



**Università degli studi di Roma
“Tor Vergata”**



**Corso di Dottorato in Ingegneria Ambientale
XXI ciclo**

**Ricerca e sviluppo di tecniche applicate
all’incenerimento di rifiuti:**

**CONVERSIONE ED OTTIMIZZAZIONE DI UN SISTEMA DENO_x A SERVIZIO
DI UN TERMOVALORIZZATORE PER RIFIUTI SANITARI**

Tutor

Prof. Ing. R. Gavasci

Candidato:

Ing. Domenico Desideri

Aprile 2010

INDICE

INTRODUZIONE	4
CAPITOLO I: OGGETTO E FINALITÀ DEL LAVORO	5
1.1 OBIETTIVI GENERALI	5
1.2 OBIETTIVI SPECIFICI	5
CAPITOLO II - METODOLOGIA GENERALE	6
CAPITOLO III: EVOLUZIONE NORMATIVA	7
CAPITOLO IV: EFFETTI DEGLI OSSIDI DI AZOTO	9
4.1 GENERALITÀ ED EFFETTI SULL'AMBIENTE DEGLI OSSIDI DI AZOTO	9
CAPITOLO V: DINAMICHE DI FORMAZIONE E SISTEMI DI ABBATTIMENTO DEGLI OSSIDI DI AZOTO	12
5.1 I PROCESSI DI FORMAZIONE DEGLI NO_x NELLE REAZIONI DI COMBUSTIONE	12
5.1.1 FORMAZIONE DEL BIOSSIDO DI AZOTO NO_2	16
5.2 I METODI DI ABBATTIMENTO DEGLI NO_x NEGLI IMPIANTI DI INCENERIMENTO DEI RIFIUTI	17
5.3 LO STATO DELL'ARTE – LE BAT	19
5.4 AZIONI PRIMARIE: IL CONTROLLO DEL PROCESSO DI COMBUSTIONE	19
5.4.1 COMBUSTIONE A STADI E RICOMBUSTIONE	20
5.4.2 RICIRCOLO DEI FUMI	21
5.4.3 RAFFREDDAMENTO DELLA FIAMMA	22
5.4.4 RIDUZIONE DELL'ARIA PRERISCALDATA E DELL'ECESSO D'ARIA	22
5.4.5 BRUCIATORI A BASSA EMISSIONE DI NO_x	23
5.5 AZIONI SECONDARIE: IL SISTEMA DI ABBATTIMENTO DEGLI NO_x	23
5.5.1 LA RIDUZIONE SELETTIVA DEGLI NO_x E IL SISTEMA DI ABBATTIMENTO NON CATALITICO (SNCR)	25
5.5.2 IL SISTEMA DI RIDUZIONE SELETTIVA CATALITICA (SCR)	30
5.6 IL REAGENTE AMMONIACALE RIDUCENTE	32
5.6.1 CARATTERISTICHE E PROBLEMATICHE DI SICUREZZA DELL'AMMONIACA ANIDRA E DELLA SOLUZIONE AMMONIACALE	33
5.7 LA SITUAZIONE IMPIANTISTICA IN ITALIA ED I SISTEMI DI TRATTAMENTO DeNO_x	36
CAPITOLO VI: L'IMPIANTO DI INCENERIMENTO AMA (ROMA)	39
6.1 DESCRIZIONE DEL PROCESSO	39
6.2 LE LINEE DI TERMODISTRUZIONE E IL SISTEMA DI RECUPERO ENERGETICO	43
6.3 IL SISTEMA DI ABBATTIMENTO DEGLI OSSIDI DI AZOTO.	50

6.4 IL SISTEMA DI ANALISI DEI FUMI IN USCITA AL CAMINO.	57
 CAPITOLO VII: SPERIMENTAZIONE E RISULTATI	 61
7.1 GENERALITÀ	61
7.2 SINTESI DELLE INNOVAZIONI INTRODOTTE NEL SISTEMA SPERIMENTALE	62
7.3 ESECUZIONE DELLE PROVE SPERIMENTALI	65
7.4 RISULTATI FASE 1 – CONFRONTO TRA NH_3 E NH_4OH	66
7.5 ANALISI DATI FASE 2 - ANALISI STATISTICA PER AMMONIACA LIQUIDA	69
7.5.1 <i>RISULTATI PER LO STADIO DI INIEZIONE 1 (ALTO)</i>	71
7.5.2 <i>RISULTATI PER LO STADIO DI INIEZIONE 2 (MEDIO)</i>	73
7.2.3 <i>RISULTATI PER LO STADIO DI INIEZIONE 3 (BASSO)</i>	74
7.2.4 <i>RISULTATI OTTENUTI NELLA FASE SPERIMENTALE 2</i>	75
7.6 RISULTATI DELLE PROVE DI ABBATTIMENTO DEGLI NO_x	79
7.7 SINTESI E CONCLUSIONI	99
 BIBLIOGRAFIA	 101
 APPENDICE 1:	 104
A1.1 RAPPRESENTAZIONI SIMULTANEE “CENTRAL COMPOSITE ROTABLE DESIGN” ADOTTATE NELLA FASE 1	104
TABELLA A1.1 FASE SPERIMENTALE 1 - AMMONIACA ANIDRA - TABELLA RIEPILOGO DATI	111
TABELLA A1.2 - FASE SPERIMENTALE 1 - AMMONIACA LIQUIDA - TABELLA RIEPILOGO DATI	112
 APPENDICE 2:	 113
METODOLOGIA STATISTICA DI INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI SPERIMENTALI ADOTTATA NELLA FASE 2	113
A2.1 IL METODO STATISTICO DI REGRESSIONE MULTIPLA	114
A2.2 LA PROCEDURA DELL’ELIMINAZIONE “BACKWARD”	118
A2.3 SVILUPPO DELL’ANALISI STATISTICA DEI RISULTATI	124
A2.4: FASE SPERIMENTALE 2 - DATA SET DELLE PROVE EFFETTUATE	132

Introduzione

La tecnologia impiantistica nel settore dell'incenerimento ha subito nel corso degli anni un continuo aggiornamento tecnologico promosso o reso cogente dall'evoluzione normativa sia di origine nazionale che conseguente al recepimento di normative europee.

Anche in maniera volontaria numerose aziende, industriali e non, hanno attuato o stanno adottando una serie di norme tecniche: Le norme ISO serie 14000. Queste norme rispecchiano, a livello internazionale le buone pratiche per la protezione dell'ambiente. Queste non danno prescrizioni di miglioramento della prestazione, ma indicano le modalità per gestire le attività in modo da perseguire gli obiettivi di prestazione autonomamente determinati.

Analoga spinta c'è stata nel settore della salute e sicurezza nei luoghi di lavoro nel quale oltre a delle prescrizioni minime normative il datore di lavoro determina, valutando i rischi dell'attività (obbligatoriamente già dal 1994), obiettivi di miglioramento dell'ambiente lavorativo secondo dei criteri e delle priorità che prevedono in primo luogo la sostituzione di ciò che è pericoloso con ciò che non lo è. Le naturali integrazioni ed interazioni tra il sistema ambientale e quello della sicurezza ha comportato spesso che aziende ed organizzazioni hanno costituito al loro interno delle unità che si occupano in maniera integrata di entrambi gli aspetti di "salute, sicurezza ed ambiente".

La ricerca applicata in generale ed in particolare nel settore dell'incenerimento non può pertanto prescindere da tali aspetti ma anzi deve averli come guida costante affinché i risultati ottenuti possano avere positivo, rapido ed efficace riscontro con potenziale applicazione anche pratica.

Lo studio condotto è stato effettuato proprio con tale obiettivo ed in questa ottica.

L'applicazione dei risultati ottenuti permetterà pertanto una migliore tutela di salute, sicurezza ed ambiente.

Capitolo I: oggetto e finalità del lavoro

1.1 Obiettivi generali

Oggetto del presente lavoro è stata la ricerca di soluzioni tecnologiche migliorative nel campo dell'incenerimento dei rifiuti in generale e potenzialmente adottabili su un impianto in esercizio di proprietà di AMA S.p.A. (Roma).

Gli obiettivi generali della ricerca hanno per finalità:

1. Miglioramento delle condizioni di salute e sicurezza dei lavoratori impiegati nel processo;
2. riduzione dei rischi per la popolazione;
3. riduzioni delle emissioni gassose;
4. Semplificazione ed alleggerimento degli oneri amministrativi.

Le suddette finalità debbono realizzarsi mantenendo per quanto possibile i costi attuali.

1.2 Obiettivi specifici

Sulla base degli obiettivi generali e dopo un'analisi preliminare sono emerse delle situazioni di potenziale miglioramento che sono state sottoposte al vaglio dell'azienda per verifica di effettiva consistenza e rispondenza ad esigenze oggettive. Di particolare rilievo ed interesse è risultato il sistema abbattimento degli ossidi di azoto. Tale sistema è stato a più riprese in passato oggetto di studi scientifici e sperimentali finalizzati alla verifica di efficienza ed all'ottimizzazione, rivelandosi adeguato a rispettare i limiti di legge ma mantenendo diversi elementi di potenziale miglioramento dal punto di vista complessivo della sicurezza.

Come obiettivi specifici prioritari sono stati pertanto individuati:

- verifica del sistema DeNOx attuale;
- ricognizione delle migliori tecnologie disponibili;
- verifica della possibilità di sostituzione del reagente utilizzato;
- progettazione ed implementazione di un sistema sperimentale alternativo;
- verifica in campo del sistema sperimentale;

- analisi dei dati ottenuti sul sistema sperimentale e confronto con il sistema esistente;

In caso di esito positivo della sperimentazione:

- trasferimento dei risultati sperimentali ottenuti tramite dimensionamento di massima del sistema sostitutivo.

Condizione importante è inoltre che il sistema di immissione adottato debba restare efficiente ed affidabile per periodi lunghi pur operando in un ambiente estremamente ostile per presenza di elevate temperature, polveri ed acidi.

Per la definizione degli obiettivi specifici è stata condotta un'analisi preliminare delle criticità presenti sulla base degli obiettivi generali.

Capitolo II - Metodologia generale

Per affrontare la problematica si è partiti dagli obiettivi generali ed è stata condotta in una prima parte teorica un'approfondita indagine bibliografica e documentale.

In particolare sono stati esaminati ed analizzati nello specifico:

- i dati delle emissioni registrati in continuo dalla strumentazione fissa installata per il monitoraggio delle emissioni al camino;
- i dati delle analisi estrattive effettuate da laboratori specializzati;
- i dati di studi specifici o sperimentali condotti sull'impianto nel corso degli anni;
- i rapporti ambientali annuali redatti dall'azienda a partire dal 2000;
- la documentazione relativa alla valutazione di impatto ambientale;
- le documentazioni ed gli atti autorizzativi esistenti;
- le raccomandazioni e prescrizioni degli organi autorizzativi, di vigilanza e controllo;
- la documentazione relativa alla richiesta di autorizzazione integrata ambientale;
- le documentazioni di valutazione dei rischi per la sicurezza e salute per i lavoratori delle società che si sono succedute nella gestione dell'impianto a partire dal 1996;
- le documentazioni di valutazione del rischio di incidente rilevante;

- normativa in materia ambientale in generale e sull'incenerimento in particolare;
- le normative in materia di prevenzione incendi ed apparecchiature a pressione;

La prima fase ha permesso di meglio inquadrare la situazione esistente in rapporto a quelle che è lo stato della ricerca e della conoscenza, nonché l'individuazione delle tecnologie disponibili, definendo nel dettaglio gli obiettivi specifici ed in particolare le modalità per il loro perseguimento.

Nella seconda parte sono state progettate le apparecchiature ed i sistemi necessari all'implementazione della fase sperimentale in campo e ne è stata curata la realizzazione ed installazione. A margine di questo sono state definite le modalità operative sia dell'apparato sperimentale che del termovalorizzatore in considerazione del contestuale esercizio dell'impianto.

Nella terza parte sono state condotte una serie di **prove sperimentali in 2 fasi successive**. A differenza di altre prove precedenti, si optato per l'utilizzo della strumentazione di analisi fissa d'impianto. L'esecuzione di prove delle prove è avvenuta in condizioni (temperature, ossigeno, carico termico, etc.) tipiche di esercizio e di NOx presente nella corrente gassosa comunque sempre inferiore ai limiti semiorari e preferibilmente inferiore anche ai limiti giornalieri. e raccolti i dati.

Nella quarta parte sono stati elaborati ed analizzati i dati raccolti.

Nella quinta ed ultima parte sono stati utilizzati i risultati sperimentali per il dimensionamento di massima del sistema sostitutivo.

Capitolo III: evoluzione normativa

Le tappe normative fondamentali partono dal 1982 quando con il D.P.R. 915 e con le disposizioni del Comitato Interministeriale del 27/07/1984, vengono stabilite le modalità tecniche d'incenerimento ed in particolare le caratteristiche e le modalità di esercizio della camera di post combustione.

Nel 1995 con il D.M. 16/01/1995 "Norme tecniche per il riutilizzo in un ciclo di combustione per la produzione di energia dai residui" vengono definite le condizioni di combustione di rifiuti e residui e le relative caratteristiche chimico-fisiche che questi dovevano possedere per poter essere utilizzati come fonte di energia.

Nel 1997 il DLgs 22/97, il cosiddetto "decreto Ronchi") richiede che l'incenerimento dei rifiuti deve essere accompagnato da una qualche forma di "recupero energetico" (sia esso di tipo termico, elettrico o entrambi)

Sempre nel 1997 il D.M. 503 del 19/11/97 – “Regolamento concernente la prevenzione dell'inquinamento atmosferico provocato dagli impianti d'incenerimento di RSU e rifiuti speciali non pericolosi” è' diventato norma di riferimento definendo per gli impianti per Rifiuti Solidi Urbani (RSU) e rifiuti speciali non pericolosi, gli inquinanti ed i limiti da rispettare nelle emissioni, oltre ai requisiti tecnici che devono presentare gli impianti adibiti al processo.

In questa norma sono stati identificati gli inquinanti principali e definiti intervalli temporali differenti ai quali riferire le misure delle emissioni (medie giornaliere e medie orarie).

Nel 2000 il D.M. 124/00 – “incenerimento di rifiuti speciali pericolosi” riprende il D.M. 503/97 con alcune modifiche. Richiede un innalzamento della temperatura da 850° a 1100° in presenza di sostanze organoalogenate superiori al 1%. Questa prescrizione nasce dalle necessità di assicurare cinetiche di reazione sufficienti a garantire una degradazione e/o non formazioni di microinquinanti quali PCDD e PCDF. Permette una riduzione dal 6% al 3% del tenore di ossigeno minimo in presenza di rifiuti polverizzati, liquidi o gassosi, relazionando la velocità di combustione alle caratteristiche fisiche in cui si presentano i rifiuti.

Nel 2006 è intervenuto il DLgs. N. 133 dell'11 maggio 2005 “Attuazione della direttiva 2000/76/CE, in materia di incenerimento dei rifiuti”.

Il decreto, oltre ad introdurre il concetto della Migliore Tecnologia Disponibile per la riduzione delle emissioni e degli odori, stabilisce una serie di obblighi ulteriori che riguardano i vari aspetti:

- Aspetti progettuali e gestionali
 - o Adozione delle Migliori Tecnologie Disponibili;
 - o nuove disposizioni in caso di malfunzionamento ed accertamento del rispetto delle prescrizioni per i nuovi impianti (o soggetti a modifica sostanziale);
- Aspetti riguardanti il monitoraggio delle emissioni in atmosfera
 - o Modifiche al software dello Sistema Monitoraggio Emissioni e nuove procedure di calcolo;
 - o Ulteriori analisi degli inquinanti per via estrattiva.

- Divieto di “trasferimento” dell’inquinamento dall’aria all’acqua e monitoraggio delle emissioni in acqua
 - o Misure con strumentazioni in continuo
 - o Misure giornaliere;
 - o Misure mensili di laboratorio

Essendo tale norma specifica in materia d’incenerimento, risulta prevalente, per gli aspetti trattati, anche rispetto al successivo “testo unico” ovvero il Decreto Legislativo 3 aprile 2006, n. 152 "Norme in materia ambientale".

Non ultime sono intervenute le norme in materia di IPPC.

L'IPPC (Integrated Pollution Prevention and Control) è una strategia, comune a tutta l’Unione Europea, per aumentare le “prestazioni ambientali” dei complessi industriali soggetti ad autorizzazione.

Con il D.Lgs. 18/02/2005 n. 59 avente per oggetto la prevenzione e la riduzione integrate dell’inquinamento (I.P.P.C.- Integrated Pollution Prevention and Control) al fine di ottenere un elevato livello di protezione dell’ambiente, è stata recepita ed introdotta tale strategia anche in Italia

Il Decreto stabilisce misure intese ad evitare oppure, ove ciò non sia possibile, a ridurre le emissioni nell’aria, nell’acqua e nel suolo, da parte di diverse attività industriali ed in particolare di quelle di gestione dei rifiuti.

Da questa rapida e sintetica “cronistoria normativa” si evince chiaramente una chiara tendenza verso un’attenzione sempre maggiore e più puntuale verso la gestione dei rifiuti ed in particolare per il trattamento termico.

Parallelamente si è assistito ad un’evoluzione normativa nel settore della tutela della sicurezza e della salute dei lavoratori.

Capitolo IV: effetti degli ossidi di azoto

4.1 Generalità ed effetti sull’ambiente degli ossidi di azoto

Tra gli inquinanti principali generati in un processo di termodistruzione dei rifiuti merita una menzione speciale la famiglia di composti gassosi derivante

dall'ossidazione termica dell'azoto molecolare, e che viene usualmente indicata con la dizione generica di *ossidi di azoto*, o NO_x . Tali composti, tanto a causa delle elevate concentrazioni prodotte (dell'ordine di centinaia di mg/Nm^3), quanto soprattutto a causa della riconosciuta partecipazione attiva nei fenomeni di degrado ambientale, costituiscono, allo stato attuale, una delle preoccupazioni maggiori nella gestione di un impianto di incenerimento, e richiedono attenzioni specifiche e puntuali, al fine di evitarne la dispersione nell'atmosfera circostante e la grave contaminazione dei comparti ambientali in genere.

Il termine NO_x sta in realtà ad indicare un'ampia miscela di molecole composte da azoto e ossigeno, le cui forme principali sono tuttavia rappresentate dal *monossido d'azoto* (o *ossido nitroso* NO) e dal *biossido di azoto* (o *ossido nitrico* NO_2). Nei processi di combustione ad alta temperatura, è soprattutto la prima specie a venire generata (quasi il 95% del totale degli NO_x emessi); tale composto, tuttavia, a causa della sua elevata instabilità, è prontamente ossidato in atmosfera ad opera dell'ossigeno e soprattutto dell'ozono, e si trasforma rapidamente in biossido di azoto, il quale deve essere dunque più correttamente considerato un inquinante secondario. Sebbene i due composti abbiano caratteristiche di reattività estremamente differenti (la specie monossido è notevolmente meno tossica e pericolosa del biossido), a causa del loro diretto legame e della precaria stabilità dell' NO risulta difficile ipotizzare un destino separato delle due specie in atmosfera, sicché nei fenomeni di inquinamento si fa spesso riferimento agli effetti nocivi provocati dalla forma più pericolosa, il biossido d'azoto.

Il *biossido di azoto* è un gas tossico di colore giallo-rosso, dall'odore forte e pungente e con grande potere irritante; è un energico ossidante, estremamente reattivo e quindi altamente corrosivo. Esiste nelle due forme N_2O_4 (forma *dimera*) e NO_2 , che si forma per dissociazione delle molecole dimere. Le preoccupazioni circa la diffusione di tale specie in atmosfera sono principalmente legate al ruolo di primo piano che essa svolge nei fenomeni di *smog fotochimico*, ossia quei processi di inquinamento atmosferico, tipici delle aree maggiormente urbanizzate, che sono indotti naturalmente della radiazione ultravioletta dei raggi solari, e che coinvolgono un'ampia varietà di composti. La presenza di elevate concentrazioni di NO_2 , infatti, altera il naturale equilibrio dinamico del cosiddetto ciclo *fotostazionario dell'ozono troposferico*, il quale normalmente auto-limita le concentrazioni di O_3 e NO_2 presenti, sicché la quantità complessiva di questi due composti negli strati inferiori

dell'atmosfera aumenta sensibilmente. In presenza di opportune condizioni di irraggiamento solare, e di elevate temperature dell'aria necessarie all'attivazione delle reazioni, l' NO_2 e O_3 presenti, in quanto specie estremamente reattive, ossidano rapidamente i *composti organici volatili* (VOC), sostanze estremamente volatili che si trovano in elevate concentrazioni nelle atmosfere dei grandi centri urbani, a causa dei processi di combustione incompleta dei combustibili fossili (soprattutto per quanto riguarda il traffico veicolare), e all'evaporazione di solventi e carburanti in genere. La combinazione tra l' NO_2 e O_3 e i VOC, catalizzata dalla luce solare, dà origine ad una gran quantità di inquinanti secondari (quali aldeidi, chetoni, perossiacetilnitrati e perossibenzoilnitrati), i quali risultano tossici per la salute umana e la vita animale e vegetale, nonché in grado di degradare parecchi materiali a causa dell'elevato potere ossidante. Le elevate concentrazioni di questi composti sono responsabili della formazione di foschie facilmente riconoscibili, di colore variabile dal giallo-arancio al marroncino (soprattutto ad opera del biossido, che è giallo-rosso, e del *soot*, miscela di particolati carboniosi, che è più scuro), le quali avvolgono l'area fortemente urbanizzata provocando una diminuzione della visibilità, un aumento della temperatura al suolo e una sensibile modifica delle condizioni microclimatiche dell'area (a causa dell'azione serra nei confronti dei raggi solari), e un pericolo per la salute dei soggetti più deboli, come anziani, bambini e sofferenti di problemi alle vie respiratorie. Il fenomeno dello smog fotochimico è particolarmente preoccupante in condizioni di inversione termica degli strati inferiori dell'atmosfera (come normalmente si verifica al tramonto), in cui la dispersione verticale degli inquinanti e il rimescolamento dell'atmosfera è inibito dalle condizioni di forte stabilità atmosferica, e in presenza di particolare configurazioni topografiche, soprattutto per aree situate in valli circondate da barriere orografiche naturali. Viceversa, tale processo ha rapidamente termine nelle ore notturne, in cui è assente la necessaria luce solare, e al venir meno della causa della produzione degli NO_x , i quali costituiscono i precursori delle reazioni di ossidazione. La presenza di ossidi di azoto in atmosfera, inoltre, contribuisce all'*acidificazione* della stessa (sebbene in misura secondaria rispetto agli ossidi di zolfo), e alla formazione di *deposizioni acide* (in forma secca, umida e occulta) le quali aggrediscono i terreni dilavando elementi nutritivi (quali calcio, magnesio, sodio e potassio), solubilizzando ioni metallici tossici, e compromettendo, a causa dell'abbassamento del pH, molti processi microbici e biotici, anche negli ambienti

acquatici. Le deposizioni acide, infine, esercitano una forte corrosione dei materiali costruttivi, provocando l'invecchiamento precoce e il danneggiamento irreversibile di edifici e monumenti.

Per quanto riguarda gli effetti diretti sulla salute umana, infine, l'azione irritante del biossido d'azoto sulle mucose contribuisce all'insorgenza di alterazioni anche gravi delle funzioni respiratorie (come bronchiti croniche, asma ed enfisemi polmonari), e anche a basse concentrazioni, per lunghi periodi di esposizione, può provocare il drastico abbassamento delle difese polmonari, con conseguente aumento del rischio di affezioni alle vie respiratorie.

Le molteplici apprensioni appena esposte legate alla dispersione in atmosfera degli NO_x impongono l'adozione di speciali provvedimenti e tecnologie, volte tanto alla prevenzione nella formazione degli stessi (minimizzando le condizioni favorevoli alla loro generazione), quanto alla rimozione e all'abbattimento delle quantità comunque formatesi, al fine di limitare l'impatto dei processi adottati sui diversi comparti ambientali. È evidente che la predisposizione di tali misure non possa prescindere dalla conoscenza delle dinamiche di generazione degli NO_x e dei fattori che ne influenzano maggiormente la presenza o meno, i quali saranno esposti sinteticamente nei paragrafi che seguono.

Capitolo V: Dinamiche di formazione e sistemi di abbattimento degli ossidi di azoto

5.1 I processi di formazione degli NO_x nelle reazioni di combustione

La principale fonte di natura antropica di ossidi di azoto è rappresentata dai processi di combustione convenzionali, qualunque sia la scala e il combustibile usato, in cui l'ossigeno comburente è addotto in forma di aria. Tale complesso di reazioni, infatti, offre le condizioni favorevoli per la generazione di una discreta quantità di NO_x , dal momento che la formazione di questo composto è governata, essenzialmente, dalla presenza di *ossigeno* per un certo tempo a temperature di processo elevate. Più nello specifico, i meccanismi di formazione degli ossidi di azoto in un processo di combustione possono essere classificati secondo 3 categorie:

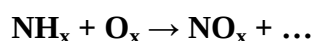
- gli NO_x di *conversione* (o “*fuel NO_x*”), i quali originano dall’ossidazione termica dell’azoto naturalmente contenuto nel combustibile, in forma di composti azotati;
- gli NO_x *termici* (o “*thermal NO_x*”), i quali vengono invece prodotti dall’ossidazione dell’azoto contenuto nell’aria comburente (in percentuale volumetrica, come è noto, di circa il 78%), in forma di azoto molecolare inerte;
- gli NO_x *veloci* (o “*prompt NO_x*”), i quali si formano nella regione confinata in prossimità della fiamma, dove sono presenti le temperature più elevate, per ossidazione rapida dell’azoto inerte, ad opera di alcune specie radicali derivanti dal combustibile.

Quest’ultimo meccanismo dà luogo alla produzione di quantitativi di NO_x relativamente esigue rispetto agli altri due, soprattutto alle elevate temperature, ed è apprezzabile, in special modo, nella combustione di idrocarburi convenzionali. Tali composti, infatti, nel corso delle reazioni di combustione liberano una gran quantità di specie radicali (soprattutto $\text{CH}^\bullet$ e $\text{C}^\bullet$), le quali reagiscono velocemente con l’azoto molecolare per formare *ammine* e *cianocomposti*, successivamente ossidate a NO con meccanismi analoghi a quello di conversione. La presenza di tali specie è meno sensibile nel caso dei rifiuti, sicché il meccanismo “prompt” può considerarsi, con buona approssimazione, un processo secondario.

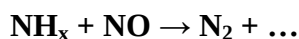
Nella combustione di un materiale meno reattivo come il *rifiuto*, invece, i meccanismi predominanti di generazione degli ossidi di azoto sono costituiti dalla conversione e del processo termico. Gli ossidi di azoto da *conversione* derivano dall’ossidazione dell’azoto presente nel materiale combusto. Nel caso del rifiuto solido urbano, il contenuto di azoto di partenza è difficilmente inquadrabile, dal momento che esso varia notevolmente a seconda della composizione, della provenienza, e del periodo dell’anno. Normalmente, il contenuto di azoto nei RSU oscilla attorno al valore di 0,5% in peso, ed è dovuto principalmente all’elevato contenuto di azoto organico presente negli scarti alimentari e nei rifiuti verdi. Liquami di natura organica o sfalci di erba verde possono infatti arrivare a contenere una percentuale in peso di azoto molto maggiore, fino al 7% su base secca. Rifiuti industriali, chimici, o fanghi di depurazione, presentano un contenuto di azoto organico notevolmente variabile a seconda del materiale trattato, ma generalmente superiore (anche di molto) rispetto al quantitativo offerto dai RSU. Gli

ossidi di conversione si formano a temperature relativamente basse, in confronto agli NO_x di natura termica. La ragione di tale fenomeno è da ricercarsi nelle minori energie di legame che competono all'azoto nei composti organici dei rifiuti, le quali devono essere vinte dall'energia complessivamente fornita dalle reazioni. La conversione in ossidi dell'azoto organico presente nel combustibile inizia con una rapida e quasi completa trasformazione dei composti azotati in prodotti intermedi, principalmente costituiti da *acido cianidrico* (HCN), il quale rappresenta il principale prodotto quando l'azoto è presente nel combustibile legato ad anelli aromatici, ed *ammoniaca* (NH_3), la quale è il principale prodotto quando l'azoto è invece presente in forma di ammine organiche. Tali prodotti sono successivamente ossidati in monossido d'azoto dall'ossigeno alle alte temperature. In verità, non tutto l'azoto organico contenuto nel combustibile è ossidato a NO. Ciò avviene perchè la specie radicale NH_x , derivante dalla distruzione intermedia di HCN e NH_3 , prende parte ad un equilibrio chimico dinamico, che regola la concentrazione finale di NO_x secondo 2 reazioni in competizione:

- o l'ossidazione dei radicali NH_x con i radicali di ossigeno ($\text{O}\bullet$), principalmente, e $\text{OH}\bullet$, per formare NO, prevalente alle temperature più elevate:



- o la riduzione dell'NO a N_2 ad opera degli stessi radicali NH_x , prevalente alle temperature più basse:



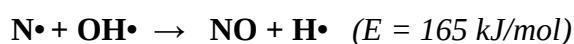
In definitiva, il grado di conversione dell'azoto organico presente nei rifiuti risulta dipendente sia dal quantitativo effettivamente contenuto nei materiali di partenza (aumentando all'aumentare di questo), sia dall'eccesso d'aria fornito, aumentando all'aumentare di questo, data la maggiore disponibilità di radicali ossigeno e $\text{OH}\bullet$.

Il principale meccanismo di formazione degli NO_x da combustione è tuttavia rappresentato dalla via *termica*. In tale dinamica, l'azoto molecolare abbondantemente presente nell'aria comburente è ossidato dall'ossigeno in corrispondenze delle elevate

temperature di combustione, le quali forniscono le energia cinetiche necessarie per la rottura dei forti legami covalenti (di tipo triplo) tra le 2 molecole di azoto che costituiscono la forma molecolare stabile N_2 . La formazione termica di ossido d'azoto a partire dalla specie inerte dipende dalla concentrazione di quest'ultima, ovviamente, ma anche dalla presenza di ossigeno e dalle elevate temperature, nonché dal tempo di permanenza disponibile alla reazione, secondo la relazione:

$$[NO] = A \times e^{\left(\frac{-E}{RT}\right)} \times [N_2] \times [O_2]^{1/2} \times t$$

in cui A è una costante cinetica di reazione (detta costante di *Arrhenius*), E è l'energia di attivazione necessaria ad innescare la reazione, R è la costante universale dei gas, T la temperatura di processo e t il tempo di permanenza. Come si vede, fissato un tempo di permanenza e note le costanti di reazione, la concentrazione di NO generata aumenta all'aumentare dell'ossigeno e, soprattutto, della temperatura. Ciò significa che le miscele combustibile/comburente che lavorano con sostenuti eccessi d'aria ed elevate temperature sono maggiormente responsabili della produzione di elevate quantità di ossidi d'azoto, mentre le miscele “ricche”, ossia con elevato tenore di combustibile e basso eccesso d'aria, danno luogo ad emissioni ridotte di NO, a causa delle limitate concentrazioni di ossigeno in camera di combustione (ma, parallelamente, a elevate emissioni di incombusti e monossido di carbonio, a causa di combustione incompleta). Più nello specifico, il meccanismo di ossidazione termica dell' N_2 si sviluppa secondo un complesso di reazioni chimiche, studiate per la prima volta dallo scienziato russo Zeldovich nel 1946, e successivamente integrate da studi posteriori. L'insieme delle reazioni, oggi universalmente accettate, prende il nome anglosassone di “*extended Zeldovich mechanism*”, e comprende le seguenti relazioni:



Tali reazioni coinvolgono dunque i radicali ossidrilici $OH\bullet$ e di ossigeno $O\bullet$, i quali, come si è visto, giocano un ruolo importante anche nella conduzione dei processi di

combustione stessa. Data la minore velocità di reazione della generazione di NO rispetto all'ossidazione del combustibile nel processo di combustione, tuttavia, il modello di Zeldovich risulta definito solo nell'approssimazione (nella realtà alquanto presuntuosa) in cui il processo di formazione di NO possa essere considerato separatamente rispetto al processo di combustione. Tale semplificazione, tuttavia, dà luogo a scostamenti accettabili tra il modello analitico e la situazione effettiva, che si appianano ulteriormente all'aumentare della temperatura.

A titolo riassuntivo, il grafico seguente illustra in sintesi i meccanismi di formazione appena descritti, e la loro dipendenza dalla temperatura:

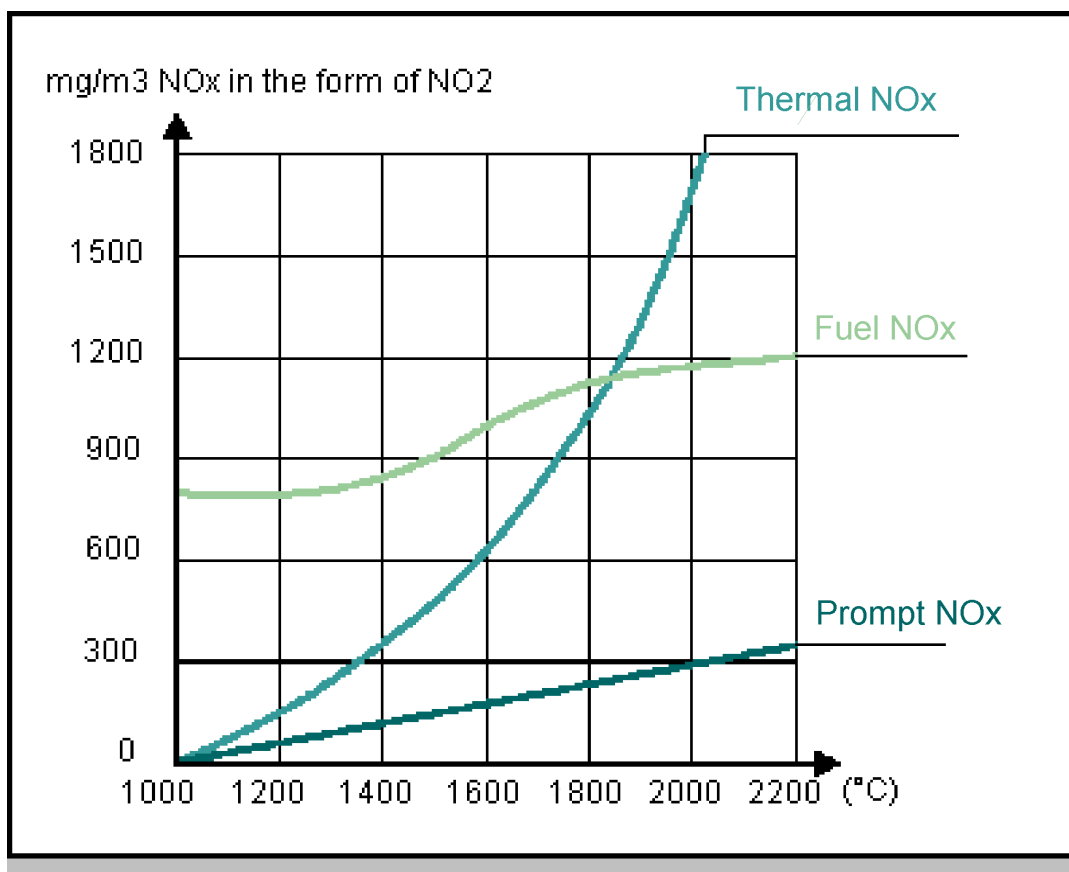


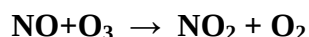
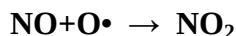
Figura 4.1: meccanismi di generazione degli NO_x [VERBUNDGESELLSCHAFT, 1996]

5.1.1 Formazione del biossido di azoto NO₂

Nel processo di combustione, si è detto, la specie di ossidi principale è costituita dall'NO, presente in concentrazione superiore al 90% in peso degli ossidi di azoto totali. Viceversa, la percentuale in peso di *biossido d'azoto* (NO₂) nei gas di combustione raramente supera il 5-10% degli NO_x totali emessi dal processo, se non per particolari

applicazioni (come alcune turbine a gas). Ciò è dovuto al fatto che, alle elevate temperature di combustione, la specie NO_2 risulta particolarmente instabile, e tende ad essere rapidamente ridissociato in NO e O_2 con reazione inversa a quella di formazione. In presenza delle numerose specie radicali liberate dal combustibile, inoltre, tale composto reagisce velocemente, perdendo un atomo di ossigeno e tornando nella forma di monossido. Affinché una significativa frazione di NO_2 persista nei fumi di combustione, è necessario che essi subiscano un rapido raffreddamento dalle temperature di fiamma (come può aver luogo in fiamme particolarmente turbolente), ma tale condizione è ovviamente contrastata negli impianti inceneritori, al fine di minimizzare l'emissione di numerose specie incombuste.

Il meccanismo principale di formazione dell' NO_2 rimane, si è detto, l'ossidazione atmosferica dell' NO emesso al camino. Diversamente a quanto accade in camera di combustione, infatti, alle basse temperature atmosferiche la specie NO risulta notevolmente instabile, e subisce l'azione ossidante dei radicali dell'ossigeno e soprattutto dell'ozono, che la trasformano rapidamente in biossido di azoto (stabile alle basse temperature), secondo le reazioni:



La presenza prevalente in atmosfera del biossido e la sua riconosciuta azione nociva sui comparti ambientali e sulla salute umana giustificano l'assunzione delle sue caratteristiche come riassuntive dell'intera famiglia degli NO_x , tant'è che la concentrazione di quest'ultimi è usualmente espressa in termini di NO_2 equivalenti:

$$[\text{NO}_x] = [\text{NO}_2] + \frac{[\text{NO}]}{PM_{\text{NO}}} \times PM_{\text{NO}_2}$$

5.2 I metodi di abbattimento degli NO_x negli impianti di incenerimento dei rifiuti

L'accresciuta conoscenza del significativo contributo reso dagli ossidi di azoto ai fenomeni di degrado ambientale ha messo in luce l'esigenza di operare un controllo sempre più oculato sulla liberazione di questi composti, che, in termini pratici, si è tradotto nell'imposizione di limiti normativi di emissione via via più severi. L'abbassamento dei limiti di emissione, recentemente avvenuto con la Direttiva comunitaria 2000/76/CE, recepita in Italia dal già citato D.Lgs 133/2005, e fissato ad un valore sulla media giornaliera di **200 mg/Nm³**, è stato inoltre reso possibile dal progressivo miglioramento delle *tecniche di prevenzione e di abbattimento* di tali inquinanti, che, allo stato attuale, offrono garanzie abbastanza ampie nel contenimento delle concentrazioni liberate in atmosfera. D'altra parte occorre sottolineare che, a differenza di quanto accade per altri composti (come i gas acidi), la produzione relativamente ridotta di NO_x (generalmente in concentrazioni medie orarie attorno ai 400-600 mg/Nm³) assicura una maggiore serenità nel raggiungimento dei limiti imposti, e richiede sistemi e tecniche di abbattimento meno severi e delicati, in cui sono ammessi livelli di efficienza minori.

Il controllo delle emissioni di ossidi di azoto è in realtà raggiungibile mediante la combinazione di due possibili strategie. In primo luogo, come già accade per i composti organici e gli incombusti, risulta particolarmente vantaggioso adottare opportune misure di *prevenzione* della formazione degli NO_x all'origine, ossia quelle *azioni primarie* che consentono di contrastare la generazione di tali inquinanti attraverso la minimizzazione, durante le fasi di processo, delle condizioni favorevoli per la loro creazione. Come è facile immaginare, tale approccio consente di affrontare il problema direttamente alla fonte, con evidente risparmio nei successivi processi di abbattimento e semplificazione dei sistemi di trattamento dell'impianto. Tale azione si esplica tanto nel controllo dei parametri di combustione, quanto nell'adozione di particolari accorgimenti per ridurre la contemporanea presenza di elevate quantità di ossigeno e delle alte temperature (particolarmente favorevoli alla formazione di NO_x). In alcuni casi, può essere così efficace da non richiedere ulteriori sistemi di rimozione per il raggiungimento dei limiti imposti. In secondo luogo, laddove le azioni preventive non siano sufficienti al raggiungimento degli obiettivi di rimozione, l'abbattimento degli NO_x è affidato ad appositi *sistemi di trattamento secondari*, i quali provvedono, attraverso processi di tipo chimico, all'eliminazione delle concentrazioni in eccesso comunque formatesi. Tali sistemi, sebbene comportino maggiori costi e complicazioni nella gestione

dell'impianto, si rendono tuttavia necessari in gran parte dei casi a garanzia del rispetto dei limiti e di un impatto ambientale limitato.

5.3 Lo stato dell'arte – le BAT

Nel 2006 l'European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau ha pubblicato il "Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration".
http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/brefdownload/download_WI.cfm

In tale documento di 638 pagine sono sintetizzate le migliori tecnologie disponibili a livello mondiale ed in particolare in Europa per l'incenerimento dei rifiuti.

5.4 Azioni primarie: il controllo del processo di combustione

Con il termine di *azioni primarie* per il controllo di NO_x si intende l'insieme delle tecnologie e delle modalità operative che consentono di prevenire la formazione degli NO_x, attraverso opportune modifiche del processo di combustione o regolazioni dell'equipaggiamento di sistema della combustione, le quali consentono di minimizzare le condizioni favorevoli alla formazione degli ossidi. In particolare, dal momento che le dinamiche di formazione dell'NO (sia termico che di conversione) sono influenzate fortemente dai parametri di combustione della *temperatura* e dell'*ossigeno* presente, le azioni preventive operano essenzialmente secondo due principi:

- la riduzione delle *temperature* massime di fiamma e del tempo di permanenza nelle regioni ad elevate temperature;
- la regolazione opportuna dell'eccesso d'aria per ridurre il tenore di *ossigeno* nelle zone di combustione.

In linea di principio, il controllo preventivo potrebbe esplicitarsi anche nella separazione a monte, dal complesso dei materiali da trattare, dei composti con maggiore tenore d'azoto. Tale soluzione, tuttavia, è generalmente non adottata nel trattamento dei rifiuti, se non in casi speciali, a causa della difficoltà nella determinazione del contenuto di azoto nei materiali, e nella separazione di frazioni eterogenee in arrivo all'impianto.

Di seguito è presentato un quadro riassuntivo delle azioni preventive maggiormente adottate.

5.4.1 Combustione a stadi e ricombustione

Il metodo della *combustione a stadi* è ampiamente utilizzato in numerose applicazioni industriali, e rappresenta una tecnologia sufficientemente matura ed affidabile per il controllo non solo degli ossidi di azoto, ma anche degli incombusti organici e del CO. Il principio del metodo consiste nella creazione, all'interno del forno di combustione, di zone di processo operanti a condizioni di temperature e ossigeno diverse, in modo da minimizzare la permanenza dei composti all'elevate temperature e ad elevati eccessi d'aria. Più nello specifico, nella prima parte del forno viene adottata l'aliquota maggiore di combustibile da bruciare, a cui viene fornito un limitato eccesso d'aria, prossimo allo stechiometrico, sicché la combustione avviene in condizioni di miscela ricca, ad elevate temperature ma limitata disponibilità di ossigeno. In queste condizioni, la formazione di NO è parzialmente inibita dalla ridotta disponibilità di O₂; l'esistenza di zone con aria inferiore alla richiesta stechiometrica, inoltre, consente la creazione di una sezione riducente, che favorisce la reazione di riduzione del radicale NH_x in N₂, piuttosto che in NO. In questa prima parte, tuttavia, la combustione non può considerarsi completa, sicché si rende necessaria l'adozione di un secondo stadio di combustione, in cui viene fornito un eccesso di aria secondaria per completare le reazioni di mineralizzazione della CO e degli altri incombusti organici. L'immissione di aria secondaria ha l'effetto di abbassare le temperature di processo, sicché anche in questo stadio, nonostante l'elevata disponibilità di ossigeno, la formazione degli NO_x è parzialmente contrastata dalla progressiva diminuzione della temperatura. La presenza di specie incombuste e radicali particolarmente reattivi, inoltre, fa sì che l'ossigeno reagisca prevalentemente con queste, piuttosto che con l'azoto molecolare.

Il principio della combustione appena descritto (che prende il nome di “*combustione a due stadi*”) può essere applicato su scala industriale con l'adozione di forni a più livelli di combustione (dotati di appositi *calcinatori*) o, più frequentemente, con un sistema multibruciatore, in cui i primi bruciatori operano in condizioni di miscela ricca (ossia con difetto d'aria), mentre i successivi in condizioni di miscela povera, cioè con eccesso d'aria. Negli impianti di incenerimento dei rifiuti, la tecnica maggiormente usata, come accennato, è costituita dall'immissione di aria secondaria in prossimità dell'uscita della camera di combustione (o, come nei tamburi rotanti, adottando una camera di post-

combustione), a mezzo di bruciatori fuori servizio usati per ventilare aria. Nei forni a griglia, inoltre, l'utilizzo di motori di tipo inverter asserviti alle giranti di ventilazione consente di modulare l'aria primaria al di sotto delle griglie, in modo da intervenire anche in tempo reale sui parametri di combustione. In alcuni casi, la combustione può essere operata in 3 stadi, qualora l'immissione di aria secondaria abbassi di troppo le temperature di processo, interrompendo le reazioni di combustione. In questa tipologia, che prende il nome di *ricombustione* (o *reburning*), nel secondo stadio è aggiunta una piccola aliquota di combustibile ausiliario (spesso costituito da metano, per la sua maggiore reattività e rapida capacità di miscelamento) che aiuta l'auto-sostentamento della combustione, e successivamente immessa aria terziaria per il completamento delle reazioni e il raffreddamento della miscela, che può essere usata anche per lambire le pareti della camera di combustione e raffreddare i materiali costruttivi. Tale tecnica deve comunque fare i conti con l'utilizzo di un combustibile ausiliario, e con i costi per il suo approvvigionamento e gestione.

5.4.2 Ricircolo dei fumi

Al posto dell'immissione di aria aspirata dall'esterno, per ossigenare la miscela in camera di combustione è possibile operare un *ricircolo dei fumi* provenienti dalla zona di scambio termico nel forno stesso. Tali fumi, infatti, contengono ancora una significativa frazione di ossigeno (non inferiore, per legge, al 6% in volume) che può essere utilizzata in luogo dell'aria tal quale, in modo da ridurre, contemporaneamente, i volumi di O_2 addotti (poiché nell'aria esso è presente al 21%), e soprattutto di N_2 inerte, che altrimenti sarebbe immesso in gran quantità, in qualità di componente principale dell'aria atmosferica (circa il 78%). In tale maniera, si consegue il duplice vantaggio nella riduzione degli NO_x di conversione, per effetto nella minore presenza di ossigeno, e soprattutto degli NO_x di natura termica, per effetto della diminuzione del tenore d'azoto nel comburente. Incidentalmente, il ricircolo dei fumi consente il completamento delle reazioni di combustione e mineralizzazione dei composti incompleti. Tale tecnica costituisce, si è visto, il principio di funzionamento della configurazione a letto fluido ricircolato, che non a caso restituisce prestazioni di abbattimento migliori ed emissioni di inquinanti più basse, ma può essere applicata con efficacia anche alle altre tecnologie, soprattutto nei forni a griglia. I fumi di combustione possono essere immessi in camera di combustione tal quali, o premiscelati

con aria di combustione per il controllo del processo. Solitamente, i migliori risultati di abbattimento sono ottenuti per immissioni dei fumi direttamente nella zona di fiamma. L'efficienza nella riduzione degli NO_x varia notevolmente a seconda dei quantitativi di fumi ricircolati e della percentuale di ossigeno in essi contenuta. Negli impianti a gas naturale, in cui è ampiamente praticata, il ricircolo del solo 10% dei fumi comporta una diminuzione pari al 60% degli NO_x emessi. Tale metodo, inoltre, ha il pregio di non mortificare l'efficienza termica e di conversione energetica degli impianti.

5.4.3 Raffreddamento della fiamma

L'abbassamento della temperatura in camera di combustione può essere conseguito aggiungendo *acqua* al combustibile o direttamente nella zona di fiamma. Ciò comporta, inoltre, la liberazione di una maggiore quantità di radicali idrossilici, i quali si combinano rapidamente con il radicale NH_x di conversione per restituire N_2 inerte. La riduzione dell' NO , dunque, avviene tanto per diminuzione degli NO_x termici (per raffreddamento della fiamma) tanto di quelli di conversione, e può raggiungere efficienze del 40%. Di contro, l'aggiunta di acqua richiede l'adduzione di ulteriore calore per la sua evaporazione, con minore rese nel bilancio energetico e maggiore spesa nell'uso di combustibile (e conseguente aumento della CO_2 in uscita)

5.4.4 Riduzione dell'aria preriscaldata e dell'eccesso d'aria

Il *preriscaldamento dell'aria* di combustione comporta un innalzamento delle temperature di processo, e una conseguente maggior produzione di NO_x termici. La diminuzione del riscaldamento di tale aria, dunque, produce un abbassamento di temperatura e uno scadimento delle dinamiche di formazione degli ossidi. Tale metodo trova tuttavia scarsa applicazione nell'incenerimento dei rifiuti (se non in rari casi), dal momento che il riscaldamento dell'aria si rende necessario per mantenere le condizioni di combustione, minacciate dal potere calorifico non elevato del rifiuto.

Allo stesso modo, anche l'utilizzo di *bassi eccessi d'aria*, usati in molte applicazioni industriali per inibire la formazione di NO_x termici, è scarsamente praticabile nelle tecnologie di incenerimento dei rifiuti (specialmente nella tecnologia a tamburo rotante), dal momento che, anche a causa della minore qualità del materiale combustibile, ha come conseguenza indesiderata la maggiore emissione di monossido di carbonio e incombusti organici. Risultati più incoraggianti si possono ottenere con la

configurazione a letto fluido, dal momento che il miglior livello di miscelamento combustibile/comburente e il ricircolo dei fumi nella soluzione ricircolata consentono di operare con quantitativi d'aria sensibilmente più basse.

5.4.5 Bruciatori a bassa emissione di NO_x

Oltre che dalla temperatura e dalla concentrazione di ossigeno, la formazione degli ossidi di azoto in camera di combustione risulta fortemente influenzata da numerose variabili di processo, quali la velocità di immissione del combustibile e dell'aria, la turbolenza e la rotazione della corrente comburente, il grado di pezzatura e nebulizzazione del combustibile, la forma e la posizione dell'ugello bruciatore. Tali variabili, riconducibili, in ultima istanza, al *sistema di bruciatori* in dotazione all'impianto e alle loro caratteristiche di funzionamento, possono essere dunque in parte manipolate attraverso modifiche all'equipaggiamento del sistema di combustione. Recentemente sono stati infatti introdotti particolare modelli di bruciatori, detti *a bassa produzione di NO_x* , i quali sono progettati in modo da ridurre in maniera sostanziale il verificarsi delle condizioni favorevoli alla formazione degli ossidi. In particolare, tali bruciatori producono fiamme relativamente “fredde” attraverso una sorta di ricircolazione dei prodotti di combustione in prossimità della fiamma. Le lunghe fiamme diffusive generate in luogo delle classiche turbolente, inoltre, riducono la miscelazione turbolenta con l'ossigeno, garantendo emissioni più basse di NO sia per via termica che di conversione.

L'utilizzo di bruciatori a bassa emissione di NO_x è tuttavia limitata nelle applicazioni di incenerimento dei rifiuti, dal momento che il materiale da trattare si presenta generalmente in forma solida di media e grande pezzatura, e i bruciatori hanno funzione esclusivamente ausiliaria.

5.5 Azioni secondarie: il sistema di abbattimento degli NO_x

L'adozione delle misure preventive appena descritte e del controllo dei parametri di combustione, sebbene contribuisca in maniera preziosa alla diminuzione degli NO_x prodotti, difficilmente assicura sempre il raggiungimento delle concentrazioni in uscita prescritte dalla normativa.

La limitata efficienza di rimozione di tali azioni impone la necessaria predisposizione in impianto di un opportuno apparato di trattamento dei fumi, adibito alla distruzione degli

inquinanti comunque formatesi, che prende il nome generico di *sistema di abbattimento degli ossidi di azoto*. Tali sistemi, posti a valle della zona di combustione, beneficiano di una tecnologia matura ed affidabile che, a seconda delle occasioni e delle esigenze, può essere adattata all'abbattimento dei soli NO_x , o alla rimozione congiunta degli ossidi di azoto e di zolfo (SO_x).

I sistemi di abbattimento degli NO_x possono essere realizzati tanto in configurazioni “*a umido*”, quanto in configurazioni “*a secco*”. I primi consistono, essenzialmente, in un processo di *assorbimento chimico* degli ossidi di azoto in una corrente di liquido, la quale viene successivamente allontanata dal flusso gassoso. Tale, processo, tuttavia, è ostacolato dalla natura relativamente inerte e insolubile dell' NO , che, come si è visto, rappresenta il principale prodotto (oltre il 90% in peso) della reazione di combustione, per cui necessita di un trattamento preliminare, in cui il monossido d'azoto viene ossidato in fase gassosa nella forma più solubile di biossido. In analogia a quanto avviene naturalmente in atmosfera, tale ossidazione è ottenuta tramite reazione con *ozono* e le sue specie radicali, o con aggiunta di un potente ossidante come lo *ione ipoclorito* (ClO^-), derivante dalla dissociazione rapida dell'*acido ipocloroso* HClO . In alternativa, il processo di ossidazione può essere condotto in fase liquida mediante l'aggiunta di reagenti quali *permanganato di potassio* (KMnO_4) o *ipoclorito di sodio* (NaClO). Il biossido di azoto così formato solubilizza velocemente nella corrente di liquido, e viene da questa asportato in forma di nitriti e nitrati.

Le difficoltà poste dai sistemi ad umido, rappresentate dalla necessita di pretrattamento della corrente gassosa, dall'onerosa aggiunta di agenti reattivi e dalla problematica gestione delle acque reflue ricche di azoto, limitano notevolmente l'applicazione di tale tecnologia. Allo stato attuale, dunque, la configurazione di gran lunga maggiormente utilizzata negli impianti di incenerimento è rappresentata dai *sistemi a secco*, i quali operano la riduzione chimica degli ossidi in azoto inerte a mezzo dell'iniezione di un opportuno reagente. Tali sistemi, che consentono una significativa riduzione delle concentrazioni di NO_x in uscita all'impianto, possono essere realizzati secondo processi che lavorano in condizioni *catalitiche* (SCR) o *non-catalitiche* (SNCR). Tanto i processi catalitici quanto quelli non-catalitici operano secondo principi e dinamiche di reazione simili, e si differenziano esclusivamente per la presenza, nei primi, di un elemento catalizzatore che accelera il processo. Nei paragrafi che seguono verrà esposta la teoria di riduzione selettiva degli ossidi di azoto e le caratteristiche dei due sistemi di abbattimento.

5.5.1 La riduzione selettiva degli NO_x e il sistema di abbattimento non catalitico (SNCR)

La *riduzione selettiva* degli ossidi di azoto avviene con modalità e dinamiche simili in entrambi le configurazioni del sistema di trattamento. Essa consiste in una reazione di *ossidoriduzione*, in cui l'azoto presente in forma ossidata (con valenza +2 nel monossido e +4 nel biossido) è *ridotto* alla forma molecolare N₂ (a valenza 0) dall'azione riducente di un opportuno reagente chimico, costituito da *ammoniaca*, *urea* o composti azotati simili, il quale a sua volta si ossida e si trasforma in azoto molecolare inerte.

Modelli cinetici predittivi (es. NOxOUT® Kinetic Model) prevedono la presenza di 31 specie chimiche e 93 reazioni influenzate principalmente da:

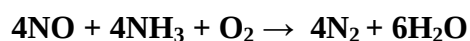
- temperatura;
- tempo di residenza;
- presenza di CO
- presenza di SO_x

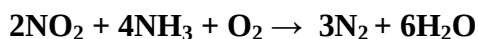
L'effettivo svolgimento delle reazioni dipende inoltre da

- Distribuzione effettiva del reagente nel flusso;
- NO_x presenti nel flusso in ingresso
- eccesso di reagente ammoniacale rispetto a quello stechiometricamente necessario (NSR) (*)

Normal stoichiometric ratio – (NSR) è il termine utilizzato per descrivere il rapporto molare N/NO del reagente iniettato rispetto all'NO_x inizialmente presente. Se 1 mole di ammoniaca anidra è iniettata rispetto ad 1 mole di NO_x, NSR=1, dato che una mole di ammoniaca reagisce con una mole di NO_x. Se 1 mole di urea è iniettata in 1 mole di NO_x, NSR=2, dato che una mole di urea reagisce con 2 moli di NO_x.

