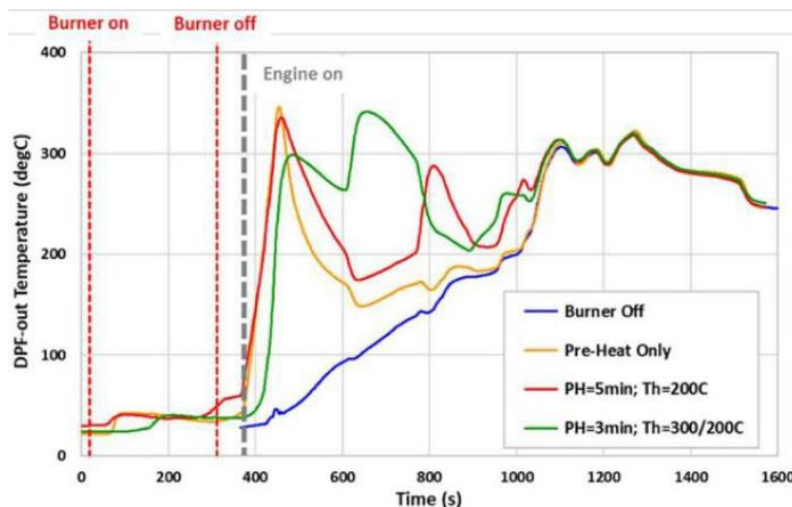


Figura 22. Andamento della temperatura DPF-out nei vari test.

Un'altra metrica utile per valutare l'impatto delle varie strategie di controllo del bruciatore è l'energia di scarico cumulativa all'uscita del DPF.

Nella Figura 23 di seguito si può vedere che pochissima energia di scarico ha superato il sensore di temperatura DPF-out durante il preriscaldamento; ancora una volta si tratta di una manifestazione del fatto che DOC e DPF assorbono efficacemente la quasi totalità del calore prodotto dal bruciatore nelle condizioni di preriscaldamento. La differenza tra 5 e 3 minuti di preriscaldamento si riflette chiaramente nell'energia di

scarico dopo 450 s (100 s nel ciclo). Quindi anche questo comportamento conferma tutte le conclusioni descritte precedentemente.

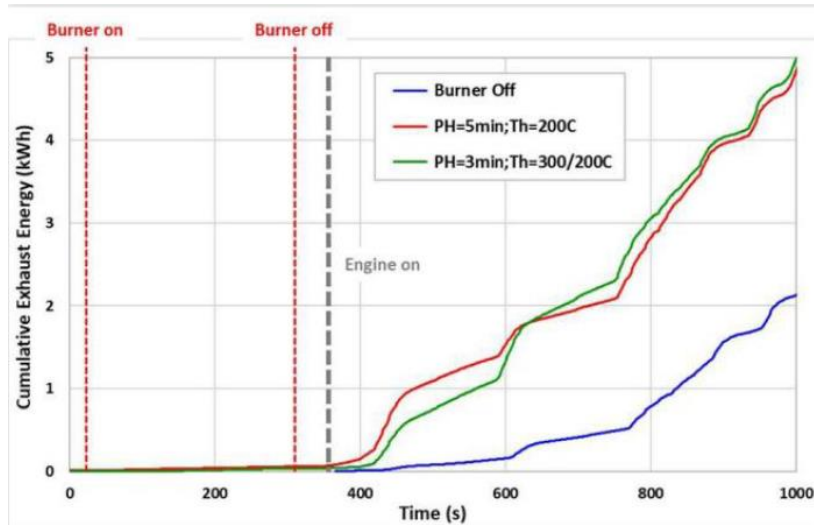


Figura 23. Energia di scarico in uscita dal DPF.

#### 4.6.2 Ciclo di prova – WHTC

Test identici a quelli descritti sopra che coinvolgono il ciclo FTP sono stati condotti anche con il motore che esegue il ciclo di prova transitorio WHTC. I risultati sono presentati nella Figura 24 di seguito (solo le parti del ciclo di preriscaldamento e avviamento a freddo del test).

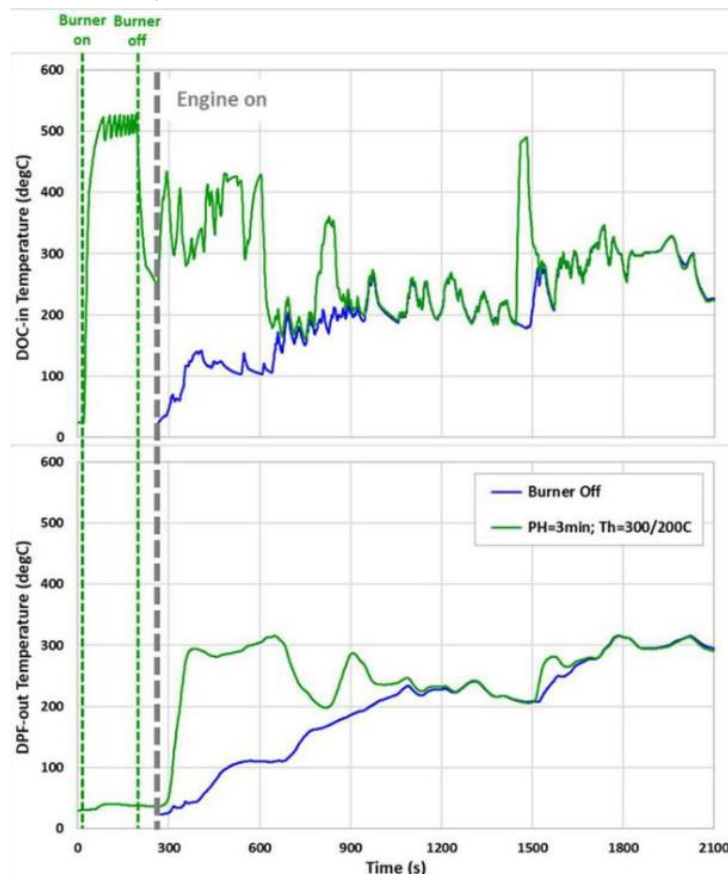


Figura 24. Risultati prove WHTC.



Anche in questo caso il preriscaldamento è stato condotto per 5 min con una portata massima costante di 0,6 g/s e un  $\lambda$  di 0,8 per il bruciatore e una portata d'aria di 18 g/s. Quindi sono stati confrontati i due casi in cui si utilizza il bruciatore sia per il preriscaldamento e sia durante il funzionamento del motore con quello del sistema di base.

Ancora una volta la temperatura di ingresso del DOC ha oscillato, indicando che la velocità di alimentazione effettiva era regolata dal controllo di protezione del DOC del bruciatore. I dati della temperatura di ingresso DOC indicano inoltre che, una volta avviato il motore e avviato il ciclo, il bruciatore ha funzionato ininterrottamente per i primi 350 secondi del ciclo, ancora una volta vincolato dal controllo di protezione DOC. Si può inoltre notare che il bruciatore si è riattivato altre due volte durante il ciclo, anche se per periodi relativamente brevi.

Anche i dati sulla temperatura di uscita DPF nella Figura 24 sono istruttivi. Innanzitutto, confrontando le temperature DOC-in e DPF-out del caso con il bruciatore in funzione, l'utilizzo della strategia di controllo on/off a 2 livelli, con valori di soglia superiore e inferiore rispettivamente di 300 e 200°C, è confermato. In secondo luogo, questa combinazione di condizioni di funzionamento del bruciatore si è rivelata in grado di aumentare il DPF-out temperatura a quasi 300°C in ~100s, mantenendo quella temperatura per i successivi 300s del ciclo e quindi assicurandosi che questa temperatura non scenda al di sotto di 200°C per il resto del ciclo. In questo modo la conversione di NOx ha raggiunto quasi il 100% quando la temperatura di uscita del DPF si è avvicinata a 300°C, cosa che si è verificata subito dopo l'accensione del motore con il bruciatore in funzione durante il ciclo. Quindi si può affermare che il funzionamento del bruciatore durante il ciclo può essere sufficiente per il WHTC per risolvere il problema di avviamento a freddo.

#### **4.7 Osservazioni:**

Innanzitutto le simulazioni hanno indicato che l'aria aggiuntiva gioverebbe al preriscaldamento in due modi diversi: consentendo di ottenere velocità di alimentazione più elevate controllando l'esposizione termica del DOC e spingendo il calore più a valle nel sistema di post-trattamento. Pertanto, per utilizzare un bruciatore per il preriscaldamento, sarà necessaria più aria.

In più, inizialmente si presumeva che il preriscaldamento dovesse essere condotto in condizioni di combustione magra per limitare le emissioni di CO e HC. La correttezza di questa ipotesi era evidente nei risultati del test, infatti la maggior parte delle emissioni di CO erano associate al breve periodo di accensione quando la combustione è ricca, mentre le emissioni erano nulle dopo che la combustione era passata a magra ( $\lambda = 0,8$ ). Le emissioni di HC sembravano essere più dipendenti dalla temperatura e

dall'attività del DOC rispetto all'ossidazione di quelle specie. Da questi risultati sembrerebbe che sia difficile ottenere emissioni di HC zero durante il preriscaldamento.

Infine i test con un sistema di post-trattamento completo e con un ciclo di prova transitorio successivo al preriscaldamento hanno permesso di chiarire l'intero quadro termico. Il solo preriscaldamento non sarà sufficiente, il che significa che il design e i controlli del bruciatore dovranno supportare entrambe le modalità di funzionamento.

#### **4.8 Conclusioni:**

Lo studio [8] analizzato, che ha utilizzato vari test per studiare l'uso di un bruciatore di scarico per il preriscaldamento di un sistema di post-trattamento DOC/DPF/SCR, ha portato ai seguenti risultati:

1. Le simulazioni hanno indicato che un flusso d'aria superiore al doppio di quello richiesto per la combustione all'interno del bruciatore consentirebbe una maggiore potenza di riscaldamento e porterebbe anche il calore più a valle nel sistema.
2. Il test iniziale con un bruciatore e due pompe d'aria (la seconda pompa forniva il flusso d'aria supplementare) ha confermato i risultati della simulazione precedente, e ha identificato limiti alla velocità di alimentazione del bruciatore associati alla necessità di proteggere il DOC dai danni termici e garantire la durata del bruciatore componenti interni.
3. Successivamente sono stati eseguiti i cicli di prova delle emissioni transitorie FTP e WHTC, preceduti da un preriscaldamento per vari tempi e con diverse strategie di controllo del bruciatore quando il motore era in funzione. Tali test hanno indicato che il preriscaldamento accoppiato al funzionamento del bruciatore durante l'avviamento a freddo del motore può fornire un riscaldamento significativo del DOC e del DPF, che comporta l'attivazione del catalizzatore SCR entro i primi 100 secondi.

In conclusione grazie a questi test è stato possibile verificare che la strategia che prevede di inserire nel sistema di post-trattamento un bruciatore, che preriscaldi il sistema e funzioni anche durante il funzionamento del motore, permette di abbattere le emissioni di NOx nelle condizioni di avviamento a freddo, e quindi permette di risolvere il principale problema che le normative Euro 7 vogliono risolvere.

## **5 Soluzione 2: TATH (ATEG+EGH)**

### **5.1 Introduzione:**

La terza soluzione presentata, che ha come scopo quello di abbattere le emissioni di NOX durante il funzionamento a freddo del motore, prevede l'introduzione all'interno del sistema di post-trattamento dei gas di scarico un generatore termoelettrico per autoveicoli (ATEG) accoppiato ad un riscaldatore a gas di scarico (EGH). L'ATEG è utilizzato per convertire il calore di scarto dai gas di scarico a valle del sistema di post-trattamento in energia elettrica che verrà immagazzinata in una batteria. In seguito l'EGH utilizza tale energia generata per riscaldare il sistema di post-trattamento riducendo così le emissioni di NOx anche per funzionamento a freddo. In più questo sistema composto da EGH+ATEG, chiamato riscaldatore di post-trattamento termoelettrico (TATH), è energeticamente autonomo, quindi non prevedrà nessun consumo aggiuntivo di carburante. [9]

Quindi il TATH è progettato per funzionare principalmente in due fasi:

1. Fase di riscaldamento: in questa fase la centralina utilizza l'energia immagazzinata nella batteria grazie all'ATEG per alimentare l'EGH. Quindi lo scopo di questa fase è riscaldare rapidamente i gas di scarico grazie all'EGH prima dell'SCR quando il motore si avvia finché la temperatura di questi rimane inferiore alla temperatura target. Raggiunta questa temperatura la soluzione di urea può essere dosata nell'SCR provocando un drastico abbattimento degli NOx.
2. Fase di recupero: questa fase ha lo scopo di caricare la batteria elettrica con il calore residuo dei gas di scarico, potenza che sarà utilizzata dall'EGH durante la fase di riscaldamento. L'ATEG è responsabile della conversione del calore di scarto in elettricità durante il funzionamento del veicolo, e a differenza della fase di riscaldamento, che avviene solo in determinati momenti lungo il percorso, la fase di recupero dura fintanto che il veicolo è in funzione.

