



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

**TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN
INGEGNERIA CHIMICA E DEI PROCESSI INDUSTRIALI**

**ASPETTI TECNICI ED AMBIENTALI CONNESSI CON
L'INSTALLAZIONE DI UN SISTEMA CATALITICO DeNO_x
SCR SULLA LINEA FUMI DI UN IMPIANTO DI
INCENERIMENTO RIFIUTI. IL CASO DEL
TERMOVALORIZZATORE DI SCHIO.**

Relatore: Prof. Antonio Mantovani

Laureanda: ELENA MARIA CAROLLO

ANNO ACCADEMICO 2011/2012

Riassunto

Il termovalorizzatore di Schio della società AVA (Alto Vicentino Ambiente) ha recentemente adottato l'innovativo sistema di abbattimento degli ossidi di azoto, introducendo il reattore catalitico SCR (*Selective Catalized Reactor*).

In questo studio è stata presa in considerazione la Linea 2 di incenerimento, la quale ha subito un importante revamping che ha comportato una sostanziale modifica, non solo dei singoli impianti, ma anche delle condizioni operative.

Il presente lavoro ha come obiettivo quello di verificare l'effettivo abbattimento degli ossidi di azoto, e nel contempo quello di individuare le eventuali possibilità di miglioramento nella gestione della linea, in particolare per quanto riguarda il sistema SCR.

Con l'inserimento di questo sistema si sono introdotti anche nuovi parametri per il controllo della gestione dell'impianto. Si sono analizzati la temperatura e la caduta di pressione attraverso il reattore, verificando un'eventuale relazione con altri parametri di interesse.

Il nodo centrale della tesi è costituito dalle prove sperimentali caratterizzate dalla variazione del set point in uscita degli ossidi di azoto. Si è scelto il valore di set point, in modo da essere il migliore compromesso tra il minor dosaggio, e una migliore efficienza di abbattimento.

Infine la Linea in questione sarà soggetta ad una futura restrizione dei limiti per quanto riguarda gli ossidi di azoto, in merito a questa restrizione vengono fatte delle considerazioni sia sullo stato attuale che sulle previsioni future di funzionamento del reattore.

Indice

Introduzione.....	1
Capitolo 1 - Quadro legislativo	3
1.1 DECRETO LEGISLATIVO 133/2005	3
1.1.1 Limiti legislativi delle emissioni in atmosfera.....	4
1.2 L’AUTORIZZAZIONE INTEGRATA AMBIENTALE E I BAT.....	7
1.2.1 Il ruolo delle BAT	8
1.3 PRESCRIZIONE DEL SISTEMA SCR	10
Capitolo 2 - Emissioni di ossidi di azoto: Aspetti generali.....	13
2.1 GLI OSSIDI DI AZOTO.....	13
2.1.1 Dinamica di formazione degli NO _x	15
2.2 TECNICHE DI ABBATTIMENTO DEGLI NO _x	18
2.2.1 Misure primarie.....	18
2.2.2 Misure secondarie	20
2.2.2.1 Riduzione selettiva non catalitica (SNCR).....	20
2.2.2.2 Riduzione catalitica selettiva (SCR).....	22
2.2.2.3 Confronto tra il sistema SCR e SNCR	27
2.3 CRITERI OPERATIVI GENERALI DEL SISTEMA SCR.....	29
2.3.1 Scelta del catalizzatore.....	29
2.3.2 Scelta della soluzione ammoniacale riducente.....	30
2.3.3 Dosaggio della soluzione ammoniacale riducente	30
2.3.4 Deattivazione del catalizzatore	32
2.3.4.1 Rigenerazione del letto catalitico	32
2.4 SITUAZIONE ITALIANA	33
Capitolo 3 - Descrizione della Linea 2 di termovalorizzazione	35
3.1 DESCRIZIONE DELLA LINEA 2 PRIMA DEL REVAMPING	36
3.1.1 Ricevimento e stoccaggio	36
3.1.2 Incenerimento e recupero termico.....	36
3.1.2.1 Forno	38
3.1.2.3 Griglia.....	38
3.1.2.3 Camera di combustione	39
3.1.2.4 Camera di post-combustione	39
3.1.2.5 Sistema di controllo.....	40
3.1.2.6 Sistema di aria comburente	40
3.1.2.7 Controllo della combustione	41
3.1.2.8 Sistema di estrazione scorie	42
3.1.3 Ciclo termico e produzione di energia elettrica	42
3.1.3.1 Generatore di vapore	43
3.1.3.2 Produzione di energia.....	44
3.1.4 Sezione depurazione fumi	46
3.1.4.1 Sistema SNCR per l’abbattimento NO _x	46
3.1.4.2 Elettrofiltro	47
3.1.4.3 Reattore a secco.....	48
3.1.4.4 Scambiatore riscaldamento fumi	49
3.1.4.5 Filtro a maniche a celle escludibili.....	49
3.1.4.6 Torre di assorbimento acido ad umido	50
3.1.4.7 Ventilatore fumi	51

3.1.4.8 Ciminiera.....	51
3.2 REVAMPING DELLA LINEA 2	53
3.2.1 Motivazione della nuova soluzione impiantistica.....	54
3.2.1.1 Bicarbonato di sodio.....	54
3.2.1.2 Installazione del secondo economizzatore	55
3.2.1.3 Filtro a maniche.....	55
3.2.1.4 Disposizione “tail end” del reattore catalitico	55
3.2.2 Strumentazione di analisi	56
3.2.2.1 Analisi a monte del trattamento fumi	57
3.2.2.2 Modifiche al sistema di analisi fumi al camino.....	59
3.2.3 Cambiamento delle condizioni operative.....	59
Capitolo 4 - Sistema di abbattimento NO_x.....	63
4.1 SISTEMA DI STOCCAGGIO E DOSAGGIO DELLA SOLUZIONE AMMONIACALE.....	63
4.1.1. Scarico autocisterna e stoccaggio soluzione ammoniacale.....	64
4.1.1.1 Pompa di riempimento:	64
4.1.1.2 Serbatoio di stoccaggio della soluzione ammoniacale:	65
4.1.1.3 Serbatoio di guardia idraulica.....	65
4.1.1.4 Sistema antincendio.....	66
4.1.2. Dosaggio soluzione ammoniacale.....	67
4.1.2.1 Sistema filtrazione.....	67
4.1.2.2 Pompe dosaggio ammoniaca	68
4.1.3 Sistema di controllo della soluzione ammoniacale	68
4.1.4 Legge di controllo per il dosaggio della soluzione ammoniacale.....	71
4.2 IL SISTEMA CATALITICO SCR	74
4.2.1 Il bruciatore	75
4.2.2 Vaporizzazione e iniezione della soluzione ammoniacale.....	77
4.2.3 Reattore	78
4.2.4 Bypass	83
4.2.5 Procedura di avvio.....	84
4.2.6 Controllo di processo	84
4.2.7 Arresto dell’impianto	85
4.2.8 Costi	85
Capitolo 5 - Analisi tecnico-ambientale della Linea 2.....	87
5.1 CADUTE DI PRESSIONE ATTRAVERSO IL REATTORE	87
5.1.1 Consumo di elettricità del ventilatore	91
5.2 ANDAMENTO DELLA TEMPERATURA NEL REATTORE.....	94
5.3 VERIFICA DELLE EMISSIONI DI NO _x	98
5.3.1 Comparazione con la Linea 3.....	100
5.4 CONFRONTO CON I LIMITI ATTUALI.....	102
5.4.1 Verifica sperimentale della rispondenza del nuovo SCR alla linea guida.	103
5.4.2 Previsione del futuro limite.....	105
5.4.3 Confronto con le emissioni prima del revamping.....	106
5.5 VERIFICA ABBATTIMENTO DELLE DIOSSINE	108
Capitolo 6 - Variazione sperimentale del set-point	111
6.1 DESCRIZIONE DELLA PROVA	111
6.2 MODALITÀ DEL DOSAGGIO	112
6.3 PARAMETRI ANALIZZATI E INDICI DI PERFORMANCE	113
6.4 RISULTATI OTTENUTI	114
6.5 ANALISI DEI RISULTATI.....	121
6.6 PROPOSTA DEL VALORE DI SET POINT	125

Capitolo 7 - Sistema SCR: Interventi migliorativi applicabili	129
7.1 CADUTA DI PRESSIONE.....	129
7.2 TEMPERATURA	130
7.3 DOSAGGIO DI REAGENTE.....	130
7.4 MIGLIORARE L'ABBATTIMENTO	131
7.5 LIMITI FUTURI.....	132
7.6 SLIP DI AMMONIACA.....	132
7.7 CONSIDERAZIONI SUL FUNZIONAMENTO.....	133
7.8 RIGENERAZIONE E SOSTITUZIONE DEL LETTO CATALITICO	133
Conclusioni.....	135
Riferimenti bibliografici	137
Allegato 1: La società A.V.A.	139

Introduzione

Negli ultimi anni il problema dell'impatto ambientale delle attività produttive ha contribuito nell'emanazione di nuove normative che sostengono una costante innovazione, al fine di favorire lo sviluppo di nuove tecnologie in grado di garantire una maggiore efficienza di abbattimento degli inquinanti.

Attualmente il settore della termovalorizzazione sta subendo numerose modifiche, dovute soprattutto al costante aggiornamento tecnologico promosso principalmente dalla normativa europea e nazionale. Infatti con l'ulteriore abbassamento dei limiti di emissione imposti dalle norme in materia, si è reso necessario lo sviluppo di tecniche di abbattimento sempre più spinte.

In queste circostanze al termovalorizzatore AVA, sito in Schio, è stato prescritto l'installazione di un reattore catalitico DeNO_x SCR in ciascuna linea, allo scopo di ridurre ulteriormente le emissioni degli ossidi di azoto.

L'installazione del nuovo reattore ha comportato una serie di cambiamenti sull'assetto della linea presa in considerazione. In particolare si è dovuto modificare alcune condizioni di processo, come ad esempio la concentrazione di gas acidi, la polverosità e la temperatura, per garantire la massima performance del reattore SCR.

Con questo lavoro si vuole garantire l'effettivo maggior abbattimento degli ossidi di azoto con questa tecnologia, in riferimento alle BAT (*Best Available Techniques*). In tal senso vengono confrontate le concentrazioni di tale inquinante con le emissioni che caratterizzavano il sistema precedente, verificando inoltre l'eventuale abbattimento anche per gli altri inquinanti.

Questa tecnica di abbattimento degli ossidi di azoto non è molto diffusa in Italia, in quanto, oltre al costo iniziale per l'installazione, si devono poi sommare anche i costi di gestione, dovuti soprattutto al consumo di metano per riscaldare i fumi in entrata al reattore, per raggiungere la temperatura ottimale per la reazione.

Un'ulteriore analisi è stata condotta in merito alle condizioni operative del reattore catalitico SCR, in particolare rispetto alla pressione e alla temperatura attraverso il gruppo SCR, ed infine è stato effettuato uno studio sul dosaggio di soluzione ammoniacale, utilizzato come reagente nel reattore catalitico, modificando il set point degli ossidi di azoto al camino.

Da questo studio faranno seguito alcuni suggerimenti sulla condotta gestionale dell'impianto.

La presente tesi è strutturata nel modo seguente:

Nel capitolo 1 viene messo in luce il quadro normativo, ovvero la situazione legislativa nazionale, per meglio comprendere il contesto e i fattori che hanno spinto questa modifica dell'impianto.

Nel capitolo 2, dopo una breve descrizione delle fonti degli NO_x, e delle loro conseguenze sull'ambiente, vengono elencate e illustrate le varie tecniche di abbattimento in uso.

Il capitolo 3 è caratterizzato dalla descrizione dell'impianto di incenerimento della linea in questione con l'assetto impiantistico precedente e dopo il revamping, motivando ogni scelta impiantistica.

Nel quarto capitolo vengono descritti con maggiore livello di dettaglio il sistema di dosaggio della soluzione ammoniacale e il gruppo SCR, che comprende il sistema di iniezione di reagente e il reattore stesso.

Il capitolo 5 è caratterizzato dall'analisi dei dati riguardanti gli aspetti tecnici quali la temperatura e la caduta di pressione attraverso il reattore, e gli aspetti ambientali, inerenti le emissioni di NO_x e delle diossine.

Nel capitolo 6 è descritta la prova sperimentale effettuata variando il set point degli ossidi di azoto in uscita, che regolano il dosaggio della soluzione ammoniacale. Ne seguono alcune considerazioni rispetto ai parametri influenzati da questa variazione

Infine nel settimo ed ultimo capitolo si sono riportati alcuni suggerimenti in merito alla gestione dell'impianto, proponendo alcune soluzioni. Si è inoltre motivata la garanzia del rispetto dei futuri limiti che verranno imposti all'impianto.

Il limite dello studio è dato dal fatto che i valori misurati sono indicativi di un sistema appena installato, pertanto non si è potuto fare una previsione riguardo alla futura prestazione del reattore catalitico, riguardo l'abbattimento degli ossidi di azoto.

Capitolo 1

Quadro legislativo

Per comprendere il contesto legislativo seguito dal termovalorizzatore di Schio, si rende necessaria una breve spiegazione per quanto riguarda il quadro normativo nazionale ed europeo.

1.1 Decreto legislativo 133/2005

La normativa italiana sull'incenerimento dei rifiuti è l'attuazione della direttiva comunitaria in materia: 2000/76/CE del 4 dicembre 2000 che definisce regole molto rigorose per l'incenerimento e il co-incenerimento dei rifiuti pericolosi e non pericolosi.

In Italia questo si traduce con il Decreto Legislativo n. 133 dell'11 maggio 2005.

Tale decreto *“stabilisce le misure e le procedure finalizzate a prevenire e ridurre per quanto possibile gli effetti negativi dell'incenerimento e del co-incenerimento dei rifiuti sull'ambiente.”*

Pertanto il decreto in questione disciplina:

- i valori limite di emissione degli impianti di incenerimento (e co-incenerimento) dei rifiuti;
- i metodi di campionamento, analisi e valutazione degli inquinanti derivanti dagli impianti di incenerimento e di co-incenerimento;
- i criteri e le norme tecniche generali riguardanti le caratteristiche costruttive e funzionali, nonché le condizioni di esercizio dell'impianto;
- i criteri temporali di adeguamento degli impianti di incenerimento e di co-incenerimento di rifiuti esistenti alle disposizioni di tale decreto.

In merito alle condizioni di esercizio dell'impianto *devono essere adottate tutte le misure affinché le attrezzature utilizzate per la ricezione, gli stoccaggi, gli eventuali pretrattamenti e la movimentazione dei rifiuti e dei residui prodotti siano progettate e gestite in modo da ridurre le emissioni e gli odori, secondo i criteri della migliore tecnologia disponibile.*

Gli impianti di incenerimento devono essere gestiti in modo da ottenere il più completo livello di incenerimento possibile. Le scorie e le ceneri pesanti prodotte non possono presentare un

tenore di incombusti totali, misurati come carbonio organico totale (COT) superiore al 3% in peso, o una perdita per ignizione superiore al 5% in peso sul secco.

Gli impianti di incenerimento devono essere progettati, costruiti, equipaggiati e gestiti in modo tale che, dopo l'ultima immissione di aria di combustione, i gas prodotti dal processo di incenerimento siano portati, in modo controllato ed omogeneo, anche nelle condizioni più sfavorevoli, ad una temperatura di almeno 850 °C per almeno due secondi. Tale temperatura è misurata nella parete interna della camera di combustione.

Per quanto riguarda le emissioni: *“Gli effluenti gassosi degli impianti di incenerimento e c. devono essere emessi in modo controllato attraverso un camino di altezza adeguata e con velocità e contenuto entalpico tale da favorire una buona dispersione degli effluenti al fine di salvaguardare la salute umana e l'ambiente, con particolare riferimento alla normativa relativa alla qualità dell'aria.”*

Riassumendo si può dire che il D.L. 133/2005 riporta alcuni valori limite da rispettare riguardo:

- alle concentrazioni degli inquinanti presenti in uscita dal camino (Allegato 1);
- alle condizioni operative. In particolare: la frazione ponderale degli incombusti sul totale delle ceneri prodotte; il superamento del limite già precedentemente riportato indica che il processo di combustione dei rifiuti non sta procedendo correttamente.

