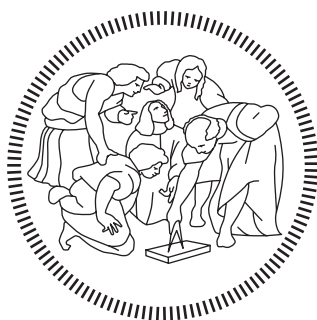


POLITECNICO DI MILANO

Scuola di Ingegneria Industriale e dell'Informazione

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica – Energy Engineering



Progettazione e ottimizzazione di sistemi di post trattamento dei gas di scarico per motori Diesel mild-hybrid

Relatore: Prof. Augusto DELLA TORRE

Tesi di Laurea Magistrale di:

Andrea GHELFA
Matr. 883954

Anno Accademico 2017 – 2018

Ringraziamenti

Voglio approfittare della stesura della mia tesi di laurea per ringraziare le persone che hanno contribuito al raggiungimento di questo traguardo.

Ringrazio il mio relatore, il professor Augusto Della Torre, per il suo aiuto, i suoi insegnamenti e la sua grande disponibilità.

Ringrazio la mia ragazza Eleonora, la mia sorellina Giada, gli amici di una vita e quelli che lo sono diventati nel corso degli anni, per i piacevoli momenti trascorsi insieme e per il sostegno che hanno saputo darmi in diverse situazioni.

In fine ringrazio in particolar modo i miei genitori Sonia e Maurizio, senza i quali non sarei potuto arrivare fin qui, la mia cara nonna Patrizia, i miei zii Roberta e Diego e tutti i famigliari che mi sono stati vicino.

Indice

Ringraziamenti	3
Indice	5
Sommario	7
Abstract	9
1. Introduzione.....	11
1.1 Emissioni nei motori Diesel	11
1.2 Veicoli Diesel MHEV (Mild-Hybrid Electric Vehicles)	12
1.3 Quadro normativo di riferimento	14
1.4 Dati di progetto.....	17
2. Cenni teorici sulla modellazione Axisuite	20
2.1 Axicat.....	20
2.1.1 Bilancio di massa e quantità di moto: calcolo delle cadute di pressione nel componente	21
2.1.2 Bilancio energetico delle fasi solida e gassosa	23
2.1.3 Bilancio delle specie: reazioni e scambio di massa	27
2.1.4 Trasporto di massa e reazioni superficiali	27
2.1.5 Trasporto di massa e reazioni “intralayer”	28
2.2 Reazioni chimiche superficiali.....	29
2.2.1 Reazioni non reversibili	29
2.2.2 Reazioni reversibili.....	30
2.2.3 Reazioni di storage	31
2.3 Axiheat	31
2.3.1 Scambio termico	31
2.3.2 Perdite di pressione nel componente	33
2.3.3 Iniezione di una corrente gassosa nel componente.....	33
2.4 Axitrap	34
2.4.1 Bilancio di massa e quantità di moto: calcolo delle cadute di pressione nel componente	34
2.4.2 Bilancio energetico delle fasi solida e gassosa	36
2.4.3 Filtraggio dei gas combusti.....	37
3. Configurazione base.....	41
3.1 Risultati ottenuti.....	43
4. Configurazioni avanzate	49
4.1 Configurazione con sistema di riduzione degli NO_x	49
4.1.1 Risultati ottenuti con dosaggio stechiometrico: $\alpha = NH_3/NO_x = 1$	52

4.1.2	Risultati ottenuti con un dosaggio ricco in ammoniacca: $\alpha = NH_3/NO_x = 1.5$...	64
4.2	Configurazione con EHC.....	75
4.2.1	Risultati ottenuti con potenza elettrica in ingresso costante: $P_{el} = 2 \text{ kW}$	77
4.2.2	Risultati ottenuti con potenza elettrica all'EHC modulare con la temperatura in ingresso al SDPF.....	90
4.2.3	Risultati ottenuti con potenza elettrica all'EHC lineare con la temperatura in ingresso al SDPF: Configurazione finale.....	98
4.2.4	Configurazione finale: Gestione e analisi del sistema su una serie di cicli NEDC consecutivi.....	107
5.	Conclusioni.....	113
6.	Proposte di futuri sviluppi.....	116
	Indice delle figure.....	119
	Indice dei grafici.....	119
	Indice delle tabelle.....	122
	Bibliografia	123

Sommario

Negli ultimi decenni, i veicoli a motore a combustione interna sono stati e sono tutt'ora oggetto di svariate normative dettate dall'Unione Europea con lo scopo di ridurre il loro impatto ambientale. La tendenza negli anni è stata infatti quella di ridurre progressivamente i valori massimi ammissibili relativi ad inquinanti gassosi e particolato emessi dai veicoli, definendo parallelamente dei nuovi standard relativi ai cicli di prova sui quali misurarli. Quest'insieme di restrizioni emanate definiscono le così dette "Classi Euro". Nell'elaborato si vuole mostrare come in questo contesto sia dunque necessario lo sviluppo di un opportuno sistema di post trattamento dei gas di scarico, nella fattispecie in uscita da un motore Diesel di un veicolo leggero di cilindrata pari a 2200cc. Dopo una prima fase di verifica relativa all'appartenenza alla classe Euro 4 della configurazione base dell'ATS (After Treatment System), è stato effettuato un graduale processo di implementazione componentistica e di ottimizzazione del sistema avente lo scopo di ottenere una linea di post-trattamento grazie alla quale venissero rispettate le più recenti limitazioni dettate dalla classe Euro 6. Come si vedrà, la configurazione finale del sistema risulta esser particolarmente interessante nel caso in cui il veicolo sfrutti la tecnologia mild hybrid (MHEV).

In un primo momento, nella configurazione di partenza, costituita da filtro antiparticolato (DPF) e catalizzatore ossidante (DOC), mediante il quale vengono abbattuti il monossido di carbonio e gli idrocarburi incombusti presenti nei gas di scarico, vi è stata l'introduzione di un sistema di riduzione degli ossidi di azoto con iniezione di ammoniaca gassosa (SDPF e SCR) e un'unità ASC dedicata all'abbattimento dell'eventuale ammoniaca residua all'uscita dell'ATS, ottenendo, dopo un'ottimizzazione del dosaggio di ammoniaca, la conformità alle normative Euro 5. Con lo scopo di ottenere dei risultati in linea con i limiti dettati dalla classe Euro 6, successivamente, all'ingresso del sistema è stata inserita una sezione elettricamente riscaldata del catalizzatore ossidante (EHC), in modo da innalzare la temperatura dei gas esausti e quindi l'efficienza di abbattimento. Il vantaggio di allocare un componente come l'EHC su di un veicolo mild hybrid risiede nel poter sfruttare l'energia recuperata nel corso della fase di frenata rigenerativa per soddisfarne la richiesta elettrica. Dopo un'analisi relativa alla strategia di regolazione dell'input energetico all'EHC, è stata ottenuta una configurazione finale di ATS di classe Euro 6, con consumi di carburante piuttosto contenuti, in linea con quelli di un veicolo Diesel ordinario e di classe Euro 5.

Parole chiave: *Sistema di post trattamento dei gas di scarico, filtraggio, reazioni catalitiche, abbattimento degli inquinanti, Diesel, mild hybrid.*

Abstract

In the last three decades, the European Committee has introduced a lot of limits to regulate the pollutant's emissions caused by internal combustion engine's vehicles. These regulations are summarized in categories called "Euro". During the design process, it is shown how the after treatment system of a 2.2 l Euro 4 Diesel engine must be developed to gain the target given by the most recent regulations, in order to respect the given maximum pollutants limits. It can be observed that the final after treatment system configuration is particularly interesting if on a mild hybrid vehicle (MHEV).

The initial Euro 4 layout was made of a Diesel Oxidation Catalyst (DOC), able to oxidize unburnt hydrocarbons and CO, and a Diesel Particulate Filter only. In the first part of the design process, in the ATS have been included a Selective Diesel Particulate Filter (SDPF) and a Selective Catalyst Reduction unit (SCR) with ammonia injection able to cut down the nitrogen oxides, and an Ammonia Slip Catalyst (ASC) able to convert the in excess ammonia at the outlet of the system, by obtaining an Euro 5 ATS layout. Then, to gain a further increase in the system efficiency, an Electrically Heated Catalyst (EHC) has been introduced at the inlet of the system to increase the exhaust gases temperature and so the pollutants conversion efficiencies. This last layout (Euro 6), on a mild hybrid vehicle, has the advantage to exploit the energy stored during the regenerative braking phase, and not only the power produced by the engine. Finally it has been studied a strategy to keep low pollutants emissions by minimizing the fuel consumption due to the EHC power supply. The result is an after treatment layout for a mild hybrid Diesel engine able to respect the limits given by Euro 6 regulations, with no further fuel consumption respect to the Euro 5 Diesel layout.

Key words: *exhaust gases after treatment system, filtering, catalytic reactions, pollutant's abatement, Diesel, mild hybrid.*

1. Introduzione

1.1 Emissioni nei motori Diesel

In particolar modo dopo la commercializzazione del sistema di alimentazione del combustibile Common Rail avvenuta alla fine degli anni '90, il motore Diesel si è diffuso sempre più nel settore automobilistico, fino ad occupare circa la metà del mercato.

Nonostante le politiche odierne si stiano muovendo per limitarne l'utilizzo, è importante ricordare che l'interesse di avere dei motori a combustione interna a ciclo Diesel, rispetto a quelli a ciclo Otto (benzina), nasce principalmente dal maggiore rapporto di compressione raggiungibile, e quindi il maggior rendimento termodinamico. Ciò significa che, a pari consumo di combustibile, con un Diesel si ricaverà una maggior potenza utile o, dualmente, a pari potenza erogata dal motore, si avrà un minor consumo, che implica anche una minor quantità di anidride carbonica rilasciata in ambiente.

Tuttavia, il motore Diesel presenta delle problematiche importanti per quanto concerne l'inquinamento atmosferico, problematiche che derivano dalla combustione della miscela aria-combustibile all'interno del cilindro.

Si tratta di un processo derivante dall'ignizione spontanea della carica causata dalle elevate pressioni e temperature che si manifestano nella camera di combustione verso la fine della corsa d'aspirazione del pistone. L'ignizione avviene dopo un certo ritardo dall'inizio dell'iniezione del combustibile: durante tale intervallo di tempo detto "ignition delay", si forma una miscela ricca ed eterogenea di combustibile e aria nella zona circostante lo spray iniettato, la quale sarà la prima ad essere coinvolta nel processo di combustione. Nel frattempo, il combustibile ancora allo stato liquido evapora e diffonde nell'aria, dando luogo ad una zona di miscela magra, coinvolta nella fase di "fiamma diffusiva", durante la quale, grazie all'elevata disponibilità di ossigeno, si raggiungono valori di temperatura più importanti. In fine, una volta terminata l'iniezione, segue la fase di "burn out", durante la quale viene completata la combustione degli idrocarburi, prima dello scarico dei gas esausti.

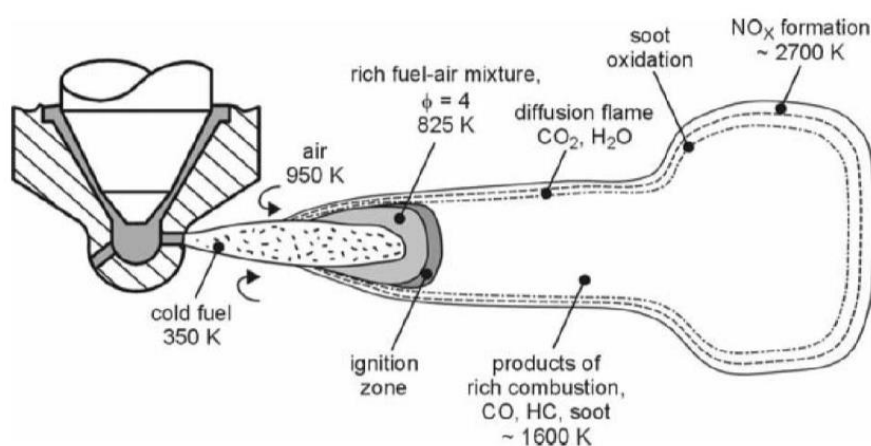


Figura 1: Schematizzazione del processo di combustione.

Le principali sostanze inquinanti derivanti dal processo brevemente descritto e che si trovano all'interno dei gas scaricati dal motore sono:

- Monossido di carbonio (CO): frutto di un'incompleta combustione degli idrocarburi avente luogo durante la prima fase ricca del processo, quando vi è un'insufficiente quantità di aria per ottenere anidride carbonica (CO_2) soltanto come prodotto delle reazioni d'ossidazione. Nella seconda parte della combustione, grazie all'abbondanza di comburente e le elevate temperature, una parte di CO viene convertita a CO_2 . Tuttavia il processo di successiva ossidazione è sempre meno importante di quello di formazione e questo comporta che il monossido di carbonio sia un'inquinante sempre presente nei gas di scarico.
- Idrocarburi incombusti (UHC): anch'essi derivano da un'incompleta ossidazione del combustibile avente luogo nella zona circostante lo spray. Inoltre, a causa dello strato limite termico a ridosso delle pareti raffreddate della camera, qui si ha il fenomeno d'estinzione della fiamma, e pertanto una parte degli idrocarburi non viene coinvolta nel processo di combustione, venendo successivamente espulsa dal cilindro insieme ai gas esausti.
- Ossidi di azoto (NOx): gli ossidi di azoto formati nella camera di combustione sono principalmente i così detti " NOx termici", legati alle elevate temperature che si manifestano durante la fase diffusiva della combustione, quando vi è una grande disponibilità di aria comburente.
- Particolato (PM): la formazione delle particelle carboniose che si trovano in grande quantità nei gas combusti dei motori Diesel è dovuta al tipo di iniezione e dal conseguente fenomeno di combustione che ne deriva. Il particolato nasce infatti dal riscaldamento ad alte temperature degli idrocarburi nel cuore dello spray di combustibile iniettato, i quali, non venendo a contatto con l'aria comburente, non possono essere ossidati.

Data la forte dipendenza della quantità degli inquinanti allo scarico del motore dal rapporto tra quantità di comburente e combustibile $\alpha = m_{aria}/m_{combustibile}$, e quindi dal rapporto d'equivalenza $\phi = \alpha_{stechiometrico}/\alpha$, uno dei modi principali di limitare l'effetto del motore sull'ambiente si basa sull'ottimizzazione di tale parametro di progetto a seconda dei punti di funzionamento del motore.

Tuttavia, per limitare l'inquinamento atmosferico si necessita di un sistema di post trattamento dei gas combusti (ATS: After Treatment System), di cui nell'elaborato saranno mostrati ed approfonditi i componenti e diverse configurazioni.

1.2 Veicoli Diesel MHEV (Mild-Hybrid Electric Vehicles)

Con lo scopo di limitare i consumi di combustibili fossili e le relative emissioni dovute alla movimentazione stradale, negli ultimi anni è iniziato un processo di progressiva elettrificazione dei veicoli. Oltre alla nascita di veicoli elettrici progettati con l'idea di sfruttare fonti d'energia rinnovabile, o comunque una produzione di potenza centralizzata e più efficiente per caricare le batterie a bordo di essi, si è pensato anche di adottare delle soluzioni ibride motore termico-elettrico.

L'interesse dell'elaborato è relativo in particolare al così detto mild-hybrid (MHEV), il quale si vuole brevemente descrivere per capirne le potenzialità.

Un veicolo MHEV vede l'impiego di un motore termico, al cui albero è connesso, per mezzo di una trasmissione a cinghia, un alternatore-starter (BAS: Belt Alternator Starter), il quale, in particolari

situazioni di marcia, è in grado di fungere da motore e recuperare così una quantità d'energia stoccabile in una batteria agli ioni di litio.

In particolare, il vantaggio dato dalla tecnologia risiede nel recupero dell'energia che andrebbe persa durante le fasi di decelerazione del veicolo (frenata rigenerativa): sia nelle fasi in cui il guidatore sta effettivamente frenando, sia in quelle situazioni nelle quali il veicolo procede a velocità piuttosto significative e semplicemente viene tolto il piede dall'acceleratore (veleggiamento). Il motore viene quindi immediatamente acceso ogni qual volta il conducente richieda potenza pigiamento sull'acceleratore. Il motore termico durante il processo di recupero in fase di veleggiamento e start & stop si spegne, e da qui il risparmio in termini di consumi ed emissioni. Altro vantaggio in questi termini è dato ovviamente dallo sfruttamento dell'energia immagazzinata nella batteria per soddisfare la potenza richiesta dagli ausiliari, quando possibile.

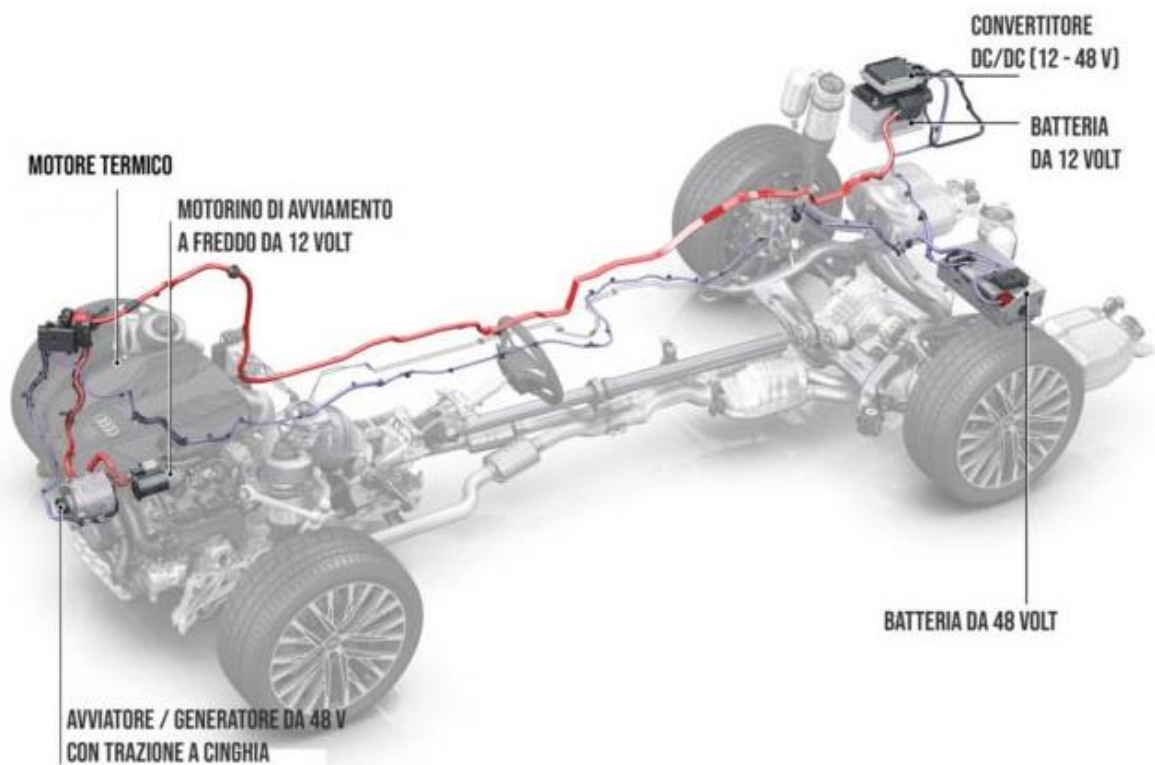


Figura 2: Schema componentistico MHEV.

Si noti dalla figura sopra riportata che quello adottato è un sistema a 48 V: in tal modo, rispetto al caso a 12 V, si minimizzano le perdite per effetto Joule durante la trasmissione della potenza recuperata alla batteria dedicata.

In conclusione, rispetto ad un veicolo a motore a combustione interna classico, la tecnologia MHEV permette un risparmio di carburante fino al 15%, da cui ne deriva anche una riduzione di anidride carbonica emessa in ambiente, e una minor quantità di inquinanti da abbattere all'interno del sistema di post trattamento dei gas combusti.

1.3 Quadro normativo di riferimento

A partire dal 1991 l'Unione Europea ha emanato una serie di direttive finalizzate a ridurre l'inquinamento ambientale prodotto dai veicoli; nascono così le cosiddette classi Euro, che si occupano principalmente di limitare sotto certi valori soglia le quantità di inquinanti emessi dai veicoli circolanti sulle strade.

Per standardizzare i risultati da confrontare con le limitazioni dettate dalle normative, sono stati adottati dei cicli di prova ben definiti:

- **NEDC: New European Driving Cycle**

Con la 91/441/CEE, nota come “Direttiva Consolidata sulle Emissioni”, si introdusse il ciclo UDC + EUDC (Urban Driving Cycle + Extra Urban Driving Cycle), detto anche NEDC (New European Driving Cycle). Nella sua versione più aggiornata del 1997, questo era costituito da quattro cicli consecutivi di simulazione di guida urbana (UDC), per un totale di 780 secondi, ed un tratto finale della durata di 400 secondi con lo scopo di simulare un tratto di guida su di una strada extraurbana (EUDC), dove si raggiungevano velocità massime di 120 km/h. La durata complessiva del ciclo era quindi di 1180 secondi, per una distanza totale percorsa pari a 11 km. La misurazione iniziava con motore e a temperatura ambiente (circa 20-30 °C).

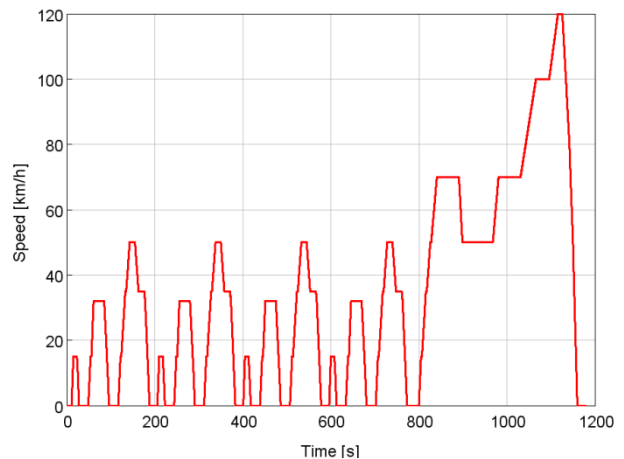


Grafico 1: Profilo di velocità del ciclo di omologazione NEDC.

- **WLTP (o WLTC): Worldwide harmonized Light Duty vehicle Test Procedure (or Cycle)**

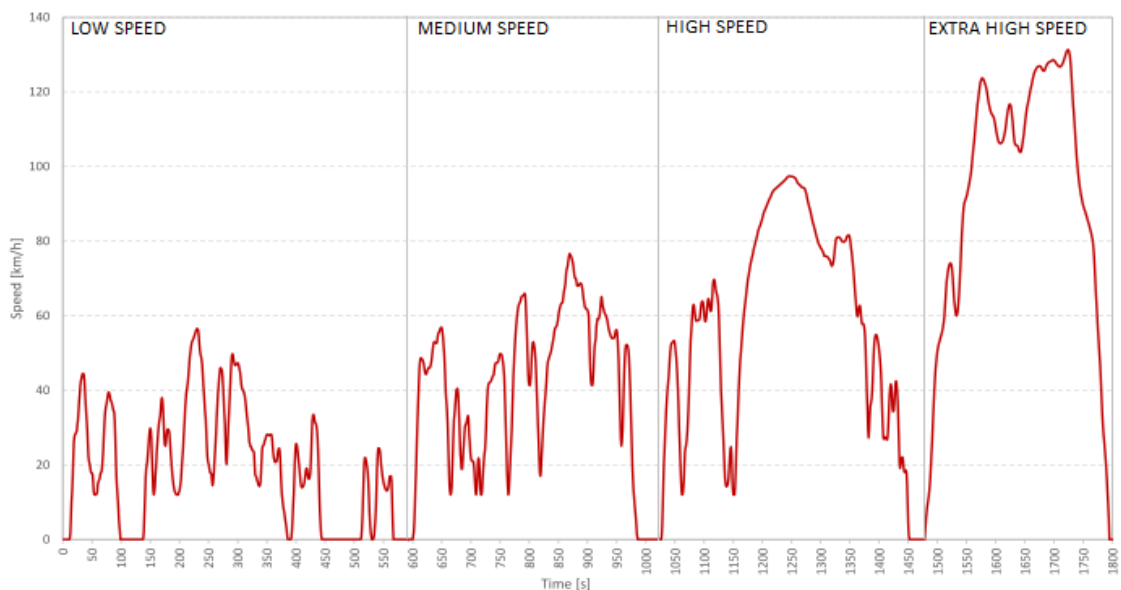


Grafico 2: Profilo di velocità del ciclo di omologazione WLTP per veicoli di Classe 3.

Data l'obsolescenza del NEDC, legata in particolar modo a velocità e accelerazioni troppo lente rispetto ai valori di guida su strada, il ciclo di prova a partire da settembre 2017 è stato rimpiazzato da un nuovo test al banco: il WLTP.

I suoi standard sono stati definiti in maniera differente a seconda della classe di appartenenza basatasi sul rapporto PMR (Power to Mass Ratio [kW/ton]). Si ha dunque la distinzione in veicoli di Classe 1 ($PMR \leq 22$), Classe 2 ($22 < PMR \leq 34$) e Classe 3 ($PMR \geq 34$), alla quale appartengono veicoli leggeri come le comuni automobili.

Le principali differenze rispetto al NEDC sono la maggior durata della prova (da 1180 a 1800 secondi per un totale di 23.25 km) e il profilo di velocità del veicolo, suddiviso in quattro differenti tratti (Grafico 2). La velocità media del ciclo sale da 34 a 46.5 km/h e quella massima da 120 a 131 km/h.

- **RDE: Real Driving Emission**

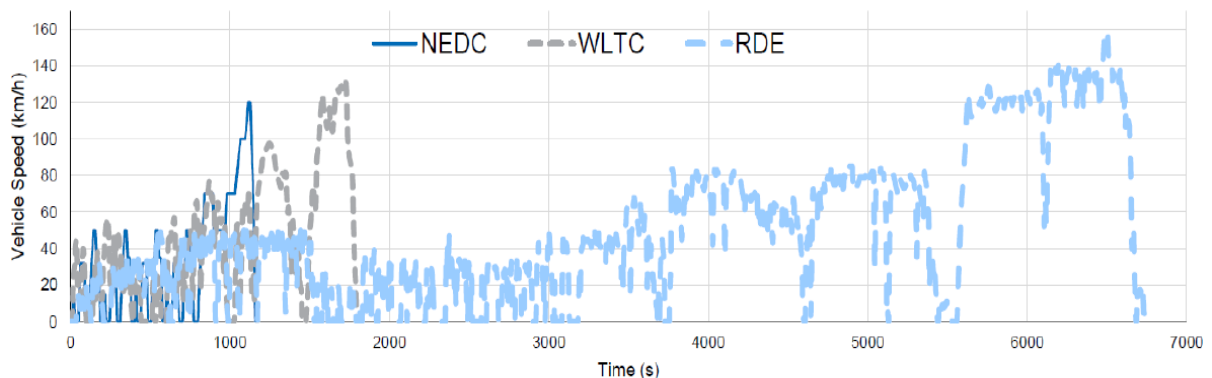


Grafico 3: Confronto tra i profili di velocità di NEDC, WLTC e un esempio di prova RDE.

Un ulteriore step nella misurazione dei dati provenienti dai gas di scarico dei veicoli proviene dalla prova RDE. Con essa si verifica che i veicoli mantengano basse emissioni anche nelle condizioni di guida reali su strada. Il test RDE non sostituisce la prova di laboratorio WLTP, ma la integra. Durante la prova, a differenza di NEDC e WLTP che erano prove svolte al banco, il veicolo viene guidato su tratti di strade urbane (bassa velocità), strade rurali (velocità media) e autostrade (alta velocità), comprendendo quindi anche l'effetto di altitudini e temperature differenti, un carico utile aggiuntivo e i tratti di strada in salita e discesa.

Per misurare le emissioni d'inquinanti durante la guida su strada, i veicoli che effettuano il test sono dotati di sistemi di misurazione portatili (PEMS: Portable Emissions Measurement System) che forniscono un monitoraggio completo in tempo reale dei principali inquinanti emessi dall'auto. I dati raccolti vengono analizzati per verificare che le condizioni al contorno della prova RDE siano state rispettate e che le emissioni si mantengano entro i limiti previsti dalle regolamentazioni.

Le soglie da non superare sono definite come quelle previste nella prova di laboratorio WLTP, moltiplicato per i così detti fattori di conformità (CF): coefficienti ideati per tener conto del margine di errore della strumentazione, la quale non misura allo stesso livello di accuratezza e ripetibilità di quella utilizzata nella prova in laboratorio. L'obiettivo futuro è quello di minimizzare la differenza nei risultati ottenuti dalle due prove, e quindi ridurre a 1 il fattore di conformità.

Detto ciò, si sintetizzano in Tabella 1 le restrizioni sulle quantità di inquinanti emesse nel caso di veicoli leggeri a motore diesel introdotte nel corso degli anni e classificate come Euro 1-2-3-4-5-6. Le quantità d'inquinanti riportate si riferiscono al test NEDC.

LIMITAZIONI DIESEL - LEGGERI						
	Valida da	CO [mg/km]	UHC+NOX [mg/km]	PM [mg/km]	NOX [mg/km]	PN [-]
EURO 1	01/92	-	970	140	-	-
EURO 2	01/96	-	700	80	500	-
EURO 3	01/00	-	560	50	250	-
EURO 4	01/05	500	300	25	250	-
EURO 5	09/09	500	250	5	180	6×10^{12}
EURO 6a	09/14	500	170	5	80	6×10^{12}
EURO 6b	09/14	500	170	5	80	6×10^{12}

Tabella 1: Limitazioni date dalle normativi fino alla EURO 6b

Ovviamente, la tendenza negli anni è stata ed è tutt'ora quella di abbassare i valori limite degli inquinanti. Uno dei metodi principale per il perseguimento di tale scopo è lo sviluppo di sistemi di post trattamento dei gas esausti. Per questo motivo, con l'avvento di nuove classi Euro nate dalle normative introdotte, si sono resi necessari degli importanti interventi sull'ATS. Tra questi, l'introduzione di un filtro antiparticolato (DPF), necessario per il passaggio dai 50 mg/km imposto dall'Euro 3 ai 25 mg/km dell'Euro 4, e l'utilizzo di un sistema SCR o di una trappola LNT per ottenere un abbattimento degli ossidi di azoto tale da poter passare da 250 a 180 mg/km (da Euro 4 a Euro 5). Notare come a partire dall'Euro 5, oltre al limite in massa, sia stato introdotto un numero massimo di particelle (PN) emesse pari a 6×10^{12} .

Lo standard Euro 6 si distingue in Euro 6a, 6b, 6c, 6d-temp. Queste classi differiscono sia in termini di valori soglia d'inquinanti, sia per i cambiamenti relativi al ciclo di guida sul quale vengono effettuate le misurazioni. Mentre Euro 6a e 6b si riferiscono al ciclo NEDC, a partire da settembre 2017, con la nascita della nuova categoria Euro 6c il WLTP ha sostituito l'obsoleto NEDC. Inoltre, per Euro 6d temp e 6d è prevista l'aggiunta di una prova su strada (RDE), i cui risultati relativi alle quantità d'inquinanti emessi devono essere moltiplicati per il Fattore di conformità prima di essere confrontati con i valori in Tabella 1.

Nelle seguenti tabelle sono sintetizzate le nuove legislazioni Euro 6c, d-temp e d:

Normativa	Euro 6c	Euro 6d-temp	Euro 6d
Test	WLTP	WLTP+RDE	WLTP+RDE
Fattore di conformità	-	2.1; 1.5 per PN	1.5
Inizio obbligo rispetto norma per nuove Immatricolazioni	dal 1/09/2018	dal 1/09/2019	dal 1/01/2021
Data ultima immatricolazione possibile con la norma	31/08/2019	31/12/2020	da definire

Tabella 2: Tempistiche e differenze tra le classi Euro 6c, 6d-temp e 6d.

LIMITAZIONI DIESEL - LEGGERI					
	CO [mg/km]	UHC+NOX [mg/km]	PM [mg/km]	NOX [mg/km]	PN [-]
WLTP					
EURO 6c	500	170	4,5	80	6×10^{11}
WLTP + RDE					
EURO 6d-temp	1050	357	9,45	168	9×10^{11}
EURO 6d	750	255	6,75	120	9×10^{11}

Tabella 3: Limitazioni date dalle normative delle classi Euro 6c, 6d-temp e 6d.

Le limitazioni introdotte trattano inoltre l'emissione di anidride carbonica in atmosfera, che però esula dall'interesse dell'elaborato, e per tanto non verrà approfondita.

1.4 Dati di progetto

Il sistema di post trattamento dei gas combusti in fase di progettazione è da considerarsi allo scarico di un motore Turbo-Diesel di cilindrata 2.2 l, i quali dati sperimentali disponibili sono i risultati del ciclo NEDC (New European Driving Cycle). Come al punto precedente, il NEDC corrisponde al ciclo di prova al banco sul quale si è basato il controllo delle emissioni fino all'introduzione delle normative Euro 6b, quando venne poi sostituito dal più sofisticat test WLTP, del quale però non si dispone alcun dato utile per lo sviluppo del sistema in questione.

Dal test al banco sono date le specifiche dei gas combusti in ingresso al sistema, dati che possono essere sintetizzati graficamente come segue:

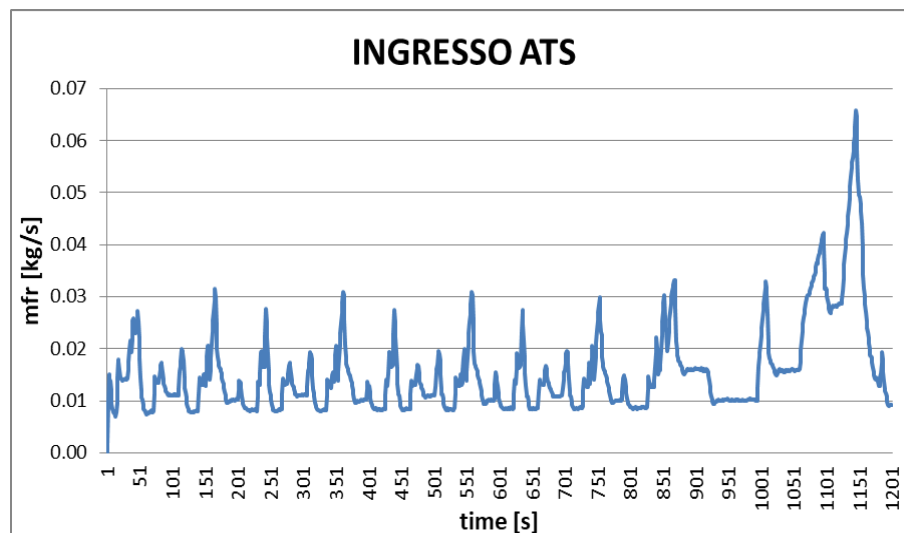


Grafico 4: Portata massica dei gas di scarico in ingresso all'ATS.

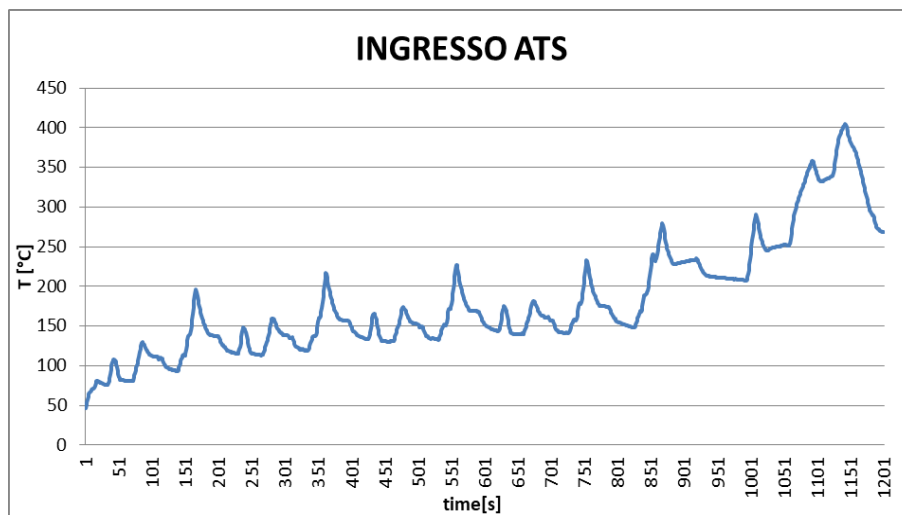


Grafico 5: Temperatura gas di scarico in ingresso all'ATS.

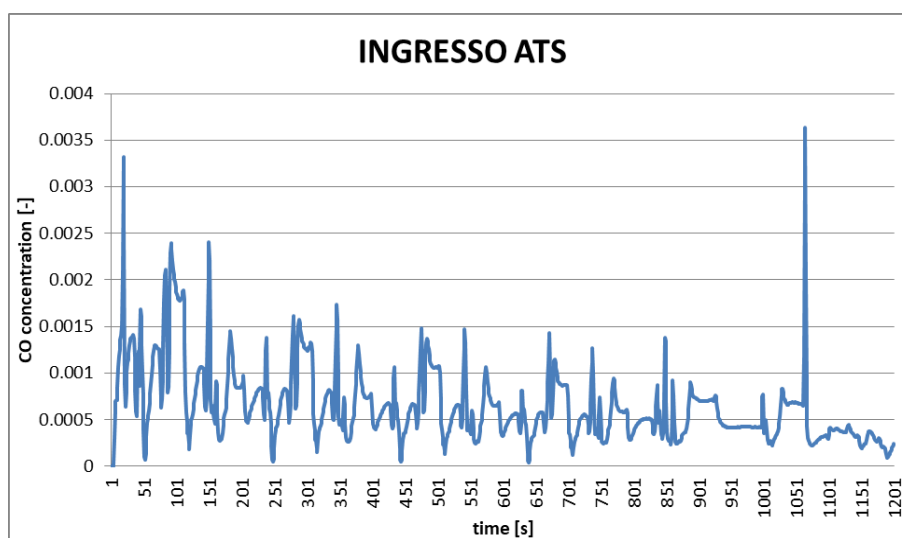


Grafico 6: Concentrazione di CO nei gas di scarico all'ingresso dell'ATS.

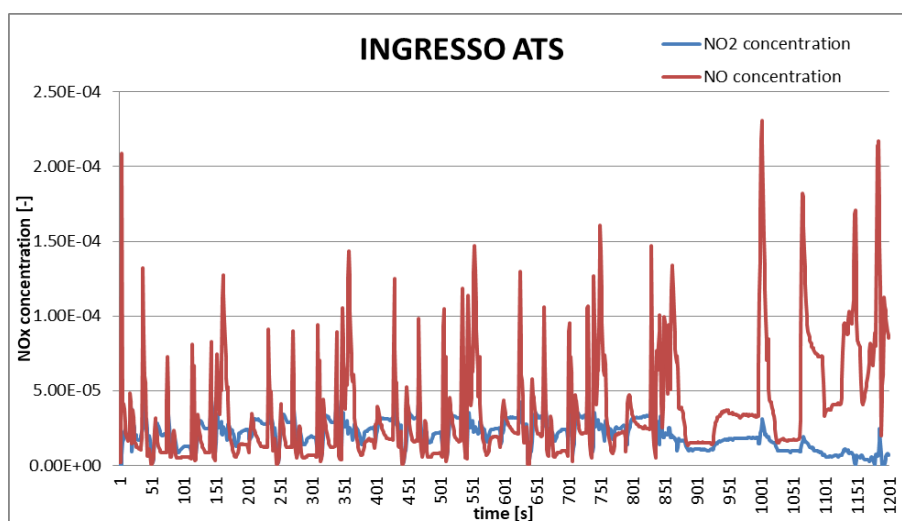


Grafico 7: Concentrazione di NOx nei gas di scarico all'ingresso dell'ATS.

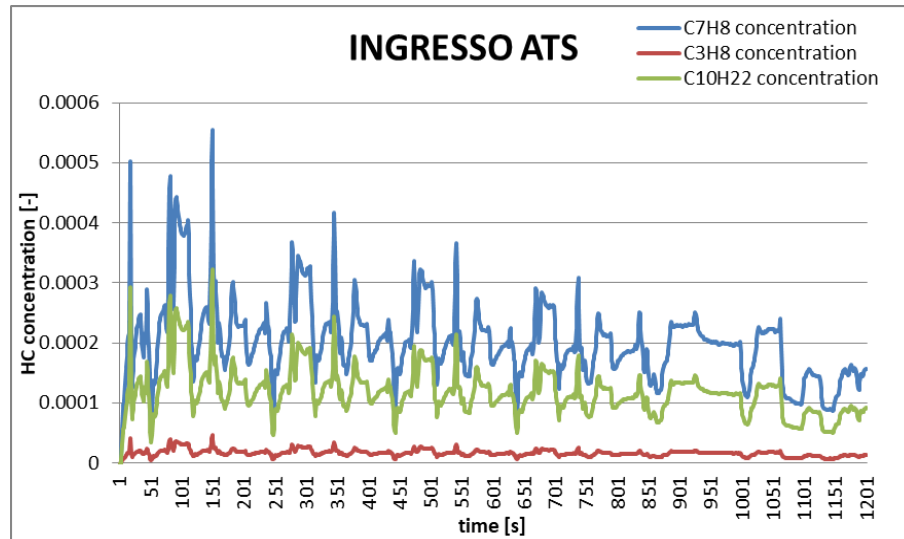


Grafico 8: Concentrazione di idrocarburi nei gas di scarico all'ingresso dell'ATS.

Sono inoltre date le specifiche tecniche dei singoli componenti adottati poi nella progettazione dell'ATS. Queste verranno riportate in seguito, quando si tratteranno nel dettaglio le diverse configurazioni del sistema di trattamento.

2. Cenni teorici sulla modellazione Axisuite

Quella relativa al sistema di post trattamento dei gas combusti in oggetto è una modellazione monodimensionale (1-D), dove quindi le grandezze d'interesse e i fenomeni di scambio termico e di massa sono studiati lungo la coordinata assiale del sistema, trascurando quindi gli effetti tridimensionali (nelle due dimensioni orizzontale e verticale) ed avendo quindi proprietà e grandezze relative ai gas esausti e alle fasi solide dei componenti costanti su ogni sezione del sistema.

Il software nel simulare il passaggio dei gas esausti attraverso il sistema di post trattamento dei gas di scarico adotta un passo temporale dell'ordine del decimo di secondo: questo significa che il profilo di portata dei gas combusti in ingresso al sistema non sia interessato dalle pulsazioni dovute a una diversa portata scaricata dal motore in funzione dell'angolo di manovella: è valida quindi l'ipotesi di stato quasi stazionario. Dal punto di vista computazionale, questo aspetto è fondamentale per lo studio di sistemi di questo tipo, nei quali si vogliono monitorare le grandezze d'interesse per lunghi archi temporali, dell'ordine delle decine di minuti.

Per descrivere come il software Axisuite modelli i diversi fenomeni che avvengono all'interno dell'ATS è necessario far riferimento ai principali componenti implementati nel programma:

2.1 Axicat

Si tratta del modello di catalizzatore, la cui struttura nel caso d'interesse è data da un substrato a nido d'ape con canali a geometria rettangolare, sui quali si trova uno strato di washcoat in cui v'è disperso il materiale catalitico. I parametri geometrici del componente sono definiti da:

- Densità dei canali (Cell density)
- Spessore del substrato w_w
- Apporto di washcoat (Washcoat loading [g/l]), per ricavare lo spessore di washcoat w_c
- Rapporto altezza/larghezza dei canali, se rettangolari

In questo modo la posizione all'interno dei canali è definita dalla funzione:

$$b(w) = \begin{cases} d + 2w, & w < 0 \\ d, & w \geq 0 \end{cases}$$

e dal parametro geometrico $f(w) = b(w)/d$.

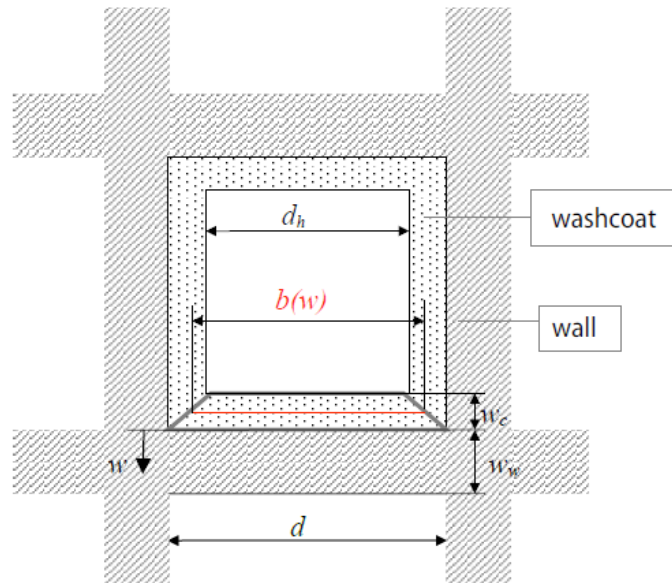


Figura 3: Sezione del canale per evidenziarne la stratigrafia

2.1.1 Bilancio di massa e quantità di moto: calcolo delle cadute di pressione nel componente

Dai bilanci di massa e quantità di moto è possibile risalire alla caduta di pressione totale sul catalizzatore. Nell'ipotesi che i fenomeni di trasporto di massa e le reazioni chimiche coinvolte avvengano in tempi molto minori rispetto ai fenomeni di instazionarietà del flusso in ingresso al componente, ovvero nell'ipotesi di avere una serie di stati quasi-stazionari, la perdita di carico totale dovuta al passaggio dei gas combusti attraverso il monolita viene così suddivisa e calcolata dal software:

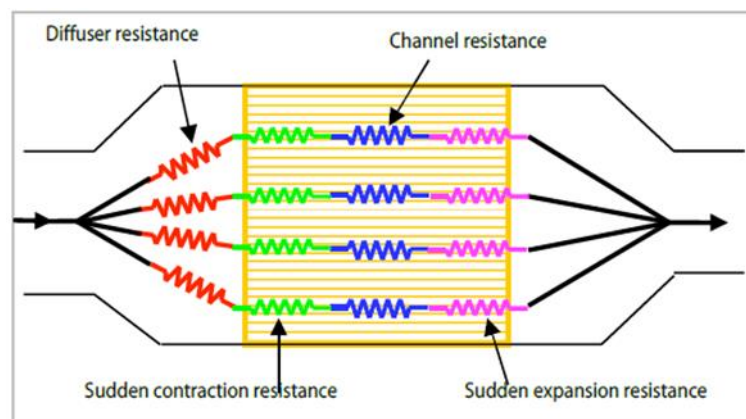


Figura 4: Circuito elettrico equivalente rappresentante le perdite di carico nel catalizzatore.

Perdita di pressione nel canale: perdite d'attrito

- Flusso laminare: $Re < 2300$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = - \frac{28.5 \mu v}{d_h^2}$$

dove:

$$v = \frac{\dot{m}}{\rho A_{monolita} \varepsilon}$$

v : velocità dei gas
 ε : frazione vuota del monolita rivestito
 μ : viscosità dinamica dei gas
 ρ : densità dei gas
 \dot{m} : portata massica dei gas

- Flusso turbolento: $Re > 3100$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\frac{f \rho v^2}{2d_h}$$

dove f (coefficiente d'attrito) è calcolato secondo la correlazione Swamee-Jain:

$$f = \frac{0.25}{\log^2 \left(\frac{e}{3.7d} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right)}$$

- Flusso in condizione di transizione turbolenta ($2300 < Re < 3100$) il software interpola linearmente i valori calcolati nei due precedenti modi.

Perdita di pressione concentrata in ingresso al monolita

Per ogni condizione di flusso, laminare, turbolento o in transizione turbolenta, la perdita di carico dovuta all'impatto del flusso all'ingresso della struttura a nido d'ape viene valutata come:

$$\Delta p_{conc} = C_{exp} DragCoef \rho \frac{(v)_{z=0}^2}{2}$$

Dove:

C_{exp} : costante unitaria di default, ma il cui valore può essere cambiato dall'utente per aggiustare il valore della perdita concentrata a seconda dell'importanza del fenomeno

$DragCoef$: Valutato in funzione del rapporto $A_2/A_1 = d_h^2 / (d + w_w)^2$, secondo il seguente grafico.

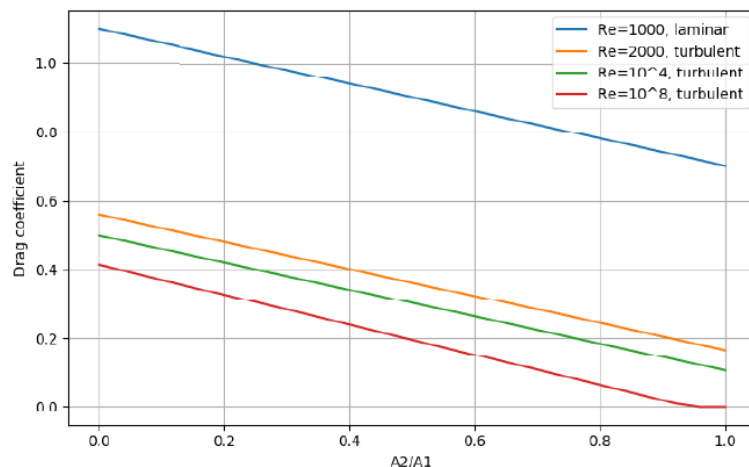


Grafico 9 Coefficiente di drag vs A_2/A_1 per ogni condizione di flusso.