### **5.2 Sistema:**

Il veicolo analizzato nello studio [9] preso in considerazione è un HDV MAN certificato Euro VI, modello TGX 18.480. La scheda tecnica del veicolo è riportata nella tabella 8 e la sua configurazione, comprensiva anche dei dati acquisiti, è riportata in Figura 25.



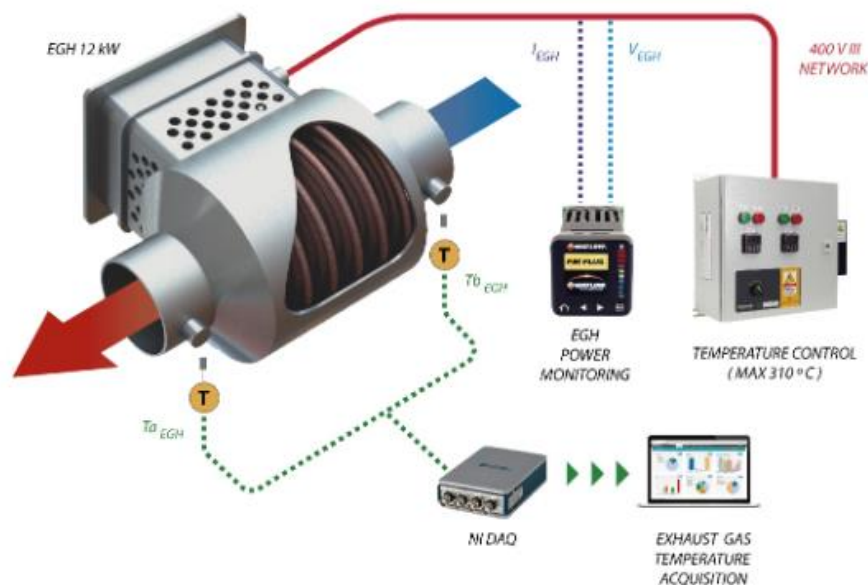


Figura 26. Schema dell'EGH installato a monte dell'ATS e relativa acquisizione dati.

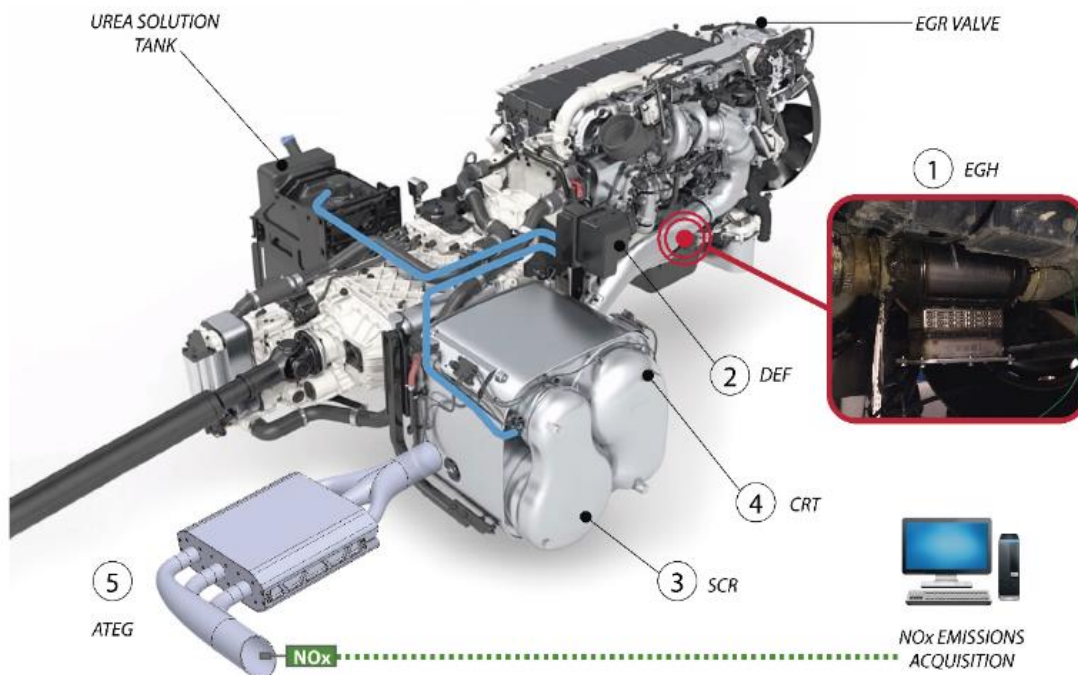


Figura 27. Schema del sistema considerato adattato al veicolo testato.

Come si vede in figura 27 l'EGH (numero 1) è stato posizionato verso il basso dei turbocompressori, appena prima dello standard ATS. L'elemento successivo che troviamo è l'unità del fluido di scarico diesel (DEF) composta da un serbatoio, un modulo di alimentazione e un modulo di dosaggio (numero 2). Il veicolo testato in questo esperimento utilizza AdBlue per l'abbattimento di NOx. La centralina è responsabile dei parametri di AdBlue, che non viene mai iniettato nell'impianto fino a quando la temperatura dei gas di scarico non supera i 180°C, condizione a cui la reazione con questa sostanza non produca derivati che si depositano sulla parete del

tubo, che sono altamente indesiderati per impedire il regolare flusso dei gas. Quindi la temperatura del gas in ingresso e il contenuto di NO<sub>x</sub> vengono letti dall'unità di dosaggio per regolare la dose esatta di AdBlue necessaria per soddisfare lo standard Euro 6. Il prossimo componente che troviamo è un'unità chiusa composta da un convertitore catalitico selettivo (SCR) e una trappola a rigenerazione continua (CRT) dove entra la miscela di AdBlue e gas di scarico (numero 3). All'interno di questo dispositivo viene prodotta una reazione catalitica per convertire gli NO<sub>x</sub> in azoto biatomico (N<sub>2</sub>), e acqua (H<sub>2</sub>O). Infine, è necessario eliminare l'NH<sub>3</sub>, prodotta dalla reazione tra AdBlue e NO<sub>x</sub>, utilizzando un catalizzatore di ammoniaca incluso nel sistema SCR. Successivamente all'SCR, all'interno dello stesso pacchetto, è presente il CRT (numero 4), che è suddiviso in un catalizzatore di ossidazione diesel (DOC) e un filtro antiparticolato diesel (DPF). Il DOC è il responsabile dell'ossidazione di CO e THC mentre il DPF viene utilizzato per catturare le particelle incombuste. La stessa unità chiusa è l'uscita di scarico standard in cui è accoppiato il sensore NO<sub>x</sub> per acquisire le emissioni del veicolo.

Inoltre nella figura 27 è presente una rappresentazione di un ATEG (numero 5) situato alla fine dell'ATS standard. Occorre sottolineare l'importanza per cui si trovi a valle dell'SCR poiché l'ATEG riduce la temperatura dei gas di scarico e l'SCR necessita di una temperatura elevata per funzionare in modo efficiente. Inoltre la perdita termica ATEG sarà ridotta poiché i convertitori catalitici post SCR aumentano la temperatura dei gas di scarico durante il funzionamento. Quindi il suo collettore di uscita coincide con il collettore dei fumi di scarico dove in questa figura è fissato il sensore di NO<sub>x</sub>.

Per valutare l'influenza dell'EGH nella riduzione delle emissioni di NO<sub>x</sub> è stato utilizzato un banco certificato per veicoli "Heavy Duty" per testare il veicolo in condizioni di guida reali. Questa apparecchiatura è stata utilizzata anche per acquisire FTPP, NO<sub>x</sub> dopo e prima dell'ATS e le temperature di scarico dall'ECU. In più è stato utilizzato un misuratore di potenza per misurare il consumo di energia EGH.

### **5.3 Configurazione motore:**

Per condurre l'analisi nello studio sono stati selezionati tre diversi regimi del motore mostrati in figura 28: 1000 giri/min ( $\approx$ 55 km/h), 1250 giri/min ( $\approx$ 65 km/h) e 1500 giri/min ( $\approx$ 80 km/h). La marcia adatta per ottenere tutti i valori di posizione del pedale del gas completo (FTPP) era l'undicesima, in particolare il massimo FTPP testato è del 90%. Durante tutti i test la temperatura del motore è rimasta al di sotto di 90°C e la temperatura di set-point dell'EGH è stata impostata su 300°C, questo per garantire che la temperatura del gas di scarico all'ingresso dell'SCR fosse superiore alla sua temperatura di attivazione di 220°C.



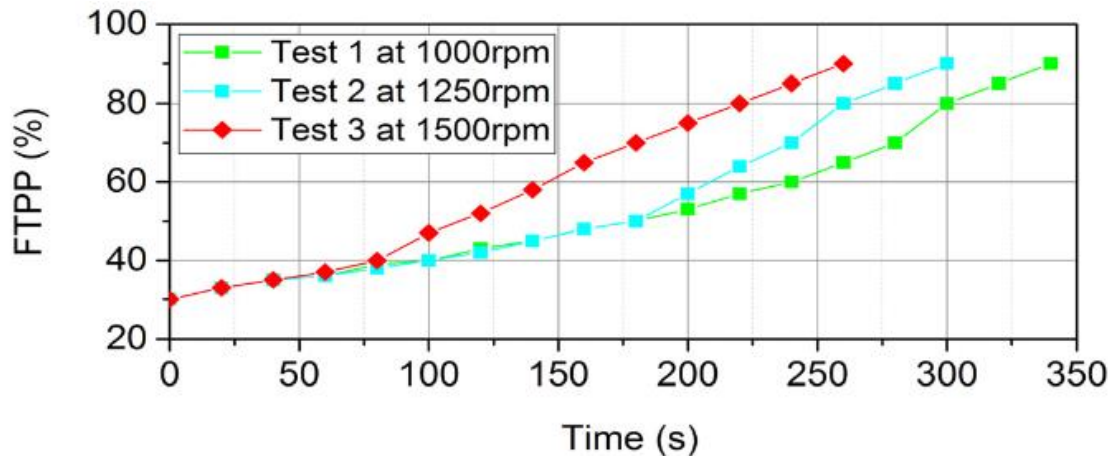


Figura 28. Prove transitorie per analizzare le emissioni di NOx.

## 5.4 Risultati prove:

### 1° ciclo:

La figura 29 mostra le emissioni di NOx e le prestazioni EGH durante il test a 1000 giri/ min. La prima cosa che si nota è il fatto che il sistema di post-trattamento standard (senza EGH) non è in grado di soddisfare la normativa Euro 6. In questa prova il limite Euro 6 di NOx è stato calcolato dal valore limite WHTC moltiplicato per il fattore di conformità CF:  $\text{NOx EURO VI} = 0,46 \times 1,5 = 0,69 \text{ g/kWh}$ ; mentre come limite imposto dalla norma Euro 7 è stato considerato un valore dimezzato rispetto a quello della normativa precedente, quindi il valore limite sarà  $\text{NOx EURO VII} = 0,27 \times 1,5 = 0,41 \text{ g/kWh}$ .

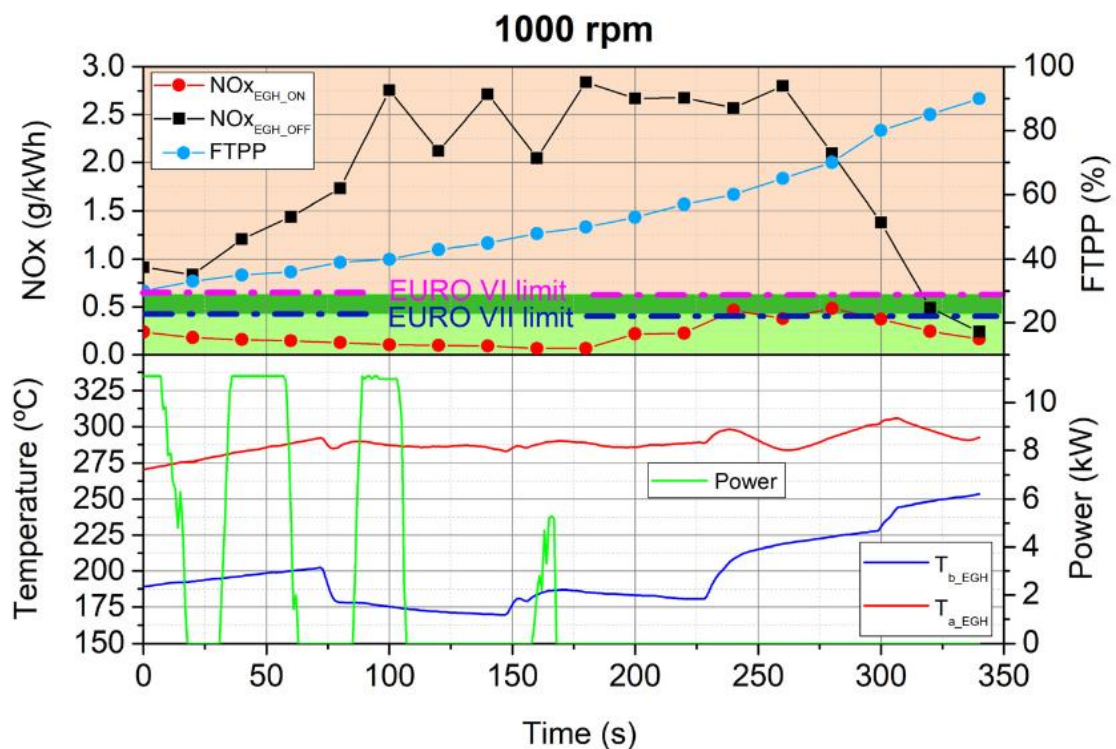


Figura 29. Risultati del test a 1000 rpm che includono: valore di NOx emessi, temperature dei gas e FTPP.