Dal momento che nei fumi è presente un discreto quantitativo di *ossigeno*, la reazione di ossidoriduzione avviene secondo le relazioni:

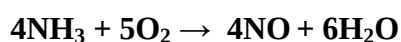




Il processo ha dunque il duplice vantaggio di convertire simultaneamente gli NO_x e i reagenti immessi in prodotti finali inoffensivi, costituiti da azoto molecolare e vapore acqueo. Le reazioni sono *selettive*, dal momento che l'immissione di un agente azotato come l'ammoniaca garantisce l'azione preferenziale, per affinità chimica, sugli ossidi di azoto.

Le reazioni appena presentate sono fortemente influenzate dal valore della *temperatura* operativa, e danno luogo a situazioni estremamente diverse al variare di essa. In assenza di catalizzatori o agenti in grado di accelerare il processo, infatti, le cinetiche di reazione si sviluppano ad una velocità tecnologicamente compatibile solo in un ristretto range di temperatura, nota come "*finestra termica*", che è compresa nell'intervallo di valori tra 850°C e 950°C. In particolare, la riduzione degli NO, presenti in maggiori concentrazioni, è particolarmente veloce nella finestra di temperatura compresa tra i 926°C e i 982°C. Tale intervallo, oltretutto, risulta pesantemente condizionato dalla concentrazione di *ossigeno* presente nei fumi trattati, restringendosi progressivamente da un valore massimo di 1100°C in totale assenza di O_2 , a valori via via più bassi all'aumentare di questo.

Valori più bassi di temperatura dei fumi comportano cinetiche di reazione progressivamente inferiori, sicché, data la velocità della corrente gassosa, l'ammoniaca immessa non ha possibilità di reagire, e viene trascinata tal quale dai fumi assieme agli ossidi non trasformati (fenomeno dell'" NH_3 slip"). Tale evenienza, oltre che a non assolvere il compito preposto di abbattimento degli NO_x , risulta addirittura doppiamente dannosa, nella misura in cui l'ammoniaca "strippata" in uscita al camino contribuisce ai fenomeni di degrado ambientale e rappresenta una minaccia per la salute umana, a causa degli effetti nocivi e dell'odore sgradevole. D'altro canto, temperature di processo troppo alte innescano la reazione competitiva di *ossidazione termica* dell' NH_3 addotta, la quale è convertita rapidamente in NO_x , secondo la relazione:



la quale, come si vede, ottiene il risultato opposto all'obiettivo prefissato, dal momento che comporta l'aumento dei quantitativi di NO nella corrente dei fumi.

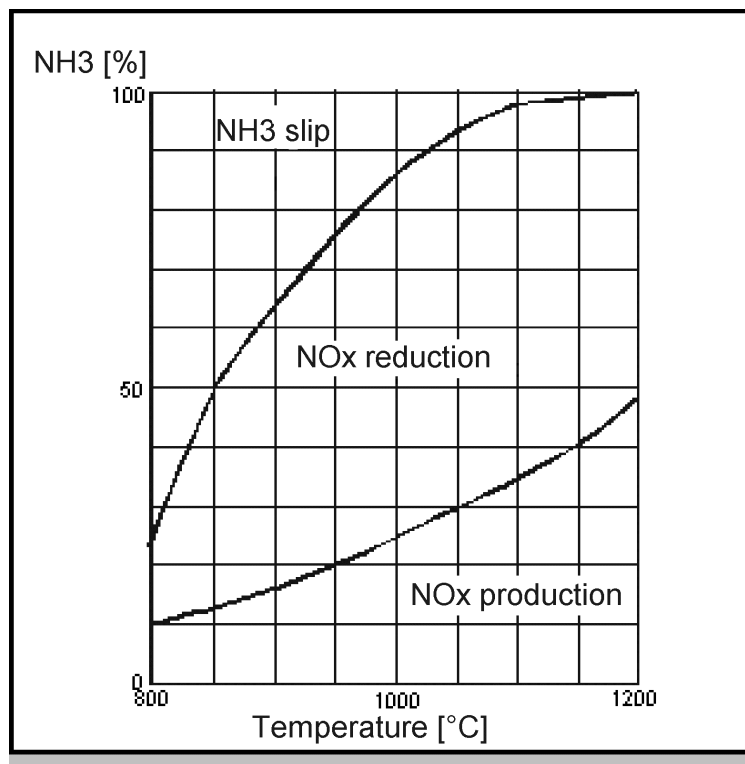


Fig. 5.1 Utilizzo dell'ammoniaca iniettata [ZELLINGER & GRUBER] (condizioni ideali di laboratorio)

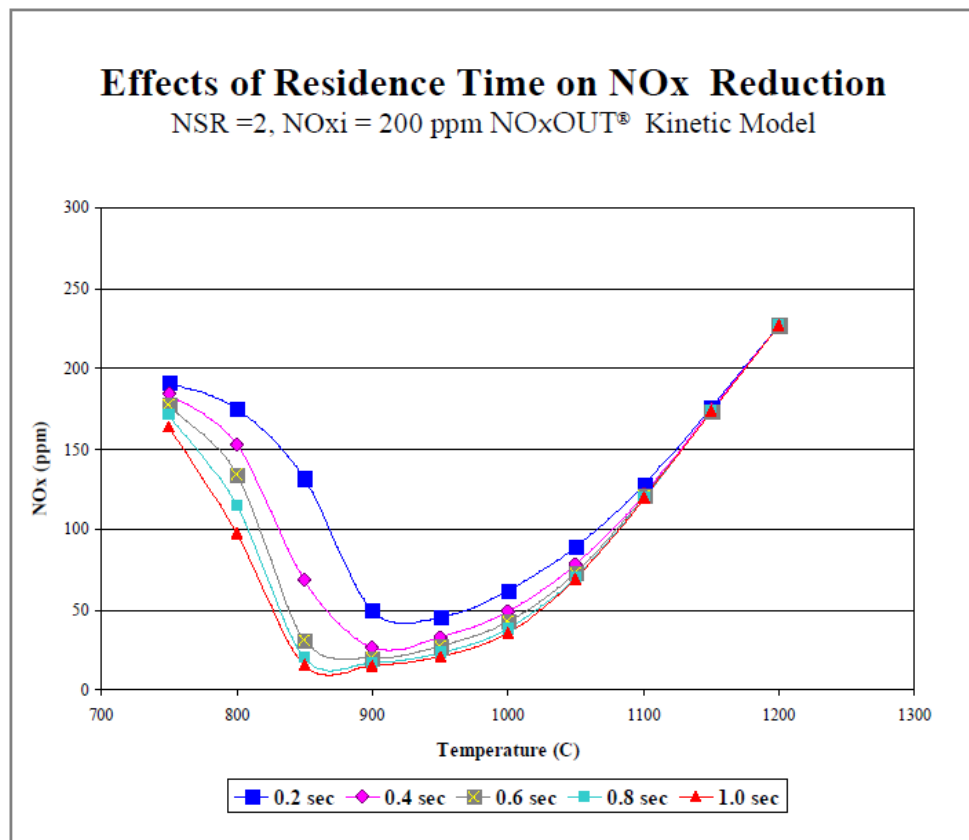


Fig. 5.2 Output semplificato del modello cinetico NO_xOUT®

La presenza di CO (nulla nel caso sopra indicato) provoca un sostanziale spostamento della “finestra di temperatura” verso temperature più basse.

Il CO è inoltre “antagonista” alla formazione termica di NO_x in quanto la presenza di CO si avrebbe solo per combustione incompleta e/o con scarso ossigeno.

La pesante influenza della temperatura impone, dunque, specifiche condizioni nell'utilizzo di sistemi di *riduzione selettiva non-catalitica* (o “*Selective Non-Catalytic Reduction*“ SNCR), a cominciare dalla zona di trattamento in cui far avvenire la reazione e di immissione del reagente adottato. Tale area, per ciò che si è detto, non potrà essere posta in camera di combustione, laddove le temperature normalmente superano i valori richiesti.

La presenza in post combustione va inoltre investigata attentamente in quanto le temperature possono essere ugualmente ancora troppo alte ed inoltre la potenziale concomitante presenza di CO (con abbassamento della finestra di temperatura) rendono tale posizione non ottimale, contrariamente a quanto si potrebbe ipotizzare.

Vari studi specifici precedenti proprio sull'impianto oggetto di questo studio hanno infatti portato ad escludere come ottimale la posizione di iniezione in camera di post combustione.

L'immissione di ammoniaca in un sistema non-catalitico deve dunque avvenire necessariamente nella zona in cui i fumi, presentano temperature ancora abbastanza elevate, e tali da ricadere nel range operativo della riduzione selettiva. Tale fattore rappresenta l'elemento di maggiore criticità nell'adozione di un sistema SNCR, dal momento che la sua scarsa flessibilità impone scelte obbligatoriamente rigide nella predisposizione degli apparati di trattamento, pena il conseguimento di risultati scadenti o addirittura controproducenti.

Ulteriore elemento da considerare è di carattere operativo. Il sistema di immissione adottato deve restare efficiente ed affidabile per periodi lunghi pur operando in un ambiente estremamente ostile per presenza di elevate temperature, polveri ed acidi.

Le prestazioni di abbattimento del sistema SNCR dipende ovviamente dai quantitativi di reagente (soprattutto *ammoniaca*, che è il più usato), che vengono addotti alla corrente gassosa, o, più propriamente, al rapporto molare NH₃/NO_x che si instaura nella zona di trattamento. Contrariamente a quanto si possa pensare, l'andamento dell'abbattimento degli NO_x non è lineare (pur aumentando, in linea di massima, all'aumentare del

rapporto molare), e deve essere verificato alla luce delle numerosi variabili nel processo di combustione. Tale attività costituisce la parte centrale di questo lavoro, e sarà ampiamente discussa nei capitoli a seguire. Parallelamente, anche la frazione di NH_3 residua trascinata tal quale dai fumi aumenta all'aumentare dell' NH_3 immessa, sicché il rapporto molare può essere regolato fino ad un certo limite superiore. Valori tipici del rapporto molare NH_3/NO_x variano da un minimo di 1 ad un massimo di 4.

Un altro elemento che condiziona il processo è dato dal grado di miscelazione tra i fumi e il reagente immesso e la distribuzione omogenea nel flusso di quest'ultimo. Affinché la reazione avvenga con l'efficacia richiesta, infatti, è necessario assicurare che tutta la corrente gassosa sia investita quanto più omogeneamente possibile dall'ammoniaca addotta, e miscelata con essa in maniera corretta, in modo da garantire l'innesco della reazione in tutte le zone. Tale miscelazione viene raggiunta con la *nebulizzazione* del reagente attraverso più punti di immissione (costituiti da stadi di *lance di immissione*) a diverse altezze, i quali utilizzano del *vapore acqueo* in pressione come mezzo di trasporto e di creazione delle condizioni di turbolenza per la miscelazione. Anche i quantitativi di vapore di trasporto hanno una certa influenza (seppur debole) sulle prestazioni del sistema, che verrà discussa nei capitoli successivi. Si avrà cura, inoltre, che i fumi permangano nella zona di trattamento per il tempo necessario per il completamento delle reazioni di riduzione degli ossidi di azoto, pari a circa 2 secondi.

in condizioni ideali di laboratorio quali: miscelamento perfetto dei reagenti, temperatura di poco inferiore ai 1.000 °C, tempo di permanenza maggiore di 0,5 s, l'efficienza dei sistemi di riduzione non-catalitica può raggiungere percentuali di abbattimento degli NO_x anche superiori all'80%. Nelle condizioni reali, difficilmente raggiunge invece percentuali di abbattimento di NO_x superiori al 70%, oscillando usualmente tra i valori del 30-60%.

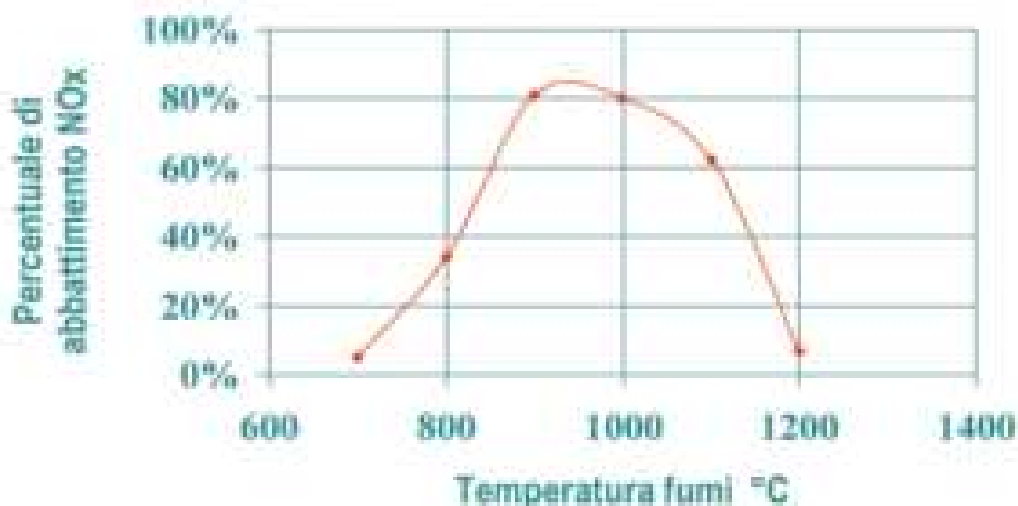


Fig. 5.3 – Andamento dell'efficienza di rimozione in condizioni di laboratorio
(David Wojichowski: "SNCR Systems to minimize emissions", Chemical Engineering, New Brunswick, Nov. 2004.)

Tale limitata efficienza risulta tuttavia sufficiente a garantire il rispetto dei limiti normativi (fissati, si ricordi, a 200 mg/Nm³ su media giornaliera), soprattutto a fronte di quantitativi generalmente prodotti in una combustione di rifiuti in un impianto di incenerimento (circa 200-500 mg/Nm³).

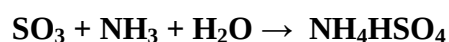
Tale sistema associa, inoltre, una buona affidabilità, una relativa semplicità di esercizio e bassi costi di installazione e gestione, ragioni per le quali viene adottato in gran parte degli impianti inceneritori.

5.5.2 Il sistema di riduzione selettiva catalitica (SCR)

Le difficoltà legate alla rigidità nei range di temperatura nel sistema non-catalitico possono essere superate mediante l'adozione di un sistema di *riduzione selettiva catalitica* (o "Selective Catalytic Reduction" SCR), il quale, pur operando secondo le stesse reazioni descritte per il sistema non-catalitico, e utilizzando gli stessi reagenti azotati (soprattutto *ammoniacale*), si avvale dell'utilizzo di un elemento *catalizzatore* per accelerare le cinetiche di reazione anche a valori più bassi di temperatura. Tale elemento terzo, cioè, partecipa come composto intermedio nelle reazioni di ossidoriduzione del sistema, agevolando la riduzione degli NO_x attraverso una reazione intermedia a temperature più basse. Tale azione consente di svincolare il dimensionamento del sistema di abbattimento dai vincoli imposti dalla temperatura, garantendo una maggiore flessibilità nella gestione delle varie unità del sistema di trattamento dei fumi. I sistemi di riduzione catalitica possono operare così a temperature *medie* (tra i 300°C e i 450°C)

o addirittura più *basse* (circa 200°C) in dipendenza dei materiali che costituiscono i catalizzatori. Solitamente, tali elementi sono costituiti da *ossidi metallici* (soprattutto Ti, V, Al e Fe) a base di *zeoliti*; i modelli di maggiore efficacia, per il quale è possibile ottenere temperature di processo più basse, sono tuttavia costituiti da *metalli nobili*, quali platino e palladio, usati anche come catalizzatori in altre applicazioni tecnologiche (si pensi alle marmitte per autotrazione). Tali materiali sono disposti all'interno del reattore di trattamento, il quale è attraversato dai fumi investiti dal quench nebulizzato di reagente riducente. Esistono differenti configurazioni impiantistiche di catalizzatori (a particelle microscopiche, a piastre), ma le più usate sono le strutture “*a nido d’ape*”, grazie alla maggiore superficie specifica di contatto con i fumi e alle minori perdite di carico indotte al flusso gassoso.

La flessibilità nella scelta dei range di temperatura operativi non elimina le difficoltà nella locazione e nel dimensionamento del sistema di abbattimento, e anzi pone al progettista nuovi quesiti gestionali di non facile soluzione. L'intervallo di temperatura media in cui operano i catalizzatori meno nobili (tra i 300 e i 450°C), infatti, compete alla corrente gassosa nella sezione dei *banchi surriscaldatori*, nella quale non è ancora avvenuta la depurazione dei fumi dai composti acidi (che si realizza, si ricordi, con il successivo trattamento a calce o soda), i quali sono in grado di “avvelenare” i materiali che costituiscono il catalizzatore, riducendone di molto la capacità di contatto con i fumi. In presenza di ammoniacca, infatti, il catalizzatore promuove l'ossidazione dell'anidride solforosa in anidride solforica, che reagisce con parte dei composti azotati secondo le reazioni:



La deposizione dei sali *solfato e bisolfato d'ammonio* così generati sulla superficie dei catalizzatori degrada rapidamente i materiali, provocando erosione e sinterizzazione dei costituenti e diminuendo rapidamente la capacità di abbattimento del sistema. Il problema dell'avvelenamento dei catalizzatori da composti acidi può essere risolto ponendo il reattore di abbattimento *a monte* del sistema di trattamento a calce/soda, laddove l'eliminazione delle sostanze aggressive garantisce una minore usura dei materiali costituenti. Tale condizione, tuttavia, deve fare i conti con l'eccessivo

abbassamento della temperatura dei fumi che, avendo attraversato tutta la caldaia e parte delle unità di trattamento, si trovano ora ad una temperatura di circa 200°C. Per raggiungere la finestra termica desiderata, dunque, è necessario operare un nuovo *riscaldamento* dei fumi, a mezzo di bruciatori ausiliari a combustibile tradizionale, che, come è facile prevedere, comporta un'ingente spesa energetica aggiuntiva. Problemi minori si registrano nell'utilizzo di catalizzatori nobili (al Pt o Pd), per i quali tuttavia le spese per l'approvvigionamento iniziale sono estremamente superiori. L'utilizzo dei catalizzatori impone inoltre diversi problemi gestionali e di manutenzione, legati soprattutto alla relativa frequenza nell'usura naturale dei materiali, che devono essere periodicamente sostituiti con elementi nuovi. I catalizzatori esausti, del resto, devono essere smaltiti come rifiuti pericolosi, data l'elevata concentrazione di contaminanti adsorbita sulla superficie. Non in ultimo, il letto catalitico di reazione occupa volumi notevoli (soprattutto se paragonati al sistema SNCR, per cui non è necessario alcun reattore aggiuntivo) e presenta elevati costi di impianto e d'esercizio.

L'esistenza delle numerose questioni descritte spesso scoraggia l'adozione del sistema SCR, considerata una tecnologia altamente dispendiosa (soprattutto per il riscaldamento dei fumi). Tale scelta è tuttavia obbligata nel caso di impianti che presentano un'elevata produzione di ossidi di azoto, e che richiedono un sistema di abbattimento con prestazioni superiori a quelle offerte dall'SNCR. Un sistema catalitico ben progettato, infatti, garantisce percentuali di rimozione fino al 95%, grazie all'azione dei catalizzatori e ai maggiori volumi a disposizione. Il più delle volte, tuttavia, le minori efficienze del sistema SNCR sono più che sufficienti ad assicurare il rispetto dei limiti, sicché quest'ultimo rimane la scelta preferenziale grazie all'assenza dei numerosi disagi del sistema catalitico.

In questo lavoro, si è inteso indagare sul comportamento degli ossidi di azoto in camera di combustione e sulle prestazioni del relativo sistema di abbattimento di un specifico impianto di incenerimento di rifiuti, alla ricerca di conferme sperimentali delle prescrizioni impartite dalla teoria. Nel capitolo che segue, viene offerta una breve descrizione dell'impianto sede di studio e del suo equipaggiamento attuale.

5.6 Il reagente ammoniacale riducente

La tabella seguente sintetizza vantaggi e svantaggi delle forme di reagente utilizzato nei sistemi SNCR

Reagent	Advantages	Disadvantages
Ammonia	• higher peak NO_x reduction potential (if well optimised) • lower N₂O emissions (10 – 15 mg/Nm³)	• narrower effective temperature range (850 – 950 °C) therefore greater optimisation is required • handling and storage hazards higher • higher cost per tonne waste • ammonia slip approx. 10 mg/Nm³ • odour of residues if in contact with humidity
Urea	• effective temperature range wider (540 – 1000C) therefore temperature control less critical • lower hazard storage and handling • lower cost per tonne waste	• lower peak NO_x reduction potential (cf. ammonia when optimised) • higher N₂O emissions (25 - 35 mg/Nm³) and hence GWP • ammonia slip approx. 1 mg/Nm³
Note: The lower cost of urea is most significant at relatively small plants. For larger plants the higher storage cost of ammonia may be fully compensated by the lower chemical cost.		

Table 4.65: Advantages and disadvantages of urea and ammonia use for SNCR
[62, Tyseley, 2001] [64, TWGComments, 2003]

Fig. 5.4 confronto sintetico ammoniacale - urea

A livello impiantistico l'utilizzo di urea comporta inoltre la necessità di un sistema di dissoluzione preliminare.

5.6.1 caratteristiche e problematiche di sicurezza dell'ammoniaca anidra e della soluzione ammoniacale

Sebbene tale sistema possa contare su una tecnologia affidabile e sulla competenza di personale addetto esperto, la scelta di operare con ammoniacale in forma gassosa comporta non poche preoccupazioni da un punto di vista gestionale, e soprattutto della *sicurezza degli operatori*, a causa delle sue caratteristiche di pericolosità della sostanza. I limiti e gli effetti sulla salute alle varie concentrazioni in aria sono sintetizzati nella tabella sottostante.

Vapor Concentration (ppm)	Limit or General Effect	Exposure Period
5	Odor detectable by most persons	Unlimited
25	NIOSH REL	8 hour TWA
35	ACGIH STEL	15 minute TWA
50	OSHA PEL	8 hour TWA
300	NIOSH IDLH	
400-700	Immediate nose and throat irritation	30 minutes to 1 hour exposure causes serious effect
1,700	Severe coughing; severe eye, nose and throat irritation	Could be fatal after 30 minutes
2,000-5,000	Severe coughing; severe eye, nose and throat irritation	Could be fatal after 15 minutes
5,000-10,000	Respiratory spasm; rapid asphyxias	Fatal within minutes

Fig. 5.5 Effetti sulla salute di concentrazioni crescenti di vapori d'ammoniaca in aria

In <http://www.cdc.gov/niosh/ipcsnitl/nitl0215.html> e <http://www.cdc.gov/niosh/ipcsnitl/nitl0414.html> sono riportate le “schede internazionali di sicurezza chimica” elaborate da WHO, IPCS ed ILO per le rispettive forme e soluzione acquosa ed anidra

Di seguito vengono comparate ed integrate con le caratteristiche salienti in modo da rendere più evidenti le differenze.

	NH₃ Anidra NH₃	Ammoniaca acquosa (Idrossido di ammonio NH₄OH) 10%-35%
Rischio incendio	Non combustibile.	Inflammabile
Rischio ESPLOSIONE	Miscela gas aria sono esplosive (limiti 15-28%) Energia accensione 680 mJ	Solo sui gas evaporati che possono evaporare dalla soluzione
Recipienti	Recipienti a pressione (tipico circa 20 bar) con varie misure antincendio	Recipienti generalmente a pressione minore di 0,5 bar con misure di prevenzione di sovrappressione e formazione di miscele di vapore / aria
Autorizzazione per Utilizzo - stoccaggio	Autorizzazione preventiva R.D. 9.1.1927 N. 147 (deroga per detenzione ed uso di quantitativi inferiori a 75 kg in piccoli impianti di refrigerazione)	

Titoli per la manipolazione	Obbligo di patentino per gas tossici per gli operatori (solitamente richiesta anche presenza contemporanea di 2 operatori) Obbligo di direttore tecnico (chimico o ingegnere chimico)	
Rischio incidenti rilevanti	Soggetta ai DLGs 334/99 - D.Lgs. 238/05 in quanto classificata come tossica	
Simboli	 	
Temperatura di ebollizione	-33 °C	38 °C (25%)
Temperatura di fusione	-78 °C	-58 °C (25%)
Tensione di vapore	8,6 barAbs (20 °C)	0,48 barAbs (20 °C)

La forma anidra dell'ammoniaca è infiammabile, e forma miscele esplosive con l'aria, sicché l'intera zona di stoccaggio del composto deve essere recintata e dotata di misure particolari per evitare la dispersione e le perdite di gas e per lo spegnimento immediato di eventuali incendi, nonché di equipaggiamento elettrico speciale antincendio.

Il personale addetto, inoltre, deve essere in possesso di particolari certificazioni autorizzative (patentino per l'utilizzo di gas tossici), che ne attestino la capacità di operare con tale sostanza pericolose; allo stesso modo anche le operazioni di rifornimento del serbatoio devono avvenire nel rispetto di speciali protocolli di sicurezza, alla presenza di un responsabile esperto.

In caso di sversamento accidentale, l'ammoniaca viene convogliata in una vasca di accumulo interrata dalla capacità massima di 400 m³, la quale è sempre mantenuta con almeno 100 m³ residui d'acqua allo scopo di assorbire eventuali fuoriuscite.

La presenza e l'utilizzo della sostanza ricadono inoltre nella "direttiva Seveso" (attualmente è la direttiva 96/82/CE "Seveso 2"), in vigore dal 3 febbraio 1999, concernente il controllo dei rischi da incidente rilevante che coinvolgano sostanze pericolose, recepito in Italia con DLGs 334/99.

Il grafico sottostante (le pressioni sono assolute) indica la tensione di vapore di soluzioni a vario titolo.

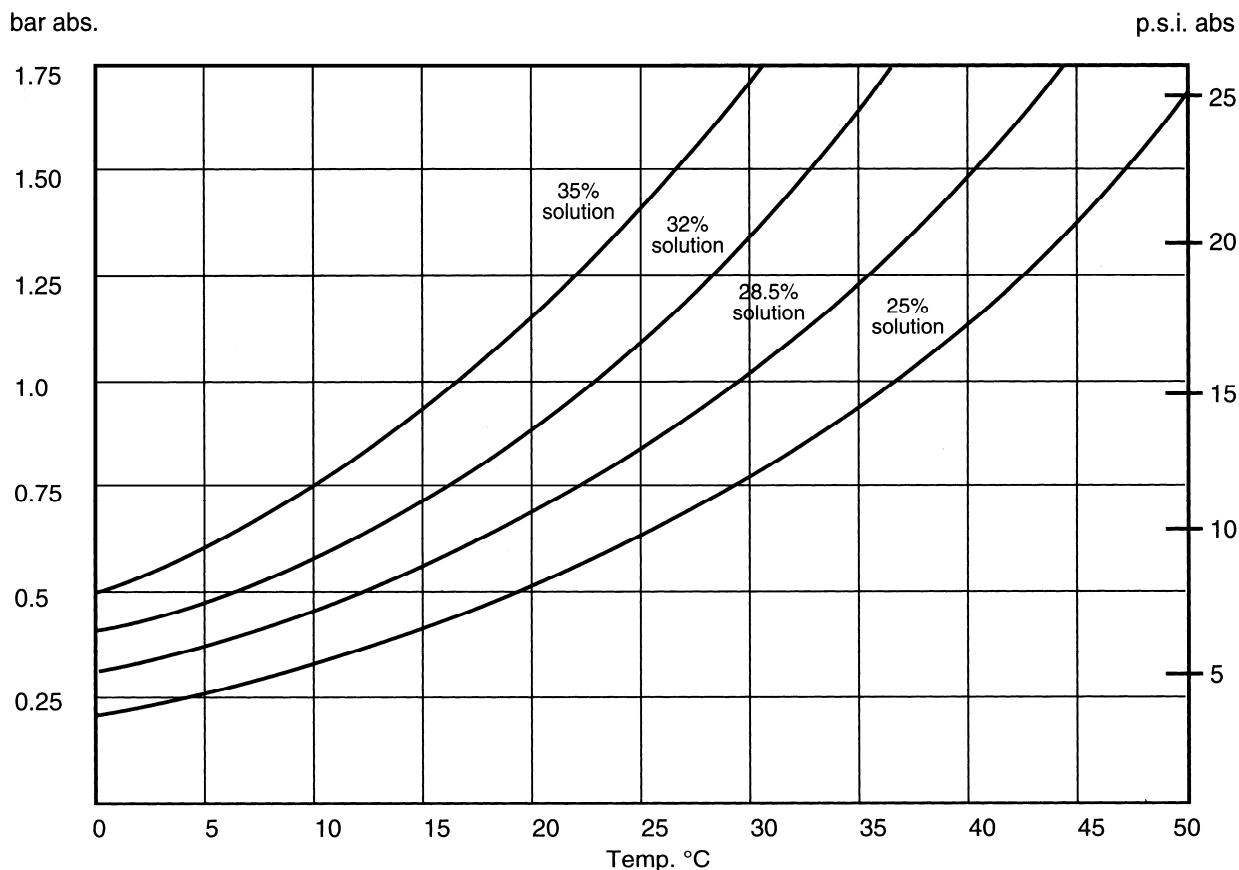


Fig. 5.6 Tensione di vapore soluzione ammoniacale

Da queste si vede che per raggiungere una tensione di vapore di 0,5 bar sarebbero necessarie temperature della soluzione di 47,5 °C (difficilmente ipotizzabile nel clima romano, soprattutto considerando che sul volume di stoccaggio influisce la temperatura media giornaliera).

Questo, utilizzando una modesta coibentazione ed evitando l'esposizione ai raggi diretti del sole, consente l'utilizzo di serbatoi di contenimento con pressione inferiore a 0,5 bar, con notevole semplificazione non solo tecnica ma anche amministrativa.

5.7 La situazione impiantistica in Italia ed i sistemi di trattamento DeNOx

Secondo l'ultimo rapporto annuale dell'APAT disponibile (2008 - contenente dati riferiti principalmente all'anno 2006),

http://www.apat.gov.it/site/it-IT/APAT/Pubblicazioni/Rapporto_Rifiuti/

risultano meno di 70 (67) impianti operativi per rifiuti speciali di cui 2 dedicati prevalentemente o esclusivamente a rifiuti sanitari. Per i rifiuti urbani sono operativi meno di 50 impianti (il 60% dei quali nel nord Italia) che trattano circa il 12% dei rifiuti prodotti.

La quasi totalità degli impianti è dotata di sistemi di recupero energetico che privilegia la produzione di energia elettrica.

Sul rapporto 2006, contenente dati relativi all'anno 2005, http://www.apat.gov.it/site/contentfiles/00143900/143912_rap_rifiuti_2006.zip per gli impianti che trattano rifiuti urbani e CDR vengono censite anche le caratteristiche tecnologiche e quindi le modalità di trattamento degli effluenti gassosi adottate dai vari impianti. In particolare per quanto riguarda i sistemi DeNOx, dei 52 impianti censiti:

- 36 impianti adottano il sistema SNCR
- 10 impianti adottano il sistema SCR
- 6 impianti non dichiarano tale trattamento

Questi dati confermano la netta prevalenza del sistema non catalitico nelle scelte impiantistiche, probabilmente per le varie ragioni prima indicate.

In tali dati l'indicazione del reagente ammoniacale utilizzato è spesso carente ma appare comunque prevalente l'urea.

Con il sistema SNCR riesce comunque difficilmente ad ottenere, in condizioni reali, valori di NOx residuo inferiore a 50 -60 ppm.

Pertanto è prevedibile che nel futuro, la progressiva riduzione dei limiti alle emissioni e la possibilità di istituzione di una "NOx Tax" come incentivo / disincentivo alla riduzione volontaria dei valori emessi con il parallelo sviluppo anche in termini di affidabilità della tecnologia SCR comportino un progressivo spostamento verso quest'ultima.

Il sistema SCR prevede obbligatoriamente l'iniezione della forma ammoniacale (liquida o gas).

Nel settore della termovalorizzazione non risultano applicazioni o sperimentazioni "ibride" che prevedano l'applicazione in serie dei sistemi SNCR ed SCR in cui il secondo stadio SCR possa sfruttare lo slip di ammoniaca del sistema SNCR.

La problematica principale del sistema SCR è quella che con gli attuali catalizzatori occorre lavorare a temperature tra 250 e 350 °C ed in assenza di polveri ed acidi (soprattutto SO₃ per evitare la formazione di bisolfato d'ammonio secondo la reazione: $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{SO}_3 \rightarrow \text{NH}_4\text{HSO}_4$).

Il trattamento va pertanto effettuato dopo i trattamenti per rimozione polvere ed acidi.

Per la rimozione di acidi e polveri, con le attuali tecnologie commercialmente disponibili:

- la calce ha temperature ottimali di reazione inferiori a 180 °C (tipicamente 160 °C);
- il bicarbonato di sodio ha costo superiore e temperature ottimali fino a circa 220 °C;

- le migliori maniche sintetiche (PTFE) hanno temperatura massima di esercizio di circa 200 °C e massima di breve periodo di 260 °C.

Emerge pertanto la necessità attuale di un post riscaldamento dei fumi trattati, in attesa e nella speranza che vengano sviluppati catalizzatori efficienti a temperature inferiori ai 200 °C.

Nell'altra direzione di operare con temperature più elevate, sono sviluppate recentemente maniche filtranti in fibra ceramica con le quali è possibile operare a temperature superiori (utilizzando quindi bicarbonato) ed all'interno delle quali è anche possibile inserire catalizzatori in forma granulare in modo da evitare la necessità di una specifica sezione. Tali maniche sembrano molto più sensibili ad eventuali presenze di condense ed acidità con possibile rapido degrado con conseguenti pesanti implicazioni dal punto di vista dell'affidabilità complessiva del sistema.

In ogni caso resta l'esigenza della rigenerazione (usualmente per via termica) del catalizzatore.

Capitolo VI: L'impianto di incenerimento AMA (Roma)

L'impianto di incenerimento oggetto dello studio sperimentale applicativo è situato all'interno dello stabilimento di *Ponte Malnome*, di proprietà all'Azienda Municipalizzata del comune di Roma (AMA), nella zona sud-ovest della città, in località Ponte Galeria. Adibito al trattamento e alla termodistruzione di *rifiuti* classificati come *speciali*, e in particolare dei *rifiuti sanitario-ospedalieri* (RSO).

La tipologia di rifiuti trattati non è soggetta a regime di privativa e pertanto può essere smaltita in tutti gli impianti autorizzati a riceverli.

Secondo i più recenti dati APAT disponibili sopra citati la produzione italiana attuale di "rifiuti sanitari è di circa 160.000 tonnellate/anno.

Di questi circa 40.000 t/a sono trattati in impianti di incenerimento per rifiuti urbani e circa 120.000 in impianti per rifiuti speciali.

L'impianto è uno dei 2 dedicati esistenti in Italia e tratta circa 15.000 t/a di rifiuti sanitari.

L'impianto opera in regime di libero mercato e pertanto è in grado di ricevere rifiuti senza limitazione territoriale.

Il bacino d'utenza è comunque prevalentemente regionale. È asservito al complesso di ospedali, case di cura, ambulatori, case farmaceutiche e strutture sanitarie in genere dell'intera Regione Lazio, smaltendo anche, in qualità di unico impianto dell'Italia Centrale, i rifiuti ospedalieri provenienti da altre Regioni attigue, in particolar modo la Campania e l'hinterland napoletano. Entrato in funzione nel 1996 con la disattivazione del precedente impianto tecnicamente obsoleto.

Il quantitativo massimo annuale autorizzato è di 30.000 tonnellate.

Oltre ai rifiuti di origine ospedaliera e ai farmaci scaduti, l'impianto è preposto allo smaltimento di modeste quantità di altre tipologie speciali di rifiuti, tra le quali vanno citati i farmaci scaduti, residui biologici dei laboratori di ricerca, le sostanze stupefacenti, materiali che devono essere distrutti per motivi di sicurezza, etc.

6.1 descrizione del processo

L'impianto di Ponte Galeria si avvale dell'utilizzo della tecnologia di incenerimento con forno a *tamburo rotante*, con sistema di recupero energetico e di trattamento e depurazione dei fumi di combustione.

L'inceneritore è dotato di due linee di trattamento parallele, ciascuna composta dai seguenti sistemi:

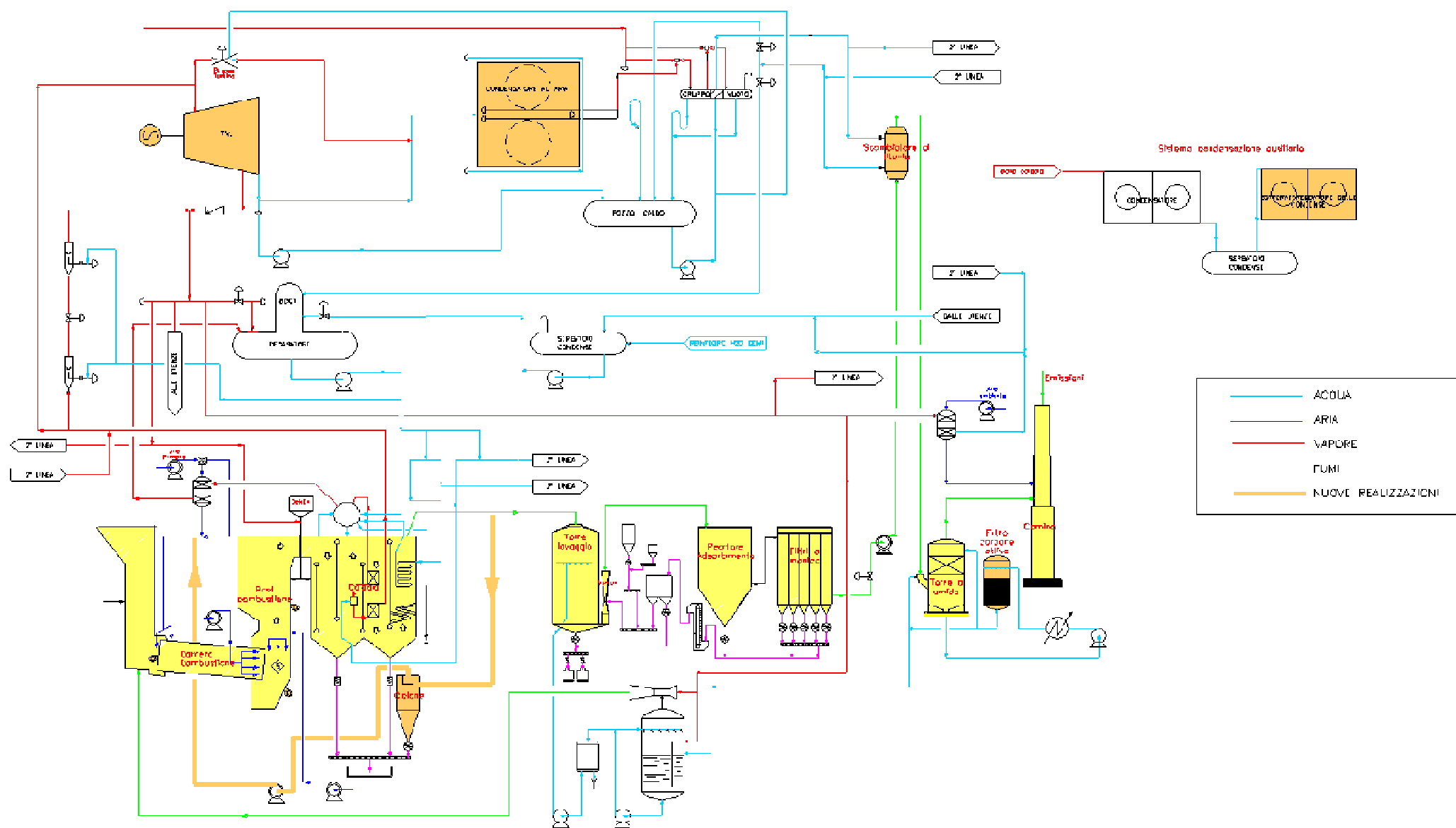
- un sistema per lo *stoccaggio* e la *movimentazione* dei rifiuti sanitario-ospedalieri;
- una sezione di *termodistruzione a tamburo rotante* e camera di post combustione
- una sezione di recupero energetico con generatore di vapore e turboalternatore;
- una sezione di *trattamento dei fumi* e *abbattimento degli inquinanti*;
- un *camino* per l'evacuazione dei prodotti gassosi depurati.

L'impianto è inoltre dotato di un moderno sistema di monitoraggio delle emissioni al camino.

Di seguito viene riportato uno schema di processo semplificato dell'impianto.

Le “nuove realizzazioni” corrispondono ad adeguamenti impiantistici conseguenti all'entrata in vigore del Decreto Ministero dell'Ambiente 503/97 riguardante l'attuazione delle direttive CEE 89/369 e 89/429 concernenti la prevenzione dell'inquinamento atmosferico provocato da impianti di incenerimento di rifiuti urbani e la disciplina delle emissioni e delle condizioni di combustione degli impianti.

Figura 6.1: schema dell'impianto AMA di Ponte Galeria



I rifiuti sanitario-ospedalieri in arrivo all'impianto sono conferiti in confezioni principalmente costituite da imballaggi di cartone dalla capacità di 60 l, nonché da secchi in materiale plastico di diversa taglia (soprattutto per lo smaltimento di rifiuti allo stato liquido), chiusi ermeticamente per evitare sversamenti accidentali di prodotto e recanti indicazioni sulla natura pericolosa del contenuto e sul relativo rischio infettivo e biologico. I contenitori vengono scaricati dagli automezzi conferitori, movimentate mediante carrelli elevatori e posizionati in capannoni coperti adibiti allo *stoccaggio*, in attesa di essere addotti alle 2 linee di forni. Il *sistema di alimentazione* dei forni si compone di più sezioni di carico dei materiali (dette *baie di carico*), dalla quale i rifiuti sono poi movimentati da un sistema automatico di rulliere, nastri trasportatori ed elevatori automatici, onde minimizzare il contatto con gli operatori. Tale sistema accompagna il rifiuto fino alla tramoggia di carico del singolo forno, posta ad un'altezza di circa 18 m.

Solo in caso di fermo e di manutenzione del sistema automatico, l'impianto è dotato di un *nastro elevatore a caricamento manuale*, che può essere usato, tra l'altro, per l'alimentazione al forno di materiali arrivati in cattive condizioni di conservazione (come cartoni umidi o parzialmente rotti), adottando tutte le misure di sicurezza del caso.



Figura 6.2: sistema di alimentazione ai forni: baie di carico e nastro trasportatore

6.2 Le linee di termodistruzione e il sistema di recupero energetico

I rifiuti movimentati sono alimentati al forno tramite una *tramoggia di carico*, la quale, attraverso un sistema doppio di *portelle automatiche*, adduce i materiali nella quantità fissata (solitamente 10 – 15 pezzi), misurata a mezzo di sensori ottici.

Il sistema è progettato in modo da consentire l'apertura alternata dei portelloni, tale da creare una *camera di precarico* separata dalla tramoggia di arrivo.

In questa maniera, viene garantita la tenuta della camera di combustione, e la separazione degli ambienti del forno dall'esterno. Il materiale conferito è dunque spinto nella sezione iniziale del tamburo rotante da un sistema di *spintore oleodinamico*, e inizia le reazioni di combustione che avvengono all'interno del forno.

Il tamburo rotante è sostanzialmente un tubo d'acciaio del diametro di 3,25 m e lunghezza 10 m, rivestito internamente da circa 30 cm di materiale refrattario.

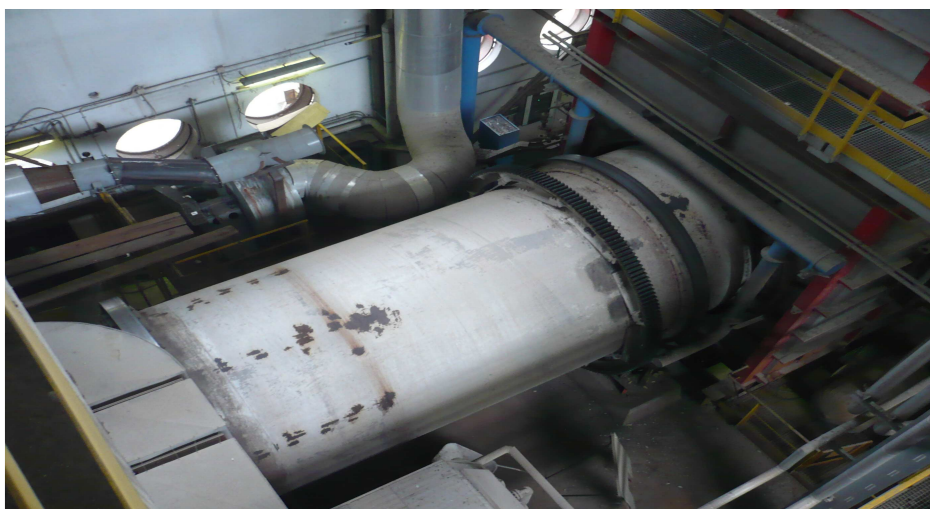


Figura 6.3: forno a tamburo rotante dell'impianto di Ponte Galeria.

La tipologia e la qualità del materiale refrattario sono scelte in modo da garantire la protezione dell'acciaio contro le aggressioni chimiche termiche e meccaniche che la combustione (fino ad oltre 1400 °C) produrrebbe.

Vengono inoltre minimizzate le dispersioni termiche.

Il tamburo è leggermente inclinato verso lo scarico per favorire l'avanzamento delle scorie.

La struttura è supportata da 4 ruote d'acciaio orizzontali opportunamente inclinate in modo da evitare che, per effetto dell'inclinazione, il cilindro stesso avanzi con moto elicoidale. Un vincolo ad asse verticale, con ruotino orizzontale, posto all'estremità inferiore del tamburo è posto come ulteriore sicurezza. La rotazione del sistema, invece, è imposta da una *ghiera dentata* che fascia il cilindro, accoppiata ad una ruota dentata legata ad un motore, che imprime il movimento, per una velocità di rotazione adatta al rivoltamento e all'avanzamento dei rifiuti.

Tale velocità può essere modificata manualmente o automaticamente in funzione dei parametri di combustione e regolata in base alle caratteristiche di temperatura e velocità di avanzamento del rifiuto desiderate (in funzione del materiale da trattare).

Recenti modifiche hanno dotato il tamburo di un sistema di *sagomature interne del refrattario*, che aiutano la movimentazione e il rivoltamento dei rifiuti e favorisce il contatto con l'aria comburente.

Il processo di *termodistruzione* avviene all'interno del tamburo rotante, dove i rifiuti rimangono almeno mezz'ora ad una temperatura fino a circa 1400°C; in fase di accensione del forno, un sistema di *bruciatori ausiliari a metano* o gasolio garantiscono il raggiungimento della temperatura minima di 850°C prevista dalla normativa per iniziare la combustione dei rifiuti.

All'uscita del tamburo, i fumi di combustione attraversano la camera di *post-combustione*, che provvede al completamento delle reazioni di ossidazione dei composti organici.

La camera è dimensionata sulla base delle disposizioni deliberate dal Comitato Interministeriale del 27/07/1984, per la prima applicazione dell'art. 4 del D.P.R. 915/82 concernente lo smaltimento dei rifiuti. Questa norma (attualmente superata da disposizioni meno restrittive), imponeva esplicitamente, nell'incenerimento la presenza di una camera di postcombustione per completare l'ossidazione dei flussi provenienti dalla camera di combustione primaria.

Le condizioni operative che l'esercizio della camera di postcombustione doveva garantire, erano che i fumi stazionassero per almeno due secondi alla temperatura di 950°C (attualmente 850°C) e con un ossigeno residuo minimo del 6% v/v e con una certa turbolenza minima. La turbolenza dei fumi veniva garantita dalla loro velocità d'ingresso nella camera che doveva essere almeno di 10 m/s - a tale scopo, all'ingresso della camera di post combustione del termovalorizzatore AMA è presente un apposita sezione ristretta.

La presenza di ossigeno è invece garantita tramite eccesso di aria primaria e dall'adduzione di aria secondaria di processo, immessa nella camera da un *ventilatore* regolabile in remoto sia manualmente che automaticamente.

Figura 6.4: interno del tamburo rotante in fase di preriscaldamento con bruciatori



Le scorie solide sono estratte in coda al tamburo, e spente in una vasca a *bagno d'acqua* con battente idraulico (guardia idraulica), onde evitare l'intromissione di aria esterna nelle zone di combustione. I materiali raffreddati sono rimossi per mezzo di un *raschiatore a catena*, il quale li conferisce, tramite apposito deviatore, in *cassoni scarrabili*, allontanati dall'impianto a mezzo di camion verso lo smaltimento finale in discarica.

I fumi in uscita dalla camera di post-combustione attraversano gli ambienti della caldaia per la *generazione di vapore*, il quale è poi inviato in turbina per la produzione di energia elettrica.

La caldaia è a tubi d'acqua a circolazione naturale ed è costituita da 4 giri di fumo creati da tubi evaporatori.

I composti gassosi, in particolare, attraversano i primi 2 giri fumo dove sono presenti solo tubi *evaporatori* poi, nel terzo giro fumi un banco di *surriscaldatori* ed infine, all'uscita del quarto giro fumi un banco finale di *economizzatori*.

Tramite tale scambio termico con il fluido circolante al loro interno, raffreddano la corrente dei fumi da circa 1100 °C fino alla temperatura di circa 300°C, alla quale entra nel percorso di depurazione successivo.

Per le caratteristiche costruttive del materiale ed al fine di prevenire l'azione corrosiva sui materiali della caldaia da parte dell'*acido cloridrico* in fase gassosa, il progetto prevede che la temperatura di parete dei surriscaldatori, disposti *perpendicolarmente* al flusso, non superi il valore di 400°C. La temperatura in questa sezione è controllata da un attemperatore ad iniezione, il quale nebulizza parte dell'acqua proveniente dalle pompe di alimento per raffreddare la corrente gassosa. Nella zona dei vaporizzatori, dove la temperatura è inevitabilmente superiore, i fasci sono disposti *parallelamente* alla parete, onde minimizzare la superficie di tubo esposta al flusso gassoso. Parte dei fumi in uscita dalla caldaia (circa 8000 Nm³/h) può essere ricircolata in testa alla camera di combustione, previa depolverazione tramite ciclone, in modo da aumentare l'efficienza di trattamento dei composti incombusti, e soprattutto ridurre la formazione di NO_x termici, secondo i principi esposti al precedente capitolo 4.

Il vapore generato dalla caldaia (fino a circa 9 tonnellate/ora) è inviato in *turbina a 5 stadi di pressione* per l'espansione e la produzione di *energia elettrica* (per una potenzialità nominale massima di 3,2 MWe).

A seconda dei regimi di funzionamento la produzione elettrica da tale recupero energetico è da 1 a 3 volte superiore ai consumi propri dell'impianto.

La quantità in esubero è ceduta ad utenze terze. In questo modo, l'impianto assolve alle prescrizioni dettate dalla normativa, che, ai sensi dell'articolo 182 del già citato D.Lgs 152/2006, impongono agli impianti inceneritori il recupero obbligatorio di parte dell'energia. A partire da una potenzialità generata pari a circa la metà di quella nominale è possibile effettuare dal primo stadio della turbina uno *spillamento*, il quale destina parte del vapore surriscaldato a 140°C e 3,2 bar ad altri usi dell'impianto, come il sistema di abbattimento degli NO_x, il riscaldamento dei fumi, la pulizia della caldaia, la separazione dell'ossigeno ad opera del degasatore. Il raffreddamento del fluido in uscita alla turbina, che viene portato a 46°C e 0,1 bar, avviene a mezzo di un sistema di *condensatori ad aria*, posti sulla sommità della sala turbina.

5.2 Il trattamento dei fumi e l'abbattimento degli inquinanti.

I prodotti gassosi generati dalla combustione attraversano un lungo percorso di trattamento prima della loro definitiva liberazione in atmosfera, lungo il quale vengono depurati dei composti inquinanti a mezzo di diverse sezioni di abbattimento.

La prima unità di trattamento incontrata nell'impianto di Ponte Malnome è costituita dal sistema di abbattimento degli NO_x , che avviene secondo un processo di *riduzione selettiva non-catalitica* (SNCR) operato con adduzione di *ammoniaca*. Tale processo avviene laddove sono presenti le temperature richieste dalle reazioni (come descritto al capitolo 4), e può essere realizzato con l'immissione di ammoniaca tanto nella forma gassosa (o anidra) quanto in quella liquida.

Nell'impianto, non essendo ancora perfettamente definiti in fase progettuale tutti i possibili regimi di funzionamento dell'impianto ed allo scopo di permettere un'adeguata elasticità operativa erano inizialmente previsti e fu dotato di 5 stadi di possibile immissione di ammoniaca, di cui:

- 1 nel tratto finale della camera di post combustione;
- 4 nel primo giro fumi della caldaia.

Successivi studi ed esperienze nelle condizioni operative reali hanno portato ad utilizzare solo 2 stadi (1° e 2° stadio nel primo giro fumi della caldaia) dove le temperature risultavano ottimali.

Il sistema DeNO_x è oggetto di studio di questo lavoro, e sarà ampiamente descritto nel paragrafo successivo.

In uscita dalla caldaia, la temperatura è variabile in funzione del grado di sporcamento della stessa e del carico termico istantaneamente presente. Essa deve pertanto essere adeguata ad un valore compatibile con i successivi trattamenti ed in particolare con le caratteristiche di resistenza dei tessuti filtranti del filtro a maniche.

Il valore normalmente adottato è di circa 175 °C che risulta un ottimale compromesso per:

- evitare condense acide e quindi problemi di corrosione a temperature troppo basse;
- permettere un'efficace reazione con il reagente basico (calce), tanto migliore quanto più bassa è la temperatura;
- mantenere un margine di sicurezza per le maniche filtranti ($T_{\text{max}} = 260$ °C per il PTFE).

Tale temperatura viene regolata in “*torre di condizionamento*” tramite immissione nebulizzata di acqua ricircolata dal processo.

La rimozione dei *composti acidi* avviene in due stadi, prima a secco poi ad umido.

Nel primo stadio “*a secco*” a mezzo dell’adduzione di *calce idrata* ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) (calce fiore ad alto titolo) in forma granulare di piccole dimensioni. Il dosaggio di calce, potrebbe avvenire anche in tempo reale sulla base del valore strumentale di HCl rilevato dal sistema di monitoraggio al camino.

Essendo tuttavia il valore di HCl normalmente presente in uscita molto basso e vicino al valore di rilevabilità strumentale (circa 1mg/Nmc) tale sistema non viene adottato in quanto risulterebbe poco affidabile.

Il miscelamento con i fumi è assicurato nel punto d’immissione dalla turbolenza generata da un *restringimento “Venturi”*, che accelera la corrente in transito. In tale sezione viene inoltre iniettato un certo quantitativo di *carboni attivi*, per l’adsorbimento degli inquinanti organici (soprattutto diossine e furani) e dei metalli presenti.

In un reattore apposito successivo “*reattore di adsorbimento*” viene assicurato un tempo di contatto affinché possano avvenire le reazioni di neutralizzazione degli acidi con la calce e di adsorbimento di composti organici e metalli sul carbone.

Le polveri presenti nella corrente gassosa, (polveri provenienti dalla combustione, calce, carbone attivo), vengono quindi separate dai gas in un *filtro a maniche*, il quale provvede alla rimozione del particolato con un’elevatissima efficienza di rimozione.

Incidentalmente le maniche di tessuto, per effetto di un consistente strato superficiale, formato dall’adesione di calce e carbone attivo, completano in maniera sostanziale le reazioni di abbattimento e rimozione dei metalli pesanti e dei microinquinanti organici nonché l’effetto di filtrazione del tessuto.