Perdita di pressione concentrata in uscita al monolita

Per ogni condizione di flusso, la perdita di carico dovuta all'espansione del flusso gassoso all'uscita dai canali del componente è valutata come:

$$\Delta p_{esp} = C_{exp} \left(1 - \frac{d_h^2}{(d + w_w)^2} \right) \rho \frac{(v)_{z=0}^2}{2}$$

Perdita di pressione nel diffusore

Questo termine di perdita considera l'effetto dei fenomeni bidimensionali e tridimensionali (vortici, distacchi di vena ecc.) che si manifestano quando i gas attraversano il diffusore, ad ogni sua sezione i , grazie a un coefficiente semi empirico ζ_i , dipendente dalla sola geometria del diffusore.

$$\Delta p_{diff,i} = \frac{\zeta_i}{2} \left(1 - \frac{A_{in}}{A_{out}} \right) \frac{\dot{m}^2}{\rho_{in} A_i^2}$$

Perdita di pressione di Bernoulli

Si tratta della perdita di carico dovuta alla sola variazione della sezione di passaggio dei gas che attraversano il diffusore/collettore. Il termine risulta esser negativo nel caso in cui la sezione d'uscita sia minore di quella d'ingresso (collettore d'uscita).

$$\Delta p_{bernoulli} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{A_{out}^2} - \frac{1}{A_{in}^2} \right) \frac{\dot{m}_i^2}{\rho}$$

2.1.2 Bilancio energetico delle fasi solida e gassosa

Bilancio energetico fase solida

Il bilancio energetico della fase solida, nel caso monodimensionale, assume la seguente forma dell'equazione di conduzione del calore:

$$\rho_s C_{p,s} \frac{\partial T_s}{\partial t} = \lambda_{s,z} \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} + S$$

La soluzione dell'equazione restituisce il campo di temperatura nella fase solida del monolita, comprendente strato isolante e involucro, lungo la dimensione assiale z . Le proprietà dei materiali sono mediate sul volume, per tanto si ha che:

$$\rho_s C_{p,s} = \rho_w \varepsilon_w C_{p,w} + \rho_c \varepsilon_c C_{p,c} = \rho_w \varepsilon_w C_{p,w} + \widehat{m}_c C_{p,c}$$

dove:

$C_{p,w}$: calore specifico del substrato

ε_w : frazione superficiale del substrato rispetto alla sezione totale

$C_{p,c}$: calore specifico del washcoat

ε_c : frazione superficiale del washcoat rispetto alla sezione totale

\widehat{m}_c : apporto di washcoat (washcoat loading [kg/m^3])

Il termine $\lambda_{S,z}$ esprime la conduttività del solido nella direzione z e analogamente al discorso precedente si ha:

$$\lambda_{S,z} = \lambda_w \varepsilon_w + \lambda_c \varepsilon_c$$

dove:

λ_c : conduttività termica lungo z del washcoat

λ_w : conduttività termica lungo z del substrato

Il termine S di sorgente termica è espresso come $S = H_{conv} + H_{react} + H_{rad} + H_{el}$, e prende quindi in considerazione i contributi di:

- **Scambio termico convettivo con i gas fluenti nei canali**

Questo termine viene espresso secondo l'equazione:

$$H_{conv} = h s_F (T_g - T_s)$$

dove:

$h = Nu \lambda_g / d_h \left[\frac{W}{m K} \right]$: coefficiente di scambio termico convettivo

$s_F [m^2/m^3]$: Area lambita dal gas per unità di volume del catalizzatore

λ_g : conduttività dei gas esausti

In generale, il coefficiente di scambio termico convettivo viene calcolato sulla base del numero di Nusselt, determinato con opportune correlazioni implementate nel software, le cui espressioni variano a seconda della natura dello stato di moto dei gas combusti all'interno dei canali (moto laminare, turbolento o in transizione turbolenta).

Nella fattispecie, secondo la correlazione Hawthorn "locale":

$$Nu = \begin{cases} Nu_L [(1 + a_H Gz)^{b_H} - b_H a_H Gz (1 + a_H Gz)^{b_H - 1}], & Re < 2300 \\ \frac{\frac{f}{8} (Re - 1000) Pr}{1 + 12.7 \left(\frac{f}{8}\right)^{\frac{1}{2}} \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right)}, & Re > 3100 \end{cases}$$

dove:

$$b_H = 0.45$$

$$a_H = 0.095$$

$Nu_L = 2.976$ (canale a sezione quadrata): Nusselt nella regione di moto laminare pienamente sviluppato

$$Gz = \frac{d_h Re Pr}{z}$$
: Numero di Graetz

- **Calore assorbito/rilasciato dalle reazioni chimiche**

Il termine relativo alle reazioni che hanno luogo sulle pareti dei canali è dato da:

$$H_{react} = s_F \sum_k \left(\int_{-w_c}^{\frac{w_w}{2}} f_w R_w dw \right) \Delta H_k$$

dove:

R_w : velocità della k-esima reazione $\left[\frac{mol}{s m^3} \right]$
 ΔH_k : calore rilasciato dalla reazione k

Osservando il sistema di riferimento fissato sulla sezione rappresentata in Figura 3, si può osservare come l'espressione sopra riportata integri il calore assorbito da ogni reazione k su tutti gli strati infinitesimi di substrato e washcoat di ogni canale. La sommatoria, così scritta, permette quindi di calcolare il calore assorbito risultante da tutte le reazioni aventi luogo sulla parete.

- **Scambio termico radiativo tra le pareti dei canali**

Assumendo che le pareti si comportino come un corpo nero, il calore scambiato per irraggiamento tra le pareti dei canali risulta essere:

$$H_{react} = s_F \sigma \left(T_s^4 - \frac{\int_{channel} T_s^4 F dA}{A_{channel}} \right)$$

Il fattore di vista F varia a seconda della posizione assiale in cui viene effettuato il calcolo. Il termine considera anche lo scambio radiativo con le aperture all'ingresso e all'uscita dei canali, le quali temperature sono considerate pari a quelle del diffusore in ingresso, e del collettore in uscita.

- **Calore rilasciato da un dispositivo esterno**

Il software può modellare un input elettrico di potenza applicata o all'involucro, o allo strato isolante compreso tra monolita e involucro, oppure direttamente al substrato, come nel caso analizzato nel Capitolo 4, dove verrà utilizzato un componente EHC (Electrically Heated Catalyst) all'interno del sistema in fase di progetto. L'apporto di calore dato dalla potenza in ingresso Q_{el} definita dall'utente e applicata al volume riscaldato V è pari a :

$$H_{el} = \frac{Q_{el}}{V}$$

L'input elettrico viene fornito mediante la configurazione dei componenti "Controller" e "Boundary Layer" (Capitolo 4), in base al segnale di temperatura proveniente da "Flow sensor" .

Condizioni al contorno

- **Periferiche**

Nella simulazione è stata adottata una condizione al contorno esterna per l'equazione di conduzione del calore di tipo "Convection_radiation", in grado di considerare appunto l'effetto dello scambio

termico convettivo (convezione naturale nel caso in esame) e del fenomeno di irraggiamento verso l'ambiente esterno circondante il componente:

$$\lambda_{S,r} \frac{\partial T_S}{\partial r} = C_{amb} h_{amb} (T_S - T_{amb}) + \varepsilon_{rad} \sigma (T_S^4 - T_{amb}^4)$$

in $r = 0.5 D_f$

Il coefficiente di scambio termico convettivo h_{amb} è calcolato per mezzo della correlazione di Churchill e Chu (valida per la convezione esterna su cilindri orientati orizzontalmente):

$$Nu = h_{amb} \frac{D_f}{\lambda_{air}} = \left[0.6 + \frac{0.387 Ra_D^{1/6}}{[1 + (0.559/Pr_{air})^{9/16}]^{8/27}} \right]^2$$

dove:

$$Ra = \frac{g(T_S - T_{amb})D_f^3}{T \nu_{air} \alpha_{air}} : \text{numero di Rayleigh}$$

$Pr = \nu_{air} / \alpha_{air}$: numero di Prandtl

ν : diffusività cinematica

α : diffusività termica

g : accelerazione di gravità

D_f : dimensione caratteristica del fenomeno considerato

ε_{rad} : emissività del materiale

C_{amb} : coefficiente moltiplicativo per valutar la perdita per convezione verso l'ambiente

- **Sulle facce anteriore e posteriore del monolita**

Per valutare le perdite di calore dalle facce anteriori (front f) e posteriore (rear r) per irraggiamento e convezione naturale si esprimono le seguenti condizioni al contorno:

in $z = 0$

$$\lambda_{S,z} \frac{\partial T_S}{\partial z} = C_f h_{amb,F} (T_S - T_{\infty,in}) + C_{rad,f} (1 - \varepsilon) \varepsilon_{rad} \sigma (T_S^4 - T_{\infty,in}^4)$$

in $z = L$

$$\lambda_{S,z} \frac{\partial T_S}{\partial z} = C_r h_{amb,F} (T_S - T_{\infty,out}) + C_{rad,r} (1 - \varepsilon) \varepsilon_{rad} \sigma (T_S^4 - T_{\infty,out}^4)$$

dove:

pedice F: free (convezione naturale)

C_f, C_r : coefficiente moltiplicativo per valutar la perdita per convezione sulla faccia frontale/posteriore

$C_{f,rad}, C_{r,rad}$: coefficiente moltiplicativo per valutar la perdita per irraggiamento sulla faccia frontale/posteriore

$1 - \varepsilon$: termine riferito alla frazione di sezione occupata dal materiale

$T_{\infty,out}$, $T_{\infty,in}$: Temperatura media del gas nella sezione di uscita/entrata rispettivamente.

Il numero di Nusselt necessario per il calcolo di $h_{amb,F}$ è pari a:

$$Nu_x = \left(\frac{Gr_x}{d}\right)^{\frac{1}{4}} \frac{0.75 \sqrt{Pr}}{(0.609 + 1.221\sqrt{Pr} + 1.238 Pr)^{\frac{1}{4}}}$$

dove:

$Gr_x = \frac{g(T_S - T_{\infty})x^3}{\nu^2}$: Numero di Grashof

x : distanza dal punto più lontano della periferia del monolita (dipende dal sistema di riferimento)

Bilancio energetico fase gas

Il profilo di temperatura dei gas fluenti attraverso i canali del catalizzatore (direzione assiale z) viene ricavato grazie al seguente bilancio energetico:

$$\rho_g C_{p,g} \frac{\partial T_g}{\partial z} = -h \frac{S_F}{\varepsilon} (T_g - T_s) + H_{react}$$

Si ricorda che il coefficiente di scambio termico convettivo viene calcolato sulla base del numero di Nusselt, determinato con opportune correlazioni implementate nel software, le cui espressioni variano a seconda della natura dello stato di moto dei gas combusti all'interno dei canali (moto laminare, turbolento o in transizione turbolenta).

2.1.3 Bilancio delle specie: reazioni e scambio di massa

L'ipotesi su cui si basano i bilanci di massa è quella data dalla condizione di uguaglianza tra velocità del fenomeno di trasporto di massa e velocità delle reazioni chimiche sui siti del catalizzatore:

$$n_{i,j}(y_{g,i,j}, y_{s,i,j}, T_g) = R_{i,j}(y_{s,i}, T_{s,i})$$

In questo modo però i fenomeni di accumulo all'interno della parete del catalizzatore non vengono considerati: per farlo Axicat prevede uno schema di reazioni di storage (esempio inerente è quello relativo all'ammoniaca, come si vedrà successivamente).

2.1.4 Trasporto di massa e reazioni superficiali

Per quanto riguarda la modellazione di catalizzatori sui quali vi si trova un singolo strato di washcoat, quello adottato dal software è l'approccio "0D intralayer mesh", il quale prevede:

- Trasporto di massa dal gas fluente nel canale alla superficie del washcoat
- Conversione dei reagenti in prodotti, avente luogo sui siti attivi del catalizzatore

Si assume quindi che le reazioni avvengano sulla superficie del washcoat, senza considerare la diffusione delle specie attraverso i pori al suo interno.

Il flusso molecolare della specie j-esima dalla corrente di gas verso la superficie del materiale di ricoprimento è pari a:

$$\dot{n}_j = c_m k_j S_F (y_{g,j} - y_{s,j})$$

dove:

$y_{g,j}$: frazione molare della specie j nel gas

$y_{s,j}$: frazione molare della specie j sulla superficie del solido

c_m : densità molecolare del gas [mol/m^3]

$k_j = Sh \frac{D_{mol,j}}{d_h}$: coefficiente di trasferimento di massa della specie j in aria

$D_{mol,j}$: coefficiente di diffusività molecolare della specie j in aria

Si può notare come il fenomeno sia descritto in modo analogo allo scambio termico convettivo: il numero di Sherwood (Sh) è calcolato nello stesso modo del numero di Nusselt (Nu), come descritto nel fenomeno di scambio termico al punto precedente.

In fine, il bilancio di massa dal quale ricavare la distribuzione di concentrazione di ogni specie j nei gas lungo il canale è:

$$\frac{d(v_g y_{g,j})}{dz} = -k_j \left(\frac{S_F}{\varepsilon} \right) (y_{g,j} - y_{s,j})$$

L'approccio descritto è quello che verrà utilizzato per modellare i componenti DOC, SDPF e SCR dell'ATS, descritti successivamente nei capitoli 3 e 4.

2.1.5 Trasporto di massa e reazioni “intralayer”

Per quanto riguarda la modellazione di catalizzatori aventi un doppio strato di washcoat, è necessario adottare un approccio più complesso: il “1D intralayer mesh”. Questo può essere schematizzato nelle seguenti fasi:

- Trasporto di massa che va dal gas fluente nel canale alla superficie del washcoat
- Trasporto di massa dei reagenti attraverso il washcoat
- Conversione dei reagenti in prodotti, avente luogo sui siti attivi del catalizzatore
- Trasporto di massa dei prodotti attraverso il washcoat
- Trasporto di massa che va dalla superficie del washcoat alla corrente di gas

Tale modello è governato dall'equazione:

$$-D_{w,j} \frac{\partial}{\partial w} \left(f_w \frac{\partial y_j}{\partial w} \right) = \frac{f_w}{c_m} \sum_k c_{j,k} R_k$$

dove la diffusività totale della parete $D_{w,j}$ viene calcolata secondo l'ipotesi di “pori paralleli” come segue:

$$\frac{1}{D_{w,j}} = \frac{\tau}{\varepsilon_{pore}} \left(\frac{1}{D_{mol,j}} + \frac{1}{D_{knud,j}} \right)$$

con:

$$D_{knud,j} = \frac{d_{pore}}{3} \sqrt{8 R T \frac{1}{\pi M_j}}: \text{diffusività di Knudsen}$$

M_j : massa molecolare della specie j

La prima condizione al contorno necessaria a trovare il profilo di concentrazioni è dall'uguaglianza tra le due espressioni del flusso molecolare all'interfaccia gas/solido:

$$\frac{d(v_g y_{g,j})}{dz} = \frac{1}{4 d_h f_{-w_c}} k_j (y_{s,j} - y_{g,j})$$

$$-D_{w,j} f_{-w} \left(\frac{\partial y_j}{\partial w} \right)_s = -4 d_h f_{-w_c}^2 \frac{d(v_g y_{g,j})}{dz}$$

e quindi:

$$-D_{w,j} f_{-w} \left(\frac{\partial y_j}{\partial w} \right)_s = -k_j f_{-w_c} (y_{s,j} - y_{g,j})$$

La seconda condizione al contorno è invece data dal trasporto di massa nullo che si ha per simmetria nel mezzo della parete, e quindi:

$$\left(\frac{\partial y_j}{\partial w} \right)_{w=0.5w_w} = 0$$

Si ricorda che il sistema di riferimento adottato è quello rappresentato in Figura 3.

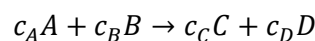
2.2 Reazioni chimiche superficiali

Si tratta delle reazioni che avvengono sui siti attivi del catalizzatore. L'utente oltre a disporre di schemi di reazioni predefiniti ha la facoltà di escluderne alcune o includerne delle altre, in base al tipo di applicazione.

2.2.1 Reazioni non reversibili

Sono quelle reazioni che nelle condizioni di temperatura tipiche dei gas esausti del settore automobilistico avvengono in una sola direzione.

Le velocità di reazione $r \left[\frac{\text{mol}}{\text{s m}^3 \text{layer}} \right]$ sono definite dall'espressione di Langmuir-Hinshelwood, secondo la quale, per una generica reazione



si ha :

$$r = \frac{k \widehat{p}_A \widehat{p}_B}{T G}$$

dove:

$k = k(T) = A e^{\frac{E}{RT}}$, termine di Arrhenius: definisce la dipendenza della velocità di reazione dalla temperatura

A: termine costante, differisce a seconda della reazione

E: energia d'attivazione della reazione

$\widehat{p}_A = p_A/p_0$: pressione parziale del reagente A sulla pressione di riferimento (fugacità)

$\widehat{p}_B = p_B/p_0$: pressione parziale del reagente B sulla pressione di riferimento (fugacità)

G: termine di inibizione della velocità di reazione

T: temperatura

2.2.2 Reazioni reversibili

Sono quelle reazioni che, per i valori di temperatura che interessano i gas esausti in uscita dal motore, posso avere luogo in entrambe le direzioni.

L'approccio più accurato tra le opzioni del software permette di disaccoppiare equilibrio chimico e velocità di reazione e viene detto "Uni-directional method".

Le velocità della reazione diretta e inversa sono definite separatamente. Le espressioni delle velocità includono il termine Kp (costante di equilibrio) relativo all'aspetto termodinamico della reazione: in base al valore assunto dalla costante di equilibrio il verso della reazione dipende da quale delle due risulta avere una velocità di reazione maggiore.

- Reazione diretta (forward: f): $c_A A + c_B B \rightarrow c_C C + c_D D$

$$r_f = \frac{k \widehat{p}_A \widehat{p}_B}{T G} Eq_f^3$$

$$Eq_f = 1 - \frac{\widehat{p}_C^{c_C} \widehat{p}_D^{c_D}}{\widehat{p}_A^{c_A} \widehat{p}_B^{c_B} Kp}$$

- Reazione inversa (reverse: r): $c_C C + c_D D \rightarrow c_A A + c_B B$

$$r_r = \frac{k \widehat{p}_C \widehat{p}_D}{T G} Eq_r^3$$

$$Eq_r = 1 - \frac{Kp \widehat{p}_A^{c_A} \widehat{p}_B^{c_B}}{\widehat{p}_C^{c_C} \widehat{p}_D^{c_D}}$$

dove: $Kp = e^{\frac{\Delta G}{RT}}$

E' opportuno specificare che il termine di inibizione della velocità di reazione G tiene conto del fenomeno di competizione tra i reagenti nell'occupare i siti attivi del catalizzatore. Axisuite prevede differenti forme di questo termine, le quali hanno tutte una dipendenza dal termine k (termine di Arrhenius) e dalla fugacità delle specie coinvolte nel fenomeno. Un esempio è quello relativo all'occupazione dei siti attivi di un catalizzatore ossidante, dove le specie in competizione sono CO e gli idrocarburi incombusti:

$$G_{2,2} = 1 + k_3 \widehat{p}_{CO}^2 \widehat{p}_{HC_2}^2$$

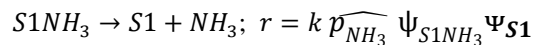
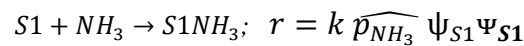
dove \widehat{p}_{HC_2} tiene conto del diverso grado di competizione all'occupazione dei siti dei vari idrocarburi ($CH_4, C_2H_{4,4}, C_3H_{6}$ ecc.).

2.2.3 Reazioni di storage

Come è stato espresso in precedenza, il bilancio di massa delle specie si basa sull'ipotesi di non avere alcun accumulo delle specie sui siti del catalizzatore. L'assunzione è valida nei casi di stazionarietà, altrimenti bisogna tenere conto dei fenomeni di accumulo attraverso degli opportuni modelli di storage. Nel Capitolo 4 si vedrà in particolare il fenomeno di assorbimento e desorbimento dell'ammoniaca sui siti S1 ed S2, per tanto si vuole presentare il modello adottato.

Il modello di storage dell'ammoniaca può essere ricostruito come segue.

Date le reazioni di assorbimento e desorbimento:



dove:

$$\Psi_{S1NH_3} = \frac{mol\ S1NH_3}{mol\ S1NH_3 + mol\ S1}; \text{ frazione di siti occupati dall'ammoniaca}$$

$$\Psi_{S1} = \frac{mol\ S1}{mol\ S1NH_3 + mol\ S1}; \text{ frazione di siti liberi}$$

Ψ_{S1} : capacità totale di storage di ammoniaca

Il bilancio di massa dei siti S1 è dato da:

$$\Psi_{S1} \frac{d\Psi_j}{dt} = \sum_{\text{production reactions of } j} n_j r - \sum_{\text{consumption reactions of } j} n_j r$$

con $j = S1, S1NH_3$

Lo stesso approccio è utilizzato per i siti S2.

2.3 Axiheat

Axiheat è il componente Axisuite tramite il quale vengono modellati i condotti di collegamento tra i dispositivi d'abbattimento: nel caso in esame il tratto tra DOC e SDPF, dove ha luogo l'iniezione di ammoniaca gassosa per permettere la riduzione degli ossidi di azoto (sistema d'iniezione verrà trattato nel Capitolo 4).

2.3.1 Scambio termico

La simulazione della linea di trattamento restituisce il profilo di temperatura dei gas esausti e nelle pareti della tubazione lungo la direzione assiale z, tenendo conto dei fenomeni di scambio termico all'interno e all'esterno del componente.

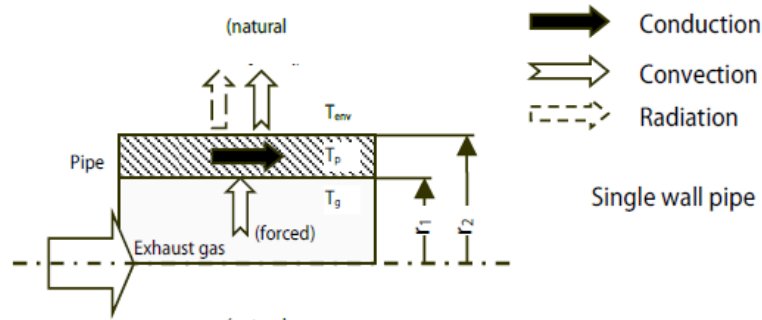


Figura 5: Schematizzazione dei fenomeni di scambio termico nel modello "single pipe".

Scambio termico verso l'esterno

Il calore scambiato tra i gas esausti e le pareti della tubazione equivale a:

$$\dot{q}_{cv,i} = h_{cv,i} 2\pi r_i (T_P - T_{amb}) \Delta z$$

dove:

$h_{cv,i} = \frac{Nu \lambda}{d}$: coefficiente di scambio termico convettivo interno al tubo

Il numero di Nusselt si calcola in base alle differenti condizioni di moto:

$$Nu = \begin{cases} 3.66 & Re \leq 2300 \\ \frac{\frac{f}{8}(Re - 1000)Pr}{1 + 12.7 \left(\frac{f}{8}\right)^{\frac{1}{2}} (Pr^{\frac{2}{3}} - 1)} & Re > 2300 \end{cases}$$

dove il coefficiente d'attrito è dato da:

$$f = \begin{cases} \frac{64}{Re} & Re \leq 2300 \\ \frac{0.25}{\log^2 \left(\frac{e}{3.7d} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right)} & Re > 2300 \end{cases}$$

Nel caso di $Re = 2300$, il numero di Nusselt si ricava per interpolazione quadratica tra 3.66 e la formula di Gnielinski (per $Re > 2300$). Si procede in modo analogo per il calcolo di f .

Scambio termico verso l'esterno: condizioni al contorno

Il modello "convection-radiation" tiene conto del calore scambiato esterno sia per convezione che per irraggiamento, per tanto la perdita di potenza termica totale è data da:

$$\dot{q}_{rad} = \varepsilon \sigma 2\pi r_o (T_P^4 - T_{amb}^4) \Delta z$$

$$\dot{q}_{cv,o} = h_{cv} 2\pi r_o (T_P - T_{amb}) \Delta z$$

$$\dot{q}_{tot} = \dot{q}_{rad} + \dot{q}_{cv}$$

dove $h_{cv} = Nu \frac{\lambda}{d}$, ed il numero di Nusselt è calcolato con l'opportuna correlazione per descrivere il fenomeno di convezione naturale, trascurando quindi importanti flussi d'aria esterni all'ATS (ipotesi più veritiera durante il test al banco):

$$Nu = \left[0.6 + \frac{0.387 Ra_{amb}^{1/6}}{[1 + (0.559/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right]^2$$

dove:

Ra: numero di Rayleig

Pr: numero di Prandl

Bilanci d'energia (caso tubo singolo)

Nell'ipotesi ragionevole di stato quasi-stazionario e di fluido incomprimibile, date le basse variazioni di pressione del caso, il bilancio energetico per la corrente gassosa può essere così espresso:

$$\frac{\partial T_g}{\partial t} + v_g \frac{\partial T_g}{\partial z} = - \frac{\dot{q}_{cv,i}}{\rho_g c_{p,g} V_1}$$

dove: $V_1 = \pi r_1^2 \Delta z$

Per quanto riguarda invece il bilancio d'energia sulla parete del componente, oltre alla convezione interna, sono da considerare anche i termini legati all'irraggiamento e la convezione esterna:

$$\frac{\partial T_p}{\partial t} = \frac{\partial^2 T_p}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}_{cv,i} - \dot{q}_{cv,o} - \dot{q}_{rad}}{\rho_g c_{p,g} (V_2 - V_1)}$$

dove: $V_2 - V_1 = \pi (r_2^2 - r_1^2) \Delta z$

2.3.2 Perdite di pressione nel componente

Ovviamente, all'interno dei tratti di tubazione si hanno delle perdite di pressione minori rispetto a quelle concentrate nei componenti. Si tratta di perdite di pressione dovute all'attrito del gas fluente nel condotto, date da:

$$\Delta p_f = CP l f \frac{\rho v_g^2}{2 d}$$

dove:

f : coefficiente d'attrito

CP: fattore di correzione definito dall'utente

2.3.3 Iniezione di una corrente gassosa nel componente

Grazie al componente ausiliario "Injector" è possibile effettuare un iniezione di una corrente gassosa avente portata massica, temperatura e composizione variabile nel tempo. Il fenomeno viene studiato per mezzo delle seguenti equazioni:

- Bilancio di massa totale: $\dot{m}_2 = \dot{m}_1 + \dot{m}_{inj}$

- Bilancio di massa relativo alle specie i:

$$\dot{m}_2 C_{2,i} = \dot{m}_1 C_{1,i} + \dot{m}_{inj} C_{inj,i}$$

- Bilancio energetico nel punto di miscelamento (adiabatico):

$$\dot{m}_2 h_2 = \dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_{inj} h_{inj}$$

In questo modo si possono ottenere portata massica, concentrazioni ed entalpia (e quindi temperatura) della corrente gassosa risultante dal miscelamento.

Tale semplice modello ovviamente non tiene conto del gradiente di temperatura e di concentrazione delle specie creatisi durante l'iniezione di un flusso gassoso nell'altro, bensì considera tali grandezze uniformi sulla sezione.

2.4 Axitrap

Axitrap è il componente tramite il quale viene modellato, nel caso oggetto dell'elaborato, il processo di filtraggio nel componente DPF (Capitolo 3) e dove hanno luogo il processo di filtraggio e di riduzione degli ossidi di azoto nel SDPF (Capitolo 4).

2.4.1 Bilancio di massa e quantità di moto: calcolo delle cadute di pressione nel componente

Le cadute di pressione nel componente sono valutate in maniera del tutto uguale a quelle relative al componente Axicat. L'unica differenza che si riscontra riguarda il calcolo della perdita che ha luogo all'interno dei canali, la quale viene ricavata da un'analisi sul volume di controllo evidenziato in figura 9, con lo scopo di studiare il problema sul singolo canale:

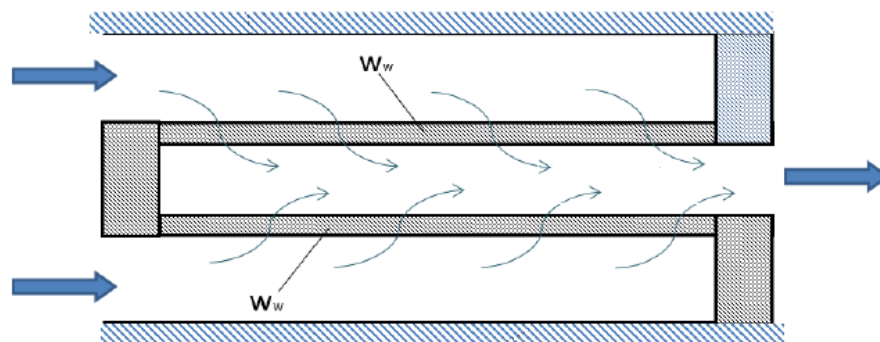


Figura 6: Schematizzazione del processo di filtrazione.

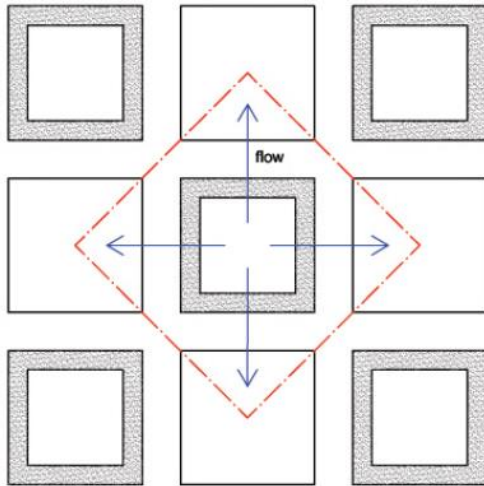


Figura 7: Volume di controllo del problema sul singolo canale

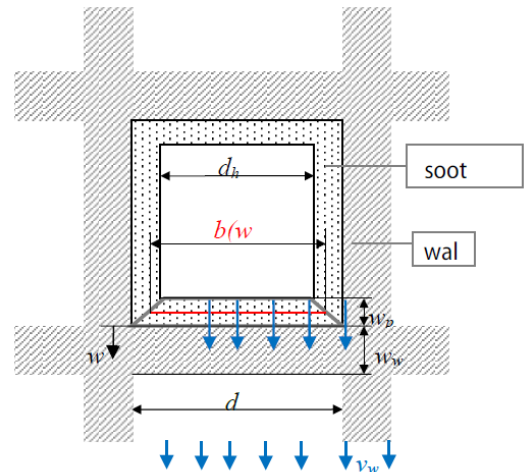


Figura 8: Schematizzazione del gas fluente attraverso la parete e lo strato di particolato

Lo spessore dello strato di particolato depositato sul canale d'ingresso viene considerato definendo:

$$b(w) = d - 2(w_p - w)$$

dove:

$$w_p = \frac{1}{2} \left(d - \sqrt{d^2 - \frac{2 m_p}{\rho_p V_{trap} c_{psm}}} \right): \text{spessore dello strato di particolato depositatosi sulla parete}$$

V_{trap} : volume effettivo della trappola (esclusi i "tappi" alle estremità e gli strati circostanti)

Dalla legge di Darcy, la variazione della pressione lungo la coordinata w è:

$$\frac{dp}{dw} = \frac{\mu v(w)}{k_p}$$

dove la velocità $v(w)$ dei gas varia in funzione di w a causa delle variazioni della densità e della sezione di passaggio:

$$v(w) = \frac{\rho_w v_w d}{\rho(w) b(w)}$$

La funzione $\rho(w)$ esprime la dipendenza della densità dei gas dalla pressione e dalla temperatura secondo la legge dei gas ideali.

La permeabilità k_p del deposito di particolato è data dalla formula semi-empirica:

$$k_p = k_{p,0} \left(1 + C_4 \frac{p_0}{p} \mu \sqrt{T/M_g} \right)$$

dove:

$k_{p,0}, C_4$: coefficienti provenienti dai dati sperimentali

Integrando l'equazione derivante dalla legge di Darcy, la caduta di pressione dovuta al passaggio del gas attraverso lo strato di particolato accumulato è dato da:

$$\Delta p_{soot} = \frac{RT\mu\rho_w V_w}{M_g \bar{p} 2k_p(\bar{p})} \ln\left(\frac{d}{d - 2w_p}\right)$$

dove:

$\bar{p} = \frac{p_1 - p_2}{2}$: pressione media tra ingresso e uscita strato di particolato

Per quanto riguarda invece la perdita dovuta al passaggio dei gas attraverso la parete:

$$\Delta p_{wall} = \frac{v_w \mu w_w}{k_w} + \frac{C_E}{\sqrt{k_w}} \rho_w v_w^2$$

k_w : permabilità della parete, analogamente a quella dello strato di particolato, $k_w = k_w(T, p)$
 C_E : coefficiente di Ergun (termine inerziale)

2.4.2 Bilancio energetico delle fasi solida e gassosa

Bilancio energetico sulla fase solida

Per quanto riguarda il bilancio d'energia sulla fase solida, Axitrap procede in modo analogo a quanto mostrato relativamente al componente Axitrap al punto 2.1.2. Tuttavia via il termine di sorgente termica S include in questo caso un nuovo fenomeno: lo scambio termico convettivo dovuto al passaggio dei gas attraverso la parete porosa. La sua espressione sarà per tanto uguale a:

$$S = H_{conv} + H_{react} + H_{rad} + H_{el} + H_{wall}$$

In quanto il coefficiente di scambio termico convettivo in questa situazione è sostanzialmente infinito, si può esprimere tale termine come segue:

$$H_{wall} = \rho_w v_w S_F C_{p,g} (T_1 - T_S)$$

dove $(T_1 - T_S)$ è la differenza di temperatura tra i gas in ingresso alla parete e la parete solida stessa.

Bilancio energetico sulla fase gas

Si hanno in tal caso due differenti volumi di controllo sui quali esprimere il bilancio:

Canale d'ingresso (1):

$$C_{p,g} \rho_1 v_1 \frac{dT_1}{dz} = \frac{h_1 A}{d} (T_S - T_1) + H_{react}$$

Canale d'uscita (2):

$$C_{p,g} \rho_1 v_1 \frac{dT_2}{dz} = \frac{h_2 A}{d} (T_S - T_2) + H_{react}$$

Le equazioni riportate tengono conto dello scambio termico convettivo tra gas e parete del solido e dell'apporto termico dato dalle eventuali reazioni aventi luogo nel componente.

La condizione al contorno necessaria per ricavare il profilo di temperatura lungo z corrisponde a $T_1(z = 0) = T_{inlet}$.

2.4.3 Filtraggio dei gas combusti

Il processo di filtrazione può essere studiato da Axisuite mediante diverse modalità, a discrezione dell'utente. La prima approssimazione effettuata dal modello "spherical particles", oltre al fatto di considerare appunto sferiche le particelle carboniose da filtrare, prevede di trascurare le interazioni e la coalescenza tra queste, la quale darebbe vita ad un particolato di dimensioni maggiori e geometria irregolare. Inoltre, il modello "depth filter" adottato tratta il fenomeno andando a calcolare l'efficienza di filtrazione dei vari meccanismi tramite i quali avviene il processo, meccanismi che si diversificano in base all'interazione con l'unità di filtrazione, sferica o fibra (collector unit):

- Impatto inerziale
- Intercettazione
- Diffusione

L'utente può definire porosità e diametro medio dei pori: $\varepsilon_{pore,0}$; $d_{pore,0}$.

Si riportano le relazioni relative al calcolo dell'efficienza di filtrazione nel caso di filtro nuovo (clean wall).

Spherical_particles_[simplified]	
Diffusion	$\eta_D = \eta_{clean,D} \cdot 0.45 Pe^{n_{pe}}$ $Pe = \frac{u_w d_{grain,0}}{D_{part}}$
	The particle diffusivity D_{part} is computed according to reference ¹⁶ , as a function of particle mobility diameter d_{part}
Interception	$\eta_R = \eta_{clean,R} \cdot 13.5(2R)^2$ $R = \frac{d_{part}}{d_{grain,0}}$
Inertial impaction	$\eta_I = \eta_{clear,I} \left(\frac{Stk \cdot J}{2 \cdot Ku^2} \right)$ $Stk = \frac{R^2 \cdot U_0 \rho_P \cdot C_C}{9 \cdot \mu_G \cdot d_{grain}}$
	$J = (29.6 - 28 \cdot \varepsilon_{pore,0}^{0.62}) R^2 - 27.5 R^{2.8}$

Tabella 4: Efficienze di filtrazione della singola unità sferica

Spherical_particles_[SC]	
Diffusion	$\eta_D = \eta_{clean,D} 1.6 \left(\frac{\varepsilon_{pore,0}}{Ku} \right)^{1/3} Pe^{\eta_{pe}} C_d \quad Pe = \frac{u_w d_{fib,0}}{D_{part}}$
	$C_d = 1 + 0.388 Kn_{fib} \left(\frac{\varepsilon_{pore,0} Pe}{Ku} \right)^{1/3}$ <p>The particle diffusivity D_{part} is computed as a function of particle mobility diameter d_{part}</p>
Interception	$\eta_R = \eta_{clean,R} 0.6 \left(\frac{\varepsilon_{pore,0}}{Ku} \right) \frac{R^2}{(1+R)} C_r \quad R = \frac{d_{part}}{d_{fib,0}}$
	$C_r = 1 + \frac{1.996 Kn_{fib}}{R}$
Inertial impaction	$\eta_I = \eta_{clear,I} \left(\frac{Stk \cdot J}{2 \cdot Ku^2} \right) \quad Stk = \frac{R^2 \cdot U_0 \rho_p \cdot C_c}{9 \cdot \mu_g \cdot R_f}$
	$J = (29.6 - 28 \cdot \varepsilon_{pore,0}^{0.62}) R^2 - 27.5 R^{2.8}$
<p>The kuwabara's hydrodynamic factor is calculated for fiber collectors as:</p> $Ku = -0.5 \ln(1 - \varepsilon_{pore,0}) - 0.75 + \varepsilon_{pore,0} - 0.25 \varepsilon_{pore,0}^2$	

Tabella 5: Efficienze di filtrazione della singola unità fibra.

dove:

u_w : velocità del gas all'ingresso della parete

Stk: numero di Stokes

L'efficienza di filtrazione della singola unità (sferica o fibra) è data da: $\eta = \eta_D + \eta_I + \eta_R$

Dato il processo di filtrazione, si verifica l'accumulo del particolato sulle pareti dei canali. Questo fenomeno influenza ovviamente l'efficienza del processo, e per tenerne conto si definiscono, a partire da quelle in condizioni "clean wall", delle nuove grandezze d'interesse.

La porosità (frazione vuota) della parete diviene:

$$\varepsilon_{pore} = \varepsilon_{pore,0} - \frac{m_p}{V \rho_p}$$

La densità del particolato accumulato varia col passare del tempo secondo la seguente equazione:

$$\rho_p(t + \Delta t) = \frac{m_p(t) + m_{deposit}}{m_p(t) + \frac{m_{deposit}}{\rho_{deposit}}}$$

Secondo il "Empirical_ erf model", l'effetto sull'efficienza di filtrazione del letto dell'accumulo di particolato risulta essere pari a:

$$\eta = \eta_0 (1 - \eta_0) \operatorname{erf} \left(3 \eta_{load} \frac{W_{cap}}{\sqrt{2}} \right)$$

dove:

$$W_{cap} = \frac{\varepsilon_{pore,0} - \varepsilon_{pore}}{\varepsilon_{pore,0}}$$

A variare sono inoltre:

$$d_{grain} = d_{grain,0} \left(\frac{1-\varepsilon_{pore}}{1-\varepsilon_{pore,0}} \right)^{1/3} ; d_{fib} = d_{fib,0} \left(\frac{1-\varepsilon_{pore}}{1-\varepsilon_{pore,0}} \right)^{1/2}$$

In fine, l'efficienza di filtrazione dell'intero letto viene così calcolata:

Collector type	Loaded wall filtration model	Equation
Sphere collectors	Empirical_erf	$E_{wall} = 1 - e^{-\eta_g \frac{3(1-\varepsilon_{pore,0})}{2 \varepsilon_{pore,0}} \frac{\Delta w}{d_{grain,0}}}$
Fibers collectors	Empirical_erf	$E_{wall} = 1 - e^{-\eta_g \frac{4(1-\varepsilon_{pore,0})}{\pi \varepsilon_{pore,0}} \frac{\Delta w}{d_{fib,0}}}$

Tabella 6: Efficienza di filtrazione del letto secondo l'opzione "Empirical_erf".

Nel processo di filtraggio, un ruolo rilevante è ricoperto anche dallo strato dello stesso particolato accumulatosi sulla parete.

Per tenere conto di questo contributo, Axitrap distingue due diverse fasi della formazione dello strato di accumulo: una fase iniziale di saturazione dei pori del substrato ed inizio dell'accumulo sulla parete, ed un seconda durante la quale lo strato di particolato formatosi aumenta d'importanza.

I due meccanismi sono descritti graficamente come segue:

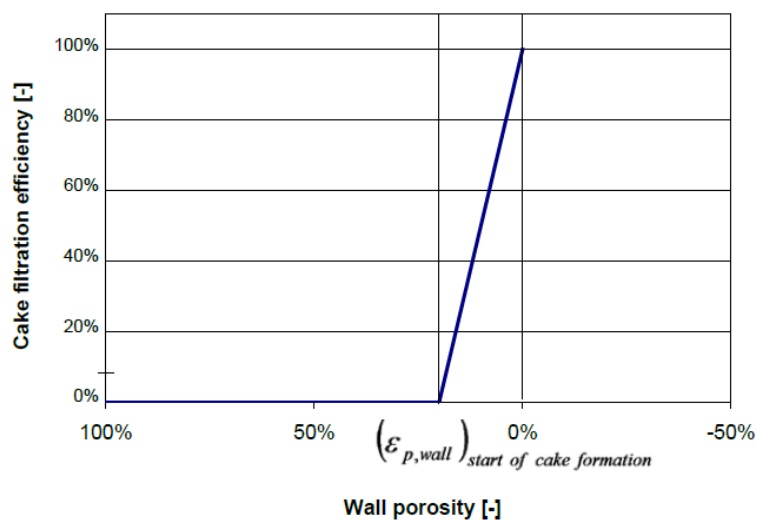


Grafico 10: Cake filtration efficiency in funzione dellaporosità della parete.

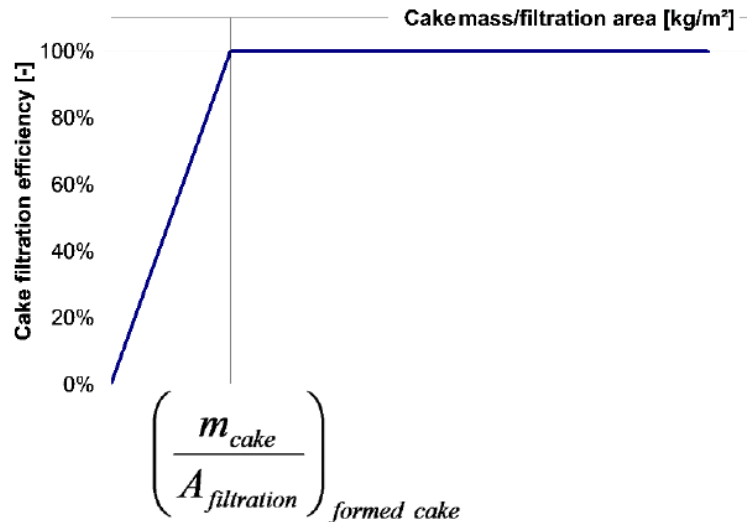


Grafico 11: Cake filtration efficiency in funzione della massa accumulata per unità di superficie sulla quale si crea lo strato.

Nella prima fase (Grafico 10) si mostra come al diminuire della porosità della parete del filtro causata dall'accumulo si abbia un incremento lineare dell'efficienza di filtraggio dovuta a questo fenomeno (filtration cake efficiency E_1).

Nella seconda fase (Grafico 11) si vede invece come al crescere della massa accumulata sulla parete l'efficienza E_2 cresce linearmente in un primo momento, e come dopo un certo quantitativo di particolato accumulato rimanga costante.

Il risultato è descritto dal seguente grafico, dove nel tratto di transizione tra le due fasi precedentemente descritte è data da:

$$E_{cake,tot} = E_1 + E_2 - E_1E_2$$

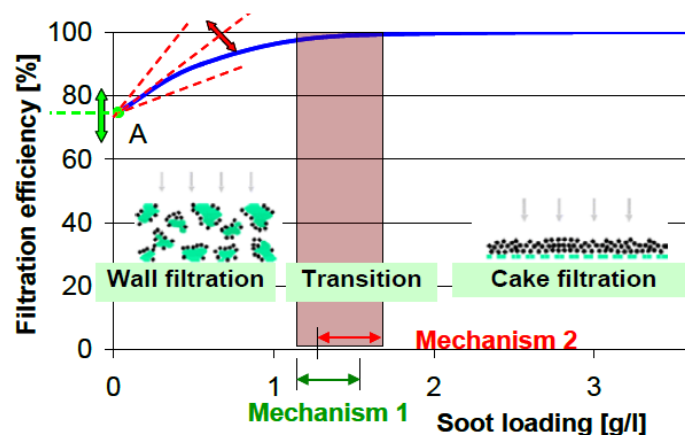


Grafico 12: Transizione tra fase di filtrazione data dalla parete a quella data dallo strato accumulatosi su di essa.

3. Configurazione base

Come illustrato in Figura 9, la configurazione prevede l'utilizzo di un catalizzatore ossidante (DOC) e di un filtro anti particolato (DPF).

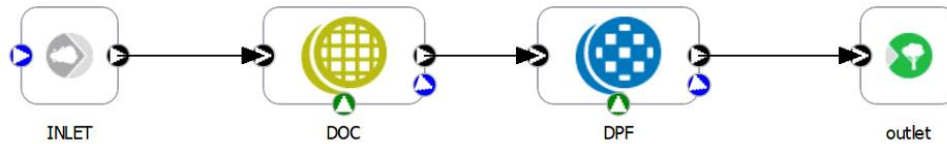


Figura 9: Configurazione dell'ATS di partenza, interfaccia Axisuite.

DOC: Diesel Oxidation Catalyst

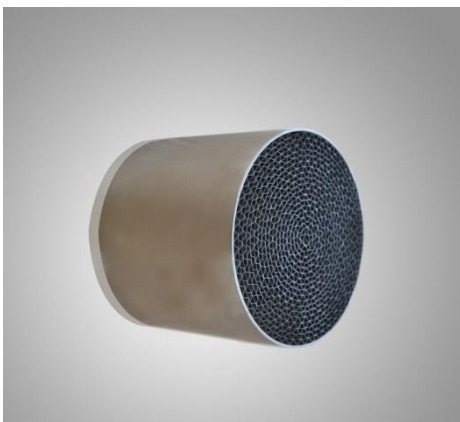
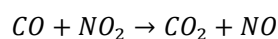
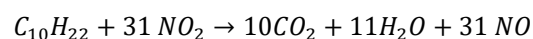
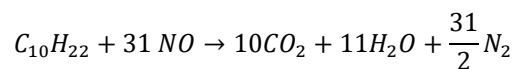
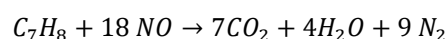
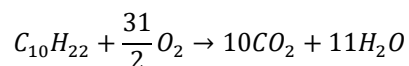
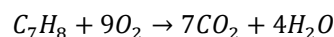
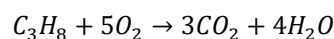
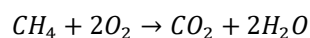
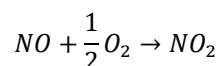
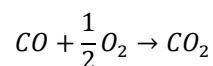


Figura 10: Catalizzatore ossidante DOC.

Si tratta di un catalizzatore la cui funzione principale è quella di favorire l'ossidazione degli idrocarburi incombusti e gli ossidi di carbonio presenti nei gas esausti all'uscita del motore, abbattendone quindi l'emissione in ambiente. Il DOC strutturalmente si presenta con una geometria a nido d'ape del substrato, tipicamente di materiale ceramico o metallico. La parte strutturale del catalizzatore è ricoperta da uno strato ad alta porosità (washcoat); questo permette di incrementare la superficie di contatto coi gas, dalla quale dipende fortemente l'efficienza di conversione. In fine, all'interno del washcoat è disperso il materiale catalitico, che per le reazioni d'interesse è costituito da metalli nobili come Pt e Pd.

Le reazioni qui catalizzate sono principalmente le seguenti:



Coerentemente con quanto detto nel Capitolo 2, il DOC è modellato con il componente Axicat di Axisuite, sulla base dei dati tecnici del componente.