Viene posta una temperatura limite in camera di combustione (850°C), e in caso non venga rispettata l'impianto deve provvedere a mantenerla con l'ausilio di un bruciatore, inoltre se scende al di sotto di tale soglia, viene bloccata l'alimentazione dei rifiuti al forno. Questo per evitare la formazione di ulteriori inquinanti nocivi (diossine).

1.1.1 Limiti legislativi delle emissioni in atmosfera

Gli aspetti principali introdotti nella direttiva sono quelli riguardanti i valori limite delle emissioni.

Tali limiti riguardano:

- Campionamento continuo: Art. 11 comma 2: *“Negli impianti di incenerimento e in quelli di coincenerimento devono essere misurate e registrate in continuo nell'effluente gassoso le concentrazioni di CO, NO_x, SO₂, polveri totali, TOC, HCl e HF.”* Queste sostanze sono misurate di minuto in minuto direttamente in impianto, analizzando i fumi in uscita dal camino. Inoltre devono essere misurati e registrati in continuo il tenore volumetrico di ossigeno, la temperatura, il tenore di umidità, la portata volumetrica dell'effluente gassoso.

Per queste voci si misurano i valori medi semiorari, ovvero viene calcolata la media di tutte le misurazioni (30) effettuate in mezz'ora.

- **Campionamento discontinuo:** per tutti gli inquinanti che appartengono a questa categoria non è obbligatorio avere una misurazione in impianto. la loro misurazione è effettuata da un laboratorio certificato che dichiara la conformità se i limiti vengono rispettati (riguardano soprattutto i metalli pesanti e i loro composti, le diossine).

I valori limite di emissione nell'atmosfera sono specificati nell'allegato 1 della direttiva e sono di seguito specificati:

Tabella 1.1 Valori limite di emissione media giornaliera-D. Lgs 133/05

Polveri totali	10 mg/Nm ³
Sostanze organiche sotto forma di gas e vapori, espresse come carbonio organico totale (TOC)	10 mg/Nm ³
Composti inorganici del cloro sotto forma di gas o vapore, espressi come acido cloridrico (HCl)	10 mg/Nm ³
Composti inorganici del fluoro sotto forma di gas o vapore, espressi come acido fluoridrico (HF)	1 mg/Nm ³
Ossidi di zolfo espressi come biossido di zolfo (SO ₂)	50 mg/Nm ³
Ossidi di azoto espressi come biossido di azoto (NO ₂)	200 mg/Nm ³
Monossido di carbonio (CO)	50 mg/Nm ³

La misurazione delle concentrazioni dei metalli vengono effettuate con campionamenti medi di un'ora e le concentrazioni limite sono:

Tabella 1.2 Valori limite di emissione medi ottenuti con periodi di campionamento di un'ora -D. Lgs 133/05.

Cadmio e i suoi composti, espressi come cadmio (Cd)	0,05 mg/Nm ³ in totale
Tallio e i suoi composti, espressi come tallio (T)	
Mercurio e i suoi composti, espressi come mercurio (Hg)	0,05 mg/Nm ³
Antimonio e suoi composti, espressi come antimonio (Sb)	0,5 mg/Nm ³ in totale
Arsenico e suoi composti, espressi come arsenico (As)	
Piombo e suoi composti, espressi come piombo (Pb)	
Cromo e suoi composti, espressi come cromo (Cr)	
Cobalto e suoi composti, espressi come cobalto (Co)	
Rame e suoi composti, espressi come rame (Cu)	
Manganese e suoi composti, espressi come manganese (Mn)	
Nichel e suoi composti, espressi come nichel (Ni)	
Vanadio e suoi composti, espressi come vanadio (V)	

Per quanto riguarda le diossine e i furani, questi vengono misurati in un periodo di campionamento di 8 ore. I valori limite di emissione si riferiscono alla concentrazione totale di diossine e furani calcolata come "concentrazione tossica equivalente".

Tabella 1.3 Valori limite di emissione medi ottenuti con periodi di campionamento di 8 ore -D. Lgs 133/05.

Diossine e furani (PCDD + PCDF)	1 ng/Nm ³
Idrocarburi policiclici aromatici (IPA)	0,01 mg/Nm ³

Le concentrazioni misurate nell'effluente gassoso in uscita devono essere normalizzati, ovvero i valori devono essere riportati alla condizione di gas secco (in base al tenore di acqua misurata) , ad una determinata condizione di temperatura e pressione (T=273K, P= 101.3 kPa). e in base al tenore di ossigeno di riferimento. Questa operazione viene effettuata al fine di creare una base in cui si possa effettuare un confronto tra i vari impianti. In questo modo vengono utilizzati dei parametri di riferimento omogenei, poiché le concentrazioni sono direttamente dipendenti dalle portate dei flussi gassosi, ovvero dal grado di diluizione. Per questo motivo si normalizzano le concentrazioni ad un tenore di O₂ di riferimento, in questo modo le diluizioni non hanno alcun peso.

I valori normalizzati di emissione si intendono rispettati se:

1. Nessuno dei valori medi giornalieri supera uno qualsiasi dei valori limite di emissioni stabiliti nella tabella 1.1
2. il 97% dei valori medi giornalieri nel corso dell'anno non supera il valore limite di emissione stabilito nella tabella 1.1
3. Nessuno dei valori medi rilevati per i metalli pesanti, le diossine e i furani e gli idrocarburi policiclici aromatici durante il periodo di campionamento supera i pertinenti valori limite di emissione stabiliti nelle tabelle.1.2 e 1.3.

I valori medi sono determinati durante il periodo di effettivo funzionamento dell'impianto (esclusi i periodi di avvio e di arresto se non vengono inceneriti i rifiuti).

In base ai valori misurati previa sottrazione del rispettivo valore dell'intervallo di confidenza al 95%. I valori degli intervalli di confidenza non possono eccedere le seguenti percentuali dei valori limite di emissione riferiti alla media giornaliera:

Tabella 1.4 Valori massimi degli intervalli di confidenza di ciascun macroinquinante..

Polveri totali	30%
Acido organico totale	30%
Acido cloridrico	40%
Acido fluoridrico	40%
Biossido di zolfo	20%
Biossido di azoto	20%
Monossido di carbonio	10%

I valori medi giornalieri sono determinati in base ai valori medi convalidati .

Per ottenere un valore medio giornaliero valido non possono essere scartati, a causa di disfunzioni o per ragioni di manutenzione del sistema di misurazione in continuo, più di 5 valori medi su 30 minuti in un giorno. Non più di 10 valori medi giornalieri all'anno possono essere scartati per le stesse ragioni.

La norma appena descritta è specifica in materia di incenerimento, risulta pertanto prevalente anche rispetto al successivo Decreto Legislativo 152/2006 dal titolo "Norme in materia ambientale".

Nel 1996 l'Unione Europea ha pubblicato la Direttiva 96/61/EC, chiamata anche direttiva "IPPC" (Integrated Pollution Prevention and Control) con l'intento di stabilire una serie di regole comuni per il rilascio di autorizzazioni ambientali per le attività riportate nella stessa Direttiva, ottenendo la prevenzione e il controllo integrato dell'inquinamento. Lo scopo di tale Direttiva è quello di ridurre le emissioni migliorando il controllo e la gestione dei processi industriali, per conseguire un alto livello di protezione dell'ambiente nel suo complesso.

I principi generali che il gestore dell'impianto e le autorità competenti devono attuare per assicurare i risultati previsti sono riportati nell'art.3, dove tra gli obblighi è riportato che: *"siano prese le opportune misure di prevenzione dell'inquinamento, applicando segnatamente le migliori tecniche disponibili."*

1.2 L'Autorizzazione Integrata Ambientale e i BAT

Per comprendere la fase successiva dei limiti di legge si deve introdurre il concetto di AIA: Autorizzazione Integrata Ambientale; L'AIA è il provvedimento che autorizza l'esercizio di un impianto o parte di esso a determinate condizioni che devono garantire che l'impianto sia conforme ai requisiti del D.Lgs 59/2005. Ogni autorizzazione integrata ambientale concessa deve includere le modalità previste per la protezione dell'ambiente nel suo complesso.

Infatti tale decreto disciplina il rilascio, il rinnovo e il riesame dell'Autorizzazione Integrata Ambientale (AIA) degli impianti di cui all'Allegato I, nonché le modalità di esercizio dei medesimi; ciò significa che gli impianti presenti nell'allegato hanno la necessità di ottenere un'autorizzazione integrata dalle autorità competenti, in assenza della quale non potranno operare.

Il concetto di autorizzazione integrata implica che le autorizzazioni devono tenere conto dell'insieme delle prestazioni ambientali degli impianti, cioè delle emissioni nell'aria, degli impatti sulle acque, sul suolo, della produzione dei rifiuti, dell'impiego di materie prime, ecc.

L'art. 269 del D.lgs 152/2006 recita che per tutti gli impianti che producono emissioni deve essere richiesta un' autorizzazione. L'autorizzazione stabilisce :

- a) per le emissioni che risultano tecnicamente convogliabili, le modalità di captazione e di convogliamento;
- b) per le emissioni convogliate o di cui è stato disposto il convogliamento, i valori limite di emissione, le prescrizioni, i metodi di campionamento e di analisi, i criteri per la valutazione della conformità dei valori misurati ai valori limite e la periodicità dei controlli di competenza del gestore;
- c) per le emissioni diffuse, apposite prescrizioni finalizzate ad assicurarne il contenimento.

Art.270 comma 1: in sede di autorizzazione, l'autorità competente verifica se le emissioni diffuse di un impianto o di un macchinario fisso dotato di autonomia funzionale sono tecnicamente convogliabili sulla base delle migliori tecniche disponibili.

1.2.1 Il ruolo delle BAT

Le autorizzazioni devono essere basate sul concetto di BAT (Best Available Techniques) , ovvero le “*migliori tecniche disponibili*: la più efficiente e avanzata fase di sviluppo di attività e relativi metodi di esercizio indicanti l'idoneità pratica di determinate tecniche a costituire, in linea di massima, la base dei valori limite di emissione intesi ad evitare oppure, ove ciò si riveli impossibile, a ridurre in modo generale le emissioni e l'impatto sull'ambiente nel suo complesso. Si intende per:

- 1) tecniche: sia le tecniche impiegate sia le modalità di progettazione, costruzione, manutenzione, esercizio e chiusura dell'impianto;
- 2) disponibili: le tecniche sviluppate su una scala che ne consenta l'applicazione in condizioni economicamente e tecnicamente valide nell'ambito del pertinente comparto industriale, prendendo in considerazione i costi e i vantaggi, indipendentemente dal fatto che siano o meno applicate o prodotte in ambito nazionale, purché il gestore possa avervi accesso a condizioni ragionevoli;
- 3) migliori: le tecniche più efficaci per ottenere un elevato livello di protezione dell'ambiente nel suo complesso.”

Pertanto l'articolo 3 comma 1 parte a del DGLS 59/2005 recita: “*devono essere prese le opportune misure di prevenzione dell'inquinamento, applicando in particolare le migliori tecniche disponibili*”.

L'Autorità competente non dovrà stabilire i valori limite di emissione per ciascun impianto, basandosi sui valori ottenibili con le BAT.

L'autorizzazione integrata ambientale per gli impianti rientranti nelle attività presenti nell'allegato I di tale decreto è rilasciata tenendo conto di considerazioni basate sul principio di prevenzione e precauzione (riportate nell'allegato IV) e nel rispetto delle linee guida per l'individuazione e l'utilizzo delle migliori tecniche disponibili.

Le BAT sono fondamentali nella Direttiva IPPC nel determinare gli obblighi degli operatori industriali riguardo alla prevenzione e al controllo dell'inquinamento.

È richiesto uno scambio di informazioni tra gli Stati membri e le industrie riguardo alle informazioni inerenti le migliori tecniche disponibili, con l'intento di eliminare o ridurre le disparità tra le prestazioni ambientali dei vari Paesi.

Al fine di ottenere l'autorizzazione integrata ambientale, l'impianto di incenerimento deve rispettare dei limiti di emissione che sono più restrittivi rispetto a quelli della legge 133/2005, e per quanto riguarda il termovalorizzatore di Schio si riassumono con la seguente tabella:

Tabella 1.5 Valori limite giornalieri delle emissioni per il termovalorizzatore secondo l'AIA.

Polveri totali	7 mg/Nm ³
Sostanze organiche sotto forma di gas e vapori, espresse come carbonio organico totale (TOC)	8 mg/Nm ³
Composti inorganici del cloro sotto forma di gas o vapore, espressi come acido cloridrico (HCl)	8 mg/Nm ³
Composti inorganici del fluoro sotto forma di gas o vapore, espressi come acido fluoridrico (HF)	< 1 mg/Nm ³
Ossidi di zolfo espressi come biossido di zolfo (SO ₂)	40 mg/Nm ³
Ossidi di azoto espressi come biossido di azoto (NO ₂)	180 mg/Nm ³
Monossido di carbonio (CO)	45 mg/Nm ³
Periodo di campionamento di un'ora	
Cadmio e i suoi composti, espressi come cadmio (Cd)	0,04 mg/Nm ³ in totale
Tallio e i suoi composti, espressi come tallio (T)	
Mercurio e i suoi composti, espressi come mercurio (Hg)	
Antimonio e suoi composti, espressi come antimonio (Sb)	0,3 mg/Nm ³ in totale
Arsenico e suoi composti, espressi come arsenico (As)	
Piombo e suoi composti, espressi come piombo (Pb)	
Cromo e suoi composti, espressi come cromo (Cr)	
Cobalto e suoi composti, espressi come cobalto (Co)	
Rame e suoi composti, espressi come rame (Cu)	
Manganese e suoi composti, espressi come manganese (Mn)	
Nichel e suoi composti, espressi come nichel (Ni)	
Vanadio e suoi composti, espressi come vanadio (V)	
Periodo di campionamento di 8 ore	
Diossine e furani (PCDD + PCDF)	0,1 ng/Nm ³
Idrocarburi policiclici aromatici (IPA)	0,005 mg/Nm ³

Si nota subito che i limiti delle emissioni sono più restrittive, inoltre ai limiti appena elencati c'è da aggiungere l'ammoniaca, la quale deve essere monitorata costantemente ed il suo valore non deve superare i 30 mg/Nm³ come valore medio su 30 minuti.

I limiti stabiliti per gli NO_x non tengono conto dell'abbattimento DeNO_x SCR, questo significa che non appena verrà rinnovata tale autorizzazione, i limiti subiranno un'ulteriore restrizione per le linee che sono state oggetto del revamping tecnologico.

Per gli esercizi che adottano l'abbattimento DeNO_x con SCR, il limite stabilito della concentrazione degli NO_x in uscita al camino deve essere compreso tra 40 e 100 mg/Nm³. Perciò l'autorizzazione non può dare limiti inferiori a 40 mg/Nm³ e non superiori a 100 mg/Nm³ ad un impianto di incenerimento che utilizza la tecnologia SCR.

1.3 Prescrizione del sistema SCR

L'introduzione del sistema SCR è stato prescritto dalla Commissione Regionale VIA nel parere n. 202 del 05 agosto 2008, allegato alla DRGV n. 228 del 10 febbraio 2009.

In base all'art. 21 della normativa regionale sui rifiuti (L.R. 3/2000), secondo cui:

“1. Nella progettazione, realizzazione ed esercizio degli impianti di recupero e di smaltimento dei rifiuti devono essere utilizzati i migliori della tecnica idonei al conseguimento degli obiettivi della massima tutela della salute degli abitanti e di progressiva riduzione dell'impatto ambientale derivante dai rifiuti. A tal fine la Giunta Regionale, con proprie deliberazioni emana ed aggiorna direttive sui requisiti che debbono essere accertati in sede di approvazione dei progetti e di rinnovo delle autorizzazioni. In relazione allo sviluppo delle migliori tecniche disponibili. Il progetto sulla base delle direttive della Giunta Regionale, individuerà le soluzioni economicamente praticabili.