Tanto la calce quanto i carboni sono in parte riciclati in testa al trattamento, onde assicurare tempi di contatto più lunghi, nonché favorire il completo mescolamento, e quindi permettere rese di abbattimento maggiori e costanti. La Parte non ricircolata viene estratta da un sistema a *coclea*, il quale raccoglie i materiali in forma fioccosa in apposite sacche di tela (dette *bigbags*), successivamente allontanate e smaltite come rifiuto pericoloso.



Figura 6.5: il sistema di trattamento dei fumi dell'impianto.

A valle del filtro a manica, i fumi, previo flussaggio forzato attraverso un gruppo moto-ventilatore, passano ad una sezione di trattamento finale, costituita da una *torre di lavaggio*, dotata di corpi di riempimento e che utilizza NaOH come reagente basico, al fine di completare l'abbattimento dei composti acidi (soprattutto HCl).

Un eventuale “*slip*” di ammoniaca non reagita verrebbe catturato in questa sezione con possibilità di invio ad un sistema di strippaggio e successivo ritorno al sistema DeNO_x.

In tale stadio la temperatura viene mantenuta a valori inferiori a 60 °C e questo consente la rimozione dei metalli facilmente volatili, soprattutto mercurio, di diossine e furani. L'acqua della torre viene depurata in un sistema a carboni attivi e riciclata in parte come liquido di condizionamento. Un eventuale eccesso viene scaricato ed inviato ad ulteriore trattamento chimico fisico e biologico presso il depuratore di stabilimento.

I fumi in uscita alla torre di lavaggio hanno completato il percorso depurativo e possono essere immessi in atmosfera a valori inferiori a quelli consentiti.

Per evitare la formazione del classico pennacchio bianco per condensazione del vapore (il quale esercita forte impressione sull'opinione pubblica, pur essendo vapore) e non inficiare i sistemi di misura in continuo delle polveri (funzionanti per diffrazione di luce e quindi influenzati da eventuali nebbie) i fumi vengono inviati ad un *apparato anti-pennacchio*, il quale li miscela con aria calda prima dello sbocco in atmosfera per ottenere al camino una temperatura di 15 -25 °C superiore a quella di uscita dalla torre ad umido, evitando così fenomeni di condensazione sia nella canna che nelle immediate vicinanze dell'uscita, in tutte le condizioni atmosferiche.

La corrente gassosa, spinta dal ventilatore fumi e per effetto congiunto del tiraggio naturale lascia l'impianto attraverso le 2 canne (una per ciascuna linea) di un camino di altezza di 80 metri dal piano campagna.

Tale altezza di emissione (circa 100 m slm) sovrasta di oltre 25 m la quota più alta delle colline circostanti la Valle Galeria (circa 40 – 75 m slm) e permette pertanto una diffusione degli inquinanti sopra la quota di usuale inversione termica.



Figura 6.6: torre di lavaggio e camino bicanna di evacuazione fumi

6.3 Il sistema di abbattimento degli ossidi di azoto.

Il rispetto dei limiti normativi e l'abbattimento delle concentrazioni degli *ossidi di azoto* presenti nella corrente gassosa sono affidati, si è detto, oltre alle misure preventive, ad un *sistema di trattamento DeNO_x*, che opera secondo i principi della *riduzione selettiva non-catalitica* (SNCR), ottenuta con l'adduzione di *ammoniaca anidra in fase gas*.

Tale sistema fu progettato ed è stato realizzato per operare con un reagente in forma gassosa (o anidra).

L'impianto DeNO_x dispone di diverse sezioni, le quali assolvono le funzioni di stoccaggio del reagente, miscelazione e trasporto al punto di immissione, adduzione alla corrente dei fumi e regolazione dei parametri di controllo. Nel rispetto dei principi della teoria della riduzione selettiva non-catalitica, l'adduzione di ammoniaca alla corrente gassosa deve avvenire in una zona d'impianto in cui i valori di temperatura sono compresi nell'intervallo della finestra termica tra 850°C e 950°C. Tali temperature

competono ai fumi nella parte alta del *primo giro fumi della caldaia*, in cui essi, avendo appena lasciato la camera di post combustione principale in cui raggiungevano temperature superiori ai 1000°C, sono parzialmente raffreddati dallo scambio termico con le pareti costituite dai tubi metallici della caldaia.

Tale immissione avviene usualmente nel 1° stadio o nel 2° stadio (il 1° stadio è quello incontrato per primo dai fumi) grazie alla presenza di 8 lance per ogni stadio.

La diffusione è assicurata dall'azione di un certo quantitativo di *vapore di trasporto*, il quale ha la funzione di offrire alla corrente una miscela omogenea di reagente nebulizzato in particelle fini, e di conferire un certo grado di turbolenza all'immissione, onde favorire la distribuzione del reagente quanto più rapida ed uniforme possibile a tutta la sezione attraversata dai fumi.

Più nello specifico, il sistema di trattamento SNCR dell'impianto analizzato è composto da:

- un *serbatoio* di accumulo e stoccaggio dell'ammoniaca in forma anidra (per la sperimentazione oggetto di questo studio è stato progettato e realizzato un sistema di dosaggio ed adduzione della forma di soluzione liquida);
- un sistema di *tubazioni* per la somministrazione e il trasporto del reagente fino al punto di immissione;
- un sistema di *tubazioni per l'immissione di vapore di trasporto*, proveniente dal sistema di generazione vapore o dallo spillamento della turbina e avente funzione di nebulizzazione e trasporto in forno dell'ammoniaca;
- un *sistema di immissione* del reagente all'interno della zona di processo, a vari *stadi di immissione* a diversa altezza della camera di post-combustione, ciascuno equipaggiato con 2 gruppi di 4 lance iniettori disposti l'uno di fronte (per un totale di 24 lance), in grado di operare alternativamente a seconda dell'altezza desiderata;
- un *equipaggiamento di regolazione e controllo* delle portate e delle quantità immesse;
- un *sistema di controllo in remoto* e di allarmi per segnalare eventuali anomalie;
- un complesso di *misure di sicurezza* per gli operatori e per la prevenzione e lo spegnimento di incendi (soprattutto per il sistema anidro).

Allo stato attuale, tale sistema di abbattimento degli NO_x è utilizzato quasi esclusivamente nella modalità di somministrazione dell'*ammoniaca anidra*, essendo

tale configurazione la prima ad essere stata installata, e potendo contare sia su un apparato tecnologico ampiamente più sviluppato (ivi comprese le misure di regolazione e controllo), sia un livello di conoscenza e confidenza maggiore da parte degli operatori dell'impianto. L'ammoniaca anidra, a temperatura e pressione normale, è presente come gas incolore più leggero dell'aria. Il suo stoccaggio, in ossequio alle prescrizioni di sicurezza di specifiche autorizzazioni, avviene in un *serbatoio d'accumulo in acciaio*, dalla capacità complessiva di circa 8000 litri, posizionato su ancoraggi in grado di bilanciare le oscillazioni dovute all'azione del vento, e le vibrazioni prodotte da eventuali eventi sismici. Un vaporizzatore di 8 kW di potenza dislocato nelle adiacenze pressurizza il reagente ad un valore minimo di 4 bar, in modo da consentire lo stoccaggio in pressione dell'ammoniaca in forma di liquido, a beneficio di sicurezza, per un volume di riempimento massimo dell'85%. Tale serbatoio è inoltre costituito di materiale *flottante*, in grado, cioè, di adattarsi alle espansioni termiche a cui sono sottoposti i vapori di ammoniaca in equilibrio dinamico con il liquido, per effetto del riscaldamento atmosferico e dell'irraggiamento solare (soprattutto nei giorni più caldi).



Figura 6.7: serbatoio di accumulo e vaporizzatore per l'ammoniaca anidra.

In uscita dal serbatoio, l'ammoniaca anidra allo stato liquido è riportata alla forma gassosa dal *vaporizzatore*, il quale, attraverso un sistema di riscaldamento costituito da resistenze nelle quali passa olio diatermico, controlla che la temperatura delle tubazioni non scenda eccessivamente per effetto dell'espansione del gas, evitando il congelamento dei materiali e la condensa dell'ammoniaca anche nei giorni di maggiore freddo. Una *valvola regolatrice*, inoltre, riduce la pressione del vapore di ammoniaca a

1,4 bar, alla quale il reagente è inviato per il suo utilizzo nella sezione di trattamento. Il dosaggio dell'ammoniaca anidra avviene in remoto dalla sala di controllo, tramite una *valvola regolatrice del flusso*, mossa da un segnale digitale di 4-20 mA, la quale regola a piacimento l'apertura di un orifizio misuratore. Tale orifizio è tarato per consentire uno scarto di dosaggio di ammoniaca corrispondente ad una pressione di 0,125 bar, ed è in grado, tramite un trasmettitore di flusso, di inviare alla sala di controllo, a mezzo di un analogo segnale digitale da 4-20 mA, la misura di portata di ammoniaca che lo attraversa in tempo reale. L'interruzione del flusso di ammoniaca può essere effettuata o chiudendo del tutto l'orifizio misuratore, o attraverso una *valvola di arresto*, che può essere azionata sia localmente che in remoto, la quale ordina il disinnescamento del vaporizzatore. Tanto la valvola regolatrice del flusso quanto quella d'arresto sono dotati di un dispositivo pneumatico di arresto in caso di emergenza. Le tubazioni che ospitano l'ammoniaca, infine, sono costituite in acciaio inossidabile, onde contrastare l'azione corrosiva del reagente.



Figura 6.8: valvola regolatrice del vapore (a sinistra) e lance di immissione dell'ammoniaca (a destra)

La miscelazione dell'ammoniaca e del vapore di trasporto avviene in prossimità della camera di post-combustione, dove si intende realizzare il trattamento. Tale vapore è addotto dalla produzione o dallo spillamento della turbina alla pressione di 4 bar circa e 170°C, per un dosaggio massimo di 400 kg/h. L'immissione del vapore di trasporto è regolata secondo le quantità desiderate da una *valvola regolatrice di flusso*, la quale deve essere manipolata a mano direttamente sul campo, che invia alla sala controllo il solito segnale 4-20 mA per la determinazione della portata. La presenza di una *valvola*

di non ritorno impedisce all'ammoniaca di occupare la tubazione adibita al trasporto del solo vapore.

A valle del punto di miscelazione, una seconda tubazione, di lunghezza sufficiente per permettere la corretta miscelazione del vapore con l'ammoniaca, porta il reagente al punto di immissione predisposto (ad uno dei 3 livelli di altezza desiderato), da dove è immesso in camere di post-combustione da un sistema di 2 gruppi di 4 iniettori a lance, i quali aumentano la velocità e la turbolenza della miscela e consentono un maggiore e più uniforme investimento della corrente dei fumi in transito. Tutti i collettori degli stadi e ciascuna lancia d'immissione sono dotati di valvole manuali per la messa in servizio del singolo stadio.

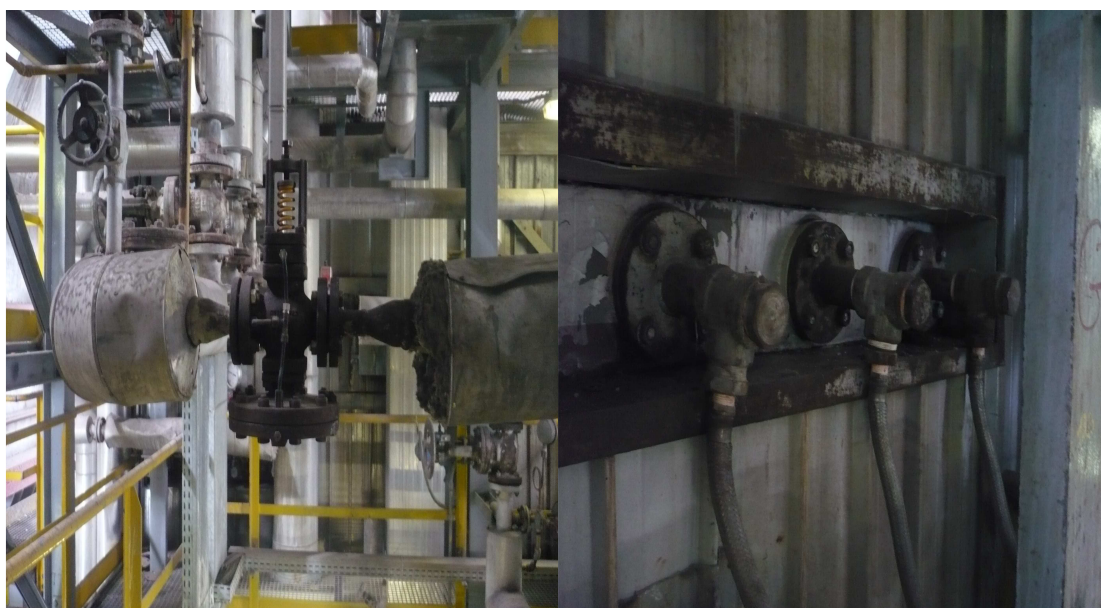


Figura 6.9: valvola regolatrice del vapore e lance di immissione dell'ammoniaca.

I 3 stadi di immissioni dell'ammoniaca oggetto d'indagine trovano locazione nel primo giro fumi in caldaia (ossia la prima sezione che i fumi attraversano in uscita dalla camera di post-combustione), a breve distanza l'uno dall'altro. Opportuni sensori costituiti da termocoppie (vari per ogni stadio) monitorano in continuo il valore della temperatura in prossimità della zona di trattamento, al fine di assicurare che le reazioni di rimozione non-catalitica avvengano nel corretto range di temperatura.

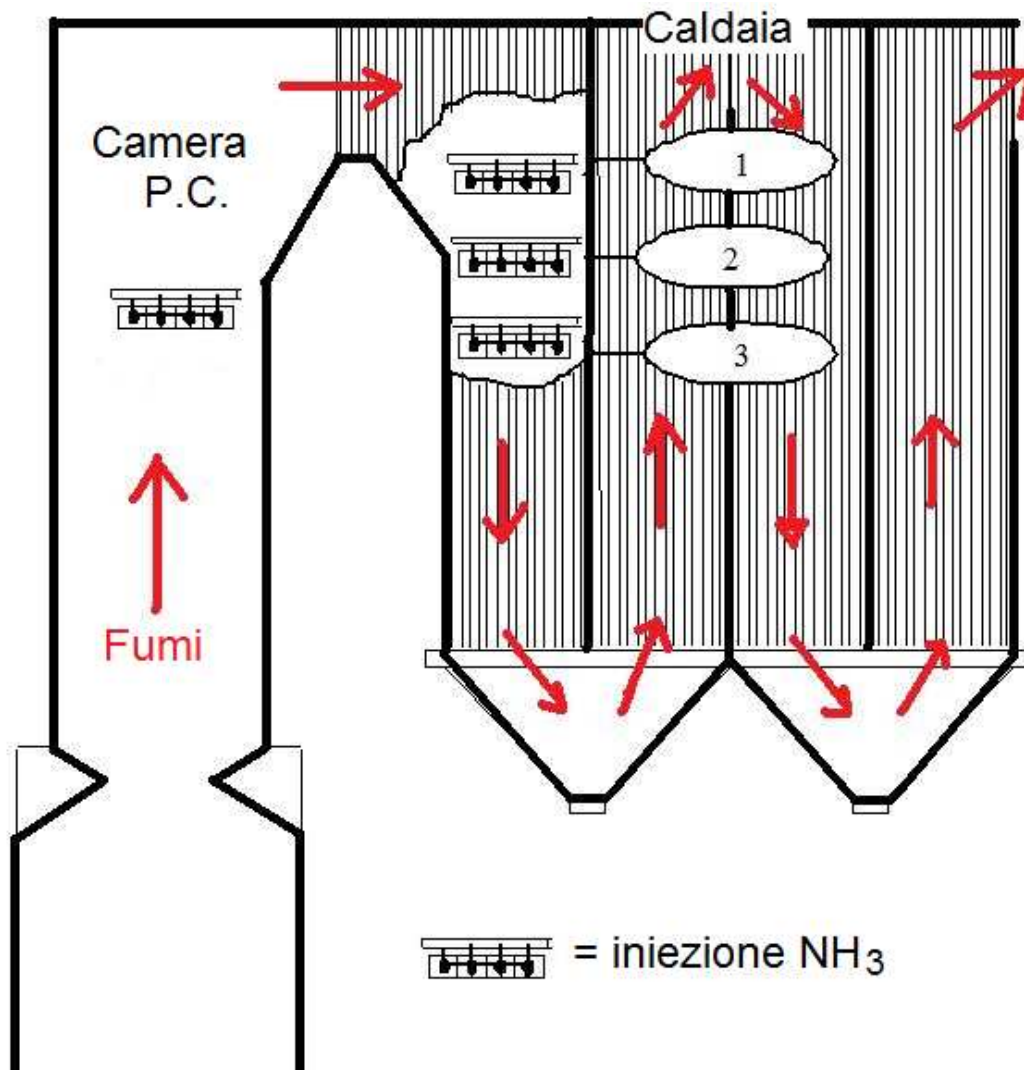


Figura 6.10: Schematizzazione della camera di post combustione, della caldaia, del flusso dei fumi e del posizionamento dei punti di iniezione ammoniacale

I punti di iniezione 1, 2 e 3 sono stati tutti indagati in questo studio. Il punto di immissione in camera di post combustione fu analizzato già in precedenti studi ed escluso dalle successive sperimentazioni in ragione della bassa efficienza di rimozione già riscontrata. Per analoghe considerazioni fu scartato 4° livello di iniezione più in basso.

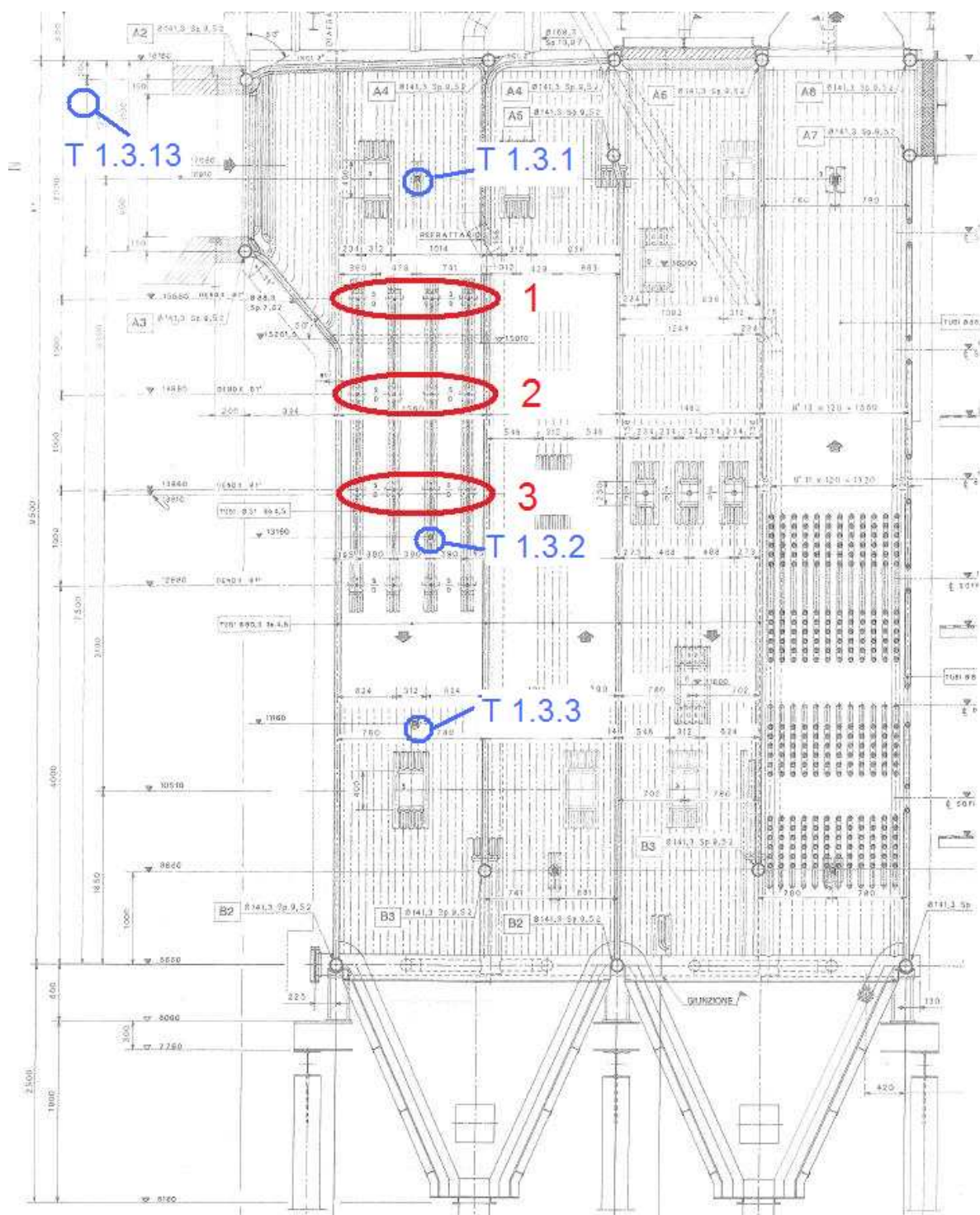


Figura 6.10: Sezione della caldaia con indicazione dei punti di iniezione e delle posizioni delle termocoppie utilizzate per il rilievo delle temperature

La termocoppia T 1.3.13 è di riferimento in post combustione, le termocoppie T1.3.1, T1.3.2 e T1.3.3 sono nel primo giro fumi della caldaia.

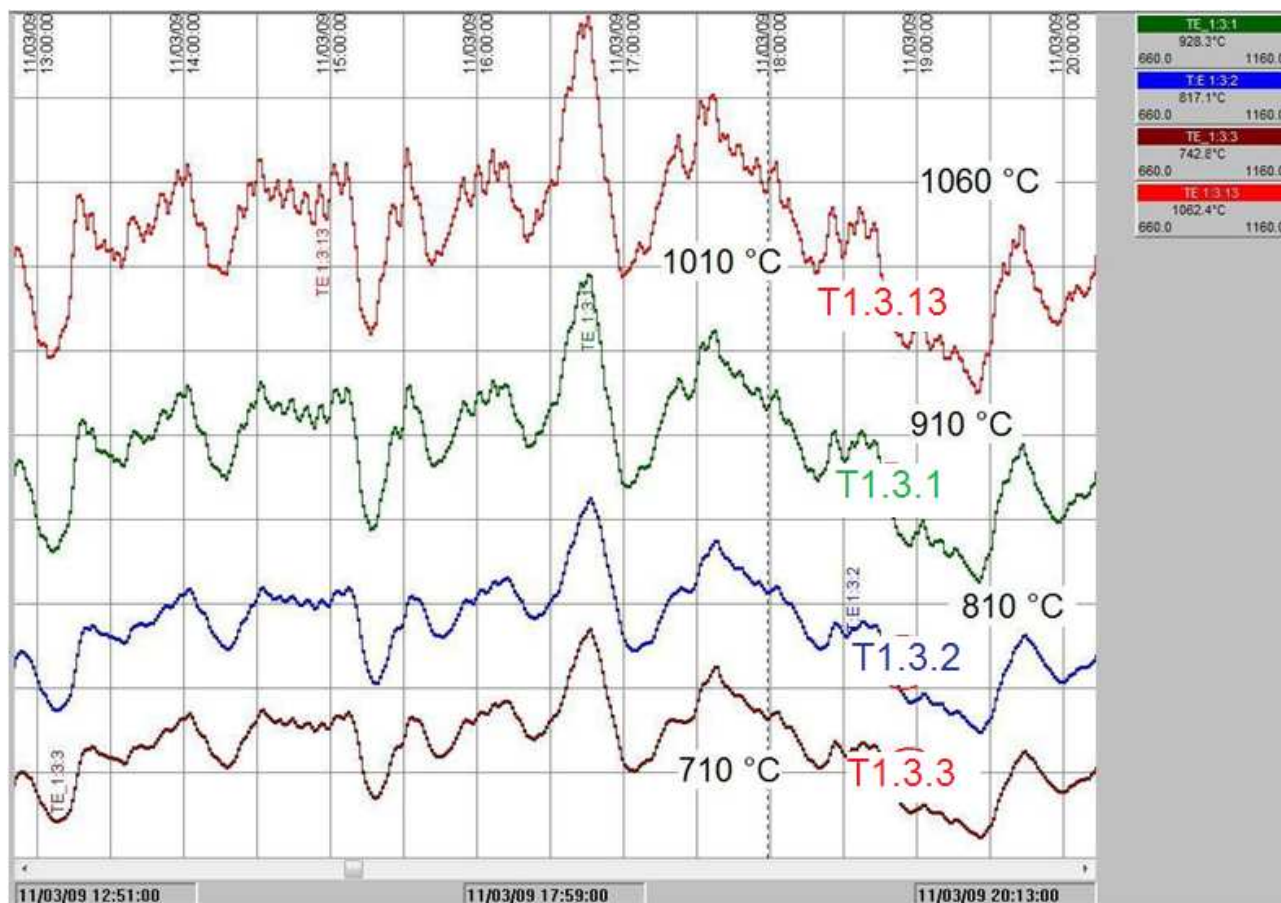


Figura 6.11: Andamento nel tempo tipico delle temperature rilevate dalle termocoppie d'impianto (1 div. = 30 minuti)

6.4 Il sistema di analisi dei fumi in uscita al camino.

Il controllo delle emissioni di inquinanti e delle prestazioni dei processi di combustione e trattamento è realizzato con l'ausilio di un complesso *sistema di analisi e monitoraggio dei fumi*, il quale fornisce, in tempo reale, i valori delle concentrazioni istantanee rilevate nella corrente in uscita, e dei parametri generici (portata, temperatura, pressione, umidità e concentrazione di ossigeno) che caratterizzano l'effluente in quel dato momento. Tale sistema prevede l'applicazione di un'*unità analitica* preposta all'analisi "a caldo" di tutti i componenti, supportata da un sistema di acquisizione, elaborazione e trasmissione dei dati monitorati, per il controllo in remoto e in tempo reale dei parametri e dei valori impostati. Più nello specifico, il sistema di analisi fumi si compone di varie sezioni:

- un *sistema di prelievo e trattamento del campione*, situato in prossimità della canna del camino, il quale estrae in continuo dalla corrente un campione di fumi, e lo invia all'unità analitica per la determinazione dei parametri;
- un' *unità analitica di tipo FTIR (Fourier Transform Infra-Red, o spettroscopia infrarossa)*, basata sul principio di misura a trasformata di Fourier, il quale analizza, in un pozzetto “a caldo” situato alla base del camino, il campione di fumi inviati dal prelievo, e fornisce in tempo reale i risultati al sistema di acquisizione;
- un *sistema di gestione, acquisizione ed elaborazione dei dati* rilevati in continuo, realizzato a mezzo software (denominato *EDA2003*) per il monitoraggio remoto in sala controllo.

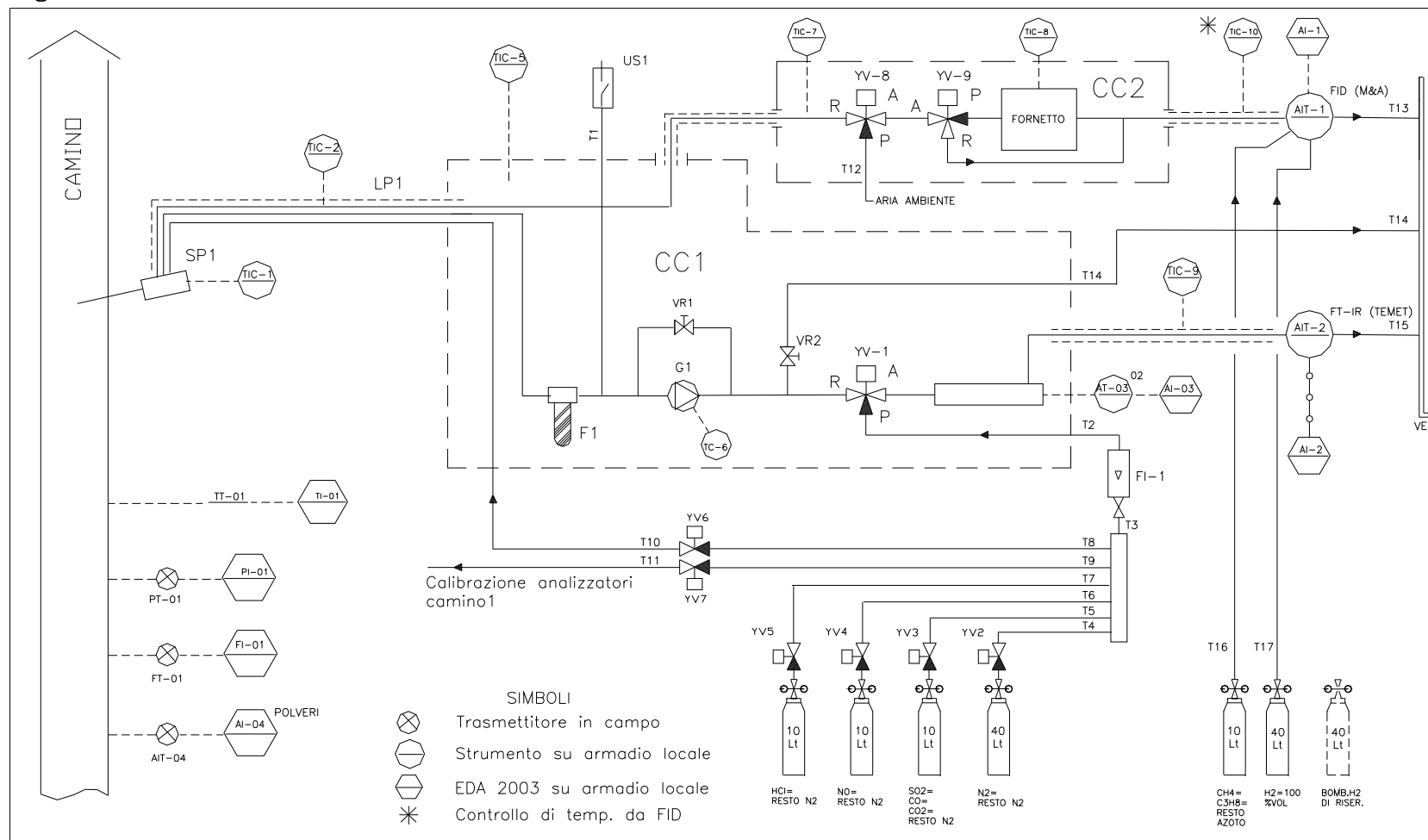
Il sistema di analisi *FTIR* sfrutta il principio dell'assorbimento di una radiazione luminosa da parte degli elementi presenti nella corrente gassosa, i quali, a seconda della loro natura, sono in grado di reagire con particolari lunghezze d'onda presenti nel segnale. Poiché ad ogni sistema molecolare è associata una distribuzione caratteristica dei livelli energetici (elettronici, vibrazionali, rotazionali), l'assorbimento di una data frequenza è una proprietà caratteristica di quel sistema e non di altri, sicché è possibile, nota la radiazione emessa dal sistema e misurata la radiazione dopo l'attraversamento della corrente, individuare le concentrazioni delle sostanze che hanno contribuito all'assorbimento delle diverse lunghezze d'onda. Lo spettro nel dominio del tempo della corrente analizzata così ottenuto può essere successivamente codificato mediante la *trasformata di Fourier*, che scompone il segnale nelle diverse frequenze che lo costituiscono e restituisce lo *spettro nel dominio delle frequenze*, ossia “l'impronta” caratteristica che la corrente gassosa e i composti in essa presenti lasciano al passare della radiazione. La correlazione tra le bande di assorbimento all'infrarosso e i composti sensibili a quelle lunghezze d'onda permette la determinazione qualitativa e quantitativa delle concentrazioni presenti. Il sistema presente in impianto emette una radiazione infrarossa modulata da un interferometro a lunghezze comprese tra i 900 e i 4200 cm^{-1} , tale da investire tutta la regione spettrale di assorbimento dei composti ricercati e fornire l'interferogramma della corrente, successivamente scomposto dal software di gestione (denominato *Calcmct*) per l'analisi contemporanea degli elementi.

Una volta acquisiti i dati, l'analizzatore FTIR comunica, tramite collegamento seriale, le rilevazioni effettuate al software di gestione e monitoraggio in remoto, denominato

EDA2003, con frequenza di 1 set di misure calcolate ogni minuto. Il sistema considera, cioè, per ogni set di dati, i 60 secondi che vanno dal secondo 00 al secondo 59, ed archivia un valore medio del minuto considerato. L'archivio delle medie minuto è ciclico e mantiene in memoria sempre gli ultimi 40 giorni di dati grezzi. Successivamente, i dati così immagazzinati sono elaborati secondo le indicazioni previste dalla normativa vigente (il già citato D.Lgs 133/05) e dagli enti di controllo. Al termine della mezz'ora di ogni ora (minuto 29 e 59 secondi e minuto 59 e 59 secondi) il sistema calcola la media dei dati elementari acquisiti nell'intervallo di tempo (1800 in caso di frequenza di acquisizione di 1 secondo). Il dato semiorario che viene archiviato è pari al valore della media sottratto il valore percentuale dell'*indice di confidenza al 95%*, configurabile nel software per ogni singolo parametro. Tale valore dell'indice di confidenza è espresso come percentuale riferito alla misura complessiva, e rimane fissato fino alla successiva verifica di linearità. Il dato semiorario così elaborato è valido se almeno il 70% dei dati elementari misurati è valido. Al termine di ogni ora (minuto 59 e 59 secondi), il sistema calcola la media dei dati elementari acquisiti nell'intervallo di tempo (3600 in caso di frequenza di acquisizione di 1 secondo) ed archivia il dato così calcolato nell'archivio delle medie orarie. Le medie orarie vengono suddivise in 3 archivi, costituiti dai dati *tal quali*, dati *normalizzati*, dati *normalizzati e corretti in ossigeno*. Anche il dato orario è valido se almeno il 70% dei dati elementari misurati è valido; viceversa, il dato istantaneo definito "invalido" non concorre in alcun modo all'elaborazione di estrazione del dato semiorario/orario finale.

La visualizzazione degli andamenti e delle concentrazioni è resa possibile dalle finestre grafiche del software di controllo EDA2003. Il monitoraggio in remoto delle emissioni avviene tanto dalla sala controllo posta nelle vicinanze dell'impianto, quanto dagli uffici della direzione e dei responsabili di impianto. Gli archivi, composti secondo le prescrizioni della normativa, rimangono a disposizione degli enti di controllo per le periodiche verifiche previste dalla legge.

Figura 6.12 Schema del sistema di analisi



Capitolo VII: Sperimentazione e risultati

7.1 generalità

Le implicazioni ambientali e di sicurezza connesse all'utilizzo della forma anidra esposte negli obiettivi specifici della ricerca che hanno spinto l'azienda a valutare la possibilità di sostituire tale configurazione con la meno pericolosa modalità di ammoniacale in *soluzione liquida* sono state a costante riferimento durante tutte le fasi della sperimentazione

Essendo comunque condizione necessaria che la modifica garantisse sempre il rispetto dei parametri ambientali, e quindi valori di abbattimento degli ossidi di azoto, uguali o migliori di quelli ottenibili con l'attuale sistema, sono state indagate le *diverse condizioni operative*.

La sperimentazione si è svolta in 2 fasi e tempi successivi:

- nella prima fase sono stati comparati i 2 reagenti nelle stesse condizioni operative, alternandone l'utilizzo a breve distanza di tempo e ricercando differenti - ma per quanto possibile stabili - condizioni operative;
- nella seconda fase, dopo aver appurato l'efficacia del reagente in forma ammoniacale, si è cercato di ottimizzare il funzionamento di questo sistema, lavorando intorno all'ottimalità già grossolanamente individuata nella prima fase ed aggiungendo come elemento innovativo anche aria.

Il costo delle due forme è comparabile anche se risente delle variazioni di produzione a livello internazionale. Recentemente è stato chiuso lo stabilimento Yara (unico produttore in Italia) di Terni, ed è rimasto operativo solo lo stabilimento di Ferrara.

7.2 sintesi delle innovazioni introdotte nel sistema sperimentale

Le attuali soluzioni tecnologiche presenti prevedono tutte, oltre al reagente in forma liquida o gassosa, un fluido di trasporto atto a favorire la dispersione del reagente nel flusso dei fumi da trattare.

I sistemi possono essere così suddivisi:

Reagente	Fluido di trasporto	Utilizzo impiantistico
Ammoniaca anidra	vapore	Attualmente adottato nell'impianto studiato ed in altri impianti simili
Ammoniaca soluzione acquosa	Acqua + aria	Attualmente esistente e proposto dai fornitori di sistemi commerciali (2 soli fornitori noti in Europa)
Ammoniaca soluzione acquosa	Vapore Vapore + aria	Non nota l'adozione in altri impianti ed oggetto della sperimentazione

La sperimentazione ha consentito di verificare in scala reale una soluzione alternativa importante per un eventuale revamping a costi modesti dell'impianto esistente sfruttando i sistemi di iniezione già installati e testati dal punto di vista dell'affidabilità nel tempo.

Per la sperimentazione, la linea di somministrazione dell'ammoniaca liquida è stata realizzata in forma semi-sperimentale. La soluzione di ammoniaca al 25% è stoccata in serbatoi cubici in materiale plastico dalla capacità di 1000 litri, i quali sono accumulati direttamente in impianto. Quando si vuole adottare la configurazione liquida, tali serbatoi vengono collegati tramite un semplice tubo di presa ad una *pompa volumetrica*. All'uscita della pompa, un *flussimetro* permette di determinare la portata istantanea della pompa e verificare il corretto svolgimento del processo.

Nella figura seguente una schematizzazione del complesso del sistema sperimentale messo a punto.

Figura 7.1 Schema del sistema di iniezione

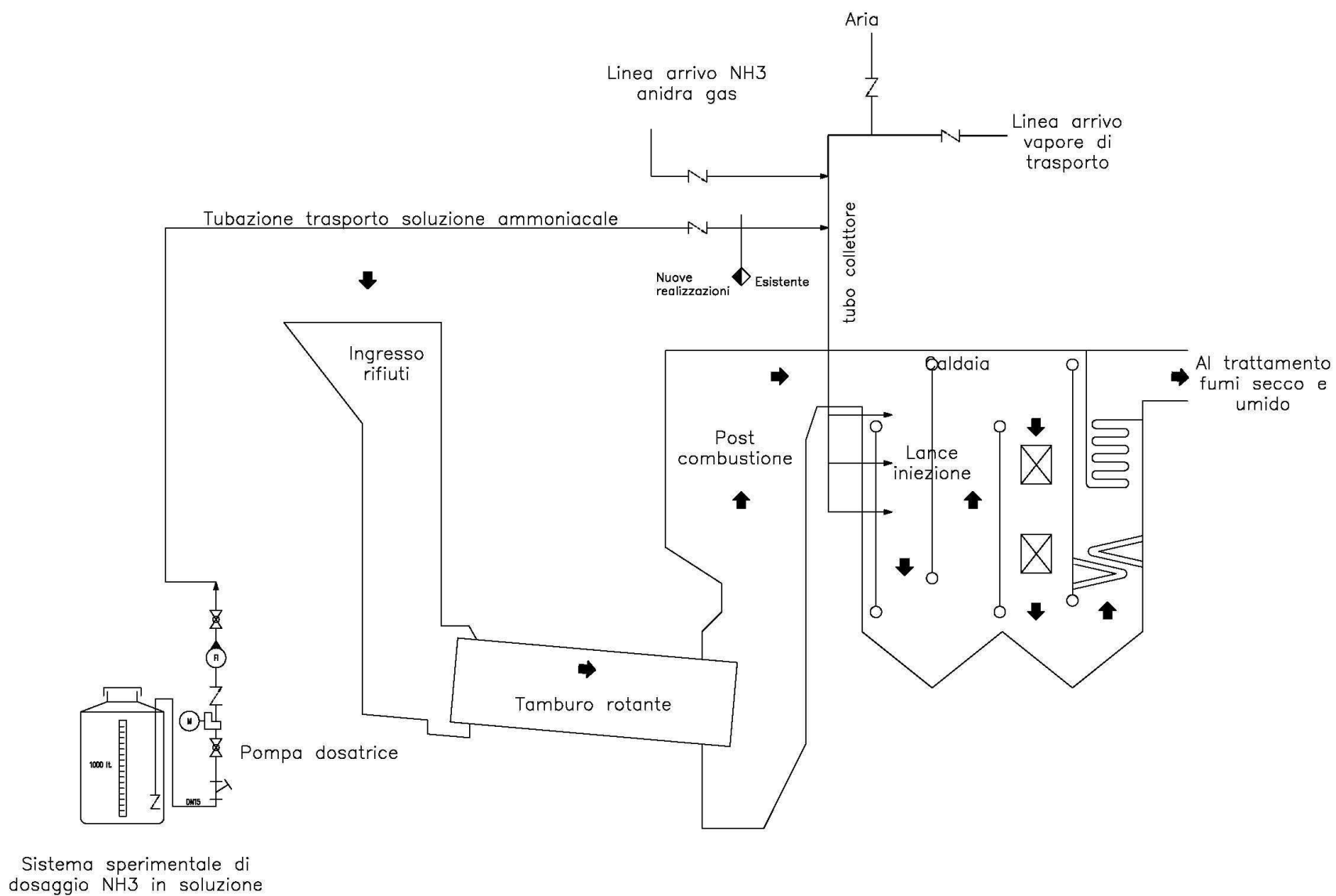




Figura 7.2: serbatoio di accumulo della soluzione di NH_3 e pompa elettromagnetica con flussimetro

Il sistema di immissione dell'ammoniaca liquida non dispone ancora di un controllo in remoto dalla sala controllo, sicché le regolazioni del dosaggio di soluzione (ossia, in ultima istanza, del numero di impulsi della pompa) deve avvenire in campo direttamente al sistema di regolazione analogico. La miscelazione della soluzione con il vapore di trasporto (la cui adduzione avviene con modalità del tutto analoghe a quelle descritte per l'ammoniaca anidra) non può essere ad oggi effettuata con l'apertura e chiusura di valvole, dal momento che la tubazione dell'ammoniaca liquida è costituita da un singolo stacco collegato ad un solo stadio di lance alla volta, e non possiede ancora derivazioni per tutti i collettori.

Nella fase sperimentale la variazione del punto di immissione, dunque, deve avvenire necessariamente con interruzione del flusso, e spostamento dello stacco sul collettore desiderato. L'immissione nel flusso dei fumi avviene con l'ausilio delle stesse lance di iniezione, con modalità già descritte per l'ammoniaca anidra.

Il sistema di somministrazione dell'ammoniaca in soluzione acquosa, dunque, manca ancora una strumentazione completa e definitiva, dal momento che tuttora richiede, al fine di passare alla fase operativa finale, una conoscenza più approfondita delle sue prestazioni e dei dosaggi ottimali di reagente. Tale operazione è svolta all'interno delle prove sperimentali condotte sul campo, i cui risultati sono mostrati nei capitoli successivi, e il cui obiettivo è verificare la fattibilità tecnica ed economica della sostituzione dei 2 sistemi di somministrazione dell'ammoniaca.

7.3 esecuzione delle prove sperimentali

Le prove sperimentali in campo, dovendosi svolgere su un impianto in esercizio, hanno dovuto tenere conto delle situazioni impiantistiche ed operative contingenti. Questo anche allo scopo di trovare le condizioni che permettessero di rendere comparabili le condizioni al contorno e limitare ulteriori elementi di aleatorietà.

Esse si sono svolte in due fasi successive.

Una prima fase tra fine 2006 ed inizio 2007 in cui si sono sperimentate le soluzioni con il solo vapore come fluido di trasporto utilizzando sia ammoniaca in soluzione acquosa che in forma anidra.

Una seconda fase, che ha beneficiato dei risultati delle prime prove e delle esperienze pratiche acquisite, si è svolta nella seconda metà del 2008 ed ha previsto l'utilizzo congiunto anche di aria compressa.

La camera di passaggio dei fumi, dove le lance iniettano l'ammoniaca, ha dimensione trasversale di 1,5 x 3,5 metri.

Le 8 lance di immissione per ogni livello sono situate in numero di 4 per ognuno dei lati più corti.

La prima fase sperimentale ha anche permesso di constatare, che nelle condizioni pratiche aveva rilevanza anche l'elemento pressione di iniezione, correlato prevalentemente alla portata vapore in maniera non lineare e non quadratica (come per un fluido in cui la perdita di carico è legata al quadrato della portata) in quanto alla pressione, per il sistema tecnologico esistente, è associata la temperatura vapore che crea un'espansione dello stesso e quindi incremento di perdite di carico.

Per l'analisi dei dati è stato utilizzato il sistema di misura presente, costantemente sottoposto a manutenzioni, tarature e verifiche di linearità previste per legge e quindi garantito in termini di accuratezza dei risultati.

Le prove sono state eseguite alternando fasi di immissione di ammoniaca seguite da fasi di interruzione del flusso, selezionando periodi di stabilità delle condizioni di esercizio. Questo ha consentito di eliminare completamente le incertezze e gli errori strumentali dovuti all'eventuale utilizzo di 2 tipologie di strumentazione differenti

La strumentazione utilizzata è stata pertanto sempre la stessa: il sistema di analisi fumi al camino descritto al capitolo precedente.

7.4 Risultati fase 1 – confronto tra NH_3 e NH_4OH

La sintesi dei risultati numerici viene riportata in 2 tabelle in appendice, la tabella A3.1 per l'ammoniaca in forma anidra (NH_3) e la tabella A3.2 per la soluzione acquosa (NH_4OH).

I risultati grafici sono:

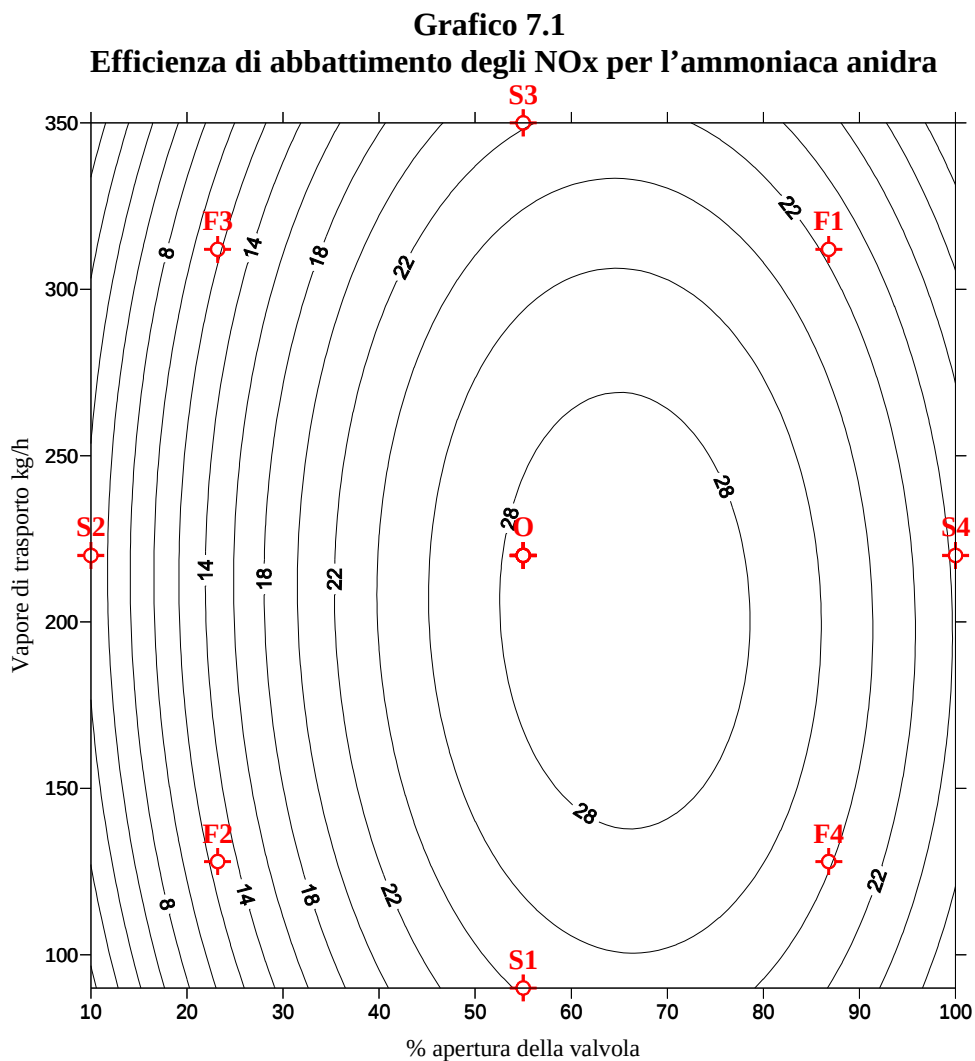
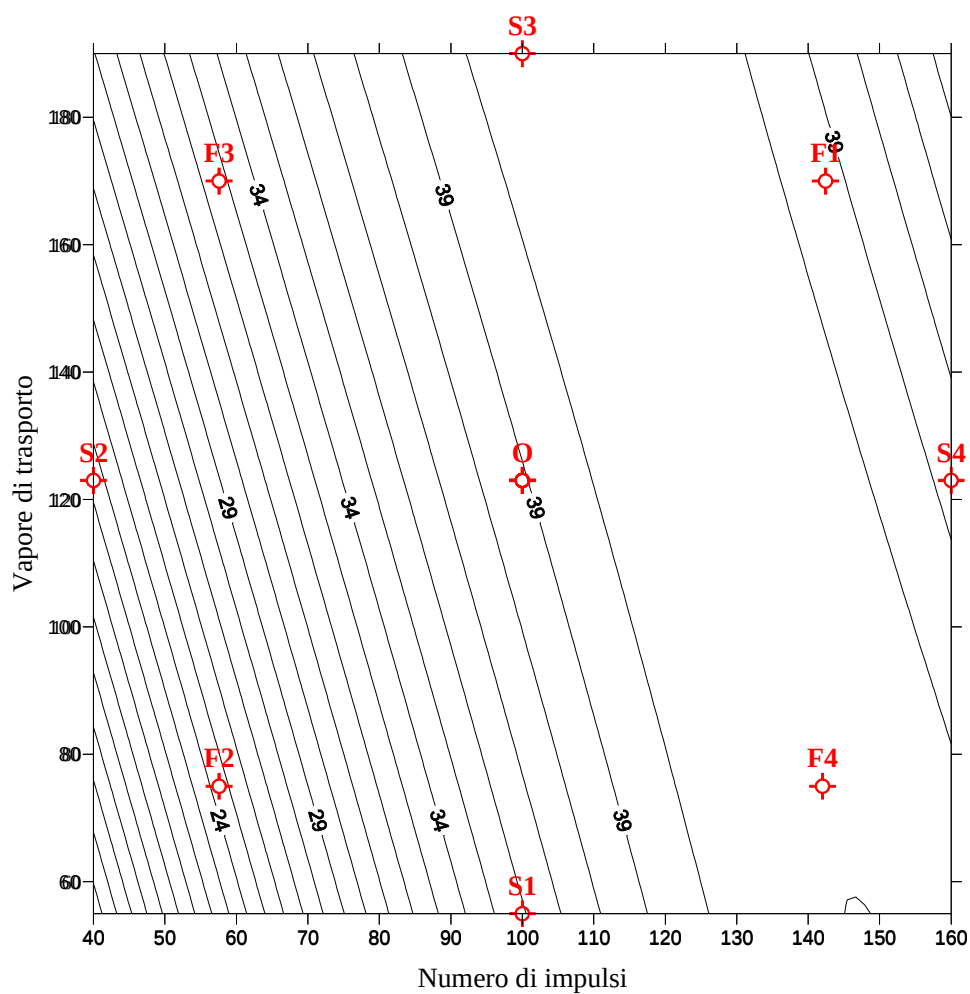
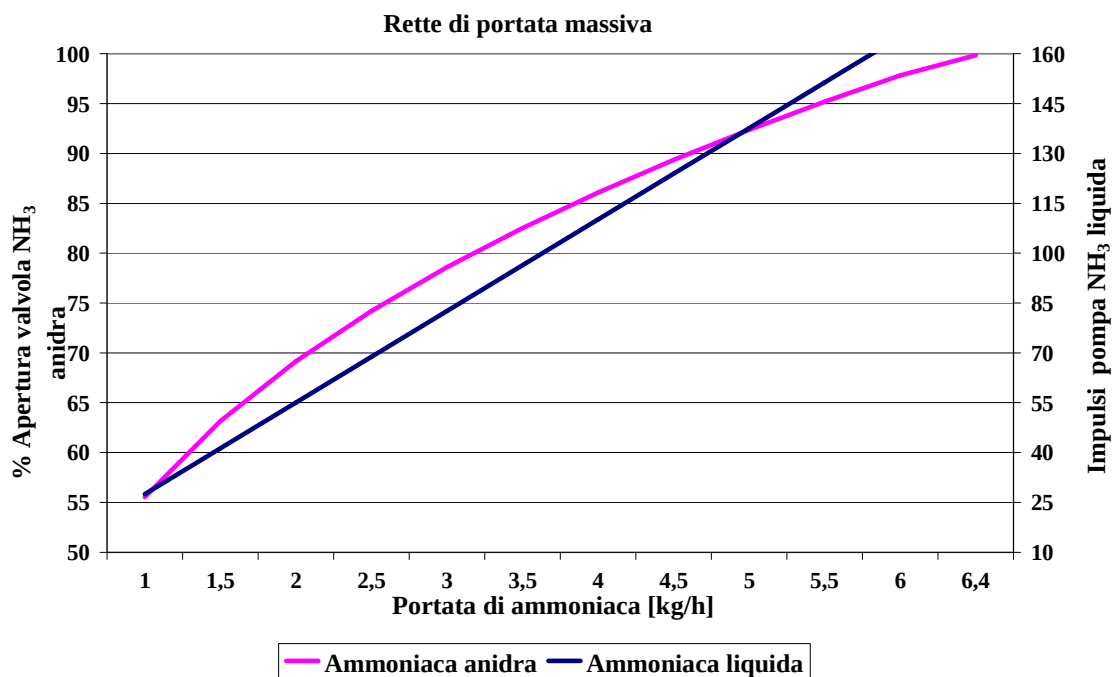


Grafico 7.2

Efficienza di abbattimento degli NOx per l'ammoniaca soluzione acquosa

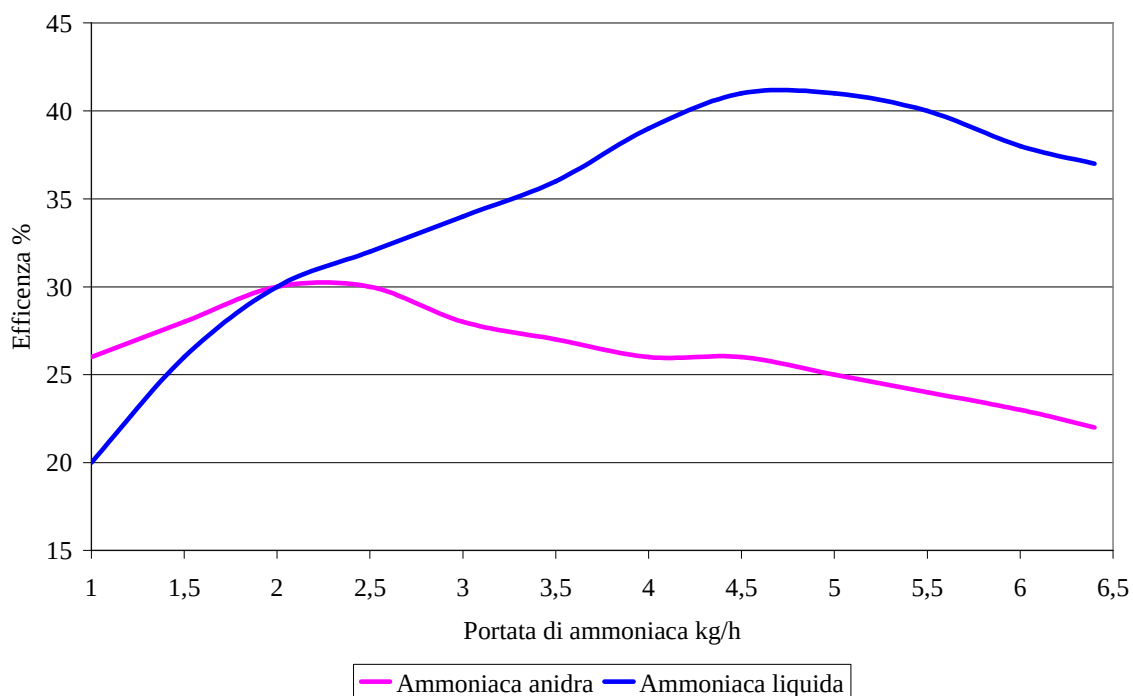


Effettuando le misure e verifiche sui sistemi di dosaggio e calcolando le rispettive portate massiche si è ottenuta la seguente correlazione.