DOC	
VOLUME [L]	1.399
LUNGHEZZA [m]	0.1147
MATERIALE WASHCOAT	gAl ₂ O ₃
MATERIALE ATTIVO	Pt_Pd
WASHCOAT LOADING [g/L]	150
LOADING MATERIALE ATTIVO [g/L]	3.885
CPSI: DENSITA' CANALI	400
SPESSORE PARETE CATALIZZATORE [μm]	114
MATERIALE DEL SUBSTRATO	Cordierite

Tabella 7 Specifiche tecniche DOC

DPF: Diesel Particulate Filter

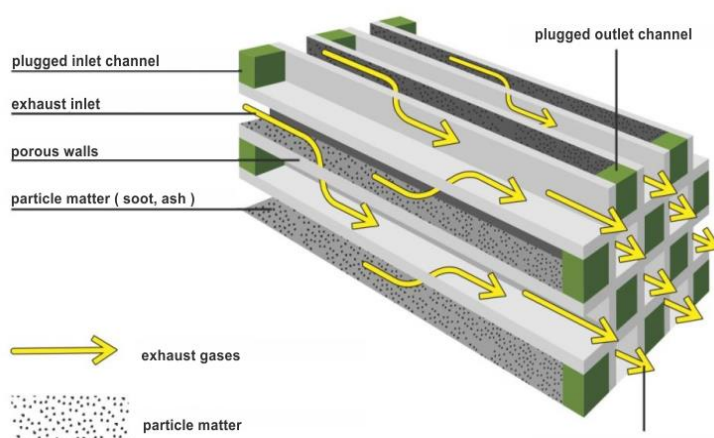


Figura 11: Filtro anti particolato

Il filtro anti particolato è un componente del sistema di post trattamento dei gas esausti in grado di abbattere le emissioni di polveri sottili. I sistemi convenzionali (Wall-Flow Filters) sono ottenuti per estrusione di materiali ceramici. Strutturalmente il DPF si presenta come un monolita a nido d'ape in cui i canali sono chiusi alternativamente a un'estremità: in tal modo i gas combusti che attraversano le pareti porose del substrato sono filtrati e quindi epurati dalle particelle carboniose, che vengono quindi trattenute.

Durante il suo funzionamento, le polveri intrappolate si vanno ad accumulare sulle pareti del componente, fino al punto in cui l'effetto di ostruzione dei canali provocherà un innalzamento delle perdite di carico concentrate sul filtro, e quindi un innalzamento della pressione a monte dell'ATS che potrebbe compromettere le performances del motore. Si necessita quindi di una fase di rigenerazione periodica del componente, ovvero un processo di ossidazione delle particelle di carbonio depositatesi che avviene a temperature che superano i 600°C, temperature maggiori rispetto alle temperature degli esausti in normali condizioni di funzionamento in un motore diesel. Un modo spesso utilizzato per creare le condizioni di elevate temperature operative necessarie al processo è effettuare una post iniezione di combustibile.

Coerentemente con quanto detto nel Capitolo 2, il DPF è modellato con il componente Axitrap del software Axisuite, sulla base dei dati tecnici del componente.

DPF	
VOLUME [L]	3.039
LUNGHEZZA [m]	0.1778
MATERIALE DEL SUBSTRATO	Cordierite
CPSI: DENSITA' DI CELLE	350
SPESSORE PARETE [μm]	410
DIAMETRO MEDIO DEI PORI [μm]	13

Tabella 8: Specifiche tecniche DPF.

Nella simulazione del sistema viene analizzata la sola fase di accumulo del particolato sul filtro, nell'ipotesi iniziale di avere un filtro nuovo, o comunque perfettamente rigenerato (soot loading nullo).

3.1 Risultati ottenuti

Con la modellazione monodimensionale dell'ATS si vogliono prevedere le emissioni all'uscita del sistema per verificare che la configurazione appena descritta risulti essere conforme alle normative dettate dalla classe Euro 4. Questo sarà il punto di partenza per sviluppare l'upgrade del sistema alle sue configurazioni più avanzate.

Si riportano gli effetti sulle emissioni del catalizzatore ossidante:

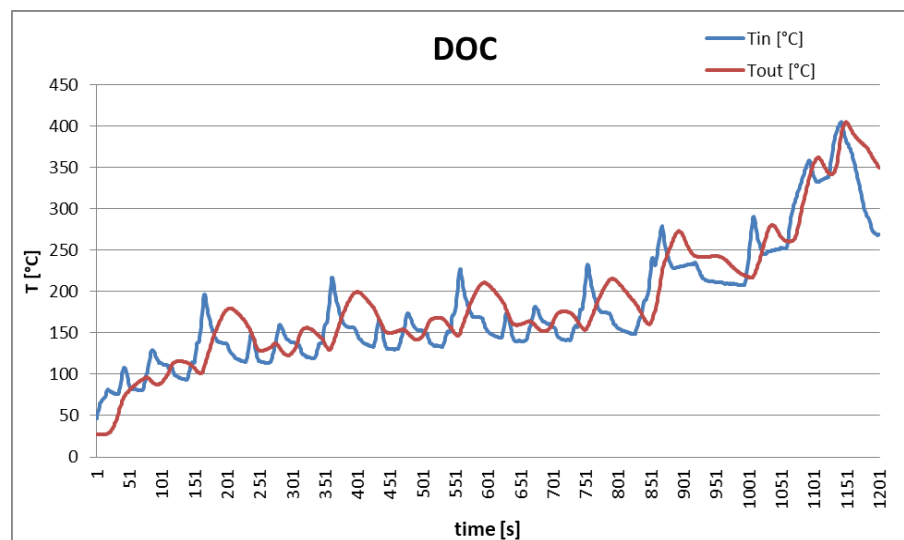


Grafico 13: Temperatura dei gas in ingresso e in uscita al DOC.

Si noti l'andamento sfalsato delle temperature in ingresso e in uscita al DOC, dato dall'inerzia termica del componente stesso (Grafico 13).

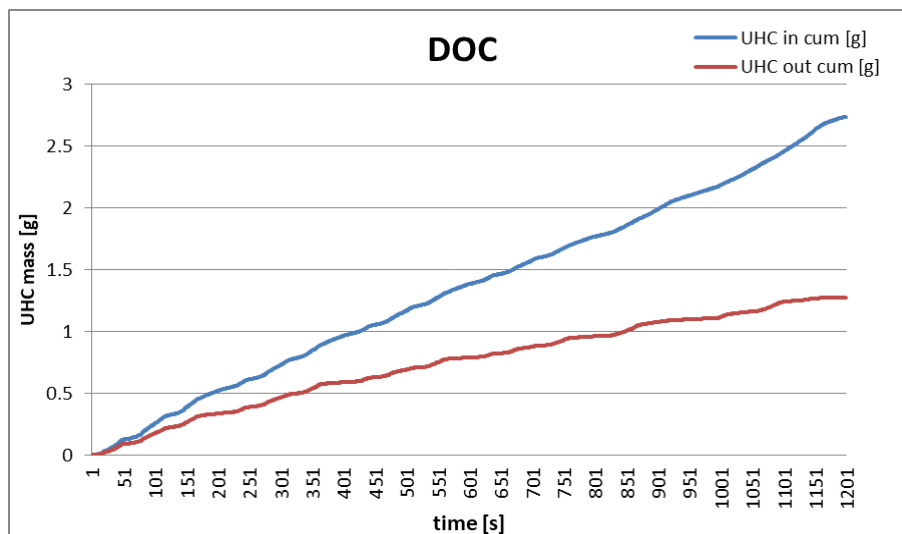


Grafico 14: Abbattimento di idrocarburi incombusti per mezzo del DOC.

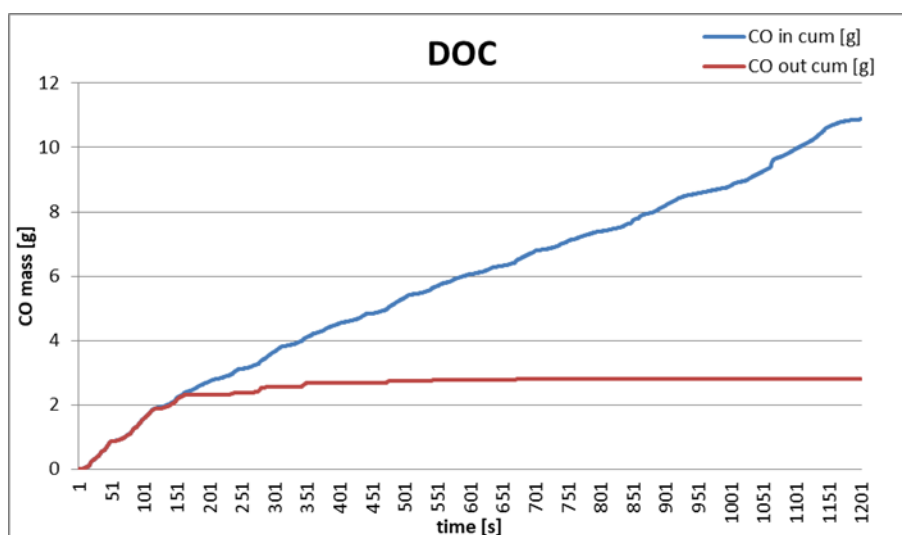


Grafico 15: Abbattimento di CO per mezzo del DOC.

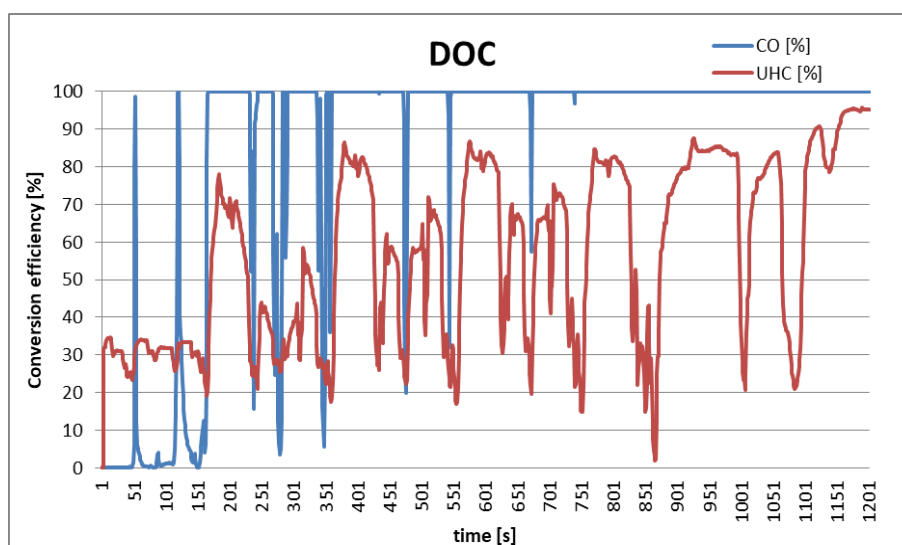


Grafico 16: Efficienza di conversione di CO e UHC.

In generale, la conversione delle reazioni catalitiche è fortemente influenzata dalle temperature operative del catalizzatore, dalle quali dipende fortemente l'aspetto cinetico. A basse temperature infatti, i valori di conversione dei reagenti sono bassi o addirittura nulli. Per questo motivo, il tempo necessario al raggiungimento della minima temperatura alla quale il catalizzatore inizia ad operare ad elevate conversioni (temperatura di light off) è una variabile molto importante, che si ripercuote sull'efficacia dell'abbattimento.

Dal Grafico 14, si può osservare come data una bassa temperatura di light off delle reazioni gli idrocarburi vengano ossidati nel DOC sin dai primi istanti del ciclo di prova. Viceversa, la reazione di ossidazione della CO raggiunge un elevato livello di conversione solo dopo un tempo di circa 150 secondi, quando le curve delle masse cumulate di CO in ingresso e in uscita al catalizzatore possono essere chiaramente distinte l'una dall'altra. Dai Grafici 13 e 15, si può inoltre notare che il light off dell'ossidazioni del CO avviene ad una temperatura media dei gas (tra ingresso e uscita) di poco superiore ai 100 °C, dopo di che, la temperatura continua a salire e l'abbattimento continua con elevata efficienza di conversione (Grafici 15 e 16).

Si noti confrontando il Grafico 16 con gli andamenti di portata e temperatura in ingresso, come a picchi di valore di quest'ultimi corrispondano picchi d'efficienza, soprattutto per quanto riguarda gli idrocarburi incombusti, dei quali si ottiene una minor efficienza di conversione rispetto a quella del monossido di carbonio, nonostante il light off sia raggiunto più in fretta.

Si riporta ora l'effetto sulle emissioni dato dal filtro anti particolato:

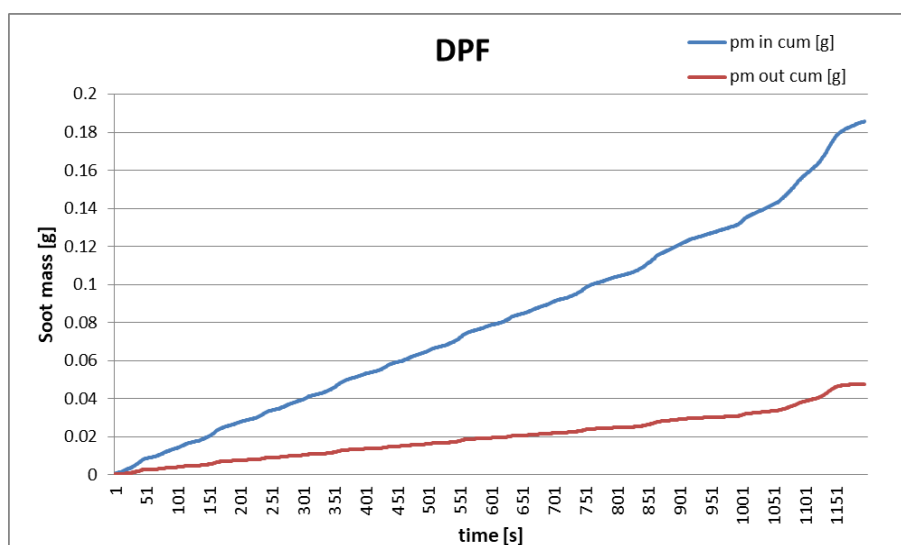


Grafico 17: Abbattimento del particolato per mezzo del DPF.

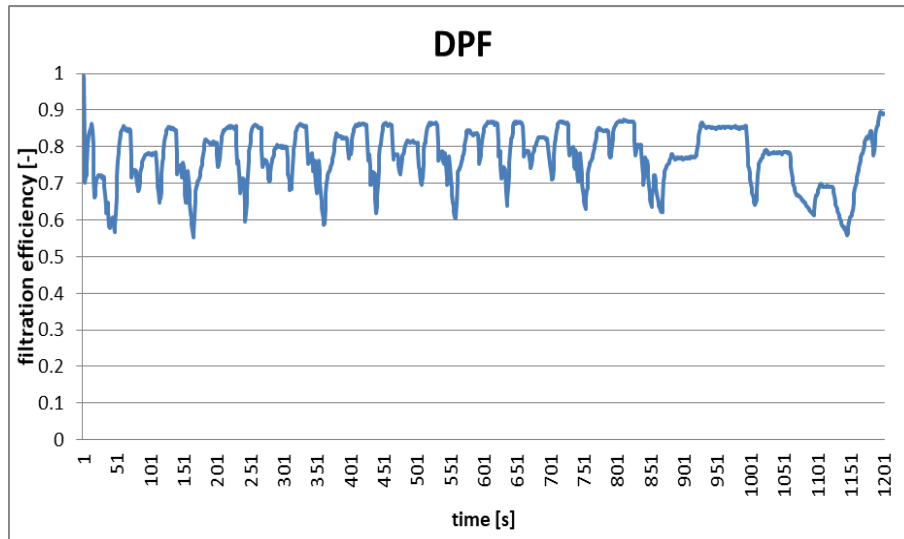


Grafico 18: Efficienza di filtrazione (in massa).

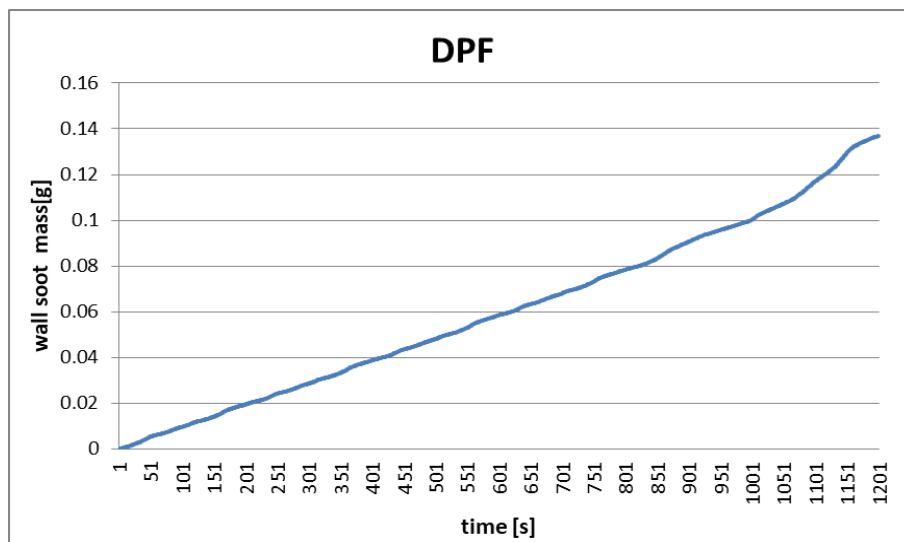


Grafico 19: Accumulo di particolato sulle pareti del filtro.

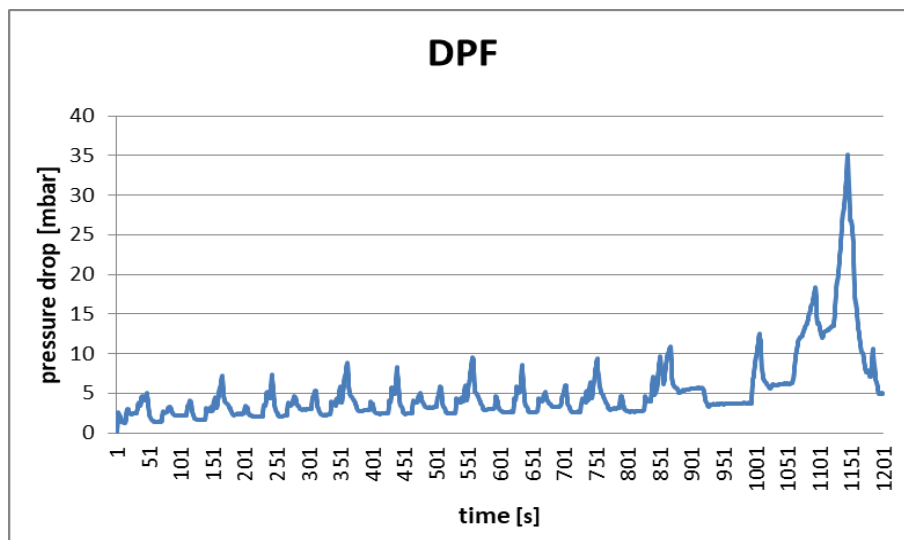


Grafico 20: Perdite di carico concentrate nel filtro.

Si può notare come il filtraggio, a differenza delle reazioni catalitiche, non dipenda dalla temperatura del sistema. L'efficienza del processo dipende invece dalle perdite di carico e quindi dalla portata e dalla velocità dei fumi: dove vi sono picchi di portata e quindi di perdita, vi sono infatti dei minimi locali in termini di efficienza di filtrazione (Grafici 18 e 20).

Osservando i Grafici 19 e 20, si nota inoltre che a pari portata di fumi, le perdite di carico tendano ad incrementare al crescere del particolato accumulato nel filtro, e quindi col passare del tempo.

Dal punto di vista quantitativo i risultati ottenuti possono essere così riassunti e confrontati coi vincoli dettati dalle normative:

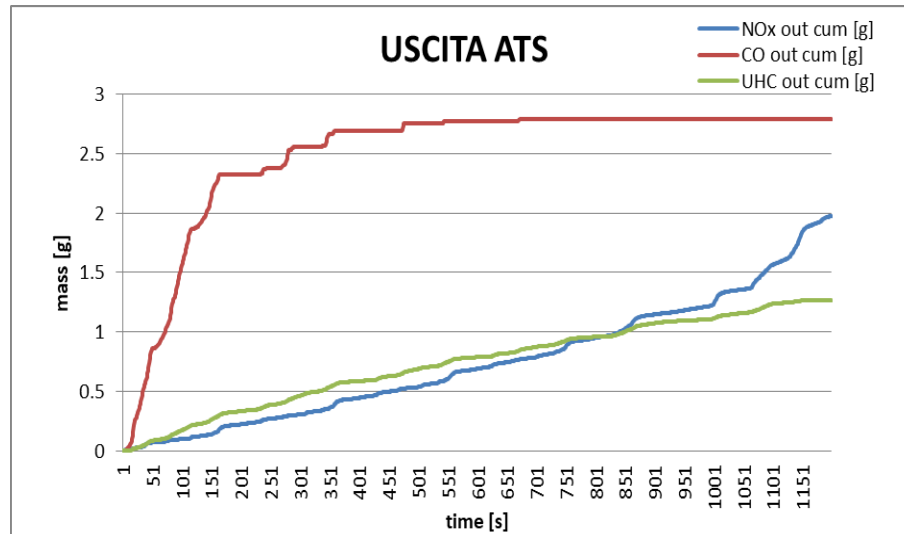


Grafico 21: Curva cumulata degli inquinanti gassosi (ossidi di azoto, idrocarburi incombusti e monossido di carbonio) alla sezione d'uscita del ATS.

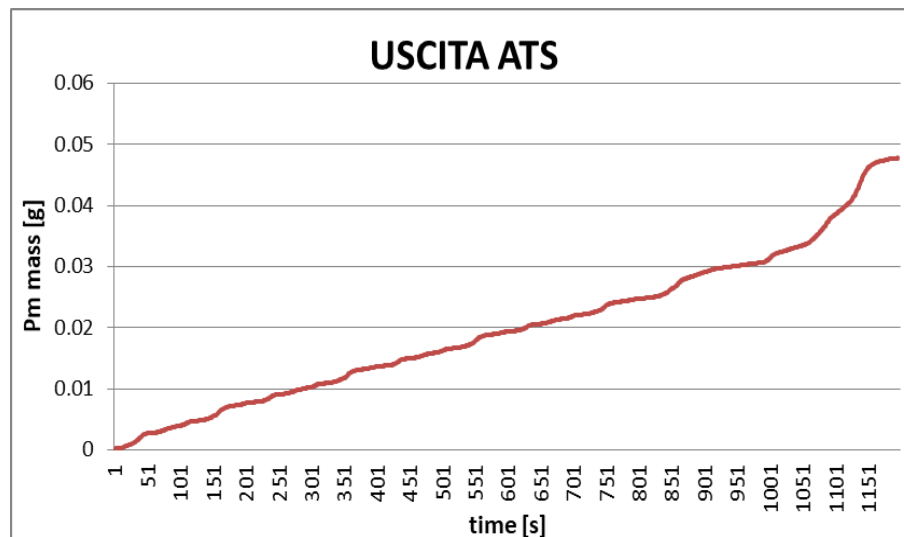


Grafico 22 Curva cumulata del particolato alla sezione d'uscita dell' ATS.

LIMITAZIONI DIESEL-LEGGERI					
	CO [mg/km]	UHC+NOX [mg/km]	PM [mg/km]	PN [-/km]	NOX [mg/km]
EURO 1	-	970	140	-	-
EURO 2	-	700	80	-	500
EURO 3	-	560	50	-	250
EURO 4	500	300	25	-	250
EURO 5	500	250	5	6×10^{12}	180
EURO 6b	500	170	5	6×10^{12}	80

Tabella 9: Sintesi delle restrizioni date dalle normative.

VERIFICA DI CONFORMITA' A EURO 4		
CO [mg/km]	248.27	<500
UHC+NOX [mg/km]	294.83	<300
NOX [mg/km]	179.35	<250
UHC [mg/km]	115.48	
PM [mg/km]	4.3361	<25

Tabella 10 Verifica della fascia d'appartenenza.

La configurazione DOC + DPF risulta esser conforme alla normativa EURO 4 soltanto, proprio come ci si aspettava. La causa è un'emissione combinata di idrocarburi incombusti e ossidi di azoto che eccede la quantità limite data dalle normative Euro 5.

Fissato l'ATS di partenza, è possibile passare alla fase di progettazione di configurazioni più avanzate e che non risultino essere obsolete in virtù delle più recenti normative.

4. Configurazioni avanzate

4.1 Configurazione con sistema di riduzione degli NO_x

Come illustrato in Figura 12, la configurazione prevede l'utilizzo di un catalizzatore ossidante (DOC) come nel caso precedente, di un sistema di riduzione degli ossidi di azoto con iniezione di ammoniaca accoppiato al filtro anti particolato in un unico componente (SDPF) e di un'ultima unità di trattamento (SCR + ASC) utile per un'ulteriore riduzione degli ossidi di azoto e per l'ossidazione dell'eventuale ammoniaca residua che si potrebbe avere all'uscita del SDPF.

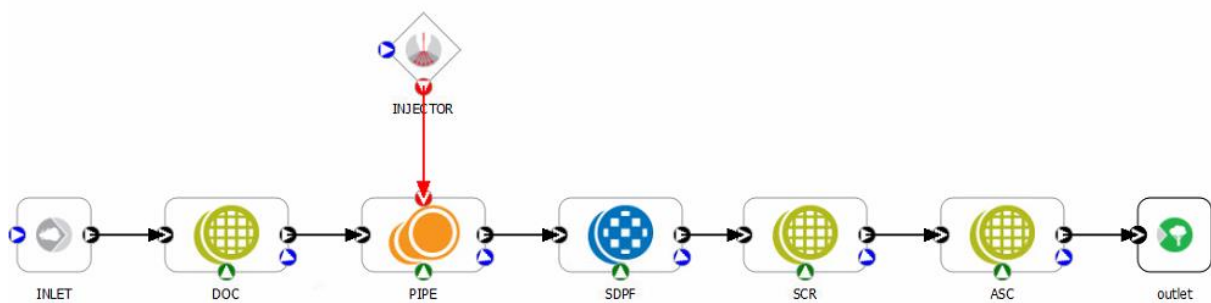


Figura 12: Configurazione dell'ATS, interfaccia Axisuite.

Dosaggio dell'ammoniaca

In sistemi di abbattimento degli ossidi di azoto di tipo SCR (Selective Catalyst Reduction), per ridurre l'inquinante in questione è necessaria la presenza di un agente riducente: ammoniaca gassosa nella fattispecie.

Una volta definito il rapporto molare tra ammoniaca e ossidi di azoto reagenti $\alpha \left[\frac{\text{kmol}_{NH_3}}{\text{kmol}_{NO_x}} \right]$, scelto come parametro di progetto, a partire dai dati di portata \dot{m}_f e concentrazione molare x_i per ogni specie i dei gas di scarico in ingresso al sistema, si può risalire alla portata massica da iniettare come segue:

- $x_{NO_x}(t) \left[\frac{\text{kmol}_{NO_x}}{\text{kmol}_{fumi}} \right] = x_{NO}(t) + x_{NO_2}(t)$;
- $MM_{fumi}(t) \left[\frac{\text{kg}_{fumi}}{\text{kmol}_{fumi}} \right] = \sum_i x_i(t) MM_i$;
- Definito il rapporto $\alpha \left[\frac{\text{kmol}_{NH_3}}{\text{kmol}_{NO_x}} \right] = \frac{\dot{n}_{NH_3}(t)}{\dot{n}_{NO_x}(t)}$ secondo il quale effettuare il dosaggio, la portata massica di ammoniaca richiesta per ogni valore di portata di fumi risulta essere:

$$y_{NH_3, fumi}(t) \left[\frac{\text{kg}_{NH_3}}{\text{kg}_{fumi}} \right] = \frac{\alpha x_{NO_x}(t)}{MM_{fumi}(t)} MM_{NH_3}$$
;
- In fine, la portata massica di ammoniaca necessaria istante per istante risulta essere pari a

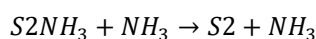
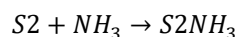
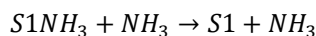
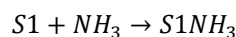
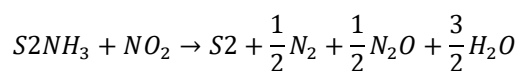
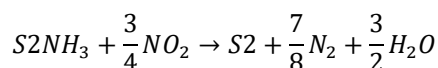
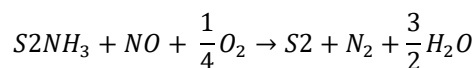
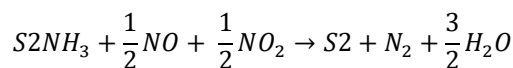
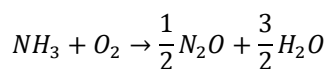
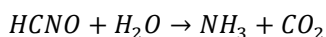
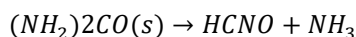
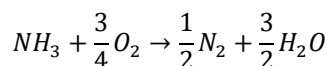
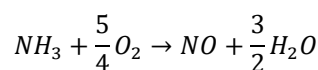
$$\dot{m}_{NH_3}(t) \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] = \dot{m}_{fumi}(t) y_{NH_3, fumi}(t).$$

La corrente di NH_3 gassosa è introdotta nel sistema da un iniettore modellato da Axisuite per mezzo del componente Injector-source (NH3 INJECTOR), mentre il miscelamento delle due correnti avviene nel componente Axiheat (PIPE), coerentemente con quanto detto nel Capitolo 2

SDPF: Selective Catalytic Reduction + Diesel Particulate Filter

I gas di scarico, dopo esser stati miscelati con l'ammoniaca incontrano il SDPF. Si tratta di un filtro anti particolato il cui substrato è ricoperto da uno strato di washcoat dov'è disperso un materiale catalitico in grado di catalizzare le reazioni di riduzione degli ossidi di azoto, così da svolgere simultaneamente le funzioni di filtraggio e abbattimento degli NO_x .

Seguono le principali reazioni catalizzate nel componente:



S1 e S2 individuano i siti liberi coinvolti nelle reazioni di adsorbimento e desorbimento superficiale. Come si nota dalle reazioni sopra riportate, e come si vedrà meglio durante l'analisi dei risultati ottenuti, l'assorbimento di ammoniaca ha luogo soprattutto sui siti S2.

Coerentemente con quanto detto nel capitolo 2, il componente SDPF è modellato da Axisuite per mezzo del componente Axitrap, sulla base dei dati tecnici del costruttore.

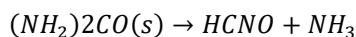
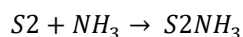
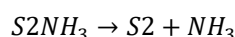
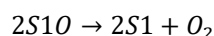
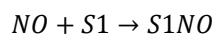
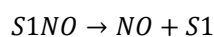
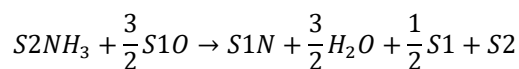
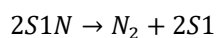
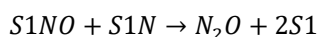
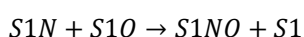
SDPF	
VOLUME DEL CATALIZZATORE [L]	3.039
LUNGHEZZA [m]	0.1778
MATERIALE CATALITICO	Cu_zeo
WASHCOAT LOADING [g/L]	106
SUBSTRATO	Cordierite
CPSI: DENSITA' CELLE	350
SPESSORE PARETE CATALIZZATORE [μm]	410

Tabella 11: Specifiche tecniche SDPF

SCR + ASC

L'ultima parte dell'ATS vede un'altra unita di riduzione degli ossidi di azoto SCR (Selective Reduction Catalyst) seguita da una ASC (Ammonia Slip Catalyst). La prima consiste in un substrato a geometria a nido d'ape con il medesimo ricoprimento del SDPF. La seconda invece presenta due diversi strati di ricoprimento del substrato a nido d'ape: uno strato PMG (con materiale catalitico composto da metalli nobili) in grado di convertire l'ammoniaca rimanente nei gas a valle del SDPF, mentre l'altro ha le stesse caratteristiche di quello del SCR. Il motivo per cui si necessita di avere un'ulteriore strato di questo tipo è dovuto al fatto che l'ammoniaca reagente nello strato PMG abbia una bassa selettività verso l'azoto, e al contrario, una maggior tendenza a essere riconvertita in NO_x . La presenza dello strato SCR permette quindi la riduzione di eventuali ossidi di azoto formati nello strato PMG.

Le reazioni catalizzate nello strato SCR sono le medesime del SDPF, mentre nello strato ASC si ha:



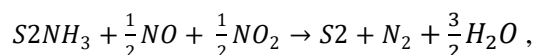
Coerentemente con quanto detto nel Capitolo 2, i componenti SCR e ASC sono modellati da Axisuite per mezzo del componente Axicat, sulla base dei dati tecnici del costruttore.

COMPONENTE	SCR	ASC
VOLUME [L]	2	0.5
LUNGHEZZA [m]	0.1459	0.0319
WASHCOAT - SCR Layer	Cu_zeo	Cu_zeo
WASHCAOT LOADING [g/L] - SCR Layer	145	145
WASHCOAT - PGM Layer	-	gAl2O3
MATERIALE ATTIVO - PGM Layer	-	Pt_Pd
WASHCAOT LOADING [g/L] - PGM Layer	-	20
ACTIVE MATERIAL LOADING [g/L] - PGM	-	0.18

Tabella 12: Specifiche tecniche SDPF.

4.1.1 Risultati ottenuti con dosaggio stechiometrico: $\alpha = NH_3/NO_x = 1$

Per la configurazione descritta, si valuta l'abbattimento di ossidi di azoto con un rapporto α unitario, e quindi un dosaggio stechiometrico della reazione:



iniettando quindi una mole di ammoniaca per ogni mole di ossidi di azoto reagenti.

Si riportano gli effetti sulle emissioni del catalizzatore ossidante:

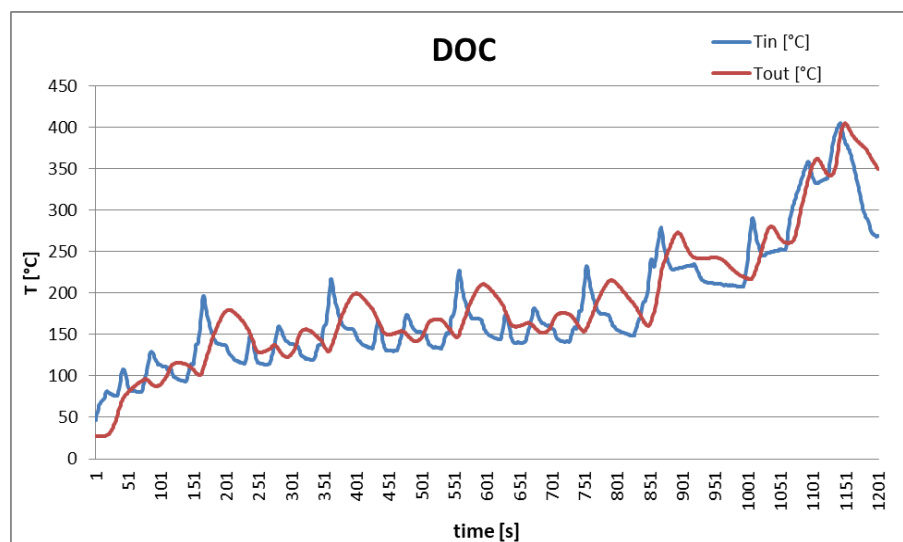


Grafico 23: Temperatura dei gas in ingresso e in uscita al DOC.

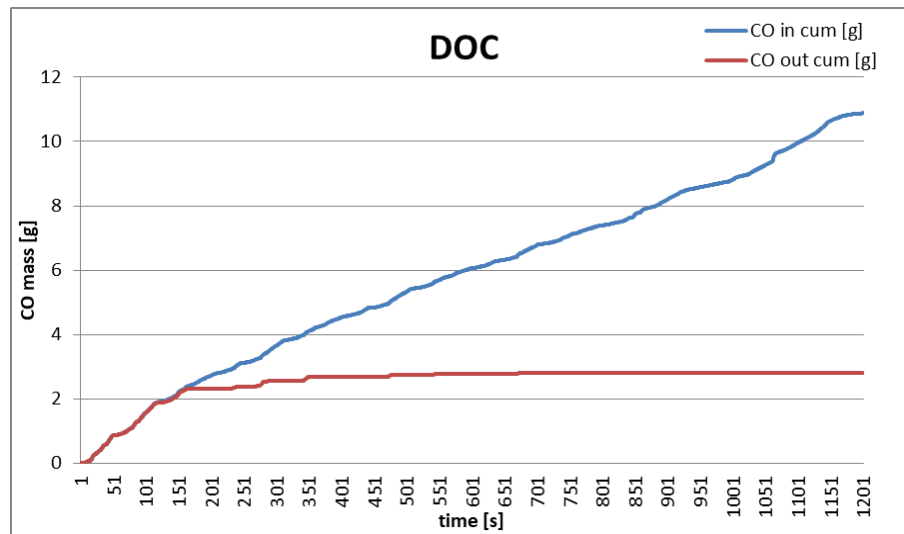


Grafico 24: Abbattimento di CO per mezzo del DOC.

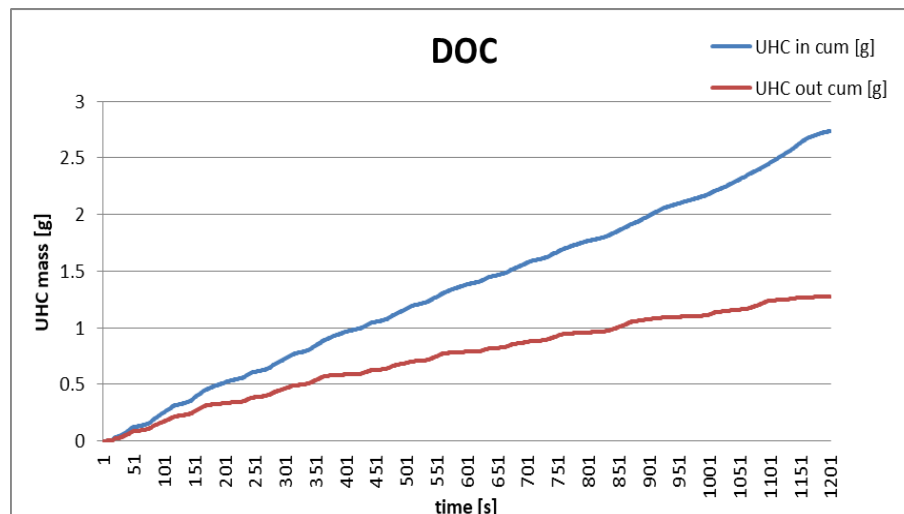


Grafico 25: Abbattimento di idrocarburi incombusti per mezzo del DOC.

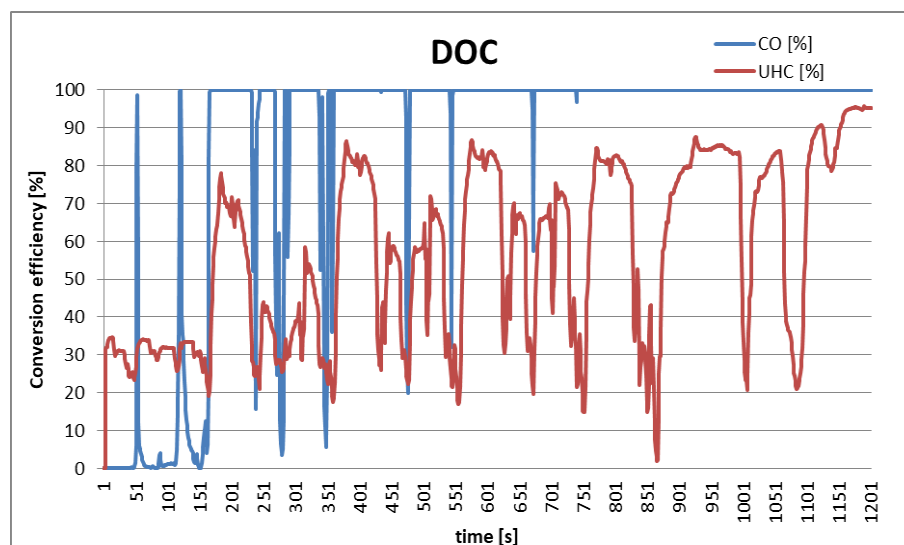


Grafico 26: Efficienza di conversione di CO e UHC.

Come ci si poteva aspettare, non vi è alcuna differenza nei risultati ottenuti rispetto alla configurazione precedentemente analizzata in quanto il componente in questione è il medesimo: il light off per le reazioni di conversione di CO avviene all'incirca dopo 150 secondi, ad una temperatura di 100°C, mentre l'ossidazione degli idrocarburi incombusti avviene sin dai primi istanti.

Si riporta ora l'effetto sulle emissioni dato dal SDPF:

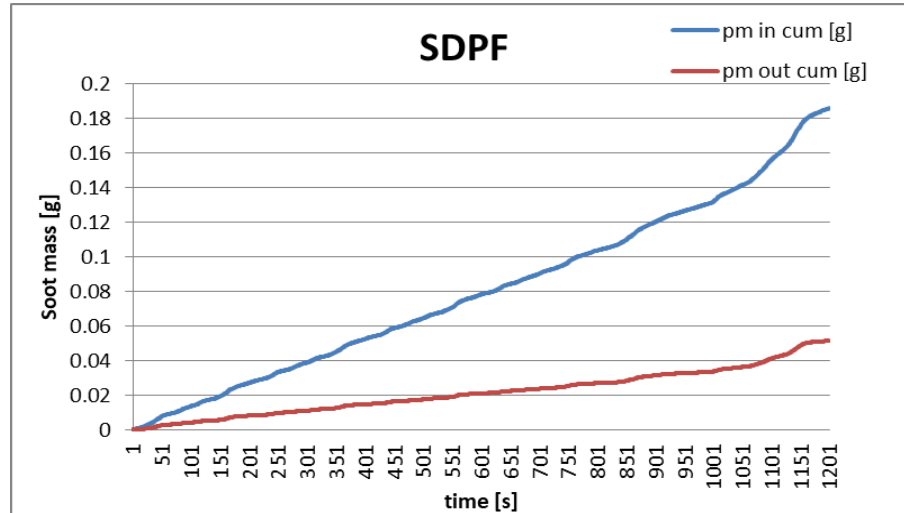


Grafico 27: Abbattimento di particolato (massa) per mezzo del SDPF.

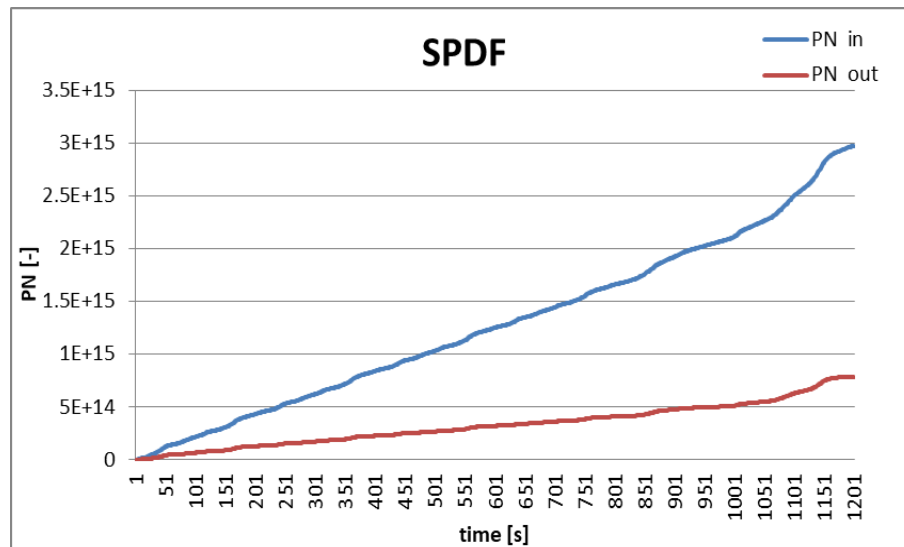


Grafico 28: Abbattimento di particolato (numero di particelle) per mezzo del SDPF.

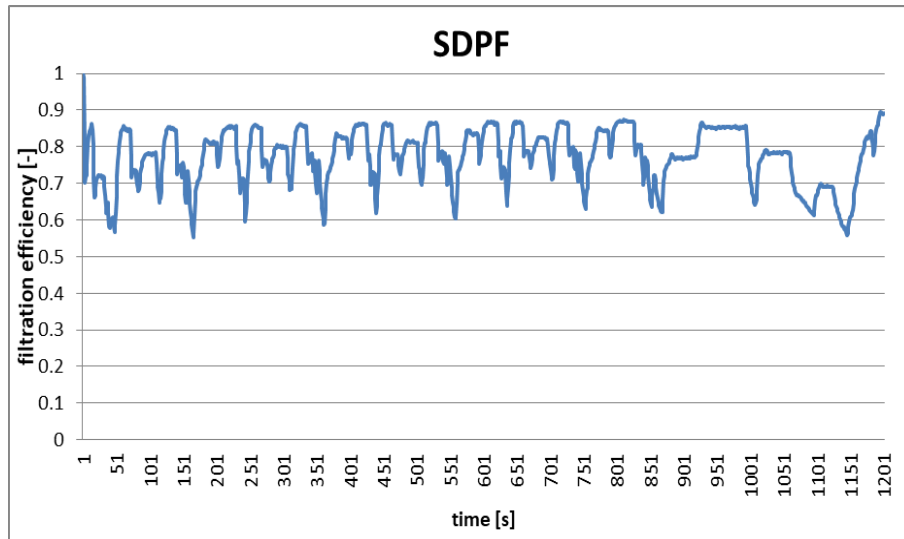


Grafico 29: Efficienza di filtrazione del SDPF.

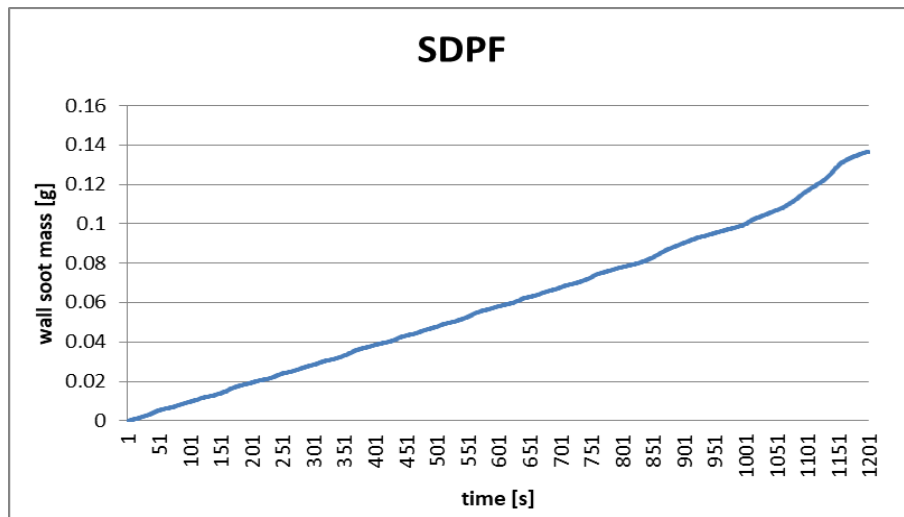


Grafico 30: Accumulo di particolato sulle pareti del filtro.

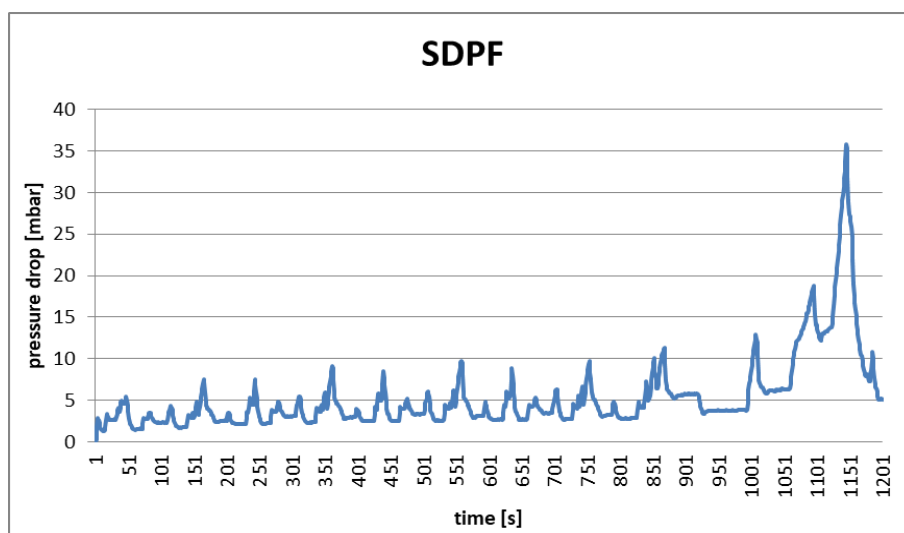


Grafico 31: Perdite di carico concentrate nel filtro.

Per quanto riguarda l'azione di filtraggio, le differenze rispetto al caso precedente sono date dalla presenza dei componenti a valle che causano un lieve innalzamento della pressione, e dunque un lievissimo peggioramento del processo di filtrazione. Essendo le differenze quasi impercettibili, ed essendo i risultati ottenuti praticamente identici anche dal punto di vista quantitativo, sono ancora valide le osservazioni fatte per il DPF della configurazione base.

Importante è invece l'effetto dello strato SCR di cui è ricoperto il substrato del filtro:

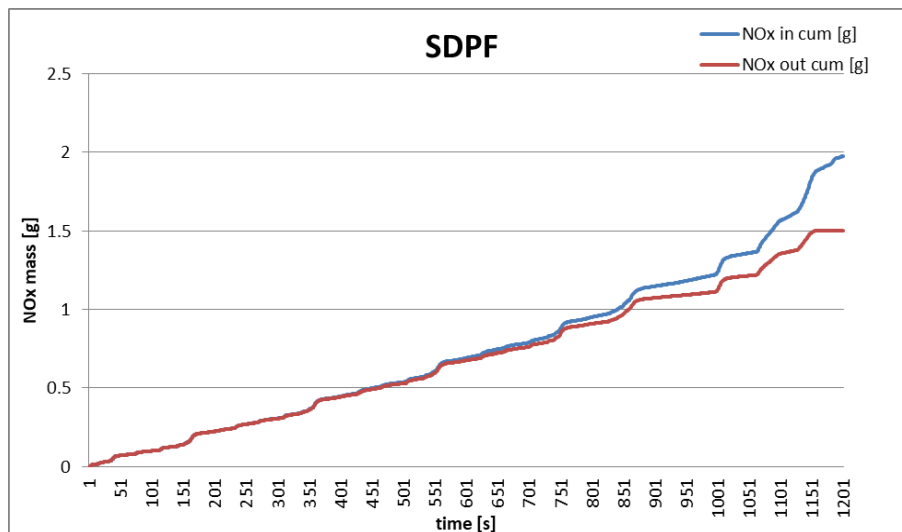


Grafico 32: Abbattimento di NOx per mezzo del SDPF.