Si nota che la temperatura  $T_{b\_EGH}$ , che corrisponde alla temperatura ottenuta nel caso di EGH\_OFF, presenta un forte calo al 40% dell'FTTP, e questo produce un aumento significativo delle emissioni di NOx mantenuto fino al 65% di FTPP, infatti in questo range il sistema catalitico si trova molto al di sotto del valore di temperatura richiesto per iniziare la reazione di circa 220°C. Questo spiega anche l'importanza di raggiungere la temperatura target di iniezione dell'urea il prima possibile per avviare la conversione catalitica all'ATS standard. Quindi senza temperatura sufficiente (inferiore a 225°C in questo test) e senza soluzione di urea iniettata, i valori di NOx rimangono elevati all'interno di un FTPP medio.

In seguito si osserva che l'inclusione dell'EGH ha avuto un impatto molto positivo. Si può notare infatti una significativa riduzione di NOx, specialmente in un range FTPP medio (40–65%), dove i valori di NOx, rispetto al caso senza riscaldatore ( $NO_{x\_EGH\_OFF}$ ), scendono drasticamente grazie al raggiungimento di una temperatura che supera i 260°C. Questo fenomeno può essere spiegato dall'iniezione di AdBlue, che inizia una volta raggiunto questo valore di temperatura, con conseguente aumento dell'efficienza dell'SCR. Nello specifico l'iniezione di questa sostanza dovrebbe iniziare teoricamente quando la temperatura di ingresso del sistema supera 220°C, in questo caso invece avviene con il superamento di 260°C. Questa differenza rispetto al comportamento teorico, che sarà presente in tutti i test, può essere spiegata dalla perdita di calore nella sezione dall'EGH all'SCR, e anche dall'inerzia termica del substrato SCR che necessita di alcuni secondi per raggiungere la soglia di iniezione della temperatura. Invece sotto i 260°C, in modalità EGH off, l'andamento di  $T_{b\_EGH}$  è principalmente influenzato dalla valvola EGR che è controllata dai parametri della ECU.

Dunque si può concludere affermando che utilizzando il riscaldatore i valori di  $T_{UN\_EGH}$  sono sempre superiori alla soglia di iniezione di AdBlue di 220°C (275°C minimo), e quindi la riduzione di NOx è migliorata drasticamente.

## **2° ciclo:**

Il secondo ciclo è stato impostato a 1250 rpm e i risultati sono mostrati in Figura 30.



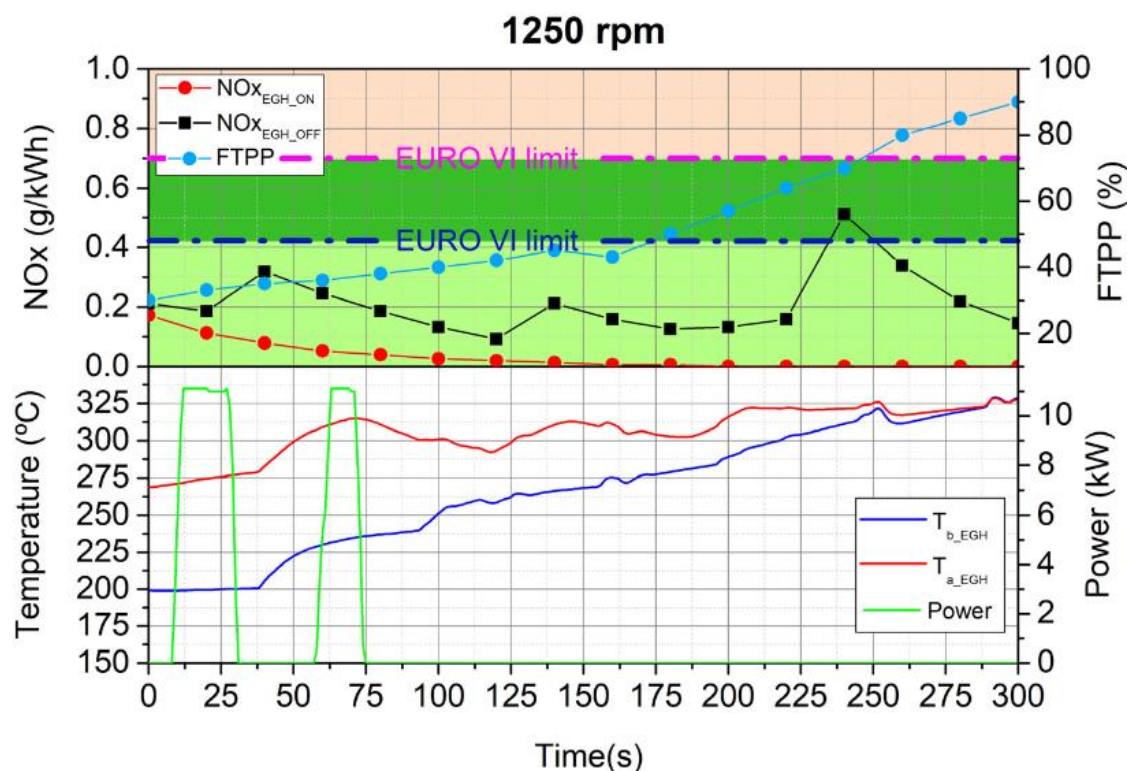


Figura 30. Risultati del test a 1250 rpm che includono: valore di NOx emessi, temperature dei gas e FTPP.

Innanzitutto si nota che a differenza della figura 29, in questo caso il sistema di post-trattamento standard è in grado di soddisfare la normativa EURO VI. Si nota infatti che l'emissione di NOx varia da 0,1 a 0,3 fino al 65% FTPP, variazione ristretta spiegata dal fatto che questo regime del motore produce un impatto maggiore nell'incremento di temperatura come mostra l'andamento di  $T_{b\_EGH}$ . Infine al termine della prova entrambe le temperature presentano gli stessi valori superiori ai 300°C (dopo 250s), quindi la conversione catalitica beneficia di ciò producendo una rapida diminuzione delle emissioni di CO nonostante i valori FTPP siano elevati.

Anche in questo caso comunque l'uso dell'EGH continua a essere vantaggioso nel ridurre le emissioni di NOx al di sotto del limite di EURO 7, infatti i valori di  $NOx_{EGH\_ON}$  sono diminuiti e sono rimasti intorno a 0 g/kWh per quasi la seconda metà del test. La principale riduzione di NOx è stata eseguita a valori FTPP elevati in contrasto con il test 1; tuttavia le due prove condividono ancora la stessa drastica riduzione di  $NOx_{EGH\_OFF}$  a valori pari a 70% di FTPP, che possono essere spiegati a causa dell'iniezione di AdBlue. In questo caso si può notare che, disabilitando l'EGH, l'iniezione di AdBlue è iniziata a 220°C circa, mentre con EGH abilitato l'iniezione di AdBlue è iniziata all'inizio del test.

### 3° ciclo:

Infine la figura 31 mostra i risultati a 1500 giri/min.

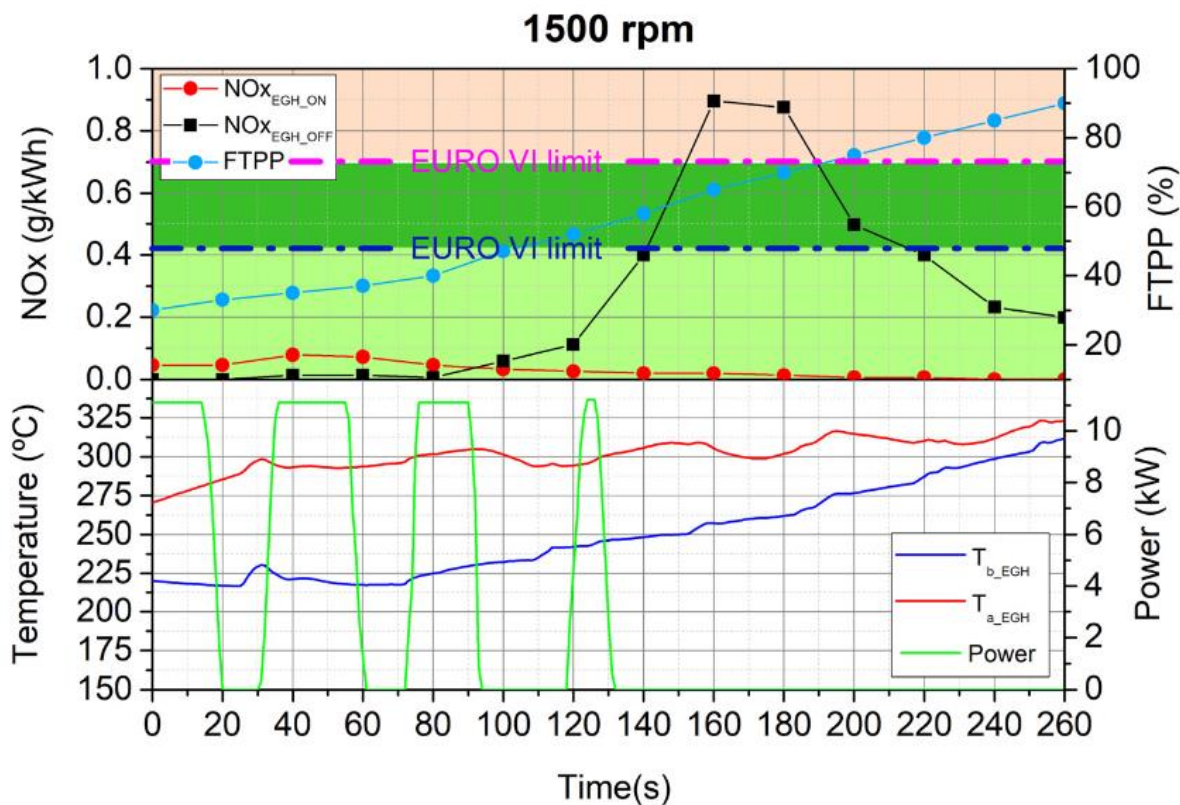


Figura 31. Risultati del test a 1500 rpm che includono: valore di NOx emessi, temperature dei gas e FTPP.

Si nota che al 65% e al 70% di FTPP le emissioni di NOx sono superiori al limite Euro 6. Comunque si può affermare che a 1500 giri/min l'EGH mantiene la sua capacità di abbattere le emissioni di NOx e può ridurne le emissioni al di sotto del limite EURO 7. In più ai primi FTPP, in entrambi i casi le emissioni erano molto basse; questo fenomeno può essere spiegato dall'attivazione dell'EGR fino al 50% FTPP che ha contribuito positivamente alla riduzione degli NOx, nonostante la bassa temperatura dei gas di scarico.

D'altra parte, la riduzione di NOx è notevole anche nella seconda metà del test dove si ha un minor consumo di energia poiché il riscaldatore non è più necessario grazie a T<sub>UN\_EGH</sub> al di sopra dell'obiettivo selezionato. Infatti con valori FTPP superiori al 70%, anche nel caso NOx<sub>EGH\_OFF</sub>, i valori di NOx sono ridotti sempre grazie all'iniezione di AdBlue visto che il limite di temperatura è stato nettamente superato in questa fase. Al contrario, il range tra il 40 e il 70% di FTPP è dove NOx<sub>EGH\_OFF</sub> sono più alti, infatti in questo caso il regime motore moderato e il range FTPP medio (intorno al 50%) portano ad un aumento rapido dei valori di emissione di NOx dell'ATS standard. Questo fenomeno è il risultato di una combinazione tra il massimo regime del motore a FTPP moderato e una temperatura dei gas di scarico relativamente bassa, entrambi controproducenti per catturare gli inquinanti all'interno dell'ATS. Di conseguenza è in questo range che la riduzione di NOx grazie all'inclusione dell'EGH è stata maggiore e fondamentale per rientrare nei limiti Euro 7.

## **5.5 Confronto risultati:**

Nella tabella 9 è stato fatto un confronto tra i vari test dei parametri di interesse.

Test	Motore Regime (giri/min)	Energia EGH Consumo (kWh)	Durata (i)	Potenza EGH media Consumo (kW)	NOx Riduzione (%)	Urea Consumo Aumento (g)
1	1000	0,191	340	2,02kW	87,97	69,67
2	1250	0,098	300	1,18 kW	83,46	19,59
3	1500	0,213	260	2,95kW	89,46	1,31

Tabella 9. Confronto risultati dei tre test.