Si è potuto pertanto rapportare la portata di ammoniaca in kg/h per entrambi i sistemi e comparare le efficienze di rimozione ottenute.

Grafico 7.4
Confronto efficienza di abbattimento degli NO_x per le forme anidra e soluzione acquosa



7.5 Analisi dati fase 2 - analisi statistica per ammoniacca liquida

Con l'ausilio dell'approccio statistico, si è detto, si è inteso verificare l'entità e l'intensità delle relazioni che legano la variabile di interesse (ossia la *concentrazione di NO_x* in uscita dal camino), con i parametri indipendenti scelti per l'analisi, per i quali è supposta inizialmente una certa interazione con il processo oggetto di studio.

L'equazione di regressione generica è la seguente:

Allo stesso tempo, gli strumenti messi a disposizione dal metodo di analisi, descritto in appendice, consentono di accertare, contemporaneamente alla costruzione del *modello di regressione multipla*, avente la seguente espressione generica:

$$NO_x = \beta_1 + \beta_2 NO_{*IN} + \beta_3 NH_3 + \beta_4 O_2 + \beta_5 O_2 PC + \beta_6 Temp PC + \beta_7 Portata + \beta_8 H_2O,$$

la presenza di quegli elementi che, in termini probabilistici, meno sono atti a spiegare il fenomeno e l'entità della formazione degli inquinanti, in modo da poterli scartare nel modello definitivo.

Per inciso si vede l'assenza di alcuni elementi che, pur essendo presenti nei modelli previsionali teorici, non avrebbero avuto ragione di essere inseriti (esempio il CO che risulta essere praticamente sempre nullo).

Allo stesso modo sono presenti elementi che non appaiono nei modelli direttamente o nelle formule chimiche ma che, se significativi, indicherebbero comunque una qualche influenza diretta o indiretta, sia come causa che come effetto.

Tale verifica di correlazione si traduce, in ultima istanza, nell'elaborazione di un'*equazione di regressione finale*, la quale contiene solo le variabili indipendenti che, a partire dall'insieme iniziale, esercitano un'influenza significativa (in termini statistici) sull'andamento delle concentrazioni di ossidi d'azoto rilevati al camino, ossia possiedono una maggiore capacità esplicativa delle complesse dinamiche di formazione e rimozione di questa specie inquinante.

Prima di procedere all'analisi statistica in senso stretto, è opportuno verificare, a partire dal data set completo delle rilevazioni effettuate per tutte le condizioni di prova, che le variabili scelte come indipendenti nel processo siano realmente tali, ossia che non sussistano tra esse relazioni di dipendenza reciproca, che ne rendano superflua l'analisi congiunta. Tale verifica, come è noto, può essere facilmente effettuata indagando l'entità della *correlazione* che sussiste tra le diverse variabili indipendenti inizialmente selezionate, considerando, di volta in volta, una coppia di tali elementi. Il valore della correlazione, infatti, indica la probabilità che tra le due variabili considerate sussista una

relazione di tipo lineare, ossia che una delle due possa essere in realtà espressa come *combinazione lineare* dell'altra. Esso varia tra gli estremi **-1**, quando sussiste perfetta *correlazione inversa* (ossia variando una variabile in un senso l'altra varia in senso inverso), e **+1**, quando sussiste *correlazione diretta* (ossia le due variabili variano nello stesso senso), mentre vale **0** in caso di *correlazione nulla*. Nei casi in cui sussista correlazione (sia diretta che inversa), dunque, la variabile correlata non può essere più considerata una variabile indipendente (essendo esprimibile in dipendenza di un'altra), e non deve entrare a far parte delle successive fasi di analisi. Viceversa, valori di correlazione relativamente bassi assicurano la reciproca indipendenza delle variabili, e la necessità di proseguire la costruzione del modello senza eliminarne alcuna. La tabella di seguito mostra i risultati dell'analisi preliminare di correlazione, effettuata con l'ausilio del software di elaborazione statistica "R.2.7.1":

	NH3	NOxIN	TempPc	O2	O2Pc	H2O	PORTATA
NH3		0,68	-0,05	0,07	0,05	0	-0,04
NOxIN	0,68		0,28	0,02	-0,12	0,11	-0,12
TempPc	-0,05	0,28		-0,15	-0,37	0,06	-0,14
O2	0,07	0,02	-0,15		<u>0,94</u>	-0,62	0,74
O2Pc	0,05	-0,12	-0,37	<u>0,94</u>		0,11	0,29
H2O	0	0,11	0,06	-0,62	0,11		<u>0,91</u>
Portata	-0,04	-0,12	-0,14	0,74	0,29	<u>0,91</u>	

Tabella 7.1: matrice di correlazione tra le variabili indipendenti inizialmente considerate.

Come si vede dalla matrice di correlazione, non tutte le variabili inizialmente selezionate possono considerarsi reciprocamente indipendenti. Valori prossimi all'unità, infatti, sono rilevati tra la percentuale di *ossigeno* nei fumi in uscita e la percentuale di *ossigeno in post-combustione*, e tra la *portata* dei fumi che attraversano le sezioni di trattamento e *contenuto di acqua (umidità)* in essi presente, espressa come percentuale volumetrica rispetto all'uscita totale. Ciò significa che una delle due variabili delle coppie può essere espressa come combinazione lineare dell'altra, e quindi non può essere considerata come variabile a sé stante nelle successive fasi di analisi. D'altro canto, i risultati dell'analisi di correlazione sembrano seguire una logica sensata, nella misura in cui è lecito attendersi una relazione forte tra la percentuale di ossigeno post combustione, e la percentuale dello stesso elemento che si incontra nei fumi all'emissione finale, in virtù di eventuali ingressi indebiti nelle varie unità di trattamento

fumi. Anche per l'umidità è lecito attendersi la dipendenza con la portata, in quanto, all'aumentare del volume dei fumi in combustione, il volume dell'acqua in emissione aumenta proporzionalmente, per effetto della *saturazione* che gli stessi fumi subiscono nel passaggio attraverso lo *stadio di trattamento ad umido*, prima dell'espulsione in atmosfera. Per questi motivi, nelle successive fasi di analisi si è deciso di non considerare i valori della variabile "O2PC", e dei valori della variabile "H2O", la cui influenza (presumibilmente di raffreddamento della miscela gassosa) rientra tra gli effetti complessivi dell'intera portata dei fumi.

In definitiva, il modello di regressione multipla iniziale sarà espressa dall'equazione:

$$NO_x = \beta_1 + \beta_2 NO_{xIN} + \beta_3 NH_3 + \beta_4 O_2 + \beta_5 TempPC + \beta_6 Portata$$

ove i coefficienti $\beta_{1,2,...,6}$ rappresentano i *coefficienti di regressione* del modello, essendo $i = 1,2...6$ la successione intera delle variabili considerate. Come si è detto, il primo coefficiente β_1 rappresenta l'intercetta del modello, mentre gli altri coefficienti, di pendenza, costituiscono le derivate parziali della variabile indipendente NO_x rispetto a ciascuna delle variabili esplicative x considerate. L'equazione così proposta richiede dunque la stima di **6** coefficienti di regressione; i paragrafi seguenti riportano i risultati dell'elaborazione e della procedura di eliminazione backward, eseguita con il software statistico, per ciascuno degli stadi di immissione dell'ammoniaca liquida, e per il complesso dei dati rilevati.

7.5.1 Risultati per lo stadio di iniezione 1 (alto)

L'elaborazione statistica dei dati rilevati per il primo stadio di immissione dell'ammoniaca nella zona di trattamento (ossia il primo incontrato dalla corrente gassosa) restituisce il seguente modello di regressione iniziale:

MODELLO INIZIALE STADIO 1		
	<i>B</i>	<i>p-valore</i>
(intercetta)	-4.206e+02	3.45e-13
NOxIN	5.576e-01	<2e-16
NH₃	-3.516e+00	1.3e-14
Temp.PC	3.885e-01	2.94e-16
O₂	1.264e+01	<2e-16
Portata	7.885e-03	4.78e-08

Come si vede dalla tabella, tutte le variabili considerate possiedono un p-valore (che, si ricordi, costituisce il minimo livello di significatività per il quale l'ipotesi di stimatore nullo può essere respinta per quel regressore) estremamente basso, per cui, in termini statistici, la probabilità di commettere errore se si ammette l'ipotesi di coefficiente di regressione non nullo per ogni parametro è estremamente limitata (si veda il paragrafo 6.2). In altre parole, nessuna delle variabili indipendenti considerate può essere esclusa dal modello di regressione finale, dal momento che la l'incidenza di ognuna di esse sulla determinazione della concentrazione di NO_x in uscita al camino risulta discretamente significativa da un punto di vista statistico, e non può essere trascurata. La procedura di eliminazione backward in precedenza descritta, pertanto, in realtà non può essere applicata in partenza, poiché nessun parametro presenta p-valore superiore al livello di significatività statistica α scelto (che, si ricordi, è pari a 0,05), ed elevata è la probabilità di commettere errore se si stima nullo uno qualsiasi dei coefficienti di regressione. D'altro canto, l'utilità del modello appena costruito è confermata dal *test di Fisher*, il quale è in grado di indicare se l'introduzione dei regressori forniti dal modello è effettivamente utile per spiegare il processo considerato (si veda sempre il paragrafo 6.2). Per il set di dati del primo stadio di immissione, il valore della statistica test risulta pari a $F = 127,9$. Viceversa, noto il numero di osservazioni per lo stadio 1, pari a 333, e considerando il numero delle variabili indipendenti è pari a 5, i gradi di libertà dell'equazione risultano dalla relazione:

$$n_{lib} = (n_{oss} - 1) - n_{var} = 327$$

Scelto un *livello di significatività* α pari a 0,05, il valore della variabile di Fisher per 5 variabili e 327 gradi di libertà risulta:

$$F_0 = 2,245232$$

Dal momento, dunque, che la statistica test è maggiore della variabile di Fisher, essa ricade nella regione critica, per cui è possibile respingere l'ipotesi nulla (come descritto in precedenza) e confermare che il modello è effettivamente utile a spiegare il fenomeno, poiché tutti gli stimatori hanno valore diverso da zero.

In definitiva, l'equazione di regressione per lo stadio 1 risulta:

$$NO_x = -420,6 + 0,5576 \cdot NO_{xIN} - 3,516 \cdot NH_3 + 0,3885 \cdot TempPc + 12,64 \cdot O_2 - 0,007885 \cdot Portata$$

7.5.2 Risultati per lo stadio di iniezione 2 (medio)

Il secondo stadio di immissione dell'ammoniaca è collocato in una fascia intermedia della zona di trattamento, ad ugual distanza dagli altri due punti di immissione. L'elaborazione statistica dei dati rilevati per tale stadio restituisce il seguente modello di regressione iniziale:

MODELLO INIZIALE STADIO 2		
	β	<i>p-valore</i>
(intercetta)	-2.903e+02	0.0082
NO_xIN	4.523e-01	3.04e-09
NH₃	-6.879e+00	1.17e-15
Temp.PC	1.644e-01	0.000176
O₂	1.973e+01	0.000166
Portata	4.168e-03	8.4e-04

Anche in questo caso, la tabella di regressione mostra come tutte le variabili considerate presentano un p-valore estremamente basso. Ciò significa che la probabilità che tali parametri abbiano stimatore nullo è estremamente limitata, e trascurabile per i livelli di significatività inizialmente selezionati ($\alpha = 0,05$). Di conseguenza, ogni singola variabile partecipa in maniera statisticamente significativa ai processi di formazione e rimozione degli NO_x, e deve essere necessariamente considerata nel modello di regressione finale. Anche in questo caso, dunque, la procedura di eliminazione backward non può essere applicata, e il modello definitivo coincide con l'elaborazione iniziale. Il test di Fisher conferma l'utilità del modello, dal momento che il valore della statistica test (in questo caso pari a **F = 43,68**), risulta superiore al valore che assume la variabile di Fisher, il quale è pari, scelto un livello di significatività $\alpha = 0,05$, per 5 le variabili considerate e **417** i gradi di libertà dell'equazione (essendo **423** le osservazioni in questo caso), al valore:

$$F_0 = 2,23558$$

Dal momento, dunque, che la statistica test è maggiore della variabile di Fisher, essa ricade nella regione critica, per cui è possibile respingere l'ipotesi nulla, e confermare che il modello è effettivamente utile a spiegare il fenomeno: tutti i regressori hanno

effettivamente stimatore non nullo. In definitiva, l'equazione di regressione per lo stadio 2 risulta:

$$NO_x = -290,2 + 0,4523 \cdot NO_{xIN} - 6,879 \cdot NH_3 + 0,1644 \cdot TempPc + 19,73 \cdot O_2 - 0,004168 \cdot Portata$$

7.2.3 Risultati per lo stadio di iniezione 3 (basso)

Il terzo stadio di lance di immissione dell'ammoniaca è l'ultimo stadio di abbattimento DeNO_x che i fumi incontrano nel loro primo giro nei locali della caldaia, ed è posizionato al livello d'altezza inferiore. L'elaborazione statistica dei dati rilevati per tale stadio restituisce il seguente modello di regressione iniziale:

MODELLO INIZIALE STADIO 3		
	β	<i>p-valore</i>
(intercetta)	-2.223e+02	0.0071973
NO_xIN	5.892e-01	<2e-16
NH₃	-6.503e+00	<2e-16
Temp.PC	1.659e-01	0.000693
O₂	1.221e+01	4.546e-04
Portata	1.851e-03	6.09e-04

Ancora una volta, dunque, nessuna variabile può essere esclusa nelle successive fasi iniziali, dal momento che i valori estremamente ridotti del p-valore assicurano la loro assoluta significatività e influenza nel fenomeno di interesse. Il modello di regressione di partenza contiene pertanto tutti i parametri maggiormente significativi, sicché esso è pari al modello definitivo cercato: anche in questo caso, la procedura di eliminazione backward non può essere applicata. Il test di Fisher, ancora una volta, conferma l'utilità del modello:

$$F > F_0$$

ove la statistica test F vale **84,45**, mentre la variabile di Fisher è pari (per 5 variabili e 397 gradi di libertà, essendo 403 in questo caso le osservazioni) a **2,23672**. In definitiva, l'equazione di regressione per lo stadio 3 risulta:

$$NO_x = -222,3 + 0,5892 \cdot NO_{xIN} - 6,503 \cdot NH_3 + 0,1659 \cdot TempPc + 12,21 \cdot O_2 - 0,001852 \cdot Portata$$

7.2.4 Risultati ottenuti nella fase sperimentale 2

L'approccio statistico allo studio delle complesse dinamiche di formazione e rimozione degli NO_x in un sistema di abbattimento SNCR su scala reale ha inteso fornire un apporto conoscitivo alla definizione del processo e delle sue caratteristiche, mediante l'elaborazione di un'equazione di regressione multipla, che esprimesse le relazioni della variabile di interesse (la concentrazione di NO_x in uscita al camino) con dei parametri per i quali è supposta, in linea di principio, una qualche incidenza sul fenomeno. Allo stesso tempo, si è cercato di capire quale fosse la significatività di ciascun parametro preso in considerazione, e, in particolare, quali tra le variabili indipendenti esercitassero un'incidenza trascurabile sui processi di interesse, in modo da escluderle nel resoconto finale.

Verificata l'effettiva indipendenza reciproca tra le variabili inizialmente selezionate, e scartati quegli elementi (*contenuto d'acqua e ossigeno in post-combustione*) i cui effetti, risultando strettamente correlati ad altri parametri, possono essere analizzati per via indiretta (attraverso lo studio delle variabili ad essi correlate), il metodo di analisi statistica utilizzato ha suggerito l'impossibilità di prescindere dagli effetti di ciascuna delle variabili residue (vale a dire il *dosaggio di ammoniaca*, la *temperatura in post-combustione*, la *concentrazione di fondo degli NO_x* , l'*ossigeno presente in forno* e la *portata complessiva dei fumi*) e l'importanza che ognuna di essa esercita, interagendo con le altre, nelle complesse dinamiche chimico-fisiche di formazione e rimozione degli ossidi di azoto in una corrente gassosa. L'analisi condotta rivela, dunque, come le concentrazioni di ossidi di azoto in uscita da un processo di termodistruzione dei rifiuti siano in realtà governate da una molteplicità di aspetti, i quali concorrono con incidenza non trascurabile alla formazione dei valori finali. Tali aspetti sono legati, contemporaneamente, alle quantità e alla varietà di *materiali in ingresso* al processo (attraverso la concentrazione di fondo e la portata dei fumi), alle condizioni in cui è operato il *processo di combustione* degli stessi (tramite i valori dell'ossigeno e della temperatura) e alle modalità con cui si opera il *trattamento di rimozione* (a mezzo del dosaggio di ammoniaca addotto).

L'elaborazione dell'equazione di regressione multipla per tutti e tre gli stadi di immissione predisposti in impianto ha evidenziato comportamenti e influenze simili in tutti i casi, confermando la bontà e l'efficacia del metodo utilizzato. La somiglianza e la vicinanza delle stime dei coefficienti di regressione (qui di seguito riassunte) danno forza ai procedimenti utilizzati e restituiscono stabilità ai risultati ottenuti che, essendo

frutto di elaborazione statistica, hanno inoltre il pregio di svincolarsi dalla mutabilità delle condizioni di prova che si presentano caso per caso:

- STADIO 1: $950^{\circ} < T < 980^{\circ}\text{C}$

$$NO_x = -420,6 + 0,5576 \cdot NO_{xIN} - 3,516 \cdot NH_3 + 0,3885 \cdot TempPc + 12,64 \cdot O_2 - 0,007885 \cdot Portata$$

- STADIO 2: $850^{\circ}\text{C} < T < 870^{\circ}\text{C}$

$$NO_x = -290,2 + 0,4523 \cdot NO_{xIN} - 6,879 \cdot NH_3 + 0,1644 \cdot TempPc + 19,73 \cdot O_2 - 0,004168 \cdot Portata$$

- STADIO 3: $780^{\circ}\text{C} < T < 800^{\circ}\text{C}$

$$NO_x = -222,3 + 0,5892 \cdot NO_{xIN} - 6,503 \cdot NH_3 + 0,1659 \cdot TempPc + 12,21 \cdot O_2 - 0,001852 \cdot Portata$$

A titolo di verifica, l'equazione di regressione elaborata dall'analisi è stata applicata al caso reale, sostituendo alle variabili considerate i valori effettivamente rilevati durante la campagna di prove. In tal modo, si è inteso verificare lo scostamento del valore di concentrazione fornito dall'equazione con la concentrazione di NO_x effettivamente rilevata dagli strumenti di misura. Ad esempio, l'applicazione del modello di regressione alla prova condotta per lo **stadio 1**, con portata di vapore pari a **100 kg/h**, comporta uno scostamento medio dal valore effettivo pari a:

$$\Delta = 8,41 \text{ mg/Nm}^3$$

pari ad una variazione percentuale media sul valore effettivamente rilevato di appena il **6,9%**. Tale scostamento può essere considerato ampiamente accettabile, se si considera che, per ciascun stadio, l'equazione di regressione è elaborata a partire da tutti i dati rilevati nelle 3 prove condotte, e risente dunque dell'influenza dei diversi valori di portata di vapore e di pressione di immissione.

Vale la pena sottolineare come anche il segno dei singoli coefficienti di regressione restituisca informazioni utili nella investigazione del fenomeno. Ricordando che ogni stimatore esprime la variazione che subisce la variabile dipendente Y in seguito ad una variazione unitaria della corrispondente variabile esplicativa x_i (tenendo costante il valore delle altre variabili esplicative), si ha che la concentrazione di NO_x in uscita aumenta o diminuisce con proporzionalità diretta con le variabile che presentano

coefficiente β positivo, mentre varia con proporzionalità inversa con le variabili che hanno stimatore negativo. Come si vede, lo strumento statistico conferma sia l'influenza positiva di quegli elementi per cui è nota l'azione sulla formazione degli ossidi di azoto (come la *concentrazione di azoto di fondo*, la *temperatura* e l'*ossigeno* in camera di combustione), sia l'incidenza negativa di quelle variabili che contribuiscono all'abbattimento degli stessi, come il *dosaggio di ammoniaca* immesso. L'effetto mitigativo della *portata complessiva di fumi*, invece, può essere spiegato con il fatto che, all'aumentare della massa della corrente gassosa, la turbolenza nella zona di trattamento risulta incrementata, e con essa la miscelazione dei fumi e l'omogeneizzazione con il reagente immesso, con evidente beneficio nella rimozione degli inquinanti.

La bontà delle elaborazioni statistiche e delle considerazioni appena effettuate risulta confermata se si prova a processare nello stesso elaborato i dati completi di tutti e tre gli stadi di immissione. L'elaborazione in questo caso restituisce un modello di regressione iniziale:

<u>MODELLO INIZIALE COMPLETO</u>		
	β	<i>p-valore</i>
(intercetta)	-1.819e+02	6.92e-08
NOxIN	5.545e-01	<2e-16
NH₃	-5.763e+00	<2e-16
Temp.PC	1.741e-01	1.08e-12
O₂	1.239e+01	0.000145
Portata	4.754e-04	1.14e-04

in cui, coerentemente ai singoli stadi, i valori limitati del p-valore assicurano l'importanza di tutte le variabili, e le singole stime dei coefficienti di regressione percorrono l'identica strada tracciata dalle precedenti:

$$NO_x = -181,9 + 0,5545 \cdot NO_{xIN} - 5,763 \cdot NH_3 + 0,1741 \cdot TempPc + 12,39 \cdot O_2 - 0,000475 \cdot Portata$$

Le stime dei coefficienti di regressione, tuttavia, non forniscono informazioni quantitative sull'intensità dell'incidenza di ogni singola variabile sulle variazioni della

variabile di interesse, dal momento che il loro valore dipende dall'unità di misura delle variabili. Viceversa, la capacità quantitativa di ciascun parametro di influenzare la variabile dipendente può essere desunta stimando l'*elasticità* della variabile dipendente rispetto a ciascuno di essi, la quale, si ricordi (par. 6.2), dà misura della percentuale di variazione della variabile *y* in funzione di una variazione unitaria del singolo regressore. Tale valore è stato calcolato in corrispondenza dei valori medi di ciascuna variabile. Il grafico seguente mostra le indicazioni quantitative riferite ai 3 singoli stadi:

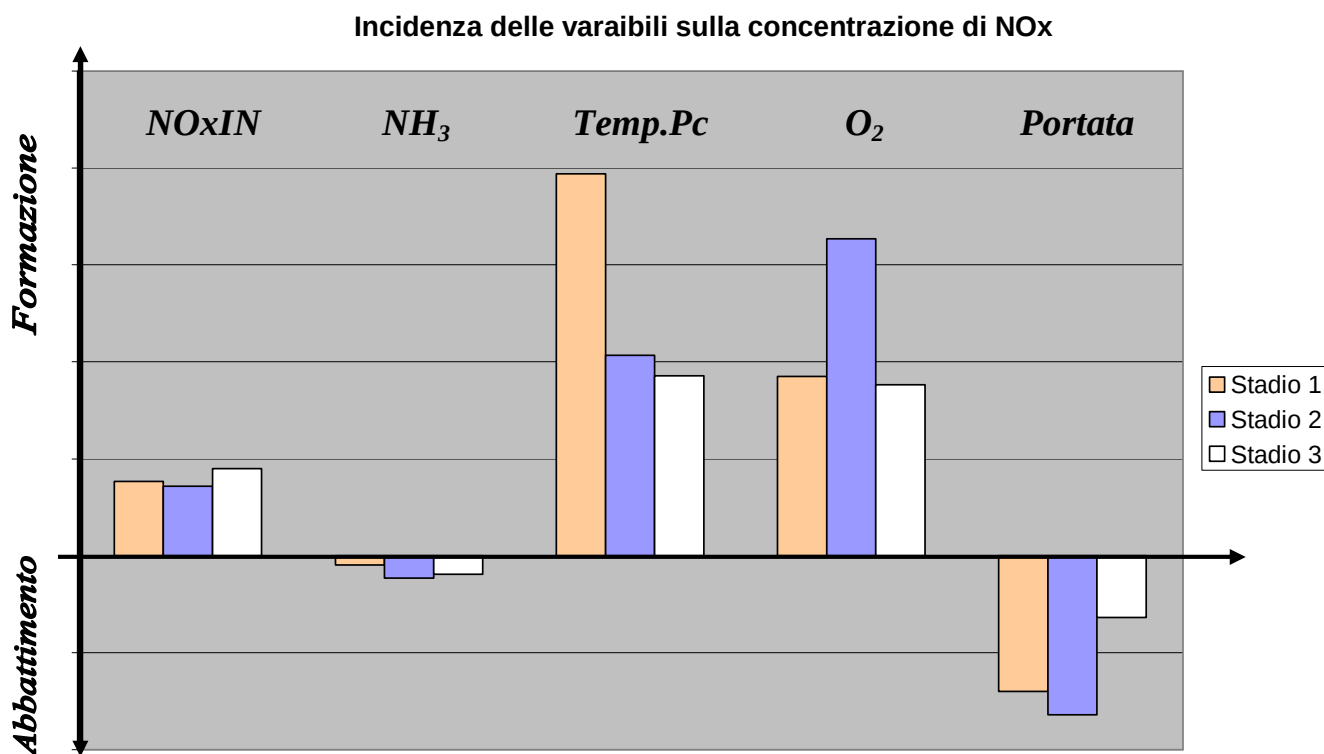


Grafico 7.1: incidenza quantitativa delle singole variabili sulla concentrazione di NO_x

L'analisi di elasticità testimonia il peso che la variazione di ciascuna variabile possiede rispetto alle variazioni delle concentrazioni di NO_x. In particolare, i valori rilevati suggeriscono l'importanza nei processi di formazione, i quali dipendono, oltre che delle *concentrazioni di fondo* in ingresso con il rifiuto, proprio dalla quantità di *ossigeno* nei fumi, e soprattutto della *temperatura* a cui avviene la termodistruzione dei rifiuti (in questo lavoro rappresentata dalla misura disponibile più prossima alla camera del tamburo, ossia la temperatura in post-combustione). Tale risultato non meraviglia, se si considera che esso è in linea con i dettami della già ricordata trattazione teorica sulle dinamiche di formazione degli NO_x (si veda a tal proposito il paragrafo 4.2). In particolare, tali parametri di formazione mostrano un'incidenza maggiore per i dati rilevati al primo stadio della zona di trattamento (laddove è contemporaneamente più

bassa l'incidenza dell'ammoniaca dosata), segno di una maggiore importanza per quell'area delle variabili di formazione rispetto a quelle di abbattimento, quasi a voler suggerire una minore efficacia nel trattamento.

Per quanto riguarda i fattori responsabili dell'abbattimento e della rimozione degli ossidi, stupiscono i valori di elasticità più elevati per la *portata complessiva di fumi* in transito nella zona di trattamento, rispetto a quelli rilevati per il *dosaggio d'ammoniaca*: tale risultato sembra voler testimoniare come la rimozione degli inquinanti non sia solo funzione della quantità di reagenti addotta, ma soprattutto delle condizioni fisiche che si verificano localmente, dal momento che un aumento della portata in transito comporta condizioni di maggiore turbolenza locale, e assicura una migliore miscelazione e contatto tra la soluzione reattiva immessa e i contaminanti da rimuovere, migliorando l'efficienza del processo. Tanto il dosaggio di ammoniaca quanto la portata dei fumi presentano un peso sui fenomeni di abbattimento maggiore nel secondo stadio di trattamento, per il quale è lecito ipotizzare un'efficacia di rimozione maggiore che negli altri stadi.

Le ipotesi qui formulate sulle dinamiche di processo saranno verificate nei paragrafi a seguire, in cui sono mostrate le valutazioni sulle prestazioni del sistema DeNO_x ad ammoniaca liquida, e l'efficienza di rimozione degli ossidi di azoto nelle diverse condizioni di prova.

7.6 Risultati delle prove di abbattimento degli NO_x

Oltre a fornire i dati per l'elaborazione statistica, le prove sperimentali, condotte in impianto su scala reale, sono state utilizzate per valutare le capacità prestazionali dell'attuale sistema in merito alla rimozione degli ossidi di azoto dalla corrente gassosa, al fine di determinare l'influenza sul processo dei diversi parametri di controllo, regolabili direttamente dall'intervento umano, e le condizioni per le quali si registra il *funzionamento ottimale* del sistema. Tale analisi costituisce la base per una successiva fase di lavoro, in cui, come si è detto, si è voluto suggerire soluzioni impiantistiche nuove, in ordine di operare la sostituzione dell'attuale sistema di somministrazione dell'*ammoniaca anidra*, con un meno pericoloso sistema ad *ammoniaca liquida*, il quale garantisce una maggiore serenità nella gestione e nell'utilizzo del reagente.

Più nello specifico, si è inteso valutare in primo luogo l'azione della ammoniacca reagente, regolando, di volta in volta, il *dosaggio di soluzione* da addurre al sistema di immissione. Tale manipolazione, si è detto, è resa possibile dalla regolazione che viene effettuata in capo alla pompa di adduzione, modificando a piacimento il numero di impulsi al minuto al quale si intende far lavorare il meccanismo.

In secondo luogo, si è cercato di valutare le prestazioni del sistema al variare dello *stadio di lance di immissione* del reagente, analizzando l'efficienza di rimozione con riferimento a tutti e 3 gli stadi attualmente attrezzati nel primo giro fumo della caldaia. Tale verifica è stata condotta in ordine di determinare la fascia di trattamento che presenta le condizioni di rimozione più favorevoli, con particolare riferimento alla *temperatura operativa* registrata nei diversi punti che, come si è detto, rappresenta la variabile di maggiore criticità in un processo di rimozione non catalitica (si veda in proposito il paragrafo 4.5.1). Incidentalmente, lo studio delle prestazioni dei 3 punti di immissione ha voluto verificare alcune supposizioni suggerite dall'analisi statistica, anche con il supporto di misure dirette di temperatura. Giova ricordare, infatti, come le prestazioni di un sistema DeNO_x non catalitico siano pesantemente influenzate dalle condizioni di temperatura registrate nella zona di trattamento, e dalla finestra termica che compete ai fumi al momento della miscelazione con la soluzione reagente. Non essendo disponibili misure in tempo reale della temperatura nella zona di trattamento, si è dunque fatto riferimento a valori registrati con l'ausilio di sensori a termocoppia in prossimità della stessa, che restituiscono il seguente andamento di temperatura:

- Stadio 1: $950\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 980^{\circ}\text{C}$
- Stadio 2: $850\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 870^{\circ}\text{C}$
- Stadio 3: $780\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 800^{\circ}\text{C}$

Non in ultimo, le capacità prestazionali del sistema sono state verificate al variare della *portata di vapore di trasporto*, la quale nebulizza e adduce la soluzione alla zona di trattamento, e di conseguenza della *pressione* registrata allo stadio di immissione, al fine di valutare gli effetti sulla rimozione delle condizioni di miscelazione e di distribuzione della soluzione all'interno della zona di processo. È evidente, infatti, che valori di pressione di immissione più alti si traducono in una diffusione più turbolenta della soluzione in camera di reazione, e, quindi, in una miscelazione più omogenea con la corrente da trattare. Tale verifica è stata effettuata lavorando su 2 diversi valori di

portata di vapore (uno *alto*, di circa **300 kg/h**, e uno *basso*, a circa **100 kg/h**), ottenuti regolando manualmente la valvola di regolazione a spirale presente in prossimità della zona di trattamento.

L'azione della pressione è stata altresì verificata con una prova in cui, per ciascun punto di immissione, il valore alto di pressione (registrato con adduzione della portata massima di vapore) veniva raggiunto modulando contemporaneamente la portata minima di vapore, con una certa portata di *aria compressa*, attraverso un sistema di immissione appositamente attrezzato. Tale misura ha inteso verificare la possibilità di utilizzare aria di trasporto in luogo del vapore, che può essere così utilizzato per la produzione di energia elettrica o per altri scopi d'impianto, e per svincolare la valutazione dell'azione della pressione dagli effetti negativi della maggiore diluizione della soluzione ammoniacale e del più pronunciato raffreddamento della miscela fumi-reagente, i quali sono tanto più intensi quanto maggiore è il quantitativo di vapore addotto per la nebulizzazione e il trasporto dell'ammoniaca liquida.

Il parametro di verifica utilizzato in questa analisi delle prestazioni è costituito dall'*efficienza di abbattimento* degli ossidi di azoto, intesa come il rapporto tra la *quantità di NO_x* rimossa dal sistema (espressa in concentrazione volumetrica), e la *concentrazione di fondo* che si rileva quando il sistema di trattamento è disattivato:

$$\varepsilon = \frac{NO_x \text{ rimossa}}{NO_x In}$$

Dal momento che la quantità di NO_x rimossa è pari alla differenza tra concentrazione di fondo e concentrazione residua rilevata in uscita al camino, con rapidi passaggi si ha:

$$\varepsilon = \frac{NO_x In - NO_x}{NO_x In} = 1 - \frac{NO_x}{NO_x In}$$

Per la valutazione delle prove si è fatto riferimento, per ciascuna condizione di dosaggio, ad un valore di *efficienza media*, determinata a partire dai valori di efficienza di abbattimento calcolati al minuto. Vale la pena ricordare, tuttavia, che anche la concentrazione di fondo di ossidi d'azoto è intesa come concentrazione *media*, dal momento che essa è riferita ad un periodo *antecedente* ogni prova, in cui il sistema di trattamento risulta disconnesso. Tale semplificazione, si è detto, si è resa necessaria in

quanto non è possibile ottenere una valutazione disgiunta, nello stesso istante temporale, delle concentrazioni di fondo e di quelle effettivamente abbattute. Le tabelle di seguito mostrano i valori massimi, minimi e medi delle concentrazioni in ingresso di NO_x rilevate per ciascuna prova durante il periodo di disattivazione del trattamento:

- Stadio 1 (alto - lato ingresso):

NH_3 [kg/h]	$\text{NO}_x\text{IN Max}$ [mg/Nm³]	$\text{NO}_x\text{IN Media}$ [mg/Nm³]	$\text{NO}_x\text{IN Min}$ [mg/Nm³]
0,7568	149,2	136,43	121,54
1,211	148,09	134,07	111,07
1,665	160,7	147,25	135,8
2,119	138,05	122,51	102,7
2,573	123,06	113,63	100,2
3,0272	120,71	113,58	103,45
3,48128	115,83	108,42	99,01
3,935	117,61	109,19	100,57
4,3894	123,85	110,96	94,07
4,8435	132,03	122,4	115,77

Tabella 7.2: Stadio 1, prova con vapore = 100 kg/h: andamenti massimi, minimi e medi delle concentrazioni di fondo di NO_x

<i>NH₃</i> <i>[kg/h]</i>	<i>NO_xIN Max</i> <i>[mg/Nm³]</i>	<i>NO_xIN Media</i> <i>[mg/Nm³]</i>	<i>NO_xIN Min</i> <i>[mg/Nm³]</i>
0,7568	136,5	132,65	124,8
1,211	138,05	127,5	118,95
1,665	132,9	128,67	121,44
2,119	164,64	139,72	124,8
2,573	191,54	162,70	143,86
3,0272	199,23	172,74	156,25
3,48128	154,51	148,95	141,39
3,935	195,26	166,08	131,9
4,3894	154,28	142,45	135,62
4,8435	152,03	135,97	122,91

Tabella 7.3: Stadio 1, prova con vapore = 300 kg/h: andamenti massimi, minimi e medi delle concentrazioni di fondo di NO_x

<i>NH₃</i> <i>[kg/h]</i>	<i>NO_xIN Max</i> <i>[mg/Nm³]</i>	<i>NO_xIN Media</i> <i>[mg/Nm³]</i>	<i>NO_xIN Min</i> <i>[mg/Nm³]</i>
0,7568	171,64	154,6	147,56
1,211	193,78	172,34	156,9
1,665	179,64	152,43	135,22
2,119	163,16	149,74	146,32
2,573	225,65	176,81	147,97
3,0272	296,57	182,92	156,25
3,48128	169,13	158,10	143,39
3,935	155,10	142,10	136,9
4,3894	146,97	145,06	139,73
4,8435	154,03	148,67	129,91

Tabella 7.4: Stadio 1, prova con aria compressa e vapore = 100 kg/h: andamenti massimi, minimi e medi delle concentrazioni di fondo di NO_x

<i>NH₃</i> <i>[kg/h]</i>	<i>NOxIN Max</i> <i>[mg/Nm³]</i>	<i>NOxIN Media</i> <i>[mg/Nm³]</i>	<i>NOxIN Min</i> <i>[mg/Nm³]</i>
0,7568	89,29	133,07	160,58
1,211	105,44	96,94	80,94
1,665	127,20	123,9	85,54
2,119	178,45	143,04	126,17
2,573	157,26	122,23	83,95
3,0272	168,93	139,71	77,61
3,48128	139,91	115,86	86,95
3,935	143,83	121,82	102,16
4,3894	160,23	126,80	103,743
4,8435	122,06	100,2	80,98

Tabella 7.5: Stadio 1, prova con aria compressa e vapore = 100 kg/h: andamenti massimi, minimi e medi delle concentrazioni di fondo di NO_x

- Stadio 2 (medio):

<i>NH₃</i> <i>[kg/h]</i>	<i>NOxIN Max</i> <i>[mg/Nm³]</i>	<i>NOxIN Media</i> <i>[mg/Nm³]</i>	<i>NOxIN Min</i> <i>[mg/Nm³]</i>
0,7568	171,18	148,55	94,82
1,211	162,77	146,38	97,24
1,665	147,80	132,38	102,99
2,119	147,53	129,49	105,48
2,573	164,60	139,16	125,20
3,0272	194,53	151,86	116,15
3,48128	164,93	145,87	97,27
3,935	180,42	158,55	107,08
4,3894	171,75	110,92	98,13
4,8435	125,35	100,71	87,16

Tabella 7.6: Stadio 2, prova con vapore = 300 kg/h: andamenti massimi, minimi e medi delle concentrazioni di fondo di NO_x

<i>NH₃</i> <i>[kg/h]</i>	<i>NO_xIN Max</i> <i>[mg/Nm³]</i>	<i>NO_xIN Media</i> <i>[mg/Nm³]</i>	<i>NO_xIN Min</i> <i>[mg/Nm³]</i>
0,7568	155,15	139,50	100,83
1,211	136,60	123,36	108,01
1,665	184,39	137,47	119,12
2,119	163,48	141,41	122,94
2,573	164,60	126,61	125,20
3,0272	157,20	136,17	88,88
3,48128	150,70	122,87	104,36
3,935	169,58	115,82	97,89
4,3894	127,22	113,93	83,52
4,8435	141,43	123,11	87,46

Tabella 7.7: Stadio 2, prova con aria compressa e vapore = 100 kg/h: andamenti massimi, minimi e medi delle concentrazioni di fondo di NO_x

- Stadio 3 (basso):

<i>NH₃</i> <i>[kg/h]</i>	<i>NO_xIN Max</i> <i>[mg/Nm³]</i>	<i>NO_xIN Media</i> <i>[mg/Nm³]</i>	<i>NO_xIN Min</i> <i>[mg/Nm³]</i>
0,7568	173,18	159,50	91,64
1,211	136,22	120,89	105,95
1,665	179,82	152,53	108,97
2,119	159,97	134,23	101,65
2,573	168,61	147,07	102,25
3,0272	175,20	150,88	113,64
3,48128	173,18	155,10	108,41
3,935	161,13	145,64	92,80
4,3894	145,16	130,76	117,36
4,8435	177,98	152,94	114,89

Tabella 7.8: Stadio 3, prova con vapore = 100 kg/h: andamenti massimi, minimi e medi delle concentrazioni di fondo di NO_x

<i>NH₃</i> <i>[kg/h]</i>	<i>NOxIN Max</i> <i>[mg/Nm³]</i>	<i>NOxIN Media</i> <i>[mg/Nm³]</i>	<i>NOxIN Min</i> <i>[mg/Nm³]</i>
0,7568	126,02	91,61	74,24
1,211	134,26	111,18	92,07
1,665	120,84	108,90	80,94
2,119	135,04	120,2	93,30
2,573	145,32	84,53	77,34
3,0272	176,65	128,48	94,72
3,48128	173,19	157,06	103,55
3,935	152,10	137,62	94,24
4,3894	142,61	128,37	99,40
4,8435	153,91	137,82	96,32

Tabella 7.9: Stadio 3, prova con vapore = 300 kg/h: andamenti massimi, minimi e medi delle concentrazioni di fondo di NO_x

<i>NH₃</i> <i>[kg/h]</i>	<i>NOxIN Max</i> <i>[mg/Nm³]</i>	<i>NOxIN Media</i> <i>[mg/Nm³]</i>	<i>NOxIN Min</i> <i>[mg/Nm³]</i>
0,7568	167,69	151,30	111,05
1,211	172,22	150,94	110,98
1,665	161,48	150,62	128,47
2,119	139,23	130,84	104,99
2,573	192,88	166,82	131,67
3,0272	189,49	166,99	103,94
3,48128	214,20	186,93	134,41
3,935	226,67	190,96	129,51
4,3894	210,04	187,4	126,68
4,8435	213,42	185,49	137,68

Tabella 7.10: Stadio 3, prova con aria compressa e vapore = 100 kg/h: andamenti massimi, minimi e medi delle concentrazioni di fondo di NO_x

Le curve di rimozione più avanti riportate, dunque, associano a ciascun dosaggio di soluzione addotto (espresso come portata di ammoniaca effettiva in kg/h) il corrispettivo valore di efficienza di rimozione media, calcolata sui 15 minuti di conduzione di ciascuna prova. Tale semplificazione, necessaria per la valutazione congiunta delle prove effettuate, non toglie comunque validità allo studio, dal momento che, come rivela il grafico alla pagina seguente, le oscillazioni massime e minime attorno al valore medio di efficienza di rimozione si mantengono entro intervalli comprensibilmente contenuti.

I grafici in seguito mostrano le oscillazioni dell'efficienza di rimozione al minuto rispetto al valore medio, per ciascuna delle prove effettuate:

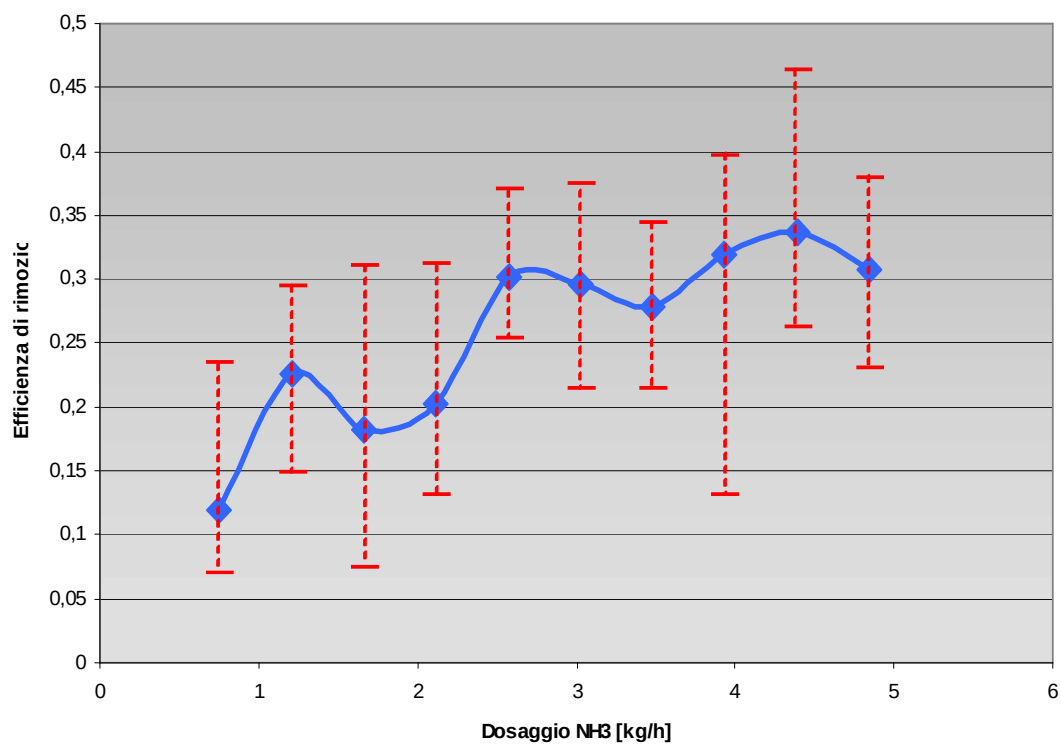


Grafico 7.3: Scostamenti min e max rimozione media, stadio 1, prova con vapore 300

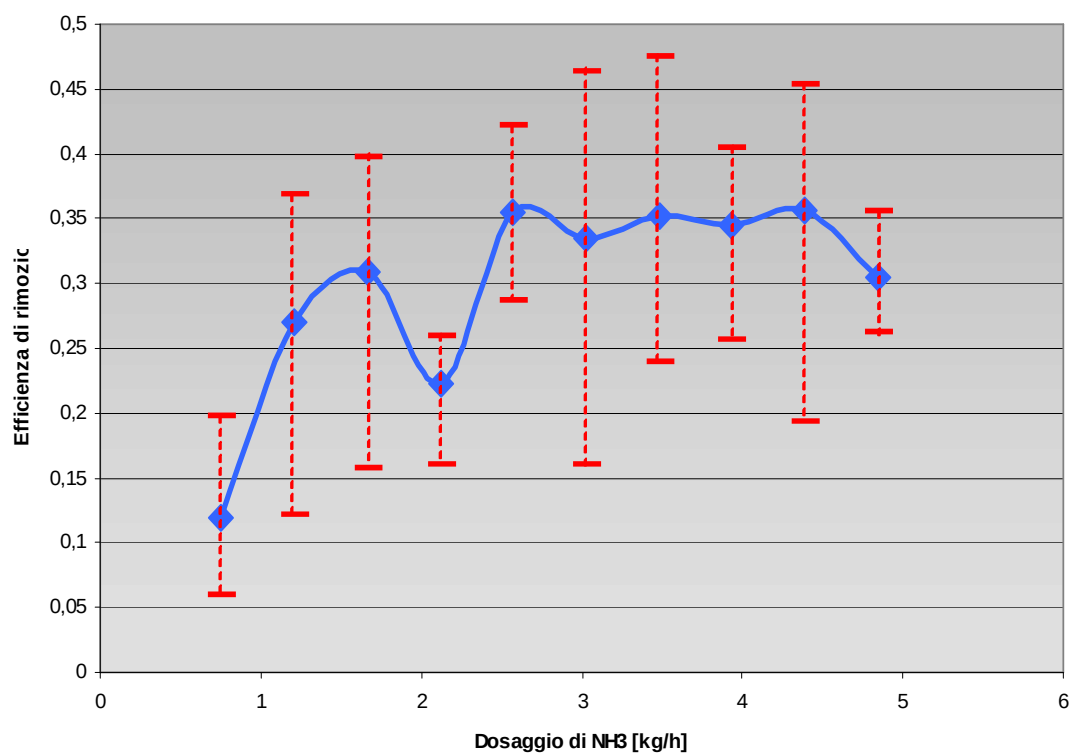


Grafico 7.4: Scostamenti minimi e massimi dalla curva di rimozione media, stadio 1, prova con aria compressa e vapore 100

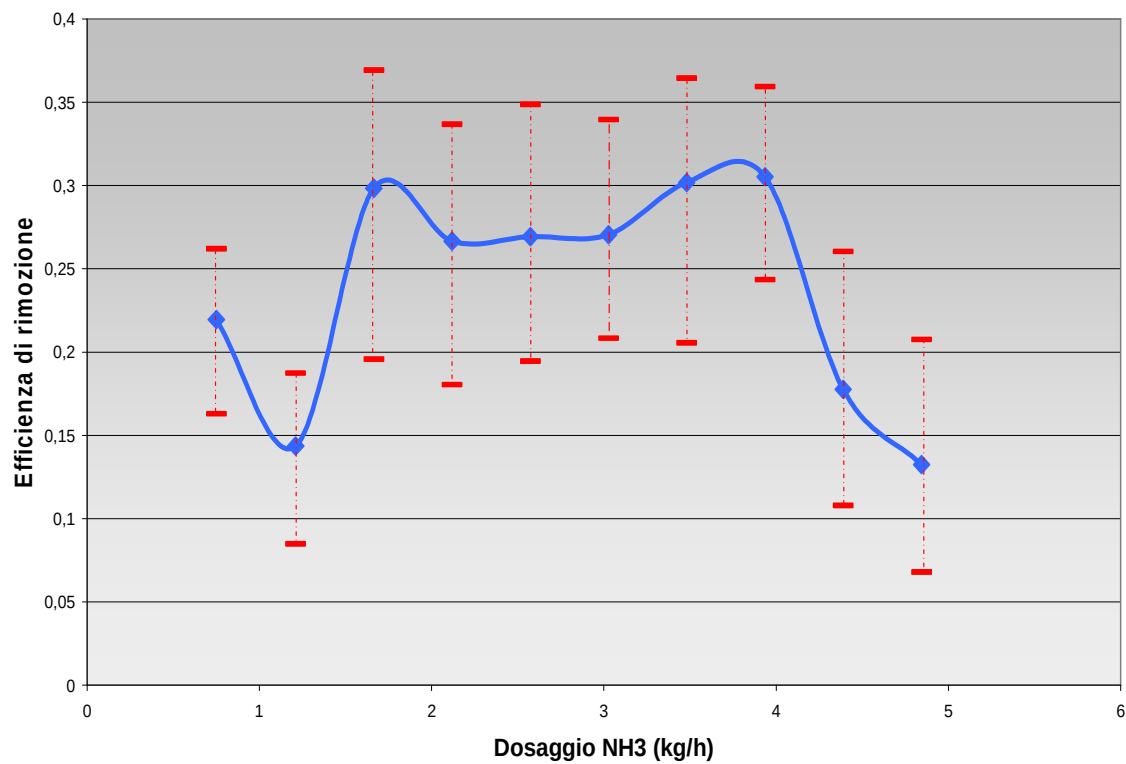


Grafico 7.2: Scostamenti minimi e massimi dalla curva di rimozione media, stadio 1, prova con

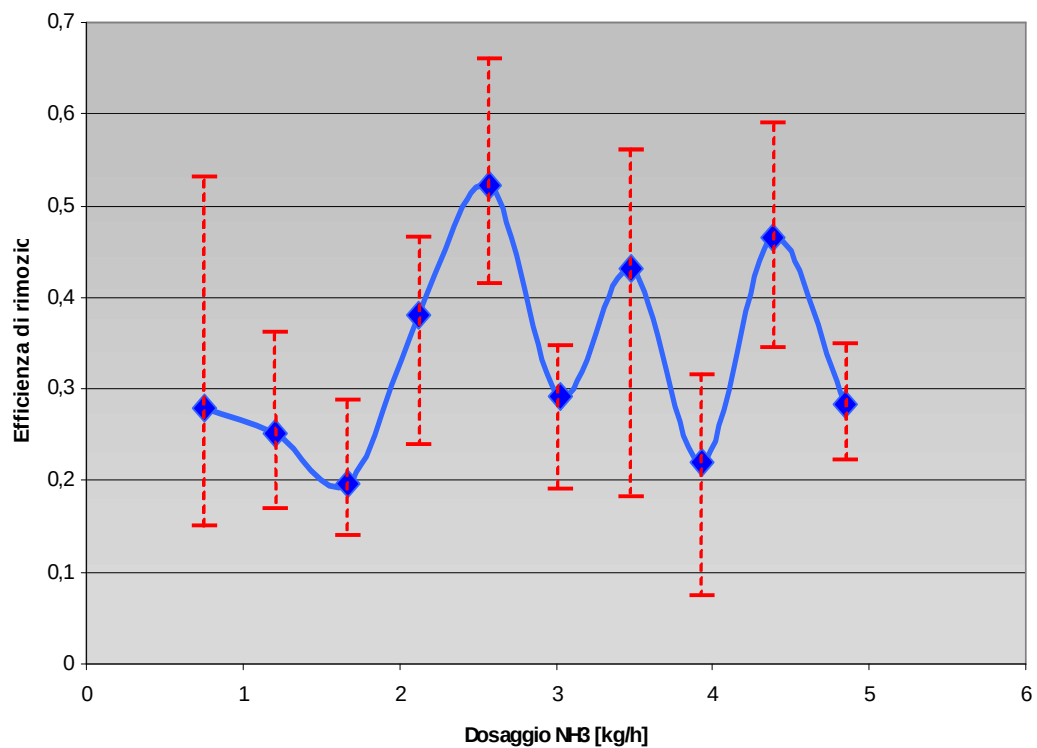


Grafico 7.5: Scostamenti minimi e massimi dalla curva di rimozione media, stadio 2, prova con vapore 100

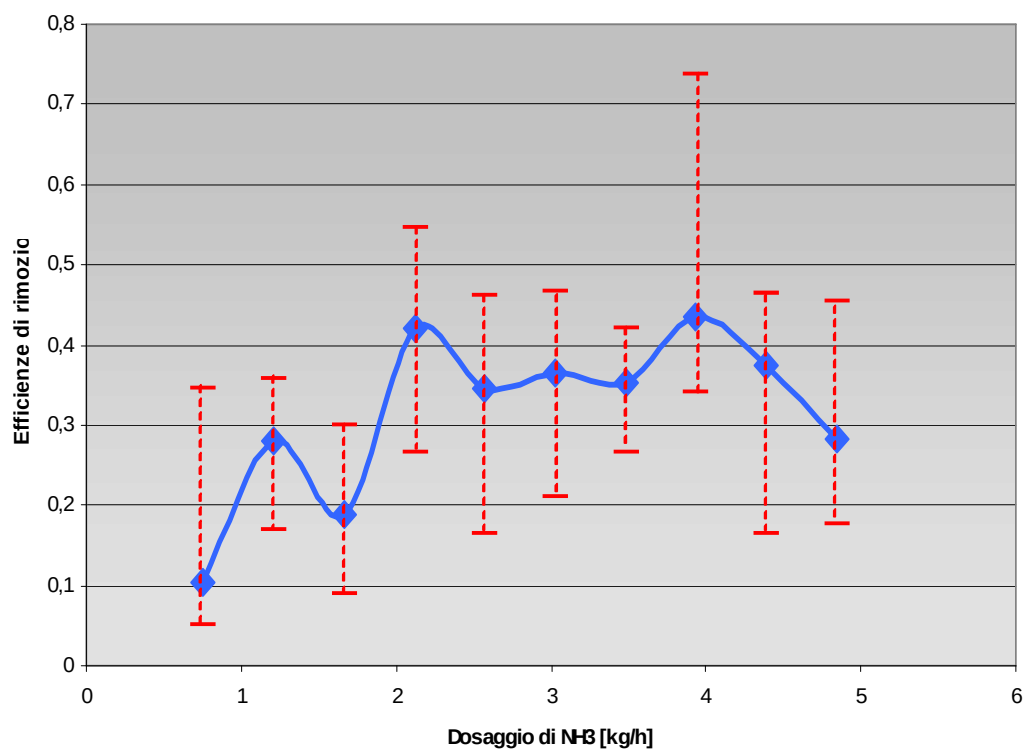


Grafico 7.6: Scostamenti minimi e massimi dalla curva di rimozione media, stadio 2, prova con vapore 300