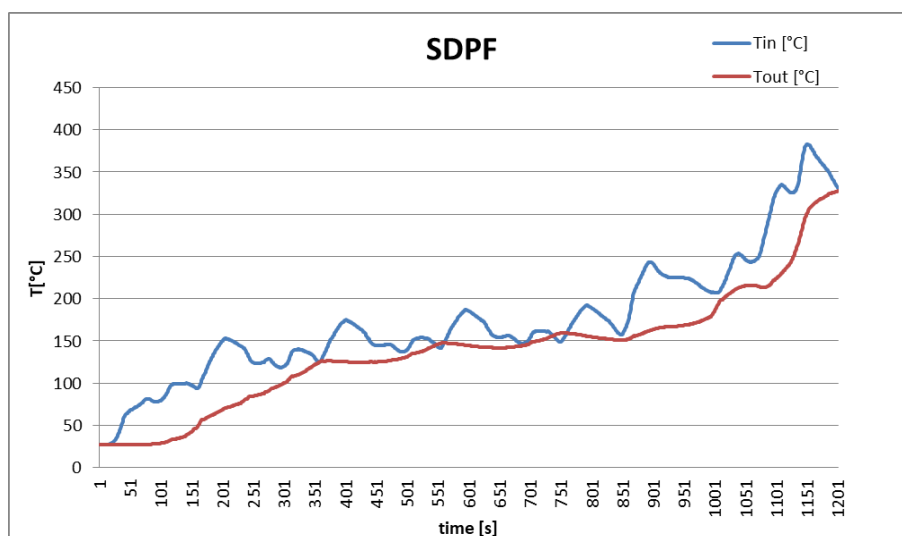


Grafico 33: Temperatura dei gas in ingresso e in uscita al SDPF.

Confrontando i Grafici 32 e 33, si nota come le curve di massa cumulata di ossidi di azoto in ingresso e in uscita al componente inizino a divergere dopo circa 350 – 400 secondi, quando la temperatura media dei gas tra ingresso e uscita SDPF supera i 130°C ed avviene il light off delle reazioni di riduzione degli NOx.

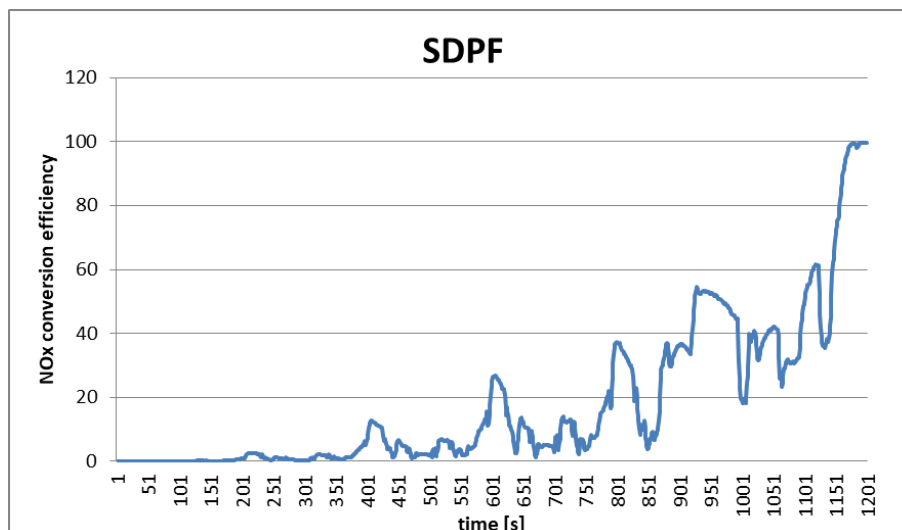


Grafico 34: Efficienza di conversione degli ossidi di azoto.

A conferma di quanto detto, si può osservare come l'efficienza di conversione degli ossidi di azoto sia prossima a zero durante i primi 350 secondi del ciclo di prova, mentre più tardi inizi ad assumere valori consistenti, con un trend crescente con la temperatura del componente (Grafico 34). Lo stesso andamento si ha per le velocità delle reazioni di riduzione di NO_x , crescenti nel tempo e quindi con la temperatura operativa del componente (Grafico 35).

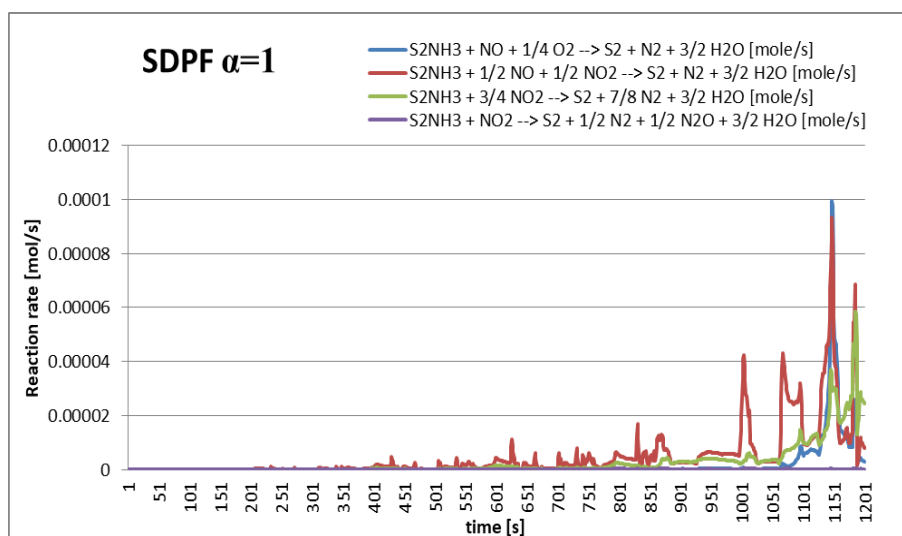


Grafico 35: Velocità delle reazioni di riduzione degli ossidi di azoto.

Altro fattore che fortemente influenza la conversione degli ossidi di azoto è la portata dei fumi. Anche se a maggiori portate di fumi e quindi di NO_x , la velocità di reazione aumenta, dalla portata dipende anche la velocità di passaggio e quindi il tempo disponibile per le reazioni catalitiche: dove vi sono picchi di portata si hanno infatti alte velocità e bassi tempi di residenza dei fumi nel catalizzatore. Si noti infatti come, a temperatura operativa fissata, al crescere della portata diminuisca invece l'efficienza di conversione (Confronto tra Grafico 4, 33 e 34). Più nel dettaglio, questo è dovuto al fatto che, data una certa temperatura operativa, dalla quale dipende la velocità delle reazioni, per valori di portata molto elevati si ha un fenomeno di conversione non più controllato dalla cinetica, ma controllato dalla velocità di diffusione degli NO_x sulla superficie del catalizzatore. In altre parole,

nonostante ad alte temperature la velocità di reazione risulti essere elevata, l'efficienza di conversione è comunque limitata dal fenomeno di diffusione molecolare. La conversione è limitata inoltre dal fatto che, a maggiori portate, corrispondano maggiori quantità di ossidi di azoto da convertire.

Dal Grafico 36 si vede come l'ammoniaca in uscita dal SDPF sia nulla, eccetto per una quantità a fine ciclo, meglio apprezzabile come portata in ingresso al SCR nel Grafico 41.

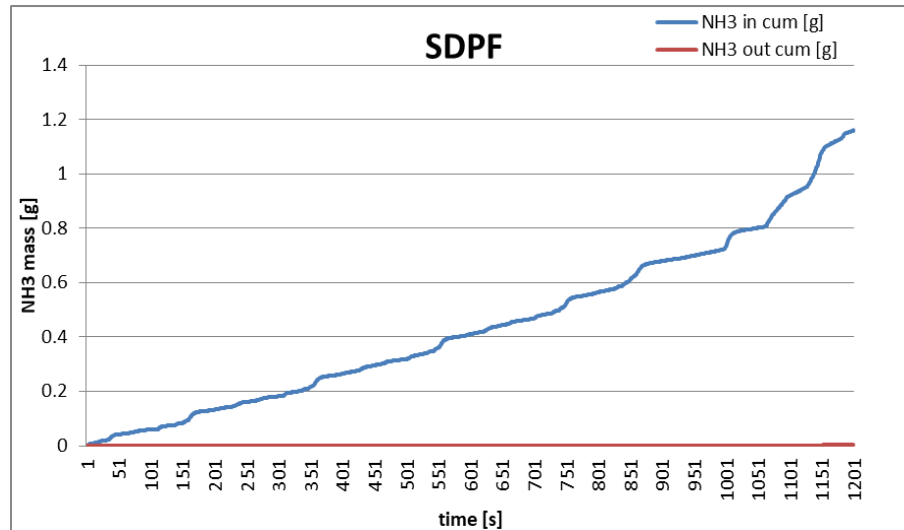


Grafico 36: Massa cumulata di ammoniaca in ingresso e in uscita al SDPF.

Questo significa che non tutta l'ammoniaca introdotta reagisce con gli NO_x : quando vi è una bassa efficienza di conversione, in particolare durante la prima frazione del ciclo di simulazione, l'ammoniaca viene solamente immagazzinata sulla superficie catalitica, reagendo con il gas inquinante per lo più nella seconda metà ciclo, quando invece si riscontrano valori di conversione maggiori.

Si mostra nel grafico sotto riportato il grado di occupazione dei siti superficiali del catalizzatore.



Grafico 37: Frazione dei siti liberi e occupati dall'ammoniaca nel SDPF.

In generale, oltre alla diminuzione dei siti S2 occupati dovuta all'alta conversione degli ossidi di azoto, si può osservare che quando avviene una diminuzione di portata di fumi, e quindi di

ammoniaca iniettata, si manifesta un rilascio di ammoniaca dovuto a una maggior velocità della reazione di desorbimento rispetto a quella di assorbimento. Proprio per questo, l'ammoniaca accumulata tende ad aumentare fino a quanto la portata inizia a decrescere nettamente, a 1000-1150 secondi dopo l'inizio del ciclo. Quanto detto è coerente coi grafici 38 e 39: la velocità della reazione di desorbimento supera (nel caso dei siti S2) e approssima (nel caso dei siti S1) quella di assorbimento solamente negli ultimi 100 secondi di ciclo, all'incirca.

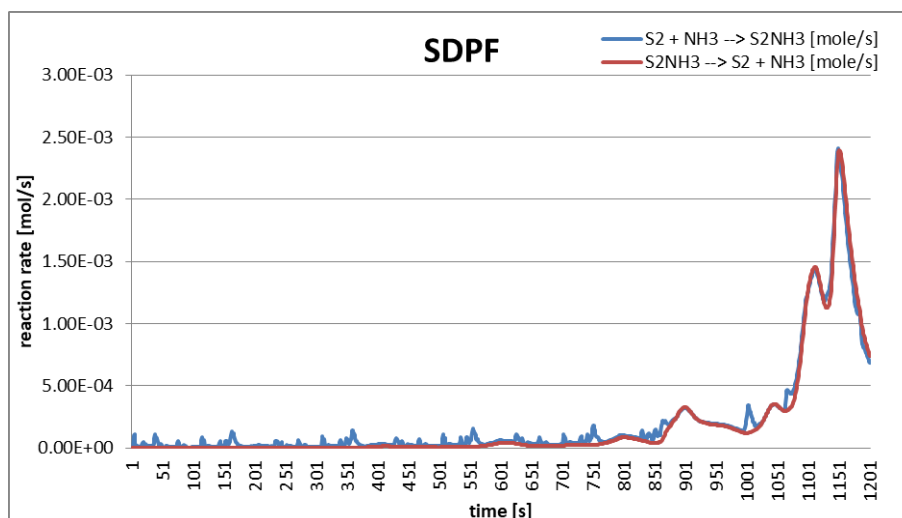


Grafico 38: Velocità delle reazioni di adsorbimento e desorbimento superficiale dell'ammoniaca.

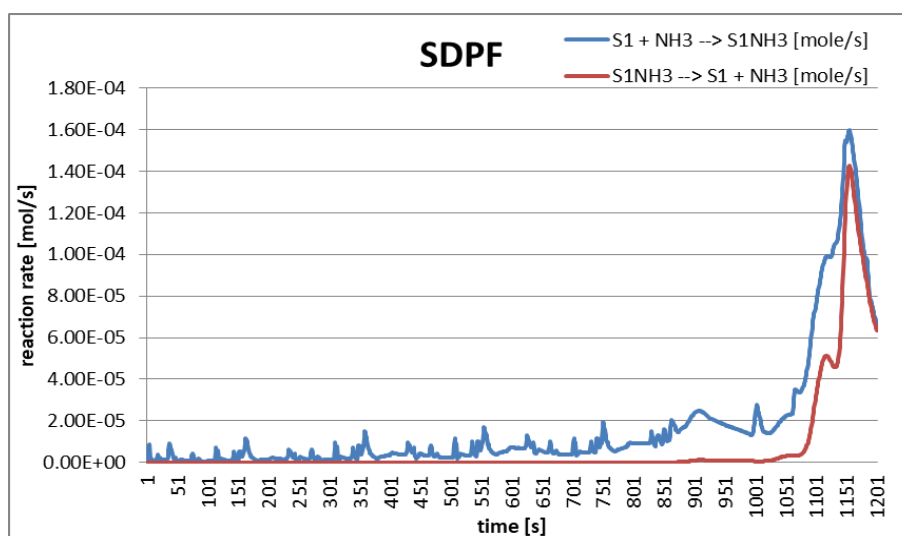


Grafico 39: Velocità delle reazioni di adsorbimento e desorbimento superficiale dell'ammoniaca.

In accordo con lo schema di reazioni riportato precedentemente, si tiene a precisare che sui siti S1 non avvengono reazioni di riduzione, ma solo di assorbimento e desorbimento di una quantità di ammoniaca minore di quella che interessa i fenomeni che avvengono sui siti S2, cioè i siti effettivamente coinvolti nelle reazioni di riduzione degli NO_x con l'ammoniaca.

Per quanto riguarda il componente SCR, data la bassissima disponibilità di ammoniaca a valle del SDPF, l'abbattimento di NO_x è sostanzialmente nullo (Grafico 40). Il componente potrebbe sembrare superfluo sotto quest'aspetto, ma la sua presenza è necessaria per convertire parte dell'ammoniaca

residua (Grafico 41), limitando così la quantità in ingresso all'ASC, il quale completa successivamente il processo.

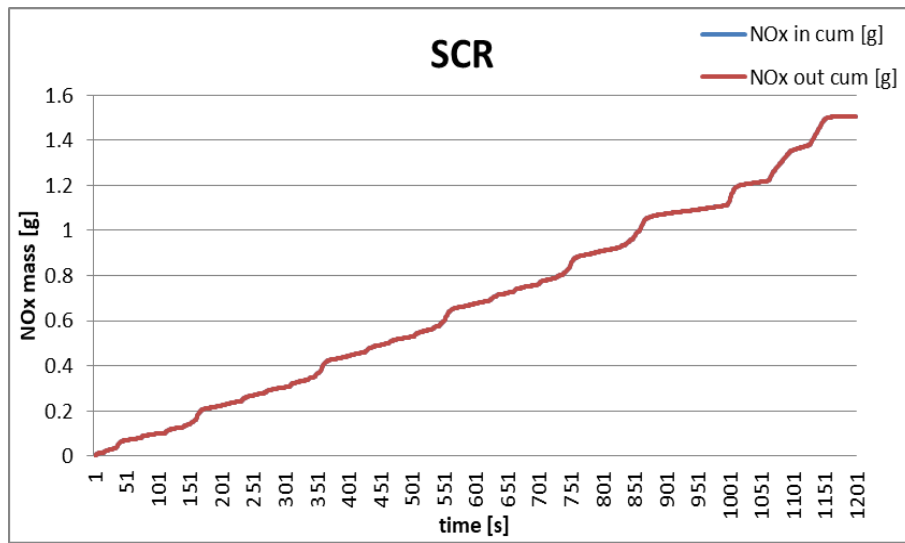


Grafico 40: Abbattimento di NOx per mezzo del SCR.

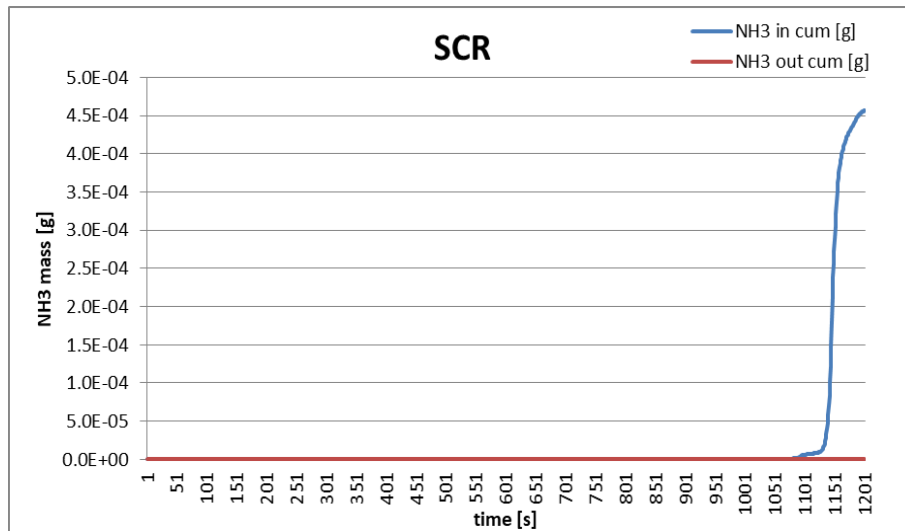


Grafico 41: Massa cumulata di ammoniaca in ingresso e in uscita al SDPF.

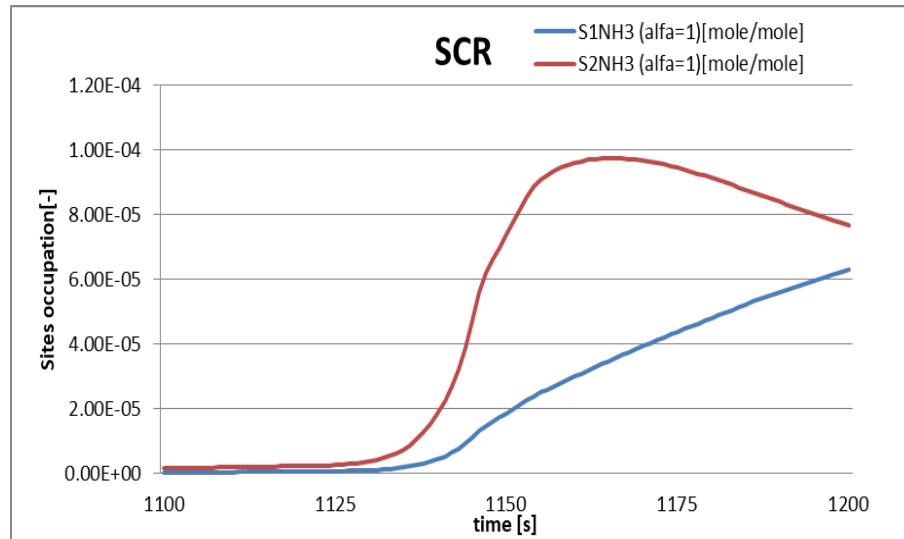


Grafico 42: Frazione dei siti del SCR occupati dall'ammoniaca.

Anche nel SCR, qualitativamente vi è lo stesso fenomeno di assorbimento e successivo rilascio dell'ammoniaca non convertita nelle reazioni di riduzione, anche se, come si vede nel grafico soprastante, la frazione di NH_3 assorbita sui siti del catalizzatore è ovviamente di entità molto minore ed avviene solo negli ultimi 100 secondi di ciclo circa, quando vi è una piccola quantità di ammoniaca in uscita dal componente che precede.

Grazie alla doppia azione dell'ASC, la quantità di ammoniaca trovata a valle del SCR viene ulteriormente ridotta di un ordine di grandezza, senza alcun aumento d'emissione in termini di NOx (Grafici 43 e 44).

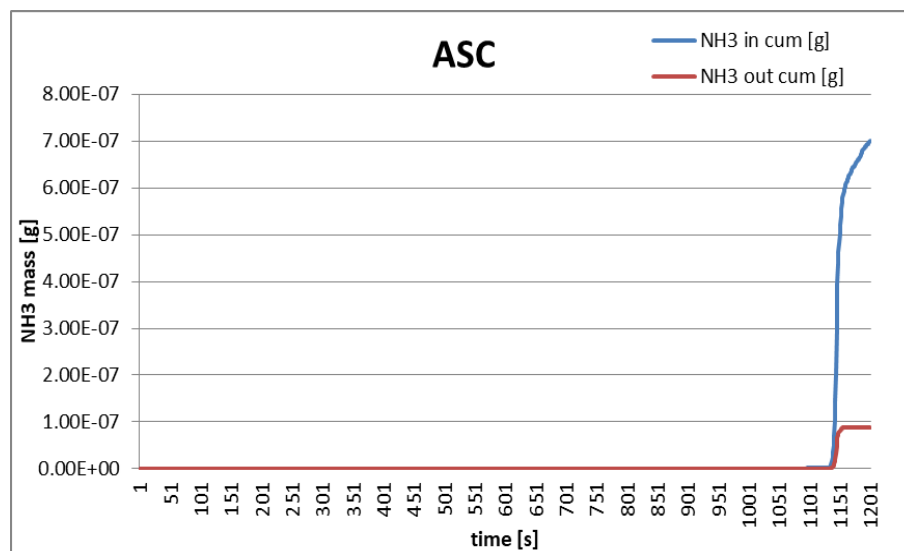


Grafico 43: Massa cumulata di ammoniaca in ingresso e in uscita all'ASC.

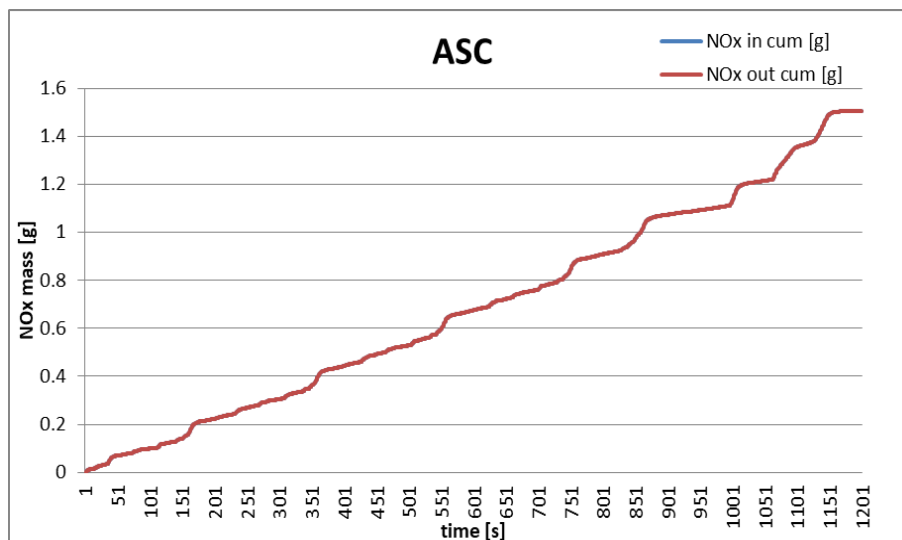


Grafico 44: Abbattimento di NOx per mezzo del SCR.

Senza gli ultimi due componenti dell'ATS, l'emissione di ammoniaca sarebbe tutt'altro che trascurabile: da un valore inferiore a 0.0001 mg ottenuto con tale figurazione, senza SCR e ASC si introdurrebbe in ambiente una quantità intorno ai 0.45 mg di NH₃ a fine ciclo, che risulterebbe essere inaccettabile data l'elevata tossicità dell'inquinante in questione.

L'importanza del SCR si può percepire soprattutto pensando all'utilizzo reale del veicolo. Fuori dalle condizioni di prova infatti, a causa di valori di ammoniaca iniettata molto variabili, proporzionali secondo il rapporto α alla portata dei fumi, potrebbero svilupparsi fenomeni di accumulo e rilascio dell'agente riducente molto importanti, e senza un SCR in grado di convertire delle maggiori quantità di ammoniaca, si rischierebbe di emetterne una quantità importante in ambiente. Questo è il motivo per cui i costruttori in genere accoppiano all'ASC un precedente stadio SCR.

Dal punto di vista quantitativo i risultati ottenuti possono essere così riassunti e confrontati coi vincoli delle normative:

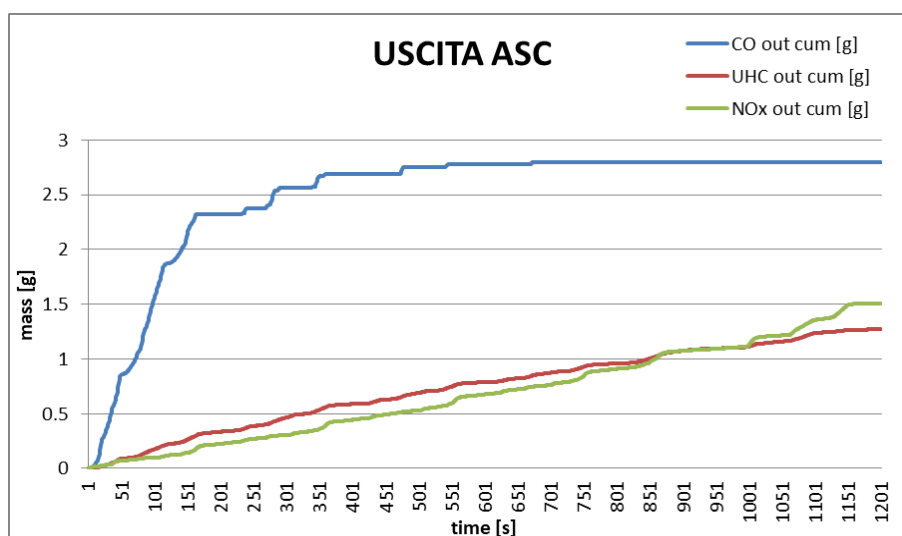


Grafico 45: Curva cumulata degli inquinanti gassosi (ossidi di azoto, idrocarburi incombusti e monossido di carbonio) alla sezione d'uscita del ATS.

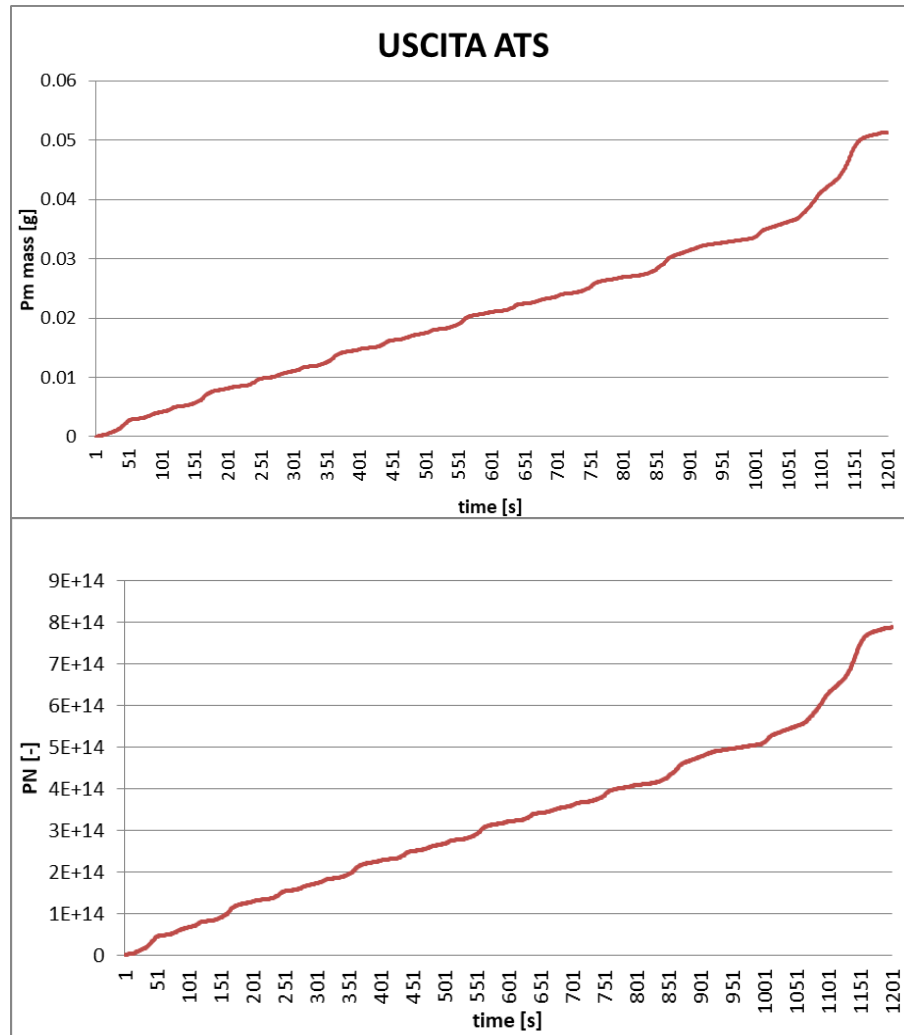


Grafico 46: Curva cumulata del particolato alla sezione d'uscita del ATS.

LIMITAZIONI DIESEL					
	CO [mg/km]	UHC+NOX [mg/km]	PM [mg/km]	PN [-/km]	NOX [mg/km]
EURO 1	-	970	140	-	-
EURO 2	-	700	80	-	500
EURO 3	-	560	50	-	250
EURO 4	500	300	25	-	250
EURO 5	500	250	5	6×10^{12}	180
EURO 6b	500	170	4.5	6×10^{12}	80

Tabella 13: Sintesi delle restrizioni date dalle normative.

VERIFICA DI CONFORMITA' A EURO 5		
CO [mg/km]	253.3	<500
UHC+NOX [mg/km]	252	>250
NOX [mg/km]	136.4	<180
UHC [mg/km]	115.5	
PM [mg/km]	4.655	<5
PN [-/km]	7.151E+13	> 6x10 ¹²
NH3 [mg/km]	8x10 ⁻⁶	

Tabella 14: Confronto dei risultati con i valori soglia della normativa EURO 5.

La nuova configurazione adottata, grazie alla riduzione di ossidi azoto ottenuta, permette di emettere una quantità di NO_x inferiore al limite massimo di 180 mg/km dettato dalla normativa Euro 5, ma poiché le emissioni combinate di NO_x e UHC superano i 250 mg/km, e il vincolo sul numero massimo di particelle emesse non è rispettato, nel complesso l'ATS è di nuovo conforme alla classe Euro 4 soltanto.

4.1.2 Risultati ottenuti con un dosaggio ricco in ammoniaca: $\alpha = NH_3/NO_x = 1.5$

Prima di focalizzare l'attenzione sui processi direttamente interessati dalla modifica progettuale effettuata in termini di ammoniaca iniettata, è opportuno ottimizzare l'unità di filtraggio (SDPF) con lo scopo di avere un abbattimento tale per cui siano rispettati entrambi i vincoli posti sul particolato dalla classe Euro 5.

Come si è visto dal precedente confronto infatti, il SDPF risulta essere inefficiente per quanto riguarda il numero di particelle emesse in ambiente. Per questo motivo, si propone di utilizzare un substrato dello stesso materiale (cordierite) ma caratterizzato da pori di diametro medio minore (10 μ m anziché 13), tale per cui, in base alla distribuzione statistica del diametro dei pori, il filtro sia in grado di trattenere tutte le particelle di dimensioni superiori ai 7 μ m di diametro. Si riportano i nuovi andamenti delle grandezze d'interesse del processo di filtraggio.

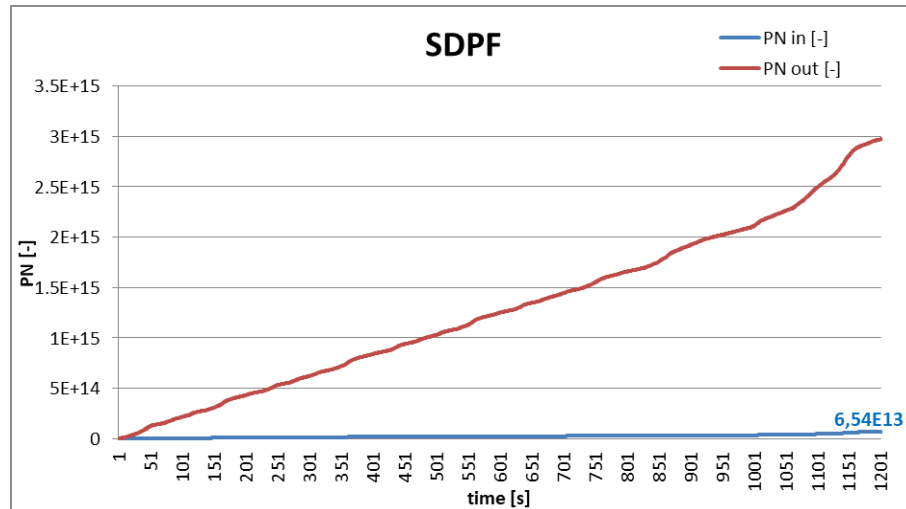


Grafico 47: Abbattimento di particolato (massa) per mezzo del SDPF.

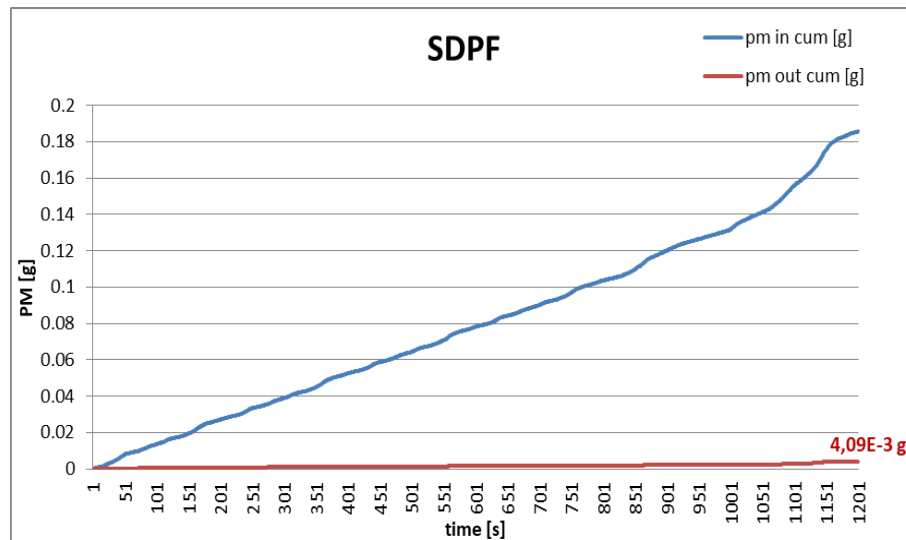


Grafico 48: Abbattimento di particolato (massa) per mezzo del SDPF.

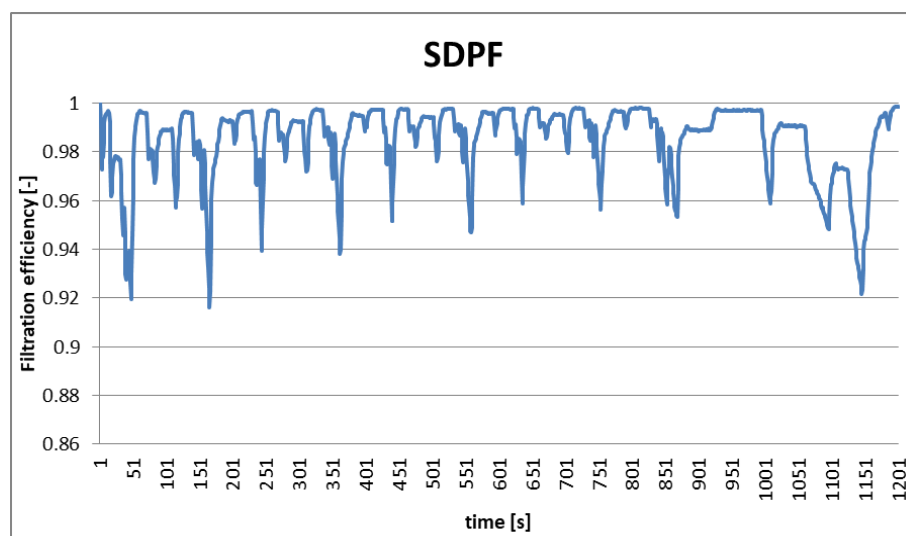


Grafico 49: Efficienza di filtrazione(in massa e numero di particelle).

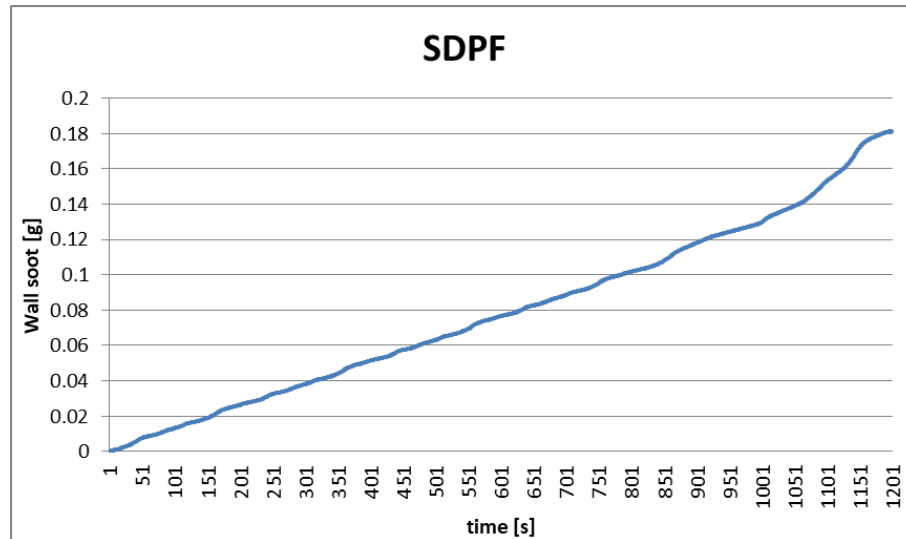


Grafico 50: Accumulo di particolato sulle pareti del filtro.

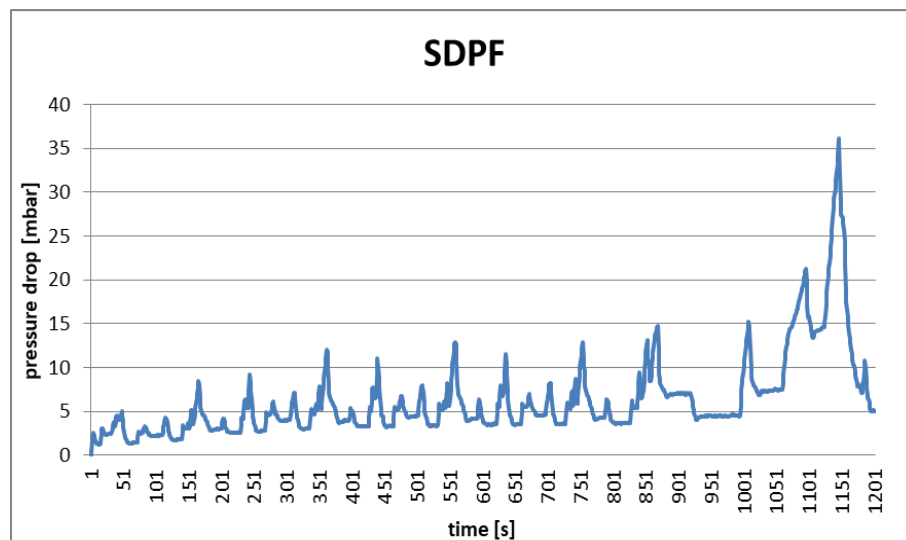


Grafico 51: Perdite di carico concentrate nel SDPF.

Dal Grafico 49 sopra riportato, sembrerebbe che il filtraggio sia egualmente efficace in termini massici e di numero di particelle. Nella realtà ci si aspetterebbe che un aumento di efficienza di filtraggio in numero di particelle non provochi lo stesso incremento anche in termini ponderali. Questa incongruenza con la realtà può essere attribuita alla semplificazione che il software adotta nel modellare il filtraggio (spherical particles), dove non si considera il fenomeno di aggregazione delle particelle. Ci aspetta quindi che il modello adottato porti a sottostimare la quantità di particolato emessa.

Ovviamente, con l'efficienza di filtrazione aumenta anche la quantità di particolato accumulata sulle pareti del filtro e con essa la perdita di carico concentrata. Il filtro avrà in questo caso bisogno di essere rigenerato dopo un periodo di tempo minore rispetto a quello utilizzato al punto precedente.

Si passa ora ad analizzare invece l'abbattimento degli NO_x frutto del nuovo dosaggio di ammoniaca.

Si è potuto notare come un rapporto α unitario porti a una riduzione di ossidi di azoto insufficiente per rientrare nella classe Euro 5. Pertanto, per abbattere ulteriormente gli ossidi di azoto si può pensare di incrementare α al fine di aumentare la quantità di ammoniaca disponibile alle reazioni di riduzione in gioco. Con lo scopo di evitare un eccessivo residuo della sostanza riducente in coda all'ATS, e in particolare mantenere meno di un ordine di grandezza di differenza rispetto al caso di dosaggio stechiometrico in termini di emissione di ammoniaca in ambiente (circa $10^{-7} g$ a fine ciclo, cioè $10^{-5} mg/km$), si limita α al valore 1.5.

Focalizzandosi sul SDPF, confrontando i risultati ottenuti con i due diversi dosaggi, si nota che l'incremento di ammoniaca iniettata causa effettivamente un aumento delle velocità delle reazioni di riduzione, e quindi una maggior efficienza di conversione e un maggior abbattimento di NO_x .

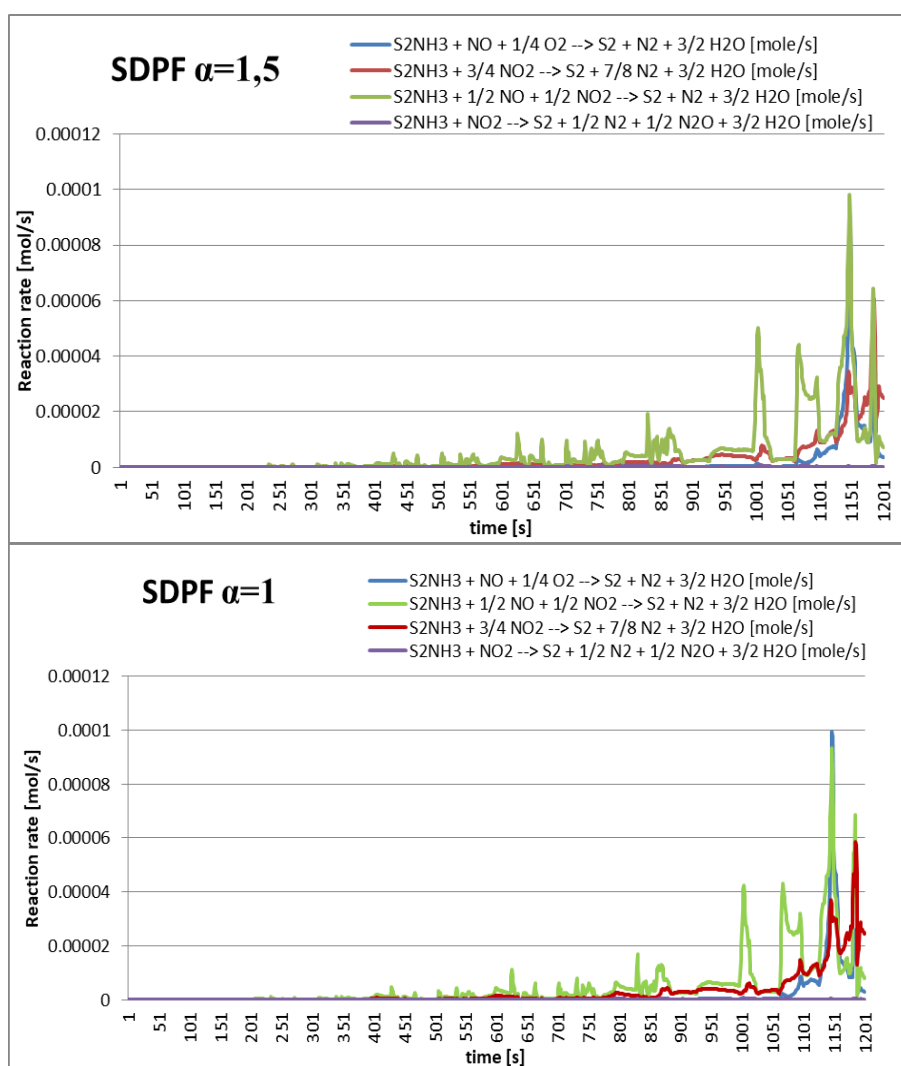


Grafico 52: Confronto tra i diversi dosaggi di ammoniaca in termini di velocità di reazione di riduzione degli ossidi d' azoto nel SDPF.

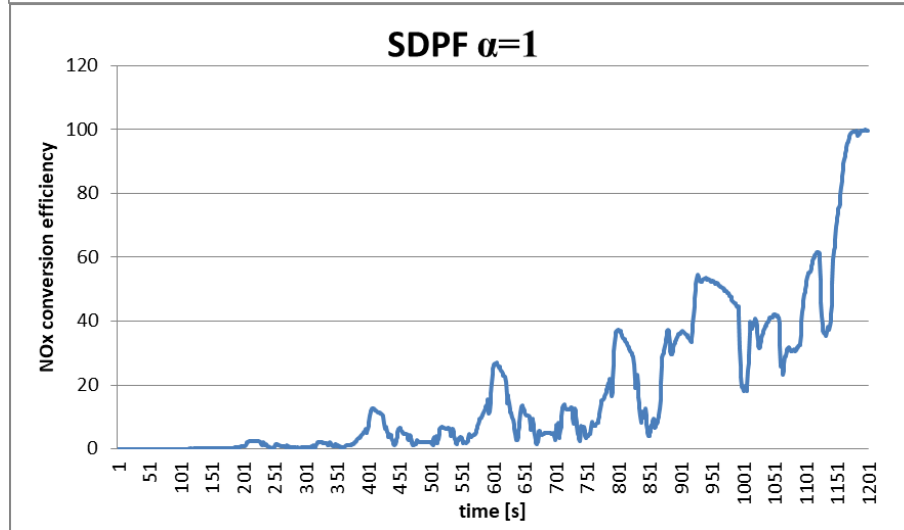
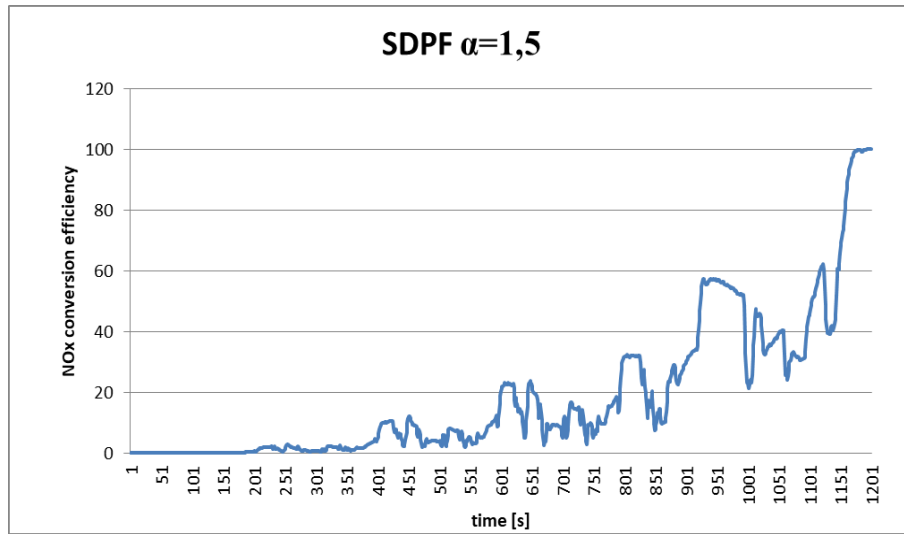


Grafico 53: Confronto tra i due diversi dosaggi di ammoniaca in termini di efficienza di conversione degli ossidi d'azoto

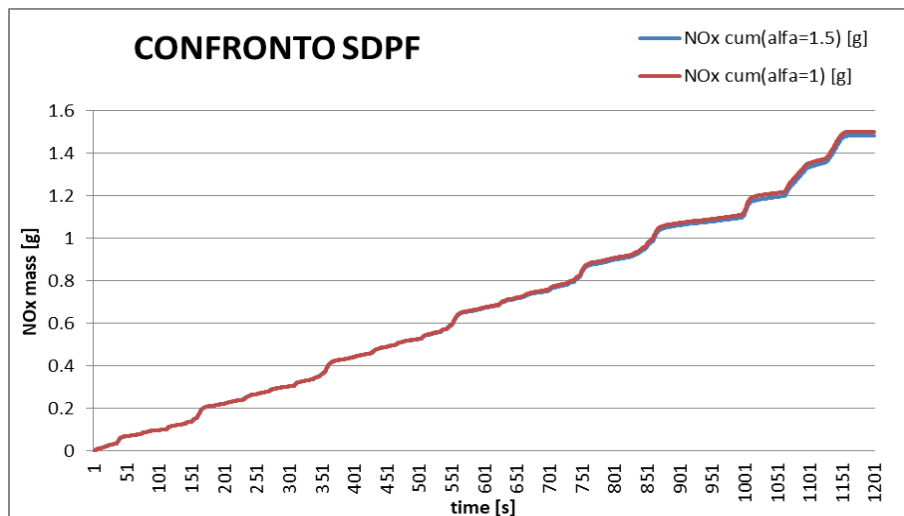


Grafico 54: Confronto tra i diversi dosaggi di ammoniaca in termini di quantità di ossidi di azoto in uscita dal SDPF.