2. I nuovi impianti di smaltimento e recupero di rifiuti sono ubicati, di norma, nell'ambito delle singole zone territoriali omogenee produttive o per servizi tecnologici.”

Dai risultati ottenuti, dopo aver effettuato uno studio sulle emissioni e in relazione ai comuni interessati, la Commissione ha ritenuto necessario effettuare ulteriori affinamenti sul ciclo depurativo dei gas, in particolare nei confronti degli NO_x, imponendo la tecnologia SCR che è la più efficace per il loro abbattimento.

La commissione pertanto ha elaborato le seguenti prescrizioni :

- 1) *“Ciascuna linea di incenerimento sia dotata di un sistema catalitico (DeNO_x SCR) per l’abbattimento degli ossidi di azoto (NO_x). L’installazione e messa in esercizio siano completate entro il 2012. Sia anticipato al 2010 l’intervento su almeno una linea. Il sistema SCR comprenda un letto catalitico per l’ossidazione di composti organici in particolare diossine e furani.*
- 2) *Ciascuna linea di incenerimento munita di sistema catalitico SCR sia dotata di un sistema di dosaggio automatico di soluzione di urea /ammoniaca, regolato con la misura della concentrazione di NO_x.*
- 3) *Ciascuna linea d’incenerimento sia dotata di un sistema di dosaggio automatico di calce/NaHCO₃ regolato con la misura delle concentrazioni di HCl”*

Gli interventi migliorativi relativi alle riduzioni delle emissioni in atmosfera in linea con linea con i BAT (migliori tecniche disponibili) sono riassumibili:

- I. Installazione su ciascuna linea di un sistema di dosaggio automatico di soluzione di ammoniaca per il processo De-NO_x SCR. L’implementazione dal sistema di dosaggio manuale consente di perseguire contemporaneamente più obiettivi: stretto controllo degli NO_x emessi a valori nettamente inferiori al limite di legge, in base al setpoint fissato, minor sovradosaggio del reagente urea/ammoniaca, minori emissioni NH₃. L’importanza di sistemi automatici è correlata con la variabilità delle condizioni di esercizio, che comportano una fluttuazione nelle concentrazioni di NO_x prodotti.
- II. Installazione di un sistema catalitico SCR su ciascuna linea per l’abbattimento degli ossidi di azoto (NO_x). Tale sistema sostituirà il sistema non catalitico (SNCR). I vantaggi dell’utilizzo dello SCR sono:
 - È in grado di abbattere con alta efficienza i microinquinanti organici (diossine ed altri, causando l’ossidazione degli stessi;
 - Riduce le emissioni degli ossidi di azoto a valori inferiori alla metà del limite di legge;
 - Dimezza lo slip di ammoniaca, cioè la concentrazione di ammoniaca in eccesso derivante dal sovradosaggio della stessa, ovvero di urea.
- III. Prelievo in continuo delle diossine. Si è ritenuto elevare in maniera decisa il livello di controllo imponendo, su ciascuna linea, il prelievo in continuo delle diossine per un durata di almeno due mesi/anno, effettuando almeno tre analisi in detto periodo di misura. In detto periodo di controllo sarà quindi senza soluzione di continui, salvo il tempo strettamente necessario alla sostituzione della cartuccia di rilievo.

IV. Monitoraggio in continuo di mercurio. Si è ritenuto elevare in maniera decisa il livello di controllo imponendo, su ciascuna linea imponendo la misura in continuo del mercurio per una durata di almeno due mesi/anni.

Capitolo 2

Emissioni di ossidi di azoto:

Aspetti generali

L'importanza dell'abbattimento degli ossidi di azoto è dovuta all'enorme quantità prodotta a livello mondiale.

2.1 Gli ossidi di azoto

Gli ossidi di azoto (NO_x) sono i principali inquinanti dell'aria, insieme ai composti organici volatili (NMVOC). La direttiva europea NEC (national emission ceilings) ha fissato per l'Italia un tetto massimo annuale di 990.000 tonn/anno. Numerose sono le fonti di emissione, ma praticamente tutte attribuibili ai processi di combustione. La fonte maggiore, quasi due terzi, è legata ai veicoli a motore, per poco più di un terzo le emissioni derivano da sorgenti fisse. Come dimostrato in figura 2.1

Il termine NO_x indica un'ampia miscela di molecole composte da azoto e ossigeno, le cui forme principali sono rappresentate dal monossido di azoto (NO), dal biossido di azoto (NO_2), e dall'ossido nitroso (N_2O), quest'ultimo è presente in una minore quantità rispetto ai primi due, ma è un potente gas serra.

Tra gli inquinanti appena citati, il monossido di azoto (NO) è un gas incolore e a contatto con l'aria si trasforma in biossido di azoto.

Il biossido di azoto è un gas rosso-arancione non infiammabile a temperatura ordinaria dall'odore pungente, irritante e caratteristico. È più denso dell'aria, pertanto i suoi vapori tendono a rimanere a livello del suolo.

Nei processi di combustione ad alta temperatura, nel totale degli NO_x emessi è soprattutto l'NO ad essere generato (circa il 95%), il quale tuttavia, data la sua elevata instabilità, è prontamente ossidato in atmosfera ad opera dell'ossigeno e dell'ozono., trasformandosi rapidamente in biossido di azoto.

L' NO_2 gioca un ruolo maggiore nelle reazioni chimiche che generano smog fotochimico. Inoltre è un agente ossidante che reagisce nell'aria per formare acido nitrico e altri nitrati tossici.

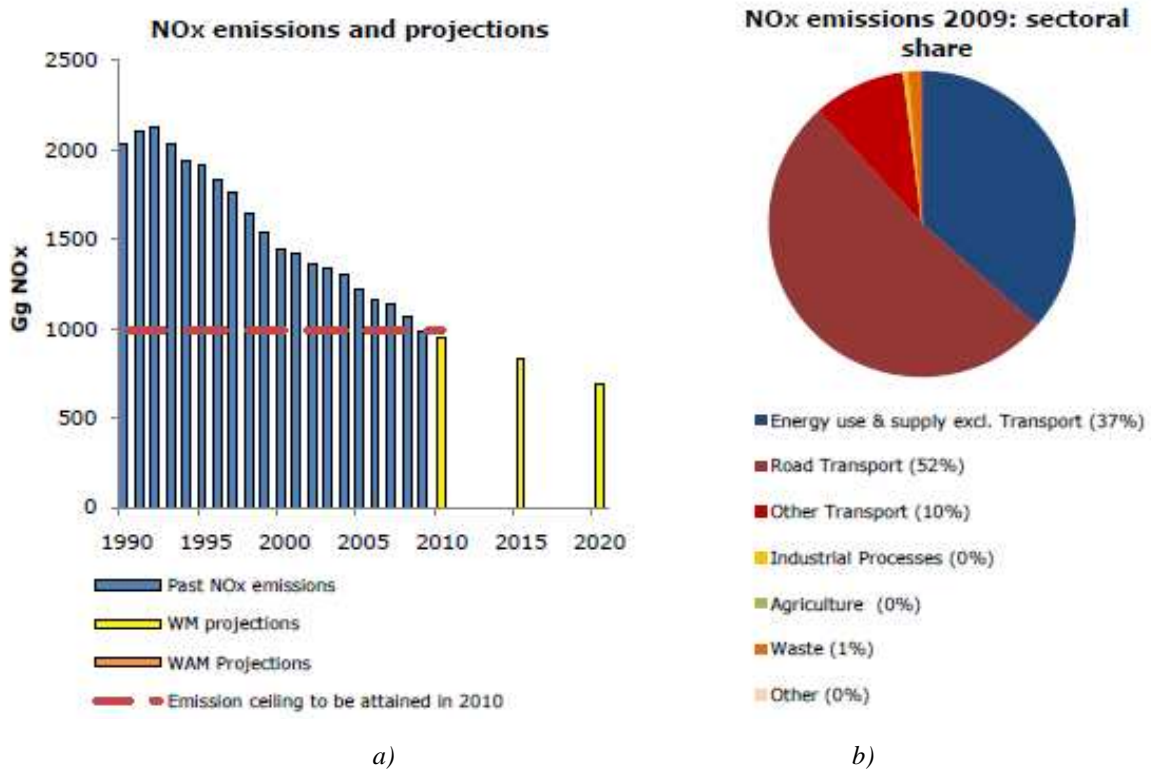


Figura 2.1 Situazione degli ossidi di azoto a livello mondiale. a) livello di emissioni in GgNOx e stima futura. b) Fonti di produzione degli ossidi di azoto nell'anno 2009.

In concentrazioni considerevoli, NO_2 è estremamente tossico, può causare seri danni ai polmoni. È un irritante al respiro, e un'alta concentrazione nell'aria può causare una brevità nella respirazione e dolori al petto.

La presenza dell'azoto inoltre contribuisce all'acidificazione dell'atmosfera, e alla formazione di deposizioni acide, le quali aggrediscono i terreni e provocano il danneggiamento di molti materiali, non solo costruttivi. I nitrati che raggiungono la superficie delle acque come fiumi e laghi contribuiscono all'aumento del contenuto di azoto nelle acque. Questo processo di nitrificazione agisce sulla crescita delle alghe e degli altri organismi che possono influenzare la vita acquatica.

Inoltre non bisogna sottovalutare l' N_2O , il quale, anche se prodotto in quantità ridotta, può raggiungere la stratosfera. Nella stratosfera questo composto partecipa ad alcune reazioni chimiche che hanno come risultato la riduzione dello strato protettivo di ozono, necessario per ridurre la penetrazione dei raggi UV. Questi potenti effetti degli ossidi di azoto sono conosciuti da molti anni per questo la regolazione delle emissioni sono state progressivamente introdotte nella maggior parte dei paesi del mondo.

Essendo causa di degrado ambientale, e pericolosi per la salute umana, il problema degli ossidi di azoto è una delle preoccupazioni maggiori nella gestione di un impianto di incenerimento.

Per questo motivo nuove tecnologie sono state introdotte con lo scopo di ridurre la formazione o di trasformarlo in azoto gassoso (N_2). L'adozione di tali tecnologie sono mirate tanto alla prevenzione nella formazione degli stessi quanto alla rimozione e all'abbattimento delle quantità comunque formatesi.

Tra queste tecnologie la riduzione catalitica selettiva (SCR) è stata sviluppata con maggiore successo.

2.1.1 Dinamica di formazione degli NO_x

La principale fonte antropica di ossidi di azoto è rappresentata dai processi di combustione. Infatti in misura più o meno elevata offre le condizioni favorevoli per la generazione di NO_x , in modo variabile a seconda della concentrazione di ossigeno e a seconda della temperatura con cui avviene la combustione.

In tutti i processi di combustione ci sono tre modalità con cui avviene la formazione degli NO_x e sono di seguito elencati:

1. *Thermal NO_x* , che si formano dalla reazione tra l'ossigeno e l'azoto presenti nell'aria, durante la combustione. Si ha una formazione significativa di tale composto sopra ai $1300^\circ C$. Infatti la formazione degli ossidi di azoto aumenta esponenzialmente con l'aumentare della temperatura di combustione. L'azoto contenuto nell'aria è inerte a temperature contenute, pertanto se la combustione avviene in condizioni ideali, si può evitarne la presenza. Solo quando si raggiungono temperature elevate le molecole di azoto si dissociano in azoto atomico che risulta molto reattivo con l'ossigeno portando alla formazione di NO.

La dipendenza della formazione di NO_x può essere espressa dalla seguente formula.

$$[NO] = A \times e^{\left(\frac{-E}{RT}\right)} \times [N_2] \times [O_2]^{0.5} \times t \quad (2.1)$$

Dove A è la costante di Arrhenius, E è l'energia di attivazione necessaria ad innescare la reazione, R è la costante universale dei gas, T la temperatura del processo e t il tempo di permanenza in tali condizioni.

2. *fuel NO_x* o NO_x di conversione, risultante dall'azoto presente nel combustibile che viene ossidato. Insieme al thermal NO_x costituisce la principale fonte di formazione

degli ossidi di azoto. La figura 2.2 mostra che la produzione degli ossidi di azoto aumenta con la percentuale di ossigeno presente durante la combustione.

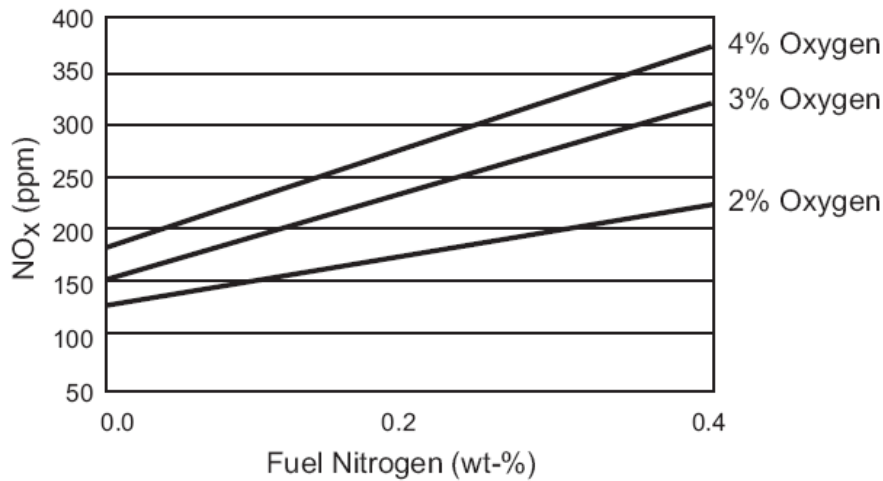


Figura 2.2 Aumento della produzione dei Fuel NO_x con l'aumento della percentuale ponderale dell'azoto presente nel materiale comburente e con l'aumento della percentuale di ossigeno.

La formazione del Fuel NO_x è estremamente affetta dalla concentrazione locale di ossigeno presente nella fiamma di combustione e dal rapporto di miscelazione tra aria e combustibile. Così, come gli NO_x termici, gli NO_x di conversione sono dominati dalle condizioni di combustione locali.

A causa della differenza spaziale di temperatura e ossigeno, le condizioni locali si riferiscono ad una specifica area nella zona di combustione

3. *prompt NO_x* o NO_x veloci, sono formati dalla conversione dell'azoto molecolare dell'aria alla presenza di composti di idrocarburi intermedi, principalmente costituiti da acido cianidrico (HCN) ed ammoniaca (NH₃). Si formano nella regione confinata in prossimità della fiamma, dove sono presenti le temperature più elevate, per ossidazione rapida dell'azoto inerte. Nel caso della combustione applicata all'incenerimento dei rifiuti, questo tipo di formazione degli NO_x è molto inferiore rispetto a quella che implica gli altri meccanismi a causa della scarsa presenza di sostanze intermedie molto aggressive e che quindi attaccano anche l'azoto.