Quindi riassumendo, le emissioni di NOx sono state ridotte con l'introduzione dell'EGH in tutti i casi ma in modi e condizioni differenti. Come si vede nella tabella 9, nel 1° test troviamo le temperature di scarico più basse e il consumo EGH più elevato, infatti i bassi regimi del motore producono una bassa temperatura di scarico, e questo è il motivo per cui sia la riduzione di NOx che il consumo di EGH sono stati i più alti rispetto agli altri test. Infatti in queste condizioni il riscaldatore necessita di più energia elettrica per colmare il divario di temperatura con conseguente aumento anche del consumo di AdBlue.

## **5.6 Ottimizzazione EGH:**

Dai risultati sopra presentati, ci si può rendere conto che un EGH da 12 kW, come quello testato, è estremamente sproporzionato considerando che questa potenza dovrebbe provenire da un generatore di bordo (cioè un alternatore). Sebbene questa enorme quantità di potenza fornisca un grande aumento di  $T_{UN\_EGH}$  con valori iniziali superiori a 260°C, se consideriamo la curva di efficienza SCR rappresentata in Figura 32, si può osservare che non ha senso riscaldare i gas di scarico al di sopra di 220°C visto che l'SCR presenta un punto di efficienza massima del 95% a  $T_{UN\_EGH}=220^{\circ}C$ . Quindi temperature al di sopra di questo valore non porteranno alcun miglioramento nella riduzione degli NOx ma faranno sì che l'alternatore consumi più carburante per alimentare l'EGH.

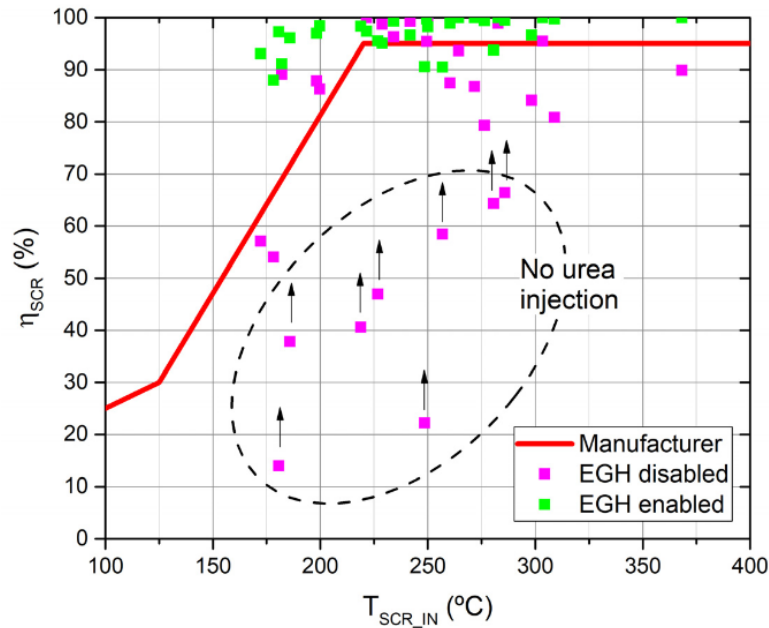


Figura 32. Efficienza di conversione dell'SCR teorica e sperimentale in funzione della temperatura del catalizzatore.

Dalla figura 32, dove sono presenti anche i valori ricavati sperimentalmente tramite le prove, si nota che quando l'EGH è attivo il rendimento del catalizzatore si mantiene sopra il 90% anche per temperature al di sotto dei 220°C.

A questo punto sapendo la  $T_{UN\_EGH}$ , valore fissato a 220°C,  $T_{b\_EGH}$  e la portata massica dello scarico, nota dai test precedenti, è possibile determinare il consumo di energia teorico per raggiungere il 95% dell'efficienza di conversione SCR. La figura 33 mostra la potenza EGH ottimizzata che garantisce un'efficienza SCR del 95%, considerando che tutta l'energia elettrica consumata dall'EGH sia stata scambiata come energia termica nei gas di scarico.

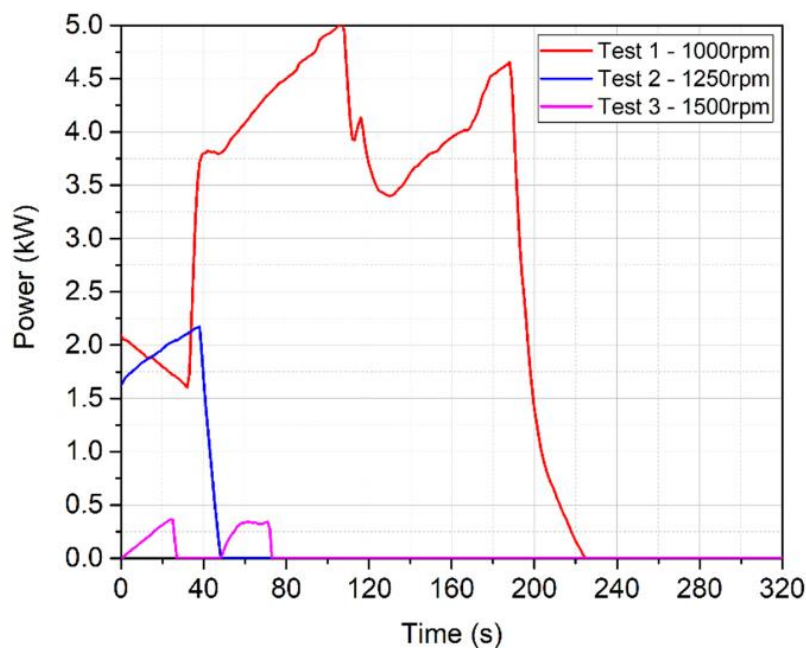


Figura 33. Consumo energetico teorico dell'EGH per raggiungere la temperatura  $T_{un\_EGH}$  di 220°C ai vari regimi.

Si può osservare che il consumo è inferiore alla potenza EGH utilizzata nei test precedenti. Infatti a 1000 rpm si ha un picco di consumo massimo di 5 kW, che è notevolmente inferiore agli 11 kW raggiunti durante la prova 1. Il suo valore di consumo diventa pari a zero solo al termine della prova quando  $T_{b\_EGH}$  è più di 220°C e non è necessaria alcuna energia extra. Inoltre a 1250 rpm la potenza EGH teorica raggiunge un picco di 2,2 kW durante i primi 50 s di prova e rimane zero dopo che  $T_{b\_EGH}$  supera i 220°C. Infine nel test 3 si può vedere che il consumo di energia dell'EGH rimane al di sotto di 0,5 kW.

Quindi si può affermare che i valori di consumo, compresi tra 5 kW e 0,3 kW, rientrano in un range realistico che un generatore di bordo può fornire. Infatti la maggior parte degli alternatori sono disponibili con uscite che vanno da 160 a 320 ampere (da 3,84 kW a 7,68 kW), ma possono gestire le necessità di base del veicolo, come fari, indicatori, pompe del carburante, aria condizionata. Quindi la soluzione più semplice per fornire questa energia aggiuntiva sarebbe l'uso di un alternatore supplementare che alimenti l'EGH provocando però un aumento significativo del consumo di carburante. A questo punto, proprio per far fronte a questo problema, entra in gioco il sistema di recupero del calore di scarto dei gas di scarico (ATEG) per produrre l'elettricità necessaria all'EGH evitare l'aumento di consumo di carburante. Infatti questo sistema è un generatore termoelettrico in grado di convertire il calore di scarto a valle del sistema di post-trattamento in energia elettrica che verrà accumulata su una batteria che alimenterà l'EGH.

### **5.7 ATEG per veicoli pesanti:**

Per ottenere una riduzione delle emissioni senza consumo aggiuntivo diretto di carburante, è necessario raggiungere un equilibrio tra l'energia consumata (fase di riscaldamento) e quella prodotta (fase di recupero).

A questo punto è opportuno condurre un'analisi sulla fattibilità dell'utilizzo di un ATEG come principale e unico fornitore di energia per l'EGH. Quindi lo scopo di questo capitolo è determinare quanta potenza può essere recuperata dai fumi di scarico del veicolo, a valle dell'ATS, nelle reali condizioni di lavoro del veicolo studiato precedentemente. Sfortunatamente gli ATEG hanno un importante inconveniente, ovvero influenzano fortemente il consumo di carburante principalmente a causa di un aumento della contropressione nel sistema di scarico. Quindi, per sviluppare un ATEG fattibile è importante anche garantire che il sistema causi una piccola caduta di pressione e generi energia elettrica sufficiente per compensare l'incremento del consumo di carburante.



### 5.7.1 Sistema:

L'ATEG è un generatore termoelettrico costituito da conduttori o semiconduttori che trasformano un flusso di calore in energia elettrica grazie all'effetto Seebeck. Infatti questo effetto prevede che quando si instaura una differenza di temperatura tra i due conduttori elettrici, si crea una differenza di tensione tra i due, e quando uno dei due viene riscaldato gli elettroni iniziano a passare dal lato caldo verso il lato freddo creando così energia elettrica.

La Figura 34 mostra il sistema considerato dallo studio analizzato [10] composto da sei unità singole ATEG (ATEG\_su) disposte in parallelo rispetto ai fumi. In particolare ogni unità comprende 34 moduli termoelettrici (TEM) configurati in due rami paralleli per aumentare la conducibilità termica (di 8 e 9 singoli TEM) ciascuno collegato elettricamente in serie per aumentare la tensione di esercizio. I TEM sono composti da tellurio di bismuto e sono assemblati con cuscinetti in grafite sui lati di contatto per fornire una bassa resistenza termica. I lati caldi di questi moduli entrano in contatto con la superficie di uno scambiatore di calore in alluminio, attraverso il quale scorre il gas di scarico. I lati freddi sono a contatto con una piastra in alluminio con circuito di raffreddamento interno.

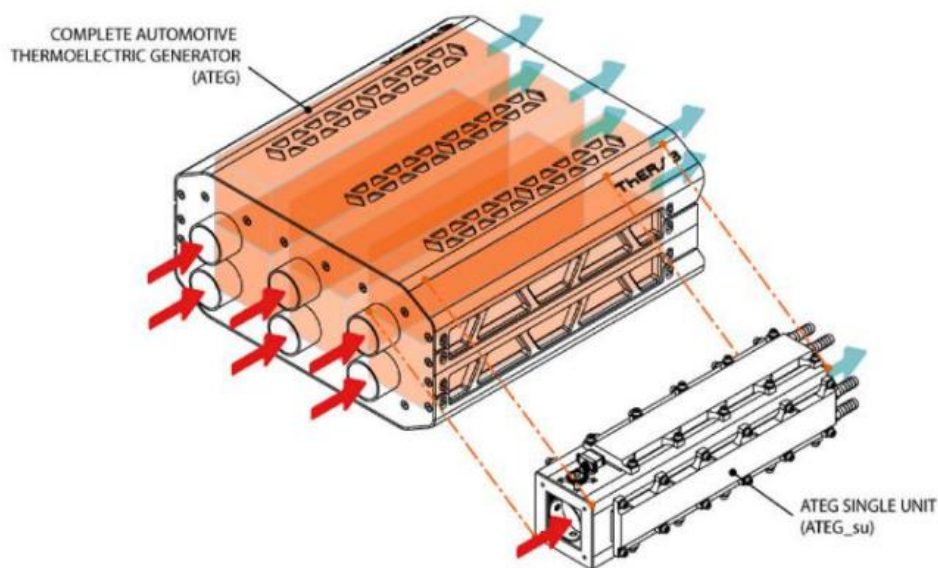


Figura 34. Schema dell'ATEG composto da sei unità singole.

La Figura 35 mostra uno schema del banco sperimentale utilizzato per testare la singola unità ATEG accoppiato ad un EGH da 12 kW controllato da un PID. In particolare è stato utilizzato un refrigeratore per simulare un vero sistema di raffreddamento del veicolo con sensori di temperatura, portata e pressione. Infatti i sistemi termoelettrici devono essere raffreddati per ottenere differenze di temperatura elevate tra i lati caldo e freddo dei moduli termoelettrici (TEM). Inoltre sono presenti: una pompa che ha il compito di muovere l'acqua attraverso le piastre fredde dell'ATEG, un sensore di

pressione differenziale che è stato utilizzato per registrare la controcompressione ATEG. Infine l'energia generata dall'ATEG è stata regolata e massimizzata da un convertitore e quindi immagazzinata in una batteria da 12V.