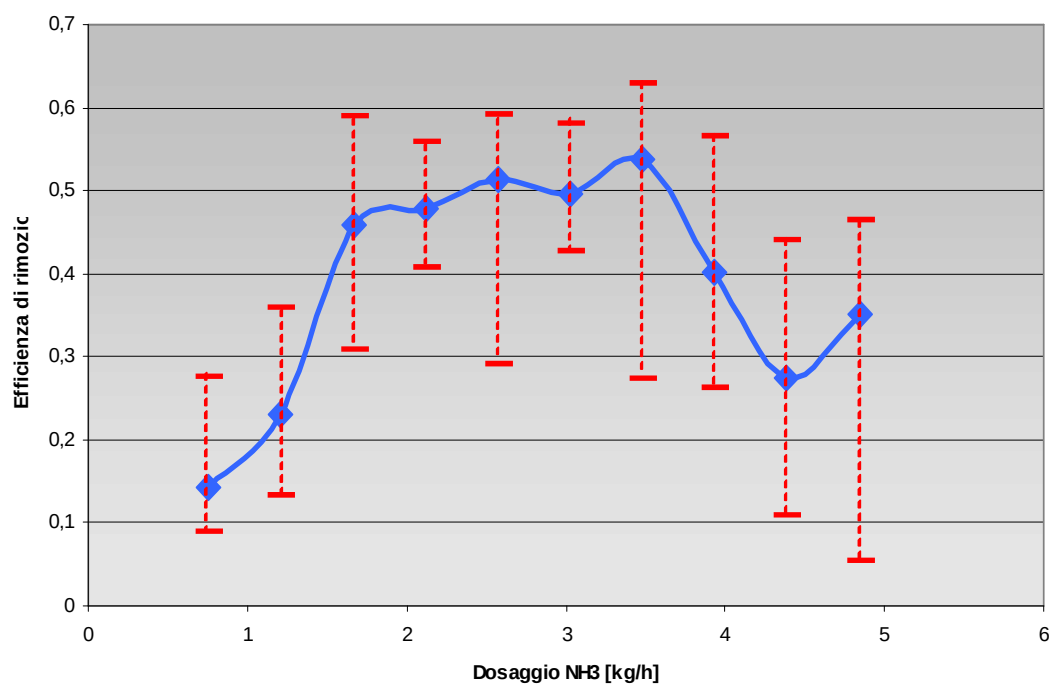


Grafico 7.7: Scostamenti minimi e massimi dalla curva di rimozione media, stadio 2, prova con aria compressa e vapore 100

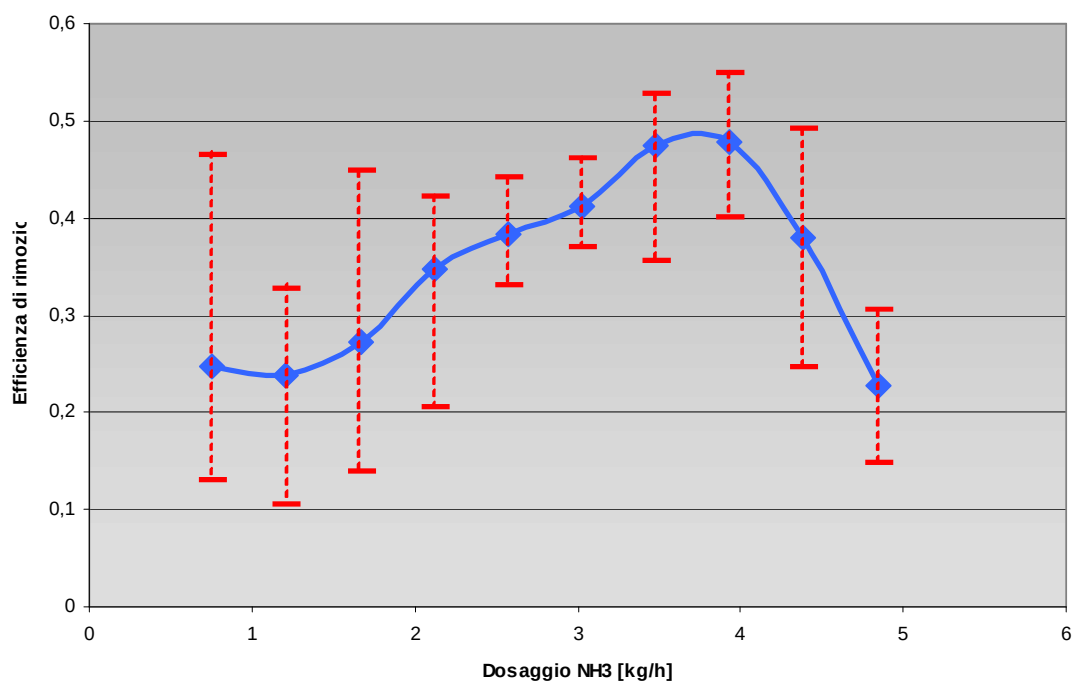


Grafico 7.8: Scostamenti minimi e massimi dalla curva di rimozione media, stadio 3, prova con vapore 100

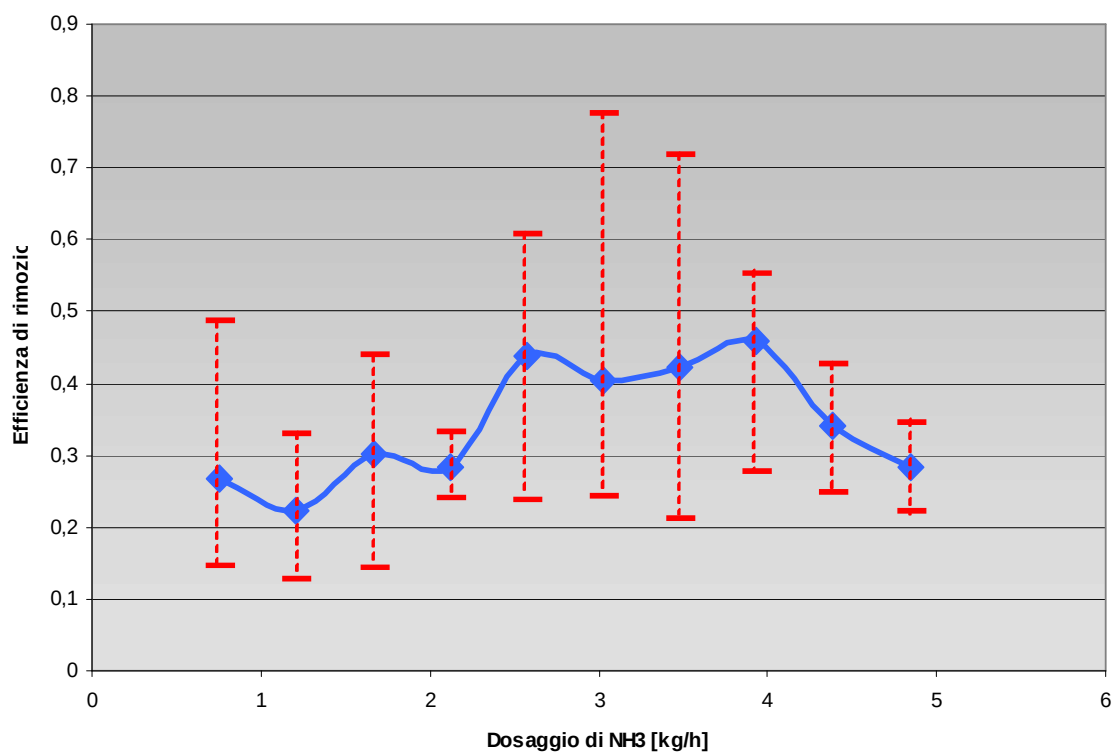


Grafico 7.9: Scostamenti minimi e massimi dalla curva di rimozione media, stadio 3, prova con vapore 300

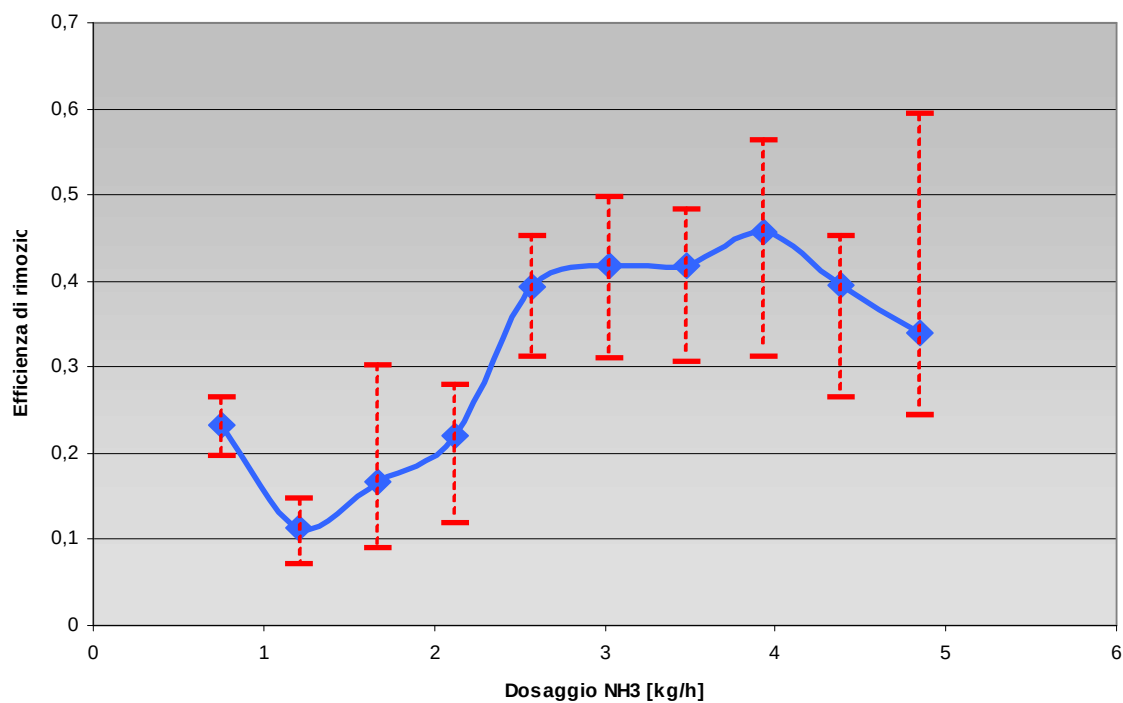


Grafico 7.10: Scostamenti minimi e massimi dalla curva di rimozione media, stadio 3, prova con aria compressa e vapore 100

I grafici a seguire mostrano le curve di rimozione ottenute per ciascun punto di immissione. Il dettaglio delle prove con i valori al minuto è presente in appendice.

Stadio 1

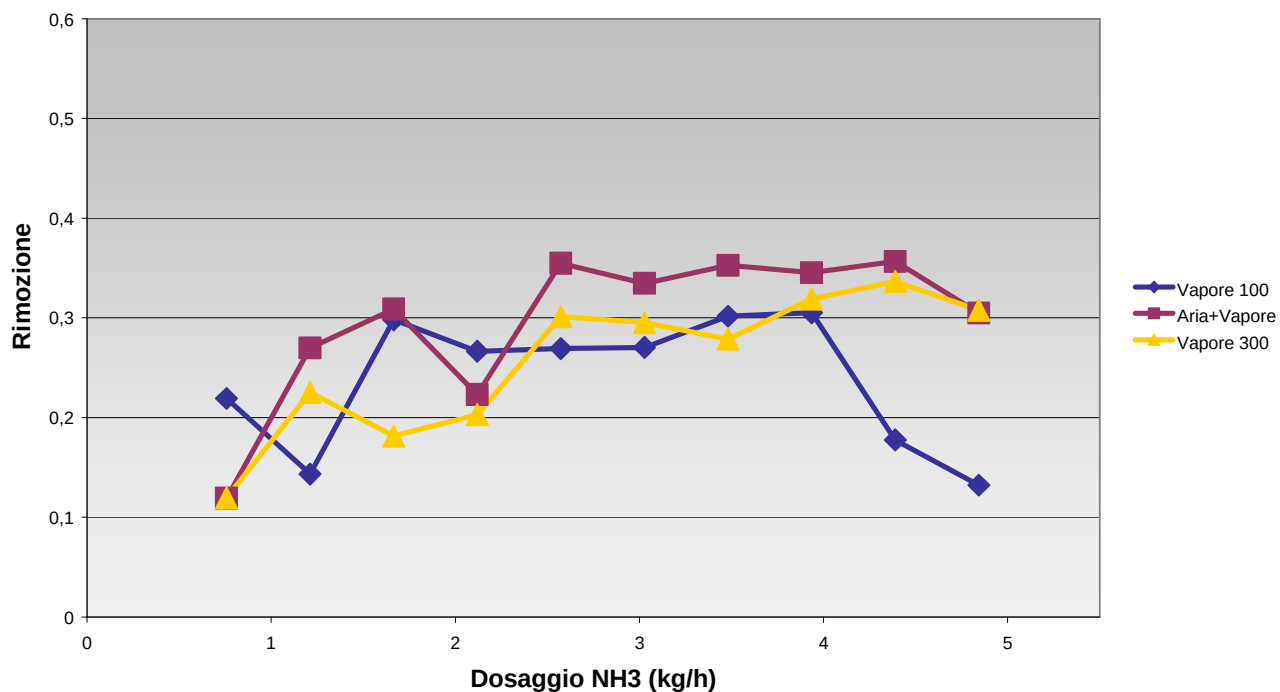


Grafico 7.3: Curve di rimozione per lo stadio 1

Stadio 2

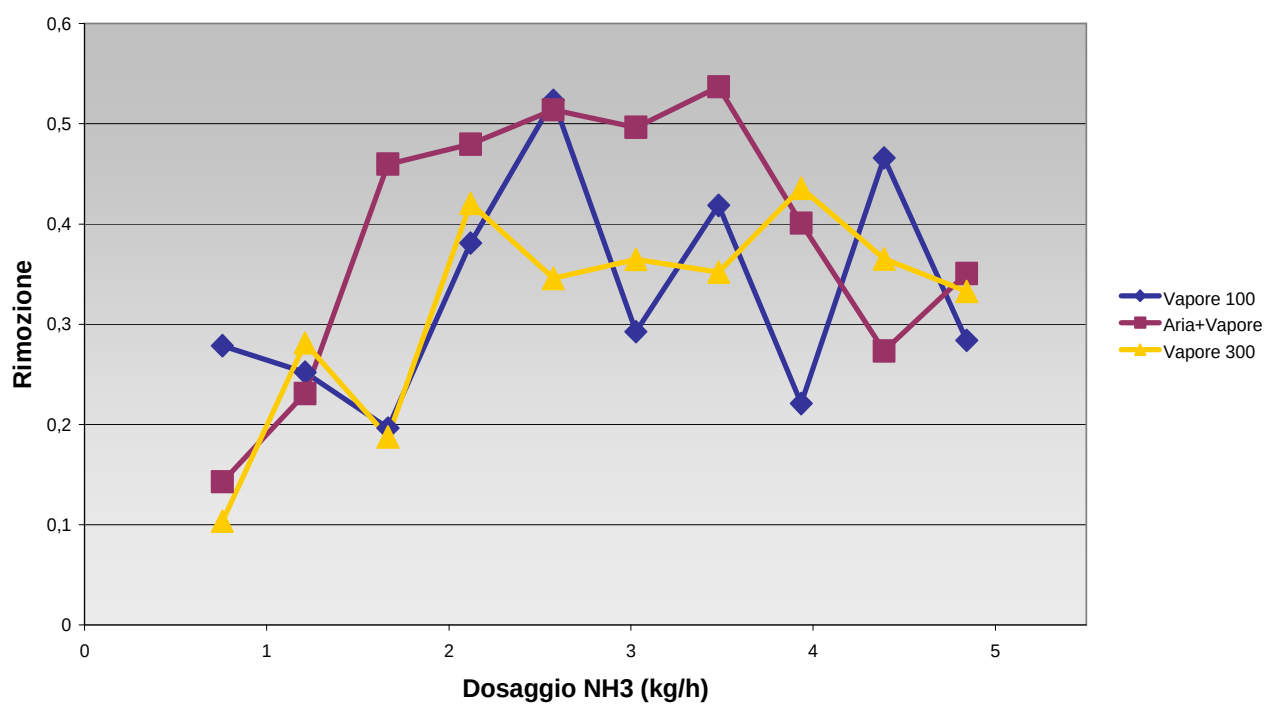


Grafico 7.4: Curve di rimozione per lo stadio 2

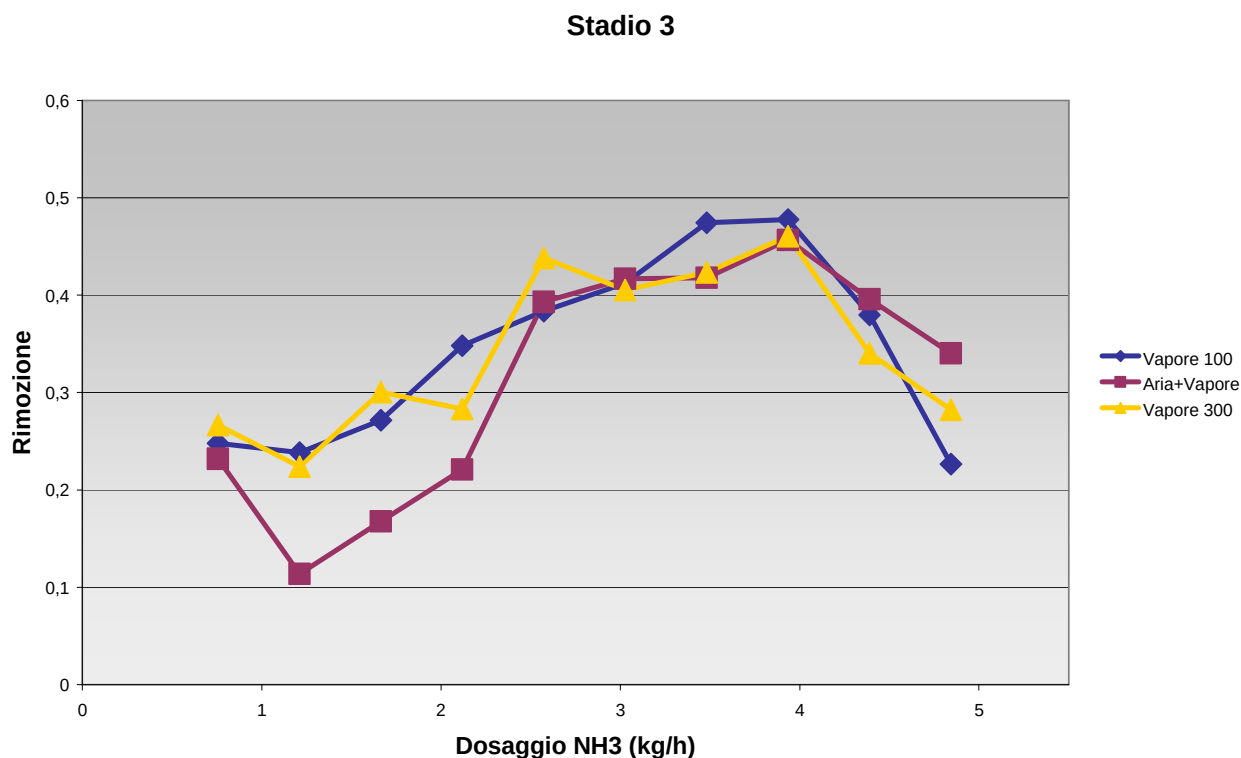


Grafico 7.5: Curve di rimozione per lo stadio 3

I risultati ottenuti dalle prove sperimentali si prestano ad alcune interessanti riflessioni. In primo luogo, è immediato notare che, in tutti gli stadi di immissione e pressoché per ogni condizione di prova, le più alte efficienze di abbattimento sono raggiunte in corrispondenza di una “*finestra*” di dosaggio ben definita, che comprende i valori centrali dell’intervallo di dosaggio considerato (che, si ricordi, dipende dal numero massimo e minimo di impulsi configurabile per la pompa in dotazione all’impianto). Quantitativi di soluzione adottata troppo bassi o troppo alti, cioè, comportano uno scadimento rapido delle prestazioni del sistema di trattamento, e restituiscono rese di rimozione praticamente dimezzate, rispetto alle condizioni di trattamento ottimali. A differenza di quanto si può pensare, dunque, l’aumento di reagente addotto alla zona di trattamento non necessariamente comporta un miglioramento delle prestazioni di abbattimento, e dà origine a comportamenti non lineari di non facile interpretazione. Più precisamente, l’efficienza di rimozione aumenta all’aumentare del dosaggio fino ad un certo quantitativo (approssimativamente 4 kg/h), dopodiché decade rapidamente, probabilmente a causa del già menzionato effetto parassita di ossidazione termica dell’ammoniaca addotta in NO_x (si veda in proposito il paragrafo 4.5.1). Viceversa, dosaggi bassi di reagente risultano insufficienti per il trattamento delle discrete

concentrazioni di NO_x contenute nella corrente dei fumi, e danno luogo a tassi di rimozione poco soddisfacenti. In definitiva, efficienze di rimozioni ottimali sono attinte per dosaggi di ammoniaca compresi tra i **2,5** e i **4 kg/h**, corrispondenti, considerando una soluzione di NH_3 al **25%** con densità pari a **0,88 kg/l**, ad un dosaggio di circa **11-18 l/h** di soluzione reagente. Tale finestra di dosaggio risulta leggermente allargata nel caso di rimozione operate con il *secondo stadio* di lance, laddove alte rese di abbattimento sono conseguite anche per dosaggi più bassi (fino a **2 kg/h**, circa **9 l/h** di soluzione), a testimonianza della sussistenza in questa regione di migliori condizioni di trattamento. Tale fattore è confermato anche dai valori di temperatura misurate con le termocoppie, come più sopra riportato, che collocano tale stadio in una finestra ottimale per il trattamento non catalitico.

Con riguardo al confronto tra le prestazioni offerte dai 3 stadi di immissione, colpiscono in primo luogo i modesti risultati ottenuti con il *primo stadio* di lance di adduzione, che fa registrare rese di abbattimento relativamente inferiori a quelle degli altri 2 stadi successivi. L'efficienza di rimozione per questo stadio, infatti, in nessun caso raggiunge il 40%, assestandosi su valori percentuali inferiori anche nei casi migliori (poco più del 35%), e faticando addirittura ad attingere rese medie del 30%, in ben 2 condizioni di prova su 3. Tale fenomeno generale è da attribuirsi, probabilmente, al valore troppo alto di *temperatura* presente in questa sezione di trattamento (che, si ricordi, rappresenta il primo stadio incontrato dalla corrente gassosa nel giro fumi della caldaia, immediatamente dopo aver lasciato la camera di post-combustione a circa 1050°C), che, come suggerito dalle termocoppie, si assesta attorno ai 980°C, in posizione estrema rispetto all'intervallo ideale della finestra termica per un trattamento di riduzione non selettiva. Tali condizioni, dunque, avviliscono parzialmente le reazioni di rimozione, e anzi favoriscono la conversione per via termica dell'ammoniaca addotta in nuovi ossidi d'azoto.

Dall'altro lato, invece, gli *stadi di immissione 2 e 3* (ossia quello centrale e quello inferiore) forniscono prestazioni di abbattimento più confortanti, avvicinandosi in diverse condizioni sperimentali a rese di rimozione medie del 50%, e superando tale valore in alcuni punti di prova (fino a punte di trattamento del 53%). In particolare, l'*ultimo stadio* di adduzione fa registrare risultati discreti in tutte le condizioni di prova, garantendo prestazioni di rimozione abbastanza stabili ed affidabili, e oscillanti tra il 40% e il 50% nella finestra di dosaggio ottimale già segnalata. In particolare, il comportamento non lineare dell'abbattimento degli NO_x all'aumentare del dosaggio di

soluzione sembra trovare speciale conferma nei risultati conseguiti per questo stadio, nei quali è evidente l'aumento dell'efficienza all'aumentare dell'ammoniaca addotta sino ad un certo dosaggio massimo (pari a 4 kg/h), e quindi il suo rapido decadimento, all'aumentare ulteriore di quest'ultimo. Nel complesso, dunque, tale stadio di rivela particolarmente affidabile e sicuro, dal momento che offre discrete capacità di trattamento in tutte le situazioni di prova, indipendentemente dalle condizioni operative di pressione e portata di vapore.

L'incidenza di tali condizioni, viceversa, sembra avere un peso maggiore nell'altro stadio di immissione che fa registrare i risultati migliori, ossia quello posto in posizione *intermedia* rispetto agli altri 2. In tale stadio, si evidenziano buone caratteristiche di trattamento in generale (comprese tra il 35% e il 50% nella finestra di dosaggio ottimale), che diventano addirittura eccellenti nel caso della prova con immissione congiunta di vapore e aria compressa (tra il 47% e il 53%). Tale prova, infatti, restituisce rese di abbattimento superiori sia al caso in cui è addotta la portata massima di vapore (circa 300 kg/h), in cui si registra un andamento di rimozione pressoché costante (tra il 35 e il 43% nella finestra ottimale), sia al caso in cui è addotta la portata minima di vapore (circa 100 kg/h), in cui, pur a fronte di alcuni picchi di eccellenza, si registra un andamento notevolmente altalenante, con diverse depressioni dell'efficienza. Le ottime prestazioni raggiunte dall'immissione congiunta di portata bassa di vapore e aria compressa suggeriscono il contemporaneo superamento di quegli effetti, per così dire "collaterali", associati alle condizioni di prova in cui è immesso semplicemente vapore. Più nello specifico, infatti, è lecito ipotizzare che una minore immissione di vapore di trasporto (come nel caso di vapore pari a 100 kg/h) comporti *una pressione di adduzione* alla zona di trattamento ovviamente inferiore, e, di conseguenza, un minor grado di turbolenza e miscelazione tra soluzione reagente e portata dei fumi, il quale, come suggerito dall'analisi statistica, contribuisce in maniera non trascurabile a determinare l'abbattimento finale degli NO_x. Viceversa, l'adduzione di una portata maggiore di vapore di trasporto (come nella prova con vapore pari a 300 kg/h) si traduce sì in un aumento della pressione in seno alla lancia di immissione, e quindi un beneficio in termini di miscelazione dell'ammoniaca, ma allo stesso tempo comporta una maggiore *diluizione* della componente reagente, la quale già in partenza è presente come soluzione liquida (tra l'altro al 25%), e risulta ulteriormente meno concentrata all'aumentare del vapore di trasporto che la nebulizza. L'immissione congiunta di *vapore e aria compressa* sembra risolvere questi effetti secondari, dal momento che

assicura, allo stesso tempo, un grado di concentrazione del reagente elevato, e quasi pari a quello che si ottiene immettendo la portata bassa di vapore, e un elevato grado di turbolenza e miscelazione con i fumi, grazie al raggiungimento dello stesso valore elevato di pressione della prova con portata alta di trasporto. L'effetto congiunto di soluzione più concentrata e di pressione elevata garantisce contemporaneamente il raggiungimento di *elevate rese di abbattimento* (dovute ad una soluzione non troppo diluita) e di una *sostanziale stabilità* nelle capacità di rimozione (almeno nella finestra ottimale di dosaggio), dovuta all'azione di turbolenza della maggiore pressione. Tale effetto stabilizzante, del resto, è confermato dalla prova con portata di vapore pari a 300 kg/h, non solo per lo stadio 2, ma, a ben vedere, anche per tutti gli altri stadi di adduzione considerati. In più, la presenza di un maggior grado di turbolenza sembra supplire anche ad un eventuale diminuzione del reagente immesso per il trattamento, dal momento che la finestra di dosaggio ottimale appare allargata anche a dosaggi leggermente inferiori (fino a 2 kg/h). La maggiore efficacia della soluzione “vapore + aria compressa”, d'altro canto, è confermata dalle prove eseguite sullo stadio 1, e non smentita dalle prove sullo stadio 3, ove attinge rese di abbattimento pari e in qualche caso superiori alle altre due prove. In tutti gli stadi, inoltre, l'aggiunta di aria compressa conferisce alle prestazioni del sistema DeNO_x una benefica stabilità e costanza nel rendimento di rimozione.

La superiorità nelle rese di abbattimento, unita alla maggiore affidabilità legata alla stabilità nelle prestazioni, fanno dell'adduzione congiunta di *bassa portata di vapore e aria compressa* una prospettiva impiantistica estremamente interessante. In tutti gli stadi adoperati, l'immissione di aria compressa come supporto al trasporto restituisce prestazioni ottimali, che consentono di conseguire abbattimenti di inquinante ampiamente soddisfacenti, anche variando il dosaggio di reagente entro la finestra di dosaggio ottimale. Incidentalmente, l'adduzione di aria in luogo del vapore consente un significativo risparmio di quest'ultimo (basti pensare che il raggiungimento del valore alto di pressione con aria comporta il risparmio di ben 200 kg/h di vapore), il quale può così essere efficacemente utilizzato per altri usi d'impianto, o per la produzione di energia elettrica, con notevole incremento del rendimento globale dell'intero impianto.

Va sottolineato, inoltre, come il tasso di rimozione rilevato sia ovviamente funzione della concentrazione di ossidi d'azoto in ingresso, aumentando all'aumentare di quest'ultima; tale concentrazione, come si può vedere dalle tabelle in appendice, non supera mai i limiti previsti dalla normativa, mantenendosi ben al di sotto anche in

assenza di trattamento. E' lecito attendersi, dunque, rese di abbattimento ancora più alte, qualora dovesse registrarsi un ingresso di rifiuto con contenuto d'azoto notevolmente maggiore.

7.7 Sintesi e conclusioni

Le 2 fasi di esecuzione delle prove sperimentali hanno consentito di raggiungere gli obiettivi specifici posti, di seguito sintetizzati:

Obiettivo specifico	Risultati ottenuti
verifica del sistema DeNOx attuale	Il sistema DeNOx attuale risponde ai requisiti di efficacia richiesti dalle norme vigenti;
ricognizione delle migliori tecnologie disponibili	Il sistema è tra le migliori tecnologie disponibili
progettazione ed implementazione di un sistema sperimentale alternativo	Un sistema sperimentale è stato realizzato e testato con varie prove sperimentali in 2 fasi successive su impianto a scala reale.
verifica della possibilità di sostituzione del reagente utilizzato	Le prove sperimentali condotte nella fase 1 hanno dimostrato la possibilità di efficace sostituzione, ed anche di potenziale migliore abbattimento, del sistema sostitutivo con ammoniaca in soluzione acquosa, soprattutto a dosaggi più elevati, necessari per più alti valori di NOx presenti (cfr. par. e fig 7.4)
verifica in campo del sistema sperimentale	Il sistema sperimentale è stato verificato in campo su diversi punti di iniezione, corrispondenti a varie temperature e si è rivelato efficace. Il punto migliore di iniezione si è dimostrato essere quello intermedio, dove le temperature medie misurate sono circa 860 °C
analisi dei dati ottenuti sul sistema sperimentale e confronto con il sistema esistente	I dati ottenuti con il sistema sperimentale sono stati analizzati nella prima fase con rappresentazioni grafiche e successivamente, nella seconda fase, con metodo statistico. Sono state ricavate delle relazioni utili e significative con i parametri di processo. È stata riscontrata una sostanziale aderenza ed influenza dai parametri attesi sulla quantità degli NOx in uscita: NOx ingresso, dosaggio NH₃, temperatura ed ossigeno di post combustione. Si è riscontrata inoltre influente, probabilmente in via indiretta tramite un aumento di turbolenza nel punto di iniezione, e quindi con necessità di ulteriori indagini, la portata dei fumi. I rendimenti di abbattimento ottenuti sono stati variabili fino a circa il 55% e tendenzialmente più alti in corrispondenza di un più elevato valore di NOx in ingresso. Il sistema sperimentato presenta degli elementi innovativi di interesse (sostituzione parziale di vapore con aria come fluido di trasporto mantenendo i vantaggi di entrambi) rispetto ai sistemi attualmente utilizzati e commercialmente disponibili.

La sperimentazione ha segnalato come, nelle condizioni usuali di esercizio, i migliori risultati siano ottenibili in corrispondenza del *secondo stadio di lance di immissione* (posto in posizione intermedia), in cui è lecito ipotizzare la sussistenza di condizioni ideali di temperatura, comprese nell'intervallo ottimale per il trattamento DeNO_x non catalitico, e in cui sono state raggiunte efficienze di abbattimento reali superiori al 50%. Per tale stadio, in particolare, l'immissione congiunta di *portata bassa di vapore e aria compressa* ha restituito prestazioni di abbattimento di eccellenza, supportate da un'apprezzabile stabilità e costanza al variare del dosaggio di reagente. L'immissione di aria compressa, congiuntamente al vapore di trasporto, restituisce infatti le rese di abbattimento più elevate (fino al 53%), e garantisce le prestazioni migliori in tutti e 3 gli stadi di immissione analizzati.

L'adduzione congiunta di aria compressa e vapore rappresenta una novità di sicuro interesse. Il miglioramento globale delle prestazioni del sistema e il contemporaneo risparmio di vapore, utilizzabile per altri scopi d'impianto, rendono tale soluzione particolarmente interessante da un punto di vista applicativo, nella misura in cui consente di ottenere significativi vantaggi sia nel trattamento degli inquinanti, sia nell'economia globale dell'impianto. Tale innovazione è stata presa dunque a riferimento per l'implementazione in scala reale di una soluzione impiantistica nuova, che consente la conversione dell'attuale sistema di somministrazione dell'ammoniaca reagente.

In particolare, sulla base di tali risultati sperimentali l'azienda AMA ha:

- richiesto ed ottenuto autorizzazione agli organi istituzionali competenti per l'implementazione definitiva del sistema;
- sviluppato una specifica tecnica di dettaglio per l'affidamento in appalto della realizzazione del sistema.

Bibliografia

Commissione Europea, 1996. Direttiva del 24 settembre 1996 N. 96/61/CE - Prevenzione e riduzione integrate dell'inquinamento IPPC. *Gazzetta ufficiale della Repubblica Italiana*, n. L. 332, 28 dicembre 2000.

Commissione Europea, 2000. Direttiva del 4 dicembre 2000 N. 96/61/CE – Incenerimento dei rifiuti. *Gazzetta ufficiale della Repubblica Italiana*, n. L. 267, 10 ottobre 1996

Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC), 2006 “*Reference document on the best available techniques for waste incineration*” European Commission, Agosto 2006

Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC), 2006 “*Reference document on the best available techniques for waste treatments industries*” European Commission, Agosto 2006

Presidenza della Repubblica, 1997. Decreto Legislativo del presidente della Repubblica N. 22/97

Presidenza della Repubblica, 2005. decreto Legislativo del presidente della Repubblica N. 59 del 18 febbraio 2005 - Attuazione integrale della direttiva 96/61/CE relativa alla prevenzione e riduzione integrate dell'inquinamento. *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana*, n. 93 - S.O. n.92, 24 aprile 2005.

Presidenza della Repubblica, 2005. decreto Legislativo del presidente della Repubblica N. 133 del 11 maggio 2005 - Attuazione della direttiva 2000/76/CE, in materia di incenerimento dei rifiuti. *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana*, n. 163 - S.O. n. 162, 15 luglio 2005.

Presidenza della Repubblica, 2006. Decreto Legislativo del presidente della Repubblica N. 152 del 3 aprile 2006 – Norme in materia ambientale. *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana*, n. 88 - S.O. n. 96, 14 aprile 2006

J. Brouwer, M. P. Heap, D. W. Perching, P. J. Smith, 1996. *“A model for prediction of selective noncatalytic reduction of nitrogen oxides by ammonia, urea and cyanuric acid with mixing limitations in the presence of CO”*. Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, USA, pp. 2117-2124

Bowman, C. T., 1973. *Kinetics of nitric oxide formation in combustion processes. Fourteenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, USA, pp. 729-738.*

Bowman, C. T., 1975. *Kinetics of pollutant formation and destruction in combustion. Progress in Energy and Combustion Science, 1, 33- 45.*

Bowman, C. T., 1992. *Control of combustion-generated nitrogen oxide emissions: technology driven by regulation. Twenty-Fourth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, USA, pp. 859-878.*

I. Smith, 1980. *“Nitrogen oxides from coal combustion - abatement and control”*. IEA Coal Research, London, (ICTIS/TR 11)

J. M. Tarbell, C.A. Petty, 1977. *“Combustion modifications for the control of NO_x emissions”*. Chemical Engineering Science, 32, 1177-1188

G. Tchobanoglous, H. Theisen, S. Vigil, 1993. *“Integrated Solid Waste Management”*. International ed. MCGRAW-HILL.

D. Thompson, T. D. Brown, J. M. Beér, 1972. *“NO_x formation in combustion”*. Combustion and Flame, 19, 69-79.

J. Zeldovich., 1946. *“The oxidation of nitrogen in combustion and explosions”*. Acta physicochimica U.R.S.S., 21 (4), 577-628

Terra Industries Inc. – Tech Manual 2002 - Ammonia & Ammonia Solution
STORAGE AND HANDLING

Terra Industries Inc. – Tech Manual 2008 - Ammonia & Ammonia Solution
STORAGE AND HANDLING

NO_x Control Technologies: Focus SNCR J. R. Comparato, Director, Product
Development Fuel Tech, Inc., Batavia, Illinois - www.fueltechnv.com -Western Coal
Council, Burning PRB Coal Seminar - April 24-26, Birmingham, Alabama

Selective Non-Catalytic Reduction: Overview - William H. Sun, Ph.D. - Fuel Tech, Inc.
- WPCA/Duke NO_x Seminar - June 7, 2005

A. Fiore, R. Gavasci, F. Lombardi, S. Zandaryaa: "SNCR DeNO_x System on a
Full Scale Hospital Waste Incineration plant: Detention of Control Parameters
and Optimization" Proc. The Fifteenth International Conference on Solid Waste
Technology and Management, 6D, Ed. University of Pensilvania, Philadelphia,
1999

A. Fiore, F. Lombardi, G. Rubrichi, G. Viviano: "Pollutants Distribution
Detected at the Flue Gases Treatment Facilities of the Hospital Waste Incinerator
of Rome". Proc. ISWA World Congress on Waste Management: "2000 and
beyond: which choices for waste management?", 439-447, Paris 3 – 7 July
2000. Ed. ISWA e Aghtm, Paris (2000).

S. Cirilli, R. Gavasci, O. Lazzaro, F. Lombardi, S. Zandaryaa: "Pilot-Scale
Thermal DeNO_x System on an Industrial Waste Incineration Plant". Proc. ISWA
World Congress on Waste Management: "2000 and beyond:which choices for
waste management?", 305-320, Paris 3 – 7 July 2000. Ed. ISWA e Aghtm,
Paris (2000)

A. Fiore, R. Gavasci, F. Lombardi, S. Zandaryaa: "NO_x Control in Waste
Incineration Plant: Comparation and Evaluation of SNCR Systems". Proc.
International Symposium on Sanitary and Environmental Engineering,
SIDISA 2000, Trento 18 – 23 September 2000. Vol. III, pagg. 275-283. Hyper
Edizioni, via Degan, 10 – 30172 Venezia.

Appendice 1:

A1.1 Rappresentazioni Simultanee “central composite rotatable design” adottate nella fase 1

Nella prima fase d'indagine è stata utilizzata la tecnica della rappresentazione simultanea di parametri. In questa fase in cui non è stata utilizzata l'analisi statistica risultava particolarmente importante la ricerca di condizioni di stabilità del processo in modo da avere un set di dati medi influenzati solo dai parametri dei quali si intende studiare la correlazione.

L'idea alla base di una rappresentazione simultanea è quella di rilevare la risposta di un set di esperimenti condotti in maniera da poter individuare le eventuali zone di ottimo e le interazioni tra i parametri mediante l'analisi di regressione.

I modelli fattoriali a due livelli sono adatti nella stima di effetti e interazioni del primo ordine, ma falliscono quando sono rilevanti gli effetti del secondo ordine sono quindi necessari modelli che tengano conto delle interazioni del secondo ordine.

Il central composite design è il risultato della sovrapposizione di un factorial design a due livelli ($2N$) e uno star design ($2N+1$), quindi si hanno un numero di esperimenti da condurre pari a $2N+2N+1$ che definiranno i termini lineari, quadratici e misti con una stima degli errori dei termini. Per la costruzione del modello si procede per fasi, durante la prima fase abbiamo la scelta del numero di fattori da studiare, nella seconda viene calcolato il numero di esperimenti da condurre mediante l'espressione $2N+2N+1$, ad esempio con due fattori dovremmo condurre 9 esperimenti, infine durante la terza fase procederemo alla localizzazione del punto centrale e il passo, nello spazio delle variabili codificate, con cui generare le altre condizioni operative.

Il centro di questo tipo di rappresentazioni viene replicato più di una volta; questo perché il modello assume che l'incertezza sperimentale pura è connessa alla distanza dal centro del modello stesso. Si noti però che questo non è sempre vero perché in alcuni casi l'incertezza risulta funzione anche della distanza dagli altri punti sperimentali nel caso in esame questo fenomeno non si è verificato. Il modello Central Composite viene utilizzato appunto per ridurre la condizione di dipendenza dell'incertezza alla sola distanza dal centro del modello e per definire l'indipendenza della stessa dalla posizione degli altri punti sperimentali. Utilizzando questo modello vengono generate informazioni equipollenti in tutte le direzioni; questo è il motivo per cui il suddetto modello viene definito “Rotable”: una rotazione dello stesso intorno all'origine, infatti, non altera i contorni di varianza del modello.

Questo tipo di modello simultaneo viene ampiamente utilizzato per l'ottimizzazione di un metodo analitico se il numero di fattori risulta comunque limitato. L'efficienza, definita come il rapporto tra il numero di parametri da stimare ed il numero di fattori combinati, risulta elevata fino a 5 fattori mentre decresce bruscamente per 6 o più fattori. Nel caso specifico i parametri di controllo sono solamente due, cioè il dosaggio di ammoniaca (NH_3) liquida o gassosa, a seconda delle prove, e la portata del vapore di

trasporto, scegliendo un opportuno intervallo di variazione di questi parametri è stato possibile determinare le coordinate dei punti necessari al modello per la ricerca delle condizioni di ottimo. In realtà nel modello le coordinate dei punti sono sempre determinate, l'unica differenza è il numero dei punti che è funzione ovviamente dei parametri indipendenti ed è fornito dall'equazione $2^N+2N+1+r$, dove r rappresenta il numero di repliche del punto centrale, quello che realmente accade è un cambiamento degli assi di riferimento infatti avviene il passaggio dal piano di riferimento del modello dove i punti formano una circonferenza di centro nell'origine al piano sperimentale dove gli assi rappresentano le variabili indipendenti. Si parla di piano in quanto è già stato detto che i parametri sono due. Il passaggio dal piano del modello a quello delle variabili sperimentali è stato effettuato mediante un cambio di variabili, tenendo conto di un opportuno fattore di scala dato il diverso ordine di grandezza tra le variabili sperimentali e le coordinate dei punti nel piano del modello.

Di seguito la tabella 7.3, riassume i valori delle prove da effettuare e tutti i parametri per la determinazione delle coordinate dei punti sperimentali. Dalla figura invece è possibile vedere bene come i punti formino un cerchio a conferma dell'ipotesi che la dipendenza dei parametri non è funzione della distanza dal punto centrale.

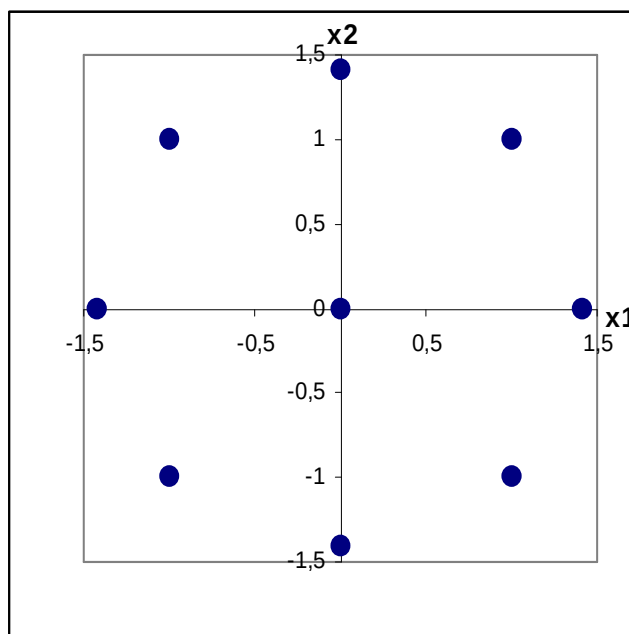
Tabella A1.1

Tabella riepilogativa ammoniacca anidra

N° variabili indipendenti	N	2		
n° repliche punto centrale	r	3		
n° esperimenti	$2^N+2N+1+r$	12		
α	$(2^N)^{0,25}$	1,41		
Variabili	(NH3)	(Q Vapore)		
Valore Minimo (m)	10	90		
Valore Massimo (M)	100	350		
Media (med)	55	220		
Fattore di scala (med/ α)	31,820	91,924		
Punti	Variabili del modello		Variabili indipendenti	
Sperimentali	x1	x2	ξ_1	ξ_2
O	0	0	55,0	220
S1	0	-1,41	55,0	90
S2	-1,41	0	10,0	220
S3	0	1,41	55,0	350
S4	1,41	0	100,0	220
F1	1	1	86,8	312
F2	-1	-1	23,2	128
F3	-1	1	23,2	312
F4	1	-1	86,8	128

Figura A1.1

Rappresentazione dei punti



Il lavoro eseguito per l'ammoniaca gassosa viene ripetuto anche per l'ammoniaca liquida, ovviamente il parametro che regola la concentrazione di NH₃ nei due casi è diverso, in quanto nel caso dell'NH₃ gassosa si interviene mediante una variazione percentuale di apertura della valvola, invece nel caso dell'NH₃ liquida si interviene sulla frequenza degli impulsi della pompa peristaltica che modifica la portata di NH₃ iniettata.

Anche il campo di variazione del vapore di trasporto è diverso, in quanto l'ammoniaca liquida aumenta la pressione nel sistema di immissione miscela ammoniaca e il valore del vapore di trasporto può essere fatto variare tra 0 e 200 kg/h.

Il valore minimo è stato scelto in base al fatto che, la regolazione non può essere fatta in modo molto precisa, quindi si è preso il valore minimo che si è riusciti ad impostare ovvero 55 kg/h.

Tabella A1.2 **Tabella riepilogativa ammoniaca liquida**

n° variabili indipendenti	N	2		
n° repliche punto centrale	r	3		
n° esperimenti	$2^N+2N+1+r$	12		
α	$(2^N)^{0,25}$	1,41		
	Variabile 1 (NH3)	Variabile 2 (Q Vapore)		
Valore Minimo (m)	40	55		
Valore Massimo (M)	160	190		
Media (med)	100	122,5		
Fattore di scala (med/α)	42,426	47,730		
Punti	Variabili del modello	Variabili indipendenti		
Sperimentali	x1	x2	ξ_1	ξ_2
O	0	0	100	123
S1	0	-1,41	100	55
S2	-1,41	0	40	123
S3	0	1,41	100	190

S4	1,41	0	160	123
F1	1	1	142	170
F2	-1	-1	58	75
F3	-1	1	58	170
F4	1	-1	142	75

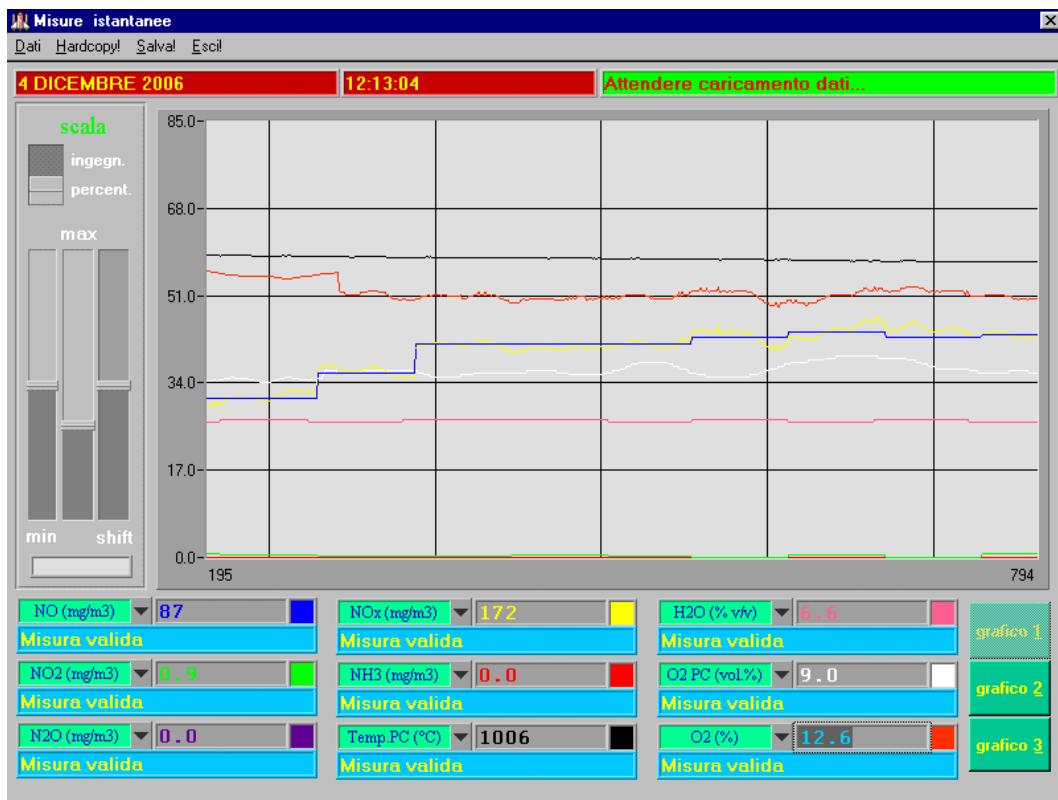
Ovviamente anche la rappresentazione dei punti riguardanti l'ammoniaca liquida formano un cerchio.

Prove effettuate

Una volta studiato l'impianto e le tecniche di rimozione degli NOx si è potuto procedere con l'esecuzione delle prove. In base a quanto determinato dal modello descritto precedentemente, dalla sala controllo è stato possibile impostare i dosaggi richiesti dell'NH₃, al contrario per regolare la portata di vapore di trasporto, tramite l'apposita valvola di controllo, era necessario scendere in campo per effettuare le varie regolazioni, dato che il sistema di regolazione del vapore non è provvisto di un controllo remoto in sala controllo. All'inizio di ogni prova è stato creato un valore di fondo degli NOx, mediante intercettazione del flusso dell'NH₃ per alcuni minuti, una volta stabilizzato il livello degli NOx si è proceduto impostando il valore dell'ammoniaca sul dosaggio previsto, quindi anche qui, attesi alcuni minuti di stabilizzazione dei nuovi livelli, si è reso possibile verificare l'abbattimento ottenuto. Di seguito le figure mostrano l'andamento dei vari parametri di controllo scelti al variare delle condizioni operative.

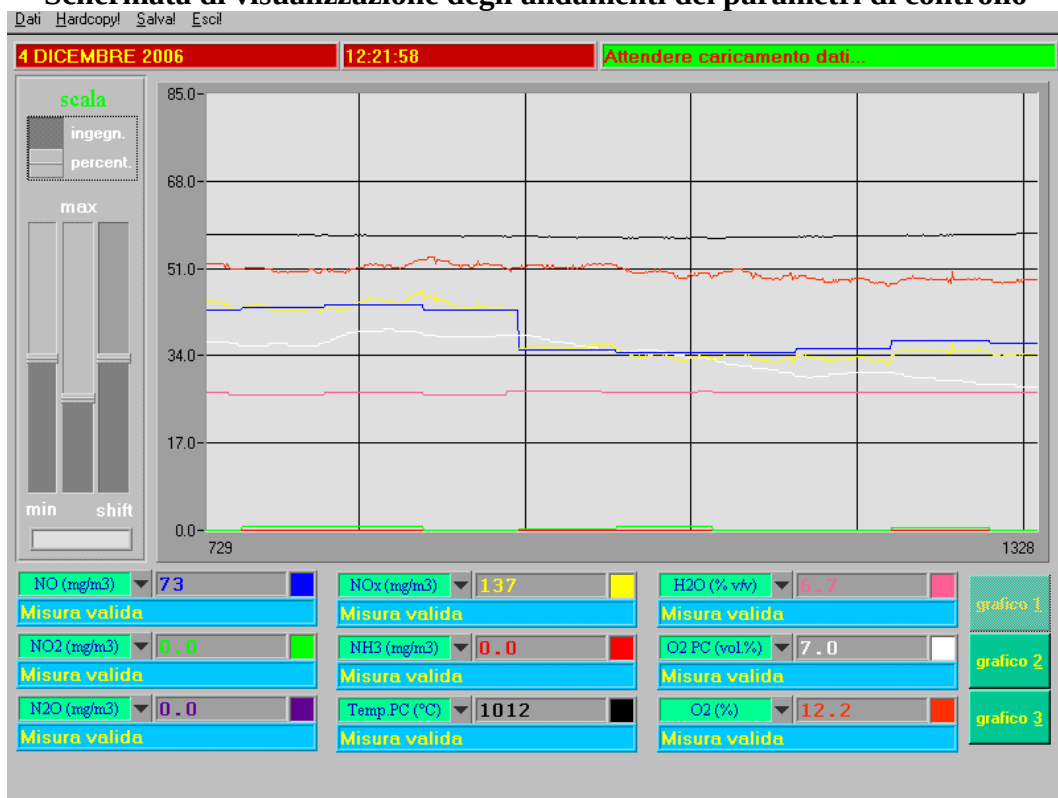
Successivamente alla chiusura dell'ammoniaca attesi circa due minuti è possibile notare l'innalzamento dei valori. Seguendo la linea blu, la quale rappresenta l'andamento degli NO, è possibile vedere in modo molto marcato l'innalzamento a scalini degli ossidi di azoto. Per semplicità si è osservato l'andamento degli NO in quanto sono valori non corretti con l'ossigeno e quindi più rappresentativi dello stato attuale nella post combustione.

Figura A1.3
Schermata di visualizzazione degli andamenti dei parametri di controllo



Nella figura 7.14 è invece possibile vedere il comportamento inverso, ovvero in seguito alla riapertura dell'ammoniaca, attesi sempre circa due minuti, si riesce a vedere l'abbattimento dovuto a quello specifico dosaggio degli NO rappresentati dalla linea blu.

Figura A1.4
Schermata di visualizzazione degli andamenti dei parametri di controllo



La necessità di azzerare il dosaggio dell'ammoniaca prima di ogni prova è dovuta alla necessità di capire il quantitativo di NO_x di base, in quanto l'abbattimento, oltre ad essere funzione del dosaggio di NH₃, del vapore di trasporto, delle temperature in camera di combustione, della quantità di aria immessa è anche funzione delle quantità degli ossidi d'azoto presenti nel flusso di gas in uscita dalle unità di trattamento.

Maggiori concentrazioni portano a maggiori abbattimenti a parità delle altre condizioni. Una volta effettuata la prova si è potuto procedere al reperimento dei dati tramite le tabelle riepilogative, che il programma di rilevamento provvede in automatico a realizzare per il monitoraggio degli inquinanti, in ottemperanza alla normativa vigente. Tale sistema di acquisizione è stato dettagliatamente descritto nel paragrafo precedente metodi di campionamento.

Le tabelle vengono registrate in continuo per ogni ora vengono realizzate due tabelle contenenti una i dati dal minuto uno al minuto trenta e l'altra dal trentunesimo al sessantesimo. Da queste vengono appunto ricavati i dati necessari per l'analisi matematica dei dati in quanto le prove vengono effettuate anche a cavallo di due tabelle e quindi si rende necessario un lavoro di raggruppamento dei dati.

Per ogni prova viene poi calcolato un valore medio rappresentativo di ogni parametro di controllo, non considerando però il periodo transitorio di stabilizzazione dei valori. Ovviamente si è cercato di rendere le prove più uniformi possibile, infatti il periodo su cui venivano mediati i valori di fondo erano tutti uguali e logicamente più corti del periodo in cui si effettuava il dosaggio, per evitare che le medie delle emissioni non subissero variazioni negative, risultando superiori ai valori massimi permessi dalla normativa vigente. Le medie per la determinazione dei valori di fondo sono state realizzate su un periodo di otto minuti, mentre per i valori riferiti al dosaggio il tempo è stato esattamente il doppio ovvero sedici minuti. La lunghezza di tali periodi risulta essere sufficiente per la determinazione dei valori corrispondenti caratteristici di ogni prova.