La dipendenza dei meccanismi appena descritti dalla temperatura è illustrata in modo nella figura 2.3

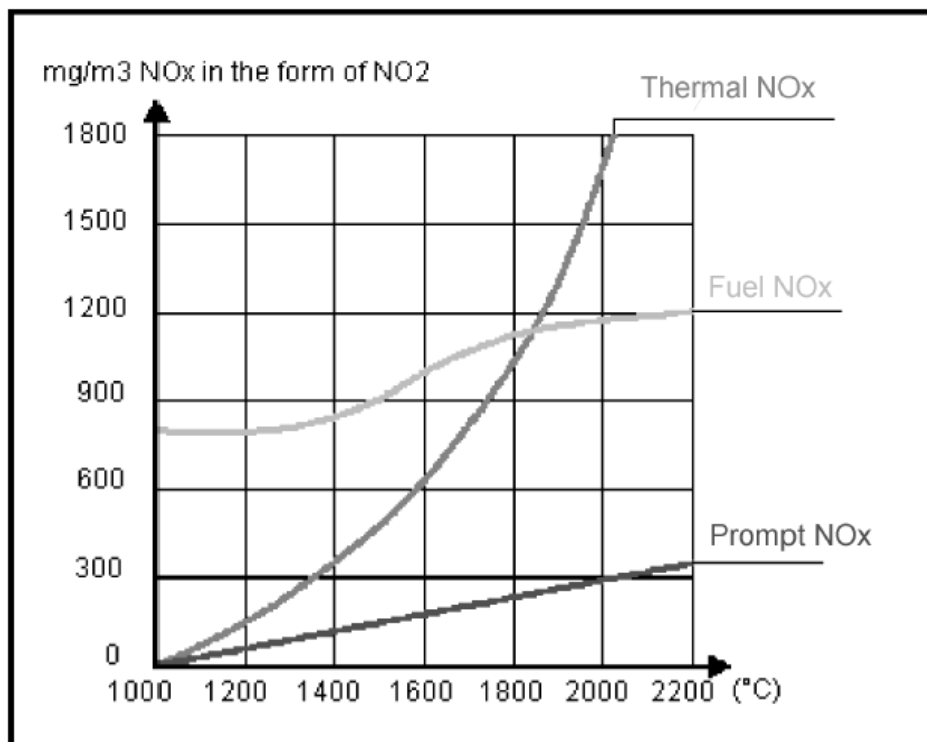


Figura 2.3 Meccanismo della formazione degli ossidi di azoto in funzione della temperatura.
 FONTE: *State of the art of the waste incineration.*

Si può dedurre che se la combustione venisse condotta con una temperatura prossima e non superiore a 1000°C le emissioni degli ossidi di azoto potrebbero essere significativamente inferiori. In realtà questa ipotesi non si verifica, in quanto le condizioni locali di temperatura possono essere diverse dal valore misurato.

Il fuel NO_x è il meccanismo principale per la formazione di NO_x e dipende dal contenuto di azoto nel combustibile e dalla concentrazione di ossigeno nella reazione.

In definitiva nella combustione del rifiuto i meccanismi predominanti di generazione degli ossidi di azoto sono costituiti dalla conversione e dal processo termico. Gli ossidi di azoto da conversione derivano dall'ossidazione dell'azoto presente nel materiale combusto. Nel caso del rifiuto solido urbano (RSU), il contenuto di azoto di partenza è difficilmente prevedibile, dal momento che esso varia notevolmente a seconda della tipologia del rifiuto.

Normalmente il contenuto di azoto nei RSU oscilla attorno allo 0.5% in peso.

D'altro canto se si considerano i cosiddetti rifiuti speciali derivanti da scarti industriali e chimici il contenuto di azoto può essere di gran lunga superiore.

Dalla figura 2.3 si nota che gli ossidi di conversione si formano a temperature relativamente basse, in confronto agli NO_x di natura termica. La ragione è da ricercarsi nelle minore energie di legame che competono alla formazione degli NO_x nei due diversi meccanismi.

Il biossido di azoto invece, come già accennato, nei gas di combustione non si trova mai in concentrazioni superiori al 5-10% rispetto agli NO_x totali, poiché con l'alta temperatura di combustione si decompongono, formando NO.

2.2 Tecniche di abbattimento degli NO_x

In generale le tecniche usate per l'abbattimento degli ossidi di azoto si distinguono in:

- misure primarie
- misure secondarie.

2.2.1 Misure primarie

Queste tecniche hanno come scopo la riduzione della formazione degli ossidi di azoto, e per questo motivo vengono applicate al solo sistema di combustione. Queste tecniche consentono di prevenire la formazione degli NO_x andando a modificare alcuni parametri nel processo di combustione.

Le azioni preventive operano essenzialmente secondo due principi:

- riduzione delle temperature massime di fiamma e del tempo di permanenza a elevate temperature;
- regolazione opportuna dell'eccesso d'aria, e quindi dell'apporto di ossigeno in camera di combustione.

Le principali misure primarie sono:

- *air staging*, basata sulla separazione della camera di combustione, la quale risulta così divisa in due parti: una in cui la combustione viene condotta in carenza di ossigeno, prossimo allo stechiometrico, e una zona di combustione secondaria in cui è presente un eccesso di ossigeno, per assicurare una completa combustione. In questo modo si va a minimizzare la permanenza dei composti alle elevate temperature e ad elevati eccessi d'aria. Questa tecnica va ad inibire principalmente il meccanismo del fuel NO_x , in quanto limita la presenza di ossigeno, ma controlla anche la formazione di thermal NO_x grazie al raggiungimento di un minor picco di temperatura.

Purtroppo non mancano gli aspetti negativi, ovvero una significativa presenza di CO, che verrebbero a formarsi a causa di una non perfetta miscelazione combustibile/aria.

- *Ricircolo dei fumi*. Una parte del flusso principale, generalmente uscente dal sistema dell'abbattimento delle polveri, viene separato per essere miscelato con l'aria di combustione, in questo modo si ha una diminuzione dell'ossigeno in camera di combustione e anche il controllo della temperatura di fiamma, consentendo al tempo

stesso il completamento delle reazioni di combustione. Come inconvenienti, si può avere un eccesso di consumo energetico dei ventilatori dovuto al trasporto dei fumi riciclati ed inoltre si possono creare problemi di corrosione nelle tubazioni, dovuti a gas acidi.

- *Basso eccesso d'aria*. È la misura più semplice da adottare in quanto si riduce l'apporto di ossigeno, garantendo solamente il quantitativo minimo necessario per una completa combustione. In questo caso si controlla la temperatura di fiamma evitando la formazione di thermal NO_x . D'altra parte sono da considerare anche gli aspetti negativi: perdita di efficienza della caldaia dovuta all'abbassamento di temperatura e un incremento del livello di carbonio negli incombusti, nel caso si verifichi un'incompleta combustione.
- *Fuel staging* (reburning) che si basa sulla creazione di differenti zone in caldaia tramite l'iniezione su più livelli di combustibile ed aria. Lo scopo è ridurre gli ossidi di azoto già formati ad azoto molecolare. In questo caso la camera di combustione viene divisa in tre parti distinte, ciascuna con un preciso scopo. La zona di combustione primaria, il combustibile brucia in atmosfera ossidante o leggermente riducente. Questa zona serve ad evitare il trasferimento dell'ossigeno in eccesso nella zona di reburning, che porterebbe alla formazione di NO_x . Nella zona di combustione secondaria o zona di reburning invece, il combustibile di reburning è iniettato in atmosfera riducente. I radicali di idrocarburo formati reagiscono con gli NO_x prodotti nella camera di combustione precedente.

Nella terza zona avviene l'iniezione di aria per completare la combustione.

- *Bruciatori a bassa emissione di NO_x* . La formazione degli ossidi di azoto risulta fortemente influenzata anche da numerose variabili di processo, come la velocità di immissione del combustibile e dell'aria, la turbolenza, la nebulizzazione del combustibile, ma anche la forma e la posizione dell'ugello possono incidere su tale processo. Pertanto tali variabili sono riconducibili al sistema di bruciatori. I bruciatori a bassa produzione di NO_x sono in grado di produrre fiamme ad una temperatura meno elevata, grazie ad un ricircolo dei prodotti di combustione. A causa della grande pezzatura del materiale combustibile, questo apparecchio trova poca applicazione in un inceneritore di rifiuti solidi urbani.

Le misure primarie però non assicurano a priori un'efficiente inibizione della formazione di NO_x , e quindi del raggiungimento delle concentrazioni in uscita prescritte dalla normativa perché in campo ci sono molte variabili tra le quali: la composizione del rifiuto e le eventuali anomalie che possono verificarsi nell'impianto, come ad esempio un improvviso aumento di temperatura. Perciò per il controllo della concentrazione di NO_x al camino ci si deve affidare alle misure di abbattimento secondarie.

2.2.2 Misure secondarie

Le tecniche secondarie mirano alla riduzione degli NO_x già formati nella camera di combustione. Possono essere utilizzate indipendentemente o in associazione con le tecniche primarie.

C'è da fare subito una distinzione, infatti tra i vari sistemi di abbattimento si differenziano i sistemi ad umido, i quali consistono in un processo di assorbimento chimico degli NO_x in una corrente di liquido, e successivamente allontanata dal processo, e il sistema di abbattimento a secco il quale, per mezzo di un reagente trasforma gli ossidi di azoto in azoto gassoso.

A causa della natura inerte e poco solubile dell' NO , il primo processo è in via di abbandono.

Per quanto riguarda invece i sistemi a secco, queste tecniche si basano sull'iniezione di ammoniaca, urea o altri composti che reagiscono con gli NO_x portando alla formazione di azoto molecolare. Si dividono in :

- riduzione catalitica non selettiva (SNCR),
- riduzione catalitica selettiva (SCR).

Il principio di funzionamento consiste nell'utilizzare un reagente, appunto riducente in maniera che l'azoto presente in forma ossidata (con valenza +2 nel monossido e +4 nel biossido) venga ridotto alla forma molecolare di valenza 0. inoltre le reazioni sono selettive poiché il reagente azotato, quale l'ammoniaca o l'urea, garantisce l'azione preferenziale sugli ossidi di azoto.

2.2.2.1 Riduzione selettiva non catalitica (SNCR)

Questa tecnica prevede l'iniezione di un reagente riducente direttamente nella camera di combustione, opera senza catalizzatore e a temperature comprese tra 850°C e 1100°C , la temperatura dipende dal tipo di reagente impiegato.

Il sistema SNCR è essenzialmente costituito da:

- unità di stoccaggio del reagente,
- l'unità SNCR, dove hanno luogo l'iniezione del reagente e le reazioni di riduzione degli ossidi di azoto ad acqua e azoto molecolare.

L'importanza della finestra delle temperature è data dal fatto che al di sopra di questa finestra di temperatura l'ammoniaca si ossida e produce NO_x , al di sotto invece comportano cinetiche di reazione inferiori, sicché l'ammoniaca non ha la possibilità di reagire e quindi viene trascinata con i fumi creando il fenomeno di slip di ammoniaca al camino. Se presente in quantità rilevanti al camino, l'ammoniaca è di gran lunga più dannosa degli ossidi di azoto, in quanto crea numerosi effetti nocivi non solo sulla salute umana, ma anche sull'ambiente.

Uno degli aspetti più importanti da tenere in considerazione per quanto riguarda questo sistema di abbattimento degli ossidi di azoto è senz'altro quello di garantire un adeguato sistema di miscelazione fumi/reagente, in modo da ottenere una buona efficienza e ridurre lo slip di ammoniaca. Per questo motivo si cerca di adottare appositi sistemi di distribuzione del reagente.

Altro parametro di rilievo è la scelta del reagente. Infatti questo può influenzare la formazione del protossido di azoto (N_2O). L'utilizzo di ammoniaca porta ad una formazione trascurabile di questo composto, mentre se si inietta urea questo fattore diventa rilevante, ma è un problema che può essere ridotto iniettando l'urea direttamente nell'aria di completamento della combustione.

L'utilizzo di urea inoltre può dare più problemi di corrosione rispetto all'ammoniaca e pertanto richiede una più accurata scelta dei materiali.

Anche il tempo di permanenza della reazione all'interno della finestra di temperatura richiesto gioca un ruolo fondamentale nell'abbattimento degli ossidi di azoto, di solito il tempo di permanenza varia tra i 0.2 e i 0.5 secondi.

Infine il rapporto molare tra ammoniaca e NO_x deve essere maggiore di quello stechiometrico, si è constatato che il rapporto molare ottimale varia tra 1 e 4, un aumento di tale rapporto farebbe crescere lo slip di ammoniaca, sebbene contribuirebbe all'aumento dell'efficienza di abbattimento.

Un altro parametro da tener conto è senz'altro il grado di miscelazione tra i fumi e il reagente, e quindi la sua distribuzione. Si cerca di progettare il sistema in modo che tutto il volume dei fumi sia investito dal reagente, onde evitare zone non coperte che farebbero incrementare la concentrazione degli NO_x in uscita. questa condizione può essere raggiunta con l'introduzione di più lance di immissione di reagente, ad altezze diverse.

Un notevole vantaggio di questo sistema è la semplicità impiantistica. Infatti le apparecchiature del processo SNCR son abbastanza facili da installare e non richiedono molto spazio.

La modalità con cui avviene l'iniezione di urea è mostrato in figura 2.4. si può così osservare che per consentire l'iniezione di reagente all'interno del range richiesto è necessario disporre di più di un livello di iniezione.

D'altro canto il processo SNCR ha un'efficienza di abbattimento modesta, pertanto è consigliabile utilizzare questo sistema per impianti che non hanno grandi variazioni in quantità e qualità del carico.

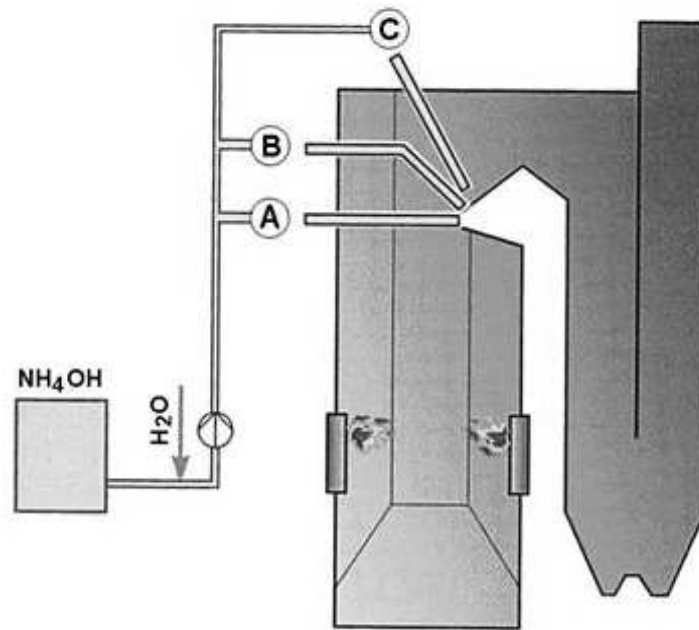


Figura 2.4 Il sistema SNCR. FONTE LG impianti oltre 50 MW

Il sistema SNCR però difficilmente raggiunge percentuali di abbattimento superiori al 70%, di solito oscilla tra valori compresi tra 30-60%.

Questo sistema viene adottato dalla maggior parte degli inceneritori grazie alla sua semplicità impiantistica associati ai bassi costi gestionali.

2.2.2.2 Riduzione catalitica selettiva (SCR)

Questo sistema è caratterizzato dalle stesse reazioni del precedente e lo stesso reagente, ma si diversifica per un elemento: il catalizzatore, il quale è in grado di aumentare le cinetiche di reazione, anche a basse temperature.

La riduzione catalitica selettiva indica la conversione selettiva degli ossidi di azoto (NO_x) ad azoto gassoso, in presenza di ossigeno gassoso e di un agente riducente (di solito inorganico, come l'ammoniaca), ma può essere anche organico (urea). Tale reagente viene iniettato a monte del catalizzatore.

Spesso la reazione è indicata con il nome DeNO_x che comunque include anche le tecniche per la rimozione degli ossidi di azoto dalle emissioni gassose. La reazione per la riduzione degli ossidi di azoto avviene sulla superficie del catalizzatore.

L'SCR degli NO_x , che usa ammoniaca (NH_3) come agente riducente è stato progettato brevettato all'inizio negli US da Engelhard Corporation nel 1957. Il catalizzatore originale, che impiegava platino o metalli del gruppo platino, erano insoddisfacenti perché

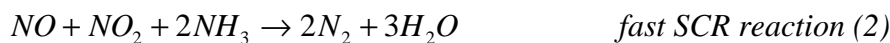
si doveva operare in un range di temperatura nel quale si formava nitrato di ammonio esplosivo. Si è scoperto che altri catalizzatori di base metallica avevano una bassa attività. Ricerche svolte in Giappone negli anni '60, in risposta alle severe regolamentazioni in campo ambientale hanno contribuito allo sviluppo di catalizzatori a base di ossidi di vanadio/titanio che hanno provato il successo di tale sistema e che ancora costituiscono un elemento attivo nell' abbattimento di NO_x da sorgenti stazionarie.