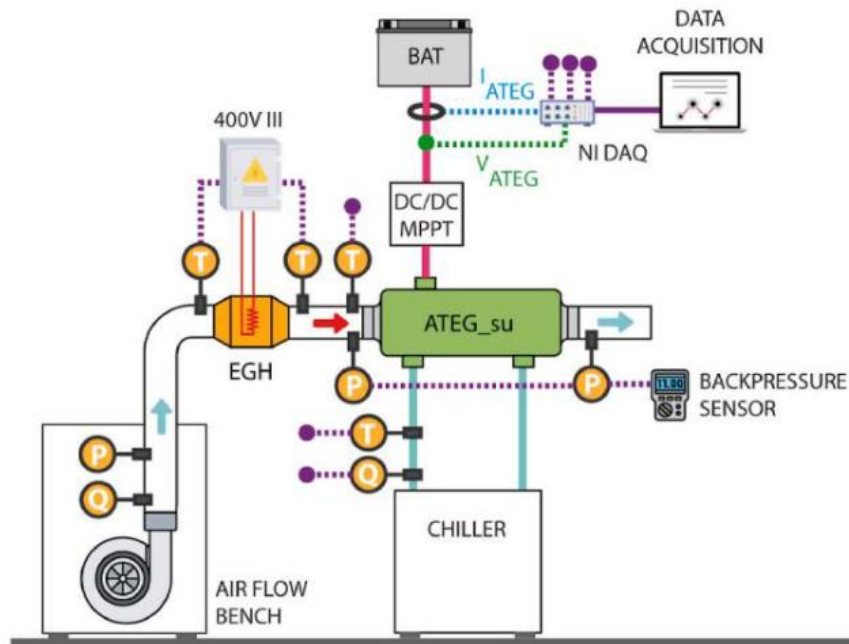


Figura 35. Schema del banco prova per l'ATEG.

### 5.7.2 Risultati prove:

La tabella 10 mostra la produzione netta di energia del prototipo testato in diverse condizioni reali. Quindi dalla tabella si può osservare che le basse temperature di scarico alla fine dell'ATS generano una modesta produzione di energia sull'ATEG, che, con l'aumento della temperatura dei gas di scarico o della portata massica, aumenta in modo esponenziale.

DRIVING CONDITION	Vehicle speed	Time*	ATEG inlet temperature (°C)	ATEG <sub>su</sub> inlet mass flow rate (kg/s)	ATEG <sub>su</sub> power generated (W)	ATEG power generated (W)	Hydraulic pump power (W)	ATEG net power generation $P_{ATEG}$ (W)
SUBURBAN	55 km/h (1000 rpm)	1,5% (4 min)	162	0.025	23	138	20	118
INTERURBAN	68 km/h (1250 rpm)	0% (0 min)	225	0.028	34	204	20	184
HIGHWAY	82 km/h (1500 rpm)	98.5% (262 min)	210	0.035	53	318	20	298

Tabella 10. Energia prodotta dall'ATEG nelle tre condizioni di guida considerate.

Una volta ottenute le prestazioni di entrambi, l'EGH e l'ATEG, è il turno di analizzare la capacità dell'intero sistema di essere energeticamente autosufficiente. Per garantire

che il sistema TATH possa alimentarsi autonomamente, l'energia consumata in fase di riscaldamento deve essere inferiore all'energia recuperata:

$$E_{\text{RISCALDAMENTO}} \leq E_{\text{RECUPERO}}$$

In particolare questa relazione si può scrivere come:

$$0 \leq P_{\text{ATEG\_HIGH}} t_{\text{HIGH}} + P_{\text{ATEG\_INT}} t_{\text{INT}} + (P_{\text{ATEG\_SUB}} - P_{\text{EGH}}) t_{\text{SUB}}$$

Dove  $P_{\text{ATEG\_HIGH}}$ ,  $P_{\text{ATEG\_INT}}$  e  $P_{\text{ATEG\_SUB}}$  sono la potenza recuperata dall'ATEG durante le tre condizioni di guida; e  $P_{\text{EGH}}$  è la potenza di riscaldamento dell'EGH in condizioni di guida suburbane. Infine  $t_{\text{HIGH}}$ ,  $t_{\text{INT}}$  e  $t_{\text{SUB}}$  sono i tempi di percorrenza del veicolo rispettivamente su percorsi autostradali, interurbani ed extraurbani.

Sostituendo i valori di potenza con quelli ottenuti si possono ottenere le relazioni temporali limite che soddisfano il bilancio energetico presentate nella tabella 11 sottostante.

Scenario	Condition to emit NOx below ISC limit for suburban conditions	Percentage of time spent in suburban conditions with respect to mission time to emit NOx below Euro limit [%]
Euro VI	$0 \leq 298t_{\text{HIGH}} + 184t_{\text{INT}} - 5722t_{\text{SUB}}$	$r_{\text{SUB\_MAX}}^{\text{EURO VI}} < 3.1-4.9\%$
Euro VII	$0 \leq 298t_{\text{HIGH}} + 184t_{\text{INT}} - 7402t_{\text{SUB}}$	$r_{\text{SUB\_MAX}}^{\text{EURO VII}} < 2.4\%-3.9\%$

Tabella 11. Rapporti temporali per emettere NOx al di sotto delle normative Euro VI e VII in condizioni suburbane.

Quindi, considerando la condizione di guida più critiche suburbana, per raggiungere il limite di NOx Euro 6 è necessario che il veicolo trascorra un massimo del 3,1% del tempo di missione in questa condizione di guida. Tale valore si ottiene considerando che la fase di recupero è limitata esclusivamente alla guida extraurbana. Se la fase di recupero è limitata alle condizioni autostradali, tale valore è leggermente superiore, raggiungendo un massimo del 4,9%. Ciò può essere spiegato dalla maggiore potenza recuperata in condizioni autostradali rispetto allo stesso periodo in condizioni interurbane. Di conseguenza un percorso che mescola autostrada e guida interurbana darebbe un valore intermedio compreso tra il 3,1% e il 4,9%. Lo stesso accade per lo scenario Euro 7, dove questo massimo si mantiene tra il 2,4 e il 3,9%, a seconda delle condizioni di guida in fase di recupero. Questi risultati possono essere considerati accettabili visto che il veicolo in studio compirà perlopiù viaggi dove dominano le condizioni di guida autostradali e extraurbane.

Pertanto è stato dimostrato che il sistema ATEG preso in considerazione riesce a fornire l'energia necessaria all'EGH entro certi limiti di guida, evitando così la necessità di utilizzare un alternatore apposito con conseguente aumento del consumo di carburante.



## **5.8 Conclusioni:**

Grazie a questo studio è stato dimostrato che un sistema di post trattamento convenzionale riscaldato utilizzando un EGH da 5 kW alimentato da un ATEG è sufficiente per produrre un significativo abbattimento delle emissioni di NOx al di sotto del limite Euro 7. Inoltre questo sistema da 5 kW potrebbe funzionare alla sua massima efficienza di conversione catalitica del 95% indipendentemente dal regime di funzionamento del motore risolvendo in questo modo il problema di emissione di NOx ai bassi regimi. Infatti, come dimostrato precedentemente, con questo sistema l'urea può essere iniettata prima così che le reazioni catalitiche possano ridurre le emissioni durante il funzionamento a freddo.

## **5.9 ATEG per veicoli leggeri:**

A questo punto è necessario testare questa configurazione di ATEG+EGH anche su veicoli leggeri per verificare se riesce ad essere un sistema autosufficiente senza implicare un aumento del consumo di carburante.

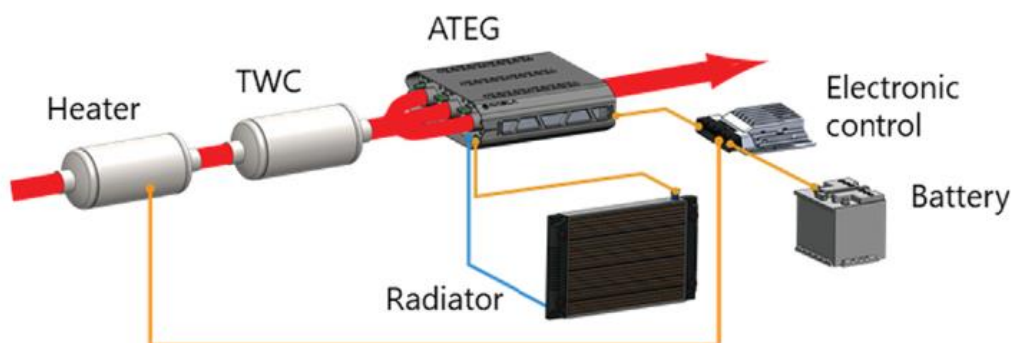


Figura 36. Schema del sistema EGH+ATEG. [6]

### **5.9.1 Sistema:**

Il sistema proposto dallo studio [6] preso in considerazione è raffigurato in figura 37, ed è composto da 34 TEM composti da tellurio di bismuto collegati elettricamente in serie e in due rami paralleli (vedi figura). In seguito i TEM sono disposti sulle superfici circostanti di uno scambiatore di calore in alluminio (elemento (4) in figura 4), attraverso cui passano i gas di scarico, e quattro piastre fredde in alluminio (elemento (2) in figura 4). Le dimensioni dell'ATEG sono 170x420x170mm (LxLxH) con un peso di 8 kg.

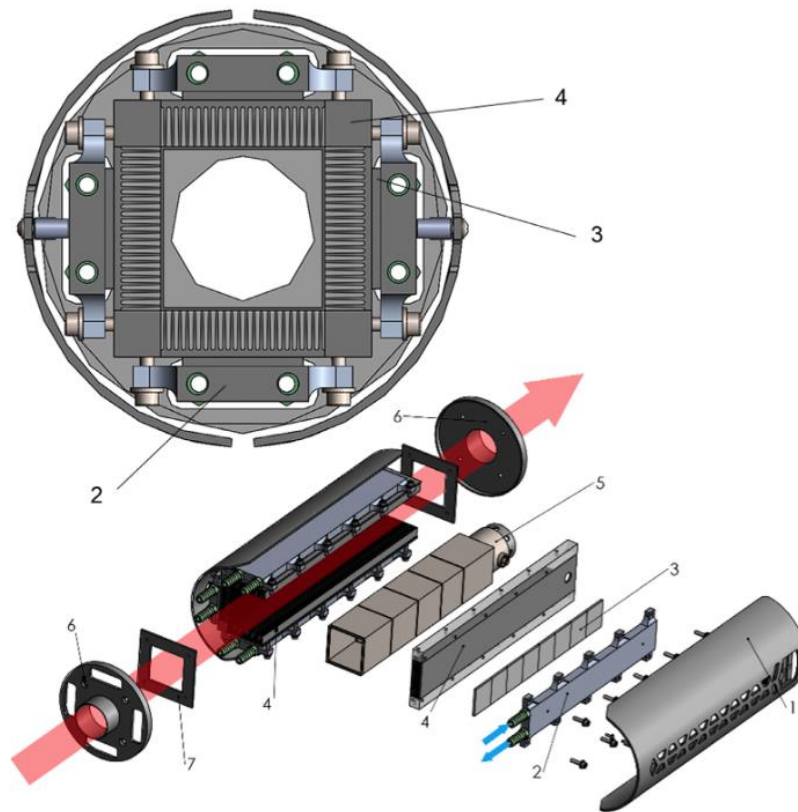


Figura 37. Esploso del prototipo: 1)coperchio, 2)piastre fredde, 3)moduli termoelettrici, 4)scambiatore di calore, 5)valvola a farfalla, 6) aspirazione e scarico fumi e 7)raccordo. (In rosso, i gas di scarico. In blu, l'acqua del sistema di raffreddamento).

Dunque il sistema consente ai gas di scarico di fluire dall'ingresso (6) all'uscita attraverso lo scambiatore di calore (4) se la temperatura del lato caldo del TEM non superi la temperatura massima consentita di  $230\text{ }^{\circ}\text{C}$  (vedere Figura 38a). Questa temperatura viene stabilita dal produttore dei moduli, per evitare che i TEM vengano danneggiati, e viene misurata nel punto situato tra lo scambiatore di calore (4) e i TEM (3). In questo caso tutti i gas di scarico passano attraverso lo scambiatore alettato (4) mentre la valvola a farfalla (5) rimane completamente chiusa. Invece nel caso in cui la temperatura lato caldo dei TEM superi i  $230\text{ }^{\circ}\text{C}$ , la valvola a farfalla (5) si apre per far uscire parte dei gas di scarico dall'ATEG senza passare attraverso lo scambiatore di calore (4), (vedere Figura 38b). Dunque questo design ATEG consente una protezione termica dei TEM e garantisce una temperatura costante del lato caldo qualunque siano le temperature dei gas di scarico. Successivamente per ottenere il massimo gradiente di temperatura, il lato freddo dei TEM viene refrigerato da un sistema di raffreddamento composto da una pompa, con un valore medio di potenza assorbita di  $20\text{ W}$ , e uno scambiatore di calore acqua-aria da  $3\text{ kW}$ . Il fluido refrigerante utilizzato è l'acqua, con una portata volumetrica costante di  $0,12\text{ l/s}$ , che scorre attraverso le piastre fredde (2).