Anche il fenomeno di accumulo di ammoniaca risulta essere più importante al crescere del rapporto NH_3/NO_x , così come il desorbimento superficiale a fine ciclo, che provoca un aumento più marcato dei siti superficiali liberi durante gli ultimi 100 secondi. Si osservino nel grafico 55 sotto riportato le maggiori pendenze delle curve con $\alpha=1.5$. Ad ogni modo la quantità di ammoniaca immagazzinata nel componente risulta essere maggiore nel caso $\alpha=1.5$.

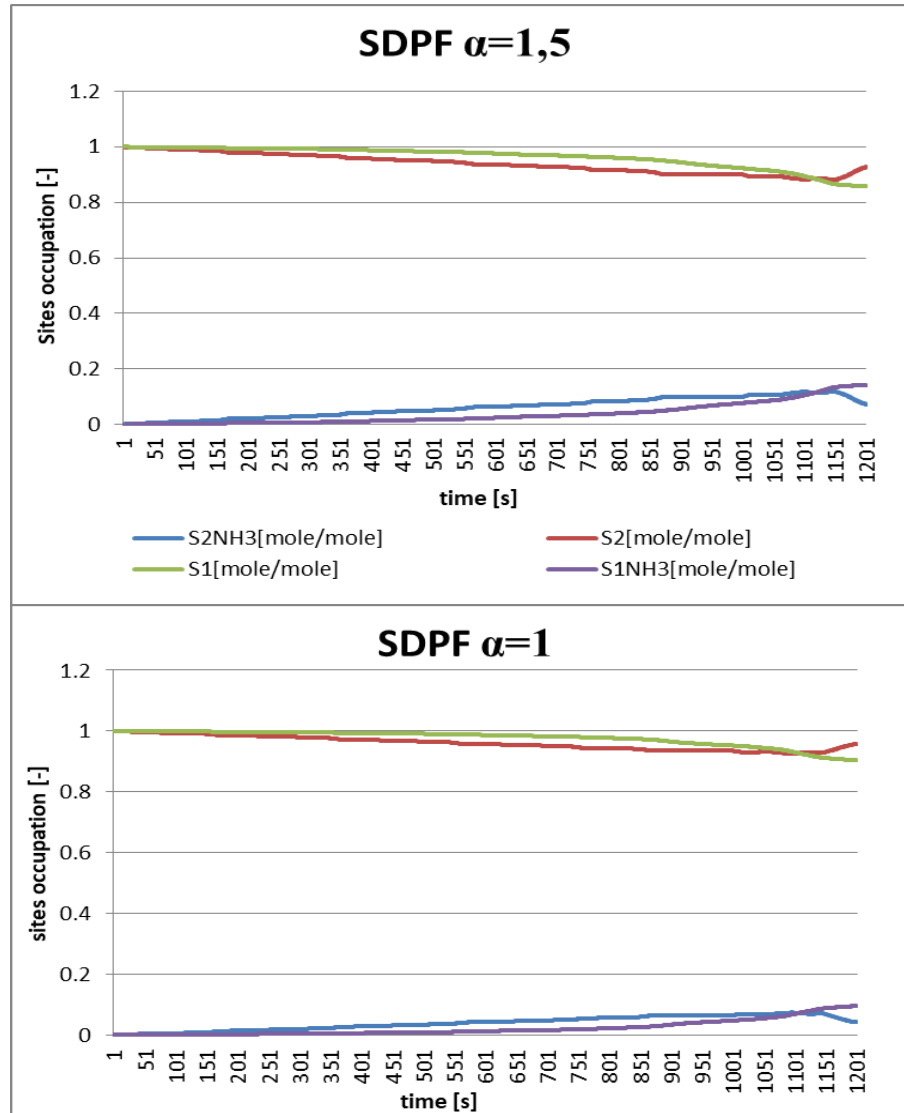


Grafico 55: Confronto tra i due diversi dosaggi di ammoniaca in termini di frazione dei siti coinvolti nei fenomeni di assorbimento e desorbimento di NH_3 nel SDPF.

Segue il confronto tra i due dosaggi relativo al componente SCR.

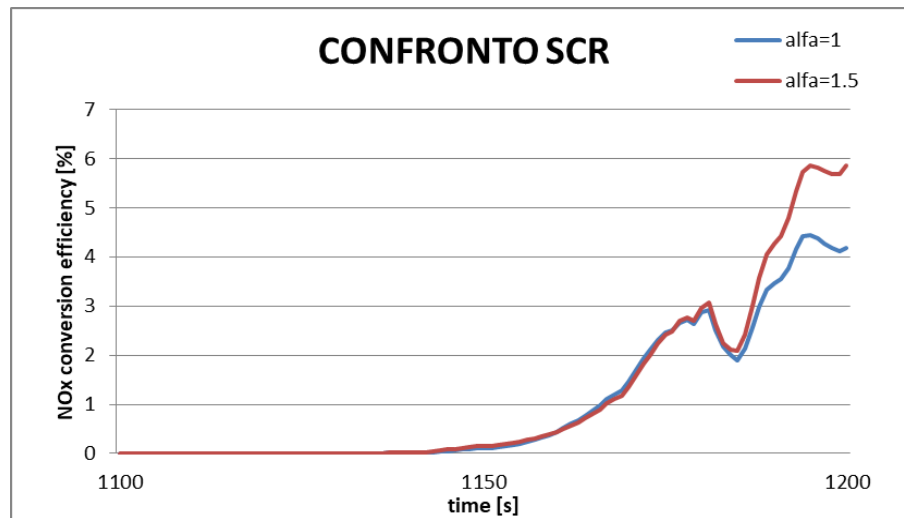


Grafico 56: Confronto tra i due diversi dosaggi di ammoniaca in termini di efficienza di conversione di NOx nel SCR.

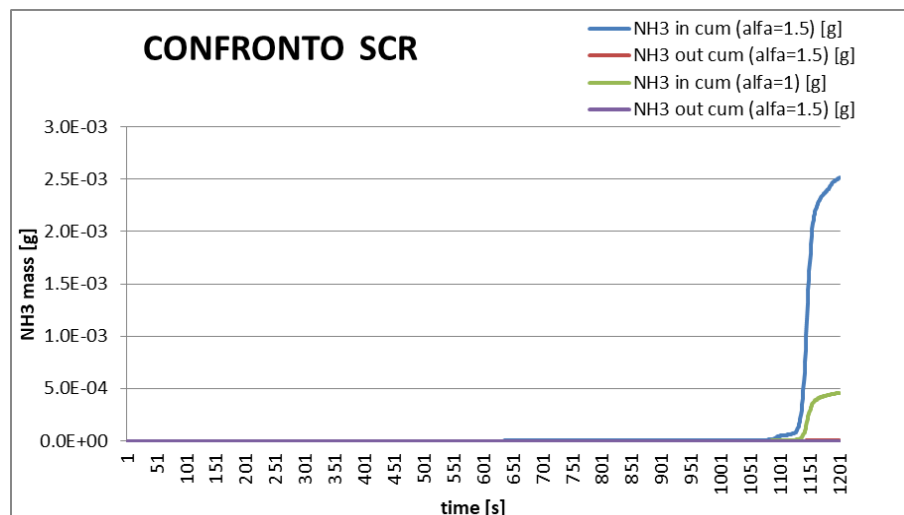


Grafico 57: Confronto tra i due diversi dosaggi di ammoniaca in termini di massa cumulata di NH₃ in ingresso e in uscita al SCR.

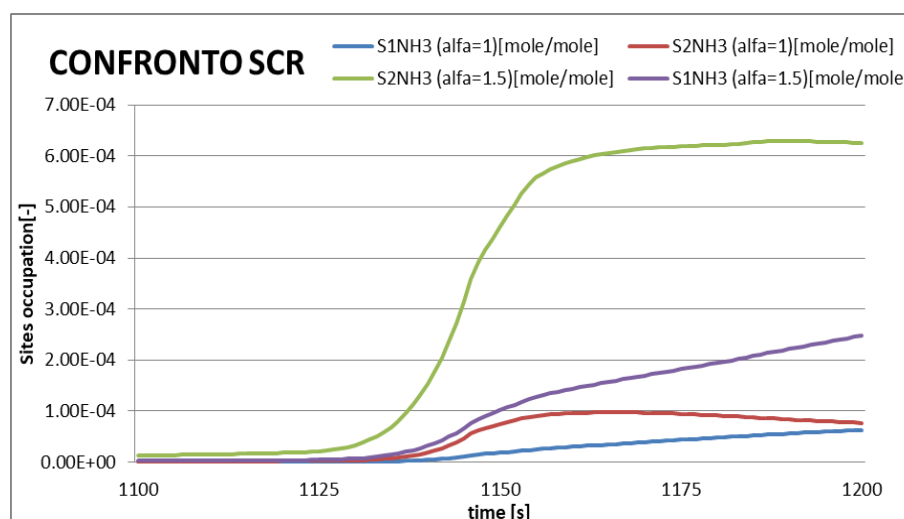


Grafico 58: Confronto tra i due diversi dosaggi di ammoniaca in termini di accumulo di ammoniaca sui siti del SCR.

Rispetto al SDPF, il SCR da di nuovo un contributo irrisorio in termini di abbattimento di NO_x , seppur maggiore rispetto al caso di α unitario (si veda la maggior efficienza di conversione, Grafico 56). Lo scopo primario del componente è ancora la limitazione di NH_3 residua, che viene poi ulteriormente abbattuta nell'ultima sezione dell'ATS.

Nonostante nel SCR avvenga una maggior conversione di NO_x ed un più importante fenomeno di storage di ammoniaca (Grafico 58), l'ASC vede comunque una quantità di ammoniaca in ingresso di un ordine di grandezza maggiore rispetto al caso di NH_3/NO_x stechiometrico.

L'ASC riesce comunque a contenere la quantità di ammoniaca residua in ambiente, mantenendola circa dello stesso ordine di grandezza del caso precedente: nei grafici seguenti si confrontano l'efficienza di conversione di NH_3 e le quantità di ammoniaca residua a fine ciclo date dalle due diverse opzioni.

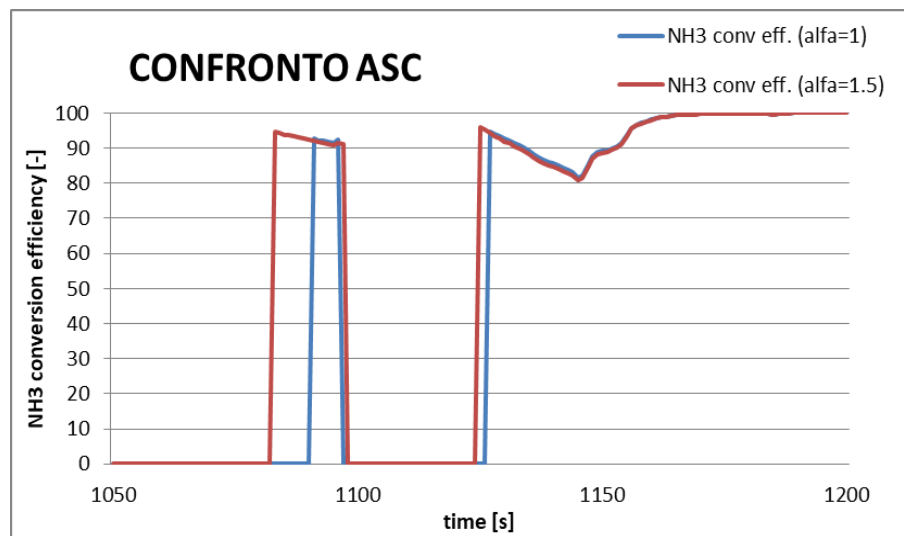


Grafico 59: Confronto tra i due diversi dosaggi di ammoniaca in termini di efficienza di conversione dell'ammoniaca nel ASC.

Si osservi come l'abbattimento sia proporzionale alla quantità in ingresso soltanto, date le condizioni invariate di temperatura tra i due casi.

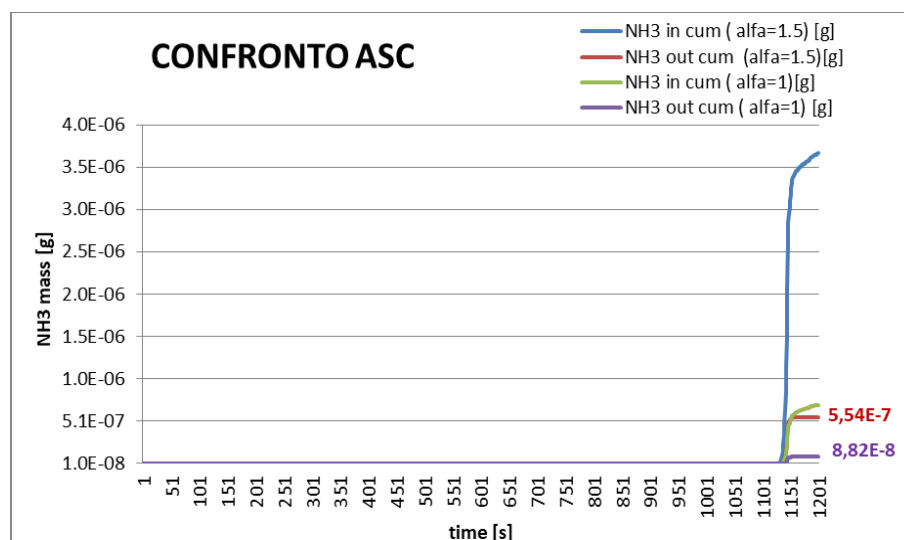


Grafico 60: Confronto tra i due diversi dosaggi di ammoniaca in termini di massa cumulata di NH_3 in ingresso e in uscita all'ASC.

Dal confronto evidenziato nei grafici 61 e 62 sotto riportati, si vede che il miglioramento ottenuto incrementando α in termini di abbattimento degli ossidi di azoto non risulta essere particolarmente importante: circa 20 mg in meno emessi a fine ciclo.

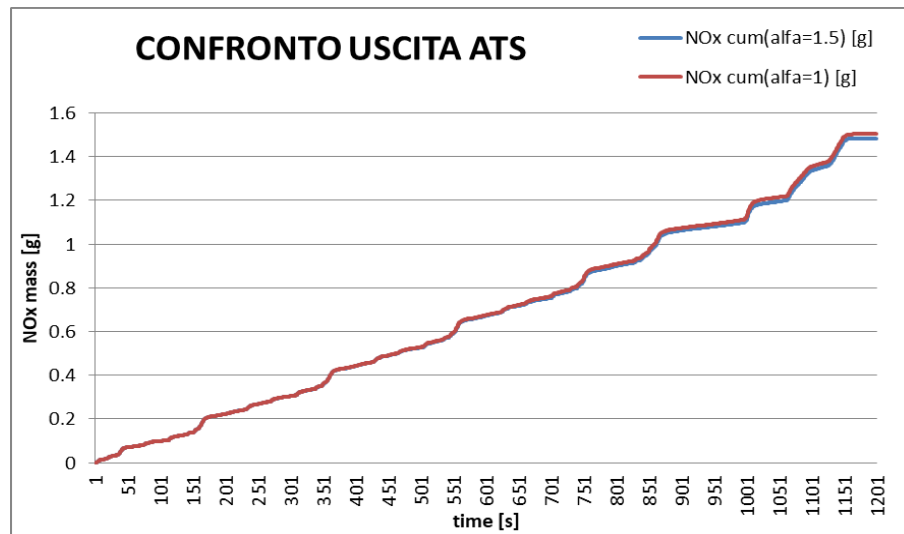


Grafico 61: Confronto tra i due diversi dosaggi di ammoniaca in termini di quantità di NOx alla sezione d'uscita dell'ATS.

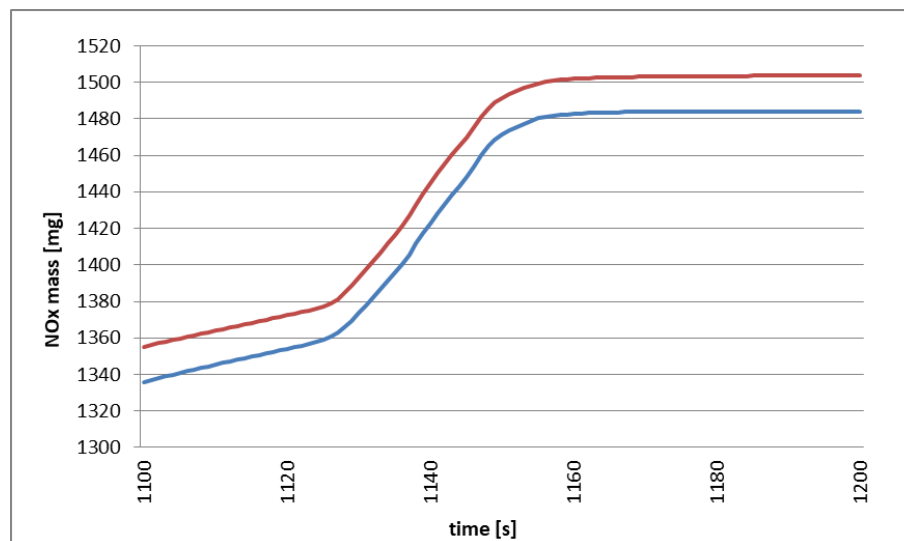


Grafico 62: Confronto tra i due diversi dosaggi di ammoniaca in termini di abbattimento di NOx alla sezione d'uscita dell'ATS, negli ultimi 100 s di ciclo di prova.

Dal punto di vista quantitativo i risultati ottenuti possono essere così riassunti e confrontati coi vincoli delle normative d'interesse:

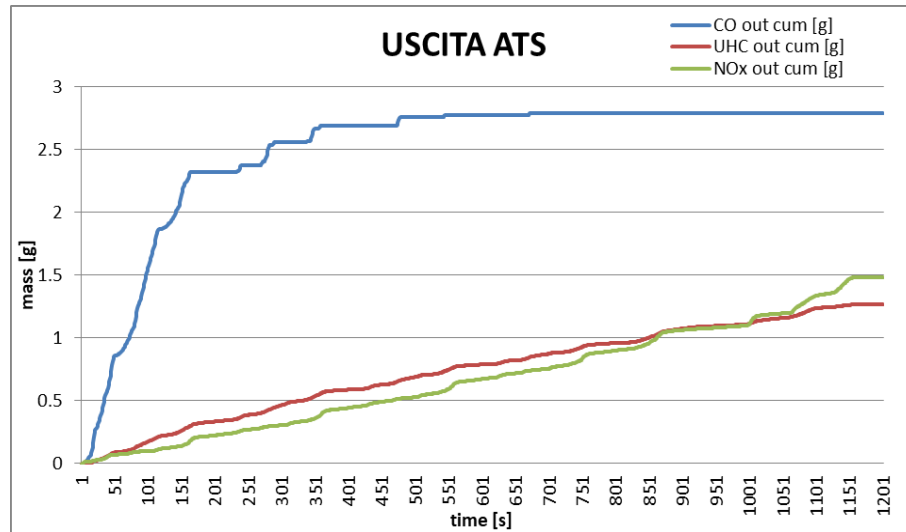


Grafico 63: Curva cumulata degli inquinanti gassosi (ossidi di azoto, idrocarburi incombusti e monossido di carbonio) alla sezione d'uscita del ATS.

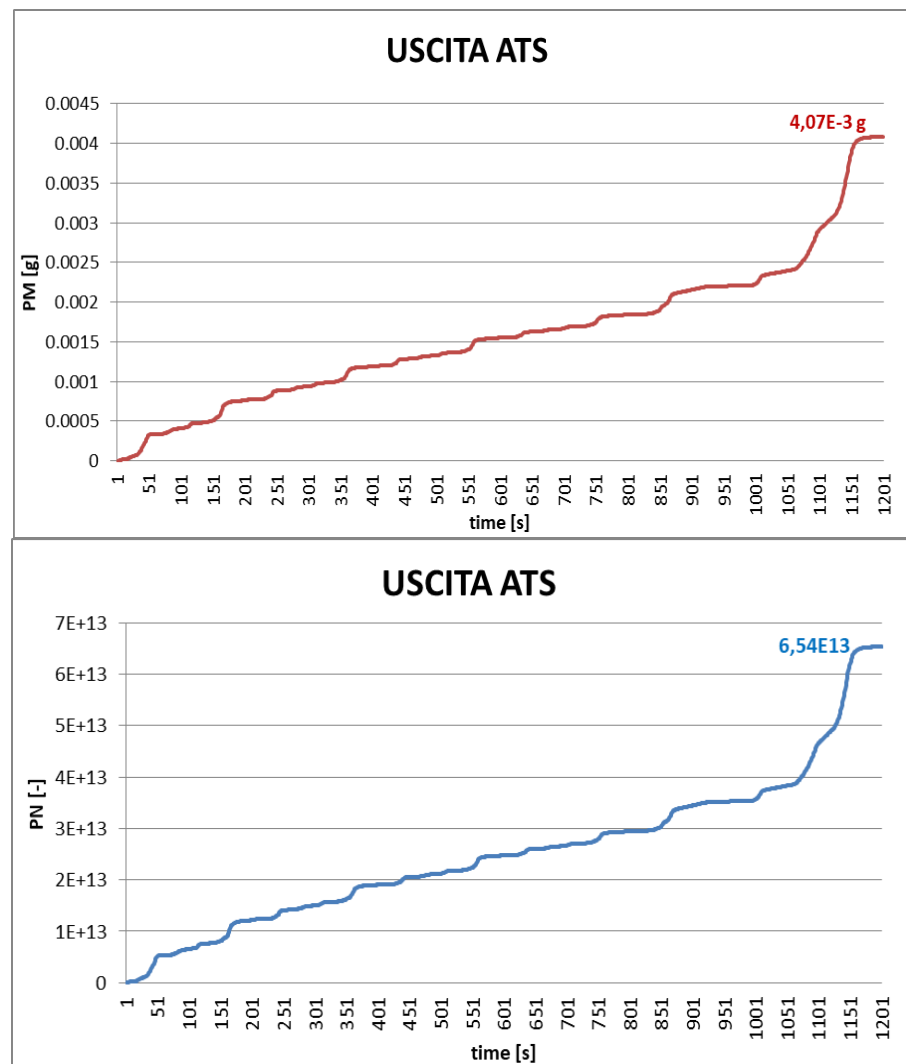


Grafico 64: Cumulate di PM e PN alla sezione d'uscita del ATS.

LIMITAZIONI DIESEL					
	CO [mg/km]	UHC+NOX [mg/km]	PM [mg/km]	PN [-/km]	NOX [mg/km]
EURO 1	-	970	140	-	-
EURO 2	-	700	80	-	500
EURO 3	-	560	50	-	250
EURO 4	500	300	25	-	250
EURO 5	500	250	5	-	180
EURO 6b	500	170	5	-	80

Tabella 15: Sintesi delle restrizioni date dalle normative.

VERIFICA DI CONFORMITA' A EURO 5		
CO [mg/km]	253.2977	<500
UHC+NOX [mg/km]	250	<250
NOX [mg/km]	134.6421	<180
UHC [mg/km]	115.4876	
PM [mg/km]	0.3715	<5
PN [-/km]	5.933×10^{12}	< 6×10^{12}
NH3 [mg/km]	4.917×10^{-5}	

Tabella 16: Confronto dei risultati con i valori soglia della normativa EURO5.

In seguito alla modifica riportata nel substrato del SDPF, il filtraggio risulta essere efficace quanto basta per rispettare entrambi i vincoli più stringenti imposti sulla quantità di particolato emessa. La quantità di NO_x emessa in coda all'ATS non è diminuita di molto in termini assoluti, ma quanto basta per far sì che risultino esser rispettate le normative Euro 5. Perché il sistema sia conforme alle normative classificate come Euro 6b, le modifiche apportate non risultano essere ancora sufficienti.

In virtù dei migliori risultati ottenuti, nelle configurazioni successive si andrà a mantenere il valore di NH_3/NO_x pari a 1.5.

4.2 Configurazione con EHC

Con lo scopo di superare i limiti della precedente configurazione, l'ATS in questo caso vede l'aggiunta di un catalizzatore riscaldato (EHC), posizionato all'ingresso del sistema di post trattamento dei gas combusti (Figura 13).

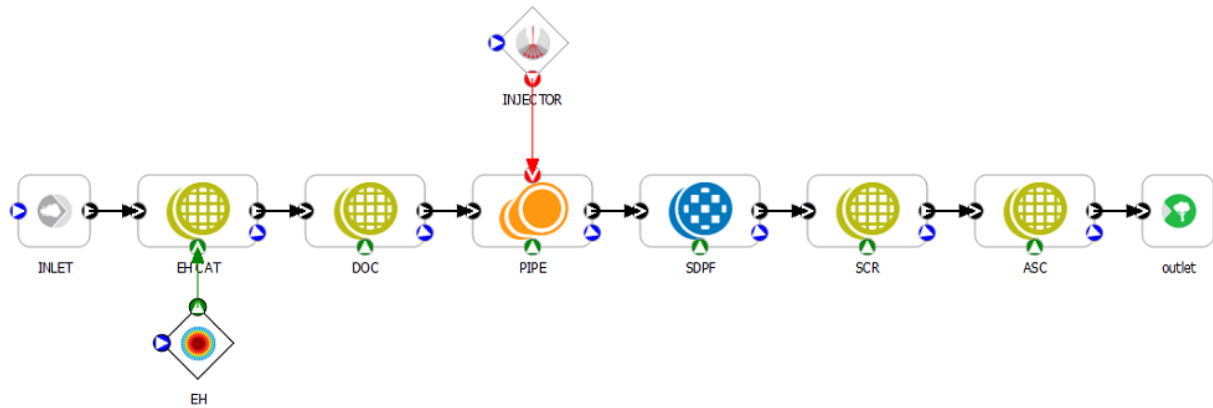


Figura 13: Configurazione ASC, interfaccia Axisuite.

EHC: Electrically Heated Catalyst



Figura 14: EHC in funzione.

L'EHC non è nient'altro che un primo breve tratto del DOC dove vi si trova un circuito elettrico a forma di spirale in cui viene dissipata potenza elettrica per effetto Joule. Per limitare questo fenomeno alla sola sezione di ingresso, questa è distaccata dalla restante parte del catalizzatore ossidante. Lo scopo del dispositivo è quello di innalzare la temperatura dei gas in ingresso al sistema per aumentare le temperature operative all'interno dei componenti, e quindi favorire un più rapido raggiungimento del light off delle reazioni catalitiche, in modo tale da ottenere elevati valori di conversione dei reagenti in tempi molto più brevi.

Coerentemente con quanto detto nel capitolo 2, il EHC è modellato da Axisuite per mezzo del componente Axicat, sulla base dei dati tecnici del costruttore (Tabella 17), da cui si nota che il componente DOC, comprensivo del EHC, ha sostanzialmente le stesse dimensioni e geometria di quello utilizzato nelle due configurazioni appena trattate, ma il suo substrato è costituito di materiale metallico, con lo scopo di avere transitori di temperatura più brevi.

E' importante precisare che il modello monodimensionale considera una temperatura uniforme su tutta la sezione dell'EHC, trascurando gli effetti tridimensionali dovuti alla geometria propria del circuito elettrico.

EHC	
VOLUME [L]	1.39
LUGHEZZA [m]	0.1105 (eH=9mm)
MATERIALE WASHCOAT	gAl ₂ O ₃
MATERIALE CATALITICO	Pt_Pd
WASHCAOT LOADING [g/L]	180
LOADING MATERIALE ATTIVO [g/L]	3.885
CPSI: DENSITA' CANALI	400
CPSI EHC	130
SPESSORE PARETE CATALIZZATORE [μm]	40
SPESSORE PARETE EHC [μm]	50
MATERIALE DEL SUBSTRATO	Acciaio

Tabella 17: Specifiche tecniche EHC

L'input elettrico viene fornito al catalizzatore riscaldato per mezzo del componente "Local boundary" di Axisuite, opportunamente configurato per fornire una determinata potenza elettrica.

La possibilità di disporre di tale energia non è affatto scontata, e come accennato prima, è legata alla tipologia di veicolo e dalla sua capacità di produrre e immagazzinare potenza elettrica. Tale configurazione trova quindi applicazione nel caso dei veicoli mild hybrid che, come descritto nel capitolo introduttivo, sono in grado di immagazzinare l'energia elettrica erogata dal motore o recuperata durante la fase di frenata rigenerativa in un'apposita batteria, più capiente di quella di un veicolo ordinario, e utilizzarla per riscaldare i gas di scarico.

Vengono ora analizzati i risultati di tre diverse strategie di utilizzo della potenza elettrica in ingresso al catalizzatore riscaldato.

4.2.1 Risultati ottenuti con potenza elettrica in ingresso costante: $P_{el} = 2 \text{ kW}$

Per prima cosa, per osservare i benefici del nuovo componente, gli si impone una potenza elettrica costante e pari a 2 kW:

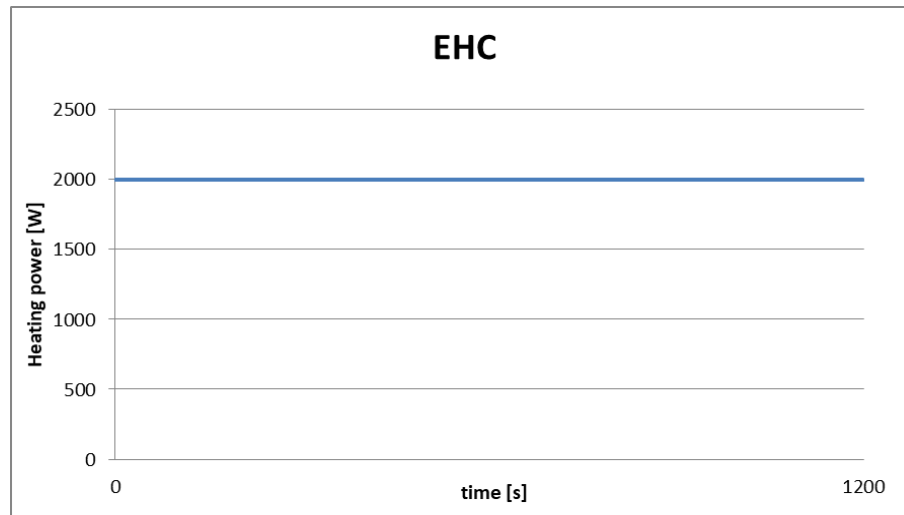


Grafico 65: Andamento della potenza elettrica in ingresso alla sezione EHC.

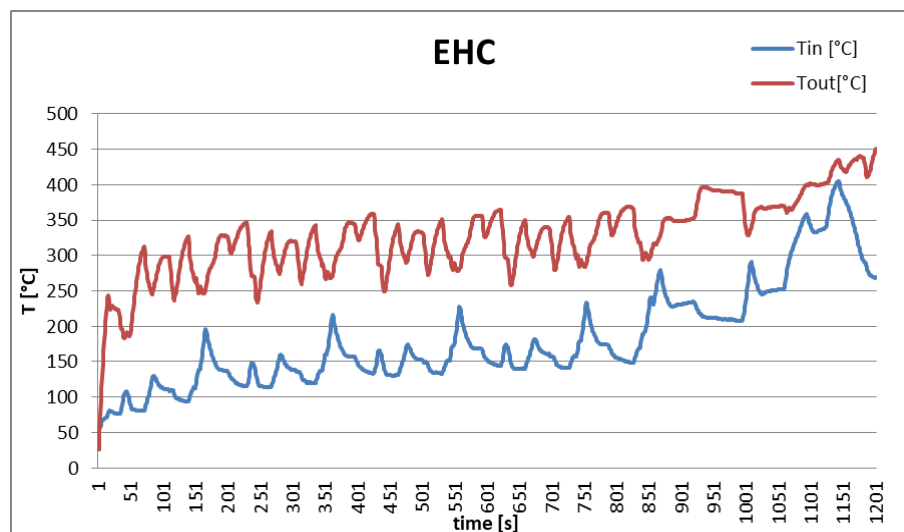


Grafico 66: Temperatura dei gas in ingresso e in uscita al EHC.

Grazie alla sezione riscaldata del catalizzatore ossidante, i gas di scarico che lo attraversano subiscono un importante incremento di temperatura (Grafico 66). La temperatura massima all'interno dell'ATS raggiunge i 450 °C, temperatura del tutto ordinaria in questi tipi di sistema, e che pertanto non ci si aspetta non dia alcun problema di stress termici nei materiali.

Essendo la sezione EHC quella effettivamente riscaldata ed avendo questa una bassa inerzia termica dovuta al volume molto ridotto, il transitorio di riscaldamento del componente è quasi istantaneo, così come il raggiungimento di elevate temperature operative del catalizzatore e perciò l'abbattimento sia di CO che degli idrocarburi incombusti presenti nei gas di scarico.

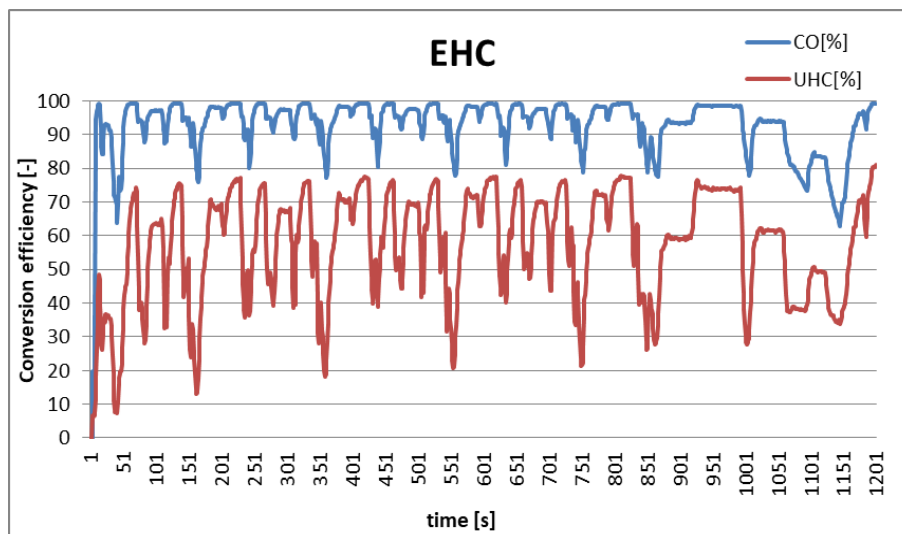


Grafico 67: Efficienza di conversione di CO e UHC nell'EHC.

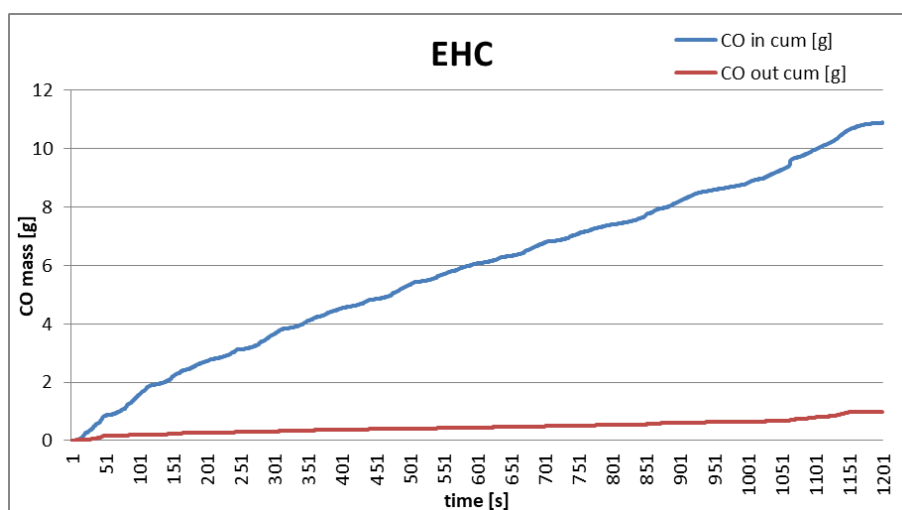


Grafico 68: Abbattimento CO per mezzo del EHC.

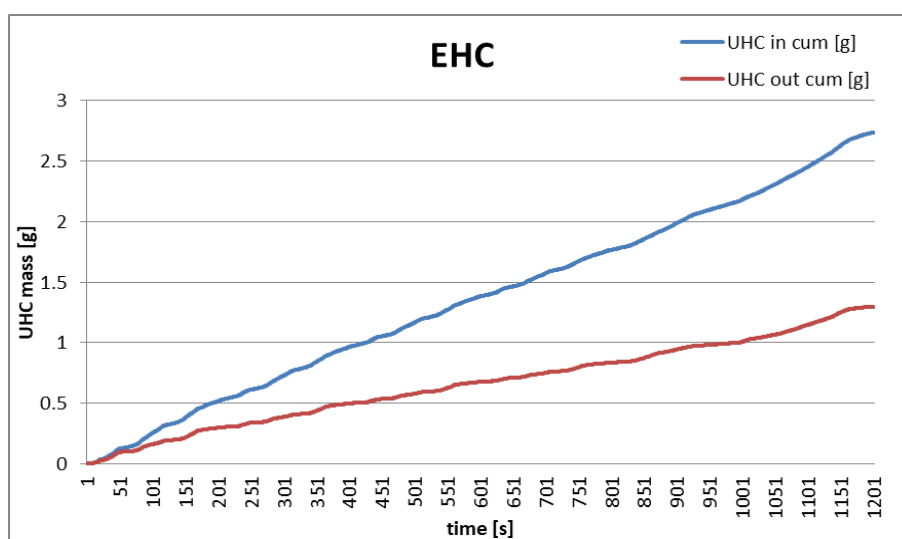


Grafico 69: Abbattimento degli idrocarburi incombusti per mezzo dell' EHC

Per quanto riguarda l'effetto dato sul DOC vero e proprio, l'EHC permette di avere un tempo di raggiungimento del light off molto breve anche per le reazioni di ossidazione del CO, che si ricorda necessitano di temperature più elevate di quelle per l'ossidazione degli idrocarburi incombusti per essere innescate, ma una volta raggiunto il light off, siano convertite dal componente in maniera più efficiente. Ad ogni modo, si ha una più elevata conversione dei reagenti e quindi un miglior abbattimento di ambe due gli inquinanti (Grafici 71, 72 e 73).

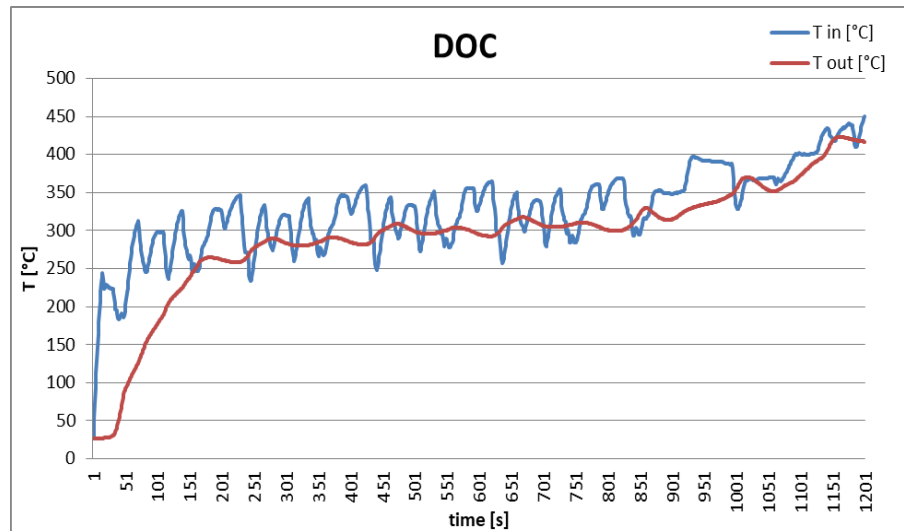


Grafico 70: Temperatura dei gas in ingresso e in uscita al DOC.

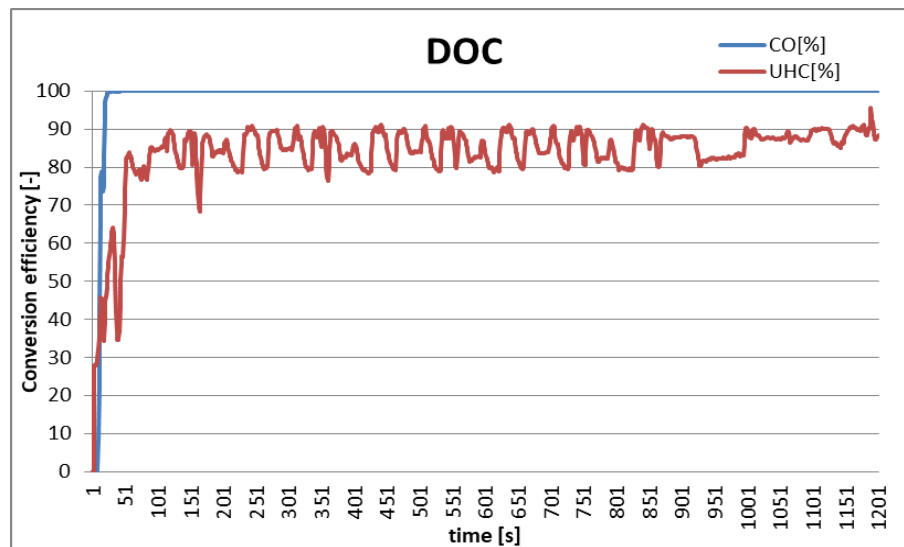


Grafico 71: Efficienza di conversione di CO e UHC nel DOC.

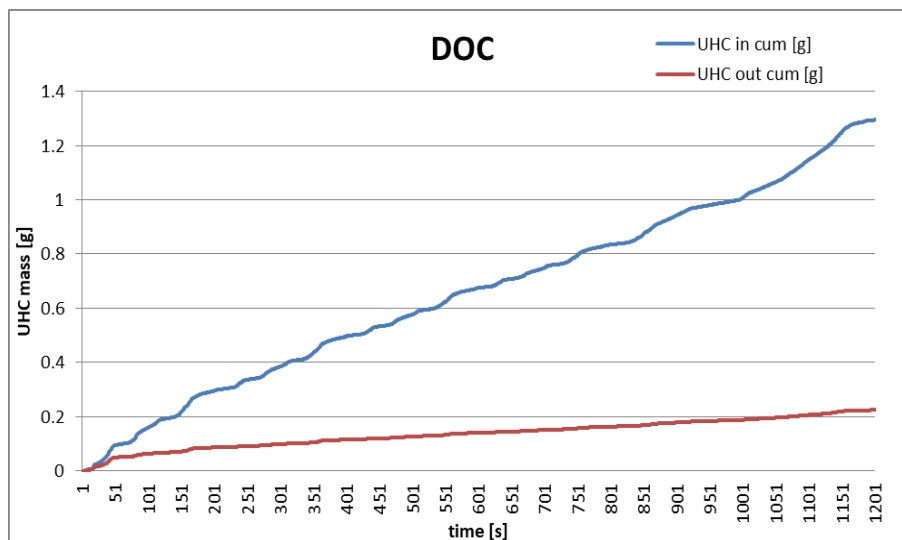


Grafico 72: Abbattimento degli idrocarburi incombusti per mezzo del DOC.

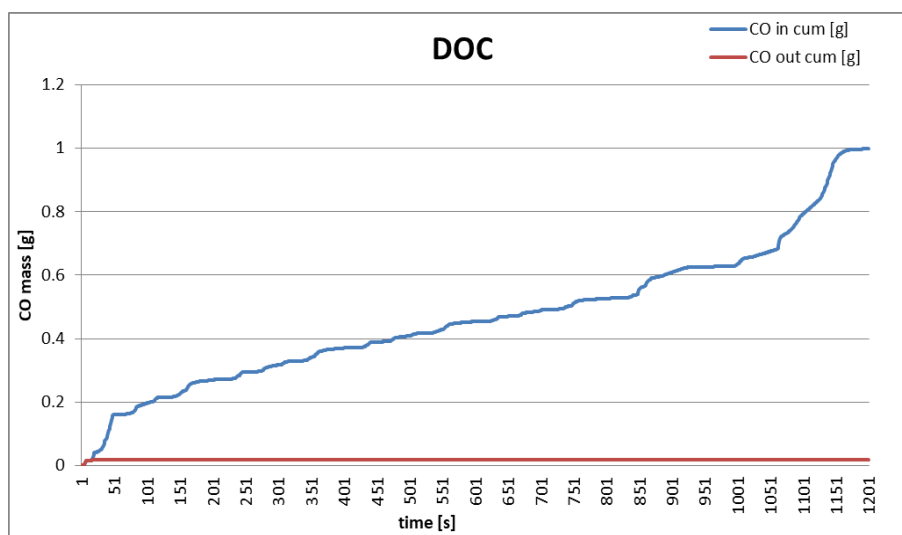


Grafico 73: Abbattimento della CO per mezzo del DOC.

Le quantità di monossido di carbonio e idrocarburi incombusti emesse risultano essere molto minori rispetto ai casi trattati precedentemente.

Lo stesso discorso vale per quanto riguarda le reazioni di riduzione degli ossidi di azoto nel SDPF: dato il rapido raggiungimento della temperatura di light off e quindi le maggiori temperature operative del SDPF durante l'intero ciclo, si può apprezzare un abbattimento di NOx molto più importante.

Entrando più nel dettaglio, mentre senza la sezione di preriscaldamento dei gas la temperatura di light off delle reazioni (intorno ai 130°C) viene raggiunta dopo 300-350 secondi, in presenza del EHC questo avviene dopo la metà del tempo (Grafici 74,75e 76).

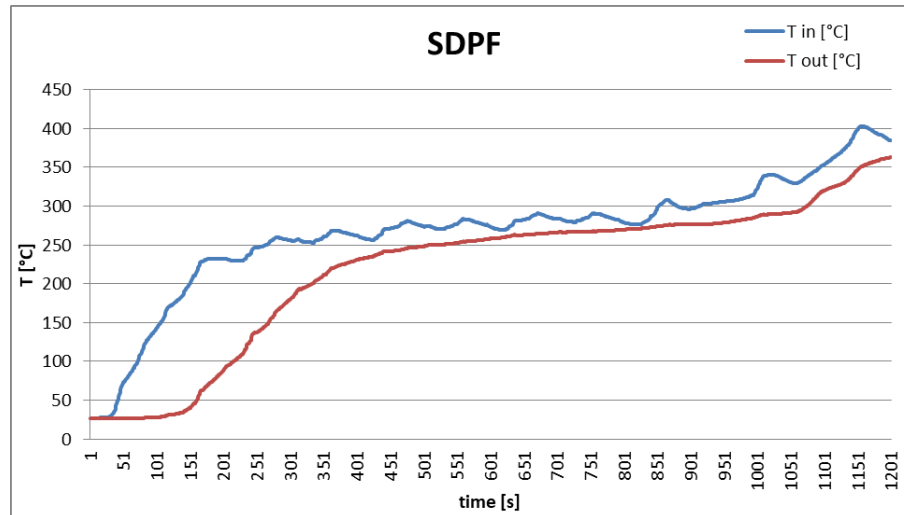


Grafico 74: Temperatura dei gas in ingresso e in uscita al SDPF.

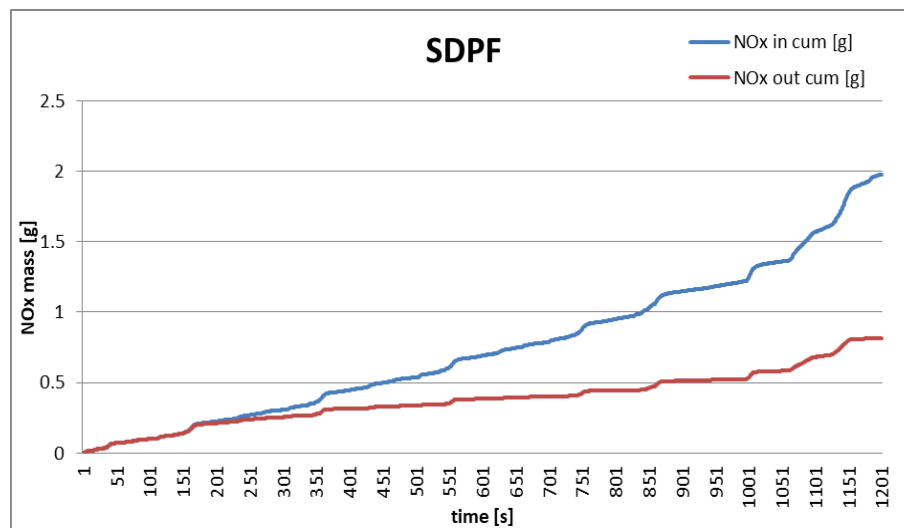


Grafico 75: Abbattimento degli ossidi di azoto per mezzo del SDPF.