Il concetto di SCR è stato inizialmente usato per indicare l'abbattimento delle emissioni di NO_x da sorgenti stazionarie usando ammoniaca come agente riducente selettivo, (SCR- NH_3), ma ci sono anche altre tecnologie che impiegano altri reagenti riducenti come urea o HC. Però tra queste il processo SCR con l'utilizzo di ammoniaca è un processo stabilmente ben commercializzato per trattare le emissioni industriali.

Un largo numero di materiali catalitici sono stati analizzati per l'SCR di NO_x . Per quanto riguarda le emissioni stazionarie, NH_3 -SCR, vengono usati gli ossidi di tungsteno e vanadio, con supporto di titanio.

Reazione

Il sistema SCR- NH_3 consiste nel ridurre le emissioni degli NO_x con l'utilizzo di ammoniaca come agente riducente. Le reazioni che caratterizzano questo processo sono le seguenti:



Lo studio delle cinetiche delle reazioni ha dimostrato che la reazione (2) è la più veloce nel range di temperatura di 170-350°C. per temperature maggiori di 350°C, i contributi delle reazioni (1) e (2) sono gli stessi in grandezza. Comunque, per un range di temperature di 200-500°C, la reazione (3) è sempre la più lenta.

La reazione (1), che decorre velocemente in presenza di un opportuno catalizzatore in un intervallo di temperature compreso tra i 250 °C e i 450 °C, rende conto della stechiometria complessiva del processo in quanto gli ossidi di azoto sono costituiti per più del 90 % da NO.

In effetti, l' NO_2 è presente nei fumi di combustione in basse percentuali (intorno al 5%), per cui le reazioni (2) e (3) rivestono un ruolo secondario nel processo SCR.

Il termine “selettiva” si riferisce alla capacità dell’ammoniaca (NH_3) di reagire con l’NO invece di essere direttamente ossidata dall’ossigeno dell’aria; tale caratteristica è specifica dell’ammoniaca in

quanto non è stata osservata per altri riducenti, quali idrocarburi H_2 o CO . La reazione di ossidazione dell’ammoniaca ad opera dell’ossigeno è infatti altamente indesiderata in quanto riduce

l’efficienza del processo di denitrificazione sottraendo il reagente NH_3 e portando alla formazione di NO o di NO_2 .

Catalizzatore

I catalizzatori utilizzati possono avere forme geometriche differenti come quella a nido d’ape o a piastre come dimostrato in figura 2.5.

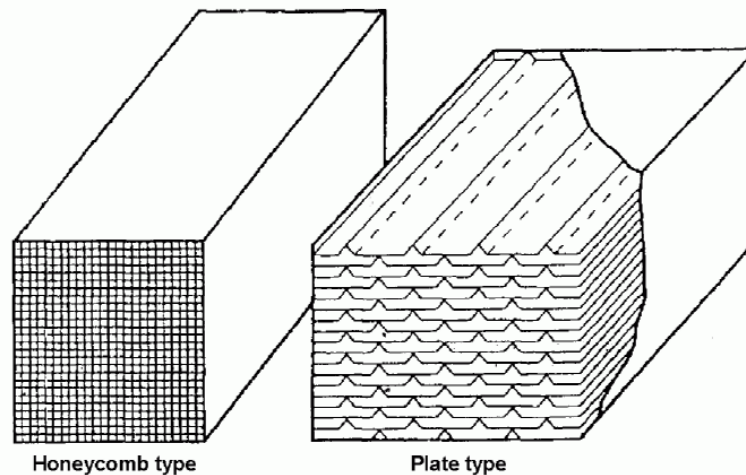


Figura 2.5 Tipi di catalizzatori *FONTE LG impianti oltre 50 MW*

I catalizzatori a nido d’ape presentano una maggiore superficie specifica, ciò contribuisce ad aumentare l’efficienza di abbattimento degli ossidi di azoto, ma va anche a limitare l’azione ossidante dell’ SO_2 . infatti la reazione di riduzione degli NO_x è maggiormente influenzata dalla superficie geometrica del catalizzatore, per via delle limitazioni diffusionali., mentre la reazione di ossidazione dell’ SO_2 è più sensibile al volume del catalizzatore. quindi una riduzione dello spessore catalitico non diminuisce l’efficienza di riduzione dell’ NO_x , ma riduce proporzionalmente l’ossidazione dell’ SO_2 .

Tuttavia i catalizzatori a piastre consentono una minore perdita di carico dei fumi di passaggio e una minore probabilità di occlusione dei canali.

Come catalizzatori per impianti SCR sono utilizzati quattro materiali.

- Ossidi di metalli pesanti, che consistono di TiO_2 come materiale base insieme ai componenti attivi (quelli che determinano l’attività catalitica) vanadio, tungsteno,

molibdeno, rame e cromo. In molti sono utilizzati il V_2O_5 con piccole quantità di WO_3 per allargare la finestra di temperatura a cui può avvenire la reazione e piccole quantità di SiO_2 per stabilizzare la struttura. Questo tipo di catalizzatore funziona in un intervallo di temperatura di 300 – 450 °C.

- Zeoliti, che sono materiali cristallini, alluminio silicati altamente porosi naturali o sintetici e che sono utilizzati tra 350 °C e 600 °C.
- Ossidi di ferro, sotto forma di particelle di ossidi di ferro con un sottile strato superficiale di fosfato di ferro.
- Carbone attivo, che consiste di carbone polverizzato miscelato con inerti e sinterizzato sotto forma di “pellets”. Poiché il carbone attivo non è stabile alle alte temperature la temperatura di funzionamento è di 100 – 220 °C e pertanto può essere utilizzato solo per SCR in configurazione “tail –end”.

I catalizzatori sono prodotti con diversi diametri dei canali; la scelta del diametro è effettuata sulla base della concentrazione e delle caratteristiche delle polveri nei fumi e della perdita di carico ammessa del reattore SCR.

Il volume di catalizzatore dipende dalle caratteristiche dello stesso (ad es. dalla sua attività), e dalle condizioni operative (efficienza di abbattimento richiesta, composizione e temperatura dei fumi, presenza di veleni per il catalizzatore).

I singoli elementi di catalizzatore sono assemblati insieme in un modulo di catalizzatore, che insieme ad altri forma lo strato di catalizzatore del reattore SCR.

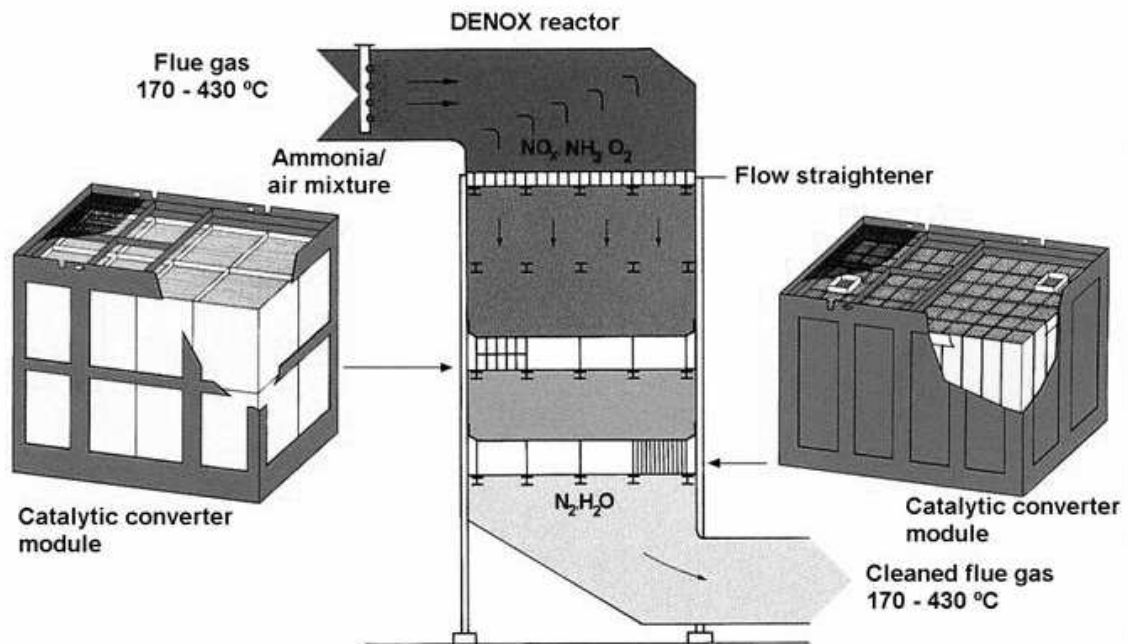


Figura 2.6 Schema semplificato del reattore DeNOx. Struttura degli elementi (a destra) e dei moduli (a sinistra) catalitici. Passaggio e reazione del gas di processo attraverso il reattore mediante passaggio discendente.

Ci sono tre possibilità di inserire il reattore SCR nella linea di depurazione dei gas; le condizioni di esercizio, come la temperatura dei fumi, devono essere adatte al catalizzatore utilizzato.

Le tre configurazioni sono high-dust, low-dust e tail-end (tail-gas) (figura 2.7)

- *High dust*. Grazie alla elevata temperatura dei fumi in uscita dalla caldaia (320 – 350 °C) non è necessario riscaldare i fumi in ingresso al reattore SCR. Gli inconvenienti sono dovuti al fatto che il catalizzatore può subire fenomeni di abrasione da parte delle ceneri presenti nei fumi e di avvelenamento, che possono portare alla perdita di attività dello stesso, con conseguente minor efficienza di abbattimento degli NO_x. Nel caso di installazione di reattori SCR su unità già esistenti deve essere trovato lo spazio nei pressi della caldaia. Uno dei vantaggi di questo sistema è sicuramente quello di non dover riscaldare i fumi per il trattamento catalitico, poiché i gas di scarico risultano sufficientemente riscaldati. Il tipo di catalizzatore usati per questo sistema è quello di tipo “plate” poiché evita l’intasamento dei canali dovuto all’alto tenore di polveri.
- La configurazione *low-dust* evita almeno in parte i problemi della configurazione high-dust, in quanto le polveri sono abbattute dall’elettrofiltro posto a monte. Il maggior vantaggio è la minor sollecitazione meccanica del catalizzatore, che allunga la vita di quest’ultimo. Comunque, poiché il processo opera senza riscaldamento supplementare dei fumi, è necessaria l’installazione di un elettrofiltro ad alta temperatura. Questa configurazione può rivelarsi difficilmente applicabile nel caso di retrofit di unità esistenti. Inoltre il catalizzatore è più soggetto alla deposizione di bisolfato d’ammonio.
- La configurazione *tail-end* è adatta per unità esistenti e presenta minori inconvenienti legati a problemi di erosione e di perdita di attività del catalizzatore. Infatti essendo posto a valle del sistema di rimozione del particolato, viene ridotto l’effetto delle ceneri sul catalizzatore. Il volume di catalizzatore è inferiore rispetto alla configurazione high-dust in quanto può essere utilizzato un catalizzatore con un passo più piccolo. I fumi devono però essere riscaldati da appositi bruciatori a gas prima dell’ingresso fino alla temperatura che consente al catalizzatore di funzionare.

Il recente sviluppo di catalizzatori che operano a basse temperature (170-190 °C) offre la possibilità di evitare l’utilizzo di combustibile per riscaldare i fumi in entrata al reattore.

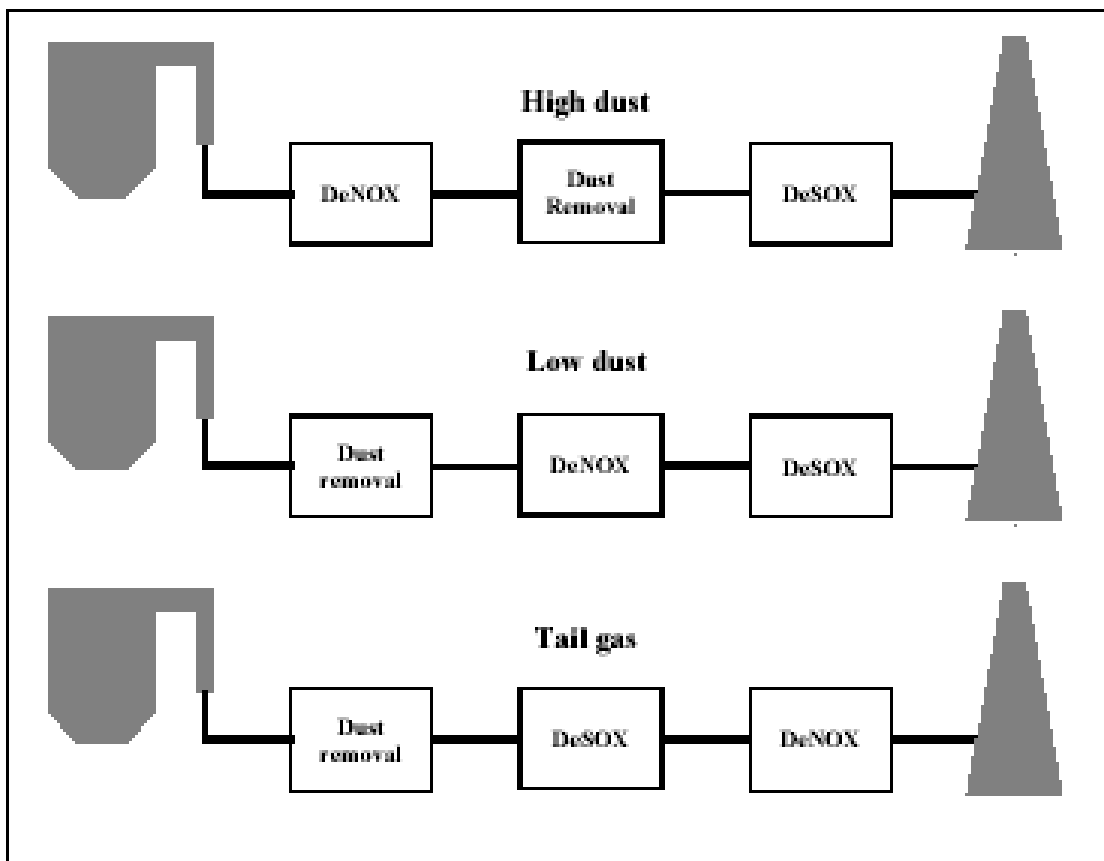


Figura 2.7. Possibili configurazioni di abbattimento degli NO_x. I tre schemi rappresentano le tre possibili locazioni del reattore SCR nella filiera di depurazione. FONTE: LG impianti oltre 50 MW.

2.2.2.3 Confronto tra il sistema SCR e SNCR

Un possibile svantaggio della tecnologia SCR è l'ammonia slip, dovuto alla reazione incompleta dell'ammoniaca con gli NO_x che porta al rilascio di piccole quantità di ammoniaca nei fumi a valle del reattore. L'ammonia slip aumenta con il rapporto NH₃/NO_x e con il decrescere dell'attività del catalizzatore e può portare a:

- formazione di solfato di ammonio, che può depositarsi sui componenti a valle, come i riscaldatori dell'aria;
- presenza di ammoniaca nelle acque reflue dei sistemi di desolforazione del tipo Wet FGD e nelle acque di lavaggio dei riscaldatori dell'aria;
- aumento del contenuto di ammoniaca nelle ceneri leggere.

I principali vantaggi della tecnologia SCR sono:

- il processo SCR può essere utilizzato per tutti i tipi di combustibile (olio combustibile, carbone, lignite, petcoke, gas naturale, gas di processo etc)

- la reazione di denitrificazione non porta alla formazione di nessun composto che non sia l'azoto molecolare;
- l'efficienza di abbattimento degli NO_x può arrivare al 90% e oltre;

In definitiva si possono riassumere le caratteristiche dei due sistemi di abbattimento NO_x nella Tabella 2.1

Tabella 2.1 Vantaggi e svantaggi delle misure secondarie di abbattimento degli NO_x : SCR ed SNCR a confronto.