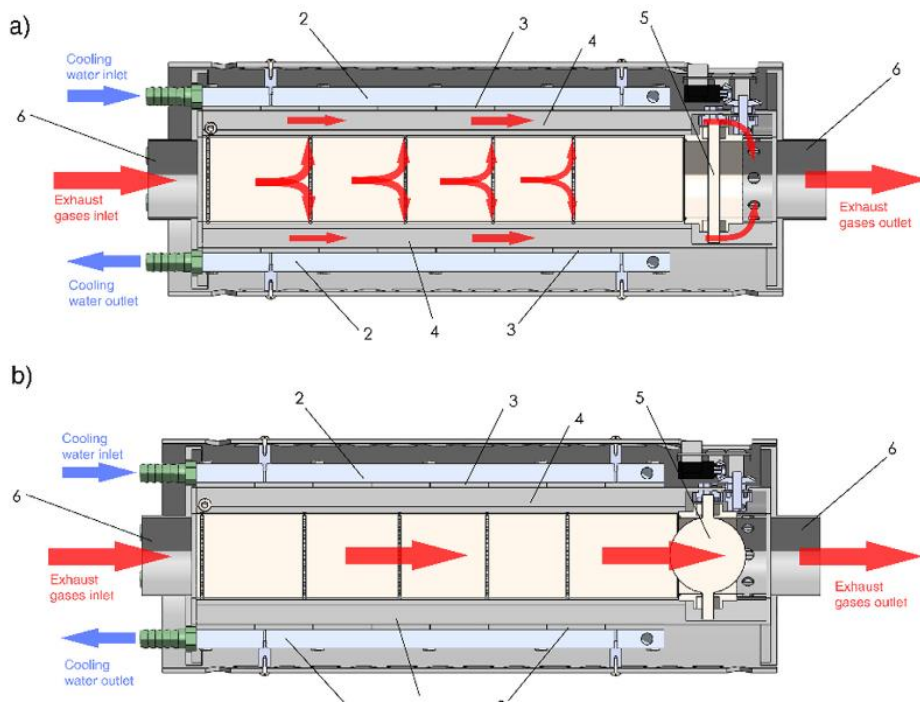


Figura 38. Sezione trasversale dell'ATEG. a) Posizione con valvola a farfalla completamente chiusa. b) Posizione con valvola a farfalla completamente aperta.

Come descritto precedentemente i TEM formano un array elettrico come mostrato in figura 39 composto da due rami in parallelo, con 17 unità ciascuno collegati in serie. Il sistema è stato definito in questo modo al fine di permettere di ottenere il miglior rapporto tra corrente e tensione per alimentare il convertitore DC/DC del PCU. Il PCU utilizzato è un Victron Bluesolar 100/35, e il suo scopo è quello di adattare la tensione oscillante generata dall'ATEG ad un segnale stabile a 12,8 V per caricare la batteria. Questa PCU è compatibile con le batterie Absorber Glass Mat (AGM) utilizzate in questo veicolo e la sua efficienza di conversione è dell'84%.

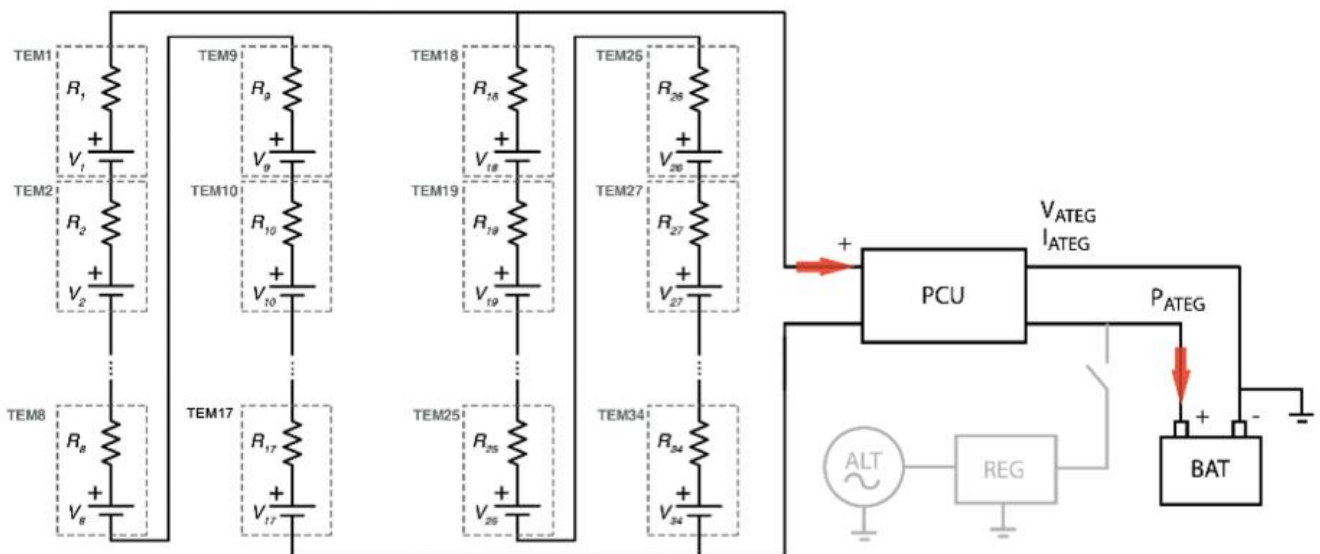


Figura 39. Schema elettrico dell'array di TEM.

### 5.9.2 Test:

Per valutare le prestazioni dell'ATEG in condizioni stazionarie e transitorie, sono state effettuate dallo studio [6] prove sperimentali su un banco prova a rulli usando come veicolo una BMW X1 sDrive18i le cui specifiche sono riassunte in tabella 12.

Parameter	Value
Maker	BMW
Model	X1 sDrive18i 6-speed Steptronic
Gearbox	Automatic
Max. rated power	100 kW (at 4400 rpm)
Max. rated torque	220 Nm (at 1250 rpm)
Cylinders	3

Tabella 12. Specifiche tecniche del veicolo testato.

Per condurre gli esperimenti, sono stati definiti i seguenti quattro regimi del motore allo stato stazionario impostando valori costanti di velocità e coppia del motore tipici di guida su strada.

1. 50 km/h
2. 80 km/h
3. 100 km/h
4. 120 km/h

Inoltre, l'ATEG è testato anche testato secondo la procedura di prova dei veicoli leggeri WLTP partendo da condizioni di motore freddo per simulare il problema dell'avviamento a freddo.

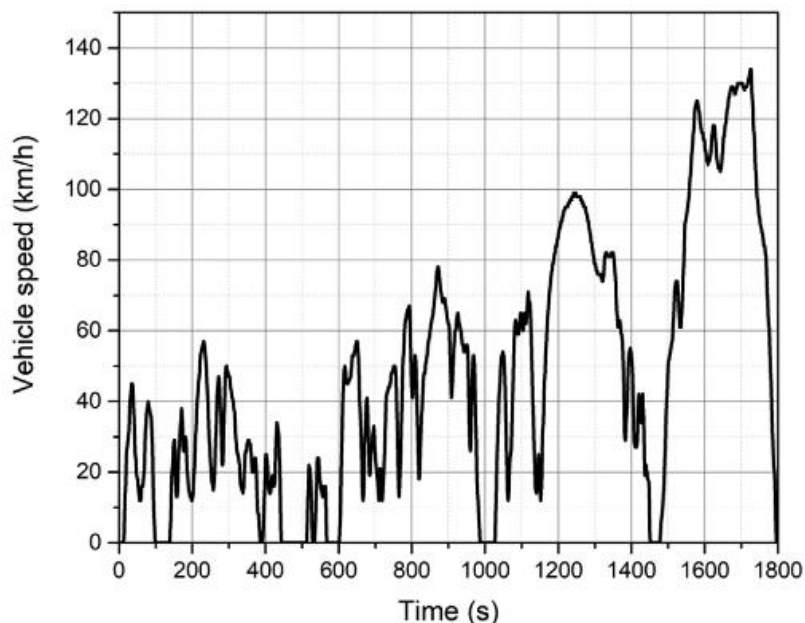


Figura 40. Ciclo WLTP.

Le grandezze acquisite sull'ATEG sono:

- Temperature di ingresso e di uscita dei gas di scarico ( $T_{EXH}$  e  $T_{EXH\_OUT}$ )
- Temperature di ingresso e uscita dell'acqua di raffreddamento ( $T_{REF}$  e  $T_{REF\_OUT}$ )
- Temperature lato caldo e lato freddo nel punto centrale dell'ATEG dei TEM ( $T_{HOT}$  e  $T_{COLD}$ )
- Tensione, corrente e potenza generata dall'ATEG ( $V_{ATEG}$ ,  $I_{ATEG}$  e  $P_{ATEG}$ )

### 5.9.3 Risultati test:

Innanzitutto è opportuno analizzare l'andamento delle temperature con la richiesta di carico imposta nelle varie prove tramite la figura 41 sottostante.

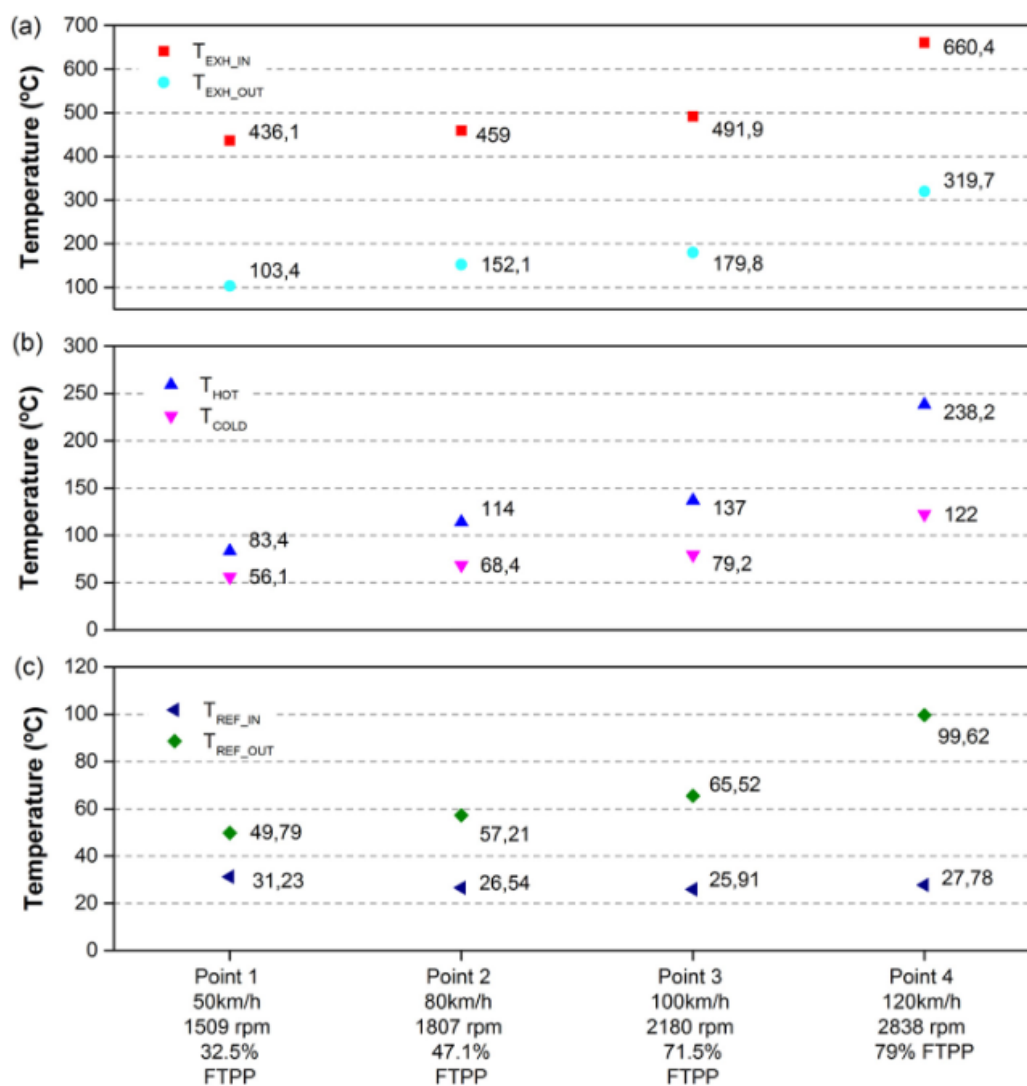


Figura 41. (a) temperature di scarico ATEG in ingresso e in uscita, (b) temperature TEM lato caldo e lato freddo nel punto ATEG centrale e (c) temperature in ingresso e uscita dell'acqua di raffreddamento.

Dalla figura 41a si nota che carichi del motore più elevati portano a temperature dei gas di scarico e portate più elevate; di conseguenza l'ATEG genera più energia. Questo può essere visto in Figura 41b, dove anche le differenze di temperatura sui TEM ( $T_{HOT} - T_{COLD}$ ) aumentano con il carico del motore. Di conseguenza temperature dei gas di

scarico più elevate portano a un flusso di calore più elevato attraverso i TEM; ad esempio si nota che per il punto 4 è necessaria una temperatura dei gas di scarico di 660,4°C per raggiungere la temperatura massima TEM lato caldo di 238,2°C.