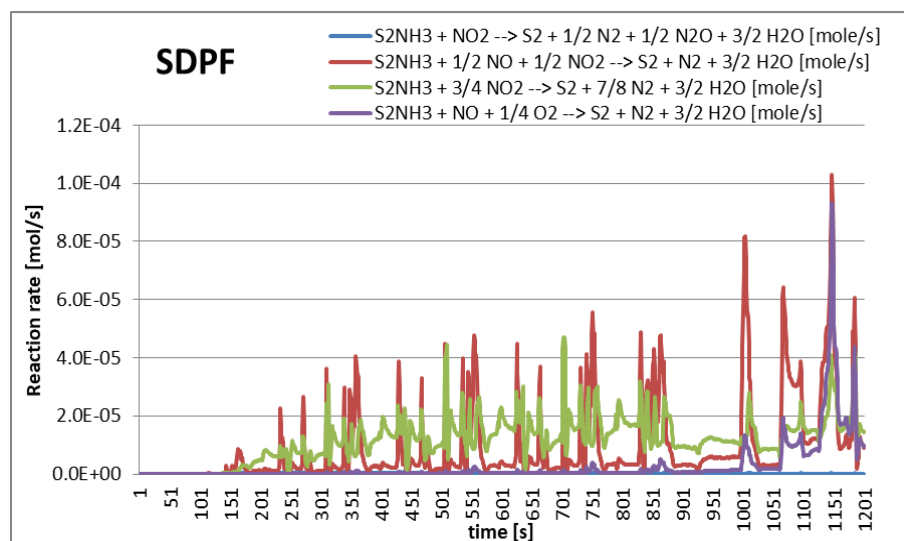


Grafico 76: Velocità delle reazioni di riduzione degli ossidi di azoto nel SDPF.

Quanto detto è evidente anche dal grafico 77: l'andamento dell'efficienza di conversione degli ossidi di azoto tende a zero a causa delle basse temperature solo nei primi 100 secondi circa del ciclo, mentre assume poi valori molto elevati.

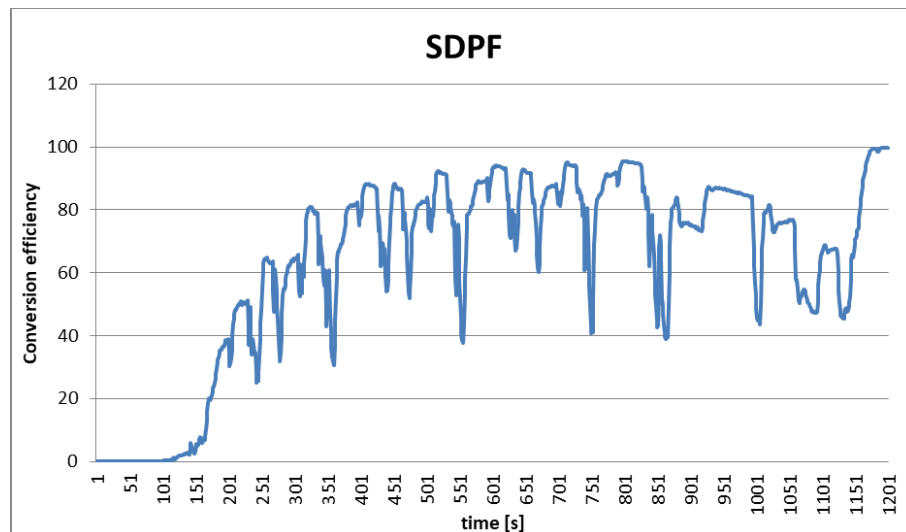


Grafico 77: Efficienza di conversione degli ossidi di azoto nel SDPF.

Si noti anche come il trend generale abbia un minimo locale intorno ai 1100 secondi, quando viene simulato il tratto di guida extraurbana ad alte velocità: date l'elevata portata e velocità dei gas nell'ATS, si ha un minor tempo disponibile per le reazioni, e per tanto un abbattimento meno efficace, nonostante si noti comunque un'alta velocità di reazione.

Si analizza ora l'utilizzo dell'ammoniaca iniettata.

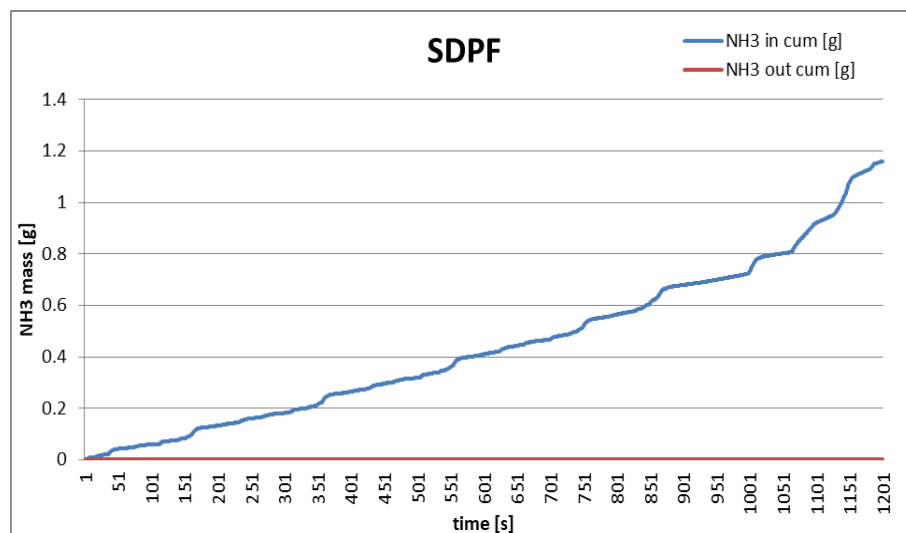


Grafico 78: Massa cumulata di ammoniaca in ingresso e in uscita al SDPF.

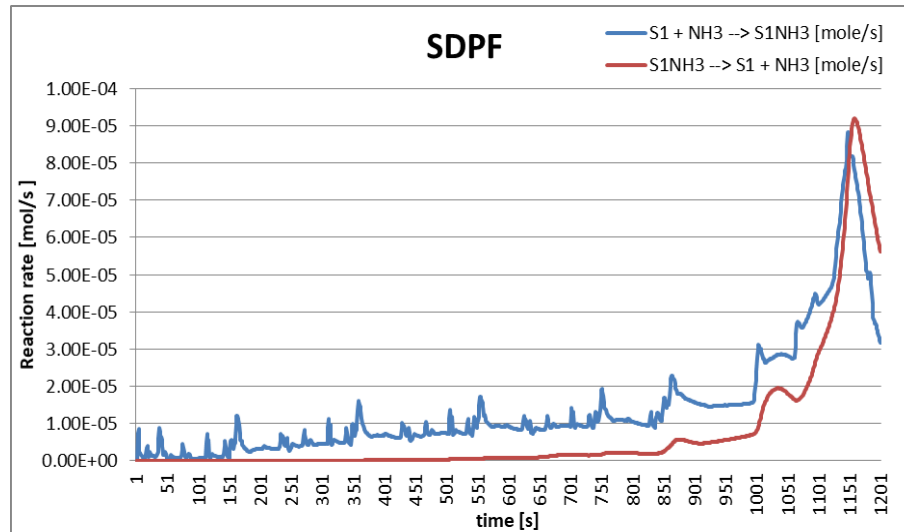


Grafico 79: Velocità di adsorbimento e desorbimento superficiale dell'ammoniaca.

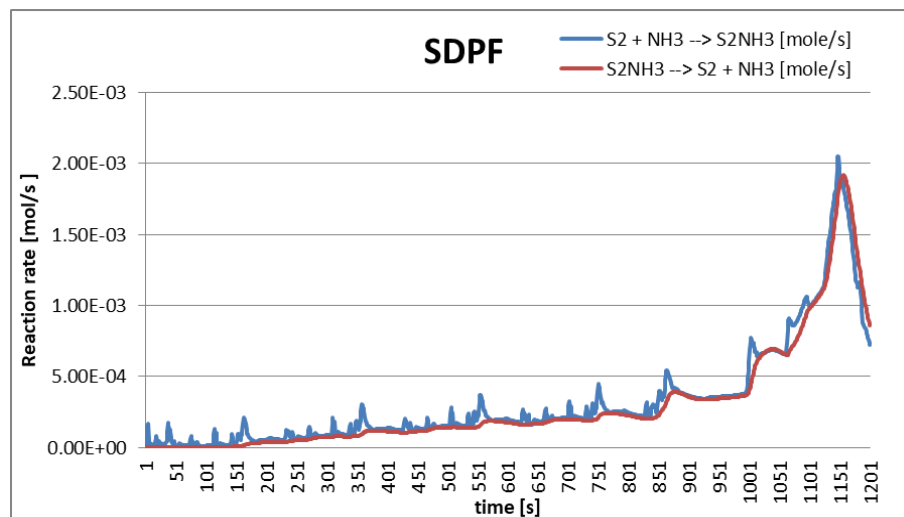


Grafico 80: Adsorbimento e desorbimento superficiale dell'ammoniaca.

Dai Grafici 79 e 80 sopra riportati, si vede che le reazioni di assorbimento e desorbimento superficiale hanno lo stesso andamento qualitativo del caso senza EHC.

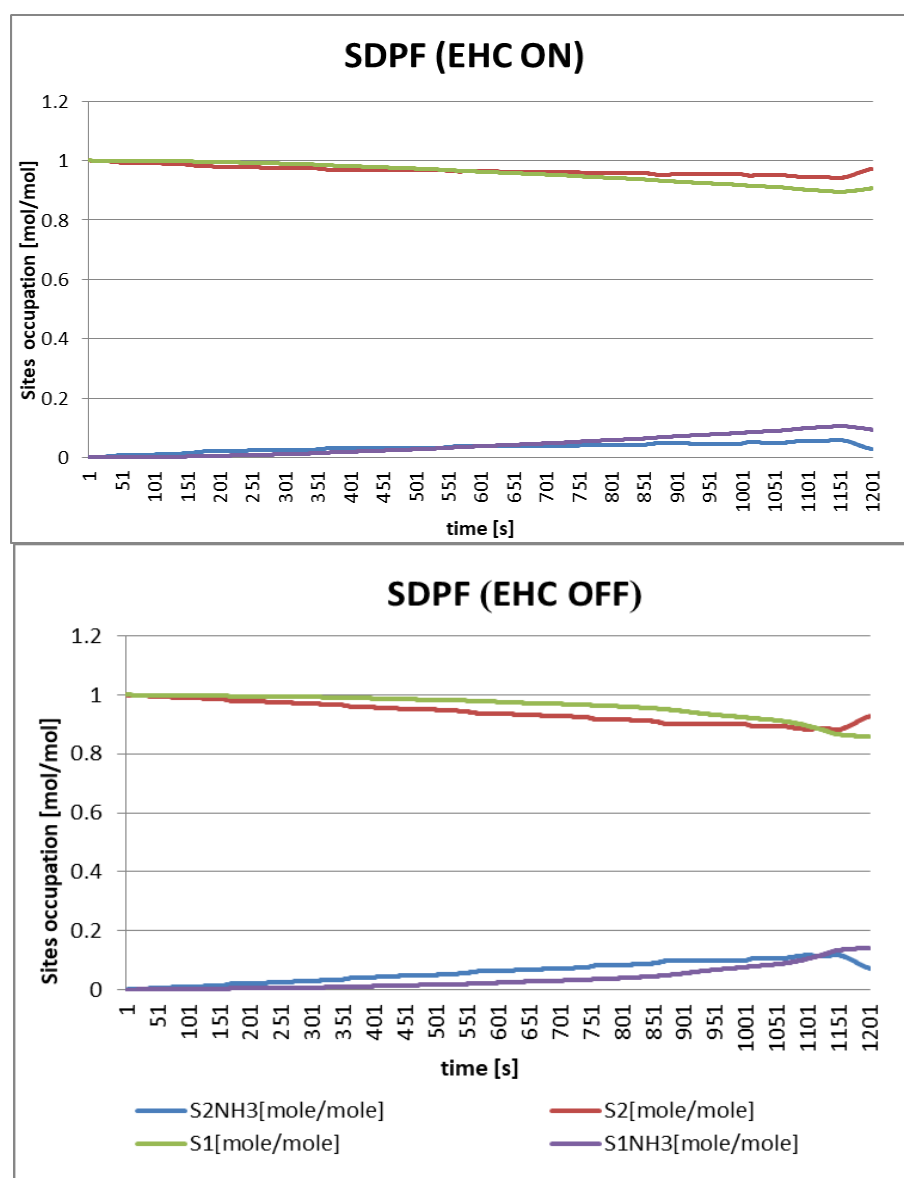


Grafico 81: Frazione dei siti coinvolti nell'assorbimento e desorbimento dell'ammoniaca nel SDPF, caso con EHC e senza a confronto, $\alpha=1.5$.

In termini quantitativi si possono però notare delle piccole differenze: data la maggior efficienza di conversione, la quantità di ammoniaca coinvolta nelle reazioni di riduzione risulta essere maggiore, e per tanto ne viene immagazzinata nel SDPF una minor quantità: notare in particolare dal Grafico 81 come le frazioni di siti occupati S1NH3 e S2NH3 siano minori, e come quindi quelle dei siti liberi S1 e S2 siano invece maggiori, rispetto alla configurazione senza EHC.

Avendo una maggior conversione d'ammoniaca nel SDPF, la quantità in ingresso al SCR risulta essere di poco inferiore rispetto al caso precedente (Grafico 83). Date le maggiori temperature in gioco invece, nel SCR si vedono valori di conversione degli ossidi di azoto maggiori (Grafico 82). Ciò nonostante, il SCR continua a non dare un'importante contributo in termini di abbattimento di NO_x , compito svolto ancora prevalentemente dal SDPF. Anche in tal caso il SCR ha principalmente lo scopo di contenere il residuo di ammoniaca nell'ATS.

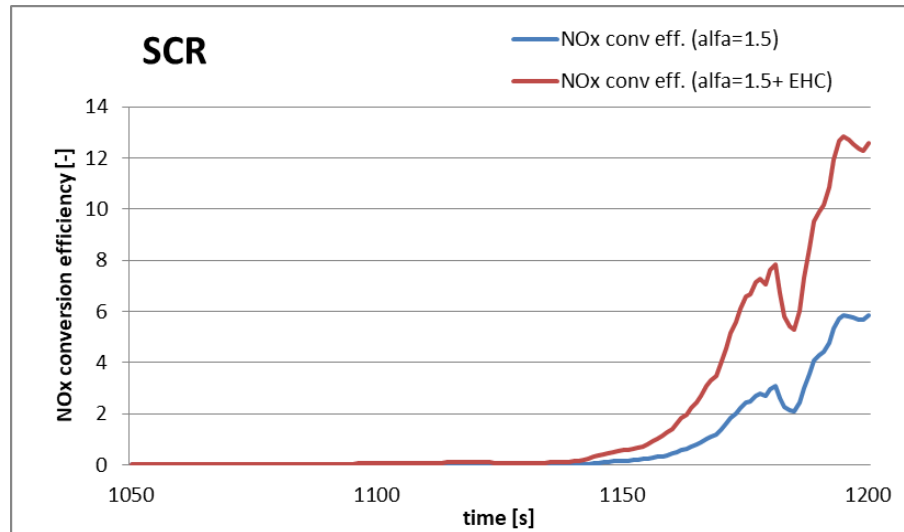


Grafico 82: Efficienza di conversione degli NOx nel SCR: confronto rispetto al caso senza EHC.

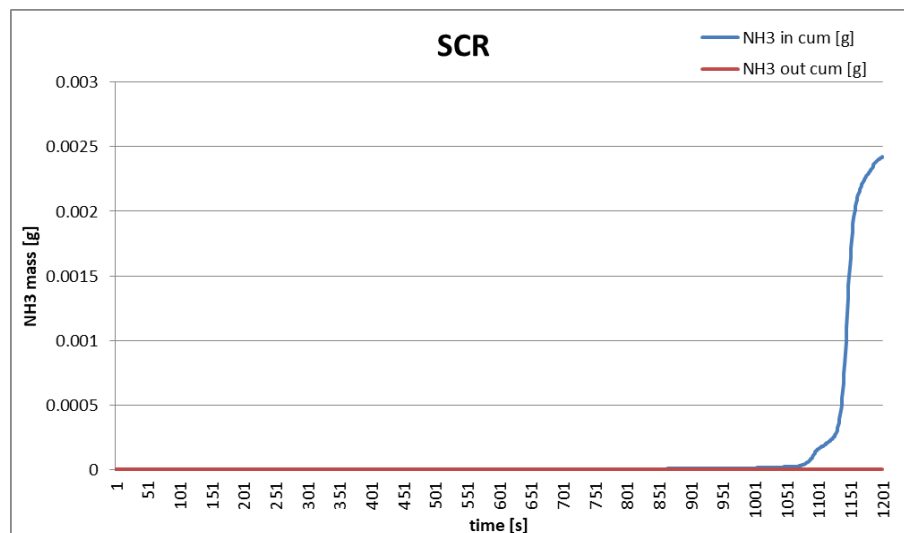


Grafico 83: Massa cumulata di ammoniaca in ingresso e in uscita dal SCR.

Dal seguente grafico (Grafico 84), si può notare che nel SCR l'effetto di una maggior conversione di NOx , e quindi un maggior utilizzo di ammoniaca (la curva blu decresce più rapidamente rispetto a quella verde), venga compensato in parte da un maggior desorbimento dell'agente riducente dai siti S1. Per questo motivo, la quantità totale di ammoniaca in ingresso all'ASC è circa pari a quella che si aveva senza EHC, anche se rilasciata in modo più costante. Ciò si vede anche dalla minor discontinuità dell'andamento dell'efficienza di conversione di NH_3 sotto riportato (Grafico 85).

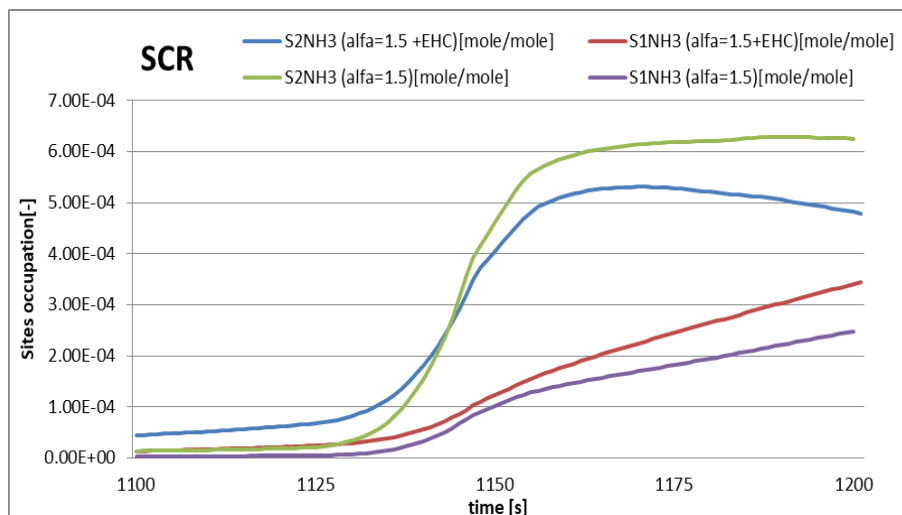


Grafico 84: Storage superficiale di ammoniaca nei siti S1 e S2 del SCR: confronto tra caso con e senza EHC.

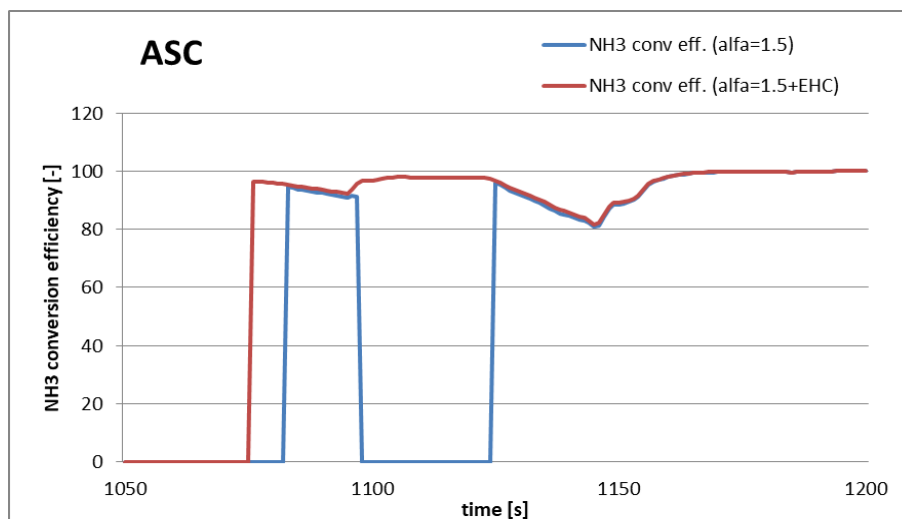


Grafico 85: Efficienza di conversione dell'ammoniaca nell'ASC: confronto tra il caso con e senza EHC.

Si noti dal grafico sopra riportato, come l'efficienza di conversione abbia lo stesso andamento del caso senza EHC, a causa di temperature in gioco negli ultimi istanti del ciclo molto simili.

Ad ogni modo, per quanto riguarda la quantità di ammoniaca residua all'uscita del sistema, l'aggiunta del nuovo componente fa sì che la situazione risulti sostanzialmente invariata (Grafico 86).

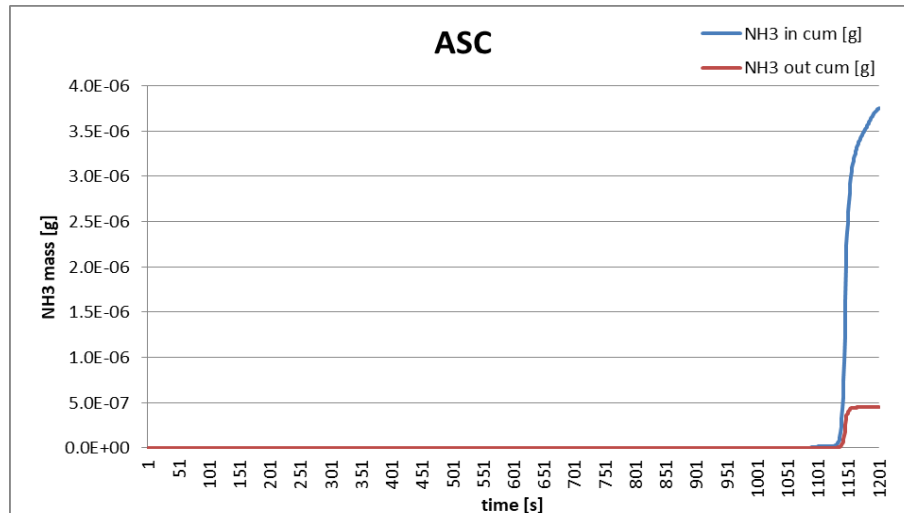


Grafico 86: Massa cumulata di ammoniaca in ingresso e in uscita dal ASC.

Per quanto concerne l'abbattimento del particolato, la temperatura dei gas che attraversano il filtro non è abbastanza alta per innescare una sorta di effetto di rigenerazione (ossidazione delle particelle carboniose ad alte temperature), come si avrebbe potuto pensare. Non vi sono pertanto differenze da analizzare rispetto alla configurazione precedente.

Dal punto di vista quantitativo i risultati ottenuti possono essere così riassunti e confrontati coi vincoli delle normative d'interesse:

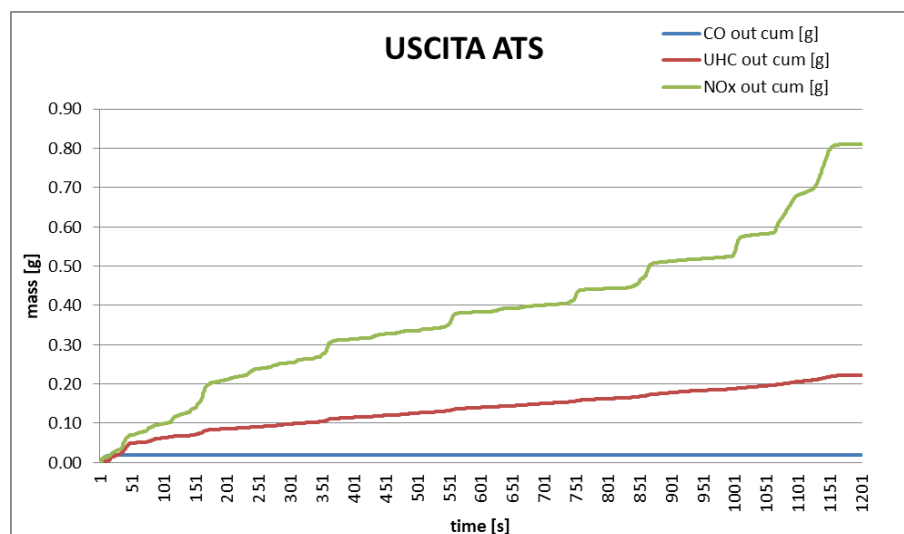


Grafico 87: Curva cumulata degli inquinanti gassosi (ossidi di azoto, idrocarburi incombusti e monossido di carbonio) alla sezione d'uscita del ATS.

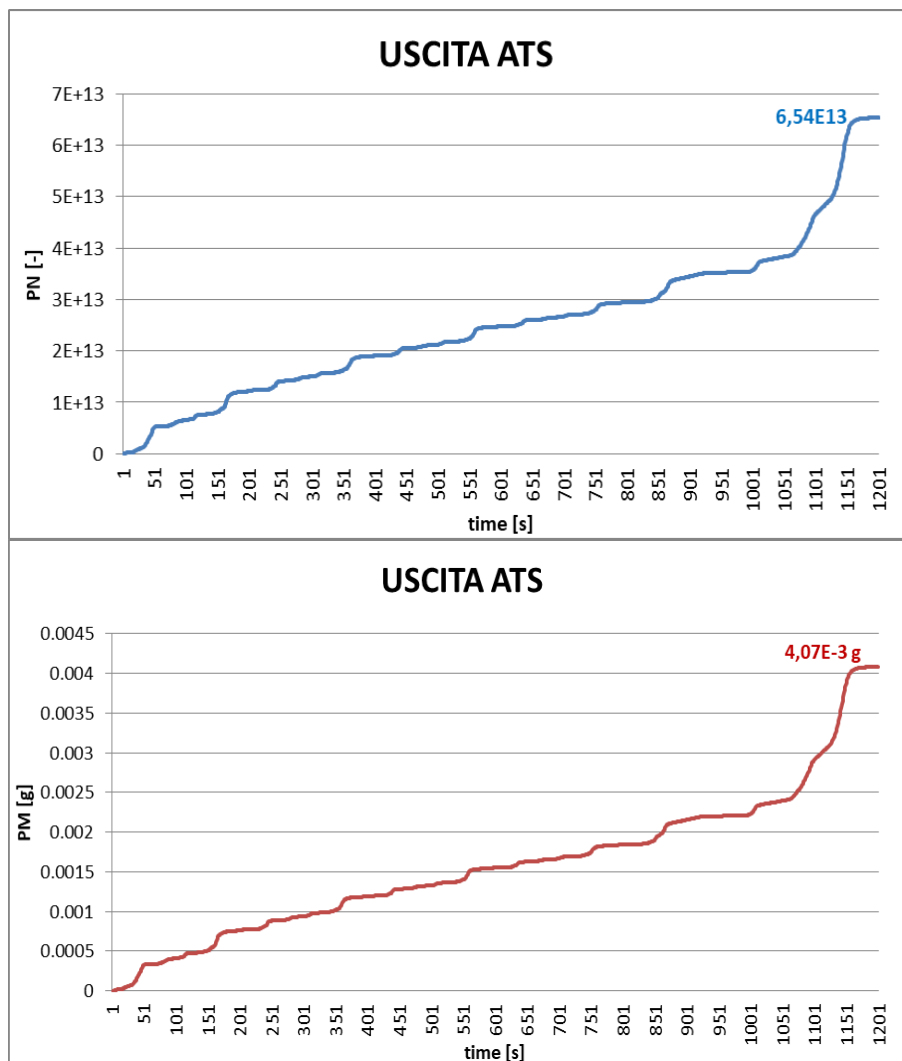


Grafico 88: Cumulate di PM e PN alla sezione d'uscita del ATS.

LIMITAZIONI DIESEL-LEGGERI					
	CO [mg/km]	UHC+NOX [mg/km]	PM [mg/km]	PN [-/km]	NOX [mg/km]
EURO 1	-	970	140	-	-
EURO 2	-	700	80	-	500
EURO 3	-	560	50	-	250
EURO 4	500	300	25	-	250
EURO 5	500	250	5	6×10^{12}	180
EURO 6b	500	170	5	6×10^{12}	80

Tabella 18: Sintesi delle restrizioni date dalle normative.

VERIFICA DI CONFORMITA' A EURO 6b		
CO [mg/km]	1.73	<500
UHC+NOX [mg/km]	93.88	<170
NOX [mg/km]	73.54	<80
UHC [mg/km]	20.33	
PM [mg/km]	0.3713	<4.5
PN [-/km]	5.931×10^{12}	$< 6 \times 10^{12}$
NH3 [mg/km]	4.046×10^{-5}	

Tabella 19: Confronto dei risultati con i valori soglia della normativa EURO 6b.

Il notevole incremento dell'efficienza di conversione delle reazioni catalitiche risultante dalle maggiori temperature operative ottenute per mezzo dell'EHC porta ad avere una configurazione rispettante le normative relative alla classe Euro 6b. I vincoli di emissione di NOx ed emissione combinata di NOx e idrocarburi incombusti che costituivano un limite nella configurazione precedente sono in tal caso rispettati con margine.

Il prezzo da pagare per ottenere questo risultato è l'energia elettrica $E_{el} = \int_0^{1200s} \text{Heating Power } dt$ proveniente dalla batteria del veicolo e pari a 2400 kJ (0.666kWh).

4.2.2 Risultati ottenuti con potenza elettrica all'EHC modulare con la temperatura in ingresso al SDPF

Nell'ottica di riscaldare i gas transitanti nell'EHC solo quando necessario, e di ottenere così un efficace abbattimento degli inquinanti evitando un eccessivo dispendio energetico, si può pensare di modulare la potenza mandata all'EHC in funzione della temperatura dei gas all'interno dell'ATS.

Come si è potuto osservare in precedenza, le sostanze inquinanti più difficili da abbattere entro i limiti imposti dalle più recenti normative (Euro 6) sono gli ossidi di azoto, il quale processo di riduzione ha luogo sostanzialmente nel SDPF, nel sistema in questione. Per controllare al meglio la temperatura dei gas a monte del SDPF, si posiziona quindi un sensore di temperatura (T SENSOR) in grado di trasferire i dati rilevati al sistema di controllo (EHC CONTROLLER), il quale aziona e regola l'input di potenza al catalizzatore riscaldato (EHC).

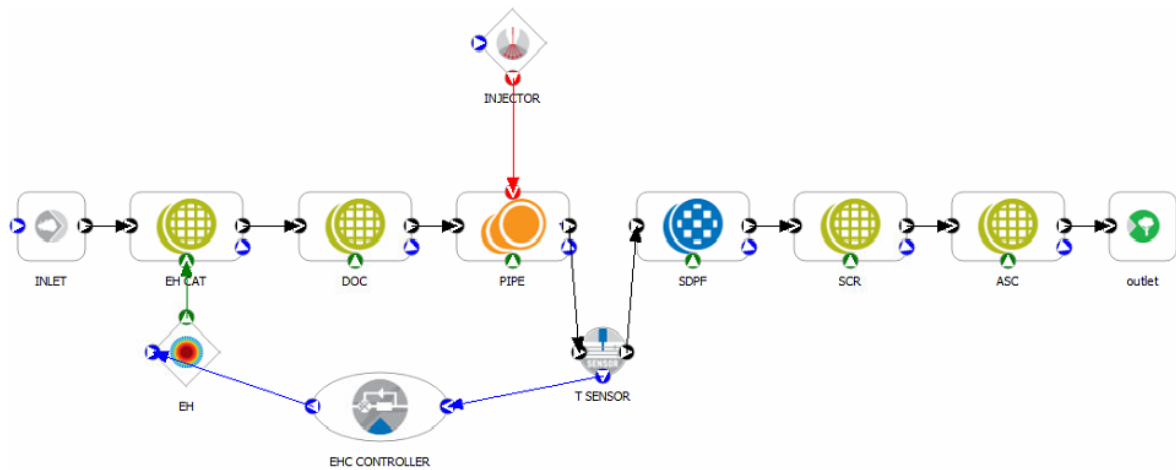


Figura 15: Configurazione dell'ATS, interfaccia Axisuite.

Il sistema di controllo è configurato in modo tale che nell'EHC venga dissipata una potenza elettrica pari a:

- 3000 W, quando la temperatura rilevata dal sensore risulta essere inferiore a 520 K ($T < 247\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- 1500 W, quando la temperatura rilevata dal sensore è compresa tra 520 e 620 K ($247\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 347\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- 0 W, quando la temperatura rilevata dal sensore supera i 620 K ($T > 347\text{ }^{\circ}\text{C}$).

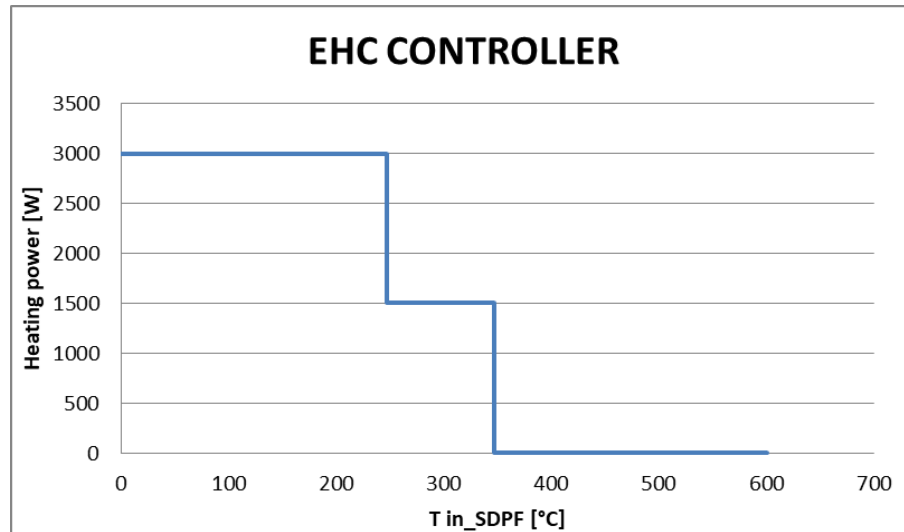


Grafico 89: Potenza all'EHC in funzione della temperatura rilevata all'ingresso del SDPF.

Il range di temperatura entro il quale modulare l'input al componente viene scelto in modo tale da ottenere elevati valori di conversione degli inquinanti, senza però sottoporre i materiali a elevati stress termici. Per questo motivo l'input di potenza si annulla quando la temperatura dei gas raggiunge i 620 K (347°C).

Come è stato detto precedentemente, le temperature di light off delle reazioni di riduzione degli ossidi di azoto sono maggiori rispetto a quelle delle ossidazioni di CO e di idrocarburi incombusti. Per avere un'elevata conversione di tutt'e tre le sostanze inquinanti è quindi necessario prestare attenzione alle condizioni dettate dalle reazioni di riduzione degli NO_x , cercando di innalzare fin da subito la temperatura dei gas fino a quella operativa ottimale del SDPF. Per questo si decide di impostare il sistema di controllo in modo da mantenere la temperatura dei gas a monte del SDPF sopra i 240-250 °C (tipiche temperature operative dei sistemi SCR, tali da garantire una buona cinetica delle reazioni).

I seguenti grafici evidenziano il profilo nel tempo dell'input elettrico in grado di garantire le condizioni dettate dal sistema di controllo (Grafico 90) e le risultanti temperature in ingresso e uscita all'EHC (Grafico 91).

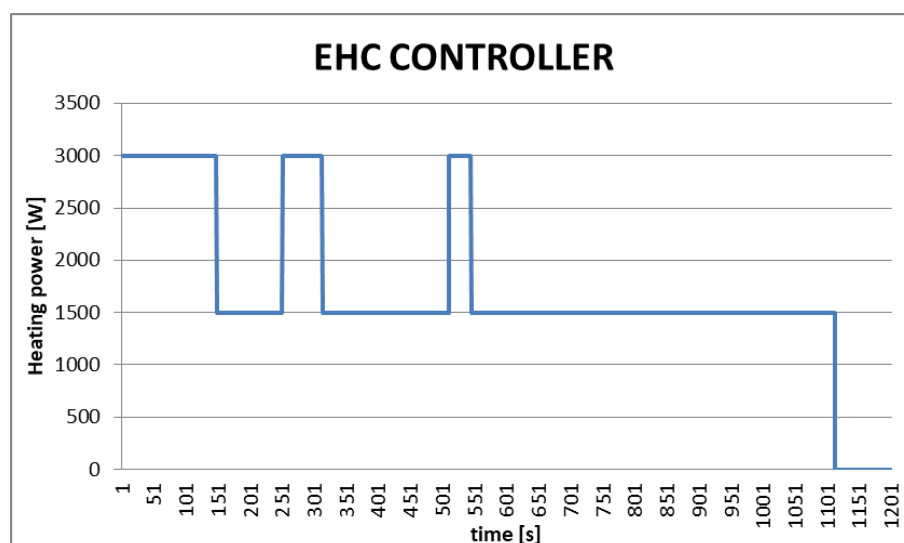


Grafico 90: Profilo di potenza all'EHC in funzione del tempo di prova.

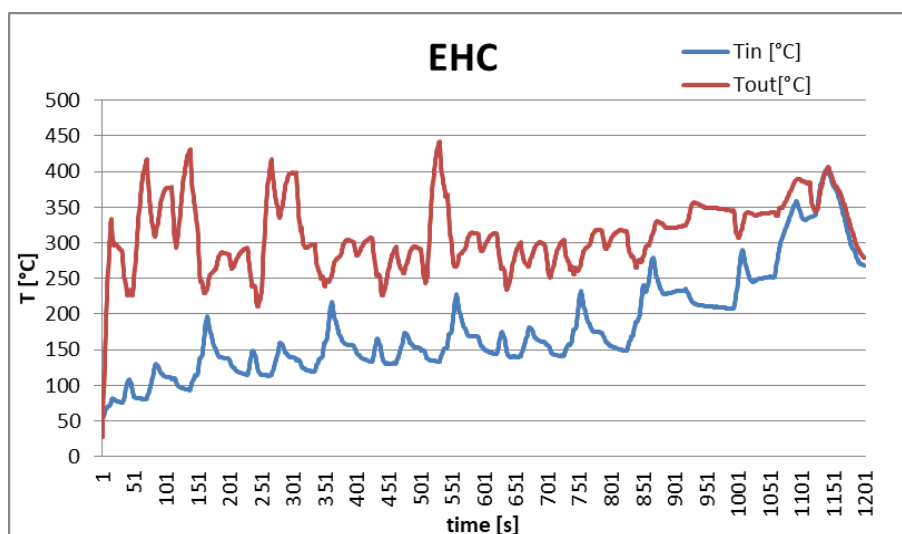


Grafico 91: Profili di temperatura dei gas in ingresso e in uscita dall'EHC.

A scopi di verifica termica dei materiali adottati, si può osservare che la temperatura massima raggiunta dai gas durante il ciclo non supera mai i 450°C (Grafico 91). Trattandosi di un valore di temperatura del tutto ordinario nei sistemi di post trattamento, dove le temperature massime superano anche i 600°C, ci si aspetta che fissare la temperatura massima per cui l'EHC venga riscaldato a 620 K come indicato precedentemente non dia nessun problema di stress termici nei materiali utilizzati.

Si punta ora l'attenzione sul principale componente che interessa l'abbattimento degli ossidi di azoto: il SDPF, di cui si riportano i profili di temperatura dei gas in ingresso e in uscita.

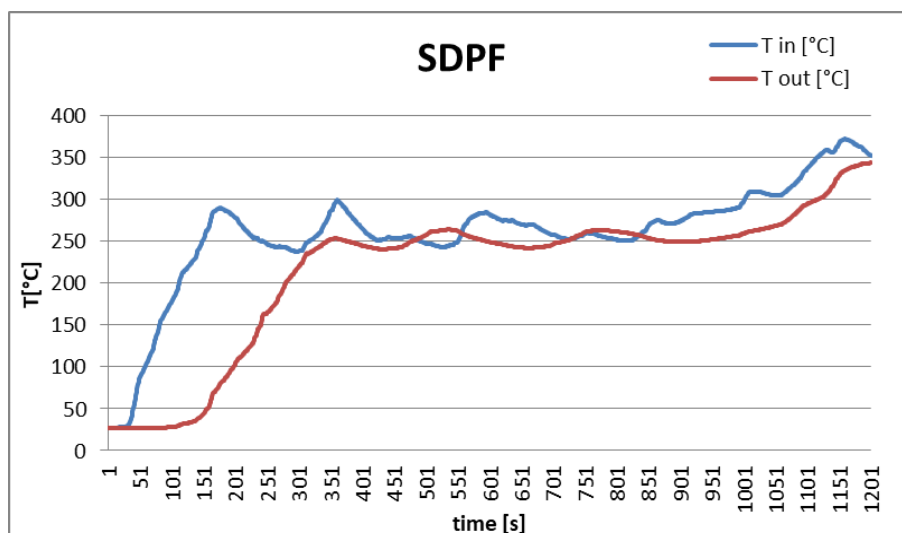


Grafico 92: Profili di temperatura dei gas in ingresso e in uscita dal SDPF.

Confrontando i Grafici 90 e 92, si può notare come durante i primi 150 secondi circa la potenza all'EHC sia quella massima, così da riscaldare significativamente i gas in uscita dal motore e quindi innalzare rapidamente la temperature in gioco nel SDPF e nell'intero sistema di post trattamento, che si trova inizialmente a temperatura ambiente. Una volta raggiunte le elevate temperature, nella parte centrale del ciclo di prova, queste sono mantenute grazie ad una potenza applicata di 1500 W, ad eccezione di qualche periodo di tempo piuttosto breve in cui è di nuovo necessario applicare una potenza di 3000 W all'EHC. In fine, durante il tratto EUDC del ciclo, i valori di temperatura rilevati sono sufficientemente alti anche senza alcuna applicazione di potenza.

L'effetto ottenuto in termini di abbattimento degli ossidi di azoto è mostrato nei grafici 93 e 94.

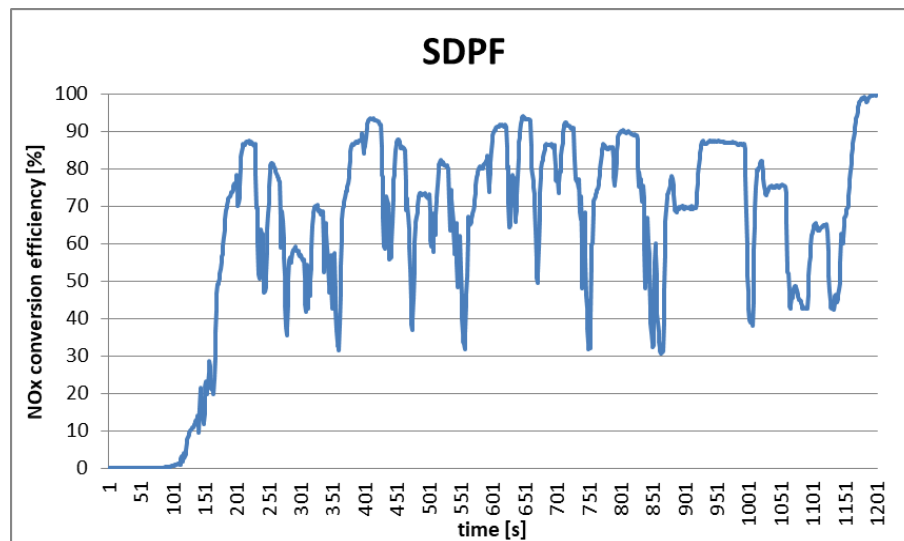


Grafico 93: Efficienza di conversione degli ossidi di azoto nel SDPF.

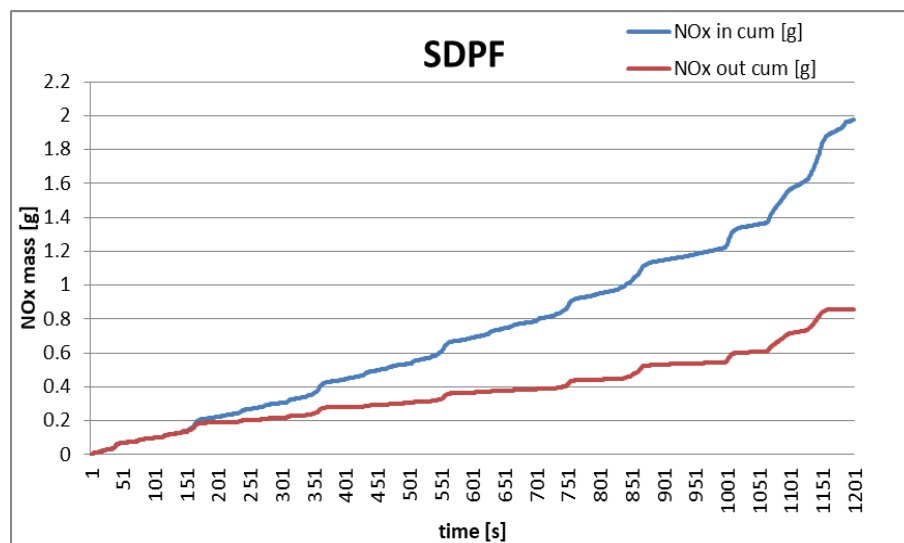


Grafico 94: Abbattimento degli ossidi di azoto per mezzo del SDPF.

Rispetto al caso precedente in cui la potenza elettrica dissipata nel catalizzatore riscaldato era costante e pari a 2 kW, le più costanti temperature mantenute nel SDPF si traducono anche in un andamento più costante in termini di efficienza di conversione: grazie all'importante input di potenza elettrica iniziale, si ha infatti un abbattimento più efficace all'inizio della prova, a discapito di una sua riduzione nella seconda parte del ciclo, quando dapprima si limita la potenza e negli ultimi 100 secondi la si taglia completamente.

Dalla cumulata di *NOx* in uscita al componente, rispetto a prima si nota una quantità maggiore, anche se di poco.

In termini di ammoniaca residua emessa in ambiente, in uscita dall'ATS se ne trova una quantità leggermente inferiore. Questo è attribuibile soprattutto ad un minor rilascio di ammoniaca da parte del

SDPF verso i componenti a valle. Si vede infatti che, al contrario del caso con potenza all'EHC costante, la reazione di assorbimento prevale sempre su quella di desorbimento, anche negli ultimi 100 secondi di prova (Grafico 95).

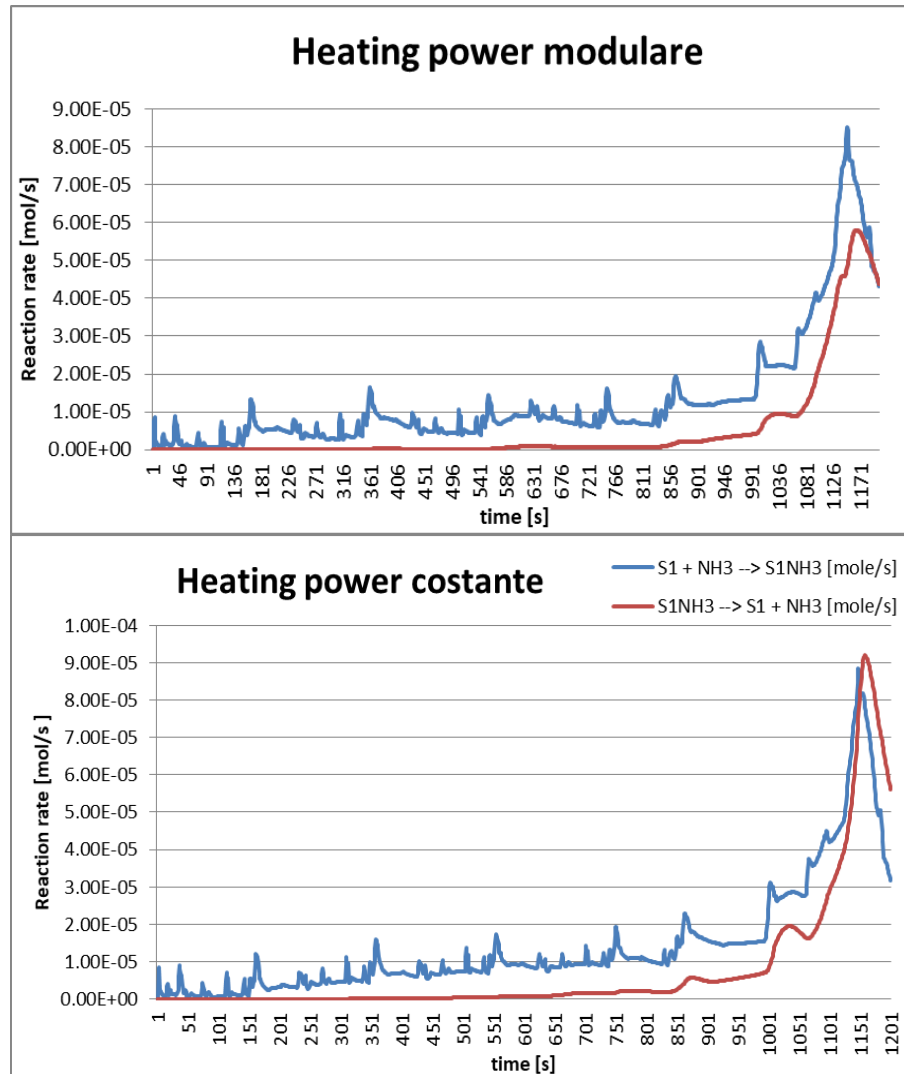


Grafico 95: Confronto in termini di velocità di adsorbimento e desorbimento superficiale dell'ammoniaca sui siti S1. Sui siti S2 la situazione è sostanzialmente invariata.