Tecnica	VANTAGGI	SVANTAGGI
SNCR	minor complessità impiantistica	bassa efficienza (<50-70%)
	minor costo di installazione	elevato slip di ammoniaca
	minor costo di gestione	elevato consumo di reagente
SCR	elevata efficienza (>90%)	maggior complessità impiantistica
	efficace anche per altri inquinanti	maggior costo di installazione e di gestione
	ridotto consumo di reagente	necessità di preriscaldamento dei fumi in ingresso

I costi di investimento per un dispositivo SCR sono notevoli rispetto a quelli di un sistema SNCR, generalmente sono circa cinque volte i costi di un impianto SNCR equivalente a seconda delle dimensioni, la riduzione NO_x e la configurazione tecnica. Tali costi sono più elevati poiché si tratta di installare un reattore catalitico nella linea fumi dell'impianto, infatti dipendono fortemente dal volume del reattore che si intende installare e quindi dalla portata dei fumi da trattare.

D'altro canto i costi di gestione sono maggiori in un impianto SNCR poiché si consuma una quantità elevata di reagente. C'è però da precisare che per quanto riguarda la voce "costi gestionale" si nota un maggior consumo di energia del ventilatore di estrazione fumi per superare la perdita di pressione attraverso il catalizzatore.

Inoltre i valori degli NO_x pubblicati per gli impianti di incenerimento dei rifiuti basati sulla tecnologia SNCR sono di solito compresi tra 150-180 mg/Nm^3 . Invece il processo SCR raggiunge valori di NO_x nel gas in uscita al camino che, negli impianti di rifiuti variano dai 30 agli 80 mg/Nm^3 , e quindi valori molto al di sotto di quelli ottenibili con un impianto che adotta la tecnica di abbattimento NO_x SNCR.

Un altro vantaggio del sistema catalitico SCR è l'ulteriore abbattimento delle diossine. Infatti il catalizzatore, adibito per la riduzione degli ossidi di azoto, è anche in grado di fissare l'ossigeno libero presente nei fumi e quindi di innescare la reazione di ossidazione dei microinquinanti organici, utilizzando le stesse condizioni operative di quelle caratterizzanti la reazione di riduzione. Inoltre con questo sistema si elimina il pericolo delle corrosioni delle superfici della caldaia dovute alla cattiva atomizzazione delle lance.

2.3 Criteri operativi generali del sistema SCR

Dopo aver elencato e descritto le diverse tecniche di abbattimento degli ossidi di azoto, si pone l'attenzione sulle scelte operative e tecnologiche che caratterizzano il sistema SCR.

2.3.1 Scelta del catalizzatore

I catalizzatori commerciali dell'SCR sono composti da un'elevata area superficiale di TiO_2 che fa da supporto ai componenti attivi: pentossido di vanadio e triossido di tungsteno.

Il vanadio è responsabile dell'attività della reazione di catalisi in quanto per la riduzione degli NO_x , ma anche per l'ossidazione indesiderata di SO_2 a SO_3 . Il contenuto di V_2O_5 è empiricamente tenuto basso (0.3-1.5%, del peso).

È stato recentemente evidenziato dalla spettroscopia di Raman che per un basso carico di Vanadio, si formano principalmente specie vanadate sulla superficie, mentre per alte concentrazioni di vanadio è stata osservata anche una fase V_2O_5 cristallina. L'efficienza dell'SCR degli NO_x aumenta con le specie polimeriche vanadate. Infatti queste specie coordinate sulla superficie contengono i gruppi V-OH, i quali agiscono come siti di Brønsted capaci di legare l' NH_3 durante la reazione. È stato dimostrato che l'energia di attivazione nella reazione DeNO_x-SCR, diminuisce all'aumentare della concentrazione superficiale di ossido di vanadio, tuttavia presenta anche l'effetto indesiderato dell'ossidazione da SO_2 a SO_3 , per cui la composizione percentuale è calcolata in base al contenuto di SO_2 presente nei fumi da trattare.

WO_3 è usato ad una concentrazione più alta (10%): questo agisce da promotore, allargando la finestra delle temperature della reazione SCR, impartisce una stabilità termica superiore, migliora il numero e la forza dei siti attivi e riduce contemporaneamente l'attività nei confronti dell'ossidazione di NH_3 e di SO_2 .

Alcuni catalizzatori commerciali utilizzano MoO_3 anziché WO_3 , il quale generalmente è meno attivo, ma è più tollerante nei confronti dell'As.

Uno svantaggio del catalizzatore a base di V_2O_5 è la deattivazione dei siti dovuto all'invecchiamento di tale catalizzatore.

La scelta del catalizzatore è importante al fine di assicurare una marcia continuativa per tutta una campagna senza fermate intermedie imposte dallo sporco e/o intasamento dei pacchi del catalizzatore.

2.3.2 Scelta della soluzione ammoniacale riducente

Il reagente riducente utilizzato per far avvenire la reazione DeNOx è l'ammoniaca che può essere stoccata in forma anidra o in soluzione acquosa. Entrambe agiscono in maniera simile quando vengono iniettate nel gas di processo. Le due forme si differenziano per lo stoccaggio, per il sistema di vaporizzazione e non di meno per la pericolosità della sostanza.

Infatti l'ammoniaca anidra è molto volatile e richiede serbatoi pressurizzati. L'ammoniaca anidra è più concentrata rispetto all'ammoniaca acquosa e pertanto deve essere diluita prima dell'iniezione. Inoltre è un gas estremamente pericoloso per la sicurezza degli operatori, ed è pertanto necessaria un'autorizzazione per l'utilizzo.

Per questi motivi è preferibile l'utilizzo della soluzione ammoniacale

2.3.3 Dosaggio della soluzione ammoniacale riducente

Il catalizzatore fa in modo che l'ammoniaca venga adsorbita sulla superficie, in maniera tale da avere un buon DeNOx anche a basse concentrazioni di ammoniaca nel gas in entrata.

Così un eccessivo dosaggio di ammoniaca aumenta solo la concentrazione di ammoniaca nei siti attivi e il DeNOx rimane pressoché costante, anche in caso di sovradosaggio di ammoniaca.

Di solito sono raccomandate le emissioni di ammoniaca di circa 10 ppm in media.

Un'altra reazione tra NH_3 e NO_2 deve essere considerata, specialmente a basse temperature. infatti NH_3 e NO_2 formano l'ammonio nitrato NH_4NO_3 , il quale si deposita nel catalizzatore in forma solida o liquida ad una temperatura inferiore a 180°C , diminuendo la prestazione del DeNOx. Un esempio è dimostrato in Figura 2.8.

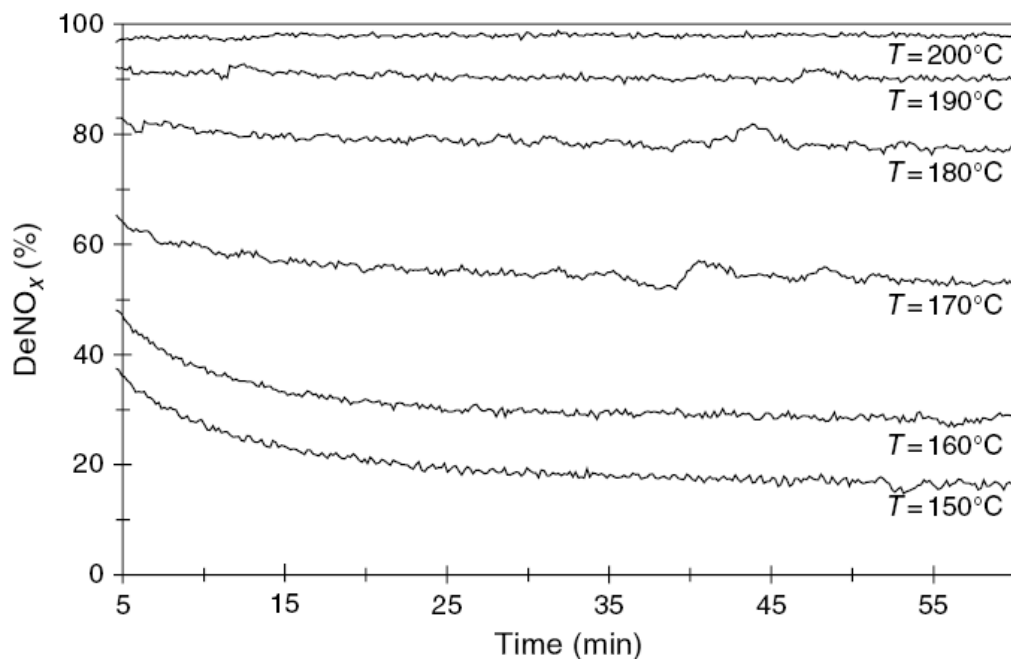
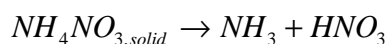
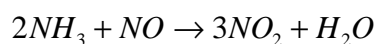


Figura 2.8. Esperimento svolto sull'avvelenamento del catalizzatore a base di V_2O_5/WO_3-TiO_2 SCR a varie temperature, dovuto alla formazione di nitrati di ammonio. Fonte: Past and present in DeNOx catalysis

Alcuni esperimenti hanno dimostrato che la formazione di nitrato di ammonio è un processo reversibile, infatti il catalizzatore ritorna alla originale attività non appena si supera la temperatura di 200°C.



L'NO presente nel gas reagisce con HNO_3 per formare NO_2 :



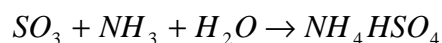
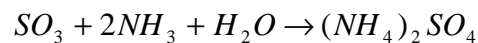
Buoni sistemi SCR combinano alte conversioni di NO_x con un basso slip di ammoniaca, la quale è un'emissione secondaria indesiderata. Per questo i catalizzatori SCR sono stati progettati per un alto grado di conversione dell'ammoniaca nel modulo catalitico e per fare in modo che l'ammoniaca residua non convertita venga trattenuta nella superficie catalitica. Per questa ragione tutti i catalizzatori SCR altamente attivi hanno superfici acidificate, le quali legano l'ammoniaca e provvedono a fornire un'alta concentrazione locale di questo reagente nei siti attivi SCR. In ogni caso, la capacità del catalizzatore di trattenere l'ammoniaca sul proprio sito attivo dipende fortemente dalla temperatura.

Inoltre lo slip di ammoniaca si verifica soprattutto nei seguenti casi: se il catalizzatore SCR è freddo, sottodimensionato, non attivo (deattivato).

2.3.4 Deattivazione del catalizzatore

Ogni catalizzatore perde lentamente la sua attività durante la marcia dell'impianto. I principali fattori di deattivazione sono:

- Avvelenamento. Infatti alcuni composti presenti nel gas di processo possono depositarsi sulla superficie del catalizzatore causando la sua deattivazione. I più importanti "veleni" per il catalizzatore sono: sali dei metalli alcalini sodio (Na) e potassio (K), ma anche Sali di calcio (Ca) e magnesio (Mg).
- Sinterizzazione termica: una lunga esposizione di temperature sopra ai 425 °C può aumentare la sinterizzazione del catalizzatore, che riduce l'attività superficiale del catalizzatore.
- Intasamento del sistema poroso. Piccole particelle possono penetrare nel sistema poroso del catalizzatore e di conseguenza restringere o bloccare il trasporto dei reagenti (NO, NH₃, O₂) sulla superficie interna del catalizzatore. Questo problema è tenuto in considerazione nel momento della progettazione del catalizzatore.
- Condensazione di acqua, acido solforico e solfato ammoniacale. la condensazione di acqua sul catalizzatore per esempio durante l'avvio o l'arresto potrebbe causare la deattivazione. Infatti in presenza di ammoniaca, il catalizzatore promuove l'ossidazione di SO₂ in SO₃, che reagisce con i composti azotati:



La deposizione dei sali solfato e bisolfato di ammonio generati degrada rapidamente i materiali che costituiscono il catalizzatore. diminuendo rapidamente la capacità di abbattimento del sistema.

2.3.4.1 Rigenerazione del letto catalitico

I fattori indice della rigenerazione del catalizzatore sono:

- Aumento della concentrazione di NO_x
- Aumento dello slip di ammoniaca
- Aumento delle perdite di carico attraverso il reattore

In generale vengono svolti i seguenti interventi di rigenerazione del letto catalitico per quanto riguarda il sistema SCR.

- rigenerazione termica: è un trattamento che impone di utilizzare temperature maggiori rispetto a quelle di esercizio (a circa 500°C), consentendo di asportare i veleni che si insediano nei siti attivi del catalizzatore, come ad esempio composti a base di SO₃
- rigenerazione tramite lavaggi: si utilizzano appunto lavaggi con acqua deionizzata per asportare polvere e depositi alcalini, in questo modo è possibile rimuovere anche alcuni metalli pesanti. D'altro canto questa soluzione presenta lo svantaggio nella mancanza di selettività nei confronti delle specie da rimuovere, poiché possono venire asportate anche le specie attive.

2.4 Situazione italiana

Dal rapporto APAT sulla gestione dei rifiuti urbani, riferito al 2009 emerge che in Italia la scelta del sistema dell'abbattimento degli ossidi di azoto verte sul sistema non catalitico SNCR, infatti dal rapporto emerge che su 51 impianti di incenerimento censiti, solo 16 adottano il sistema SCR come illustrato nella seguente figura.

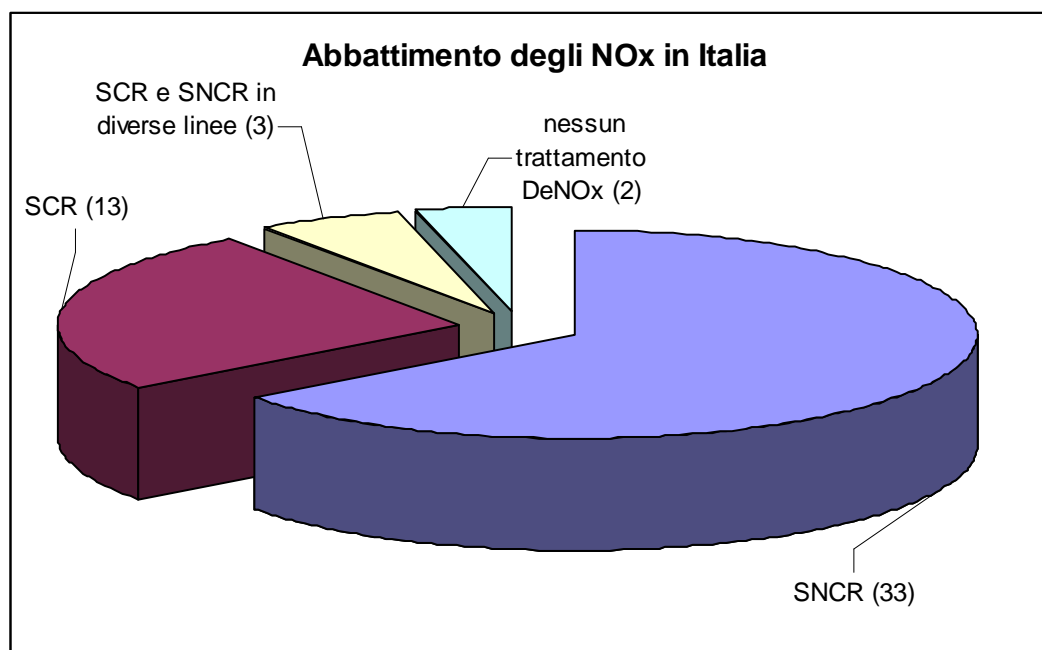


Figura 2.9. Situazione dell'abbattimento degli ossidi di azoto nei diversi impianti di incenerimento in Italia. Fonte dati APAT.

Essendo dati riferiti alla situazione italiana degli inceneritori nel 2009, il termovalorizzatore di Schio si inserisce nel sistema di abbattimento SNCR, ma dopo le modifiche apportate lo scorso anno, la sua posizione si insedia tra quei termovalorizzatore (come quello di Brescia)

che presentano alcune linee dell'impianto che utilizzano il sistema SCR , mentre altre mantengono la soluzione dell'SNCR.