Inoltre, quando si analizzano le prestazioni di un ATEG, è importante valutare l'impatto che il dispositivo provoca sulla perdita di contropressione. Questa è definita la pressione dei gas di scarico prodotta dal motore per vincere la resistenza idraulica del sistema di scarico. Se questo valore aumenta, il motore consuma più carburante perché deve investire più energia per pompare i gas fino allo scarico. Quindi per questo motivo è necessario progettare un ATEG con la minore perdita di carico possibile. In particolare la contropressione dipende dalla gravità dell'ostruzione provocata e dalla portata massica dei gas di scarico, e questi due valori sono mostrati in Figura 42. Il valore massimo di contropressione è di 45,81 mbar e può essere considerato entro i limiti accettabili.

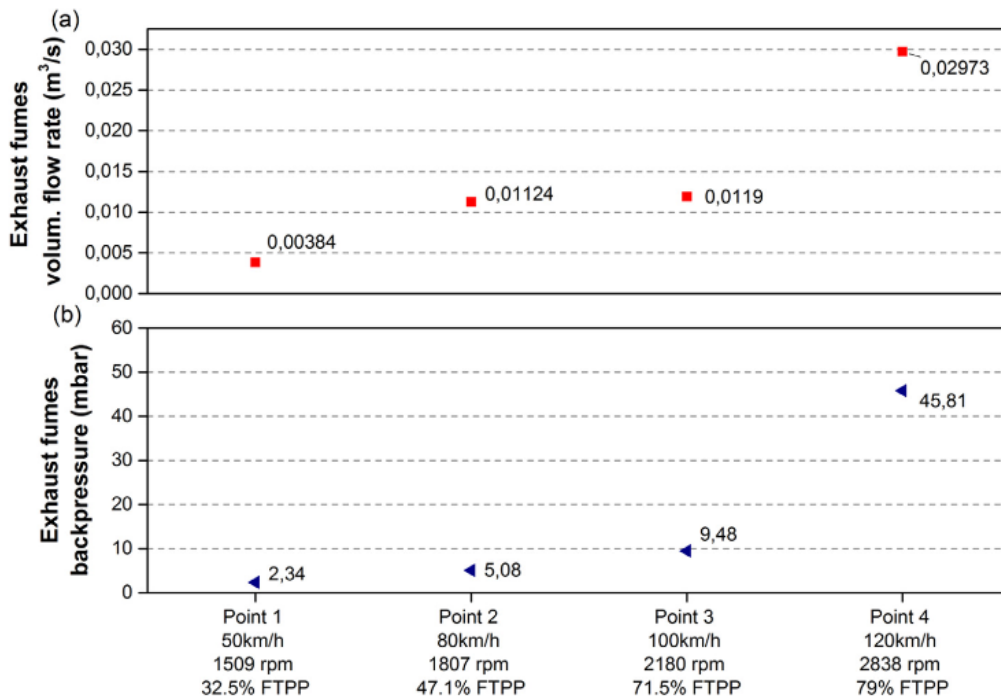


Figura 42. (a) portata volumetrica dei gas di scarico ATEG, (b) contropressione allo scarico ATEG.

Successivamente in figura 43 e 44 sono riportate le uscite elettriche generate dall'ATEG e le temperature TEM e di scarico durante il test WLTP.



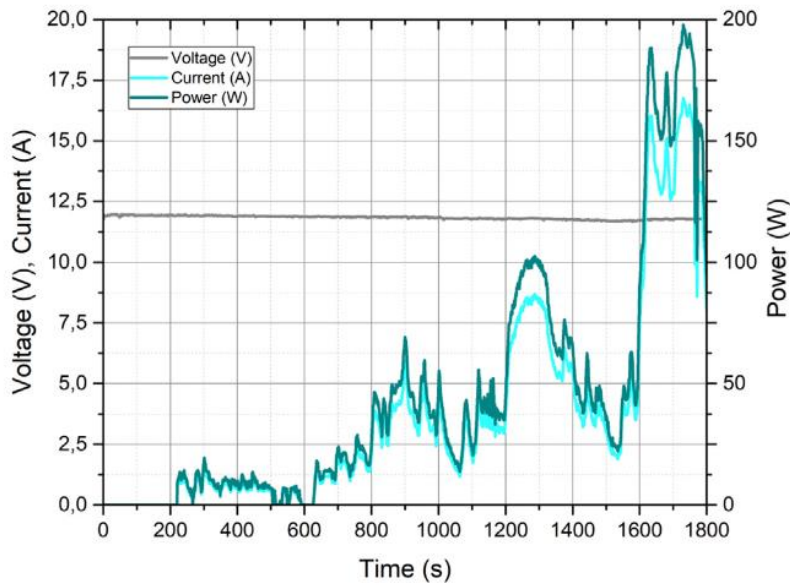


Figura 43. Uscite elettriche ATEG sotto un test di guida WLTC.

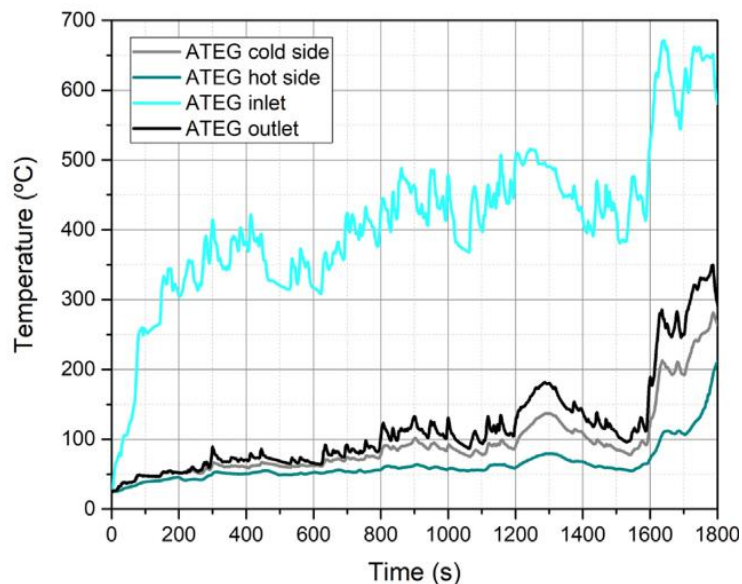


Figura 44. Andamento delle temperature di scarico in ingresso e in uscita dell'ATEG e delle temperature termoelettriche dei lati caldo e freddo nel punto ATEG centrale.

Si nota che la potenza massima, 197,77 W, viene generata a fine ciclo, durante il periodo extraurbano e questo punto corrisponde al gradiente di temperatura massimo dei TEM. Inoltre dalla figura 43 si nota che l'ATEG è in grado di recuperare fino a 22,5 Wh di energia in un ciclo WLTC e 98,9 Wh a una velocità costante di 120 km/h e identico periodo di tempo. In particolare la tabella 13 riassume i valori di potenza recuperata dall'ATEG nei vari punti di funzionamento considerando un lavoro di 1800s.



	Point 1 50 km/h (1800 s)	Point 2 80 km/h (1800 s)	Point 3 100 km/h (1800 s)	Point 4 120 km/h (1800 s)	WLTC (1800 s)
$P_{ATEG}$ (W)	38.65	76.38	101.09	197.77	*
Energy recovered (Wh)	19.3	38.19	50.5	98.9	22.5

Tabella 13. Produzione di energia da parte dell'ATEG.

Dopodiché nella figura 46 sono riportati gli andamenti di CO, HC, NOx e CO2 ottenuti nel test WLTC. Il motivo delle emissioni elevate di avviamento a freddo è legato alla temperatura del catalizzatore, in particolare la figura 45 mostra la temperatura del catalizzatore durante i primi 5 min del ciclo di guida. Si nota che la temperatura di esercizio del catalizzatore è inferiore a 350°C per i primi 2 min, e l'efficienza di conversione per questo periodo è molto piccola, circa il 40%.

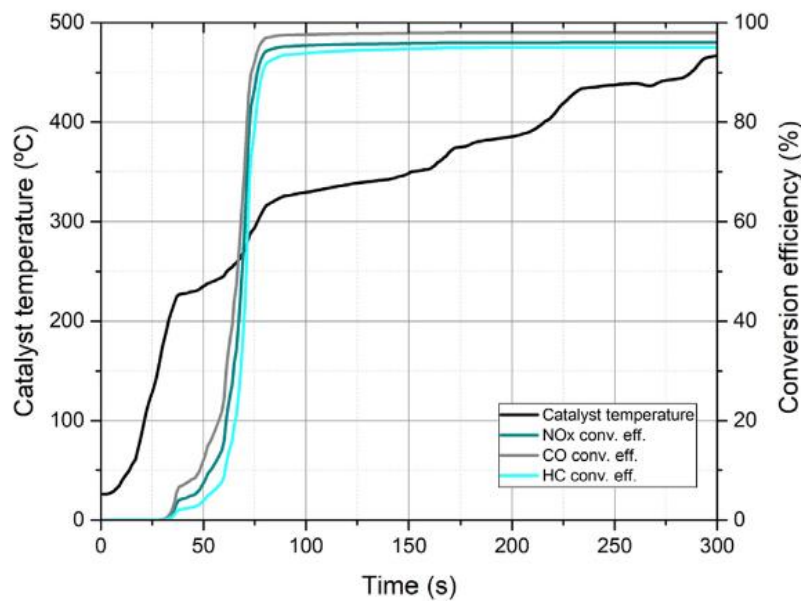


Figura 45. Temperatura del catalizzatore durante i primi 5 minuti del test di guida WLTC.

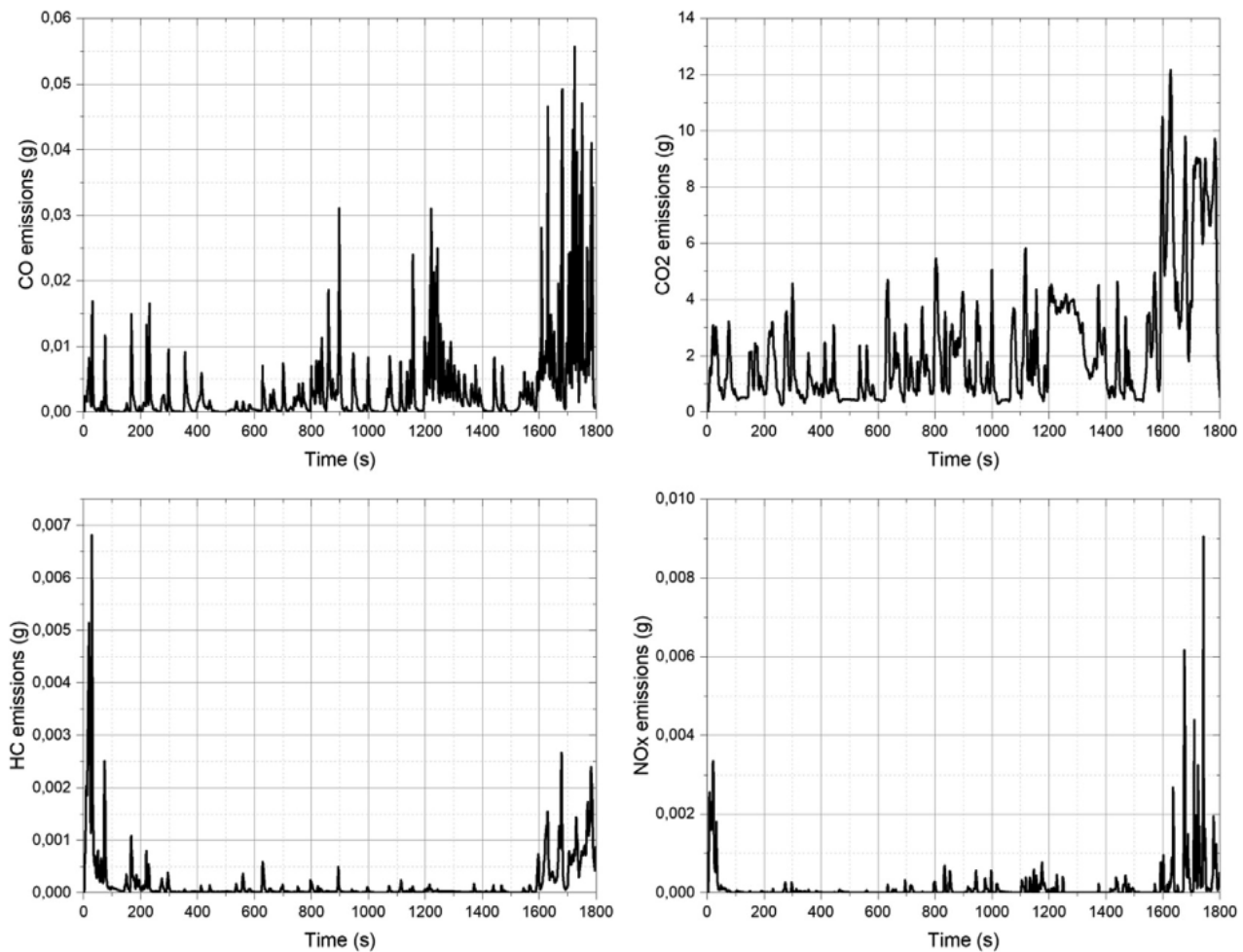


Figura 46. Andamento delle emissioni di CO, CO<sub>2</sub>, HC e NO<sub>x</sub> durante il test di guida WLTC.