Il comportamento dei componenti SCR ed ASC in termini di efficienza di conversione dei reagenti rimane sostanzialmente invariato rispetto al caso in cui la potenza all'EHC sia costante e pari a 2 kW.

Di seguito si riportano le cumulate di ammoniaca in ingresso e uscita alle due unità.

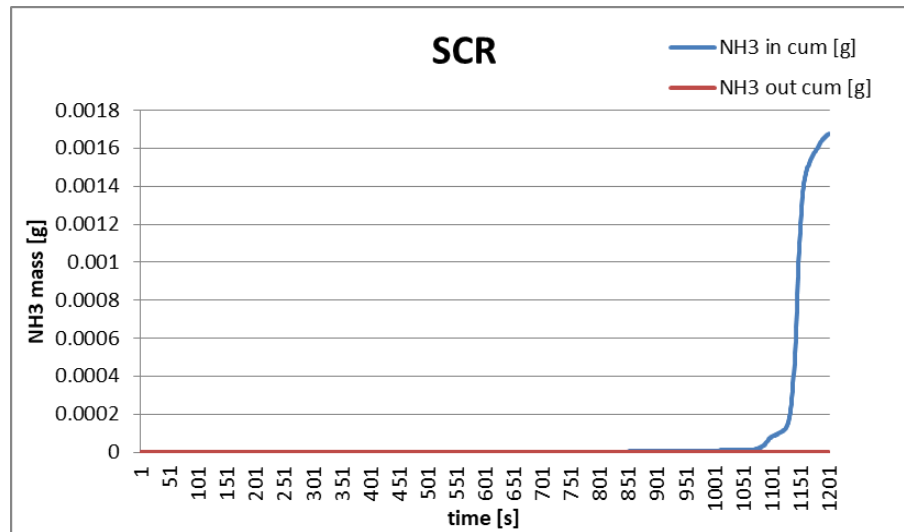


Grafico 96: Massa cumulata di ammoniaca in ingresso e in uscita dal SCR.

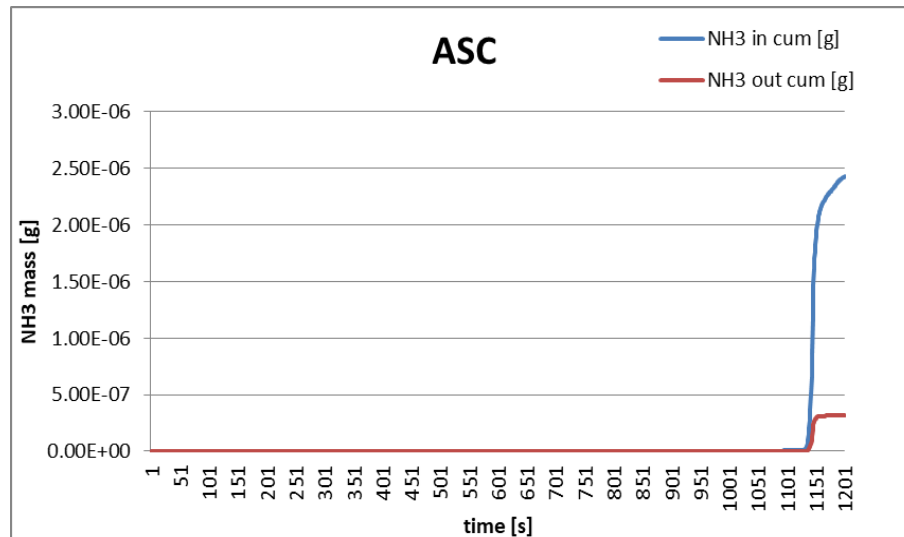


Grafico 97: Massa cumulata di ammoniaca in ingresso e in uscita dall'ASC

Per quanto concerne l'abbattimento di particolato, ossidi di carbonio e idrocarburi incombusti non vi sono interessanti variazioni da evidenziare rispetto alla configurazione precedente.

Dal punto di vista quantitativo i risultati ottenuti possono essere così riassunti e confrontati con i vincoli delle normative d'interesse:

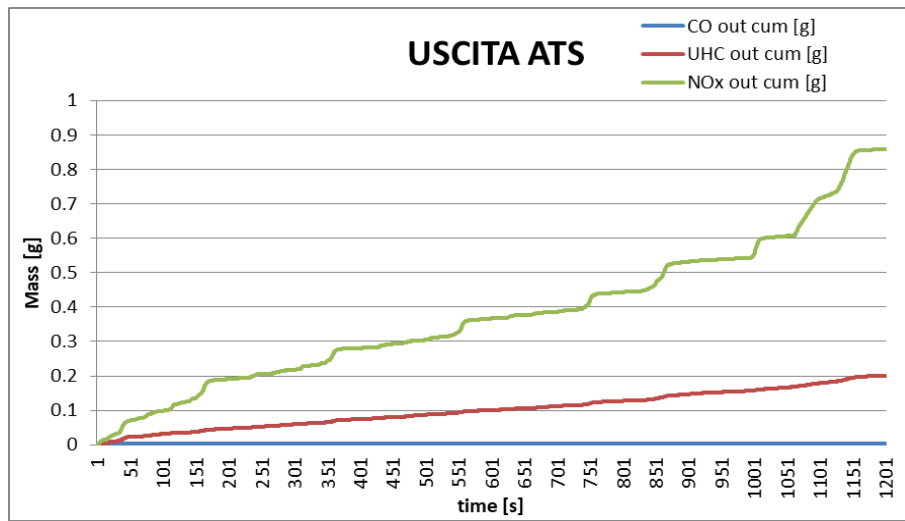


Grafico 98: Curva cumulata degli inquinanti gassosi (ossidi di azoto, idrocarburi incombusti e monossido di carbonio) alla sezione d'uscita dell' ATS.

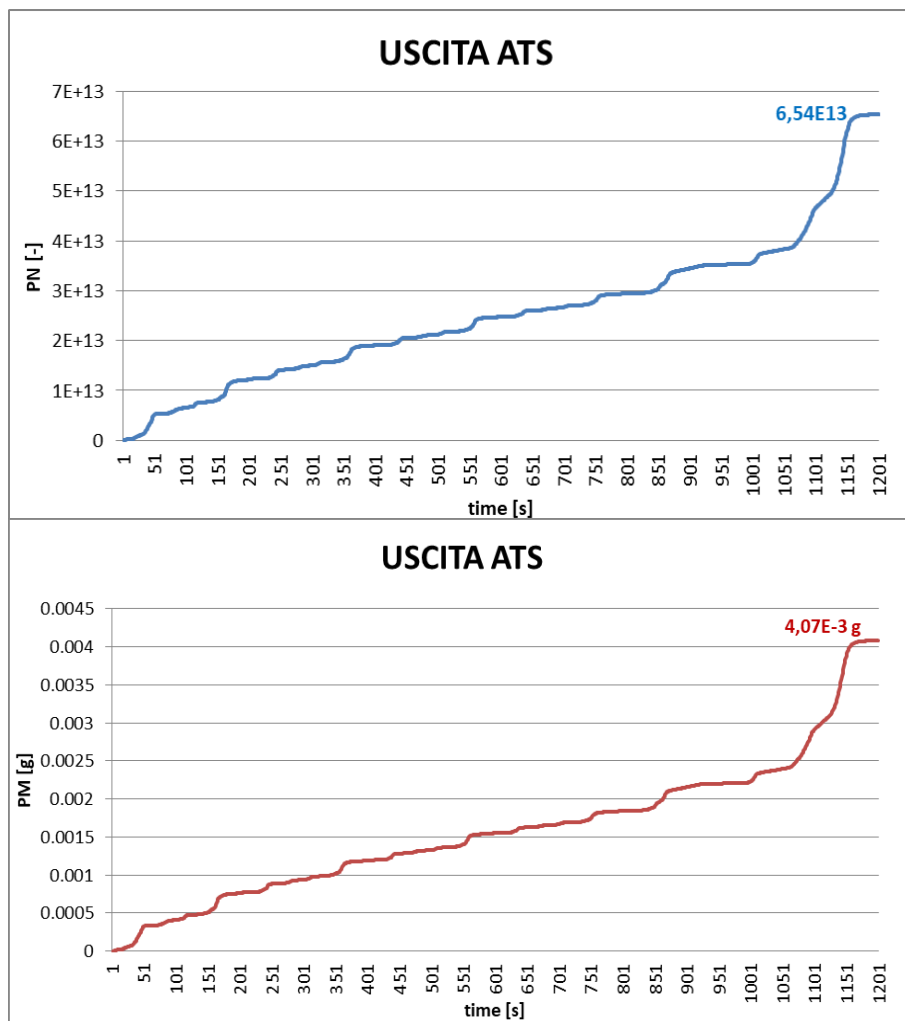


Grafico 99: Cumulate di PM e PN alla sezione d'uscita del ATS.

LIMITAZIONI DIESEL-LEGGERI					
	CO [mg/km]	UHC+NOX [mg/km]	PM [mg/km]	PN [-/km]	NOX [mg/km]
EURO 1	-	970	140	-	-
EURO 2	-	700	80	-	500
EURO 3	-	560	50	-	250
EURO 4	500	300	25	-	250
EURO 5	500	250	5	6×10^{12}	180
EURO 6b	500	170	5	6×10^{12}	80

Tabella 20: Sintesi delle restrizioni date dalle normative.

VERIFICA DI CONFORMITA' A EURO 6b		
CO [mg/km]	0.24	<500
UHC+NOX [mg/km]	96	<170
NOX [mg/km]	77.79	<80
UHC [mg/km]	18.21	
PM [mg/km]	0.3713	<4.5
PN [-/km]	5.931×10^{12}	6×10^{12}
NH3 [mg/km]	2.84×10^{-5}	

Tabella 21: Confronto dei risultati con i valori soglia della normative EURO 6b.

Dai risultati ottenuti si può notare che, rispetto al caso precedente con potenza al catalizzatore riscaldato costante e pari a 2 kW, all'uscita dell'ATS si hanno quantità minori di monossido di carbonio e idrocarburi incombusti, mentre la quantità emessa di NOx risulta essere sì maggiore, ma non tanto da compromettere la conformità alle normative Euro 6b della configurazione.

In termini di energia elettrica spesa per riscaldare i gas combusti fluenti nell'ATS, la strategia adottata risulta essere più conveniente rispetto al caso precedentemente illustrato. Il dispendio energetico ammonta infatti a 2033 kJ (0.565 kWh), contro i 2400 kJ (0.666 kWh) del caso a potenza costante.

4.2.3 Risultati ottenuti con potenza elettrica all'EHC lineare con la temperatura in ingresso al SDPF: Configurazione finale

Al fine di ottenere un ATS che permetta di rispettare i vincoli di emissioni delle più recenti normative Euro 6b limitando la spesa energetica relativa al componente EHC e mantenendo lo stesso sistema in termini di componenti, si può pensare ad una strategia alternativa a quella precedentemente analizzata.

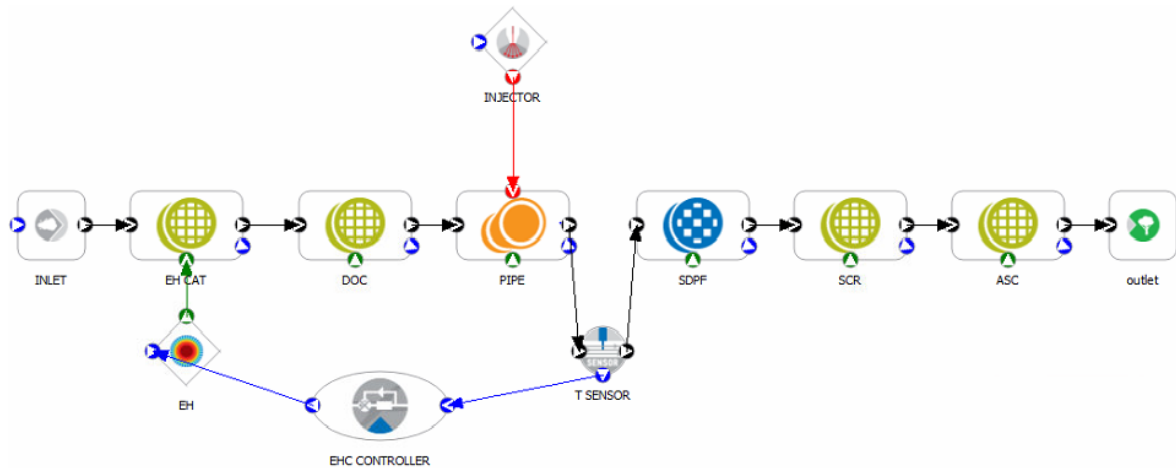


Figura 16 : Configurazione dell'ATS, interfaccia Axisuite.

Quello che si propone è di nuovo un controllo della potenza elettrica in ingresso al riscaldatore elettrico in funzione della temperatura rilevata dal sensore posto a monte del componente SDPF.

Il sistema di controllo questa volta è configurato in modo tale che nell'EHC venga dissipata una potenza elettrica pari a:

- 2500 W, quando la temperatura rilevata dal sensore risulta essere inferiore a 520 K ($T < 247\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- $P_{el} = P = 16946 - 27.78 T_{in_SDPF}$, quando la temperatura rilevata dal sensore è compresa tra 520 e 610 K ($247^{\circ}\text{C} < T < 337\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- 0 W, quando la temperatura rilevata dal sensore supera i 610 K ($T > 337\text{ }^{\circ}\text{C}$).

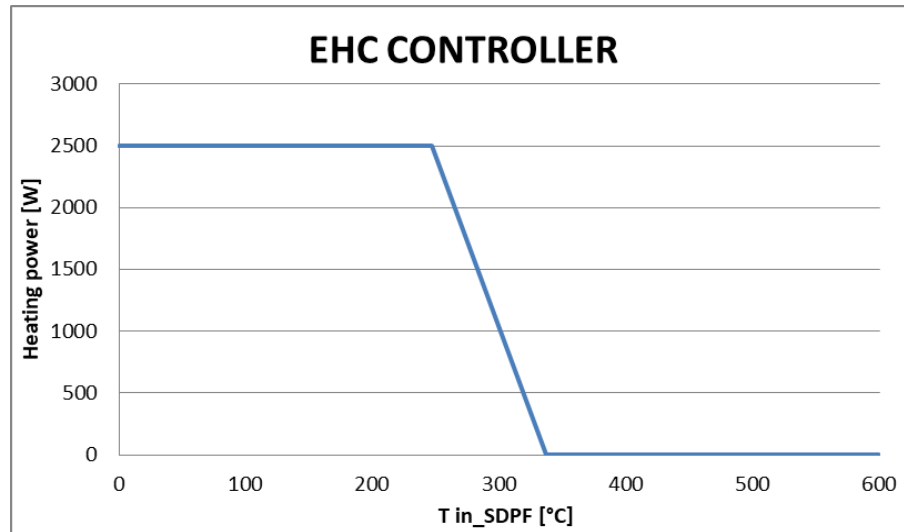


Grafico 100: Potenza all'EHC in funzione della temperatura rilevata all'ingresso del SDPF.

Il range di temperatura entro il quale la potenza ha un andamento lineare con la temperatura viene scelto in modo tale da ottenere elevati valori di conversione degli inquinanti, senza però sottoporre i materiali a elevati stress termici. In virtù delle osservazioni ancora valide fatte al punto 5.2.3, la soglia sotto la quale all'EHC è mandata la potenza massima è di nuovo pari a 520 K. La temperatura alla quale la potenza elettrica si annulla è minore rispetto al caso precedente (610 K ora, 620 K prima). L'intervallo di temperatura è stato di poco ristretto per avere un buon livello di sensibilità della regolazione di potenza con la temperatura (27.78 W/K. Anche in tal caso, a maggior ragione, non ci si aspetta quindi di aver problemi in termini di stress termici nei materiali).

I seguenti grafici evidenziano il profilo nel tempo dell'input elettrico in grado di garantire le condizioni dettate dal sistema di controllo (Grafico 101) e le risultanti temperature in ingresso e uscita all'EHC (Grafico 102).

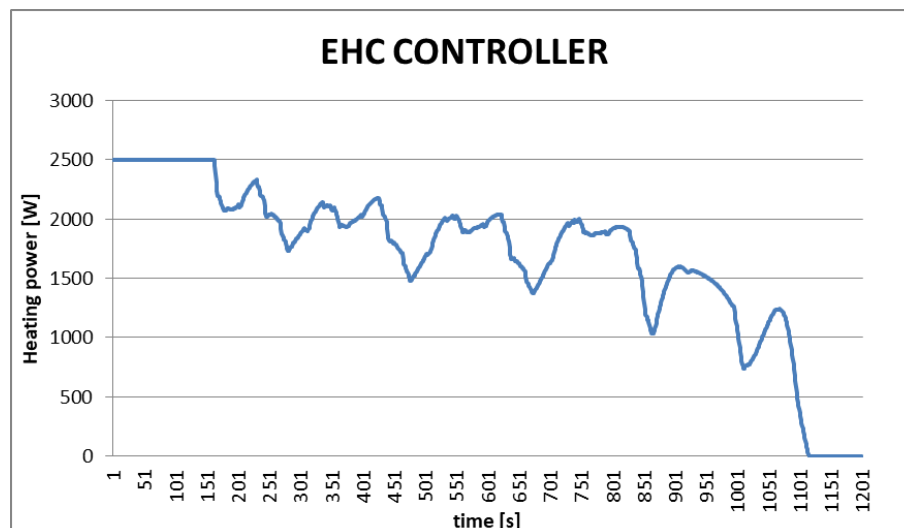


Grafico 101: Profilo di potenza all'EHC in funzione del tempo di prova.

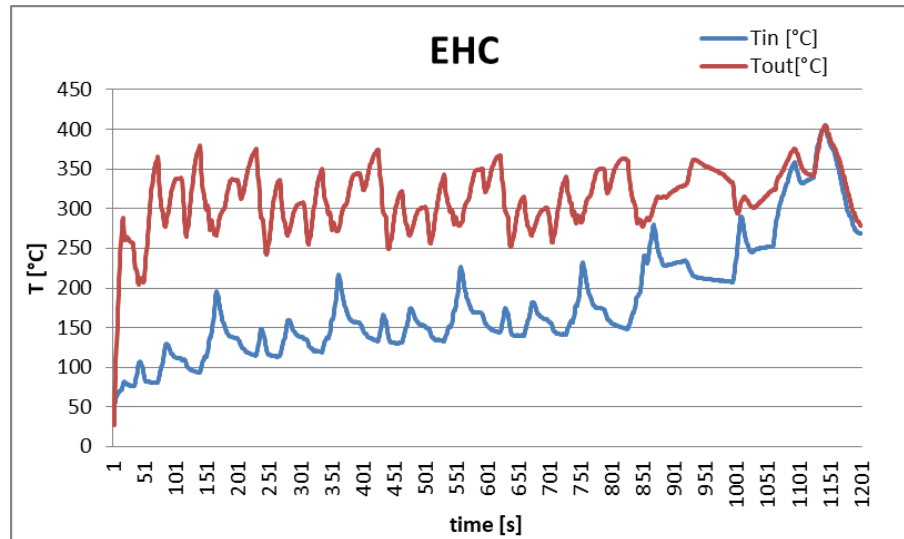


Grafico 102: Profili di temperatura dei gas in ingresso e uscita dall'EHC.

Dal Grafico 102 si vede che, rispetto ad una gestione modulare della potenza, le temperature dei gas hanno dei valori più costanti nel tempo, con picchi meno importanti. Anche in tal caso non ci si aspetta di aver problemi in termini di stress termici nei materiali.

Si riportano ora i profili di temperatura dei gas in ingresso e in uscita dal SDPF:

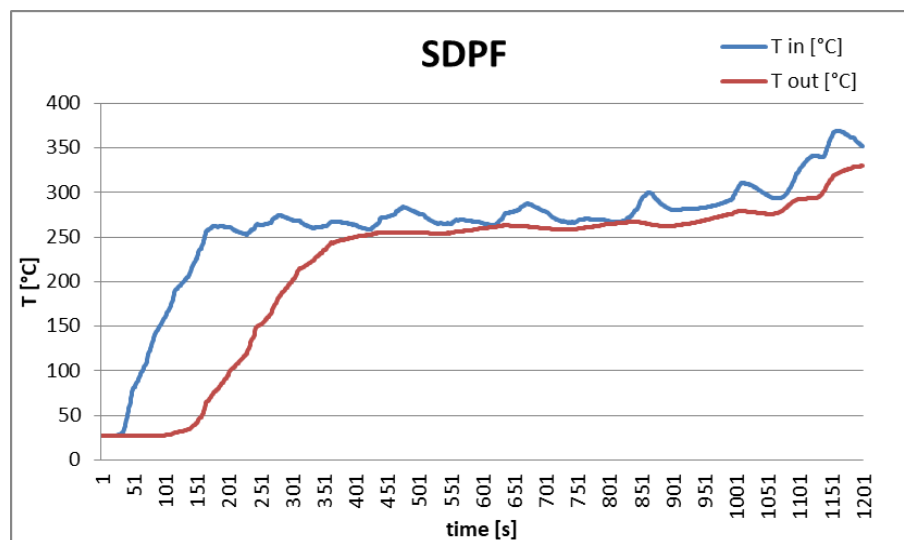


Grafico 103: Profili di temperatura dei gas in ingresso e uscita dal SDPF.

Da un confronto tra i grafici 101 e 103, si osserva che dopo i primi 150 secondi circa, durante i quali la potenza all'EHC è quella massima, trascurando i picchi e le valli dovuti rispettivamente ai minimi e massimi locali del profilo di velocità del veicolo che condizionano i valori di portata e di temperatura dei gas di scarico, la potenza tende a decrescere nel tempo: la causa è il riscaldamento del sistema di trattamento. In fine, quando negli ultimi 100 secondi di ciclo (tratto di simulazione di guida extraurbana) si verifica un netto aumento delle velocità del veicolo, il conseguente aumento delle temperature dei gas in ingresso al sistema, fa sì che l'apporto di potenza sia nullo.

Rispetto al caso precedente, l'elevata sensibilità nel controllo della potenza in funzione della temperatura dei gas si traduce in un andamento più costante dei profili di temperatura dei gas in

ingresso e uscita dal componente, e quindi, come si vede dal Grafico 104 sotto riportato, in una più costante efficienza di conversione degli ossidi di azoto.

L'effetto ottenuto in termini di abbattimento degli ossidi di azoto è mostrato nei seguenti grafici.

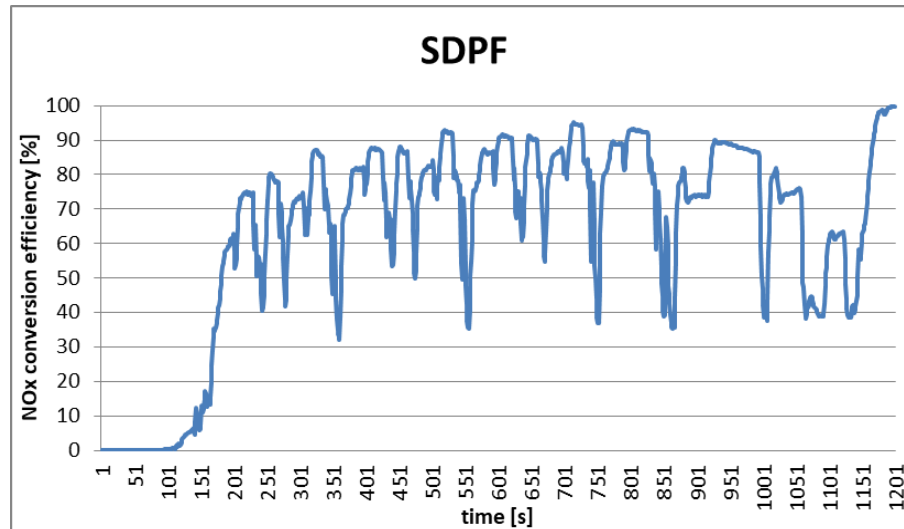


Grafico 104: Efficienza di conversione degli ossidi di azoto nel SDPF.

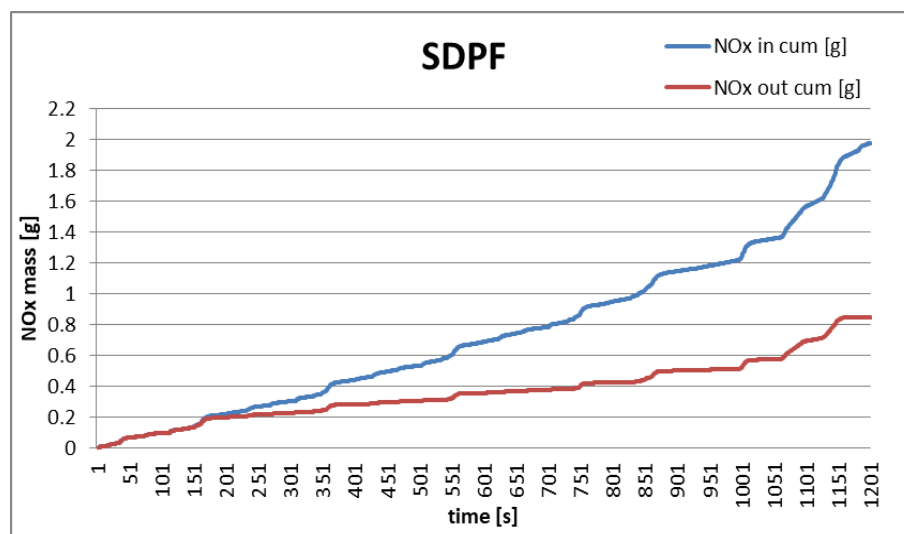


Grafico 105: Abbattimento degli ossidi di azoto per mezzo del SDPF.

L'abbattimento di NOx (Grafico 105) nel complesso è di nuovo leggermente meno efficace rispetto al caso di potenza all'EHC costante e pari a 2 kW. Si ha infatti una quantità di NOx in coda all'ATS sostanzialmente uguale al caso di gestione modulare della potenza all'EHC.

Il fatto di avere alti valori di conversione per tutto il tempo del ciclo di prova si ripercuote anche sui componenti a valle del SDPF: SCR ed ASC hanno in infatti in tal caso una quantità di ammoniaca residua minore da trattare rispetto ai casi precedenti. Come al punto 4.2.2, il rilascio di ammoniaca nel SDPF risulta esser particolarmente inibito dagli effetti della strategia adottata (Grafico 106). Il risultato è una quantità di ammoniaca residua sostanzialmente uguale (di poco minore) a quella vista in uscita dall'ATS precedente, in quanto i comportamenti di SCR e ASC non subiscono variazioni in termini di efficienza di conversione.

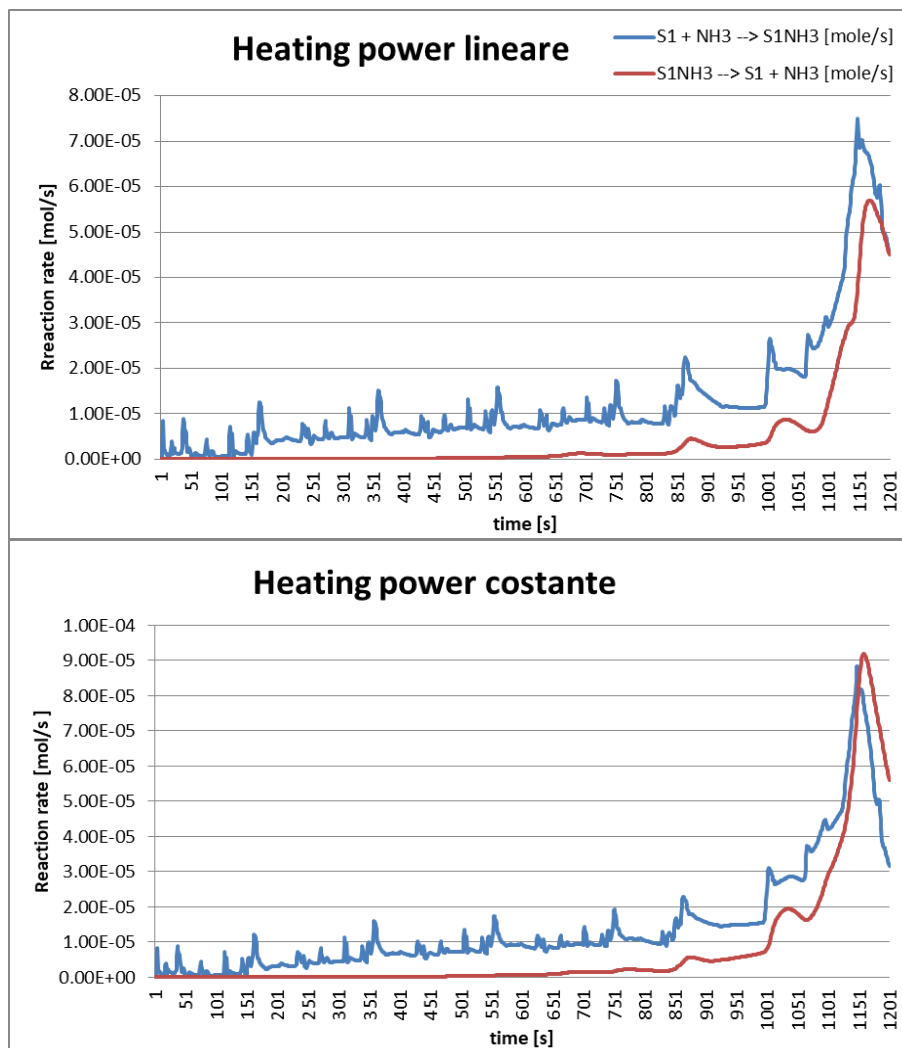


Grafico 106: Confronto in termini di velocità di adsorbimento e desorbimento superficiale dell'ammoniaca sui siti S1. Sui siti S2 la situazione è sostanzialmente invariata.

Si riportano i grafici relativi le quantità d'ammoniaca in ingresso e uscita a SCR ed ASC.

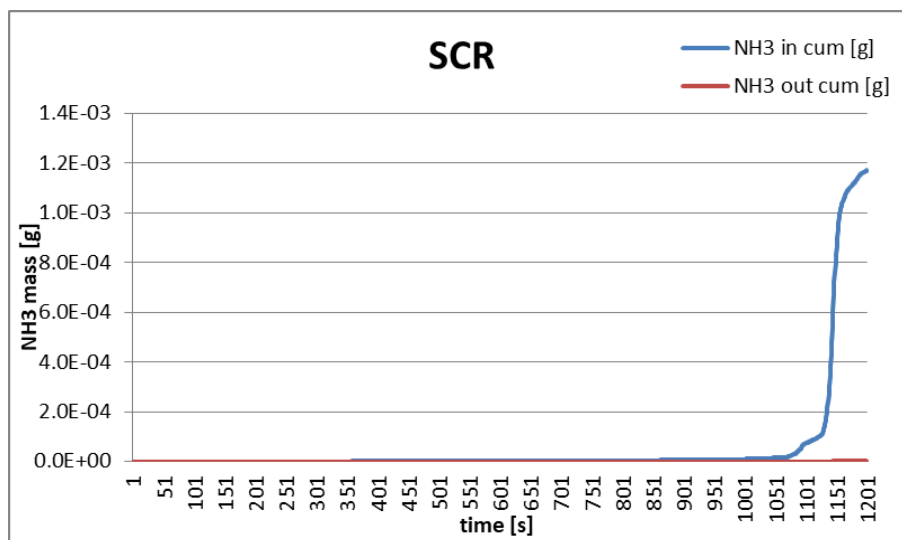


Grafico 107: Massa cumulata di ammoniaca in ingresso e in uscita dall'SCR.

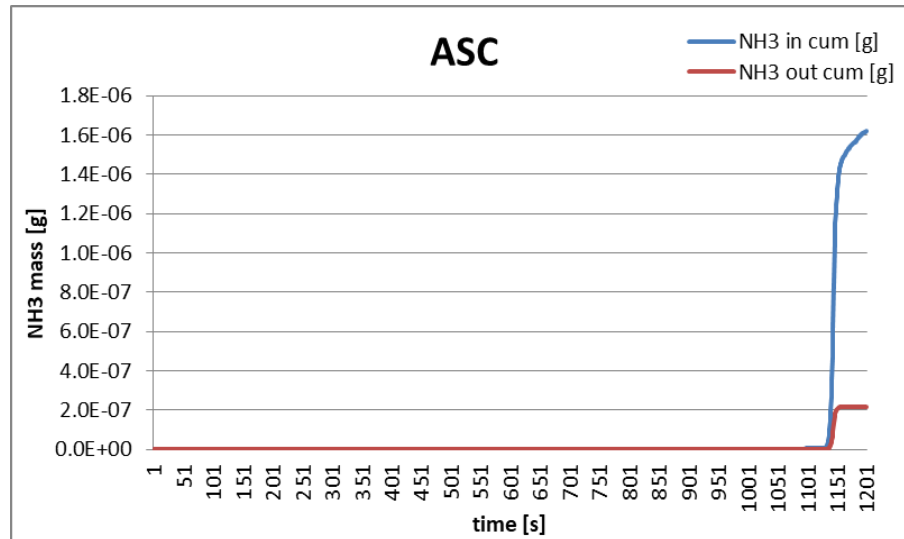


Grafico 108: Massa cumulata di ammoniaca in ingresso e in uscita dal ASC.

Per quanto concerne l'abbattimento di particolato, ossidi di carbonio e idrocarburi incombusti non vi sono interessanti variazioni da evidenziare rispetto alla configurazione precedente.

Dal punto di vista quantitativo i risultati ottenuti possono essere così riassunti e confrontati con i vincoli delle normative d'interesse:

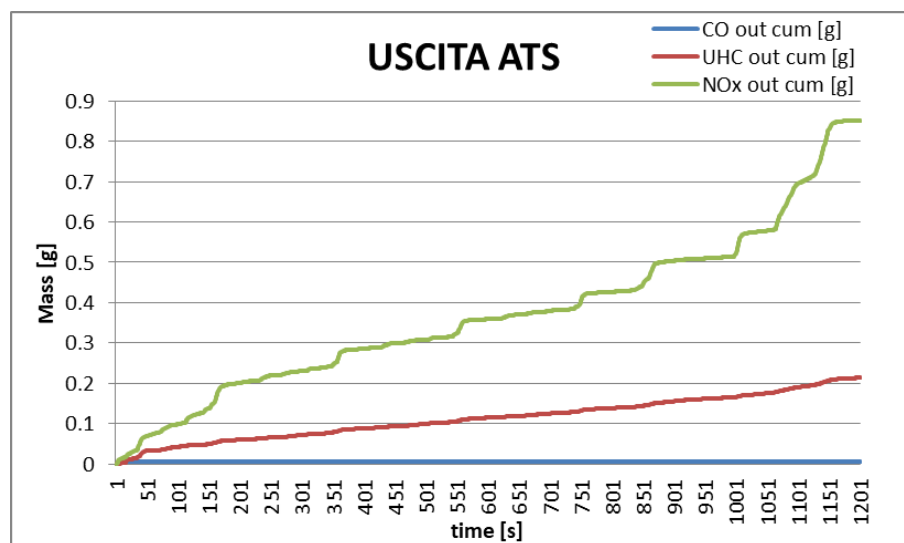


Grafico 109: Curva cumulata degli inquinanti gassosi (ossidi di azoto, idrocarburi incombusti e monossido di carbonio) alla sezione d'uscita del ATS.

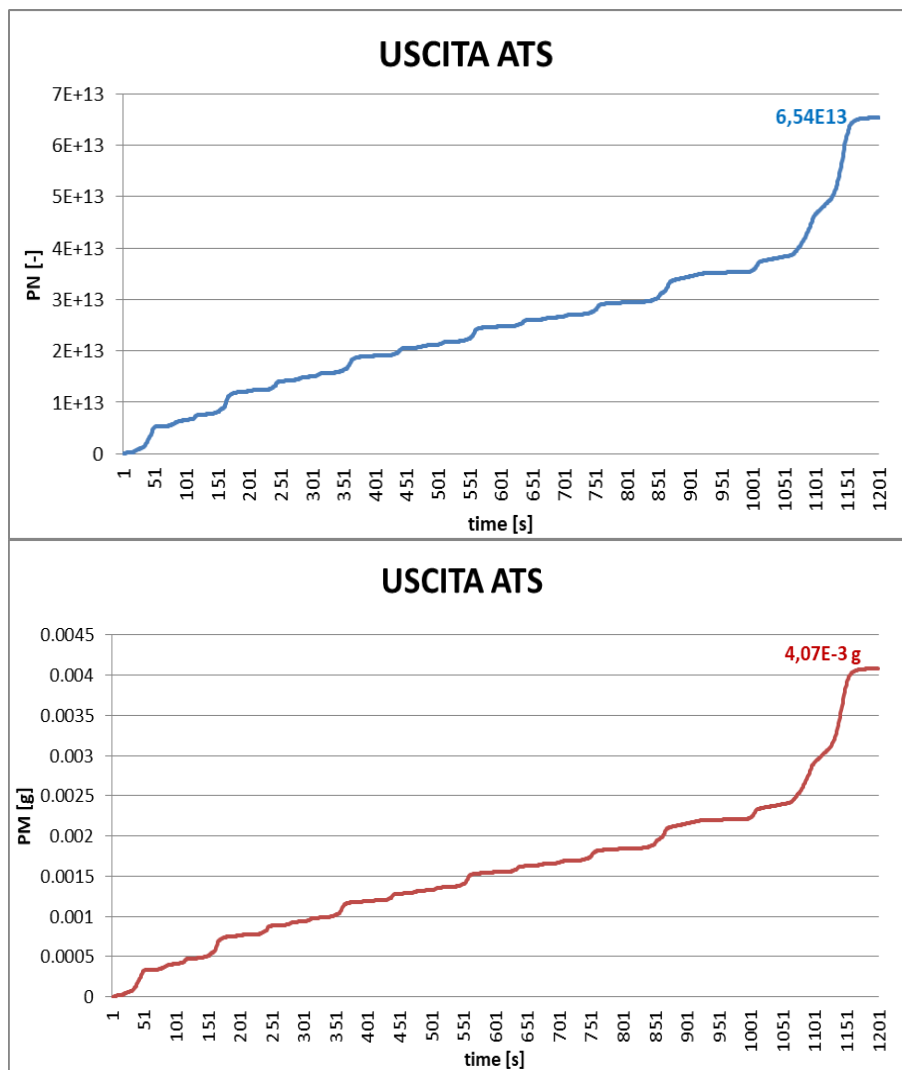


Grafico 110: Cumulate di PM e PN alla sezione d'uscita del ATS. Curva

LIMITAZIONI DIESEL-LEGGERI					
	CO [mg/km]	UHC+NOX [mg/km]	PM [mg/km]	PN [-/km]	NOX [mg/km]
EURO 1	-	970	140	-	-
EURO 2	-	700	80	-	500
EURO 3	-	560	50	-	250
EURO 4	500	300	25	-	250
EURO 5	500	250	5	6×10^{12}	180
EURO 6b	500	170	5	6×10^{12}	80

Tabella 22: Sintesi delle restrizioni date dalle normative.

VERIFICA DI CONFORMITA' A EURO 6b		
CO [mg/km]	0.60	<500
UHC+NOX [mg/km]	96.54	<170
NOX [mg/km]	77.38	<80
UHC [mg/km]	19.38	
PM [mg/km]	0.3713	<4.5
PN [-/km]	5.931×10^{12}	$< 6 \times 10^{12}$
NH3 [mg/km]	1.99×10^{-5}	

Tabella 23: Confronto dei risultati con i valori soglia della normative EURO 6b.

In definitiva, per tutte le sostanze inquinanti si ottiene sostanzialmente lo stesso grado di abbattimento del caso che sfruttava una legge modulare della potenza all'EHC: la configurazione permette perciò di rispettare i vincoli dettati dalle normative Euro 6b.

In termini di energia spesa per il funzionamento del componente EHC, il risultato è un consumo di poco inferiore rispetto al caso precedente: 2026 kJ (0.563 kWh), contro i 2033 kJ (0.565 kWh) di prima.

Nell'ottica futura di ottenere un maggior abbattimento degli inquinanti, in particolare degli ossidi di azoto, si può pensare di utilizzare una legge di regolazione dell'input elettrico come quella appena descritta, mantenendo il medesimo range di temperatura entro il quale applicarla, ed incrementare la potenza massima al catalizzatore riscaldato per accelerare ulteriormente il transitorio termico dei componenti e ottenere quindi maggiori temperature dei gas ed efficienza di conversione nei primi istanti del ciclo.

Oltre a quella già analizzata, vengono riportate tre nuove leggi lineari di potenza aventi diversi valori di potenza massima applicata, e quindi differenti pendenze [W/K].

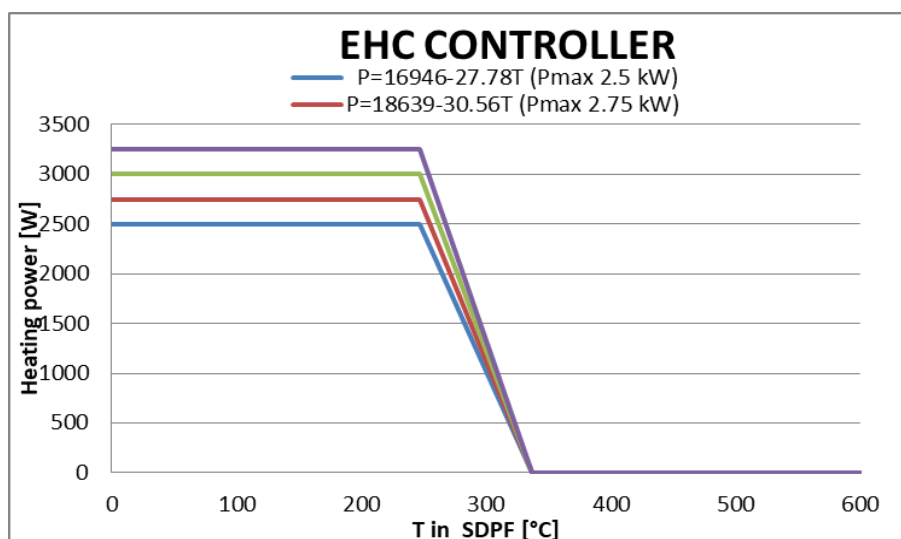


Grafico 111: Confronto tra le varie leggi di regolazione di potenza all'EHC in funzione della temperatura rilevata all'ingresso del SDPF.

Fissando una soglia di potenza massima maggiore, la sensibilità nella regolazione di potenza in funzione della temperatura aumenta: ciò significa che a pari differenza di temperatura dei gas tra un istante e quello successivo, la variazione di potenza applicata che ne consegue risulta essere maggiore. Si notino nel grafico seguente le maggiori ampiezze dei profili di potenza nel tempo al crescere della potenza massima fissata.

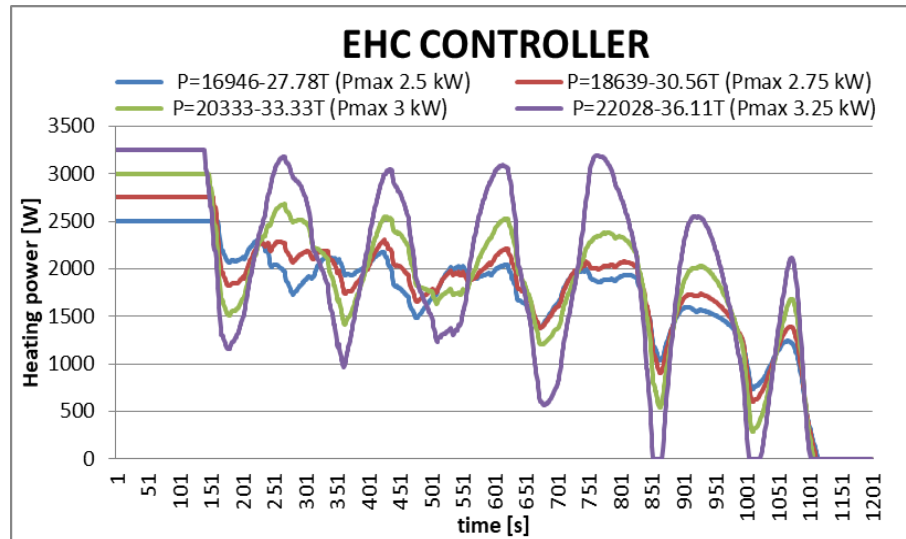


Grafico 112 Confronto tra i profili di potenza all'EHC in funzione del tempo di prova.

Si riporta un confronto tra le diverse leggi analizzate:

P (Tin_SDPF)	NOx [mg/km]	NH3 [mg/km]	En [kJ]	En [kWh]
P=16946-27.78 T (Pmax 2.5 kW)	77.38	1.99×10^{-5}	2026	0.5628
P=18639-30.56 T (Pmax 2.75 kW)	75.66	1.93×10^{-5}	2113	0.5871
P=20333-33.33 T (Pmax 3 kW)	74.57	1.93×10^{-5}	2199	0.6108
P=22028-36.11 T (Pmax 3.25 kW)	75.02	1.96×10^{-5}	2283	0.6340

Tabella 24: Confronto tra i risultati dati dalle diverse leggi di regolazione di potenza.

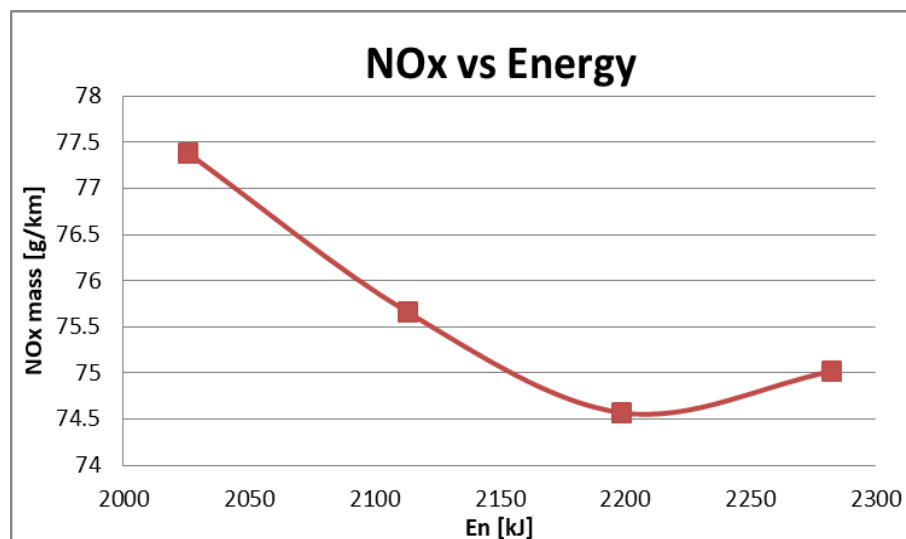


Grafico 113: Quantità di ossidi di azoto rilasciato in ambiente al variare della potenza massima all'EHC, fissato il range di temperatura entro il quale regolare la potenza linearmente con la temperatura dei gas in ingresso al SDPF.

Quello che si osserva è che, innalzando la potenza massima all'EHC, la quantità di NOx emessa decresce in maniera meno che proporzionale al consumo d'energia necessario per il funzionamento del componente e, inoltre, estremizzando l'aumento della potenza massima, la strategia di regolazione perde di efficienza: per valori di potenza massima di 3.25 kW (e coefficiente angolare della retta 36.11 W/K) si ottengono una maggior quantità di ossidi di azoto e un maggior dispendio energetico rispetto al caso con potenza massima minore e pari a 3 kW. Come si vede nel grafico seguente, questo è dovuto ad una maggior oscillazione della temperatura dei gas in ingresso al SDPF, e pertanto a valori di temperatura minori in prossimità delle valli della curva: in questi punti si convertono quindi minori quantità di NOx .

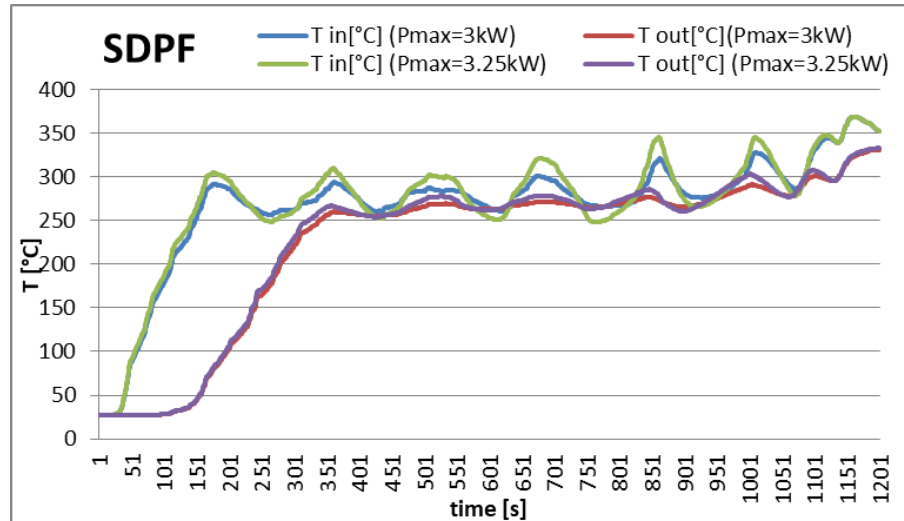


Grafico 114: Confronto tra le temperature dei gas in ingresso e uscita al SDPF nei casi di potenza massima all'EHC pari a 3 e 3.25 kW.