Dai dati del censimento si evince inoltre che gli inceneritori che adottano il sistema SCR, sono prevalentemente sorti in anni recenti, questo significa che in fase di progettazione di un nuovo termovalorizzatore, risulta quasi scontato inserire il sistema SCR come abbattimento degli ossidi di azoto, questo in previsione dei futuri restringimenti legislativi dei limiti di emissione. Infatti introdurre il sistema SCR a impianto già avviato non solo risulta una spesa per l'impianto, ma bisogna garantire che ci sia anche lo spazio per effettuare l'intervento di inserimento.

Si può comunque affermare che la situazione italiana nei prossimi anni si evolverà, dando maggior spazio alla nuova tecnologia per l'abbattimento degli ossidi di azoto.

Capitolo 3

Descrizione della Linea 2 di termovalorizzazione

Il termovalorizzatore di Schio è uno dei primi impianti di incenerimento in Italia che preveda il recupero energetico. Ha una capacità di circa 200 tonn/giorno, è costituito da 3 linee parallele, alimentate da un'unica fossa e dotate di sistemi separati per la depurazione dei fumi.

Linea 1: fu costruita tra il 1981 e il 1982 ed entrò in esercizio nel 1983; ha una potenzialità di incenerimento di 36 tonn/giorno di rifiuto urbano, composta di una sezione di recupero termico e energetico e di una linea di lavaggio fumi a semisecco, completa di filtro elettrostatico e filtro a maniche. Inoltre è dotata di un sistema di abbattimento degli ossidi di azoto SNCR.

Linea 2: l'ampliamento dell'impianto di smaltimento dei rifiuti solidi urbani fu predisposto nel 1985, con questa nuova linea che entrò in esercizio nel 1991. tale linea, con potenzialità di smaltimento di 60 tonn/giorno di rifiuto urbano, si compone una sezione per il recupero del termico ed energetico e di una linea di depurazione dell'effluente gassoso che attualmente è composta da: filtro elettrostatico, reattore a secco, filtro a maniche e sistema di abbattimento DeNO_x SCR.

Linea 3: la costruzione di questa linea di incenerimento, con una potenzialità di smaltimento di 100 tonn/giorno, è avvenuta tra il 2001 e il 2003. Per la depurazione dell'effluente gassoso, la Linea 3 si avvale della stessa tipologia di apparecchiature utilizzate dalla Linea 2.

I rifiuti trattati sono di diverso tipo e comprendono:

- rifiuti tal quale, provenienti da comuni che non effettuano la raccolta differenziata;
- rifiuto secco;
- rifiuti ingombranti (vengono preliminarmente sottoposti a triturazione);
- rifiuti ospedalieri;
- rifiuti industriali assimilabili agli urbani.

Il potere calorifico dei rifiuti urbani è stimabile attorno ai 3500 kcal/kg. Il carico termico è stimato 33.2 MW_{th}.

L'impianto nel corso degli anni ha subito costanti lavori, sia per l'adeguamento a normative sempre più restrittive riguardanti la riduzione delle emissioni che per il potenziamento. Infatti nel 2009 si sono sviluppate delle progettazioni relative alla modifica delle linee 2 e 3.

In particolare nel presente lavoro di tesi si focalizza sulla Linea 2, pertanto ne verrà di seguito presentata la descrizione prima e dopo l'introduzione della tecnologia DeNOx SCR.

3.1 Descrizione della Linea 2 prima del revamping

Si considera l'impianto diviso nelle seguenti sezioni:

- ricevimento e stoccaggio dei rifiuti;
- incenerimento e recupero termico;
- ciclo termico e produzione di energia elettrica;
- depurazione fumi.

3.1.1 Ricevimento e stoccaggio

I rifiuti che raggiungono l'impianto vengono pesati e successivamente scaricati nella fossa.

La capacità della fossa è dimensionata per contenere un volume occupato da 130 tonnellate di rifiuti.

Le operazioni di caricamento del forno consistono nella selezione del rifiuto che il gruista deve inviare alle tramogge per mezzo di un carro ponte munito di benna.

Grazie al carro ponte la benna può scorrere lungo tutta l'area di stoccaggio. Inoltre la benna è provvista di un rilevatore per il peso del rifiuto selezionato.

Le tramogge di carico dei forni sono visualizzate dall'operatore sul monitor per mezzo di una telecamera.

Caricati nella tramoggia i rifiuti attraversano un condotto verticale ed entrano nel forno.

3.1.2 Incenerimento e recupero termico

In questa parte di impianto avviene l'incenerimento del rifiuto. Una volta scaricato il rifiuto nell'apposita tramoggia, questi raggiunge la camera di combustione.

Il forno di incenerimento sarà alimentato con 60tonn/giorno di rifiuti costituiti da sovralli (scarti provenienti dal processo di compostaggio e da rifiuti industriali assimilabili agli

urbani. Questa miscela di rifiuti sarà prelevata dalla fossa, mediante il carroponete munito di benna, e scaricata nella tramoggia di alimentazione del forno. Un alimentatore a spinta, installato sul fondo della tramoggia, spinge i rifiuti sulla prima parte della griglia, dove vengono sottoposti ad un processo di essiccamento e successivamente avviene l'accensione e la combustione senza l'apporto di energia dall'esterno.

Mediante il movimento dei barrotti, i rifiuti percorrono tutta la griglia, bruciando a man mano, sino alla completa combustione, ottenendo così un efficace e sicuro incenerimento.

I barrotti hanno la parte superiore fissa e la parte inferiore mobile a scomparsa completa, in questo modo la parte mobile con la traslazione orizzontale sposta il materiale al gradino successivo.

Attraverso i barrotti viene insufflata l'aria comburente. Essa può essere dosata nella quantità necessaria per ognuna delle due zone della griglia.

Questo dosaggio a zone è un ulteriore mezzo per regolare la combustione variando la qualità e la quantità dell'aria.

Le scorie e le ceneri cadono in un vascone pieno d'acqua. Dal vascone, tramite un nastro a tapparelle metalliche, le scorie vengono estratte e scaricate su un nastro trasportatore che le deposita sul piazzale; qui saranno trasportate in discarica.

La quantità di scorie prodotte è circa il 20-30% in peso dei sovralli bruciati, compresa l'umidità con cui vengono scaricate.

I fumi in uscita, dalla camera di combustione, alla temperatura di 1200-1300 °C, vengono raffreddati in una caldaia a tubi d'acqua per il recupero del calore e da essa escono a 300°C.

Il forno della Linea 2 è stato progettato per le seguenti condizioni operative:

Tabella 3.1 Tab. Condizioni nominali Linea 2 in fase di progettazione nel 1991.

CONDIZIONI NOMINALI LINEA 2	
Potenzialità nominale	2500 [kg/h]
Potere calorifico di progetto	3500 [kcal/kg]
Minimo potere calorifico	1200 [kcal/kg]
Carico termico nominale	8750000 [kcal/h]
Carico termino nelle condizioni di sovraccarico	9625000 [kcal/h]
Volume fumi nelle condizioni di sovraccarico	24000 [Nm ³ /h]
Temperatura normale in camera di combustione	1200-1300 [°C]
Volume aria di combustione nelle condizioni nominali	21250 [Nm ³ /h]
Superficie della griglia	14 [m ²]
Carico specifico della griglia	178 [kg/m ² h]
Volume camera di combustione	52 [m ³]
Volume camera di post-combustione	72 [m ³]
Carico termico in camera di combustione e post-combustione	78300 [kcal/m ³ h]
Rendimento caldaia	77 %
Scorie prodotte	25 %
Incombusti non putrescibili nelle scorie	<5 %
Incombusti putrescibili nelle scorie	<2 %

3.1.2.1 Forno

La camera di combustione e le apparecchiature relative all'aria comburente ad alla depurazione fumi sono state progettate per bruciare sovralli con p.c.i. di 3500 kcal/kg. Il forno presenta inoltre una notevole elasticità potendo trattare rifiuti fino ad un p.c.i. di 1200 kcal/kg (limite minimo affinché la combustione si autosostenga. Nella camera di combustione la temperatura supererà sempre gli 800 °C per distruggere ogni cattivo odore e per rendere sterili i gas di combustione e le scorie.

3.1.2.2 Griglia

Il forno è dotato di una griglia a due elementi. Ogni elemento di griglia è costituito da una serie di barrotti dotati di movimento alternato (avanti e indietro) e di rotazione attorno ai perni dal movimento combinato delle due serie di barrotti si ottiene che nello stesso punto della griglia si crei prima una zona a “valle” e subito dopo una zona a “monte”. La conseguenza di questo movimento verticale nella griglia stessa è di rivoltare costantemente i rifiuti, esponendo tutte le loro parti all'aria comburente, ottenendo così una combustione efficace. Un ulteriore dispositivo per assicurare un'ottima combustione è dato dal salto intermedio tra le due zone di griglia.

La griglia è divisa in due zone aventi ognuna un'inclinazione diversa.

Nella prima zona del forno avviene la fase di essiccamento del rifiuto, segue la fase di combustione e per ultimo il completamento della combustione delle scorie.

La pendenza è accentuata nella prima zona (zona di pre-essiccazione) ma diminuisce nella seconda (zona di combustione e finitura). Con questo concetto costruttivo si ottiene la diminuzione della velocità di avanzamento del combustibile man mano che esso percorre la griglia, avendosi una riduzione del volume dei rifiuti durante la combustione, lo strato sulla griglia diminuisce verso la parte finale, diminuzione che viene corretta con le diverse inclinazioni. In questo modo il tempo di permanenza del combustibile aumenta gradualmente nelle diverse zone ed esso è maggiore nella zona di fine combustione, permettendo così un incenerimento completo di tutte le parti combustibili.

I barrotti sono costruiti in modo da eliminare quasi completamente il passaggio delle parti fini dei rifiuti attraverso la griglia; in tal modo il contenuto di materiale putrescibile nelle scorie è inferiore al limite indicato nei dati di progetto.

Un parametro fondamentale per il dimensionamento della griglia è senz'altro il carico termico superficiale della griglia, ovvero la quantità di combustibile che si può bruciare, per unità di superficie della griglia e per unità di tempo, espresso in kcal/m²h. Questo carico ovviamente deve essere tale da assicurare un'elevata efficienza di combustione in base ai tempi di residenza dei rifiuti.

La caratteristica fondamentale della griglia consiste nell'avere una superficie di combustione orizzontale ed un movimento controllato che favorisce il mescolamento del materiale combustibile. Questo permette di ottenere dei rendimenti elevati con una minore lunghezza. Grazie ad una miglior distribuzione dell'aria comburente si ottiene una riduzione del flusso totale limitando la formazione termica di NO_x .

3.1.2.3 Camera di combustione

La camera di combustione è progettata in modo da assicurare una combustione regolare dei rifiuti solidi e dei residui gassosi grazie alla sua forma, alla sua ampiezza ed alla sua qualità e spessore della muratura refrattaria. Inoltre è studiata in modo che il calore venga accumulato nella parte più calda del forno, per venir poi ceduto per irraggiamento ai rifiuti freschi in entrata.

Le volte sospese della camera di combustione dirigono i flussi del gas e con il loro calore irradiante migliorano l'essiccazione e la combustione dei rifiuti.

L'ampio volume della camera di combustione, favorendo un'ottima miscelazione dell'aria comburente con i residui gassosi, crea le condizioni necessarie alla loro combustione ed inoltre riduce la velocità dei fumi stessi, evitando così il trasporto di polveri.

3.1.2.4 Camera di post-combustione

Il forno è stato progettato per incenerire sovralli ad alto potere calorifico. Per questo motivo sopra la parte terminale della griglia è stata prevista una camera di post-combustione in cui, grazie alla possibilità di miscelazione con tra i fumi ed aria secondaria, è possibile mantenere stabilmente una temperatura di 1200-1300°C. i fumi vengono mantenuti per almeno 2 secondi a tali condizioni di temperatura.

Il tempo di combustione viene assicurato dalle dimensioni della camera di post-combustione divisa dalla sottostante camera di combustione da un restringimento accentuato del passaggio dei fumi in cui si crea un effetto Venturi. Per aumentare questo effetto sono previste due serie di ugelli di aria secondaria posizionati in modo da tagliare il flusso del gas. Le relativamente ridotte dimensioni trasversali del passaggio e la velocità di sbocco dell'aria dagli ugelli sono tali che tutta la sezione venga interessata dalla turbolenza.

I gas, ben miscelati in questa zona, completano quindi la loro combustione nel vano superiore detto appunto camera di post-combustione. Questa configurazione è ottimale dal punto di vista della distribuzione delle temperature. La temperatura più bassa viene registrata nella zona inferiore, appena sopra le griglie, di modo che si evitano la fusione delle ceneri e quindi

blocchi nel funzionamento del forno. La temperatura più elevata si ha nella zona di turbolenza dove gli ugelli dell'aria secondaria funzionano da veri e propri bruciatori di post-combustione e dove l'eventuale rammollimento delle ceneri volanti crea molto meno problemi.

Il gradiente di temperatura va poi riducendosi di qualche decina di gradi verso l'uscita del forno, permettendo una buona decantazione delle ceneri nella tramoggia di raccolta posta sotto l'uscita.

In camera di post combustione vi è installato un bruciatore secondario, in modo da mantenere una temperatura elevata (maggiore di 800°C) dei fumi, nei periodi transitori di avviamento e di spegnimento.

I dati di dimensionamento della camera di postcombustione sono quelli stabiliti dalla legge 915 nonché dalla normativa tedesca del settembre 1974 per i forni di incenerimento rifiuti.

Il complesso forno-postcombustione è realizzato in robusta carpenteria metallica tamponata, tale da reggere il rivestimento interno realizzato con materiale refrattario, ad alto contenuto di allumina, ed isolante nonché le sollecitazioni termo meccaniche derivanti dal funzionamento.

3.1.2.5 Sistema di controllo

Il forno sarà equipaggiato con le apparecchiature necessarie per il controllo della temperatura tra 1200 e 1300°C nonché del tenore di ossigeno nei fumi sopra il valore minimo del 6%. Il regolatore automatico della temperatura, in funzione della temperatura rilevata in camera di combustione agisce sul bruciatore ausiliario e sulla portata di aria secondaria in modo da mantenere la temperatura tra 1200 e 1300°C.

In termini pratici, quando la temperatura si abbassa, avvicinandosi ai 1200°C il regolatore inserisce il bruciatore ausiliario; mentre quando la temperatura sale verso i 1300°C il regolatore immette aria secondaria in eccesso, in modo da evitare il superamento del campo di temperatura previsto.

3.1.2.6 Sistema di aria comburente

L'aria comburente viene alimentata al forno tramite due circuiti separati:

- circuito aria primaria che viene prelevata dalla fossa di stoccaggio ed inviata sottogriglia (*aria polverosa*). L'aria primaria è riscaldata tramite un sistema di preriscaldamento che utilizza il calore sottratto alla griglia dal sistema di raffreddamento ad

acqua. In questo modo è possibile far fronte alle variazioni del nel potere calorifico dei rifiuti.

- circuito dell'aria secondaria che viene prelevata dal locale forni e soffiata ad alta velocità tramite ugelli in corrispondenza ai nasi di turbolenza realizzati alla base della camera di post-combustione (*aria atmosferica*). L'aria necessaria alla combustione secondaria viene immessa a velocità superiori rispetto alla griglia ed ha lo scopo di portare a completamento la reazione di combustione, realizzando una condizione di eccesso di ossigeno e una turbolenza che assicura un mescolamento ottimale di combustibile e comburente.

La serranda di regolazione dell'aria primaria è motorizzata ed abbinata alla regolazione automatica della pressione sottogriglia e del contenuto di ossigeno in uscita dalla camera di post-combustione.

I condotti di convogliamento dell'aria sono dimensionati in modo da mantenere la velocità dell'aria sempre inferiore ai 15 m/s.

La serranda di regolazione dell'aria secondaria è anch'essa motorizzata e abbinata alla regolazione automatica della temperatura in camera di post-combustione.

In sede di avviamento dell'impianto l'alimentazione dei rifiuti potrà avvenire solo dopo che sia stata raggiunta nella camera secondaria la temperatura minima di legge. Questa temperatura viene raggiunta tramite combustibile convenzionale. Successivamente si può alimentare i rifiuti nel forno e ridurre il flusso di detto combustibile in modo da rispettare le condizioni operative prescritte.