A questo punto occorre calcolare nei primi 5 minuti del WLTC a freddo l'energia necessaria all'EGH per aumentare la temperatura dei gas di scarico, questa può essere calcolata utilizzando la seguente equazione:

$$P = m c_p (T_o - T_i)$$

Dove  $m$  è la portata massica del gas di scarico,  $c_p$  è il calore specifico a pressione costante dell'aria,  $T_o$  e  $T_i$  sono la temperatura di scarico di uscita e di ingresso del riscaldatore elettrico. Di conseguenza, l'energia necessaria all'EGH per raggiungere la temperatura dei gas di scarico di 350 °C è di 20,6 Wh. La soglia di temperatura di 350°C è selezionata per raggiungere un'efficienza di conversione del catalizzatore di almeno il 90%, corrispondente alla sua temperatura di attivazione.

Quindi se l'energia recuperata, mostrato in tabella 14, viene utilizzato per riscaldare il gas di scarico, può essere raggiunta la riduzione delle emissioni indicata in tabella 14. In quest'ultima le colonne rappresentano la quantità di emissioni inquinanti risparmiate dal sistema EGH quando l'ATEG ha recuperato energia durante 1800 s, alla velocità del veicolo specificata, e l'EGH l'ha utilizzata per riscaldare i gas di scarico fino a 350°C.

Cold start emissions WLTC	Point 1 50 km/h		Point 2 80 km/h		Point 3 100 km/h		Point 4 120 km/h		WLTC	
	(g)	%	(g)	%	(g)	%	(g)	%	(g)	%
NOx	0.0502	88	0.0536	94	0.0536	94	0.0536	94	0.0536	94
HC	0.1151	86	0.1229	91	0.1229	91	0.1229	91	0.1229	91
CO	0.4535	91	0.4840	97	0.4840	97	0.4840	97	0.4840	97
ATEG operation time (s)	1800		971		734		375		1644	
EGH and ATEG performance ratio	300:1800 (1:6)		300:971 (1:3.25)		300:734 (1:2.5)		300:375 (1:1.25)		300:1644 (1:5.48)	

Tabella 14. Influenza di EGH + ATEG sulla riduzione delle emissioni in un WLTC.

Al punto 3, ad esempio, utilizzando l'energia recuperata dall'ATEG, che ha operato per 1800 s a una velocità del veicolo di 50 km/h, per alimentare l'EGH è in grado di ridurre rispettivamente del 94%, 91% e 97% le emissioni di NOx, HC e CO di un WLTC con avviamento a freddo. Solo al punto 1, l'ATEG non è in grado di recuperare energia sufficiente per aumentare l'efficienza media del catalizzatore fino al 90%. In più per velocità del veicolo superiori gli ATEG tendono a lavorare meno, soprattutto al Punto 4 con un tempo di intervento di soli 375 s. Il motivo è che, per velocità del veicolo più elevate, i TEM subiscono gradienti di temperatura maggiori e l'efficienza ATEG aumenta in modo esponenziale con esso, e quindi l'ATEG genera maggiori quantità di energia per lo stesso periodo. Questo fenomeno spiega anche il rapporto di prestazione, che rappresenta la relazione del tempo di funzionamento tra ATEG e EGH. Nel punto 1, ad esempio, l'ATEG deve funzionare 6s per ogni secondo in cui funziona EGH (1:6). Il rapporto di prestazione migliora con velocità del veicolo più elevate, diventando solo 1:1,25 al punto 4. Con rapporti di prestazione così ridotti, EGH + ATEG potrebbe non solo essere utilizzato per risolvere il problema dell'avviamento a freddo, ma anche per aumentare la temperatura dei gas di scarico quando sono al di sotto della temperatura di attivazione del catalizzatore.

Infine è importante sottolineare che la riduzione delle emissioni è stata calcolata considerando una soglia di temperatura di 350 °C, corrispondente alla temperatura di attivazione del catalizzatore. Nei punti 2, 3, 4 e WLTC, l'ATEG potrebbe recuperare maggiori quantità di energia se utilizzato più a lungo, il che significa che il riscaldatore potrebbe essere utilizzato per raggiungere temperature più elevate e aumentare la riduzione delle emissioni.

### **5.10 Conclusioni:**

In conclusione possiamo affermare che in condizioni stazionarie, l'energia massima recuperata è stata 98,9 Wh in 1800 s, corrispondenti a una velocità del veicolo di 120 km/h su strada pianeggiante e resistenza aerodinamica. Invece sotto il test WLTP, l'ATEG è stato in grado di raccogliere 22,5 Wh. In ognuno dei due casi, l'energia recuperata e utilizzata per riscaldare i gas di scarico rappresenta una riduzione delle emissioni relative all'avviamento a freddo superiore all'86%. In aggiunta nei casi più

favorevoli, che corrispondono ai regimi di velocità più elevati, si arriva ad una riduzione massima delle emissioni con avviamento a freddo del 97%. Successivamente è stato dimostrato anche che i rapporti di prestazione raggiunti in questo studio, EGH + ATEG potrebbe non solo essere utilizzato per risolvere il problema dell'avviamento a freddo, ma anche per aumentare la temperatura dei gas di scarico quando sono al di sotto della temperatura di attivazione del catalizzatore.

Dunque in questo capitolo è stata verificata l'efficienza di questo sistema nel risolvere i problemi considerati anche nei veicoli leggeri, e quindi può essere considerata un'alternativa valida per soddisfare la normativa Euro7.

## 6 Conclusioni finali:

Il presente elaborato si poneva come obiettivo la ricerca di nuove soluzioni tecnologiche di sistemi di post-trattamento al fine di rientrare nelle future normative Euro 7. In particolare lo studio mirava alla risoluzione del principale problema che le nuove normative vogliono risolvere, ovvero il funzionamento del motore alle basse temperature, a causa di avviamento a freddo, bassi carichi richiesti oppure basse temperature di funzionamento, che producono elevate emissioni di sostanze inquinanti rispetto alle condizioni di funzionamento a regime. Innanzitutto il problema è stato verificato e quantificato dai primi test su veicoli riportati che hanno confermato quanto detto precedentemente, infatti si è potuto notare che le sostanze inquinanti erano emesse soprattutto quando i gas di scarico si trovavano a basse temperature.

Quindi, dopo aver quantificato il problema, sono state studiate due soluzioni per risolverlo.

Per prima cosa sono stati riportati i risultati dello studio [7] che prevede il confronto tra varie configurazioni di sistemi di post-trattamento, tra cui alcune che prevedevano l'aggiunta di un elemento riscaldante elettrico. Dunque grazie a questo studio si è riusciti a trovare la migliore configurazione che ci permette di ridurre le emissioni del 60% fino al 70% rispetto a Euro 6d, ovvero quella con elemento riscaldante a 48V oppure utilizzando un NSC come primo blocco del sistema seguito dall'EH da 12V. D'altra parte va considerato anche che l'inclusione di un elemento riscaldante elettrificato implica un attento bilancio energetico sia dal lato propulsore che dal lato del veicolo che portano ad un aumento del consumo di carburante (per ovviare a questo problema entra in gioco la seconda soluzione).

Successivamente è stata presa in considerazione una prima soluzione che prevedeva l'introduzione nel sistema di un bruciatore [8]. Questo elemento ha come obiettivo preriscaldare il sistema e di mantenerlo sempre alla temperatura ottimale di funzionamento, ovvero alla temperatura a cui avvengono le reazioni chimiche di riduzione o di ossidazione nei vari elementi di cui è composto, anche durante il funzionamento del motore e quando quest'ultimo si trova alle condizioni critiche di bassa temperatura. I test riportati con questa strategia hanno portato alla conclusione che il preriscaldamento accoppiato al funzionamento del bruciatore durante l'avviamento a freddo del motore fornisce un riscaldamento significativo del DOC e del DPF, che porta all'attivazione del catalizzatore SCR entro i primi 100 secondi abbattendo quindi le emissioni anche subito dopo l'accensione del motore.

Infine l'ultima strategia presa in considerazione è quella di immettere nel sistema di post-trattamento convenzionale un riscaldatore elettrico (EGH) e un generatore di recupero (ATEG), al fine di riuscire a creare una soluzione autosufficiente dal punto di vista energetico [6-9-10]. Infatti dai test con solo EGH è emerso il problema del rifornimento di energia aggiuntiva necessaria per questo elemento che il veicolo non poteva sostenere. Dunque, per ovviare alla soluzione di aggiungere un alternatore aggiuntivo per fornire tale energia, che comporterebbe ad un aumento del consumo di carburante, è stata testata la strategia di aggiungere un ATEG allo scarico che recuperasse il calore dei gas in uscita per convertirlo in energia elettrica da fornire all'EGH. Questa soluzione si è rivelata efficace dai test riportati per i veicoli pesanti, anche se entro certi limiti di guida urbana (circa il 4% del viaggio), considerati però accettabili vista la prevalenza di tratti di autostrada e strade extraurbane nei viaggi di questi veicoli. Inoltre nello studio [6] è stato riscontrato un effetto positivo anche per i veicoli leggeri, dove l'energia recuperata e utilizzata per riscaldare i gas di scarico permette un abbattimento delle emissioni relative all'avviamento a freddo superiore all'86%, fino al 97% nelle condizioni più favorevoli di regimi di velocità più elevati.

In conclusione, grazie ai risultati ottenuti nei vari studi presi in considerazione, è possibile considerare entrambe le strategie valide per risolvere il problema presentato e per riuscire a soddisfare i limiti imposti dalla nuova normativa Euro 7. Però va sottolineato che la soluzione con bruciatore richiederà anche una pompa dell'aria per proteggere il riscaldatore e il DOC dai danni termici e per spingere l'aria calda nel sistema di post-trattamento. Pertanto, l'aggiunta di tutti questi sistemi aggiuntivi per consentire il preriscaldamento con un bruciatore può essere vista come un sistema a prova di futuro per l'inevitabile transizione verso un approccio completamente elettrico alla gestione termica dei gas di scarico.

## 8 Bibliografia

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

[2] Zisis C. Samaras, Anastasios Kontses, Athanasios Dimaratos, and Dimitrios Kontses, Andreas Balazs, Stefan Hausberger, Leonidas Ntziachristos, Jon Andersson, Norbert Ligterink, Paivi Aakko-Saksa, Panagiota Dilara; “A European Regulatory Perspective towards a Euro 7 Proposal”. SAE Technical paper, 2022-37-0032.

[3] ICCT’s COMMENTS AND TECHNICAL RECOMMENDATIONS ON FUTURE EURO 7/VII EMISSION STANDARDS, <https://theicct.org/sites/default/files/eu-commission-euro-7-and-VI-may2021.pdf>

[4] Euro 7: Europe’s chance to have clean air. [https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/09/2021\\_09\\_Euro\\_7\\_cars\\_vans\\_policy\\_paper.pdf](https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/09/2021_09_Euro_7_cars_vans_policy_paper.pdf)

[5] Prof. Zisis Samaras, Prof. S. Hausberger, Dr. G. Mellios; “Preliminary findings on possible Euro 7 emission limits for LD and HD vehicles”. <https://circabc.europa.eu/sd/a/fdd70a2d-b50a-4d0b-a92a-e64d41d0e947/CLOVE%20test%20limits%20AGVES%202020-10-27%20final%20vs2.pdf>

[6] A. Massaguer b, T. Pujol, M. Comamala, E. Massaguer; “Feasibility study on a vehicular thermoelectric generator coupled to an exhaust gas heater to improve aftertreatment’s efficiency in cold-starts”, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431119339870?via%3Dihub>

[7] Giuseppe Previtero, Claudio Ciaravino, Paolo Ferreri, Chiara Pozzi, and Stefano Cantore, James Romagnolo, Rahul Mital; “Aftertreatment Layouts Evaluation in the Context of Euro 7 Scenarios Proposed by CLOVE Abstract.” SAE Technical Paper, 2022-37-0008.

[8] Thomas Harris, Raphael Bellard, Matthew Muhleck, and Guenter Palmer; “Pre-Heating the Aftertreatment System with a Burner”. SAE Technical paper, 2022-01-0554.

[9] Joan Ximinis, Albert Massaguer and Eduard Massaguer; “NO<sub>x</sub> Emissions below the Prospective EURO VII Limit on a Retrofitted Heavy-Duty Vehicle”. <https://dugidoc.udg.edu/bitstream/handle/10256/20482/NOxEmissions.pdf?sequence=1>



[10] J. Ximinis, A. Massaguer, E. Massaguer; “Towards compliance with the prospective EURO VII NO<sub>x</sub> emissions limit using a thermoelectric aftertreatment heater”.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X22004282?via%3Dihub>