Periodi più lunghi della prova, avrebbero potuto invalidare i valori del fondo corrispondente, in quanto il combustibile utilizzato in alimentazione al forno è estremamente eterogeneo, di conseguenza tempi più lunghi porterebbero all'immissione di nuovo combustibile che potrebbe avere un contenuto di azoto diverso, invalidando i valori del fondo.

Di seguito sarà mostrata la tabella 7.5, un esempio dove è possibile vedere il lavoro svolto per la determinazione dei valori medi.

Tabella A1.3

postazione: linea 2										
data : 10 GENNAIO 2007 minuti: 10:42 - 11:05										
	NO	NO ₂	NO _x	N ₂ O	NH ₃	Temp.PC	O ₂ PC	O ₂	Potata	H ₂ O
minuti	mg/m3	mg/m3	mg/m3	mg/m3	mg/m3	°C	%vol	%	Nm3/h	%v/v
42	45	3,1	123	0	0	1035	8,1	14,2	36219	3,8
43	44	2,5	127	0	0	1036	7,7	14,7	35938	3,8
44	44	2,5	129	0	0	1036	7,6	14,6	35577	3,8
45	45	2,2	124	0	0	1036	8,1	14,7	35707	3,9
46	47	2,5	126	0	0	1036	8,4	14,9	36043	3,9
47	47	2,4	127	0	0	1035	7,9	14,9	36280	3,9
48	47	2,5	120	0	0	1033	8,1	14,5	36131	3,9
49	47	2,2	126	0	0	1033	8	14,8	35497	3,9
50	47	2,9	124	0	0	1032	8,1	14,7	35291	3,9
51	47	2,6	128	0	0	1031	8,2	14,9	35524	3,9
52	47	2,7	124	0	0	1029	8	14,7	35547	4
53	43	2,6	115	0	0	1027	8,4	14,9	35537	3,9
54	34	1,4	90	0	0	1024	8	14,2	35360	3,9
55	33	1,2	86	0	0	1023	7,3	14,6	35317	3,9
56	34	2	85	0	0	1023	6,8	14,5	35345	3,9
57	34	2,4	89	0	0	1024	7,4	14,5	35587	3,9
58	34	3	93	0	0	1023	8,4	14,6	35898	3,9
59	34	2,6	94	0	0	1022	8,4	14,9	35815	3,9
60	33	2,7	90	0	0	1021	7,5	14,7	35528	3,9
1	34	2,3	87	0	0	1022	6,9	14,5	35489	3,8
2	34	1,5	85	0	0	1023	7	14,5	35485	3,9
3	34	2,4	90	0	0	1024	7,3	14,6	35586	3,9
4	34	1,3	89	0	0	1024	8	14,6	35707	3,9
5	35	1,7	94	0	0	1025	8,3	14,8	35943	3,9
6	33	2,7	90	0	0	1021	7,5	14,7	35528	3,9
7	34	2,3	87	0	0	1022	6,9	14,5	35489	3,8
8	34	1,5	85	0	0	1023	7	14,5	35485	3,9
Fondo	46,60	2,36	124,60	0,00	0,00	1034,60	8,10	14,76	35931,60	3,90
NH3	34,00	2,19	89,60	0,00	0,00	1023,10	7,60	14,62	35638,30	3,89

	periodo per la determinazione del fondo
	periodo per la determinazione dei valori con dosaggio
	periodo di transizione

Tabella A1.1 Fase sperimentale 1 - ammoniaca anidra - tabella riepilogo dati

	NH ₃	Qvapore	NOx	Abb.NOx	Eff.NOx	NO	NOu/NOi	NO ₂	N ₂ O	NH ₃ slip	Temp.PC	O ₂ PC	O ₂	H ₂ O
	%	kg/h	mg/Nm ³	mg/Nm ³	%	mg/Nm ³		mg/Nm ³	mg/Nm ³	mg/Nm ³	°C	%vol	%	%v/v
Fondo S1	0,0	90	95			38		ND	0,0	0,0	1039	7,9	14,6	3,7
	55,0	90	71	24	25	28	0,73	ND	0,0	0,0	1045	8,2	14,7	3,7
Fondo F4	0,0	128	109			44		ND	0,0	0,0	1040	8,0	14,7	3,5
	86,8	128	84	25	23	34	0,78	ND	0,0	0,0	1048	7,7	14,6	3,6
Fondo F2	0,0	128	75			29		ND	0,0	0,0	1048	8,0	14,9	2,6
	23,2	128	65	9	12	26	0,90	ND	0,0	0,0	1041	8,0	14,7	2,9
Fondo S2	0,0	220	186			66		57,5	0,0	0,1	1046	7,7	13,8	8,9
	10,0	220	179	6,4	3	59	0,90	20,6	0,0	0,1	1062	8,7	14,1	9,1
Fondo 0	0,0	220	119			46		ND	0,0	0,0	1007	8,3	14,9	3,6
	55,0	220	83	36	30	33	0,71	ND	0,0	0,0	1000	8,0	14,7	4,0
Fondo 01	0,0	220	119			47		ND	0,0	0,0	1035	8,1	14,8	3,9
	55,0	220	85	34	29	34	0,73	ND	0,0	0,0	1023	7,6	14,6	3,9
Fondo 02	0,0	220	113			45		ND	0,0	0,0	1025	7,9	14,7	4,1
	55,0	220	82	31	28	33	0,74	ND	0,0	0,0	1028	7,9	14,6	4,0
Fondo 03	0,0	220	77			30		ND	0,0	0,0	1020	8,3	14,8	2,9
	55,0	220	57	21	27	23	0,75	ND	0,0	0,0	1031	7,8	14,7	2,8
Fondo S4	0,0	220	108			43		ND	0,0	0,0	1020	8,4	14,8	3,8
	100,0	220	87	21	19	32	0,75	ND	0,1	0,0	1021	7,9	14,6	3,9
Fondo F3	0,0	312	74			29		ND	0,0	0,0	1047	8,0	14,7	2,9
	23,2	312	64	10,3	14	25	0,84	ND	0,0	0,0	1050	8,1	14,9	2,5
Fondo F1	0,0	312	109			44		ND	0,0	0,0	1040	8,0	14,7	3,5
	86,8	312	84	25	23	34	0,78	ND	0,0	0,0	1048	7,7	14,6	3,6
Fondo S3	0,0	350	71			27		ND	0,0	0,0	1062	8,4	14,9	2,7
	55,0	350	57	13,8	19	26	0,94	ND	0,0	0,0	1049	8,0	13,9	2,5

Tabella A1.2 - Fase sperimentale 1 - ammoniaca liquida - tabella riepilogo dati

Punto	Valori rilevati		NOx	Abb.NOx	Eff.NOx	NO	NOu/NOi	NO ₂	Temp.PC	O ₂ PC	O ₂	H ₂ O	N ₂ O	NH ₃ _{slip}	Portata
	NH ₃	Qvapore	mg/m ³	mg/m ³	%	mg/m ³	%	Mg/m ³	°C	%vol	%	%v/v	mg/m ³	mg/m ³	Nm ³ /h
Fondo S1	0	61	148	-		59		10,8	990	8,5	14,4	8,2	0,0	0,2	38285
	100	61	95	52	35	42	71	ND	1035	12,6	13,8	8,3	2,4	0,2	38493
Fondo F2	0	93	152	-		63		ND	1033	8,3	14,1	8,6	0,0	0,4	36885
	58	93	112	40	26	47	75	ND	1028	7,9	13,9	8,6	1,0	0,4	36807
Fondo F4	0	93	160	-		66		ND	1026	8,5	14,2	8,6	0,0	0,4	37058
	142	93	95	65	41	41	62	ND	1033	7,9	13,9	8,4	4,0	0,3	37107
Fondo S2	0	114	152	-		67		ND	1065	7,6	13,6	8,4	0,0	0,0	36701
	40	114	122	30	20	46	69	ND	1036	9,7	14,7	8,1	0,7	0,0	36609
Fondo O	0	114	170	-		69		20,7	1029	8,3	14,2	8,0	0,0	0,0	36017
	100	114	97	73	43	42	60	ND	1038	8,0	13,8	8,5	1,9	0,0	36414
Fondo O1	0	114	145	-		58		13,3	1031	8,8	14,4	8,2	0,0	0,0	36122
	100	114	86	59	41	37	63	ND	1022	7,8	13,9	8,6	8,3	0,0	35598
Fondo O2	0	114	128	-		55		24,4	1042	8,0	13,8	9,0	0,0	0,0	36433
	100	114	81	47	36	35	63	ND	1029	8,0	13,8	8,8	7,0	0,0	36168
Fondo O3	0	114	144	-		61		15,2	1038	8,1	13,9	8,7	0,0	0,0	36572
	100	114	93	51	35	39	63	ND	1030	8,3	14,0	9,1	7,4	0,0	36065
Fondo S4	0	114	138	-		58		11,7	1058	8,2	13,9	8,4	0,0	0,0	36486
	160	114	84	54	39	35	60	ND	1036	8,6	14,1	8,1	7,0	0,0	36674
Fondo F3	0	169	146	-		58		24,1	1022	8,3	14,2	9,2	0,0	0,7	36240
	58	169	94	52	36	39	66	13,1	1029	8,3	14,0	9,4	0,7	0,8	36008
Fondo F1	0	169	145	-		63		13,3	1029	7,8	13,7	9,7	0,0	0,8	36100
	142	169	84	61	42	37	59	ND	1057	8,3	13,6	9,2	4,4	0,7	37048
Fondo S3	0	194	146	-		58		ND	1038	8,5	14,4	9,0	0,0	0,0	36581
	100	194	90	56	39	37	64	ND	1028	8,0	14,1	9,0	8,6	0,0	36357

Appendice 2:

Metodologia statistica di interpretazione dei risultati sperimentali adottata nella fase 2

Nella seconda fase d'indagine, avendo appurato l'efficacia della soluzione ammoniacale, vista la difficoltà di ottenere valori medi, ovvero mantenere stabili per un periodo sufficientemente lungo le condizioni di processo e per volontà di indagare un più ampio spettro di condizioni operative e capire più a fondo le correlazioni tra tutti i vari parametri operanti simultaneamente è stata utilizzata la tecnica dell'indagine statistica.

Si è cercato insomma di ritrovare le correlazioni che i modelli matematici di produzione e rimozione forniscono in maniera generica e predittiva.

I fenomeni di generazione e abbattimento delle varie specie inquinanti, si è visto, coinvolgono dinamiche e processi di natura complessa, che risentono dell'influenza di numerose variabili locali. Tale complessità si traduce, in ultima istanza, in una definizione ostica della capacità di trattamento *effettiva* del sistema preposto, e in una conseguente significativa *imprevedibilità* delle reali concentrazioni in uscita al camino. Neanche l'osservazione diretta, a ben vedere, chiarisce con sufficienza le evoluzioni dei fenomeni indagati, dal momento che gli ambienti in cui essi si verificano offrono caratteristiche fisiche e chimiche estremamente mutevoli nel tempo e nello spazio, e dal momento che la loro reciproca interazione restituisce contributi non prevedibili, e nemmeno ben definiti.

D'altro canto, tuttavia, proprio l'incertezza nei risultati prestazionali dei sistemi di trattamento, e l'incapacità endemica di fornire previsioni "matematiche" sulle emissioni effettive rilasciate dall'impianto, costituiscono il principale motivo di diffidenza da parte dell'opinione comune nei confronti di questa tipologia di smaltimento, in combinazione alle perplessità legate alla qualità e alla natura del combustibile utilizzato. È evidente dunque che, al duplice scopo di offrire un impatto che gravi il più limitatamente possibile sull'ambiente esterno, e di fornire tutte le garanzie richieste (anche sociali) nello smaltimento dei rifiuti, è necessario che la *conoscenza* dei complicati processi coinvolti sia opportunamente curata e di volta in volta affinata, approfondendo progressivamente il livello di padronanza sui fenomeni d'interesse, e investigando con ocularità le dinamiche non ancora sufficientemente comprese. Il miglioramento dei sistemi attuali e delle tecnologie utilizzate, cioè, è possibile solo laddove tale approfondimento (che si esplica attraverso un percorso di *lavori di ricerca*) sia curato in dettagli sempre più particolari, i quali, penetrando in profondità le questioni da risolvere e individuando le cause e le condizioni alla base di esse, consentono di intervenire in maniera più efficace, e di orientare i processi verso i risultati desiderati. Il lavoro di *analisi preliminare* costituisce così una fase di fondamentale importanza, nella misura in cui permette di fare luce sui fattori che regolano i fenomeni di interesse; le risorse inizialmente impiegate trovano giustificazione nel sicuro vantaggio competitivo che si ottiene nelle operazioni

successive, nella accresciuta capacità di dimensionare gli interventi correttivi con maggiore precisione e accuratezza, e nel risparmio di inutili sprechi di tempo e denaro.

All'approfondimento della conoscenza di un particolare tipo di processo in un impianto di incenerimento, costituito, si è detto, dalle *dinamiche di formazione e abbattimento degli ossidi d'azoto*, è dedicato questo lavoro. Il percorso di ricerca è stato sviluppato su due direzioni distinte, ma intimamente connesse tra loro.

Nella prima parte del lavoro, si è inteso indagare sui fenomeni d'interesse con gli strumenti forniti da un particolare tipo di approccio (in verità raramente sviluppato), costituito dall'*analisi statistica*, la quale è stata applicata ai dati, elaborati in continuo dal sistema di rilevazione, riguardanti le concentrazioni di NO_x in uscita al camino dell'impianto di incenerimento dei rifiuti. Si è cercato, cioè, con l'ausilio dello strumento statistico, di formalizzare le relazioni che legano alcune variabili, per le quali è inizialmente supposta una certa influenza sul processo, all'emissione effettiva di ossidi d'azoto, evidenziando, in particolare, il diverso grado di correlazione tra esse, in modo da distinguere i soli elementi che, in termini probabilistici, maggiormente sono atti a spiegare il fenomeno e l'entità della formazione degli inquinanti. Tale tipo di trattamento ha l'indubbio pregio di fornire risultati *statisticamente* veritieri, ossia slegati dalle particolari condizioni locali in cui essi sono stati conseguiti, e maggiormente vicini a quelle che sono le dinamiche reali che governano i processi investigati. L'allargamento delle osservazioni e il loro trattamento statistico, cioè, consentono di divincolarsi dalle situazioni che di volta in volta si presentano, e di avvicinarsi maggiormente alla definizioni di leggi universalmente valide, non condizionate dal mutare delle condizioni al contorno. L'utilizzo dello strumento statistico, in definitiva, consente di appianare le incertezze dell'osservazione diretta, e ottenere risultati di validità più generale. È evidente, in ultima istanza, che tale tipo di elaborazione costituisce la base preliminare per le successive prove di ottimizzazione del processo, e per la definizione dei parametri d'ottimo che governano i meccanismi di abbattimento degli inquinanti considerati, dal momento che essa permette di individuare le variabili di maggior peso, e di concentrare gli sforzi su un piano di ricerca mirato e ben definito, riservando maggiore attenzione per le sole variabili di processo che più significativamente influenzano le dinamiche di formazione e rimozione degli ossidi di azoto. I dati per le elaborazioni statistiche sono stati forniti da una serie di prove sperimentali sul campo.

I dati forniti dall'analisi statistica forniscono un valido supporto alla progettazione, dal momento che essi consentono di individuare il *dosaggio ottimale* di ammoniaca liquida da addurre al sistema DeNO_x e il *punto di immissione* ai fumi che garantisce la più alta efficacia di abbattimento.

Nei paragrafi successivi viene presentato il modello statistico utilizzato nelle prove.

A2.1 Il metodo statistico di regressione multipla

Nella prima parte del lavoro di ricerca si è inteso verificare le *relazioni* che legano la variabile dipendente di interesse (ossia la concentrazione di ossidi d'azoto nel camino),

con gli altri fattori di processo, analizzando, secondo il linguaggio statistico, l'incidenza delle singole variabili sul processo di formazione degli inquinanti nel processo. In particolare, si è cercato di costruire un *modello matematico*, che descrivesse le variazioni delle emissioni di ossido d'azoto in funzione dei parametri oggetto di investigazione, evidenziando il loro diverso grado di significatività del processo. Dal momento che il numero delle variabili indipendenti inizialmente considerate per spiegare il processo è superiore a 1, è evidente che la problematica non può essere affrontata adottando un modello di regressione semplice, bensì occorre necessariamente far ricorso ad un *metodo di regressione multipla*. Tale metodologia, infatti, è in grado di spiegare l'andamento della variabile indipendente considerata (generalmente indicata con Y) in funzione di k variabili esplicative (con $k > 2$) che prendono il nome generico di *regressori*, secondo la relazione:

$$Y = \beta_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon$$

ove i coefficienti $\beta_{1,2,\dots,k}$ rappresentano i *coefficienti di regressione* del modello, essendo $i = 1, 2, \dots, k$ la successione intera dei regressori considerati. Il primo coefficiente β_1 rappresenta l'intercetta del modello, mentre gli altri coefficienti, di pendenza, costituiscono le derivate parziali della variabile indipendente Y rispetto a ciascuna delle variabili esplicative x considerate:

$$\frac{\partial Y}{\partial x_j} = \beta_j \approx \frac{\Delta Y}{\Delta x_j} \quad \text{per } j = 2, \dots, k$$

di conseguenza, il coefficiente β_j esprime la variazione che subisce la variabile dipendente Y in seguito ad una variazione unitaria della variabile esplicativa x_i , tenendo costante il valore delle altre variabili esplicative. Tale relazione ammette una rappresentazione matriciale del tipo:

$$\underset{n \times 1}{Y} = \underset{n \times k}{X} \underset{k \times 1}{\beta} + \underset{n \times 1}{\varepsilon}$$

in cui Y è il vettore costituito dagli n valori della variabile dipendente, e X è una matrice di dimensioni $n \times k$ contenente i valori delle variabili esplicative, in cui ogni colonna corrisponde ad un regressore: la prima colonna ha tutti elementi unitari, la seconda contiene i valori di x_2 , e così via, fino all'ultima colonna che contiene i valori di x_n :

$$\underset{n \times k}{X} = \begin{bmatrix} 1 & x_{21} & \dots & x_{k1} \\ 1 & x_{22} & \dots & x_{k2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_{2n} & \dots & x_{kn} \end{bmatrix}$$

Infine, il vettore β , di dimensioni k , raccoglie i parametri del modello di regressione, e il vettore casuale ε , di dimensioni n , rappresenta gli errori del modello in corrispondenza della i -esima osservazione.

Nella definizione del modello di regressione multipla, si assumono soddisfatte le seguenti ipotesi, conosciute come ipotesi del *modello classico*:

- il vettore degli errori ε ha *valore atteso* nullo, ossia deve essere $E[\varepsilon_i] = 0$ per $i = 1, 2, \dots, n$;
- di conseguenza, gli errori risultano *omoschedastici* e *incorrelati*, e presentano *varianza* costante pari a $\text{Var}(\varepsilon_i) = \sigma^2$;
- la matrice X delle variabili esplicative è *deterministica*, ossia i regressori, $x_2, \dots, x_n$ sono variabili non *stocastiche*;
- la matrice X ha *rango pieno*, ossia la devianza di ciascuna variabile esplicativa $x_2, \dots, x_n$ è positiva. Infatti, se un regressore avesse devianza nulla la colonna corrispondente risulterebbe proporzionale alla prima colonna di X , sicché il rango risulterebbe minore di k . In questo caso, inoltre, esisterebbe una variabile esplicativa che può essere espressa come combinazione lineare delle altre (ossia non è statisticamente indipendente), risultando ridondante.

Le ipotesi del modello classico implicano che il valore atteso della variabile dipendente si trovi nel modello di regressione. Infatti si ha:

$$E[Y] = E[X\beta] + E[\varepsilon] = X\beta$$

essendo X una matrice deterministica e $E[\varepsilon] = 0$. In ultima istanza, dunque, la variabile dipendente Y risulta una combinazione lineare di una componente deterministica $X\beta$ e una casuale costituita dall'errore ε . Di conseguenza, essa ha la stessa distribuzione degli errori, traslata in modo che la media coincida con la funzione di regressione, e presenta anch'essa varianza pari a σ^2 :

$$\begin{aligned} Y &= X\beta + \varepsilon \\ \text{Var}(Y) &= \sigma^2 \end{aligned}$$

L'analisi dei dati a mezzo della regressione multipla presuppone, in primo luogo, la stima β' dei vari coefficienti di regressione β relativi alle variabili esplicative. A tale scopo, sotto le ipotesi del modello classico, è possibile ricorrere a diversi strumenti analitici, il più usato dei quali è costituito dal *metodo dei minimi quadrati*. Tale strumento rappresenta un metodo di stima non parametrico, secondo il quale, analogamente a quanto succede per il modello lineare, le stime dei parametri sono rappresentate da quei valori dei coefficienti di regressione β per i quali la somma dei quadrati degli scarti delle osservazioni dalla funzione di regressione è minima. Essendo tali scarti rappresentati dall'espressione:

$$q = Y_i - \beta_i X_i = y_i - \beta_1 - \beta_2 x_2 - \dots - \beta_n x_n$$

si può definire la funzione obiettivo:

$$Q(\beta) = (q)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_1 - \beta_2 x_{i2} - \dots - \beta_i x_{ii})^2$$

che deve essere minimizzata per trovare i coefficienti di regressione che meglio approssimano il set di dati osservato. Lo sviluppo analitico della funzione obiettivo consente trovare i valori richiesti degli stimatori β' , dalla relazione:

$$\beta' = (X'X)^{-1} X'y$$

che prende il nome di *equazione normale*, nella quale il termine $(X'X)^{-1}$ rappresenta l'inversa di una matrice quadrata di dimensione k , ottenuta moltiplicando la matrice delle variabili esplicative per sé stessa.

Il calcolo dei valori dei coefficienti di regressione attraverso il metodo dei minimi quadrati è in verità abbastanza complesso. Solitamente, si preferisce ricorrere a programmi di calcolo statistico, i quali sono in grado di fornire la stima dei parametri β richiesti dal modello di regressione multipla, noto il data set in ingresso delle variabili d'interesse.

Elaborata la valutazione degli stimatori, è opportuno verificare in che misura il modello di regressione costruito è in grado di accostarsi ai dati delle osservazioni. Tale accostamento è tanto migliore quanto più elevata è la percentuale della *devianza spiegata*, pari alla sommatoria dei quadrati delle differenze tra i valori della variabile dipendente y_i' forniti dal modello e il valore medio dell'equazione di regressione $\bar{y}$, rispetto alla *devianza totale*, fornita dalla sommatoria dei quadrati delle differenze tra i valori osservati della y_i e il valore medio dell'equazione di regressione $\bar{y}$. Si può definire, allora, un opportuno *indice di determinazione* R^2 , costituito dal rapporto tra la devianza spiegata e la devianza totale:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i' - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

il quale rappresenta la percentuale di devianza della variabile dipendente spiegata dall'insieme delle variabili esplicative, ossia la misura in cui il modello costruito si adatta ai dati osservati. Tale indice può assumere valori nell'intervallo tra 0 e 1, essendo pari all'unità quando vi è un perfetto adattamento del modello ai dati in ingresso, sicché le osservazioni si trovano tutte sulla funzione di regressione stimata ($y_i = y_i'$ per $i = 1, 2, \dots, n$); viceversa esso è nullo quando i regressori stimati non sono in grado di spiegare le variazioni della variabile dipendente (ossia la devianza spiegata è nulla), e le y_i' calcolate coincidono con il valore medio $\bar{y}$.

Se l'indice di determinazione misura il grado di accostamento del modello ai dati, allora esso può essere usato per verificare che le variabili esplicative considerate nella fase iniziale di investigazione sono adatte a spiegare il processo oggetto di studio, ossia danno origine ad una funzione di regressione che approssima con sufficiente precisione

il modello reale. Nel caso in cui il suo valore sia prossimo a 1, dunque, è possibile asserire che il complesso dei fattori scelti per l'analisi si dimostra efficace nella spiegazione del fenomeno osservato. L'indice di determinazione, tuttavia, nulla dice sul contributo esplicativo dei singoli repressori. A conferma di ciò, è lecito immaginare che il valore atteso dell' R^2 nelle prime prove statistiche, in cui sono considerate tutte le variabili dell'insieme iniziale, sia più vicino all'unità (e, quindi, al perfetto accostamento), di quanto non lo sia nelle successive iterazioni, in cui vengono eliminate le variabili meno significative. Ciò è dovuto al fatto che quando si stima il modello con riferimento ad un minor numero di variabili, la devianza residua è comprensibilmente maggiore di quella ottenuta nel primo modello, dal momento che quante più variabili sono considerate, anche se con influenza minima, tanto migliore è il livello di approssimazione raggiunto dal modello rispetto al processo reale. La stima della significatività dei singoli parametri, pertanto, deve essere conseguita secondo una procedura di tipo diverso.

A2.2 La procedura dell'eliminazione "backward"

L'adattamento del modello ai dati osservati può essere infatti altresì verificato eseguendo un *test F sull'utilità* sul modello, il quale è in grado di indicare se l'introduzione dei regressori forniti dal modello è utile per spiegare il processo considerato. In particolare, tale test sottopone congiuntamente a verifica l'ipotesi per cui nessun regressore stimato contribuisce a spiegare le variazioni della variabile dipendente y (*ipotesi nulla*), con l'*ipotesi alternativa* che almeno un regressore non sia nullo, ossia il suo stimatore β' non sia pari a zero:

$$F = \begin{cases} H_0 : \beta_2 = \beta_3 = \dots = \beta_k = 0 \\ H_1 : \exists \beta_j \neq 0 \end{cases}$$

in cui H_0 rappresenta l'ipotesi nulla, e H_1 l'ipotesi alternativa. Per eseguire il test occorre confrontare la *devianza residua* del modello sotteso all'ipotesi H_1 (ossia il modello di regressione costruito), che è data dalla:

$$Dev(H_1) = \sum_{i=1}^n e_i'^2$$

ove e'_i rappresenta il *residuo non spiegato* dal modello di regressione, con la *devianza residua* sotto l'ipotesi nulla, che coincide con la devianza totale dei dati osservati:

$$Dev(H_0) = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$$

Se la differenza tra le due devianze residue è significativamente diverso da zero (scelto un certo *grado di significatività* α), allora l'ipotesi nulla è respinta, e il modello è effettivamente utile per spiegare il processo. Si noti come la differenza tra $Dev(H_0) - Dev(H_1)$ rappresenti, in realtà, la devianza spiegata dal modello di regressione, per cui il test verifica, in ultima istanza, se la devianza spiegata è sufficientemente ampia per

giustificare la costruzione del modello. In definitiva, la statistica test è data dalla relazione:

$$F = \frac{[Dev(H_0) - Dev(H_1)]/(k-1)}{Dev(H_1)/(n-k)}$$

ove n è il numero di osservazioni e k è il numero di variabili considerate. Sotto l'ipotesi nulla, tale funzione si distribuisce secondo una variabile F di Fisher con $k-1$ gradi di libertà al numeratore e $n-k$ al denominatore:

$$F(H_0) \rightarrow F_{k-1, n-k}$$

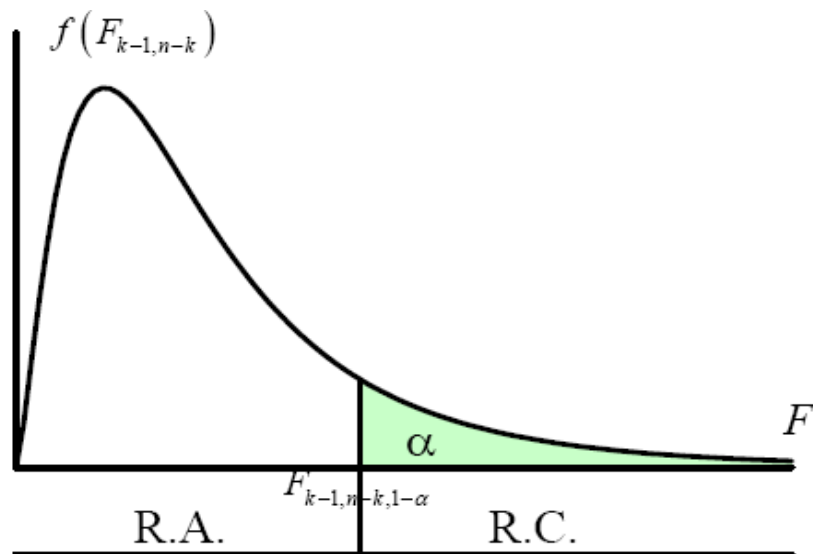
sicché è sufficiente confrontare il valore della funzione F con il valore assunto dalla variabile di Fisher per il livello di significatività α richiesto. Per valori elevati di F , l'ipotesi nulla risulta meno verosimile, in quanto è elevata la devianza spiegata dal modello. Per questo motivo, è possibile definire una regione di accettazione dell'ipotesi nulla tale che:

$$R.A. : F \leq F_{k-1, n-k, 1-\alpha}$$

Viceversa, la regione critica di accettazione del modello, per la quale respingere l'ipotesi nulla, sarà data dalla:

$$R.C. : F \geq F_{k-1, n-k, 1-\alpha}$$

ove $F_{k-1, n-k, 1-\alpha}$ rappresenta il valore tabellato della variabile di Fisher per il livello di significatività richiesto. Il significato del test statistico è raffigurato in figura seguente:



Qualora il valore della statistica test sia superiore al valore della variabile F di Fisher, allora il modello costruito è effettivamente utile a giustificare il processo considerato. Viceversa, se tale valore cade nella regione di accettazione dell'ipotesi nulla, si dovrà considerare l'esistenza di almeno un regressore con coefficiente nullo, sicché si dovrà provvedere alla costruzione di un nuovo modello.

Confermata l'utilità del modello nel suo complesso, è ora possibile verificare la capacità dei singoli regressori stimati di spiegare le variazioni della variabile dipendente y . Tale fase costituisce il cuore dell'analisi statistica che si è inteso effettuare in questo lavoro, dal momento che essa indica quali coefficienti di regressione possono essere considerati nulli senza alterare significativamente l'efficienza del modello proposto, e, di conseguenza, quali variabili ad essi collegate possono essere trascurate, tra quelle che inizialmente componevano l'insieme di investigazione, nella spiegazione del processo di formazione degli ossidi di azoto. Il risultato di tale procedura, cioè, sarà un modello di regressione che contenga esclusivamente le variabili che hanno una maggiore influenza sulle concentrazioni di inquinanti in uscita all'impianto, sulle quali è opportuno, con evidente risparmio di risorse, focalizzare l'attenzione nelle successive prove di ottimizzazione di abbattimento delle stesse. A tal proposito, si è fatto uso di un *test t sulla significatività dei singoli parametri*, che pone a confronto l'ipotesi in cui il singolo stimatore β_j sia nullo (*ipotesi nulla*), con l'ipotesi alternativa che esso non lo sia:

$$t = \begin{cases} H_0 : \beta'_j = 0 \\ H_1 : \beta'_j \neq 0 \end{cases}$$

in particolare, nel caso in cui il singolo coefficiente di regressione stimato presenti segno negativo, l'ipotesi alternativa richiede che $\beta_j < 0$; viceversa, qualora lo stimatore sia positivo, si richiede che $\beta_j > 0$. In questo caso, la statistica test è data dall'espressione:

$$t_j = \frac{\beta'_j}{Sd(\beta'_j)}$$

ove **Sd** (β'_j) dipende dalla varianza σ^2 stimata dal modello e dall'inverso della matrice X delle variabili esplicative, moltiplicata per sé stessa:

$$Sd(\beta'_j) = \sqrt{\sigma^2 (X' X)^{-1}}$$

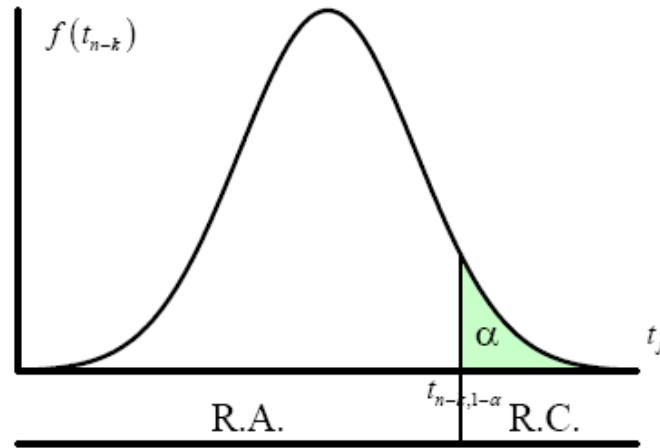
Il rapporto t_j viene anche definito *t-ratio*; tale quantità presenta una distribuzione secondo la variabile *t di Student*, con $n-k$ gradi di libertà, sicché è sufficiente confrontare il valore della funzione *t* con il valore assunto dalla variabile di Student per il livello di significatività α richiesto. Di conseguenza, è possibile definire la *regione di accettazione dell'ipotesi nulla*:

$$R.A. : t_j \leq t_{n-k, 1-\alpha}$$

e la corrispondente *regione critica* di accettazione del modello:

$$R.C. : t_j \geq t_{n-k, 1-\alpha}$$

ove $t_{n-k,1-\alpha}$ rappresenta il valore tabellato della variabile di Student per il livello di significatività richiesto. Il significato del test statistico è raffigurato in figura seguente:



Qualora uno dei parametri ricada nella regione di accettazione, dunque, l'ipotesi nulla su di essi non può essere respinta. Di conseguenza, la variabile ad esso connessa risulta trascurabile nella spiegazione dei processi di formazione dei NO_x , e può essere scartata nella costruzione del modello di regressione definitivo. Viceversa, occorre escludere l'ipotesi che le variabili che ricadono nella regione critica abbiano stimatore nullo, per cui esse avranno una facoltà di incidenza sulla variabile dipendente non trascurabile, e dovranno essere necessariamente considerate nella descrizione finale del processo.

La stima del *test t* è solitamente eseguita a mezzo di software statistici, i quali sono in grado di fornire, per ciascun parametro stimato, la probabilità che il valore della *t* di Student calcolato per n osservazioni e k variabili sia maggiore della *t-ratio* osservata per il singolo parametro:

$$P(|t_{n-k}| > t_j)$$

Tale quantità prende il nome di *p-valore*, e rappresenta la massima probabilità di commettere errore se si respinge l'ipotesi nulla per quel singolo parametro. In altri termini, il *p-valore* costituisce il minimo livello di significatività per il quale l'ipotesi nulla può essere respinta. Di conseguenza, i parametri che presentano un *p-valore* elevato (o, meglio, significativamente diverso da zero), possono essere eliminati serenamente dal modello, dal momento che per essi risulta elevata la probabilità che il corrispondente stimatore sia nullo, e che la loro incidenza sul processo, in termini statistici, non sia significativa. Viceversa, i regressori che conservano un *p-valore* basso (indicativamente inferiore al livello di significatività scelto) devono essere trattenuti nella trattazione finale, dal momento che la loro influenza sulla variabile dipendente non è trascurabile.

Il modello di regressione iniziale, dunque, può essere progressivamente migliorato eliminando, volta per volta, le variabili che, sottoposte a test parametrico, presentano il p-valore più elevato. Tale procedura di eliminazione graduale prende il nome di “*backward elimination procedure*”, dal momento che, a partire dall’insieme iniziale di variabili, consente di scartare progressivamente i fattori di minore importanza, fino alla costruzione definitiva con le sole variabili significativamente influenti sul processo. Con il supporto del software statistico, è possibile operare in maniera iterativa, stimando più volte il modello “depurato” della variabile con p-valore più alto, fino ad ottenere un modello vincolato in cui tutte le stime dei coefficienti siano significativamente diverse da zero (o, meglio, inferiori alla significatività scelta). In definitiva, tale modo di procedere rappresenta uno strumento di notevole utilità, nella maniera in cui è in grado di distinguere, da un punto di vista strettamente quantitativo, l’azione dei singoli fattori che entrano in gioco nella formazione degli inquinanti, dando misura della partecipazione effettiva al processo delle singole variabili considerate.

La definizione del modello di regressione finale non esaurisce l’investigazione statistica. È buona norma, infatti, verificare che i regressori scartati dalla procedura di eliminazione backward non siano effettivamente in grado di spiegare le variazioni della variabile dipendente, e possano essere a buon diritto trascurati nella descrizione del processo finale. A tal proposito, è possibile effettuare nuovamente un *test di utilità F* sul modello definitivo (anche definito come *test Anova*, acronimo inglese per *analysis of variance*) che confronta l’ipotesi in cui i regressori scartati abbiano effettivamente stimatore nullo (*ipotesi nulla*), con l’*ipotesi alternativa* che almeno uno dei coefficienti di regressione sia diverso da zero.

$$F = \begin{cases} H_0 : \beta_2 = \beta_3 = \dots = \beta_m = 0 \\ H_1 : \exists \beta_m \neq 0 \end{cases}$$

con m pari al numero dei parametri scartati. Tale procedura è dunque sostanzialmente identica a quella applicata sul modello completo non vincolato, con la differenza che essa opera non sull’interezza dei parametri, ma su un sottoinsieme ristretto di essi, costituito da quei soli regressori che sono stati scartati. Analogamente a quanto operato in precedenza, occorre confrontare la devianza residua del modello vincolato H_0 con la devianza residua del modello completo H_1 , secondo la statistica test:

$$F = \frac{[Dev(H_0) - Dev(H_1)]/(k - m)}{Dev(H_1)/(n - k)}$$

ove n è il numero di osservazioni, k è il numero di variabili inizialmente considerate, e m il numero di regressori scartati dalla procedura di eliminazione backward. Come si vede, il valore della statistica test F aumenta all’aumentare della differenza al numeratore delle devianze residue sotto H_0 e H_1 . Ciò significa che aumenta il guadagno nella capacità esplicativa se si considerano i soli parametri $k-m$ residui dall’eliminazione, poiché esiste una differenza statisticamente significativa tra la capacità esplicativa del modello vincolato H_0 e il modello completo H_1 . Sotto l’ipotesi

nulla, la funzione F si distribuisce secondo una variabile F di Fisher con $k-m$ gradi di libertà al numeratore e $n-k$ al denominatore:

$$F(H_0) \rightarrow F_{k-m, n-k}$$

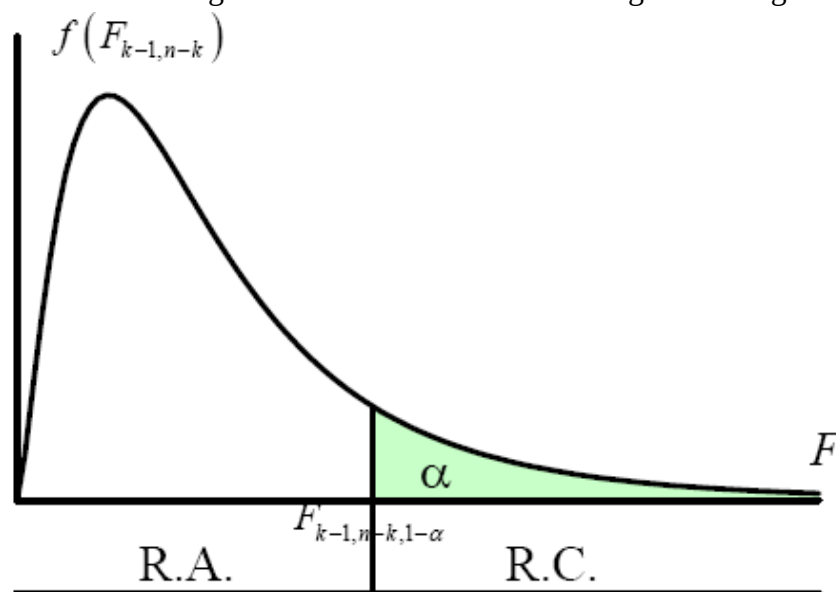
sicché è sufficiente confrontare il valore della funzione F con il valore assunto dalla variabile di Fisher per il livello di significatività α richiesto. Come evidenziato, il numero di gradi di libertà al numeratore è dato proprio dal numero di vincoli imposti dall'ipotesi nulla, ovvero dal numero di regressori non eliminati in precedenza. E' possibile dunque definire una regione di accettazione dell'ipotesi nulla R.A. tale che:

$$R.A. : F \leq F_{k-1, n-k, 1-\alpha}$$

Viceversa, la regione critica di accettazione del modello sarà data dalla:

$$R.C. : F \geq F_{k-1, n-k, 1-\alpha}$$

ove $F_{k-1, n-k, 1-\alpha}$ rappresenta il valore tabellato della variabile di Fisher per il livello di significatività richiesto. Il significato del test statistico è raffigurato in figura seguente:



Se il valore della statistica test ricade nella regione di accettazione, l'ipotesi nulla non può essere scartata, ragion per cui è possibile affermare che i regressori m hanno effettivamente stimatore nullo, e che il modello vincolato costruito ha efficacia reale nel descrivere il processo in questione, considerando le sole variabili residue della procedura di eliminazione.

Il test delle ipotesi verifica se i regressori hanno effettivamente capacità esplicativa, ma non fornisce informazioni quantitative sull'intensità dell'incidenza di ogni singola variabile. Neanche le stime dei coefficienti di regressione possono restituire tale informazione, dal momento che il loro valore dipende dall'unità di misura delle variabili. L'importanza dei singoli regressori, ossia la capacità quantitativa di incidere sulla variabile dipendente a mezzo delle proprie variazioni, può essere tuttavia desunta con la stima dell'elasticità della variabile dipendente rispetto a ciascuno di essi. Tale

parametro, infatti, dà misura della percentuale di variazione della variabile y in funzione di una variazione unitaria del singolo regressore, ed è espressa dal rapporto:

$$\eta_{x_j} = \beta_j' \cdot \frac{\bar{x}_j}{\bar{y}}$$

ove $\bar{x}_j$ e $\bar{y}$ rappresentano, rispettivamente, il valore medio del singolo regressore e della variabile dipendente stimati nel modello di regressione definitivo. Tanto più grande è il valore assoluto dell'elasticità η , tanto più la corrispondente variabile esplicativa x ha un effetto maggiore sulla variabile dipendente. Il test sull'elasticità, dunque, permette di materializzare effettivamente l'azione delle singole variabili residue nel modello esplicativo finale sul processo di formazione degli inquinanti analizzato.

A2.3 Sviluppo dell'analisi statistica dei risultati

La procedura tramite lo strumento statistico descritta è stata utilizzata nella seconda fase nella ricerca dell'ottimo e la correlazione di tutti i possibili parametri interferenti. Si è cercato di valutare, cioè, in che misura tali concentrazioni subiscano l'influenza di alcuni parametri specifici, per i quali è lecito attendersi, nota la teoria sulle dinamiche di formazione e abbattimento degli NO_x , una certa interazione e partecipazione al processo. In particolare, si è posta gran parte dell'attenzione su alcune variabili la cui evoluzione non è direttamente controllabile dall'intervento umano, ma dipende dalle condizioni che si presentano volta per volta all'interno dell'impianto, in relazione sia al tipo e alla quantità di rifiuto in ingresso, sia alla disomogeneità del processo di combustione. In questo modo, dunque, si è inteso contribuire in piccola misura all'approfondimento della conoscenza delle dinamiche legate agli ossidi di azoto, e verificare la corrispondenza della trattazione classica con le indicazioni fornite dallo studio statistico.

Per prima cosa, dunque, sono state selezionate le variabili con le quali eseguire l'analisi statistica. Come è facile immaginare, tale fase rappresenta un passaggio di importanza non secondaria, dal momento che, all'interno del ventaglio di tutte le possibili variabili, solo una scelta sensata e supportata dalla teoria di base può garantire una certa validità e logicità ai risultati ottenuti. Per tale motivo, sono stati considerati in primo luogo quei fattori che, come descritto nelle sezioni precedenti, contribuiscono alla formazione degli ossidi di azoto in un processo di combustione. Tali variabili, come è noto, sono rappresentate dal valore di *temperatura* rilevata nella camera di *post-combustione*, (espressa in gradi Celsius e di seguito indicata come variabile "*Temp.PC*") e soprattutto

dalla *concentrazione di ossigeno*, espressa in percentuale sul volume totale di fumi, tanto in prossimità della fiamma all'interno del tamburo rotante (di seguito indicata come variabile " O_2 "), tanto all'interno della camera di post-combustione (di seguito indicata come variabile " O_2PC "), laddove le ancora elevate temperature dei fumi che si vanno raffreddando contribuiscono a creare una zona di criticità per la formazione degli NO_x . Ovviamente, le concentrazioni in uscita sono intimamente dipendenti dalla quantità e dalla tipologia di rifiuto trattato in ingresso, e, in particolare, dalla percentuale di azoto contenuta nello stesso. Per tenere conto di tale dipendenza, si è considerato innanzitutto un parametro quantitativo come la *portata di fumi totale* in uscita dal camino (espressa in Nm^3/h e di seguito indicata come variabile " $Portata$ "), la quale è legata, ovviamente, ai quantitativi combusti, e un parametro che fosse indizio della concentrazione di azoto in ingresso. Tale variabile, indicata di seguito come " NO_{xIN} ", è data dal *valore di fondo* di ossidi d'azoto registrato dallo strumento di rilevazione quando viene disattivato il sistema di abbattimento degli ossidi di azoto, ossia quando è interrotto il flusso di NH_3 all'interno della caldaia. Con riferimento alla portata dei fumi, si è inoltre inteso valutare l'azione del *contenuto di umidità* in essi presente, espressa come percentuale volumetrica rispetto all'uscita totale e indicata come variabile " H_2O ". In secondo luogo, si è fatto riferimento ai fattori che regolano le dinamiche di abbattimento degli ossidi d'azoto, i quali, stavolta, ricadono sotto il controllo della mano umana e delle scelte progettuali. In particolare, è evidente che l'abbattimento desiderato sia funzione della *quantità di reagente* immessa (in questo caso rappresentato, come si è visto, dall'*ammoniaca* in forma *liquida o gassosa*), sicché si dovrà tenere necessariamente in considerazione tale variabile, espressa in kg/h e indicata con il nome di " NH_3 ". In definitiva, ricordando che la variabile dipendente è ovviamente rappresentata dalla concentrazione di NO_x in uscita, il modello di regressione che si intende stimare risulta il seguente:

$$NO_x = \beta_1 + \beta_2 NO_{xIN} + \beta_3 NH_3 + \beta_4 O_2 + \beta_5 O_2PC + \beta_6 TempPC + \beta_7 Portata + \beta_8 H_2O$$

ove i coefficienti $\beta_{1,2,...,8}$ rappresentano i *coefficienti di regressione* del modello, essendo $i = 1,2,...,8$ la successione intera delle variabili considerate. Come si è detto, il primo coefficiente β_1 rappresenta l'intercetta del modello, mentre gli altri coefficienti, di pendenza, costituiscono le derivate parziali della variabile indipendente NO_x rispetto a

ciascuna delle variabili esplicative x considerate. L'equazione così proposta richiede dunque la stima di **8** coefficienti di regressione.

Lo studio statistico è stato condotto su una serie di dati registrati nel corso di una campagna di sperimentazioni sul campo. I valori delle variabili selezionate sono forniti in continuo dal sistema di rilevazione FTIR dell'impianto, che ne archivia un valore medio per ogni minuto. Ai fini della costruzione del data set, i valori della concentrazione di fondo di NO_x sono stati riferiti alla media delle concentrazioni rilevate lungo un opportuno periodo costante di prova (circa 15 minuti), durante il quale il sistema di abbattimento veniva disattivato, in modo da non considerare gli effetti del transitorio e della stabilizzazione degli stessi, e da uniformare le condizioni dell'esperimento. Per quanto riguarda i valori di ammoniaca immesse nel sistema di trattamento, si deve precisare che il dosaggio del reagente non è misurato in termini di concentrazione, ma con riferimento al *numero di impulsi della pompa peristaltica*, nel caso dell' NH_3 in forma liquida. Per tali ragioni, è necessario operare un trattamento preliminare dei dati forniti dal sistema per questa variabile, in ordine di convertire il valore tal quale in termini di portata massica di reagente.

Nel caso dell'ammoniaca in forma liquida, la correlazione tra numero di impulsi della pompa peristaltica e dosaggio in termini di portata non è fornita dal sistema di misura, per cui si è reso necessario, in primo luogo, calcolare la curva della portata volumetrica della pompa. Tale equazione viene elaborato con l'ausilio di una prova empirica, in cui è misurato il tempo di svuotamento di un volume di liquido noto in funzione degli impulsi della pompa. Per conoscere la portata in massa, infine, occorre considerare che l'ammoniaca liquida è addotta in soluzione acquosa al **25%**, e che essa possiede una densità volumica pari a circa **0,88 kg/l**. La portata massica Q_M sarà dunque data dalla relazione:

$$Q_M = Q_V \cdot \rho_{\text{NH}_3} \cdot C_{\text{NH}_3}$$

ove Q_V è la portata volumetrica, e ρ_{NH_3} e C_{NH_3} rappresentano, rispettivamente, la densità e la concentrazione dell'ammoniaca in soluzione acquosa. In definitiva, la relazione che lega la portata massica y al numero x di impulsi della pompa peristaltica sarà:

$$Y = 0,030272 \cdot x$$

con indice di determinazione R^2 pari a **1**, il cui significato è mostrato nel grafico seguente:

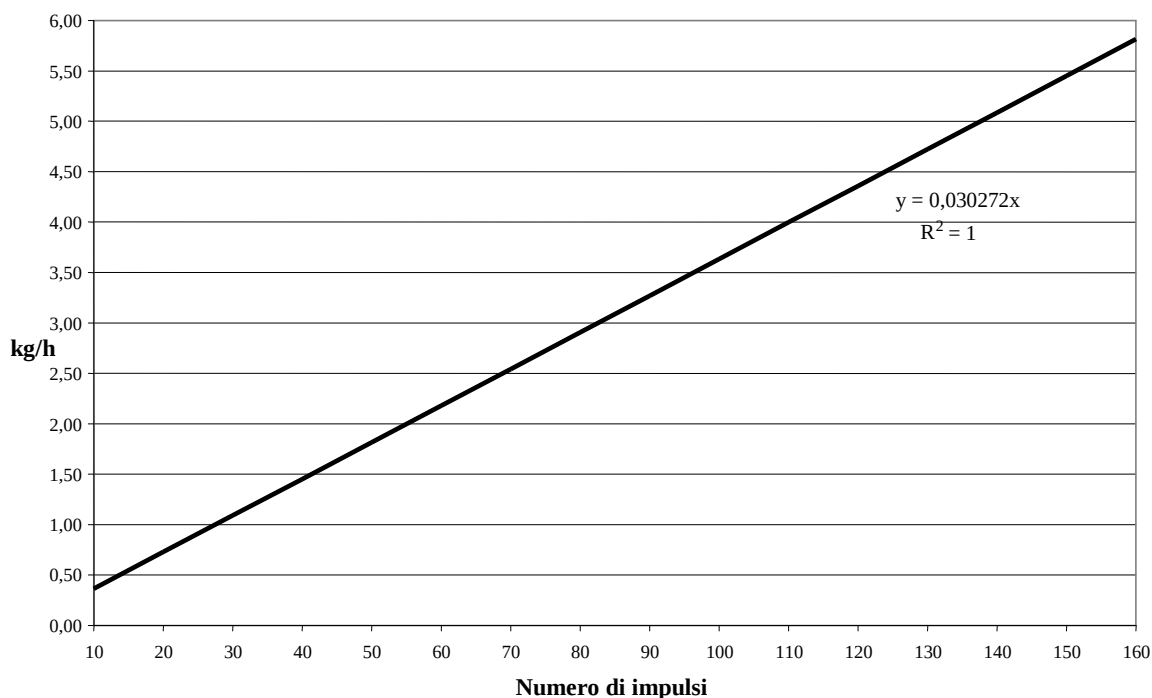


Figura 7.1: relazione tra numero di impulsi della pompa e dosaggio di NH_3 (in kg/h)

Con le premesse appena effettuate, dunque, l'approccio statistico descritto in appendice 2 è stato applicato ad un ampio insieme di informazioni iniziali, rappresentato dai *valori al minuto* delle diverse variabili prese in considerazione dall'analisi. Tali valori, si è detto, sono forniti dal sistema di misura dell'impianto in tempo reale, secondo le procedure di acquisizione automatica riportate al paragrafo 5.4. È fuori di dubbio che una considerevole estensione della casistica oggetto di studio conferisce all'analisi statistica un'aumentata stabilità e verosimiglianza nei risultati ottenuti, dal momento che garantisce la valutazione di un vasto campionario di scenari, e assicura una maggiore protezione dagli errori, provocati dall'estrema mutabilità delle condizioni di prova.

Le prove sperimentali per l'acquisizione dei dati al minuto sono state condotte su scala reale direttamente in impianto, durante i periodi di funzionamento a regime dello stesso. In particolare, le diverse prove hanno voluto verificare la risposta del sistema analizzato alla variazione di quei parametri specifici che sono direttamente controllabili e regolabili da parte dell'operatore umano, e che sono rappresentati dal *dosaggio di ammoniacale* addotto per il trattamento DeNO_x , dalla *quantità di vapore di trasporto* utilizzato per la nebulizzazione della stessa, dalla *pressione* di immissione nella zona di

trattamento e dal *punto di adduzione* del reagente alla corrente di fumi da trattare. Gli obiettivi dell'analisi hanno portato all'elaborazione di una *campagna di prove*, che può essere catalogata in tre distinte categorie:

- una serie di prove eseguite sullo *stesso punto di immissione*, per ciascuno dei 3 attualmente attrezzati con lance (si veda la figura 5.7), nel primo giro fumi della caldaia (classificati, di seguito, come punto di immissione *alto*, *medio* e *basso*);
- una serie di prove condotte variando la *portata di vapore di trasporto* addotta per la nebulizzazione. In particolare, per ciascun punto di immissione si è scelto di operare con un valore di portata *basso*, pari a circa **100 kg/h**, e un valore di portata *alto*, pari a circa **300 kg/h**. La regolazione della portata di trasporto è operata direttamente in prossimità della zona di trattamento, mediante una *valvola di strozzatura a spirale* (fig. 5.7). Un manometro in prossimità del collettore, il quale alimenta le lance di adduzione, rileva poi la pressione con cui avviene l'immissione, con precisione di 0,1 bar;
- una serie di prove condotte al valore basso di portata di vapore, nelle quali si è tuttavia inteso operare con la *pressione di immissione* (rilevata dal manometro sul collettore) che si ottiene quando si adduce la portata massima. Tale pressione è ottenuta con la regolazione congiunta di *aria compressa* e vapore di trasporto, mediante un sistema di adduzione dell'aria appositamente allestito in impianto, la quale supplisce alla quota parte di pressione che compete alla portata massima, e che non è possibile raggiungere adducendo la portata di vapore minima.