Nell'ottica di minimizzare la quantità di NOx emessa e di accettare un maggior consumo d'energia, ha senso optare al più per una legge $P = 20333 - 33.33 T$ (Potenza massima all'EHC pari a 3 kW).

Per ottenere un ulteriore abbattimento, oltre ad innalzare la soglia di potenza massima a 3.25 kW, sarebbe necessario diminuire la pendenza del tratto lineare incrementando il range di temperatura entro il quale applicare la legge lineare.

Se lo scopo è quello di rispettare i limiti della classe Euro 6b minimizzando i consumi, ed è questo il caso, il miglior compromesso è evidente sia quello relativo alla legge riportata originariamente:

$$P = 16946 - 27.78 T \text{ (Potenza massima all'EHC pari a 2.5 kW).}$$

4.2.4 Configurazione finale: Gestione e analisi del sistema su una serie di cicli NEDC consecutivi

Per ottenere una maggior conversione degli ossidi di azoto, ed averne quindi una minor quantità in uscita al sistema di trattamento, si ricordi come sia stato scelto di iniettare una quantità di ammoniaca maggiore della quantità stechiometrica, secondo un rapporto $\alpha = \frac{NH_3}{NOx} = 1.5$. Operando costantemente con eccesso di ammoniaca, nel caso il veicolo percorra lunghe distanze, ci potrebbe essere però la possibilità di avere un importante fenomeno di storage e di arrivare a saturare i siti del SDPF, aumentando così il rischio di avere dell'ammoniaca residua in uscita al sistema.

Una situazione di questo tipo può essere simulata effettuando consecutivamente più cicli di guida NEDC (6 nella fattispecie), e con lo scopo di evitare la problematica descritta e mantenere alte conversioni di NOx sin dal primo ciclo di prova, si può pensare di adottare un rapporto $\alpha = 1.5$ solo durante il primo NEDC, e poi operare con un rapporto α unitario.

Nel seguente grafico si può osservare il transitorio riguardante la quantità di ammoniaca immagazzinata nel SDPF. Si vede chiaramente che le frazioni dei siti occupati dall'ammoniaca, e quindi anche quelli liberi (S1 e S2), dal quarto ciclo NEDC consecutivo in poi seguono lo stesso identico andamento nel tempo, di ciclo in ciclo. Questo è sinonimo di stazionarietà del sistema.

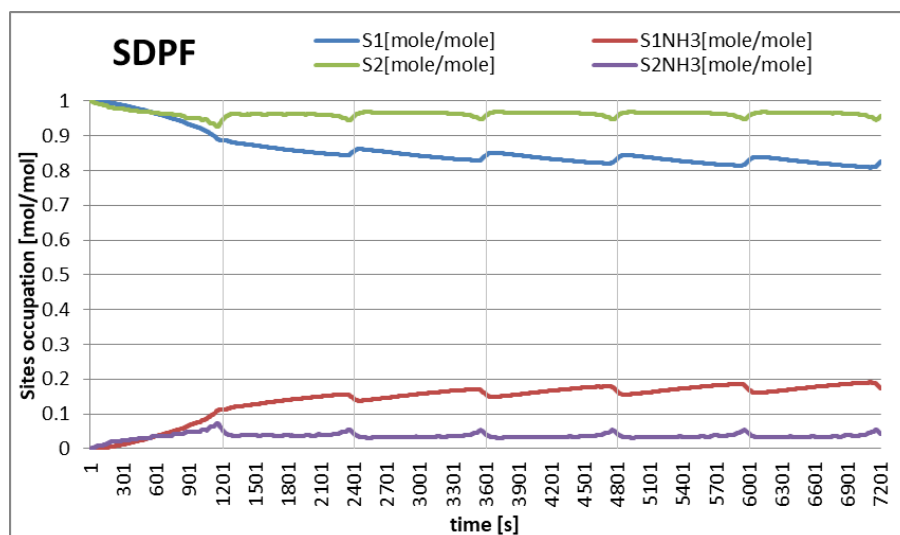


Grafico 115: Storage superficiale di ammoniaca nei siti S1 e S2 nel SDPF su sei cicli NEDC consecutivi.

A questo punto si analizzano ora sinteticamente i risultati di uno dei cicli NEDC “ripetibili” con α unitario (Quinto ciclo), soffermando l’attenzione sull’abbattimento degli ossidi di azoto.

Quello che si osserva è che l’efficienza di conversione degli NOx è maggiore durante il quinto ciclo rispetto al primo (Grafico 116). Questo è il risultato di una maggior disponibilità di ammoniaca dovuta alla maggior quantità immagazzinata precedentemente nel SDPF, e soprattutto di elevate temperature dei gas sin dai primi istanti (Grafico 117), a differenza del primo ciclo di prova, dove l’ATS si trova inizialmente a temperatura ambiente. Per lo stesso motivo, il maggior abbattimento d’inquinanti è ottenuto con un minor apporto di energia all’EHC (0.521 kWh contro i 0.566 kWh del primo ciclo). A conferma di ciò si osservi la minor area sottesa dalla curva rossa nel Grafico 118.

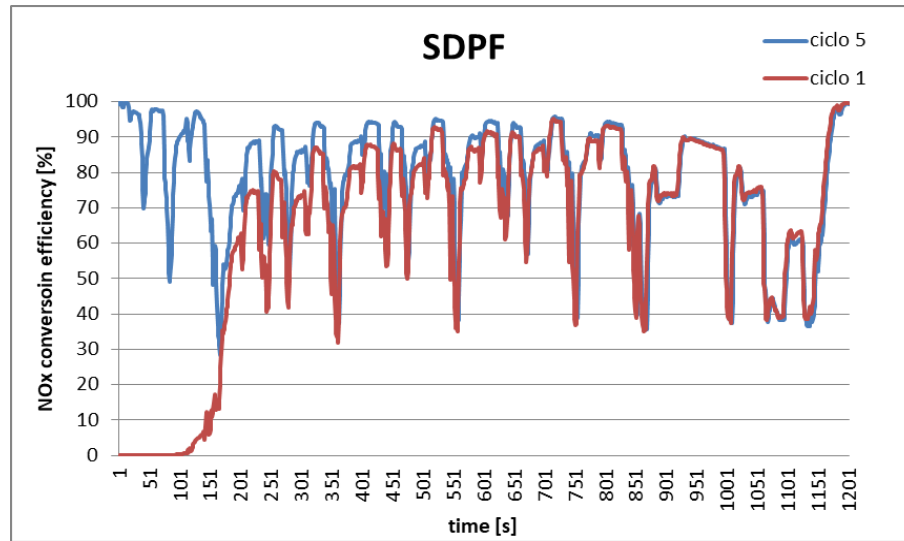


Grafico 116: Confronto tra ciclo 1 e ciclo 5 in termini di efficienza di conversione di NOx nel SDPF.

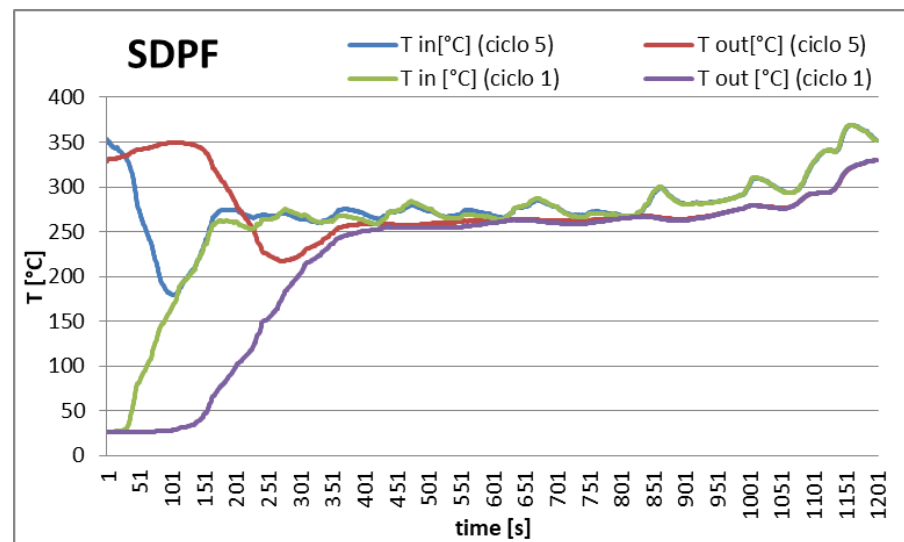


Grafico 117: Confronto tra ciclo 1 e ciclo 5 in termini di temperature dei gas in ingresso e uscita al SDPF.

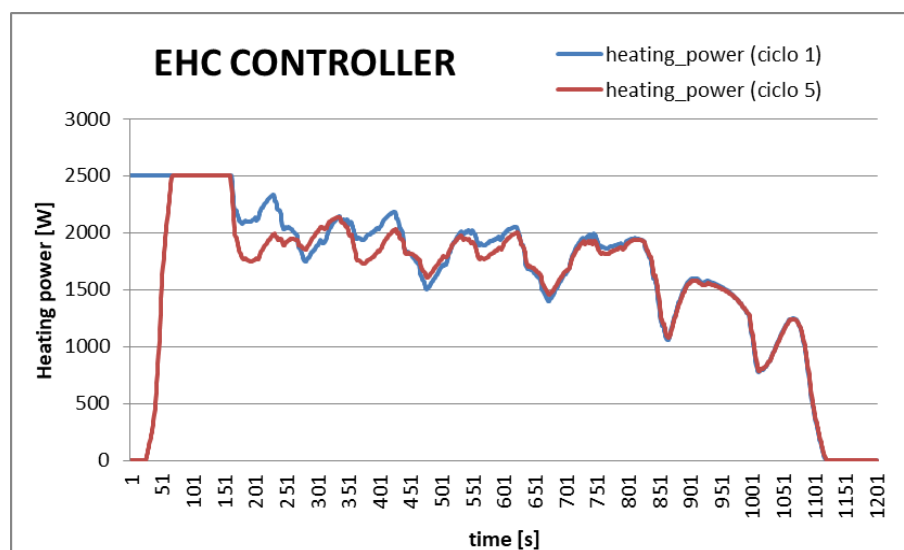


Grafico 118: Confronto tra ciclo 1 e ciclo 5 in termini di potenza in ingresso all'EHC.

Dal seguente grafico si può verificare inoltre come la quantità residua di ammoniaca all'uscita dell'ATS alla fine del quinto ciclo si stabilizzi ad un valore sostanzialmente uguale, di poco superiore, a quello del primo.

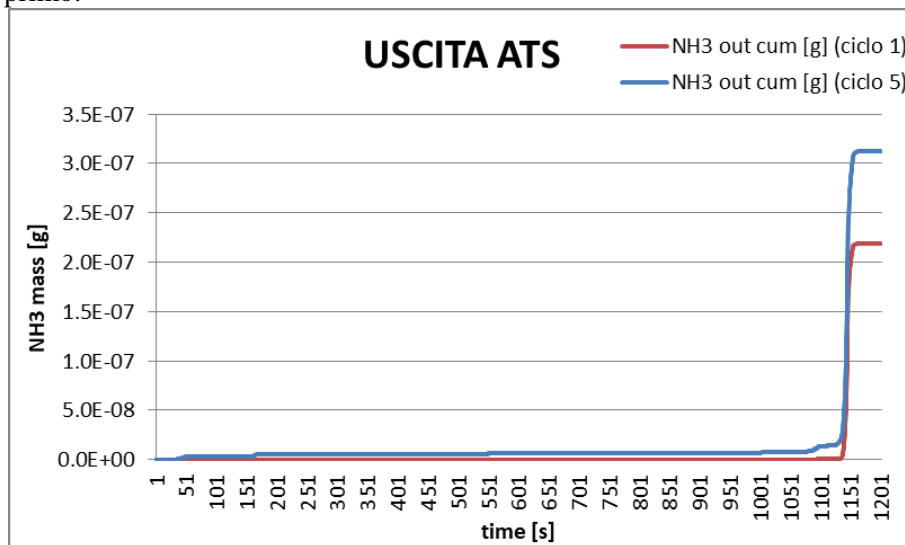


Grafico 119: Confronto tra ciclo 1 e ciclo 5 in termini di ammoniaca residua in uscita.

Da un'analisi relativa invece al processo di filtraggio, si può osservare un continuo aumento dell'efficienza di filtrazione nel tempo. Il motivo è la maggior quantità di particolato accumulata, e quindi la saturazione dei pori della parete filtrante e la conseguente formazione di uno strato di particolato su di essa, il quale partecipa al processo aumentandone l'efficienza, come descritto nel Capitolo 2.4.3 (cake filtration model).

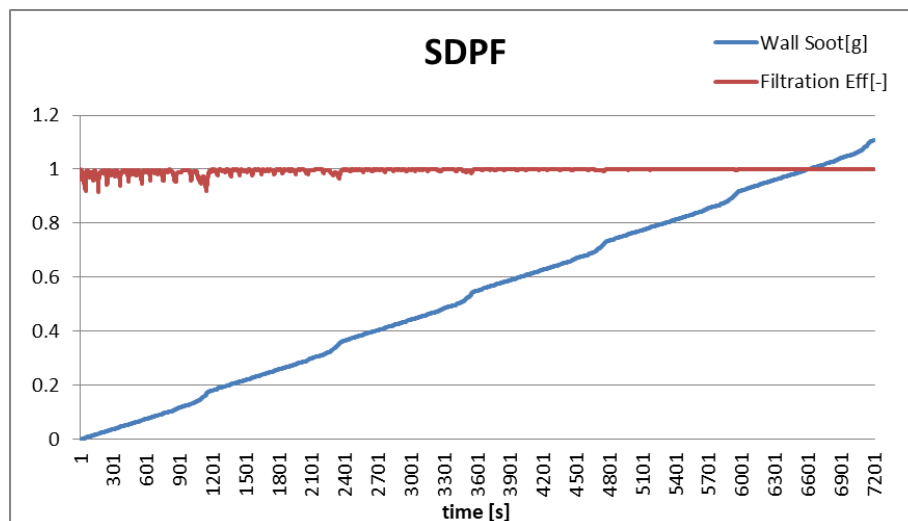


Grafico 120: Efficienza di filtraggio e massa di particolato accumulata sul filtro nell'arco di tempo di simulazione di sei NEDC consecutivi.

Dal punto di vista quantitativo i risultati ottenuti possono essere così riassunti e confrontati con i vincoli delle normative d'interesse:

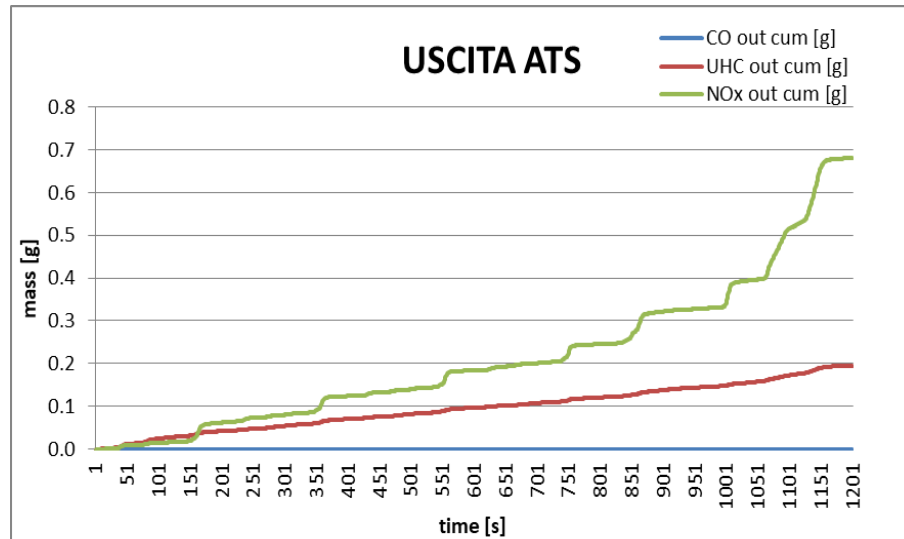


Grafico 121: Curva cumulata degli inquinanti gassosi (ossidi di azoto, idrocarburi incombusti e monossido di carbonio) alla sezione d'uscita del ATS (ciclo 5).

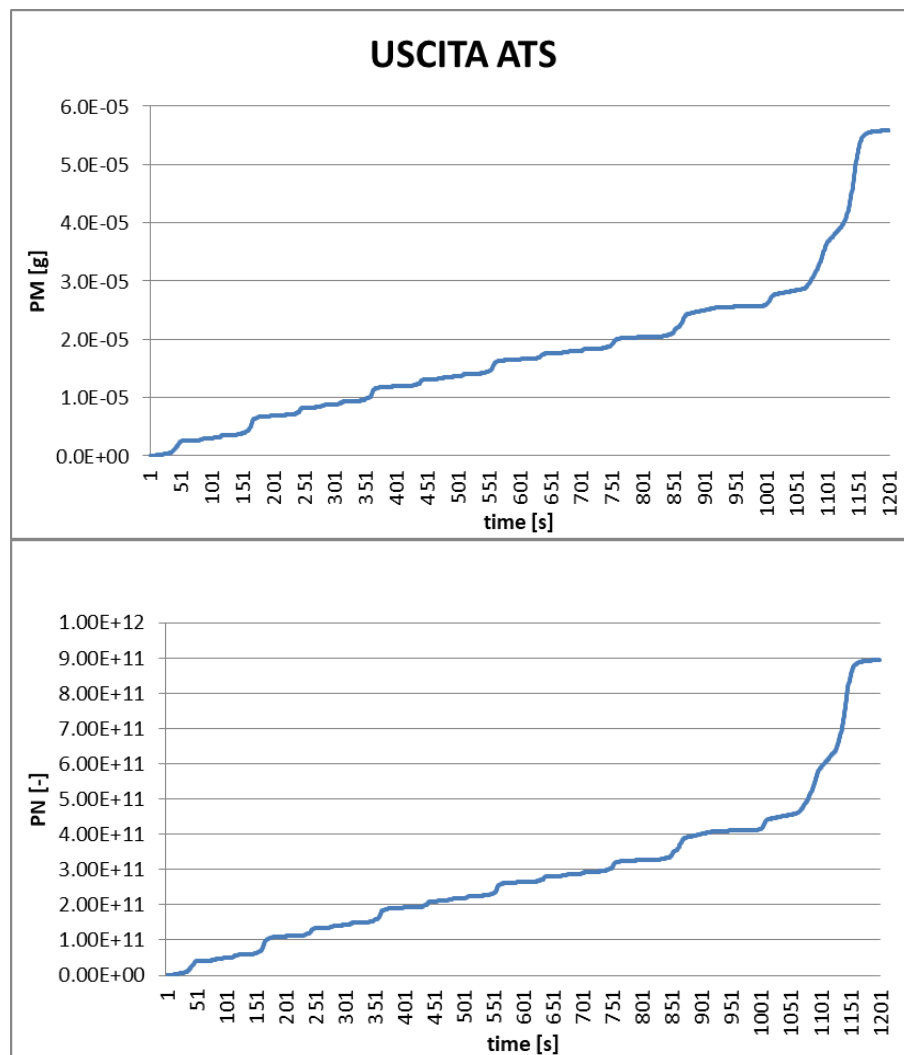


Grafico 122: PM e PN in uscita all'ATS (ciclo 5.)

CONFRONTO EMISSIONI PRIMO-QUINTO CICLO		
	CICLO 5	CICLO 1
CO [mg/km]	0.01	0.60
UHC+NOX [mg/km]	79.42	96.54
NOX [mg/km]	61.67	77.38
UHC [mg/km]	17.75	19.38
PM [mg/km]	0.00506	0.3713
PN [-/km]	8.11×10^{10}	$< 5.931 \times 10^{12}$
NH3 [mg/km]	2.84×10^{-5}	1.99×10^{-5}

Tabella 25: Confronto delle emissioni tra il primo e il quinto ciclo NEDC.

Come ci si poteva aspettare, date le maggiori temperature dei gas nei primi 150 secondi e la più elevata efficienza di filtraggio che si osservano al quinto ciclo di simulazione, rispetto al primo, le quantità emesse di tutti i diversi inquinanti risultano essere inferiori. In particolare si osserva una quantità di ossidi di azoto di circa 7 mg/km inferiore e una bassissima quantità di particolato emessa, ragionevolmente minore rispetto a quella risultante dalla simulazione del primo NEDC, ma comunque probabilmente sottostimata dal modello “spherical particles”.

5. Conclusioni

Nell'elaborato s'è voluta mostrare la fase di progettazione ed ottimizzazione necessaria per rendere conforme alle più recenti normative in vigore una configurazione ad oggi obsoleta (Euro 4) del sistema di post trattamento dei gas combusti di un motore Diesel. Questo è stato fatto percorrendo e adottando passo dopo passo le modifiche progettuali rese necessarie dalle restrizioni sull'emissione d'inquinanti imposte nel corso degli anni, fino a sfruttare una parziale elettrificazione del veicolo (MHEV), per sviluppare una configurazione di ATS piuttosto avanzata ed innovativa.

Dopo una fase per lo più di verifica della configurazione di base DOC+DPF (Euro 4), si è vista l'aggiunta di un sistema in grado di ridurre gli ossidi di azoto per mezzo di ammoniaca gassosa in accoppiamento al filtro anti particolato (SDFP), e quindi dei successivi componenti necessari ad evitare l'emissione in ambiente di quantità significative dell'agente riducente (SCR+ASC).

Con un opportuno dosaggio di ammoniaca e una rivisitazione del componente di filtraggio precedentemente adottato, il sistema ha dato risultati coerenti con la classe Euro 5.

A questo punto, con lo scopo di ottenere una configurazione finale in linea con la classe Euro 6b, si è voluto incrementare l'efficienza dell'ATS impiegando un componente aggiuntivo, l'EHC, passando però ad una tecnologia di veicolo MHEV in grado di soddisfare parte della potenza richiesta dal dispositivo elettrico senza che sia prodotta dal motore, ma sfruttando l'energia recuperata durante la fase di frenata rigenerativa.

Viene riportata la configurazione finale dell'ATS, frutto del lavoro di progettazione svolto.

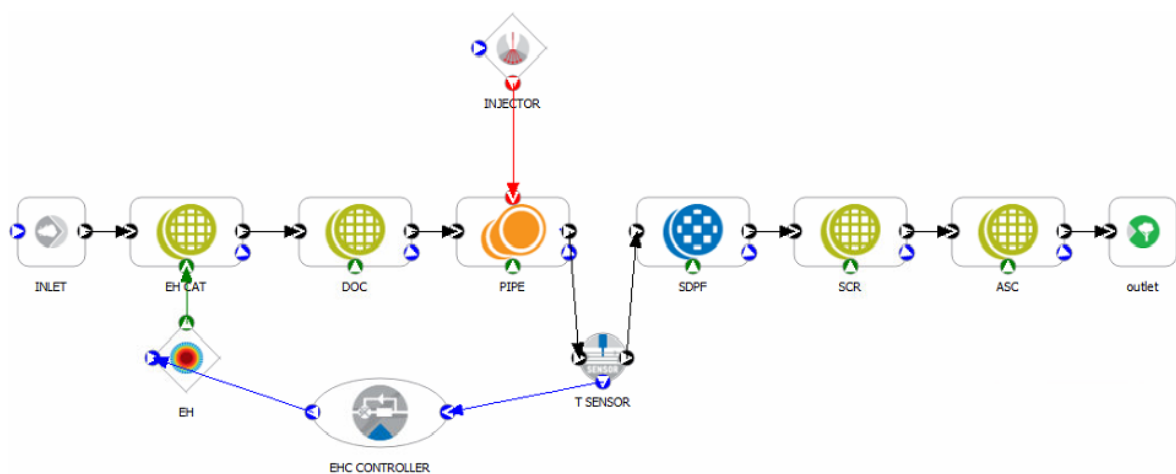


Figura 17: Configurazione finale dell'ATS, interfaccia Axisuite.

Dall'analisi descritta al punto 4.2, si sono evidenziate due interessanti strategie di regolazione della potenza in ingresso alla sezione riscaldata del catalizzatore ossidante. In quanto una legge lineare della potenza con la temperatura dei gas restituisca valori di emissioni di NO_x e di energia spesa leggermente inferiori rispetto al caso di regolazione modulare della potenza, si tende a premiare la strategia analizzata al punto 4.2.3.

QUANTITA' D'INQUINANTI IN AMBIENTE	
CO [mg/km]	0.6
UHC+NOX [mg/km]	96.54
NOX [mg/km]	77.38
UHC [mg/km]	19.38
PM [mg/km]	0.3713
PN [-/km]	5.39×10^{12}
NH3 [mg/km]	1.99×10^{-5}
CLASSE DI OMOLOGAZIONE	EURO 6b
UTILIZZO EHC	
TEMPO TOTALE D'UTILIZZO [s]	1125
ENERGIA ELETTRICA IN INGRESSO [kWh]	0.566
POTENZA MASSIMA IN INGRESSO [kW]	2.5
TEMPO A MASSIMA POTENZA [s]	162
ENERGIA A POTENZA MASSIMA [kWh]	0.1125

Tabella 26: Sintesi dei risultati relativi alla configurazione finale. Risultati riferiti al ciclo di prova NEDC.

Oltre alla progettazione del sistema sul singolo ciclo NEDC con lo scopo di stabilire la sua classe di omologazione, si è inoltre affrontata una simulazione su una serie di cicli NEDC per valutare il transitorio del sistema, soprattutto in termini di ammoniaca accumulata nel SDPF. Dopo il primo ciclo, si è deciso di passare ad un rapporto $\alpha = NH_3/NOx$ unitario (stechiometrico) per evitare un eccessivo accumulo di NH_3 e limitare quindi il rischio di averne una quantità residua all'uscita del sistema. Dalla simulazione è scaturito che lo storage di ammoniaca si stabilizza dopo quattro cicli consecutivi. Da un'analisi di uno dei cicli "ripetibili" si è inoltre osservata una minor quantità di inquinanti rilasciata in ambiente, ottenuta con una minor spesa energetica, proprio come ci si aspettava.

Tornando alla simulazione del singolo ciclo di omologazione, per concludere è opportuno fare delle considerazioni di carattere pratico ed economico riguardo l'energia aggiuntiva necessaria all'impiego del componente EHC.

E' ragionevole ipotizzare che, date le caratteristiche del percorso stradale che il test al banco (NEDC) vuole simulare, una frazione di circa il 40% dell'energia elettrica richiesta per raggiungere i risultati descritti non sia prodotta dal motore termico, ma provenga invece dalla fase di frenata rigenerativa. Per questo motivo, la quota d'energia addizionale che il motore deve erogare e mandare alla batteria non è di 0.563 kWh, ma di $E = 0.338 \text{ kWh}$.

Ricordando che il motore turbo-Diesel del veicolo in questione abbia una cilindrata di 2.2 l, si può assumere un consumo specifico di combustibile (bsfc: break specific fuel consumption: $bsfc = \rho V / E$) pari a 200 g/kWh.

Dato inoltre un combustibile Diesel avente densità $\rho = 850 \text{ g/l}$, dalla definizione di bsfc si può stimare il volume consumato dal motore per il funzionamento del componente EHC:

$$V = E \frac{bsfc}{\rho}$$

Il volume di combustibile necessario per erogare l'energia dissipata nel catalizzatore riscaldato è pari a 0.0795 l, per una distanza percorsa di 11 km (distanza simulata nel test NEDC), ovvero 0.723 l/100km.

Il consumo addizionale di combustibile dato dalla tecnologia adottata non è trascurabile, ma comunque piuttosto contenuto se confrontato con i consumi medi di un'auto avente un motore in linea con quello in oggetto. Infatti, considerando ad esempio un motore Diesel il quale consumo medio (in condizioni di guida miste urbana-extraurbana) ammonta a 6 litri di combustibile ogni 100 chilometri percorsi, l'incremento di consumo di combustibile si aggira attorno al 12%. Come già riportato nel capitolo introduttivo, l'utilizzo di una tecnologia MHEV può far risparmiare intorno al 15% del carburante in condizioni miste di guida. Per tanto, rispetto alla configurazione Diesel Euro 5 (trattata al punto 4.1.2), con l'introduzione nell'ATS del nuovo componente, in una configurazione MHEV del veicolo, si può raggiungere la classe di omologazione Euro 6b, mantenendo di poco minori, o al più invariati, i consumi di combustibile.

I valori di consumi stimati sono rappresentativi di un ciclo di guida misto di 11 km, simulato al banco osservando gli standard del test NEDC, quindi con temperature iniziali del sistema attorno ai 25°C. Per differenti condizioni ambientali e differenti tratte percorse, nella realtà i risultati ottenuti potrebbero essere poco veritieri. Ricordando che il componente EHC sia stato ideato per accelerare il transitorio termico dei componenti dell'ATS al fine di raggiungere elevate temperature e quindi efficienze d'abbattimento degli inquinanti anche nei primi minuti di marcia, ci si aspetta che su una tratta di lunga distanza, soprattutto se percorsa su strade extra urbane, il consumo relativo all'utilizzo del componente sia inferiore di quello precedentemente riportato (0.723l/100km): si osservi come dopo poco più di 15 minuti di marcia la potenza al componente sia stata tagliata, date le alte temperature rilevate nel sistema di trattamento da quel momento in poi. In questi termini risultano essere più veritieri i consumi derivanti dalla simulazione di un maggior numero di NEDC consecutivi al punto 4.2.4 (0.669 l/100 km).

Per quanto riguarda l'effetto di eventuali diverse condizioni di temperatura iniziali, nel caso queste fossero più rigide, per portare alle temperature desiderate il sistema sarebbe necessario un periodo di maggior durata durante il quale all'EHC sia fornita la potenza massima, e quindi in generale un maggior tempo di funzionamento del componente, che causerebbe un maggior dispendio energetico e quindi un maggior consumo di carburante.

6. Proposte di futuri sviluppi

- A questo punto, sarebbe opportuna una validazione del modello monodimensionale tramite uno studio dimensionale sui componenti più delicati. Il componente EHC, il quale viene modellato dal software come una sezione a temperatura uniforme, approssima in maniera poco accurata la distribuzione di temperatura reale dovuta al circuito elettrico a forma di spirale all'interno del substrato del catalizzatore. Altro punto delicato dell'ATS in questi termini è il punto d'iniezione dell'ammoniaca: è facile immaginare che qui il processo di miscelamento tra i due flussi gassosi sia tutt'altro che un fenomeno monodimensionale.
- Ottimizzazione del componente SDPF e del dosaggio di ammoniaca al fine di ridurre i consumi relativi all'energia richiesta dal catalizzatore riscaldato, e quindi i consumi del veicolo MHEV. In modo duale, a pari spesa energetica un'operazione di questo tipo porterebbe permettere di ridurre ulteriormente le quantità d'inquinanti in uscita dall'ATS, soprattutto nell'ottica di dover soddisfare probabili future ulteriori limitazioni sull'emissioni.
- Essendo il modello presentato basato su dati relativi ai gas di scarico provenienti dalle misurazioni effettuate da un test al banco (NEDC), per quanto riguarda la configurazione finale dell'ATS, i brevi tratti di spegnimento del motore termico e gli effetti di aumento del carico del motore legati alla produzione della potenza aggiuntiva necessaria al componente EHC quando la batteria è scarica, in termini di portata, temperatura e concentrazione degli inquinanti nei gas non sono presi in considerazione. Si può pensare quindi di accoppiare alla simulazione dell'ATS quella di un modello di motore in grado di tenere conto di tali fenomeni in maniera circolare.

Indice delle figure

Figura 1: Schematizzazione del processo di combustione.	11
Figura 2: Schema componentistico MHEV.....	13
Figura 3: Sezione del canale per evidenziarne la stratigrafia	21
Figura 4: Circuito elettrico equivalente rappresentante le perdite di carico nel catalizzatore.	21
Figura 5: Schematizzazione dei fenomeni di scambio termico nel modello “single pipe”.....	32
Figura 6: Schematizzazione del processo di filtrazione.	34
Figura 7: Volume di controllo del problema sul singolo canale.....	35
Figura 8: Schematizzazione del gas fluente attraverso la parete e lo strato di particolato accumulato.....	35
Figura 9: Configurazione dell'ATS di partenza, interfaccia Axisuite.....	41
Figura 10: Catalizzatore ossidante DOC.....	41
Figura 11: Filtro anti particolato	42
Figura 12: Configurazione dell'ATS, interfaccia Axisuite.	49
Figura 13: Configurazione ASC, interfaccia Axisuite.	75
Figura 14: EHC in funzione.	75
Figura 15: Configurazione dell'ATS, interfaccia Axisuite.	90
Figura 16 : Configurazione dell'ATS, interfaccia Axisuite.	98
Figura 17: Configurazione finale dell'ATS, interfaccia Axisuite.....	113

Indice dei grafici

Grafico 1: Profilo di velocità del ciclo di omologazione NEDC.....	14
Grafico 2: Profilo di velocità del ciclo di omologazione WLTP per veicoli di Classe 3.	14
Grafico 3: Confronto tra i profili di velocità di NEDC, WLTC e un esempio di prova RDE.	15
Grafico 4: Portata massica dei gas di scarico in ingresso all'ATS.	
Grafico 5: Temperatura gas di scarico in ingresso all'ATS.	17
Grafico 6: Concentrazione di CO nei gas di scarico all'ingresso dell'ATS.....	18
Grafico 7: Concentrazione di NOx nei gas di scarico all'ingresso dell'ATS.....	18
Grafico 8: Concentrazione di idrocarburi nei gas di scarico all'ingresso dell'ATS.....	19
Grafico 9 Coefficiente di drag vs A2/A1 per ogni condizione di flusso.	22
Grafico 10: Cake filtration efficiency in funzione dell'apertezza della parete.....	39
Grafico 11: Cake filtration efficiency in funzione della massa accumulata per unità di superficie sulla quale si crea lo strato.	40
Grafico 12: Transizione tra fase di filtrazione data dalla parete a quella data dallo strato accumulatosi su di essa.	40
Grafico 13: Temperatura dei gas in ingresso e in uscita al DOC.....	43
Grafico 14: Abbattimento di idrocarburi incombusti per mezzo del DOC.	
Grafico 15: Abbattimento di CO per mezzo del DOC.	
Grafico 16: Efficienza di conversione di CO e UHC.....	44
Grafico 17: Abbattimento del particolato per mezzo del DPF.....	45
Grafico 18: Efficienza di filtrazione (in massa).	46
Grafico 19: Accumulo di particolato sulle pareti del filtro.	46
Grafico 20: Perdite di carico concentrate nel filtro.....	46
Grafico 21: Curva cumulata degli inquinanti gassosi (ossidi di azoto, idrocarburi incombusti e monossido di carbonio) alla sezione d'uscita del ATS.	47
Grafico 22 Curva cumulata del particolato alla sezione d'uscita dell' ATS.	47
Grafico 23: Temperatura dei gas in ingresso e in uscita al DOC.....	52

Grafico 24: Abbattimento di CO per mezzo del DOC.	
Grafico 25: Abbattimento di idrocarburi incombusti per mezzo del DOC.	53
Grafico 26: Efficienza di conversione di CO e UHC.....	53
Grafico 27: Abbattimento di particolato (massa) per mezzo del SDPF.	54
Grafico 28: Abbattimento di particolato (numero di particelle) per mezzo del SDPF.	
Grafico 29: Efficienza di filtrazione del SDPF.	
Grafico 30: Accumulo di particolato sulle pareti del filtro.	
Grafico 31: Perdite di carico concentrate nel filtro.....	54
Grafico 32: Abbattimento di NOx per mezzo del SDPF.....	56
Grafico 33: Temperatura dei gas in ingresso e in uscita al SDPF.....	56
Grafico 34: Efficienza di conversione degli ossidi di azoto.....	57
Grafico 35: Velocità delle reazioni di riduzione degli ossidi di azoto.	57
Grafico 36: Massa cumulata di ammoniaca in ingresso e in uscita al SDPF.	58
Grafico 37: Frazione dei siti liberi e occupati dall'ammoniaca nel SDPF.....	58
Grafico 38: Velocità delle reazioni di adsorbimento e desorbimento superficiale dell'ammoniaca.	59
Grafico 39: Velocità delle reazioni di adsorbimento e desorbimento superficiale dell'ammoniaca.	59
Grafico 40: Abbattimento di NOx per mezzo del SCR.	
Grafico 41: Massa cumulata di ammoniaca in ingresso e in uscita al SDPF.	
Grafico 42: Frazione dei siti del SCR occupati dall'ammoniaca.	60
Grafico 43: Massa cumulata di ammoniaca in ingresso e in uscita all'ASC.....	61
Grafico 44: Abbattimento di NOx per mezzo del SCR.....	62
Grafico 45: Curva cumulata degli inquinanti gassosi (ossidi di azoto, idrocarburi incombusti e monossido di carbonio) alla sezione d'uscita del ATS.	62
Grafico 46: Curva cumulata del particolato alla sezione d'uscita del ATS.	63
Grafico 47: Abbattimento di particolato (massa) per mezzo del SDPF.	65
Grafico 48: Abbattimento di particolato (massa) per mezzo del SDPF.	65
Grafico 49: Efficienza di filtrazione(in massa e numero di particelle).....	65
Grafico 50: Accumulo di particolato sulle pareti del filtro.	66
Grafico 51: Perdite di carico concentrate nel SDPF.	66
Grafico 52: Confronto tra i diversi dosaggi di ammoniaca in termini di velocità di reazione di riduzione degli ossidi d' azoto nel SDPF.	67
Grafico 53: Confronto tra i due diversi dosaggi di ammoniaca in termini di efficienza di conversione degli ossidi d'azoto	68
Grafico 54: Confronto tra i diversi dosaggi di ammoniaca in termini di quantità di ossidi di azoto in uscita dal SDPF.	68
Grafico 55: Confronto tra i due diversi dosaggi di ammoniaca in termini di frazione dei siti coinvolti nei fenomeni di assorbimento e desorbimento di NH3 nel SDPF.....	69
Grafico 56: Confrnto tra i due diversi dosaggi di ammoniaca in termini di efficienza di conversione di NOx nel SCR.	70
Grafico 57: Confronto tra i due diversi dosaggi di ammoniaca in termini di massa cumulata di NH3 in ingresso e in uscita al SCR.	70
Grafico 58: Confrnto tra i due diversi dosaggi di ammoniaca in termini di accumulo di ammoniaca sui siti del SCR.....	70
Grafico 59: Confrnto tra i due diversi dosaggi di ammoniaca in termini di efficienza di conversione dell'ammoniaca nel ASC.	71
Grafico 60: Confronto tra i due diversi dosaggi di ammoniaca in termini di massa cumulata di NH3 in ingresso e in uscita all'ASC.....	71
Grafico 61: Confronto tra i due diversi dosaggi di ammoniaca in termini di quantità di NOx alla sezione d'uscita dell'ATS.....	72
Grafico 62: Confronto tra i due diversi dosaggi di ammoniaca in termini di abbattimento di NOx alla sezione d'uscita dell'ATS, negli ultimi 100 s di ciclo di prova.....	72

Grafico 63: Curva cumulata degli inquinanti gassosi (ossidi di azoto, idrocarburi incombusti e monossido di carbonio) alla sezione d'uscita del ATS.	73
Grafico 64: Cumulate di PM e PN alla sezione d'uscita del ATS.	73
Grafico 65: Andamento della potenza elettrica in ingresso alla sezione EHC.	77
Grafico 66: Temperatura dei gas in ingresso e in uscita al EHC.	77
Grafico 67: Efficienza di conversione di CO e UHC nell'EHC.	78
Grafico 68: Abbattimento CO per mezzo del EHC.	
Grafico 69: Abbattimento degli idrocarburi incombusti per mezzo dell' EHC	78
Grafico 70: Temperatura dei gas in ingresso e in uscita al DOC.	
Grafico 71: Efficienza di conversione di CO e UHC nel DOC.	
Grafico 72: Abbattimento degli idrocarburi incombusti per mezzo del DOC.	
Grafico 73: Abbattimento della CO per mezzo del DOC.	79
Grafico 74: Temperatura dei gas in ingresso e in uscita al SDPF.	
Grafico 75: Abbattimento degli ossidi di azoto per mezzo del SDPF.	81
Grafico 76: Velocità delle reazioni di riduzione degli ossidi di azoto nel SDPF.	81
Grafico 77: Efficienza di conversione degli ossidi di azoto nel SDPF.	82
Grafico 78: Massa cumulata di ammoniaca in ingresso e in uscita al SDPF.	82
Grafico 79: Velocità di adsorbimento e desorbimento superficiale dell'ammoniaca.	
Grafico 80: Adsorbimento e desorbimento superficiale dell'ammoniaca.	83
Grafico 81: Frazione dei siti coinvolti nell'assorbimento e desorbimento dell'ammoniaca nel SDPF, caso con EHC e senza a confronto, $\alpha=1.5$.	84
Grafico 82: Efficienza di conversione degli NOx nel SCR: confronto rispetto al caso senza componente EHC.	85
Grafico 83: Massa cumulata di ammoniaca in ingresso e in uscita dal SCR.	85
Grafico 84: Storage superficiale di ammoniaca nei siti S1 e S2 del SCR: confronto tra caso con e senza EHC.	86
Grafico 85: Efficienza di conversione dell'ammoniaca nell'ASC: confronto tra il caso con e senza EHC.	86
Grafico 86: Massa cumulata di ammoniaca in ingresso e in uscita dal ASC.	87
Grafico 87: Curva cumulata degli inquinanti gassosi (ossidi di azoto, idrocarburi incombusti e monossido di carbonio) alla sezione d'uscita del ATS.	87
Grafico 88: Cumulate di PM e PN alla sezione d'uscita del ATS.	88
Grafico 89: Potenza all'EHC in funzione della temperatura rilevata all'ingresso del SDPF.	91
Grafico 90: Profilo di potenza all'EHC in funzione del tempo di prova.	91
Grafico 91: Profili di temperatura dei gas in ingresso e in uscita dall'EHC.	92
Grafico 92: Profili di temperatura dei gas in ingresso e in uscita dal SDPF.	92
Grafico 93: Efficienza di conversione degli ossidi di azoto nel SDPF.	93
Grafico 94: Abbattimento degli ossidi di azoto per mezzo del SDPF.	93
Grafico 95: Confronto in termini di velocità di adsorbimento e desorbimento superficiale dell'ammoniaca sui siti S1. Sui siti S2 la situazione è sostanzialmente invariata.	94
Grafico 96: Massa cumulata di ammoniaca in ingresso e in uscita dal SCR.	95
Grafico 97: Massa cumulata di ammoniaca in ingresso e in uscita dall'ASC	95
Grafico 98: Curva cumulata degli inquinanti gassosi (ossidi di azoto, idrocarburi incombusti e monossido di carbonio) alla sezione d'uscita del ATS.	96
Grafico 99: Cumulate di PM e PN alla sezione d'uscita del ATS.	96
Grafico 100: Potenza all'EHC in funzione della temperatura rilevata all'ingresso del SDPF. ...	99
Grafico 101: Profilo di potenza all'EHC in funzione del tempo di prova.	99
Grafico 102: Profili di temperatura dei gas in ingresso e uscita dall'EHC.	100
Grafico 103: Profili di temperatura dei gas in ingresso e uscita dal SDPF.	100
Grafico 104: Efficienza di conversione degli ossidi di azoto nel SDPF.	101
Grafico 105: Abbattimento degli ossidi di azoto per mezzo del SDPF.	101
Grafico 106: Confronto in termini di velocità di adsorbimento e desorbimento superficiale dell'ammoniaca sui siti S1. Sui siti S2 la situazione è sostanzialmente invariata.	102

Grafico 107: Massa cumulata di ammoniaca in ingresso e in uscita dall'SCR.....	102
Grafico 108: Massa cumulata di ammoniaca in ingresso e in uscita dal ASC.....	103
Grafico 109: Curva cumulata degli inquinanti gassosi (ossidi di azoto, idrocarburi incombusti e monossido di carbonio) alla sezione d'uscita del ATS.	103
Grafico 110: Cumulate di PM e PN alla sezione d'uscita del ATS.Curva	104
Grafico 111: Confronto tra le varie leggi di regolazione di potenza all'EHC in funzione della temperatura rilevata all'ingresso del SDPF.....	105
Grafico 112 Confronto tra i profili di potenza all'EHC in funzione del tempo di prova.	106
Grafico 113: Quantità di ossidi di azoto rilasciato in ambiente al variare della potenza massima all'EHC, fissato il range di temperatura entro il quale regolare la potenza linearmente con la temperatura dei gas in ingresso al SDPF.	106
Grafico 114: Confronto tra le temperature dei gas in ingresso e uscita al SDPF nei casi di potenza massima all'EHC pari a 3 e 3.25 kW.	107
Grafico 115: Storage superficiale di ammoniaca nei siti S1 e S2 nel SDPF su sei cicli NEDC consecutivi.....	108
Grafico 116: Confronto tra ciclo 1 e ciclo 5 in termini di efficienza di conversione di NOx nel SDPF.....	109
Grafico 117: Confronto tra ciclo 1 e ciclo 5 in termini di temperature dei gas in ingresso e uscita al SDPF.....	109
Grafico 118: Confronto tra ciclo 1 e ciclo 5 in termini di potenza in ingresso all'EHC.	109
Grafico 119: Confronto tra ciclo 1 e ciclo 5 in termini di ammoniaca residua in uscita.	110
Grafico 120: Efficienza di filtraggio e massa di particolato accumulata sul filtro nell'arco di tempo di simulazione di sei NEDC consecutivi.....	110
Grafico 121: Curva cumulata degli inquinanti gassosi (ossidi di azoto, idrocarburi incombusti e monossido di carbonio) alla sezione d'uscita del ATS (ciclo 5).	111
Grafico 122: PM e PN in uscita all'ATS (ciclo 5.)	111

Indice delle tabelle

Tabella 1: Limitazioni date dalle normativi fino alla EURO 6b.....	16
Tabella 2: Tempistiche e differenze tra le classi Euro 6c, 6d-temp e 6d.	16
Tabella 3: Limitazioni date dalle normative delle classi Euro 6c, 6d-temp e 6d.	17
Tabella 5: Efficienze di filtrazione della singola unità sferica.....	37
Tabella 6: Efficienze di filtrazione della singola unità fibra.....	38
Tabella 7: Efficienza di filtrazione del letto secondo l'opzione "Empirical_ erf".	39
Tabella 8 Specifiche tecniche DOC.....	42
Tabella 9: Specifiche tecniche DPF.....	43
Tabella 10: Sintesi delle restrizioni date dalle normative.....	48
Tabella 11 Verifica della fascia d'appartenenza.	48
Tabella 12: Specifiche tecniche SDPF	51
Tabella 13: Specifiche tecniche SDPF.	52
Tabella 14: Sintesi delle restrizioni date dalle normative.....	63
Tabella 15: Confronto dei risultati con i valori soglia della normativa EURO 5.	64
Tabella 16: Sintesi delle restrizioni date dalle normative.....	74
Tabella 17: Confronto dei risultati con i valori soglia della normativa EURO5.	74
Tabella 18: Specifiche tecniche EHC.....	76
Tabella 19: Sintesi delle restrizioni date dalle normative.....	88
Tabella 20: Confronto dei risultati con i valori soglia della normativa EURO 6b.	89
Tabella 21: Sintesi delle restrizioni date dalle normative.....	97

Tabella 22: Confronto dei risultati con i valori soglia della normative EURO 6b. 97
Tabella 23: Sintesi delle restrizioni date dalle normative..... 104
Tabella 24: Confronto dei risultati con i valori soglia della normative EURO 6b. 105
Tabella 25: Confronto tra i risultati dati dalle diverse leggi di regolazione di potenza..... 106
Tabella 26: Confronto delle emissioni tra il primo e il quinto ciclo NEDC. 112
Tabella 27: Sintesi dei risultati finali ottenuti. Risultati riferiti al ciclo di prova NEDC. 114

Bibliografia

- Axisuite user manual- Exothermia S.A.
- CFD Investigation of the Impact of Electrical Heating on the Light-off of a Diesel Oxidation Catalyst - Augusto Della Torre, Gianluca Montenegro, Angelo Onorati, and Tarcisio Cerri - Politecnico di Milano
- Motori a combustione interna – Giancarlo Ferrari
- Procedure and design of exhaust systems to fulfill all emission limits during real driving conditions – Stefan J. Ahlers, Rolf Bruck, Thomas Cartus, Holger Stock, Continental Automotive, Emitec, Oliver Maiwald, Continental Automotive, Powertrain
- Constitutional Issues of a Prohibition of Diesel Veichles – Professor Dr. Klaus Ferdinand Garditz, University of Bonn
- The technology of the new BMW 6-Cylinder Diesel Engine for the X4 M40d – Ing. Fritz Steinparzer, Dr. Peter Nefischer, Dipl.- Ing. Wolfgang Stutz, Dipl.- Ing. Detlef Hiemesch
- The Path to a Negligible NO_2 Immission Contribution from the Diesel Powertrain – Robert Bosh GmbH, Division Powertrain Solutions, Stuggart
- System Approach for a Vehicle with Gasoline Direct Injection and Particulate Filter for RDE – Continental Regensburg
- Implementing the Worldwide harmonised Light-duty vehicles Test Procedure (WLTP) in Europe – Legislation and pratical realization – Dipl.Ing Helge Schmidt, Dipl.Ing Gregor Zielonka
- Introduction to Heat Transfer - Incropera F., DeWitt D, Bergam T Lavine S
- Experimental procedures for efficient after treatment model calibration – Kalogirou, Shejbal, Koltsakis
- An assessment of the conventional cake filtration theory – Tien C. Bai R.