Ciascuna prova (dalla durata complessiva di 300 minuti) è stata condotta aumentando progressivamente la quantità di soluzione di ammoniaca addotta al sistema DeNO_x, in modo da verificare in tutti i casi le variazioni nelle prestazioni di abbattimento degli ossidi di azoto presenti nei fumi. In particolare, il dosaggio di reagente è stato aumentato di volta in volta di circa **0,5 kg/h** (per la precisione, di **0,454 kg/h**, corrispondenti, per una soluzione al 25% e densità pari a **0,88 kg/l**, a circa **2 l/h**) a partire da un dosaggio minimo di **0,75 kg/h**, fino ad un massimo di circa **5 kg/h (4,8435)**. Tale regolazione, si è detto, è resa possibile modificando il numero di impulsi della pompa peristaltica, attraverso l'interfaccia del sistema pompante collocato in prossimità della zona di trattamento (fig. 5.8). Nota la relazione tra il numero di impulsi

della pompa e il dosaggio di reagente addotto, per ottenere una variazione di 0,5 kg/h è necessario modificare il regime della pompa di **15 impulsi**. Il grafico di seguito mostra il riassunto dei punti di dosaggio utilizzati nelle prove:

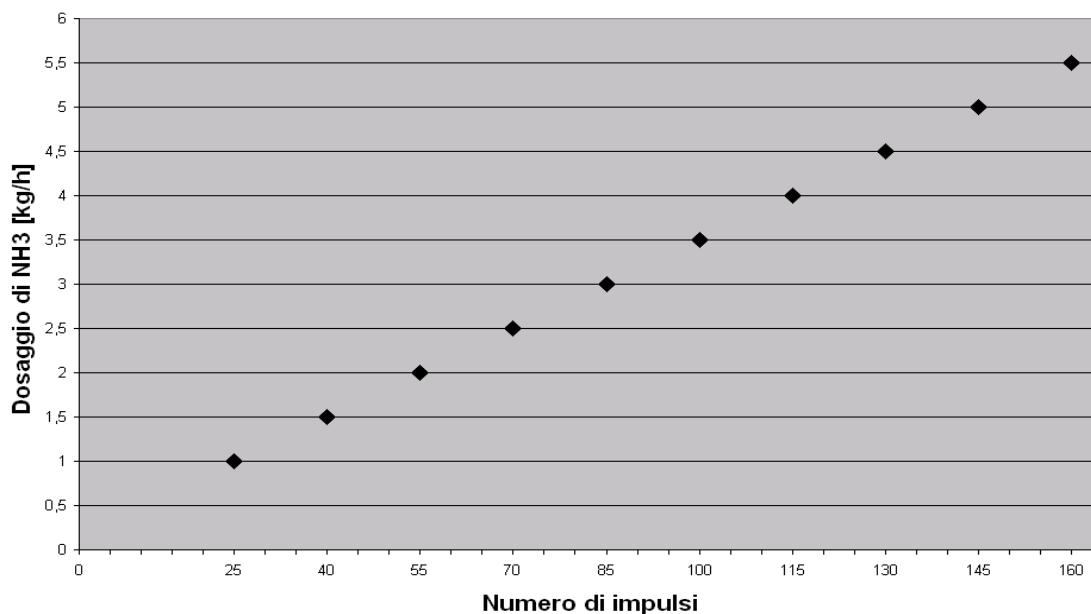


Figura 7.2: punti di prova scelti per la sperimentazione.

Al fine di valutare le prestazioni a regime del sistema di abbattimento (scartando, così, le imprecisioni dei transitori), ciascuna prova è stata condotta per un periodo di **15 minuti**, ritenuti ampiamente sufficienti a garantire la stabilizzazione delle concentrazioni in uscita al camino e della risposta del sistema di trattamento. Allo stesso modo, ciascuna prova è stata preceduta da un intervallo di ulteriori **15 minuti**, in cui il sistema di trattamento veniva disconnesso (con dosaggio di NH₃ pari a zero), in ordine di ottenere, previa stabilizzazione del sistema, un valore medio della *concentrazione di fondo di NO_x* liberati dai rifiuti, sulle quali operare l'abbattimento. Tale procedura si è resa necessaria al fine di avere un'indicazione almeno di massima sulla quantità di *azoto* contenuta nel rifiuto in ingresso, la quale, per evidenti ragioni, non può essere conosciuta a priori (poiché dipende dal tipo di rifiuto trattato).

Il valore al minuto delle variabili di interesse durante il periodo di prova è archiviato dal software di gestione EDA2003 e reso accessibile in tabelle semi-orarie, secondo le procedure di acquisizione descritte al paragrafo 5.4. Il dato “grezzo” risulta così costituito dalla media dei valori istantanei rilevati in un minuto, dal secondo 00 al secondo 59. Tali tabelle sono state successivamente convertite in formato testo con l'ausilio di un programma di esportazione dati fornito dalla ditta “Orion”, responsabile

della gestione del software di controllo EDA2003, in modo da rendere possibile la manipolazione e l'elaborazione dei dati ottenuti. Il dettaglio delle prove con i valori al minuto è presente in appendice. L'andamento in tempo reale delle concentrazioni rilevate è stato invece seguito con l'ausilio dell'interfaccia grafica del software (nella sezione "Strip chart"), che riporta i valori al secondo delle variabili di interesse, così come restituite dall'analizzatore FTIR. Tale interfaccia può essere configurata in ordine di visualizzare esclusivamente i parametri di interesse, e secondo la scala numerica più opportuna. Così, ad esempio, negli istanti iniziali di ciascuna prova (immediatamente successivi all'accensione della pompa per il dosaggio di NH_3 , e previa stabilizzazione del processo), si è potuto apprezzare l'attesa e progressiva diminuzione delle concentrazioni di NO_x rilevate, per effetto delle reazioni con l'ammoniaca nella zona di abbattimento. Tale diminuzione presenta un caratteristico andamento "a scalino", come mostrato nella schermata di esempio che segue (in cui l'andamento degli NO_x è visualizzato dalla spezzata in blu) :

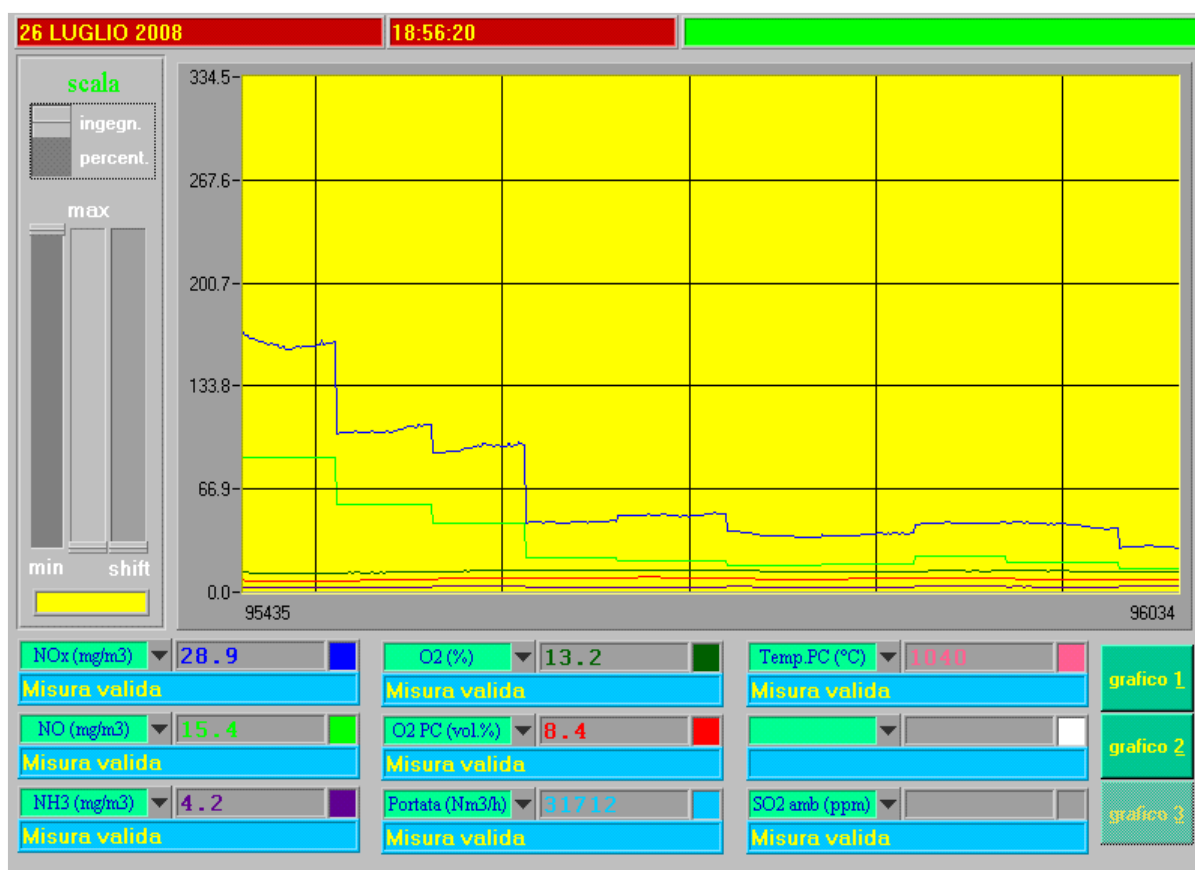


Figura 7.4: andamento decrescente delle concentrazioni di NO_x a seguito dell'attivazione del flusso di reagente ammoniacale.

Parimenti, l'interfaccia grafica permette di visualizzare cosa accade nei momenti in cui il sistema di abbattimento viene disattivato, in ordine di determinare la concentrazione di fondo di NO_x presenti, e avere una stima della percentuale d'azoto contenuta nel rifiuto in ingresso (non essendo possibile rilevarla in altro modo). Come è lecito attendersi, tale periodo coincide con un immediato aumento delle concentrazioni in uscita, secondo un andamento "a scalino" inverso al precedente. La schermata di seguito riportata restituisce un esempio di tale comportamento (l'andamento degli ossidi è sempre visualizzato in blu):

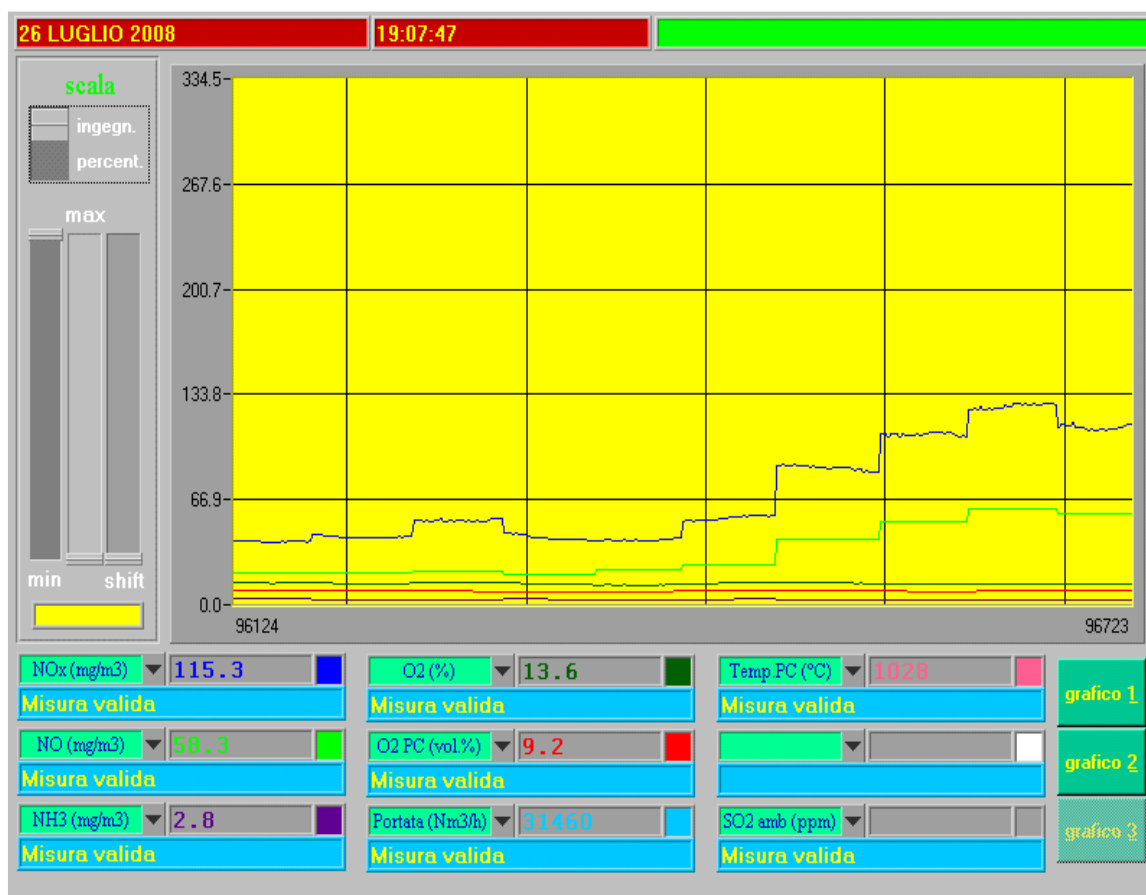


Figura 7.3: andamento crescente delle concentrazioni di NO_x a seguito dell'interruzione del flusso di reagente ammoniacale

Le prove così costruite hanno dunque voluto evidenziare gli effetti dalla variazione dei singoli parametri di controllo sulle prestazioni di abbattimento degli NO_x. Tali effetti sono stati isolati facendo variare, di volta in volta, solo una singola variabile di interesse, e mantenendo costante le altre. Particolare attenzione è stata riservata al caso di adduzione congiunta di *aria compressa* e vapore di trasporto, in ordine di valutarne l'efficacia, e suggerire una soluzione impiantistica con risparmio nell'adduzione di vapore. Il lavoro di analisi dei dati rilevati in sede di prova è stato effettuato con l'ausilio di un software di elaborazione statistica, noto come "R 2.7.1".

A2.4: Fase sperimentale 2 - data set delle prove effettuate

Di seguito si riportano i dati della campagna sperimentale effettuate presso l'impianto AMA di incenerimento di rifiuti sanitari di Ponte Galeria.

Stadio 1, prova con vapore 100:

NOx (mg/m3)	NOxIN (mg/m3)	NH3 (kg/h)	Temp,PC (°C)	O2 PC (°C)	H2O (% v/v)	O2 (%)	Portata (m3/h)
102,54	136,43	0,7568	1040,50	8,57	11,54	15,03	17857,10
108,10	136,43	0,7568	1041,10	8,06	11,55	15,40	17635,60
100,57	136,43	0,7568	1041,50	8,10	11,52	14,75	17741,70
106,19	136,43	0,7568	1042,90	8,64	11,59	15,12	17871,20
113,29	136,43	0,7568	1043,60	8,45	11,61	15,40	17781,20
106,86	136,43	0,7568	1044,90	8,21	11,55	14,98	18012,90
105,27	136,43	0,7568	1045,20	8,10	11,55	15,00	17796,20
103,62	136,43	0,7568	1046,60	8,02	11,55	14,90	17718,60
103,94	136,43	0,7568	1047,80	7,79	11,52	14,97	17999,20
106,94	136,43	0,7568	1050,80	7,93	11,57	14,78	17519,60
114,18	136,43	0,7568	1048,90	8,40	11,61	15,09	17547,50
118,93	134,07	1,2110	1048,00	7,81	11,84	14,75	18399,30
108,95	134,07	1,2110	1053,50	7,53	11,83	14,66	18012,60
110,95	134,07	1,2110	1053,60	7,97	11,87	14,36	18106,30
119,88	134,07	1,2110	1052,10	8,67	11,87	14,94	18358,90
122,69	134,07	1,2110	1051,00	8,91	11,90	15,43	18193,90
115,28	134,07	1,2110	1051,30	8,08	11,92	15,07	18525,70
110,94	134,07	1,2110	1053,20	8,18	11,94	14,67	18416,30
116,87	134,07	1,2110	1053,80	8,26	11,94	14,88	18123,30
115,95	134,07	1,2110	1052,10	8,12	11,95	14,92	18330,30
111,00	134,07	1,2110	1050,50	8,22	12,03	14,89	18342,00
112,08	134,07	1,2110	1048,00	8,43	12,03	14,92	18169,90
111,84	134,07	1,2110	1047,00	8,43	12,01	15,04	18428,60
117,38	134,07	1,2110	1046,90	8,27	12,01	14,92	18227,90
118,43	147,25	1,6650	1048,00	8,50	11,89	15,06	18850,10
103,38	147,25	1,6650	1050,00	7,66	11,86	15,08	18705,70
94,03	147,25	1,6650	1055,80	7,50	11,82	14,37	18272,90
92,89	147,25	1,6650	1057,00	7,83	11,79	14,60	18640,00
110,60	147,25	1,6650	1058,30	8,36	11,87	14,88	18412,70
111,31	147,25	1,6650	1056,70	8,53	11,88	15,11	18604,50
105,88	147,25	1,6650	1057,20	8,66	11,87	15,09	18910,00
107,00	147,25	1,6650	1054,80	9,05	11,89	15,18	18799,20
107,09	147,25	1,6650	1054,60	8,51	11,79	15,32	18672,80
100,33	147,25	1,6650	1054,50	8,34	11,77	14,91	18736,20
98,47	147,25	1,6650	1056,50	8,25	11,80	14,89	18564,80
95,19	147,25	1,6650	1058,10	8,17	11,77	14,86	18542,20
98,80	147,25	1,6650	1058,10	8,70	11,80	14,64	18909,40
100,40	122,51	2,119	1067,50	8,63	11,60	15,09	18613,50
95,12	122,51	2,119	1067,10	8,19	11,53	14,94	18814,60
95,74	122,51	2,119	1065,10	8,89	11,56	14,83	18774,60
92,61	122,51	2,119	1060,90	8,98	11,58	15,45	18609,90
87,30	122,51	2,119	1058,20	8,86	11,58	15,17	18692,50

87,51	122,51	2,119	1056,70	8,76	11,56	15,14	18758,90
85,06	122,51	2,119	1054,40	8,63	11,55	15,11	18422,20
81,25	122,51	2,119	1053,70	8,54	11,50	15,06	18752,80
85,48	122,51	2,119	1052,00	9,01	11,54	15,08	18690,50
89,93	122,51	2,119	1050,50	9,04	11,56	15,48	18642,40
87,95	122,51	2,119	1048,70	9,01	11,46	15,20	18914,00
89,60	113,63	2,5730	1053,70	8,43	11,49	14,98	18202,10
77,18	113,63	2,5730	1059,40	7,16	11,44	14,88	18351,00
74,01	113,63	2,5730	1065,80	7,78	11,47	13,97	18296,30
90,50	113,63	2,5730	1065,70	8,95	11,46	14,96	18336,50
91,29	113,63	2,5730	1065,60	8,48	11,42	15,36	18508,70
81,03	113,63	2,5730	1067,80	8,55	11,52	14,86	18629,90
80,80	113,63	2,5730	1065,00	8,87	11,53	15,03	18444,90
86,30	113,63	2,5730	1063,10	8,77	11,45	15,14	18727,10
83,09	113,63	2,5730	1058,10	9,08	11,45	15,16	18766,00
77,36	113,63	2,5730	1055,60	8,62	11,40	15,30	18470,70
75,87	113,63	2,5730	1057,00	8,49	11,42	14,95	18575,80
80,68	113,63	2,5730	1058,70	8,66	11,48	15,06	18865,20
91,53	113,63	2,5730	1057,90	8,96	11,50	15,18	18763,20
85,87	113,58	3,0272	1063,30	8,96	11,47	14,98	18394,10
88,22	113,58	3,0272	1061,70	8,84	11,50	15,45	18877,60
81,92	113,58	3,0272	1061,80	8,64	11,46	14,96	18730,80
82,72	113,58	3,0272	1064,80	8,18	11,45	14,92	18549,10
75,01	113,58	3,0272	1066,70	8,13	11,41	14,61	18684,30
77,22	113,58	3,0272	1066,60	8,73	11,46	14,70	18868,70
89,92	113,58	3,0272	1065,30	8,92	11,49	15,16	18677,30
80,99	113,58	3,0272	1063,40	9,08	11,42	15,07	19065,50
83,49	113,58	3,0272	1062,00	8,76	11,40	15,22	18909,00
79,57	113,58	3,0272	1063,50	8,18	11,42	14,89	18601,40
86,53	113,58	3,0272	1063,90	8,23	11,38	14,72	18742,00
86,14	108,42	3,4813	1058,30	8,93	11,30	15,32	18930,70
72,40	108,42	3,4813	1058,90	8,49	11,31	15,13	18454,30
70,30	108,42	3,4813	1062,10	8,37	11,26	14,88	18520,00
76,91	108,42	3,4813	1060,80	8,53	11,28	14,97	18619,10
72,85	108,42	3,4813	1059,40	9,30	11,28	15,11	18604,10
73,45	108,42	3,4813	1057,20	9,03	11,25	15,64	18828,80
73,63	108,42	3,4813	1055,40	8,78	11,27	15,15	18693,00
71,35	108,42	3,4813	1054,70	8,68	11,25	15,16	18458,90
68,91	108,42	3,4813	1055,10	8,88	11,21	15,06	18712,40
77,85	108,42	3,4813	1053,60	9,01	11,24	15,42	18764,60
79,74	108,42	3,4813	1055,10	8,31	11,25	15,33	18510,30
74,42	108,42	3,4813	1056,10	8,69	11,19	14,91	18700,90
86,12	108,42	3,4813	1053,60	9,02	11,23	15,32	18589,60
78,56	109,19	3,935	1054,30	8,19	11,28	15,02	18134,90
74,03	109,19	3,935	1057,40	8,01	11,33	14,84	18416,20
71,64	109,19	3,935	1056,20	8,67	11,34	14,83	18350,60
74,71	109,19	3,935	1055,80	9,30	11,34	15,42	18507,50
81,37	109,19	3,935	1050,70	9,27	11,34	15,69	18957,40
78,42	109,19	3,935	1048,00	9,14	11,32	15,30	18493,80
77,32	109,19	3,935	1047,90	8,86	11,25	15,44	18391,60
73,23	109,19	3,935	1048,70	8,51	11,31	15,12	18500,10
82,61	109,19	3,935	1047,00	8,78	11,36	15,21	18399,90
74,58	109,19	3,935	1048,20	8,21	11,35	15,25	18288,70
69,95	109,19	3,935	1049,40	8,01	11,27	14,85	18599,60
73,98	109,19	3,935	1056,40	7,07	11,43	14,67	18120,30
82,07	110,96	4,3894	1056,30	8,14	11,52	14,46	18141,60

92,84	110,96	4,3894	1054,10	8,65	11,56	15,29	18186,20
88,42	110,96	4,3894	1053,60	8,35	11,57	15,31	18434,70
86,01	110,96	4,3894	1052,60	8,19	11,64	15,03	18164,30
85,61	110,96	4,3894	1052,00	8,48	11,64	15,03	17951,90
93,40	110,96	4,3894	1050,40	9,27	11,63	15,31	18432,80
98,99	110,96	4,3894	1046,60	9,23	11,65	15,73	18171,10
95,96	110,96	4,3894	1043,20	8,95	11,57	15,55	18016,30
93,78	110,96	4,3894	1041,30	8,61	11,57	15,44	18243,20
95,48	110,96	4,3894	1039,20	8,58	11,65	15,20	17883,80
97,00	122,40	4,8435	1044,10	7,76	11,96	14,63	18250,60
103,45	122,40	4,8435	1044,90	7,97	11,96	15,01	18123,70
106,33	122,40	4,8435	1041,10	8,45	11,99	15,11	18010,80
103,71	122,40	4,8435	1038,00	8,34	12,02	15,33	18273,40
101,20	122,40	4,8435	1037,40	8,29	12,08	15,20	18220,60
107,61	122,40	4,8435	1036,00	8,27	12,11	15,21	18103,80
107,65	122,40	4,8435	1035,70	8,48	12,02	15,13	18311,90
111,51	122,40	4,8435	1036,10	8,47	12,12	15,29	18457,80
114,09	122,40	4,8435	1034,80	8,26	12,20	15,26	18117,20
109,35	122,40	4,8435	1034,80	7,94	12,07	15,17	18272,60

Stadio 1, prova con vapore 300:

NOx (mg/m3)	NOxIN (mg/m3)	NH3 (kg/h)	Temp,PC (°C)	O2 PC (°C)	H2O (% v/v)	O2 (%)	Portata (m3/h)
118,00	132,65	0,7568	1053,80	8,72	11,48	15,13	17821,30
120,33	132,65	0,7568	1053,20	8,38	11,51	15,14	17821,20
117,41	132,65	0,7568	1052,50	8,51	11,52	14,73	17514,50
117,74	132,65	0,7568	1052,00	8,79	11,50	14,96	17921,20
127,32	132,65	0,7568	1050,30	9,79	11,51	15,43	18218,30
131,72	132,65	0,7568	1045,20	9,52	11,50	15,94	17938,30
114,66	132,65	0,7568	1045,60	9,07	11,46	15,30	17894,10
108,70	132,65	0,7568	1047,10	8,27	11,46	15,16	18065,50
107,72	132,65	0,7568	1056,50	7,19	11,52	14,55	17584,30
101,53	132,65	0,7568	1067,10	7,06	11,53	13,71	17646,80
119,30	132,65	0,7568	1070,30	8,13	11,60	14,16	17871,00
108,54	127,50	1,2110	1047,80	8,99	11,54	15,29	17885,90
102,22	127,50	1,2110	1049,40	8,45	11,58	15,29	17858,90
93,62	127,50	1,2110	1050,90	8,45	11,56	14,77	17625,60
98,68	127,50	1,2110	1050,80	9,33	11,53	15,09	18029,20
108,31	127,50	1,2110	1048,90	9,36	11,61	15,71	18016,30
100,82	127,50	1,2110	1048,20	8,97	11,51	15,49	17756,90
93,71	127,50	1,2110	1047,30	8,89	11,44	15,00	17868,70
101,32	127,50	1,2110	1045,20	9,02	11,50	15,45	17498,40
98,49	127,50	1,2110	1044,60	8,67	11,50	15,45	17290,50
90,89	127,50	1,2110	1048,90	7,77	11,55	15,05	17391,40
89,99	127,50	1,2110	1053,70	7,74	11,62	14,37	17385,60
88,66	128,67	1,6650	1060,00	8,44	11,72	14,63	18085,10
96,58	128,67	1,6650	1057,30	9,36	11,79	15,14	17909,90
114,10	128,67	1,6650	1053,80	9,56	11,75	15,79	17926,10
119,13	128,67	1,6650	1045,70	9,99	11,73	15,72	17911,60
113,50	128,67	1,6650	1040,10	9,85	11,82	16,22	18230,30
97,63	128,67	1,6650	1037,30	9,34	11,76	15,82	18029,10

97,91	128,67	1,6650	1033,30	9,68	11,77	15,56	18166,10
114,82	128,67	1,6650	1030,20	9,07	11,79	15,96	18173,00
112,27	139,72	2,119	1055,20	7,79	11,86	14,64	17398,10
110,61	139,72	2,119	1055,50	8,36	11,84	14,92	17287,50
121,32	139,72	2,119	1053,00	9,07	11,87	15,27	17687,90
121,24	139,72	2,119	1048,20	9,43	11,91	15,80	17733,50
112,56	139,72	2,119	1047,30	8,45	11,88	15,80	17555,00
99,05	139,72	2,119	1051,10	7,57	11,84	14,85	17627,10
99,90	139,72	2,119	1055,00	7,78	11,92	14,53	17535,30
112,92	139,72	2,119	1055,70	8,53	11,96	14,91	17505,40
121,34	139,72	2,119	1055,40	8,89	11,94	15,38	17882,00
118,44	139,72	2,119	1057,30	7,91	12,00	15,34	17757,70
107,54	139,72	2,119	1059,50	7,90	11,98	14,55	17514,70
111,40	139,72	2,119	1058,70	7,93	11,97	14,78	17736,10
114,24	139,72	2,119	1060,10	7,57	11,99	14,91	17552,10
111,90	162,70	2,5730	1039,50	8,01	12,23	15,15	17754,30
102,52	162,70	2,5730	1041,40	7,96	12,19	14,66	17956,90
111,95	162,70	2,5730	1042,40	8,23	12,26	14,98	17959,30
116,65	162,70	2,5730	1040,30	9,03	12,28	15,26	17700,70
118,52	162,70	2,5730	1037,40	9,24	12,24	15,70	18004,80
121,39	162,70	2,5730	1032,70	9,17	12,26	15,70	18073,70
121,37	162,70	2,5730	1030,70	8,66	12,28	15,57	17650,50
110,00	162,70	2,5730	1028,90	8,79	12,20	15,31	17627,80
112,77	162,70	2,5730	1029,60	8,13	12,21	15,48	17671,80
107,26	162,70	2,5730	1032,50	8,01	12,31	14,89	17304,50
112,54	162,70	2,5730	1032,10	8,13	12,29	15,07	17432,60
115,51	162,70	2,5730	1032,10	8,19	12,35	15,07	17613,00
119,44	172,74	3,0272	1045,40	7,16	12,38	14,33	17405,20
108,09	172,74	3,0272	1057,20	6,45	12,47	14,28	17382,50
113,91	172,74	3,0272	1065,80	6,38	12,50	13,73	17168,40
130,41	172,74	3,0272	1070,30	7,12	12,55	13,92	17329,80
135,61	172,74	3,0272	1069,50	7,83	12,60	14,36	17794,60
133,89	172,74	3,0272	1065,30	8,81	12,60	14,85	17729,40
129,31	172,74	3,0272	1062,50	8,71	12,54	15,31	18007,90
128,35	172,74	3,0272	1058,80	9,01	12,53	15,10	18104,60
123,74	172,74	3,0272	1058,20	8,53	12,48	15,17	17806,20
110,95	172,74	3,0272	1061,00	7,96	12,41	14,76	17974,10
111,26	172,74	3,0272	1063,10	8,29	12,40	14,41	18084,70
125,86	172,74	3,0272	1060,90	9,17	12,46	15,07	18059,10
130,96	172,74	3,0272	1056,80	9,35	12,44	15,50	18159,90
124,00	172,74	3,0272	1056,70	8,35	12,41	15,26	18225,70
110,73	172,74	3,0272	1058,70	8,06	12,39	14,60	18044,80
111,06	172,74	3,0272	1056,20	8,95	12,38	14,83	17982,40
112,86	148,95	3,4813	1045,40	7,78	12,36	15,17	17436,20
107,24	148,95	3,4813	1048,30	7,73	12,33	14,72	17551,40
104,76	148,95	3,4813	1050,90	7,92	12,31	14,83	17625,00
108,07	148,95	3,4813	1049,70	8,54	12,35	15,02	17688,30
106,63	148,95	3,4813	1044,10	9,64	12,24	15,50	17855,20
116,93	148,95	3,4813	1041,30	9,29	12,27	15,97	17854,50
109,36	148,95	3,4813	1039,90	8,37	12,23	15,52	17474,70
100,88	148,95	3,4813	1040,30	7,93	12,21	14,83	17700,10
97,71	148,95	3,4813	1043,40	7,65	12,28	14,81	17560,70
99,29	148,95	3,4813	1046,40	8,26	12,30	14,59	17383,70
108,36	148,95	3,4813	1046,10	8,73	12,31	15,15	17807,60
109,48	148,95	3,4813	1044,70	8,29	12,37	15,35	17802,90
108,36	148,95	3,4813	1048,50	7,59	12,39	15,01	17526,70

113,95	148,95	3,4813	1053,00	7,64	12,28	14,44	17853,70
144,31	166,08	3,935	1055,60	8,31	12,43	15,07	18103,80
114,92	166,08	3,935	1055,60	8,18	12,44	14,72	18136,50
114,01	166,08	3,935	1055,30	8,09	12,50	14,93	18022,10
105,88	166,08	3,935	1055,90	8,41	12,46	14,68	18320,70
110,54	166,08	3,935	1054,50	9,50	12,47	15,03	18532,70
116,03	166,08	3,935	1047,30	9,07	12,41	15,42	18336,60
112,40	166,08	3,935	1047,30	8,32	12,38	15,11	18446,30
105,20	166,08	3,935	1050,40	7,21	12,41	14,68	18051,90
100,12	166,08	3,935	1055,40	7,30	12,36	13,85	17953,00
107,15	166,08	3,935	1057,70	7,71	12,42	14,31	18136,10
111,54	166,08	3,935	1057,70	8,26	12,48	14,80	18029,40
113,71	166,08	3,935	1053,50	9,11	12,43	14,99	18210,40
119,21	166,08	3,935	1043,90	8,92	12,38	15,74	18472,90
107,72	166,08	3,935	1046,70	7,69	12,30	14,99	18226,10
113,66	166,08	3,935	1050,50	7,55	12,26	14,20	18430,20
103,91	142,45	4,3894	1054,80	8,22	12,16	14,65	18297,60
105,13	142,45	4,3894	1055,10	8,78	12,17	14,86	18600,10
101,49	142,45	4,3894	1053,40	9,38	12,18	15,26	18448,40
98,65	142,45	4,3894	1052,40	8,98	12,10	15,51	18576,40
90,20	142,45	4,3894	1050,00	9,07	12,07	15,06	18576,40
96,76	142,45	4,3894	1046,80	8,80	12,09	15,34	18336,60
96,66	142,45	4,3894	1048,30	8,02	12,03	14,99	18149,30
95,82	142,45	4,3894	1052,80	7,18	12,02	14,48	18284,30
91,29	142,45	4,3894	1056,90	7,69	12,11	14,07	18182,20
92,11	142,45	4,3894	1059,00	8,14	12,10	14,66	18347,50
93,99	142,45	4,3894	1059,10	8,28	12,11	14,78	18686,80
97,61	142,45	4,3894	1057,30	9,10	12,10	14,96	18665,40
96,87	142,45	4,3894	1052,60	9,67	12,03	15,44	18546,40
98,86	142,45	4,3894	1052,60	8,63	12,00	15,55	18854,80
89,65	142,45	4,3894	1059,20	7,35	12,05	14,69	18525,40
76,39	142,45	4,3894	1072,40	6,09	11,97	13,86	18167,70
81,06	142,45	4,3894	1084,40	6,61	11,96	13,10	18338,80
84,38	135,97	4,8435	1062,90	8,74	11,73	14,98	18507,50
89,59	135,97	4,8435	1063,20	8,87	11,83	15,11	18576,90
95,18	135,97	4,8435	1061,80	8,77	11,87	15,17	18173,70
93,43	135,97	4,8435	1063,80	8,49	11,85	15,05	18410,50
92,25	135,97	4,8435	1062,60	8,69	11,88	14,94	18706,40
98,16	135,97	4,8435	1062,00	8,46	11,85	15,25	18274,40
93,57	135,97	4,8435	1062,30	8,83	11,79	15,01	18363,60
95,97	135,97	4,8435	1058,30	9,69	11,82	15,45	18623,50
104,57	135,97	4,8435	1051,90	9,84	11,84	15,95	18500,80
93,89	135,97	4,8435	1050,00	8,61	11,80	15,78	18246,40

Stadio 1, prova con aria compressa e vapore 100:

NOx (mg/m3)	NOxIN (mg/m3)	NH3 (kg/h)	Temp,PC (°C)	O2 PC (°C)	H2O (% v/v)	O2 (%)	Portata (m3/h)
145,32	154,60	0,7568	1052,00	9,05	11,75	15,26	18399,20
141,35	154,60	0,7568	1049,70	9,07	11,72	15,73	18635,30
134,54	154,60	0,7568	1047,40	8,85	11,69	15,40	18693,00
135,52	154,60	0,7568	1045,80	8,37	11,71	15,54	18379,60
124,05	154,60	0,7568	1050,10	7,17	11,66	15,00	18349,10
113,63	172,34	1,2110	1057,70	6,56	11,71	14,44	18389,10
114,61	172,34	1,2110	1065,50	6,63	11,74	13,80	18109,10
129,54	172,34	1,2110	1066,40	8,01	11,76	14,17	18309,70
140,91	172,34	1,2110	1062,30	9,64	11,83	15,21	18933,10
151,41	172,34	1,2110	1057,50	9,50	11,83	16,21	18814,20
121,79	172,34	1,2110	1053,70	8,42	11,76	15,52	18618,20
108,78	172,34	1,2110	1054,20	7,92	11,68	14,91	18898,40
128,26	152,43	1,6650	1057,30	7,66	11,75	14,77	18709,40
113,27	152,43	1,6650	1017,40	9,63	11,75	15,84	18390,50
107,56	152,43	1,6650	1016,70	9,29	11,72	16,28	18054,40
98,35	152,43	1,6650	1017,80	8,39	11,73	15,63	18218,30
92,82	152,43	1,6650	1021,70	7,67	11,76	15,17	18092,20
91,68	152,43	1,6650	1025,70	7,92	11,78	14,73	17822,50
105,54	152,43	1,6650	1028,60	8,20	11,80	15,24	18068,70
110,82	149,74	2,119	1027,60	8,69	11,88	15,24	18033,30
115,69	149,74	2,119	1026,60	8,57	11,85	15,75	17935,50
111,00	149,74	2,119	1028,00	8,27	11,76	15,33	18051,60
114,20	149,74	2,119	1073,60	7,91	11,97	14,54	18362,80
114,59	149,74	2,119	1073,30	8,62	11,96	14,90	18287,80
125,59	149,74	2,119	1060,60	8,95	12,02	15,30	18699,50
122,32	149,74	2,119	1053,10	9,07	12,04	15,40	18777,00
111,15	176,81	2,5730	1049,90	8,78	12,02	15,56	18456,70
109,79	176,81	2,5730	1045,10	8,86	11,96	15,33	18403,90
118,72	176,81	2,5730	992,70	10,69	11,96	16,76	17657,50
126,11	176,81	2,5730	988,70	10,29	11,97	17,06	17948,30
122,05	176,81	2,5730	984,30	10,27	12,03	16,65	18014,60
122,03	176,81	2,5730	982,70	9,37	12,00	16,67	17600,30
109,77	176,81	2,5730	983,20	9,13	11,93	16,06	17739,20
111,14	176,81	2,5730	985,40	8,58	11,99	16,09	17662,10
107,48	176,81	2,5730	988,00	8,32	12,07	15,77	17185,50
102,24	176,81	2,5730	991,60	7,83	12,09	15,49	17302,30
101,23	182,92	3,0272	1001,30	6,94	12,19	15,13	17664,60
98,05	182,92	3,0272	1015,80	5,64	12,27	14,33	17308,40
98,46	182,92	3,0272	1031,90	4,83	12,29	13,06	17314,10
129,48	182,92	3,0272	1052,60	4,33	12,34	12,81	17673,80
105,02	182,92	3,0272	1089,70	9,17	12,33	14,70	19112,70
128,02	182,92	3,0272	1087,50	9,51	12,33	14,94	19514,80
130,30	182,92	3,0272	1084,50	8,09	12,52	15,03	19013,00
121,81	182,92	3,0272	1085,10	8,05	12,49	14,19	18899,40
133,21	182,92	3,0272	1077,10	9,12	12,61	14,70	18554,00
153,53	182,92	3,0272	1069,00	10,05	12,64	15,78	18915,90
135,76	182,92	3,0272	1058,50	10,23	12,50	15,90	19080,80
125,33	182,92	3,0272	1048,30	10,14	12,49	16,00	18836,20
120,25	158,10	3,4813	1040,90	9,99	12,36	15,95	18873,30
114,90	158,10	3,4813	1032,20	9,87	12,36	15,90	19057,20

119,46	158,10	3,4813	1026,70	10,07	12,41	15,98	18662,50
119,92	158,10	3,4813	1021,40	10,16	12,27	16,27	18722,10
115,18	158,10	3,4813	1015,90	10,32	12,15	16,23	18969,00
120,06	158,10	3,4813	1017,60	8,46	11,88	14,77	18333,50
104,48	158,10	3,4813	1019,80	8,49	11,91	15,40	18693,10
94,49	158,10	3,4813	1023,20	8,24	11,94	15,23	18574,40
88,88	158,10	3,4813	1028,30	8,03	11,89	14,98	18388,70
86,38	158,10	3,4813	1030,70	8,74	11,83	14,93	18793,10
91,80	158,10	3,4813	1033,80	8,43	11,85	15,48	18569,00
87,41	158,10	3,4813	1039,10	8,16	11,79	14,97	18542,50
86,51	158,10	3,4813	1044,30	7,88	11,73	14,84	18858,20
82,97	158,10	3,4813	1048,90	8,02	11,73	14,79	18456,00
84,61	142,10	3,935	1051,60	8,30	11,72	14,88	18562,40
87,46	142,10	3,935	1053,60	8,58	11,70	14,94	18941,50
90,05	142,10	3,935	1052,90	8,89	11,72	15,27	18712,30
90,19	142,10	3,935	1048,40	9,47	11,70	15,35	18860,70
105,60	142,10	3,935	1044,80	9,33	11,63	15,52	19138,40
100,15	142,10	3,935	1025,60	9,53	11,66	15,98	18354,30
88,79	142,10	3,935	1021,10	9,89	11,66	15,83	18542,60
99,22	142,10	3,935	1016,90	9,73	11,72	16,29	18171,20
93,37	142,10	3,935	1014,30	9,77	11,65	16,09	18135,00
90,76	142,10	3,935	1011,90	9,84	11,57	16,14	18311,70
91,95	145,06	4,3894	1010,10	9,46	11,63	16,39	18091,80
84,13	145,06	4,3894	1011,10	8,84	11,64	15,63	18107,00
79,29	145,06	4,3894	1013,90	8,75	11,66	15,48	18461,60
83,48	145,06	4,3894	1017,50	8,20	11,74	15,46	17949,70
80,56	145,06	4,3894	1023,00	8,35	11,57	15,07	18023,70
84,37	145,06	4,3894	1027,90	8,05	11,63	15,15	18221,20
96,69	145,06	4,3894	1031,20	8,56	11,73	15,05	17981,40
116,92	145,06	4,3894	1055,20	8,90	11,74	15,26	18688,00
109,32	145,06	4,3894	1057,10	8,80	11,77	15,23	18919,90
100,67	145,06	4,3894	1060,40	8,51	11,74	15,06	18499,90
99,40	145,06	4,3894	1062,90	7,86	11,73	14,92	18204,80
102,94	148,67	4,8435	1064,10	7,97	11,74	14,56	18339,00
109,57	148,67	4,8435	1061,90	8,54	11,74	14,89	18287,20
105,10	148,67	4,8435	1058,30	8,69	11,81	15,15	18395,80
101,51	148,67	4,8435	1052,80	9,43	11,91	15,25	18687,60
104,98	148,67	4,8435	1049,10	9,13	11,89	15,79	18521,00
95,78	148,67	4,8435	1046,90	8,70	11,79	15,36	18405,40

Stadio 2, prova con vapore 100:

NOx (mg/m3)	NOxIN (mg/m3)	NH3 (kg/h)	Temp,PC (°C)	O2 PC (°C)	H2O (% v/v)	O2 (%)	Portata (m3/h)
89,29	133,07	0,7568	1051,50	8,82	12,99	13,54	32597,30
87,92	133,07	0,7568	1050,70	8,47	13,12	13,24	32486,50
82,39	133,07	0,7568	1052,80	8,45	13,02	13,10	32684,40
160,58	133,07	0,7568	1050,20	9,47	12,84	13,51	32731,30
79,16	133,07	0,7568	1046,00	9,44	13,05	14,40	32551,70
62,53	133,07	0,7568	1046,60	9,03	12,97	13,80	32615,20
116,83	133,07	0,7568	1047,30	8,55	12,78	13,09	32683,70
79,12	133,07	0,7568	1048,30	8,82	12,95	13,36	32613,00
63,47	133,07	0,7568	1048,00	9,04	13,00	13,63	32575,70
130,01	133,07	0,7568	1048,10	8,53	12,82	13,42	32666,40
133,07	133,07	0,7568	1048,40	8,49	12,81	13,25	32666,40
72,81	133,07	0,7568	1048,40	8,61	12,92	13,21	32641,70
101,21	133,07	0,7568	1048,10	9,19	12,86	13,55	32670,70
133,95	133,07	0,7568	1048,70	9,00	12,82	13,82	32679,00
127,36	133,07	0,7568	1048,30	8,97	12,84	13,49	32687,30
121,76	133,07	0,7568	1048,50	8,72	12,85	13,48	32661,60
79,91	133,07	0,7568	1049,80	8,61	12,91	13,12	32640,70
49,04	133,07	0,7568	1049,50	8,77	13,00	13,50	32602,30
53,44	133,07	0,7568	1049,00	8,92	13,02	13,55	32583,70
89,93	96,94	1,2110	1041,80	8,66	13,14	13,47	32552,90
74,09	96,94	1,2110	1045,50	8,17	13,18	13,37	32544,40
67,70	96,94	1,2110	1048,30	8,11	13,19	12,71	32439,70
71,08	96,94	1,2110	1049,10	9,09	13,28	13,35	32447,40
77,56	96,94	1,2110	1047,50	9,05	13,30	14,04	32371,30
70,90	96,94	1,2110	1048,80	8,72	13,24	13,49	32546,20
63,38	96,94	1,2110	1049,40	8,53	13,22	13,39	32526,80
61,94	96,94	1,2110	1050,70	8,16	13,29	13,17	32540,50
62,28	96,94	1,2110	1055,80	7,46	13,33	12,96	32451,80
61,91	96,94	1,2110	1058,90	7,68	13,32	12,27	32423,70
73,96	96,94	1,2110	1060,70	8,27	13,40	13,10	32456,30
86,70	96,94	1,2110	1058,80	8,53	13,49	13,33	32296,50
79,09	96,94	1,2110	1058,40	8,52	13,41	13,39	32321,20
67,54	96,94	1,2110	1057,10	8,93	13,39	13,38	32423,30
73,97	96,94	1,2110	1057,10	8,47	13,40	13,56	32359,50
67,48	96,94	1,2110	1062,60	8,00	13,31	12,85	32363,40
83,07	96,94	1,2110	1068,10	7,65	13,29	12,59	32545,10
74,20	123,90	1,6650	1077,70	9,20	13,22	13,95	32610,10
63,40	123,90	1,6650	1078,40	8,71	13,16	13,32	32687,60
64,05	123,90	1,6650	1076,50	8,55	13,10	12,82	32491,80
69,19	123,90	1,6650	1073,60	9,54	13,02	13,45	32676,40
140,58	123,90	1,6650	1067,70	9,87	12,80	14,11	32622,50
121,67	123,90	1,6650	1065,60	9,55	12,81	14,00	32754,10
118,41	123,90	1,6650	1064,70	9,13	12,72	13,65	32774,50
104,16	123,90	1,6650	1061,20	9,26	12,69	13,29	32672,90
123,71	123,90	1,6650	1057,40	9,26	12,71	13,95	32825,10
104,11	123,90	1,6650	1057,50	8,64	12,66	13,37	32933,40
106,22	123,90	1,6650	1065,20	7,46	12,61	12,65	32777,40
105,02	123,90	1,6650	1070,10	7,90	12,66	12,26	32833,40
108,98	143,04	2,119	1041,70	9,61	12,07	14,36	33134,40
82,34	143,04	2,119	1040,20	9,36	12,05	13,72	32983,60

85,35	143,04	2,119	1037,60	9,56	12,15	13,77	32875,90
94,33	143,04	2,119	1037,00	9,45	12,20	14,22	33145,60
80,83	143,04	2,119	1036,40	8,99	12,15	13,65	33165,80
76,49	143,04	2,119	1037,70	8,79	12,23	13,43	32950,00
82,09	143,04	2,119	1039,00	8,88	12,27	13,58	33089,50
90,56	143,04	2,119	1040,90	8,50	12,21	13,70	33096,20
85,14	143,04	2,119	1040,50	8,52	12,29	13,19	32904,90
88,36	143,04	2,119	1041,90	8,76	12,40	13,50	32925,60
88,33	143,04	2,119	1040,30	9,14	12,36	13,68	32854,40
88,51	143,04	2,119	1042,60	8,84	12,29	13,88	33071,90
91,71	143,04	2,119	1040,90	8,72	12,32	13,36	32961,00
97,11	143,04	2,119	1040,10	8,70	12,37	13,56	32917,10
91,42	143,04	2,119	1041,90	8,37	12,42	13,47	32877,10
83,95	143,04	2,119	1045,40	8,20	12,50	13,08	32893,50
90,13	143,04	2,119	1048,20	8,11	12,55	13,11	32913,60
111,63	122,23	2,5730	1073,80	8,15	12,86	12,90	32626,10
61,67	122,23	2,5730	1077,60	7,97	12,99	12,76	32530,90
51,47	122,23	2,5730	1079,90	7,97	13,09	12,67	32455,00
57,27	122,23	2,5730	1078,50	8,97	13,14	13,07	32386,50
64,11	122,23	2,5730	1075,80	9,38	13,13	13,82	32483,00
60,29	122,23	2,5730	1070,30	10,01	13,10	14,21	32534,50
47,62	122,23	2,5730	1066,50	9,53	13,05	13,93	32708,70
71,54	122,23	2,5730	1066,20	9,06	12,92	13,44	32713,80
71,36	122,23	2,5730	1065,60	9,02	12,95	13,44	32712,30
41,53	122,23	2,5730	1064,20	9,14	13,05	13,28	32638,40
44,27	122,23	2,5730	1062,60	9,31	13,02	13,95	32641,10
42,13	122,23	2,5730	1060,40	9,53	13,04	13,44	32590,90
44,00	122,23	2,5730	1058,80	9,28	13,09	13,73	32539,70
43,77	122,23	2,5730	1058,80	9,31	13,07	13,65	32691,10
47,74	122,23	2,5730	1058,40	9,21	13,03	13,48	32636,30
65,10	122,23	2,5730	1058,70	8,76	13,02	13,62	32654,70
107,02	139,71	3,0272	1059,20	9,23	12,66	13,75	32844,90
96,46	139,71	3,0272	1058,10	9,11	12,60	13,42	32788,80
98,55	139,71	3,0272	1059,10	8,81	12,65	13,54	32698,50
93,19	139,71	3,0272	1057,10	9,20	12,75	13,27	32648,30
94,03	139,71	3,0272	1056,50	8,85	12,72	13,85	32895,30
91,21	139,71	3,0272	1054,30	9,41	12,69	13,21	32916,00
103,12	139,71	3,0272	1050,30	9,89	12,69	14,20	32656,70
100,22	139,71	3,0272	1048,70	9,63	12,59	14,03	32678,50
97,73	139,71	3,0272	1048,30	10,05	12,51	13,74	32913,10
94,53	139,71	3,0272	1047,90	10,23	12,58	14,29	33002,20
99,26	139,71	3,0272	1044,90	10,72	12,55	14,28	33019,70
93,11	139,71	3,0272	1044,10	11,03	12,48	14,65	33034,30
102,23	139,71	3,0272	1037,30	12,16	12,45	14,85	32926,30
113,16	139,71	3,0272	1029,50	14,12	12,40	16,34	33028,20
94,78	115,86	3,4813	917,70	11,69	11,77	14,83	33324,40
86,10	115,86	3,4813	922,40	11,11	11,74	14,94	33220,40
68,89	115,86	3,4813	928,40	10,35	11,68	14,18	33467,70
62,18	115,86	3,4813	935,00	10,05	11,70	13,84	33504,90
63,70	115,86	3,4813	940,50	10,15	11,72	14,07	33187,40
64,48	115,86	3,4813	947,30	9,56	11,63	14,08	33223,50
66,71	115,86	3,4813	956,80	9,48	11,57	13,37	33478,40
67,37	115,86	3,4813	964,70	9,38	11,60	13,97	33432,00
55,17	115,86	3,4813	975,20	8,56	11,55	13,56	33409,80
50,83	115,86	3,4813	987,80	7,82	11,53	12,59	33511,60
52,32	115,86	3,4813	1003,90	7,60	11,63	12,41	33492,60

54,64	115,86	3,4813	1012,50	7,91	11,65	12,77	33439,80
60,89	115,86	3,4813	1020,70	8,48	11,66	13,05	33300,90
62,37	115,86	3,4813	1022,30	9,29	11,72	13,83	33292,10
64,01	115,86	3,4813	1022,10	9,09	11,67	14,05	33381,00
63,52	115,86	3,4813	1027,60	8,38	11,65	13,36	33167,70
64,39	115,86	3,4813	1034,60	7,82	11,71	12,73	33198,40
81,64	115,86	3,4813	1040,20	7,46	11,78	12,56	33168,00
86,91	121,82	3,935	1010,40	9,13	12,53	13,68	32877,30
83,38	121,82	3,935	1010,90	8,61	12,54	13,47	32710,40
89,53	121,82	3,935	1015,30	8,43	12,59	13,04	32826,40
89,65	121,82	3,935	1016,90	8,93	12,63	13,38	32628,30
89,71	121,82	3,935	1015,20	9,67	12,64	13,77	32760,90
111,30	121,82	3,935	1012,60	10,35	12,78	14,50	32764,90
112,90	121,82	3,935	1014,20	9,44	12,71	14,65	32874,90
91,52	121,82	3,935	1018,10	8,57	12,59	13,24	32863,10
85,10	121,82	3,935	1021,30	8,45	12,61	12,91	32689,20
89,45	121,82	3,935	1022,20	8,91	12,72	13,22	32666,00
95,54	121,82	3,935	1020,20	9,84	12,71	13,92	32682,20
103,43	121,82	3,935	1019,00	10,07	12,70	14,40	32781,40
105,42	121,82	3,935	1015,40	10,49	12,71	14,34	32847,50
82,27	126,80	4,3894	914,00	12,84	12,12	15,63	33156,90
83,22	126,80	4,3894	922,10	11,69	12,07	14,77	33096,50
77,12	126,80	4,3894	931,20	11,04	12,10	14,09	33113,90
73,60	126,80	4,3894	939,80	10,53	12,12	13,99	33069,10
67,51	126,80	4,3894	949,20	10,10	12,10	13,68	33067,90
66,15	126,80	4,3894	958,20	10,24	12,11	13,55	33061,20
69,83	126,80	4,3894	966,00	10,23	12,08	13,97	33112,40
68,17	126,80	4,3894	972,20	10,14	11,96	13,88	33104,00
63,65	126,80	4,3894	979,30	10,01	11,90	13,72	33151,60
59,30	126,80	4,3894	984,80	9,80	11,90	13,85	33298,40
56,06	126,80	4,3894	989,30	9,67	11,84	13,50	33069,60
51,91	126,80	4,3894	997,00	8,85	11,79	13,35	33237,20
54,39	126,80	4,3894	1007,30	8,23	11,78	12,58	33252,10
74,70	126,80	4,3894	1014,70	8,18	11,73	12,53	33155,70
67,56	100,20	4,8435	1006,20	9,19	12,14	13,60	33026,20
70,92	100,20	4,8435	1006,60	9,04	12,21	13,51	33036,40
74,31	100,20	4,8435	1008,00	8,91	12,20	13,63	33043,40
66,67	100,20	4,8435	1011,90	8,33	12,17	13,15	33015,50
67,54	100,20	4,8435	1015,50	8,45	12,27	12,78	32972,40
75,31	100,20	4,8435	1016,90	9,37	12,33	13,56	33013,20
77,74	100,20	4,8435	1013,90	9,63	12,30	14,19	33025,50
77,94	100,20	4,8435	1011,30	9,56	12,27	14,01	32905,80
74,83	100,20	4,8435	1012,10	8,99	12,29	13,82	32903,40
67,04	100,20	4,8435	1015,70	8,31	12,25	13,09	32993,40
65,22	100,20	4,8435	1020,00	8,18	12,25	12,71	32981,80
69,47	100,20	4,8435	1021,30	8,99	12,37	13,14	32903,60
77,78	100,20	4,8435	1022,20	9,42	12,35	14,10	33012,70
72,58	100,20	4,8435	1024,80	8,89	12,34	13,73	33157,40
73,64	100,20	4,8435	1028,10	8,54	12,37	13,21	32951,40
72,76	100,20	4,8435	1034,00	7,68	12,37	13,10	32946,90
68,52	100,20	4,8435	1039,60	7,70	12,33	12,09	33026,60

Stadio 2, prova con vapore 300:

NOx (mg/m3)	NOxIN (mg/m3)	NH3 (kg/h)	Temp.PC (°C)	O2 PC (°C)	H2O (% v/v)	O2 (%)	Portata (m3/h)
145,14	148,55	0,7568	1024,70	9,47	13,84	14,12	32127,70
144,72	148,55	0,7568	1022,90	9,66	13,91	13,87	32101,30
143,31	148,55	0,7568	1021,40	9,82	14,00	14,29	32052,90
134,11	148,55	0,7568	1023,00	9,01	13,97	14,00	32048,60
129,87	148,55	0,7568	1026,20	8,53	14,02	13,14	32054,80
148,66	148,55	0,7568	1030,00	8,30	14,15	13,29	31991,90
142,45	148,55	0,7568	1032,80	8,35	14,23	12,81	31894,90
142,96	148,55	0,7568	1036,30	8,67	14,33	13,18	32000,60
148,18	148,55	0,7568	1038,70	8,95	14,43	13,58	31907,20
138,71	148,55	0,7568	1042,30	8,50	14,39	13,41	31913,10
127,98	148,55	0,7568	1053,50	7,11	14,42	12,50	31843,40
120,63	148,55	0,7568	1068,20	6,21	14,47	11,68	31889,20
119,87	148,55	0,7568	1079,60	6,24	14,59	11,12	31751,50
97,24	148,55	0,7568	1084,30	7,74	15,00	12,38	31658,10
113,77	148,55	0,7568	1082,30	8,94	15,03	13,60	31662,60
121,79	146,38	1,2110	1045,40	9,28	14,26	13,61	31921,70
112,73	146,38	1,2110	1044,40	9,16	14,25	13,74	31950,80
104,20	146,38	1,2110	1044,10	8,62	14,18	13,31	31982,80
105,72	146,38	1,2110	1044,10	8,72	14,22	13,09	31963,30
106,40	146,38	1,2110	1044,40	8,41	14,24	13,28	32042,60
100,87	146,38	1,2110	1042,10	8,93	14,16	13,11	32061,10
108,29	146,38	1,2110	1039,70	9,02	14,14	13,80	32038,20
102,78	146,38	1,2110	1038,80	8,84	14,10	13,64	31999,00
98,82	146,38	1,2110	1038,00	8,73	13,98	13,22	32203,00
106,31	146,38	1,2110	1038,00	8,68	14,03	13,55	32216,30
102,85	146,38	1,2110	1038,10	8,78	14,08	13,13	32018,80
93,85	146,38	1,2110	1037,30	9,25	13,96	13,83	32136,40
102,99	146,38	1,2110	1035,70	8,90	14,03	13,61	32215,80
102,80	132,38	1,6650	1062,50	8,80	14,07	13,19	32089,40
108,64	132,38	1,6650	1060,40	9,00	14,09	13,63	32131,90
100,51	132,38	1,6650	1061,50	8,62	14,03	13,24	32100,40
105,46	132,38	1,6650	1062,90	8,36	14,07	13,14	32037,10
117,08	132,38	1,6650	1064,00	8,02	14,08	13,00	32040,10
108,73	132,38	1,6650	1066,30	8,16	14,07	12,63	32001,50
117,77	132,38	1,6650	1063,80	9,15	14,16	13,32	32057,90
130,39	132,38	1,6650	1061,70	9,47	14,18	14,15	31989,60
107,19	132,38	1,6650	1060,10	8,89	14,09	13,47	31983,80
107,34	132,38	1,6650	1058,40	9,01	14,11	13,47	32010,80
99,43	132,38	1,6650	1055,60	9,09	14,06	13,48	32070,90
92,86	132,38	1,6650	1053,80	9,14	13,99	13,46	32084,60
107,90	132,38	1,6650	1053,40	8,74	14,22	13,72	31976,60
94,60	132,38	1,6650	1054,10	8,49	14,01	13,06	32138,20
84,45	129,49	2,119	1039,40	9,06	13,89	13,49	32078,90
82,67	129,49	2,119	1037,10	9,44	13,92	13,88	32151,00
74,32	129,49	2,119	1035,00	9,73	13,82	13,77	32211,30
83,03	129,49	2,119	1030,50	11,03	13,83	14,59	32259,40
88,00	129,49	2,119	1026,70	11,28	13,84	15,50	32306,60
72,76	129,49	2,119	1024,10	10,34	13,67	14,76	32372,70
63,97	129,49	2,119	1021,10	10,08	13,68	13,78	32372,50
77,18	129,49	2,119	1021,00	9,92	13,72	14,38	32223,70
63,22	129,49	2,119	1020,30	9,54	13,65	13,67	32426,80
68,69	129,49	2,119	1019,00	9,69	13,81	13,91	32373,60

71,78	129,49	2,119	1016,70	9,99	13,79	14,09	32275,10
58,75	129,49	2,119	1013,00	9,94	13,70	14,14	32123,60
72,28	129,49	2,119	1012,60	9,65	13,72	14,06	32034,90
69,40	129,49	2,119	1015,40	8,54	13,75	13,61	32191,40
95,02	129,49	2,119	1019,60	8,56	13,66	12,73	32232,30
95,46	139,16	2,5730	1045,90	8,18	13,92	13,14	31944,50
75,07	139,16	2,5730	1047,50	7,98	13,88	13,12	32176,20
79,01	139,16	2,5730	1049,20	7,88	14,04	13,01	32004,70
84,33	139,16	2,5730	1050,20	8,14	14,06	13,00	32025,50
89,64	139,16	2,5730	1049,20	8,92	14,03	13,31	32059,10
98,08	139,16	2,5730	1047,00	9,44	14,15	14,07	31990,90
93,45	139,16	2,5730	1045,70	8,81	14,08	14,11	32036,50
76,73	139,16	2,5730	1046,90	8,32	14,00	13,00	32064,10
85,89	139,16	2,5730	1050,10	8,26	14,13	13,10	32007,90
86,89	139,16	2,5730	1054,10	7,52	14,14	13,10	32166,70
85,41	139,16	2,5730	1061,30	7,01	14,10	12,26	32005,60
92,58	139,16	2,5730	1061,90	7,92	14,27	12,38	31925,10
116,21	139,16	2,5730	1058,20	8,85	14,28	13,73	31899,80
116,15	139,16	2,5730	1053,30	9,76	14,30	14,02	31803,20
89,30	151,86	3,0272	1043,00	8,42	14,28	13,22	32091,40
92,08	151,86	3,0272	1044,20	8,27	14,35	13,24	31827,30
81,20	151,86	3,0272	1050,20	7,39	14,22	13,12	32095,90
83,93	151,86	3,0272	1060,90	6,20	14,30	11,76	31973,30
89,30	151,86	3,0272	1069,50	6,89	14,43	11,71	31679,50
110,94	151,86	3,0272	1070,70	8,09	14,51	12,93	31640,30
119,79	151,86	3,0272	1067,00	9,20	14,51	13,67	31711,30
118,60	151,86	3,0272	1061,60	9,15	14,49	14,17	31658,20
94,53	151,86	3,0272	1061,80	8,66	14,33	13,42	31818,50
88,27	151,86	3,0272	1062,10	8,05	14,35	13,09	32002,60
91,66	151,86	3,0272	1060,70	8,17	14,38	12,73	32071,60
97,25	151,86	3,0272	1060,90	8,07	14,37	13,13	31768,30
97,27	151,86	3,0272	1059,80	8,93	14,45	13,09	31920,30
101,49	145,87	3,4813	1041,10	8,82	14,41	13,47	32037,90
92,58	145,87	3,4813	1044,60	8,14	14,35	13,36	31932,40
84,41	145,87	3,4813	1046,00	8,26	14,38	12,60	31893,50
102,62	145,87	3,4813	1044,80	9,16	14,42	13,55	31750,70
106,28	145,87	3,4813	1044,90	9,07	14,43	14,07	31997,50
92,97	145,87	3,4813	1045,00	8,80	14,45	13,22	31966,60
96,05	145,87	3,4813	1044,20	9,15	14,44	13,68	31943,50
90,81	145,87	3,4813	1043,80	8,72	14,33	13,52	32161,90
86,80	145,87	3,4813	1042,80	8,92	14,30	13,19	31921,60
92,83	145,87	3,4813	1044,10	8,68	14,34	13,50	31878,40
88,49	145,87	3,4813	1043,70	8,58	14,31	13,25	32004,10
86,73	145,87	3,4813	1044,10	8,80	14,30	13,35	31943,60
107,08	145,87	3,4813	1043,90	9,41	14,36	13,91	31932,70
102,11	158,55	3,935	1047,80	7,86	14,33	12,95	31901,90
89,64	158,55	3,935	1049,90	8,04	14,38	12,58	31909,80
100,92	158,55	3,935	1046,60	9,17	14,47	13,65	31818,30
101,31	158,55	3,935	1043,80	9,19	14,42	14,37	31909,40
87,75	158,55	3,935	1045,00	8,67	14,37	13,38	31939,60
86,65	158,55	3,935	1047,30	8,25	14,41	13,46	32086,10
80,56	158,55	3,935	1053,00	7,70	14,39	12,71	31849,40
86,13	158,55	3,935	1056,90	7,85	14,44	12,60	31780,60
99,95	158,55	3,935	1058,10	8,78	14,52	13,37	31805,00
104,71	158,55	3,935	1055,20	9,03	14,48	13,88	31941,90
99,50	158,55	3,935	1056,30	8,59	14,46	13,42	31755,00

94,52	158,55	3,935	1056,80	8,59	14,49	13,39	32001,90
86,40	158,55	3,935	1055,00	8,84	14,45	13,21	31936,60
79,99	158,55	3,935	1051,40	9,74	14,52	13,98	32024,80
41,49	158,55	3,935	1048,90	9,25	14,83	14,30	31729,60
86,12	110,92	4,3984	1044,40	9,28	15,09	14,03	31573,40
68,51	110,92	4,3984	1040,40	9,59	15,22	14,30	31529,10
65,07	110,92	4,3984	1038,20	9,01	15,23	14,22	31562,00
66,32	110,92	4,3984	1038,70	8,61	15,11	13,26	31565,50
60,78	110,92	4,3984	1037,90	8,87	15,15	13,55	31604,30
64,98	110,92	4,3984	1036,80	8,81	15,29	13,88	31550,60
59,51	110,92	4,3984	1038,70	8,47	15,21	13,42	31510,90
64,20	110,92	4,3984	1038,00	8,46	15,17	13,31	31678,50
65,88	110,92	4,3984	1034,60	8,91	15,27	13,64	31442,60
61,21	110,92	4,3984	1031,10	8,90	15,27	13,92	31532,60
64,02	110,92	4,3984	1028,10	8,90	15,28	13,55	31692,80
92,67	110,92	4,3984	1027,00	8,69	15,42	13,90	31546,60
62,28	110,92	4,3984	1030,50	7,98	15,33	13,10	31483,30
62,53	110,92	4,3984	1031,00	8,35	15,40	12,81	31341,40
78,79	110,92	4,3984	1029,70	9,10	15,57	13,93	31426,10
87,16	110,92	4,3984	1029,10	8,88	15,43	13,88	31404,60
82,96	100,71	4,8435	1019,40	9,58	15,34	14,47	31569,40
73,48	100,71	4,8435	1023,80	9,20	15,22	13,44	31420,50
64,59	100,71	4,8435	1025,90	8,81	15,25	13,63	31287,10
65,53	100,71	4,8435	1026,10	8,78	15,39	13,17	31403,40
65,54	100,71	4,8435	1027,60	8,68	15,35	13,47	31671,60
58,27	100,71	4,8435	1025,90	9,24	15,27	13,62	31355,60
65,19	100,71	4,8435	1024,30	9,48	15,33	14,21	31338,50
68,87	100,71	4,8435	1020,00	10,05	15,27	14,23	31491,60
57,17	100,71	4,8435	1013,60	10,70	15,19	14,63	31581,70
55,01	100,71	4,8435	1005,80	11,17	15,17	15,02	31612,60
62,31	100,71	4,8435	998,80	11,56	14,99	15,12	31526,70

Stadio 2, prova con aria compressa e vapore 100:

NOx (mg/m3)	NOxIN (mg/m3)	NH3 (kg/h)	Temp,PC (°C)	O2 PC (°C)	H2O (%) v/v	O2 (%)	Portata (m3/h)
119,88	139,50	0,7568	1050,90	10,35	13,31	14,20	32521,00
122,80	139,50	0,7568	1050,40	9,67	13,31	14,21	32556,70
112,68	139,50	0,7568	1052,50	9,03	13,29	13,44	32552,30
114,18	139,50	0,7568	1058,00	8,21	13,33	13,18	32677,40
114,97	139,50	0,7568	1065,30	8,38	13,36	12,44	32642,80
135,15	139,50	0,7568	1065,00	9,35	13,49	13,65	32469,20
138,16	139,50	0,7568	1062,50	10,11	13,46	14,00	32472,30
123,03	139,50	0,7568	1058,20	10,23	13,42	14,45	32554,60
116,67	139,50	0,7568	1054,80	10,05	13,39	14,06	32520,30
114,33	139,50	0,7568	1052,00	9,94	13,31	14,08	32532,20
116,15	139,50	0,7568	1054,50	8,92	13,44	13,91	32603,80
100,83	139,50	0,7568	1059,80	8,28	13,37	12,79	32657,50
119,58	139,50	0,7568	1062,80	8,62	13,51	12,94	32472,60
131,98	139,50	0,7568	1062,40	9,48	13,58	13,59	32436,00
124,98	139,50	0,7568	1059,90	10,25	13,67	14,38	32405,90
123,93	139,50	0,7568	1058,40	9,85	13,57	14,40	32417,60
108,01	139,50	0,7568	1061,00	9,09	13,52	13,39	32491,40

115,00	139,50	0,7568	1062,30	9,23	13,53	13,56	32500,20
96,36	123,36	1,2110	1052,00	9,15	13,30	13,55	32568,10
87,24	123,36	1,2110	1052,60	9,23	13,22	13,38	32589,70
105,52	123,36	1,2110	1052,40	9,28	13,34	13,73	32539,60
94,97	123,36	1,2110	1051,90	9,49	13,27	13,66	32575,30
99,35	123,36	1,2110	1049,00	10,13	13,33	14,14	32577,30
106,88	123,36	1,2110	1045,70	10,36	13,35	14,58	32546,10
99,59	123,36	1,2110	1045,20	9,19	13,35	14,22	32526,00
84,94	123,36	1,2110	1050,90	7,40	13,34	13,37	32488,80
78,97	123,36	1,2110	1058,50	7,20	13,37	12,13	32339,60
84,10	137,47	1,6650	1024,10	12,44	13,49	15,75	32515,40
74,41	137,47	1,6650	1014,30	13,14	13,40	16,11	32584,00
71,49	137,47	1,6650	1005,50	13,61	13,35	16,49	32662,00
67,91	137,47	1,6650	995,30	12,99	13,44	16,07	32548,80
56,40	137,47	1,6650	991,00	11,70	13,44	15,43	32412,40
57,34	137,47	1,6650	991,50	10,50	13,48	14,23	32388,80
71,88	137,47	1,6650	991,30	10,14	13,71	13,73	32361,10
70,68	137,47	1,6650	996,20	9,79	13,82	13,92	32479,40
74,49	137,47	1,6650	999,10	9,65	13,92	13,66	32255,80
77,32	137,47	1,6650	1003,80	9,39	14,04	13,89	32243,40
74,37	137,47	1,6650	1008,80	9,16	13,91	13,29	32219,20
86,68	137,47	1,6650	1015,50	8,90	13,93	13,53	32254,90
77,83	137,47	1,6650	1022,10	8,64	13,90	13,26	32261,10
95,03	137,47	1,6650	1025,70	9,25	13,87	13,40	32312,10
70,26	141,41	2,119	1038,90	8,32	13,64	13,25	32487,70
70,93	141,41	2,119	1042,90	8,39	13,67	12,98	32357,80
80,65	141,41	2,119	1043,40	8,99	13,76	13,54	32304,50
82,89	141,41	2,119	1040,60	9,98	13,74	14,01	32351,20
82,91	141,41	2,119	1036,30	10,42	13,73	14,77	32326,40
72,62	141,41	2,119	1031,50	10,17	13,70	14,60	32345,70
62,47	141,41	2,119	1033,20	9,05	13,62	13,93	32488,90
62,22	141,41	2,119	1039,60	7,76	13,73	12,67	32289,10
67,47	141,41	2,119	1051,20	7,19	13,76	12,00	32160,70
83,68	141,41	2,119	1058,00	7,75	13,82	12,28	32142,20
89,64	126,61	2,5730	1027,20	10,44	13,60	14,73	32468,80
59,61	126,61	2,5730	1022,00	9,82	13,58	14,15	32292,00
61,67	126,61	2,5730	1021,20	9,71	13,62	13,91	32361,10
62,96	126,61	2,5730	1021,10	9,10	13,66	13,88	32379,20
58,69	126,61	2,5730	1021,60	9,22	13,64	13,45	32349,60
66,44	126,61	2,5730	1020,70	9,49	13,69	14,02	32371,10
62,91	126,61	2,5730	1018,70	10,01	13,72	14,10	32436,90
64,37	126,61	2,5730	1014,50	10,90	13,68	14,91	32478,30
67,35	126,61	2,5730	1007,80	11,31	13,62	15,42	32350,50
55,85	126,61	2,5730	1004,10	10,81	13,53	14,97	32446,40
53,91	126,61	2,5730	1002,10	10,38	13,50	14,58	32472,00
57,95	126,61	2,5730	1001,50	9,66	13,57	14,35	32395,50
55,64	126,61	2,5730	1009,70	8,32	13,48	13,17	32555,60
51,52	126,61	2,5730	1020,10	7,65	13,59	12,48	32425,60
53,58	126,61	2,5730	1030,60	7,63	13,65	12,42	32398,80
88,88	126,61	2,5730	1038,20	8,05	13,62	12,81	32390,80
77,81	136,17	3,0272	1057,10	10,49	13,70	14,56	32575,80
64,67	136,17	3,0272	1054,00	9,79	13,66	13,92	32627,20
62,94	136,17	3,0272	1052,20	9,34	13,70	13,87	32603,40
63,67	136,17	3,0272	1052,30	9,00	13,73	13,46	32524,30
67,18	136,17	3,0272	1051,70	9,26	13,84	13,26	32467,90
77,10	136,17	3,0272	1046,40	10,30	13,90	14,12	32466,50

76,64	136,17	3,0272	1041,10	10,50	13,84	14,63	32325,80
65,64	136,17	3,0272	1039,10	10,04	13,80	14,37	32353,10
56,85	136,17	3,0272	1040,20	9,27	13,60	13,59	32497,30
73,42	136,17	3,0272	1043,80	8,55	13,62	13,17	32437,40
73,44	122,87	3,4813	1049,10	11,99	13,38	15,41	32627,70
62,01	122,87	3,4813	1039,40	11,73	13,31	15,32	32495,00
51,85	122,87	3,4813	1031,80	10,65	13,24	14,52	32545,20
45,37	122,87	3,4813	1030,00	10,23	13,24	14,03	32683,30
47,66	122,87	3,4813	1026,40	10,04	13,33	14,08	32601,70
45,80	122,87	3,4813	1026,40	9,54	13,33	13,80	32641,30
48,51	122,87	3,4813	1026,30	9,98	13,36	13,80	32753,80
60,91	122,87	3,4813	1023,10	10,88	13,44	14,66	32612,80
64,42	122,87	3,4813	1018,10	11,68	13,38	15,17	32609,50
59,17	122,87	3,4813	1012,60	12,24	13,35	15,58	32560,60
50,58	122,87	3,4813	1005,90	12,69	13,29	15,78	32627,60
45,36	122,87	3,4813	999,50	13,05	13,14	15,95	32668,10
52,42	122,87	3,4813	992,20	12,97	13,10	16,04	32689,30
89,09	122,87	3,4813	987,70	12,41	12,95	15,62	32772,00
73,56	115,82	3,935	1043,80	8,41	13,13	13,47	32802,50
66,33	115,82	3,935	1049,90	8,47	13,16	12,97	32720,50
75,44	115,82	3,935	1052,40	9,05	13,17	13,45	32743,00
84,63	115,82	3,935	1048,90	10,20	13,14	14,05	32560,30
79,62	115,82	3,935	1045,00	10,67	13,10	14,88	32652,90
59,25	115,82	3,935	1042,10	10,08	13,02	14,45	32658,50
77,13	115,82	3,935	1043,80	9,41	12,90	13,72	32898,00
85,22	115,82	3,935	1042,90	9,27	12,91	13,59	32717,60
50,20	115,82	3,935	1044,60	8,81	13,02	13,70	32779,80
52,14	115,82	3,935	1047,00	8,22	13,05	12,98	32704,80
54,86	115,82	3,935	1055,50	7,77	13,14	12,90	32649,70
60,20	115,82	3,935	1060,90	8,10	13,20	12,80	32701,20
83,52	115,82	3,935	1059,80	8,97	13,24	13,29	32730,20
89,71	113,93	4,3894	1049,40	10,25	13,38	14,60	32420,00
74,03	113,93	4,3894	1044,70	10,04	13,33	14,25	32573,10
71,76	113,93	4,3894	1042,20	10,10	13,32	14,37	32512,30
63,69	113,93	4,3894	1043,30	9,23	13,30	13,93	32604,50
64,34	113,93	4,3894	1042,50	9,15	13,36	13,32	32616,20
77,58	113,93	4,3894	1046,90	8,47	13,37	13,71	32525,30
71,93	113,93	4,3894	1053,10	7,84	13,39	12,62	32567,70
78,59	113,93	4,3894	1060,10	7,88	13,49	12,86	32615,90
95,92	113,93	4,3894	1062,80	8,31	13,52	13,09	32489,30
112,03	113,93	4,3894	1059,00	9,67	13,52	13,70	32352,60
112,85	113,93	4,3894	1052,50	10,59	13,56	14,95	32259,10
87,46	113,93	4,3894	1051,80	9,60	13,47	14,61	32454,10
76,33	113,93	4,3894	1052,70	8,45	13,39	13,28	32366,40
116,40	123,11	4,8435	1072,90	10,80	13,38	14,70	32504,10
101,69	123,11	4,8435	1064,70	10,70	13,30	14,87	32586,30
81,37	123,11	4,8435	1058,80	10,06	13,26	14,54	32622,70
65,93	123,11	4,8435	1054,60	9,66	13,20	13,47	32530,90
74,16	123,11	4,8435	1051,30	9,87	13,28	14,27	32664,10
74,29	123,11	4,8435	1045,80	9,67	13,31	14,03	32441,50
71,42	123,11	4,8435	1043,10	9,55	13,28	13,73	32525,10
71,18	123,11	4,8435	1040,20	9,72	13,31	13,91	32481,40
69,03	123,11	4,8435	1040,10	9,59	13,28	14,00	32516,10
72,47	123,11	4,8435	1038,30	9,30	13,34	14,12	32568,60
81,55	123,11	4,8435	1039,00	9,00	13,42	13,62	32492,60

Stadio 3, prova con vapore 100:

NOx (mg/m3)	NOxIN (mg/m3)	NH3 (kg/h)	Temp,PC (°C)	O2 PC (°C)	H2O (% v/v)	O2 (%)	Portata (m3/h)
144,64	159,50	0,7568	1043,20	8,55	14,16	13,15	31998,70
153,18	159,50	0,7568	1042,70	8,42	14,16	13,57	32016,00
142,06	159,50	0,7568	1043,90	8,20	14,16	13,11	31958,50
111,66	159,50	0,7568	1045,90	8,12	14,18	13,16	31986,50
85,13	159,50	0,7568	1046,20	7,99	14,14	12,98	31943,90
91,64	159,50	0,7568	1045,80	8,91	14,12	13,08	32138,00
118,73	159,50	0,7568	1045,40	8,64	14,16	14,20	32084,20
120,02	159,50	0,7568	1046,80	8,39	14,04	13,07	32231,20
127,97	159,50	0,7568	1051,50	7,69	14,03	13,10	32169,80
126,45	159,50	0,7568	1055,10	7,46	14,09	12,52	31921,20
129,10	159,50	0,7568	1060,80	7,34	14,04	12,57	32189,70
130,10	159,50	0,7568	1061,10	8,01	14,14	12,94	32123,10
125,40	159,50	0,7568	1060,30	8,24	14,26	13,45	31982,50
123,27	159,50	0,7568	1059,50	8,55	14,16	13,32	31888,70
126,53	159,50	0,7568	1057,10	8,90	14,20	13,71	32144,40
117,69	159,50	0,7568	1054,20	9,21	14,09	13,62	32113,70
118,60	159,50	0,7568	1051,40	9,81	14,09	14,14	32154,70
116,56	159,50	0,7568	1047,70	9,42	14,14	14,21	32054,10
103,32	159,50	0,7568	1049,80	8,68	14,00	13,55	32187,50
100,84	159,50	0,7568	1050,40	8,24	14,05	13,01	32130,60
105,95	159,50	0,7568	1053,30	8,16	14,07	13,27	32093,80
90,44	120,89	1,2110	1046,90	9,09	13,93	13,72	32136,60
81,20	120,89	1,2110	1047,80	8,51	13,85	13,30	32232,30
83,76	120,89	1,2110	1048,50	8,55	13,89	13,46	32202,80
83,80	120,89	1,2110	1051,30	8,02	13,81	13,35	32176,90
82,12	120,89	1,2110	1053,80	7,92	13,82	12,62	32185,00
95,25	120,89	1,2110	1053,70	8,71	14,01	13,23	32152,10
97,41	120,89	1,2110	1050,60	9,42	13,90	14,12	32248,00
99,51	120,89	1,2110	1046,80	9,36	13,82	14,37	32234,60
89,15	120,89	1,2110	1045,00	8,66	13,91	13,72	32201,40
85,44	120,89	1,2110	1044,40	8,32	13,78	13,04	32145,50
93,30	120,89	1,2110	1043,10	9,19	13,81	13,58	32158,30
108,09	120,89	1,2110	1040,80	9,36	13,93	14,59	32131,40
99,44	120,89	1,2110	1041,00	8,56	13,87	13,86	31954,00
92,35	120,89	1,2110	1045,10	8,22	13,84	12,95	32053,90
99,91	120,89	1,2110	1043,30	8,63	13,86	13,56	32210,90
119,76	152,53	1,6650	1090,80	6,94	14,29	12,06	32010,50
125,51	152,53	1,6650	1091,50	7,93	14,34	12,50	31976,80
138,78	152,53	1,6650	1088,50	8,99	14,29	13,60	31971,70
131,58	152,53	1,6650	1080,50	9,83	14,29	14,00	31986,80
126,39	152,53	1,6650	1073,40	9,73	14,24	14,33	32129,30
105,22	152,53	1,6650	1064,50	9,55	14,14	13,79	32115,10
96,94	152,53	1,6650	1060,10	9,36	14,15	13,92	32041,30
93,07	152,53	1,6650	1057,20	8,80	14,19	13,68	32274,40
83,92	152,53	1,6650	1059,00	7,89	14,16	12,83	32109,10
89,97	152,53	1,6650	1061,90	8,15	14,21	12,77	32036,50
92,44	134,23	2,119	1043,60	8,15	14,08	13,28	32215,70
86,50	134,23	2,119	1050,40	7,82	14,15	12,51	32141,20
96,74	134,23	2,119	1058,10	8,17	14,34	12,96	32078,10
106,51	134,23	2,119	1060,30	8,60	14,33	13,28	31871,70
101,46	134,23	2,119	1060,50	9,35	14,24	13,60	32118,20

87,13	134,23	2,119	1063,40	8,85	14,08	13,85	32235,50
78,04	134,23	2,119	1065,70	8,88	13,95	13,12	32056,40
90,88	134,23	2,119	1065,00	9,33	14,00	13,57	31993,40
99,91	134,23	2,119	1065,30	9,68	14,05	14,11	32128,30
90,13	134,23	2,119	1063,60	9,54	13,94	13,65	32225,40
81,78	134,23	2,119	1064,40	9,44	13,94	13,59	32328,70
84,24	134,23	2,119	1064,20	9,48	13,91	13,84	32236,70
82,33	134,23	2,119	1061,00	9,87	13,76	13,53	32425,70
82,40	134,23	2,119	1058,80	9,83	13,82	14,03	32338,50
77,51	134,23	2,119	1053,80	9,90	13,71	13,85	32553,00
77,68	134,23	2,119	1049,30	10,00	13,74	14,02	32422,90
84,70	134,23	2,119	1044,40	9,90	13,85	14,14	32138,30
80,87	134,23	2,119	1041,00	9,67	13,71	13,87	32174,30
80,81	134,23	2,119	1039,90	9,60	13,82	13,73	32412,30
84,28	147,07	2,5730	1061,50	8,24	13,76	13,10	32313,30
82,00	147,07	2,5730	1065,00	8,82	13,71	13,04	32367,60
93,81	147,07	2,5730	1064,10	9,39	13,76	13,92	32318,50
94,35	147,07	2,5730	1064,90	9,06	13,79	13,72	32390,90
82,51	147,07	2,5730	1064,20	9,39	13,72	13,55	32300,20
87,64	147,07	2,5730	1065,30	9,38	13,78	14,00	32394,10
90,52	147,07	2,5730	1065,90	9,07	13,84	13,48	32292,20
87,55	147,07	2,5730	1067,00	9,02	13,81	13,28	32294,20
98,40	147,07	2,5730	1066,10	9,22	13,93	13,76	32264,20
95,96	147,07	2,5730	1066,30	9,02	13,85	13,51	32223,30
93,38	147,07	2,5730	1065,90	9,05	13,98	13,34	32254,90
97,63	147,07	2,5730	1067,00	8,41	14,03	13,37	32211,30
89,89	150,88	3,0272	1056,50	9,28	13,96	13,49	32336,00
94,88	150,88	3,0272	1056,00	8,98	14,06	13,94	32042,30
81,21	150,88	3,0272	1058,50	8,79	13,86	13,03	32446,70
86,02	150,88	3,0272	1058,70	9,02	13,82	13,56	32535,70
88,98	150,88	3,0272	1057,90	9,13	13,93	13,52	32459,20
86,13	150,88	3,0272	1057,10	9,55	13,85	13,90	32270,60
90,70	150,88	3,0272	1058,50	8,92	13,93	13,72	32355,70
82,42	150,88	3,0272	1060,50	8,51	13,85	13,05	32375,10
85,78	150,88	3,0272	1066,10	8,08	13,83	12,92	32379,40
90,96	150,88	3,0272	1070,20	8,42	13,98	12,92	32336,90
92,32	150,88	3,0272	1070,70	8,78	13,98	13,30	32460,00
90,75	150,88	3,0272	1070,80	9,02	13,97	13,40	32180,50
92,99	150,88	3,0272	1072,50	9,04	14,00	13,64	32120,70
99,85	155,10	3,4813	1042,30	9,54	13,73	13,82	32330,60
87,14	155,10	3,4813	1042,10	9,45	13,77	13,64	32305,90
86,81	155,10	3,4813	1040,90	9,59	13,88	13,87	32267,20
82,45	155,10	3,4813	1042,20	9,06	13,82	13,65	32293,80
76,61	155,10	3,4813	1044,90	8,90	13,84	13,11	32234,20
78,22	155,10	3,4813	1049,40	8,68	13,80	13,35	32351,80
73,29	155,10	3,4813	1052,20	8,31	13,76	12,93	32282,30
78,61	155,10	3,4813	1055,40	8,80	13,81	13,08	32315,70
80,58	155,10	3,4813	1057,60	8,78	13,79	13,45	32318,40
75,64	155,10	3,4813	1060,10	9,04	13,76	13,27	32315,60
78,66	155,10	3,4813	1062,40	9,15	13,75	13,63	32325,60
76,06	155,10	3,4813	1064,10	9,31	13,66	13,49	32383,50
78,10	155,10	3,4813	1067,70	8,95	13,72	13,52	32341,10
78,32	155,10	3,4813	1070,20	9,18	13,82	13,27	32326,00
92,80	155,10	3,4813	1070,80	9,47	13,74	13,54	32372,40
87,18	145,64	3,935	1078,60	9,25	13,68	13,23	32243,30
86,98	145,64	3,935	1077,50	9,35	13,69	13,48	32380,90

86,16	145,64	3,935	1076,90	9,28	13,64	13,59	32435,20
77,34	145,64	3,935	1076,20	9,26	13,64	13,46	32347,50
75,48	145,64	3,935	1074,30	9,33	13,70	13,40	32414,50
74,11	145,64	3,935	1073,30	9,45	13,69	13,41	32367,60
73,51	145,64	3,935	1072,50	9,61	13,71	13,95	32346,90
70,99	145,64	3,935	1071,10	9,27	13,68	13,56	32598,40
70,18	145,64	3,935	1069,40	9,45	13,54	13,31	32405,90
72,74	145,64	3,935	1067,30	9,84	13,63	14,06	32418,80
74,18	145,64	3,935	1065,40	9,57	13,59	13,74	32428,90
65,67	145,64	3,935	1066,30	9,61	13,57	13,58	32343,20
76,49	145,64	3,935	1066,50	9,43	13,63	13,85	32378,40
73,63	145,64	3,935	1066,60	9,47	13,55	13,43	32486,70
96,80	130,76	4,3894	1085,20	9,82	13,48	13,58	32516,60
98,55	130,76	4,3894	1082,80	9,72	13,60	14,21	32313,40
84,51	130,76	4,3894	1080,30	9,28	13,47	13,58	32720,50
83,71	130,76	4,3894	1076,40	9,81	13,53	13,53	32489,90
88,70	130,76	4,3894	1070,20	9,73	13,60	14,44	32305,40
70,06	130,76	4,3894	1067,40	9,87	13,45	13,82	32294,10
82,14	130,76	4,3894	1060,70	10,32	13,58	14,39	32376,50
81,39	130,76	4,3894	1054,90	10,25	13,60	14,66	32101,30
66,32	130,76	4,3894	1051,50	10,46	13,48	14,28	32486,30
73,96	130,76	4,3894	1048,30	10,49	13,53	14,50	32669,80
74,41	130,76	4,3894	1048,50	9,91	13,50	14,45	32570,10
68,06	130,76	4,3894	1049,70	9,80	13,45	13,67	32478,10
77,34	130,76	4,3894	1050,10	10,18	13,46	14,37	32172,00
89,17	130,76	4,3894	1053,10	9,81	13,43	14,43	32539,90
109,89	152,94	4,8435	1065,60	8,40	13,50	13,14	32376,30
105,97	152,94	4,8435	1072,80	7,68	13,66	12,54	32339,10
106,82	152,94	4,8435	1082,30	7,43	13,69	12,27	32227,60
113,37	152,94	4,8435	1088,10	7,52	13,78	12,35	32269,50
123,46	152,94	4,8435	1094,50	7,84	13,90	12,81	32020,30
128,87	152,94	4,8435	1098,70	8,04	13,82	12,92	32428,60
127,72	152,94	4,8435	1101,50	8,23	13,86	12,84	32391,90
130,26	152,94	4,8435	1103,00	8,27	13,85	13,06	32296,00
118,21	152,94	4,8435	1107,30	7,87	13,70	12,74	32270,10

Stadio 3, prova con vapore 300:

NOx (mg/m3)	NOxIN (mg/m3)	NH3 (kg/h)	Temp,PC (°C)	O2 PC (°C)	H2O (% v/v)	O2 (%)	Portata (m3/h)
78,21	91,61	0,7568	983,10	9,54	13,11	13,18	32482,20
75,14	91,61	0,7568	988,70	9,08	13,18	13,40	32423,60
73,09	91,61	0,7568	993,90	8,83	13,13	12,81	32502,90
69,11	91,61	0,7568	998,50	8,63	13,04	12,95	32554,90
66,79	91,61	0,7568	1003,90	8,36	13,13	12,55	32433,90
70,75	91,61	0,7568	1009,30	8,90	13,03	12,87	32622,90
71,35	91,61	0,7568	1011,20	9,18	13,09	13,22	32469,70
64,20	91,61	0,7568	1013,90	8,81	13,02	13,28	32581,20
64,31	91,61	0,7568	1010,40	9,67	13,05	13,17	32512,30
71,31	91,61	0,7568	1002,20	10,42	13,13	14,37	32413,10
67,61	91,61	0,7568	1000,80	9,53	13,12	14,45	32577,20
47,02	91,61	0,7568	1006,30	8,02	13,12	12,75	32455,60
52,49	91,61	0,7568	1020,10	6,97	13,06	11,89	32605,70

69,19	91,61	0,7568	1029,40	7,60	13,17	11,75	32496,30
82,36	111,18	1,2110	1023,00	8,66	13,75	13,68	32317,30
83,47	111,18	1,2110	1020,70	9,01	13,76	13,45	32330,30
88,82	111,18	1,2110	1017,80	9,49	13,74	14,03	32163,10
92,82	111,18	1,2110	1015,40	9,78	13,79	14,37	32175,40
95,49	111,18	1,2110	1011,40	9,79	13,80	14,34	32179,80
88,69	111,18	1,2110	1009,90	9,98	13,75	14,26	32207,80
92,98	111,18	1,2110	1006,50	10,56	13,78	14,60	32235,80
96,74	111,18	1,2110	1001,60	11,33	13,77	15,05	32236,90
92,05	111,18	1,2110	996,90	11,68	13,70	15,37	32196,20
85,56	111,18	1,2110	992,60	11,71	13,68	15,52	32315,80
82,12	111,18	1,2110	988,20	11,28	13,65	15,18	32435,20
78,66	111,18	1,2110	984,80	10,87	13,61	14,60	32248,60
79,51	111,18	1,2110	983,70	10,37	13,66	14,64	32295,70
74,36	111,18	1,2110	986,00	9,69	13,69	13,93	32332,50
80,94	111,18	1,2110	991,40	8,98	13,68	13,63	32434,70
88,22	108,90	1,6650	1034,00	8,55	13,71	13,15	32282,50
81,15	108,90	1,6650	1034,30	8,87	13,72	13,55	32286,50
77,49	108,90	1,6650	1033,20	8,88	13,70	13,43	32231,00
80,77	108,90	1,6650	1035,00	8,56	13,75	13,43	32121,30
67,49	108,90	1,6650	1034,30	8,64	13,66	13,03	32105,20
67,10	108,90	1,6650	1032,90	9,18	13,69	13,70	32156,90
69,69	108,90	1,6650	1032,10	8,90	13,74	13,80	32166,00
60,76	108,90	1,6650	1034,20	8,44	13,60	13,38	32338,40
67,02	108,90	1,6650	1035,00	8,34	13,81	13,06	32318,90
75,68	108,90	1,6650	1036,40	8,17	13,78	13,16	32116,90
79,55	108,90	1,6650	1036,20	8,69	13,79	13,05	32234,30
85,57	108,90	1,6650	1034,10	9,07	13,88	13,92	32151,30
72,44	108,90	1,6650	1034,90	8,67	13,84	13,33	32196,30
93,30	108,90	1,6650	1039,40	8,12	13,87	13,28	32142,40
90,27	120,20	2,119	1056,40	8,71	14,03	13,62	32014,60
91,32	120,20	2,119	1054,20	8,82	14,03	13,55	32059,10
87,41	120,20	2,119	1052,10	8,86	13,97	13,47	32115,10
85,94	120,20	2,119	1047,10	9,59	14,05	13,83	32013,20
88,76	120,20	2,119	1046,90	9,33	14,07	14,32	32045,20
80,07	120,20	2,119	1044,30	8,90	14,05	13,48	32084,70
82,95	120,20	2,119	1042,40	8,67	14,10	13,59	32039,00
80,24	120,20	2,119	1041,80	8,57	14,12	13,24	31988,90
86,17	120,20	2,119	1040,30	8,72	14,23	13,70	31990,00
86,89	120,20	2,119	1040,10	8,51	14,25	13,49	31988,00
88,12	120,20	2,119	1036,80	8,79	14,25	13,39	31997,70
48,37	84,53	2,5730	1039,40	8,94	15,04	13,28	31529,10
39,14	84,53	2,5730	1036,40	9,50	15,12	14,46	31554,00
92,63	84,53	2,5730	1036,10	8,67	14,73	13,95	31932,70
52,48	84,53	2,5730	1036,40	8,29	14,86	13,25	31853,60
32,98	84,53	2,5730	1037,20	7,92	15,03	13,06	31669,20
33,63	84,53	2,5730	1037,90	8,13	15,02	12,91	31509,30
36,69	84,53	2,5730	1037,70	8,92	15,13	13,59	31567,80
39,35	84,53	2,5730	1035,00	9,08	15,19	14,07	31527,50
35,09	84,53	2,5730	1033,20	9,22	15,13	13,68	31567,30
34,86	84,53	2,5730	1034,70	8,70	15,12	13,84	31674,90
64,27	84,53	2,5730	1038,90	7,84	14,90	12,89	31662,90
75,23	84,53	2,5730	1043,80	7,84	14,92	12,65	31725,70
38,69	84,53	2,5730	1044,30	8,41	15,23	13,19	31566,50
37,30	84,53	2,5730	1041,50	8,96	15,26	13,57	31628,10
42,88	84,53	2,5730	1040,00	8,79	15,24	13,84	31573,60

56,30	84,53	2,5730	1042,30	8,34	15,18	13,25	31490,60
61,16	128,48	3,0272	1024,60	9,13	14,90	13,71	31693,20
36,78	128,48	3,0272	1023,20	9,16	15,01	13,67	31716,10
77,82	128,48	3,0272	1021,70	9,24	14,74	13,71	31810,90
54,02	128,48	3,0272	1018,80	9,54	14,88	14,02	31682,10
28,56	128,48	3,0272	1017,00	9,32	14,99	14,13	31740,50
59,23	128,48	3,0272	1017,00	9,09	14,77	13,66	31804,10
96,82	128,48	3,0272	1017,00	8,95	14,59	13,76	31870,50
93,17	128,48	3,0272	1017,70	9,07	14,53	13,41	31853,70
97,12	128,48	3,0272	1018,70	8,98	14,53	13,79	31974,90
94,45	128,48	3,0272	1018,80	8,78	14,57	13,52	31944,90
88,87	128,48	3,0272	1018,40	8,81	14,45	13,28	31784,50
91,08	128,48	3,0272	1018,60	9,03	14,43	13,61	31907,70
91,07	128,48	3,0272	1018,80	8,79	14,48	13,76	31905,00
81,85	128,48	3,0272	1019,50	8,57	14,61	13,27	31880,50
38,00	128,48	3,0272	1019,50	8,95	14,91	13,57	31717,40
91,31	128,48	3,0272	1018,90	8,82	14,53	13,79	31803,40
92,07	128,48	3,0272	1020,70	8,49	14,43	13,38	31845,30
88,67	128,48	3,0272	1021,70	8,98	14,46	13,49	31879,50
89,57	128,48	3,0272	1020,70	8,83	14,43	13,85	31894,60
93,74	157,06	3,4813	1054,40	9,17	14,94	13,89	31804,00
123,87	157,06	3,4813	1051,80	9,43	14,60	13,85	31935,60
105,70	157,06	3,4813	1052,30	8,89	14,56	13,74	31734,80
89,04	157,06	3,4813	1056,20	7,94	14,52	13,08	31838,00
87,78	157,06	3,4813	1057,70	8,33	14,49	12,51	31851,30
43,98	157,06	3,4813	1056,50	8,77	14,88	13,67	31727,20
80,49	157,06	3,4813	1052,80	8,90	14,63	13,38	31785,40
94,96	157,06	3,4813	1051,50	9,42	14,50	13,72	31821,20
95,26	157,06	3,4813	1048,90	9,15	14,50	13,89	31919,00
87,06	157,06	3,4813	1050,90	8,64	14,42	13,16	31890,10
94,24	157,06	3,4813	1048,10	9,03	14,45	13,51	31847,80
78,50	137,62	3,935	1021,80	9,84	14,07	13,90	32047,50
83,92	137,62	3,935	1019,50	10,38	14,13	14,49	32208,10
82,40	137,62	3,935	1017,30	10,81	14,06	14,73	32204,40
75,13	137,62	3,935	1015,90	10,51	13,89	14,82	32287,60
71,87	137,62	3,935	1014,60	10,13	13,96	14,22	32208,50
61,54	137,62	3,935	1014,80	9,47	13,87	13,78	32241,30
67,35	137,62	3,935	1017,70	9,56	13,95	13,55	32170,80
74,73	137,62	3,935	1017,90	9,19	13,99	13,83	32068,40
65,76	137,62	3,935	1018,50	9,25	13,94	13,41	32117,20
76,81	137,62	3,935	1019,00	9,54	14,07	13,91	32285,60
77,03	137,62	3,935	1018,10	9,17	14,03	13,92	32137,70
68,01	137,62	3,935	1018,70	8,92	13,97	13,29	32062,00
68,03	137,62	3,935	1020,70	9,16	13,99	13,60	32227,20
64,44	137,62	3,935	1019,40	8,95	13,95	13,63	32226,00
73,10	137,62	3,935	1020,80	8,87	13,95	13,48	32069,40
99,40	137,62	3,935	1021,00	8,83	13,97	13,60	32173,70
86,59	128,37	4,3894	1037,10	7,67	13,96	12,52	32037,10
88,03	128,37	4,3894	1039,20	8,91	14,12	13,20	32050,10
84,62	128,37	4,3894	1037,90	8,78	14,09	14,10	32095,80
73,60	128,37	4,3894	1041,90	8,34	14,05	13,03	31994,90
78,85	128,37	4,3894	1043,50	8,39	14,11	13,19	31916,00
83,39	128,37	4,3894	1044,90	8,60	14,07	13,35	32175,60
84,53	128,37	4,3894	1044,30	8,84	14,10	13,46	32159,70
79,79	128,37	4,3894	1042,20	9,07	14,14	13,51	32200,60
74,84	128,37	4,3894	1044,40	8,49	14,07	13,46	32074,40

76,46	128,37	4,3894	1048,10	8,25	14,07	13,08	32248,80
87,25	128,37	4,3894	1048,10	8,57	14,19	12,97	31941,80
95,54	128,37	4,3894	1048,60	8,68	14,35	13,49	31802,60
92,97	128,37	4,3894	1048,70	8,60	14,36	13,40	31800,70
87,46	128,37	4,3894	1046,10	8,93	14,17	13,43	32059,20
96,23	128,37	4,3894	1042,50	9,01	14,10	13,63	32102,80
99,77	137,82	4,8435	1036,70	8,24	14,12	12,82	32016,70
105,31	137,82	4,8435	1037,10	8,80	14,19	13,64	32067,60
98,65	137,82	4,8435	1039,80	8,21	14,15	13,54	32095,40
90,05	137,82	4,8435	1044,30	7,68	14,09	12,73	32063,20
96,80	137,82	4,8435	1047,40	7,69	14,13	12,84	32154,00
103,08	137,82	4,8435	1048,70	8,61	14,11	13,14	32159,50
106,94	137,82	4,8435	1046,70	8,83	14,14	13,90	32110,10
96,88	137,82	4,8435	1047,30	8,40	14,11	13,38	32040,50
92,37	137,82	4,8435	1051,90	8,03	13,96	12,88	32090,60

Stadio 3, prova con aria compressa e vapore 100:

NOx (mg/m3)	NOxIN (mg/m3)	NH3 (kg/h)	Temp,PC (°C)	O2 PC (°C)	H2O (% v/v)	O2 (%)	Portata (m3/h)
115,21	151,30	0,7568	1051,20	8,97	13,47	13,18	32379,50
118,59	151,30	0,7568	1052,80	8,82	13,48	13,38	32362,10
121,26	151,30	0,7568	1051,70	9,30	13,49	13,38	32387,70
119,17	151,30	0,7568	1050,00	9,48	13,46	13,67	32439,60
115,76	151,30	0,7568	1050,90	9,73	13,47	14,00	32440,90
113,50	151,30	0,7568	1053,40	9,07	13,39	13,62	32659,60
118,22	151,30	0,7568	1054,10	9,36	13,45	13,40	32554,60
114,66	151,30	0,7568	1054,10	9,08	13,37	13,65	32623,10
110,98	151,30	0,7568	1051,60	9,53	13,45	13,59	32530,70
113,66	151,30	0,7568	1048,80	9,70	13,45	13,85	32649,70
111,71	151,30	0,7568	1048,80	9,40	13,39	13,85	32576,80
117,20	151,30	0,7568	1048,90	9,07	13,46	13,61	32479,60
120,55	151,30	0,7568	1049,00	9,23	13,47	13,28	32495,70
135,91	150,94	1,2110	1040,30	9,23	13,55	13,55	32460,40
133,10	150,94	1,2110	1040,70	8,97	13,54	13,42	32423,10
130,96	150,94	1,2110	1040,80	9,11	13,60	13,48	32349,60
128,47	150,94	1,2110	1042,00	9,14	13,68	13,55	32370,90
140,17	150,94	1,2110	1040,10	9,40	13,68	13,67	32314,80
139,87	150,62	1,6650	1051,00	8,28	13,94	12,70	32175,30
142,87	150,62	1,6650	1052,80	8,49	13,96	13,15	32126,40
137,75	150,62	1,6650	1053,30	8,81	13,95	13,20	32105,00
144,36	150,62	1,6650	1053,90	9,46	13,96	13,72	32205,10
153,47	150,62	1,6650	1052,90	9,50	14,06	13,99	32361,40
128,34	150,62	1,6650	1055,30	8,88	13,91	13,43	32352,10
131,12	150,62	1,6650	1055,50	9,32	13,93	13,33	32187,70
136,15	150,62	1,6650	1053,60	9,39	13,88	13,94	32273,30
117,44	150,62	1,6650	1051,60	9,40	13,96	13,62	32225,20
121,58	150,62	1,6650	1049,30	9,33	14,00	13,79	32209,50
107,39	150,62	1,6650	1050,50	9,29	13,97	13,41	32113,10
123,58	150,62	1,6650	1049,30	9,56	13,95	13,90	32239,10
104,99	150,62	1,6650	1048,80	9,17	13,89	13,46	32280,40
105,12	150,62	1,6650	1051,40	8,90	13,91	13,27	32323,50
106,02	150,62	1,6650	1056,90	8,27	13,90	13,16	32364,30

105,79	150,62	1,6650	1059,70	8,31	13,91	12,52	32141,50
117,86	130,84	2,119	1041,30	8,98	13,66	13,47	32362,40
120,37	130,84	2,119	1041,10	9,08	13,79	13,62	32292,10
111,28	130,84	2,119	1041,10	9,07	13,76	13,82	32299,10
98,67	130,84	2,119	1039,40	9,39	13,76	13,84	32283,10
101,30	130,84	2,119	1039,40	9,02	13,78	14,01	32324,40
94,20	130,84	2,119	1040,00	8,61	13,74	13,41	32283,10
98,59	130,84	2,119	1040,70	8,78	13,75	13,66	32308,30
95,68	130,84	2,119	1040,70	8,77	13,74	13,85	32308,40
96,47	130,84	2,119	1039,50	9,12	13,91	13,75	32259,70
99,63	130,84	2,119	1037,40	9,11	13,88	14,21	32271,20
94,59	130,84	2,119	1036,20	8,97	13,83	13,72	32286,20
96,26	130,84	2,119	1038,10	8,33	13,82	13,80	32321,00
99,94	130,84	2,119	1042,20	7,59	13,83	12,77	32271,70
114,78	166,82	2,5730	1046,60	9,42	14,35	13,69	32021,40
111,32	166,82	2,5730	1048,00	8,74	14,30	13,60	32121,00
98,35	166,82	2,5730	1048,00	8,71	14,23	13,03	32126,10
97,24	166,82	2,5730	1048,40	8,40	14,29	13,28	32061,10
96,59	166,82	2,5730	1050,60	8,45	14,29	12,85	32059,40
104,83	166,82	2,5730	1049,70	9,12	14,28	13,49	32177,30
105,76	166,82	2,5730	1048,60	9,16	14,29	13,73	32093,50
96,17	166,82	2,5730	1045,90	9,59	14,23	13,53	32008,90
102,69	166,82	2,5730	1042,80	9,79	14,23	13,96	32065,20
91,34	166,82	2,5730	1040,90	9,48	14,20	13,75	31999,60
92,09	166,82	2,5730	1042,90	9,18	14,11	13,58	32019,00
103,94	166,82	2,5730	1045,30	8,68	14,14	13,16	32124,10
114,92	166,99	3,0272	1054,10	9,11	14,09	13,82	32249,20
103,54	166,99	3,0272	1051,20	9,63	14,00	13,88	32185,60
96,24	166,99	3,0272	1049,20	9,33	14,02	14,04	32248,90
83,73	166,99	3,0272	1050,30	8,91	13,98	13,23	32241,70
87,11	166,99	3,0272	1050,90	8,97	13,96	13,43	32192,50
93,60	166,99	3,0272	1052,60	8,94	13,99	13,31	32211,60
94,95	166,99	3,0272	1053,70	8,89	14,02	13,39	32185,00
106,85	166,99	3,0272	1052,40	8,90	14,10	13,71	32149,40
99,70	166,99	3,0272	1050,80	9,04	14,10	13,19	32142,80
98,04	166,99	3,0272	1049,10	9,37	14,13	13,72	32132,30
102,09	166,99	3,0272	1049,10	9,04	14,17	13,76	32158,10
87,53	166,99	3,0272	1050,00	9,08	14,10	13,37	32188,80
124,91	186,93	3,4813	1055,10	8,41	14,19	12,66	32187,80
120,70	186,93	3,4813	1055,90	8,76	14,24	13,50	32225,70
103,65	186,93	3,4813	1056,50	8,71	14,22	13,21	32062,80
101,89	186,93	3,4813	1056,60	8,84	14,24	13,35	32128,50
101,95	186,93	3,4813	1061,40	8,54	14,20	12,99	32283,30
113,14	186,93	3,4813	1065,10	8,92	14,19	13,22	32236,20
117,94	186,93	3,4813	1065,90	8,95	14,20	13,30	32142,00
109,15	186,93	3,4813	1064,90	9,68	14,13	13,69	32213,70
110,76	186,93	3,4813	1064,50	9,62	14,13	13,74	32146,20
100,77	186,93	3,4813	1062,70	9,51	13,97	13,62	32180,60
104,07	186,93	3,4813	1060,80	9,32	14,00	13,49	32226,80
96,62	186,93	3,4813	1056,70	9,68	14,02	13,48	32176,20
99,48	186,93	3,4813	1056,20	9,31	13,93	13,69	32168,70
97,22	186,93	3,4813	1058,60	8,87	14,03	13,15	32223,30
129,51	186,93	3,4813	1058,20	9,36	14,02	13,12	32084,70
103,27	190,96	3,935	1048,30	8,75	13,80	13,10	32228,10
102,41	190,96	3,935	1049,50	9,00	13,85	13,58	32267,20
99,41	190,96	3,935	1048,80	8,80	13,85	13,62	32222,30

101,30	190,96	3,935	1048,40	9,35	13,82	13,21	32295,70
104,08	190,96	3,935	1047,60	9,14	13,87	14,30	32345,40
89,38	190,96	3,935	1052,30	8,12	13,79	12,96	32307,80
83,33	190,96	3,935	1061,50	7,36	13,75	12,48	32374,40
96,12	190,96	3,935	1067,40	7,56	13,75	12,01	32178,70
126,68	190,96	3,935	1071,30	8,42	13,84	13,08	32142,20
131,17	190,96	3,935	1066,00	9,41	13,88	13,72	32327,10
103,89	190,96	3,935	1061,60	9,38	13,74	13,81	32297,50
117,81	187,40	4,3894	1042,90	9,15	13,86	13,65	32309,80
117,55	187,40	4,3894	1041,90	9,11	13,94	13,58	32308,70
110,16	187,40	4,3894	1041,30	8,97	13,96	13,70	32336,40
102,95	187,40	4,3894	1039,90	9,12	14,04	13,43	32318,70
107,50	187,40	4,3894	1039,80	8,96	13,96	13,84	32237,90
107,29	187,40	4,3894	1040,60	8,42	14,11	13,50	32087,40
102,33	187,40	4,3894	1045,10	8,04	14,04	12,85	32143,70
108,84	187,40	4,3894	1046,50	8,51	14,20	13,28	32025,70
117,60	187,40	4,3894	1045,40	8,76	14,20	13,77	31997,90
115,60	187,40	4,3894	1043,10	9,21	14,17	13,76	32054,50
137,68	187,40	4,3894	1043,40	9,05	14,24	14,01	32168,40
130,90	185,49	4,8435	1050,90	8,51	14,52	13,04	31940,40
138,14	185,49	4,8435	1053,20	8,10	14,52	13,27	31974,50
123,80	185,49	4,8435	1056,20	8,38	14,51	12,71	31982,40
75,00	185,49	4,8435	1056,60	8,63	14,96	13,82	31792,30
131,70	185,49	4,8435	1058,40	8,43	14,58	12,99	31901,00
128,16	185,49	4,8435	1061,00	8,47	14,53	13,22	31919,70
131,36	185,49	4,8435	1065,20	8,12	14,49	13,07	31986,60
136,27	185,49	4,8435	1067,30	8,25	14,46	12,84	32002,50
140,02	185,49	4,8435	1066,30	8,82	14,49	13,19	31833,50
127,62	185,49	4,8435	1064,10	9,25	14,37	13,95	32005,80
111,18	185,49	4,8435	1061,90	9,08	14,36	13,64	31985,70
107,17	185,49	4,8435	1059,00	9,70	14,37	13,84	31902,80
108,97	185,49	4,8435	1055,60	9,78	14,48	13,94	31862,10