L'aria per la combustione viene insufflata attraverso i barrotti. Il dosaggio della quantità insufflata è sempre in funzione della qualità della combustione che si vuole ottenere.

3.1.2.7 Controllo della combustione

Al fine di raggiungere un'alta efficienza e flessibilità al sistema di combustione dell'impianto, si è progettato un sistema di controllo in modo da garantire un'elevata affidabilità di esercizio. In particolare il sistema di controllo è volto a:

- garantire un'adeguata efficienza in caso di variazione merceologica e del quantitativo di rifiuto;
- consentire una completa combustione dei materiali, minimizzando il contenuto di incombusti;
- completare la combustione dei prodotti gassosi;
- assicurare una portata, temperatura e pressione costanti del vapore surriscaldato, per il recupero energetico.

Al fine di poter condurre al meglio il processo di combustione vengono effettuate delle misurazioni in campo riguardante i seguenti parametri:

- portata di vapore
- tenore di O₂ nei fumi
- temperatura della griglia
- portata di aria primaria e secondaria

Infatti il contenuto di O₂ nei fumi è un prezioso indice che determina l'andamento della combustione.

Sostanzialmente i dispositivi di regolazione automatica della combustione riguardano:

- regolazione dello spintore di alimentazione
- regolazione della velocità dei barrotti
- regolazione dell'aria primaria e dell'aria secondaria.

3.1.2.8 Sistema di estrazione scorie

I residui solidi di combustione, essenzialmente costituiti dalle ceneri e scorie scaricate dall'ultimo gradino di griglia, attraverso uno specifico condotto, detto pozzo scorie, sono convogliati alla sottostante vasca di estinzione a umido delle scorie. Nella stessa vasca termina anche il materiale di piccole dimensioni che passa attraverso gli interstizi delle griglie, grazie ad apposite tramogge e relativi condotti.

La vasca di estinzione delle scorie è dragata da un trasportatore a catena, mosso da un robusto motoriduttore, che convoglia le scorie al nastro successivo, che provvede al loro allontanamento.

Sia il pozzo scorie che le tramogge sottogriglia hanno una tenda a guardia idraulica, sfociando sotto il pelo libero dell'acqua, non solo per evitare indebite dispersioni, ma anche per assicurare la tenuta del forno, così da non generare incontrollati flussi d'aria, in quanto la camera di combustione deve essere mantenuta in depressione per prevenire accidentali fughe di gas di combustione.

3.1.3 Ciclo termico e produzione di energia elettrica

Il recupero di calore derivante dal raffreddamento dei fumi serve per la produzione dell'energia elettrica.

3.1.3.1 Generatore di vapore

La Linea 2 è dotata di una caldaia a tubi d'acqua a circolazione naturale a due corpi cilindrici è costituita da cinque canali verticali schermati con pareti membranate, attraverso le quali passano i fumi aspirati dalla depressione generata a valle della linea dal ventilatore di coda.

La caldaia è provvista di tre tramogge di scarico delle polveri in lamiera d'acciaio rinforzata da profilati e rivestita di materiale refrattario adatto a resistere alle caratteristiche dei fumi e al lavaggio chimico dei tubi. Le pareti interne sono rivestite dai tubi di circolazione dell'acqua, mentre tutte le pareti esterne della caldaia sono coibentate con lana minerale e con finitura esterna con lamiera d'alluminio del tipo stagno in modo che la differenza tra la temperatura esterna della superficie della caldaia e la temperatura ambiente non superi 35°C.

Il circuito acqua-vapore prevede l'arrivo dell'acqua dalla pompa di alimentazione al corpo cilindrico superiore, da qui ripartita in tutto il fascio tubiero. Lo scambio di calore avviene prevalentemente per irraggiamento ed in parte per convezione a spese dei fumi di combustione. Il vapore prodotto si raccoglie nel corpo cilindrico superiore, in cui il processo di separazione è favorito da apposite alettature contro le quali l'acqua viene fermata.

Il condizionamento chimico per evitare le corrosioni nell'impianto è realizzato iniettando fosforo trisodico (Na_3PO_4) nel corpo cilindrico della caldaia e idrazina (N_2H_4) sulla tubazione d'acqua di alimento in uscita dal degasatore.

Sono previste anche tubazioni di presa campioni e di spurgo; gli spurghi sono necessari perché sebbene il ciclo termico sia chiuso, si ha con il passare del tempo, che l'acqua in caldaia si arricchisce di sali favorendo così incrostazioni che danneggerebbero l'impianto.

L'economizzatore è installato immediatamente a valle della caldaia, all'uscita del quinto canale. La sua funzione è quella di preriscaldare l'acqua, innalzando la sua temperatura di circa 30 °C, (da 120°C a 150°C), sfruttando il residuo salto entalpico reso disponibile dai fumi a 300°C che vengono così ulteriormente raffreddati fino a 250°C. al di sotto di tale temperatura i fumi non possono venire sfruttati perché sorgerebbe il problema dei fenomeni corrosivi e dei depositi con conseguente danneggiamento o cattiva conduzione termica degli organi costituenti l'impianto, dovuta alla natura aggressiva dei fumi stessi. Il surriscaldatore installato all'interno della quarta camera d'irradiazione, ha lo scopo di surriscaldare il vapore separatosi nell'evaporatore e portandolo ad una temperatura di circa 310°C. il surriscaldatore contiene solo la fase gassosa e pertanto è necessario per non danneggiare il serpentino che lo costituisce, che sia realizzato un preciso equilibrio tra la temperatura e la portata dei fumi e la quantità di vapore prodotto.

All'uscita il vapore prodotto viene inviato principalmente alla turbina; un a parte del vapore viene comunque prelevata, depressurizzata in stazione di riduzione fino a 2 bar e quindi

impiegata insieme al vapore spillato in turbina , per le utenze interne (teleriscaldamento e degasatore).

È presente un impianto per la rimozione delle fuliggini dalle superfici di scambio dell'economizzatore e del generatore mediante vapore surriscaldato. Le fuliggini sono raccolte da apposite tramogge.

3.1.3.2 Produzione di energia

Il forno della Linea 2 è dotato di un gruppo turboalternatore e di un ciclo termico in grado di accettare anche il vapore prodotto dal forno della Linea 1.

Le apparecchiature che costituiscono il ciclo termico, e che verranno di seguito descritte, sono dimensionate per una portata di vapore pari alla somma delle portate dei due forni.

Il vapore prodotto dalla caldaia della Linea 2 è inviato ad un collettore al quale è collegata anche la caldaia della Linea 1. da questo collettore si dipartono le tubazioni vapore per la turbina della Linea 2, le tubazioni di by-pass alle turbine e per l'alimentazione dei degasatori.

Il vapore prodotto nelle due caldaie viene quindi condensato nel condensatore a 0.2 ata e a 60°C.

La condensa si raccoglie nel serbatoio e di qui alimentata al degasatore. Al degasatore sono collegate le pompe di alimentazione della caldaia della Linea 2 e le pompe esistenti per l'alimentazione della caldaia della Linea 1. Il degasatore è alimentato con acqua demineralizzata prodotta dall'impianto de mineralizzatore, dall'acqua proveniente dal serbatoio delle condense e con un mix di vapore proveniente da uno spillamento intermedio in turbina e vapore proveniente dalla stazione di riduzione vapore.

Gruppo turboalternatore

La turbina opera la trasformazione dell'energia di espansione del vapore in energia meccanica; si tratta di una macchina a 6 stadi, in cui il vapor vivo affluisce ad alta pressione e si espande fino allo scarico in depressione. Fra il terzo e il quarto stadio il vapore può essere estratto e usato per le utenze ausiliarie quali teleriscaldamento interno e il degasatore.

La turbina è accoppiata all'alternatore a mezzo di gruppo riduttore di giri a ruota dentata, che permette di passare dai 10000 giri/min della turbina ai 1500 giri/min del rotore. L'alternatore è una macchina sincrona trifase, adatto alla marcia in parallelo alla rete, sia al funzionamento in isola.

Gruppo del vuoto

Il gruppo del vuoto è costituito da due eiettori in parallelo che estraggono gli incondensabili dal condensatore ad aria, creando in tal modo il vuoto, e dal refrigerante del gruppo vuoto.

Gli eiettori funzionano con vapore ad alta pressione. Gli scarichi degli eiettori pervengono ad un serbatoio orizzontale provvisto di serpentino attraverso il quale passa il condensato pompato dal serbatoio condense al degasatore; in questo serbatoio si ha la condensazione del vapore di scarico degli eiettori. Gli in condensabili vengono scaricati nell'atmosfera.

Stazione di riduzione vapore di by-pass della turbina

Questa sezione di riduzione viene impiegata per ridurre la pressione e la temperatura del vapore prodotto dalla caldaia quando la turbina è ferma. In questo caso il vapore vien ridotto da 20 bar e 280-300°C a 0.7-0.9 bar e 90-97 °C e inviato al condensatore ad aria.

Condensatore ad aria

Per condensare il vapore scaricato dal turboalternatore o proveniente dalla valvola di by-pass della turbina (sfioro) c'è un condensatore ad aria. È costituito da un complesso di tubi in acciaio alettati esternamente. Ad aumentare l'efficienza del condensatore concorrono i ventilatori comandati da motori elettrici.

Serbatoio condense

Il vapore di raccolta condensato è raccolto nel serbatoio di raccolta condensato per essere trasferito mediante pompe al degasatore. Il serbatoio ha una capacità di 12m³ e raccoglie acqua ad una temperatura di circa 60°C; è costruito in acciaio in carbonio.

Scambiatore di teleriscaldamento

Questa macchina è collegata alla linea di vapore a bassa pressione dal serbatoio di acqua demineralizzata ed è utilizzata per la produzione di acqua calda per il riscaldamento interno degli edifici.

Degasatore

Il degasatore è formato da una torre degasante dove avviene la liberazione dei gas dall'acqua e da un serbatoio di stoccaggio dell'acqua degasata della capacità utile di 18 m³. alla torre degasante arriva l'acqua di reintegro, le condense dell'impianto ed il vapore che libera i gas contenuti in essa. I gas vengono scaricati all'atmosfera mentre l'acqua passa al serbatoio di stoccaggio.

Stazione di riduzione vapore

Questa sezione di riduzione viene impiegata per ridurre la pressione e la temperatura del vapore prodotto dalla caldaia al fine di alimentare la rete di vapore a bassa pressione per gli utilizzi interni. In questo caso il vapore viene ridotto da 20 bar e 280-300 °C a 4 bar e 140-150°C, ed in queste condizioni inviato al degasatore e allo scambiatore di teleriscaldamento. La pressione del vapore prodotto dalla caldaia viene controllata dalla valvola di sfioro. Il

regolatore di pressione che comanda la valvola è montato a valle della valvola in modo da mantenere costante la pressione sul collettore vapore a bassa pressione a qualsiasi carico d'utilizzo.

Impianto di demineralizzazione

L'impianto è costituito da due linee gemelle parallele. In testa si trova l'addolcitore (colonna di resina a scambio ionico): le resine cationiche trasformano i sali di calcio e di magnesio in sali di sodio. Le resine vengono rigenerate con cloruri di sodio.

L'acqua viene poi filtrata per trattenere i corpuscoli più grossi e infine pompata (ad una pressione di 15bar) su una membrana selettiva che produce due flussi: il flusso concentrato viene spurgato, mentre il flusso permeato viene mandato ad un serbatoio di recupero.

L'impianto è automatizzato e non comporta consumo di vapore; serve per garantire l'adeguata portata d'acqua di reintegro.

3.1.4 Sezione depurazione fumi

In questa sezione si effettua il vero e proprio abbattimento degli inquinanti. Pertanto l'impianto viene diviso in ulteriori sezioni a seconda del tipo di inquinante che si intende abbattere.

I fumi uscenti dall'economizzatore a 250°C vengono depolverati in un filtro elettrostatico a due campi in serie. Successivamente passano nello scambiatore a tubi di vetro che utilizza il calore dei fumi medesimi per innalzare la temperatura di 55°C dopo il trattamento ad umido.

Aumentando la temperatura si va così ad innalzare il pennacchio bianco allo sbocco del camino, si riduce la richiesta di acqua di raffreddamento dei fumi all'ingresso del lavaggio, si riduce la temperatura di saturazione migliorando il lavaggio dei metalli pesanti.

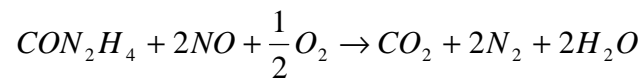
Ad una temperatura di 180-190°C i fumi vengono inviati, tramite il ventilatore di tiraggio, alla colonna di lavaggio, ove entrano dal fondo e si dirigono verso l'alto. Il loro raffreddamento è effettuato mediante ugelli spruzzatori.

Per meglio comprendere la filiera di depurazione del gas di processo, si farà riferimento allo schema a fine paragrafo (Figura 3.1).

3.1.4.1 Sistema SNCR per l'abbattimento NO_x

L'abbattimento degli NO_x avviene mediante l'iniezione nel flusso dei fumi di una soluzione di urea in un intervallo di temperatura ben determinato. L'impianto di denitrificazione, a fronte di una concentrazione di ossidi di azoto nei fumi pre-iniezione di urea di 400 mg/Nm³,

garantisce una concentrazione di uscita di 200mg/Nm³. La riduzione degli ossidi di azoto avviene con la seguente reazione globale:



3.1.4.2 Elettrofiltro

L'elettrofiltro realizza la depolverazione dei fumi provenienti dall'impianto assorbimento acidi.

Il suo principio di funzionamento di basa sulla separazione elettrostatica ottenuta caricando artificialmente le particelle solide all'interno di un campo elettrico.

I fumi entrano nell'elettrofiltro con un contenuto di polveri di 4 g/Nm³ e ad una temperatura di 250°C. In uscita il tenore di polveri è inferiore a 50 mg/Nm³.

Il sistema è costituito da un elettrodo di emissione e da uno di raccolta. La differenza di potenziale esistente tra le due piastre determina un passaggio di corrente attraverso la corrente dei fumi, con le particelle solide che si caricano elettricamente. Più specificatamente l'elettrofiltro è costituito da un'unità suddivisa in due sezioni elettriche in serie. Sono presenti placche contigue in acciaio disposte verticalmente, una di seguito all'altra lungo l'asse maggiore, che suddividono la sezione in canali. Lungo la mezzeria di ciascun canale sono disposti a intervalli regolari, conduttori verticali filiformi che costituiscono gli elettrodi di emissione, i quali sono collegati con una sorgente unidirezionale di alta tensione.

Le placche che delimitano i canali sono gli elettrodi di captazione e, insieme alle armature che li sostengono, alle pareti dell'unità e ad altri dispositivi, sono collegate elettricamente a terra.

Sono inoltre presenti delle tramogge per la raccolta del materiale precipitato. L'applicazione agli elettrodi emissivi di una tensione unidirezionale negativa di parecchie decine di kV, crea un campo elettrico elevato in prossimità dell'elettrodo. Si produce così un'emissione a corona, con la conseguente ionizzazione delle specie chimiche del gas trattato che hanno una maggiore affinità elettronica (SO₂, O₂ e in misura minore CO₂ e H₂O). Gli ioni prodotti nel processo di ionizzazione del dielettrico e gli elettroni migrano verso gli elettrodi di segno opposto e urtano, nel loro cammino, le particelle di polvere o di liquido sospese nei fumi conferendo loro una carica elettrica. Le dimensioni dell'elettrofiltro sono descritti nella seguente tabella:

Tabella 3.2 Parametri dell'elettrofiltro e caratteristiche del gas di processo in entrata.

Elettrofiltro		
portata di progetto dei fumi in ingresso	25000	[Nm ³ /h]
temperatura	250	[°C]
temperatura max	300	[°C]
contenuto polveri	4	[g/Nm ³]
umidità	8	%
polveri in uscita	<50	[mg/Nm ³]
campi elettrici in serie	2	
numero di passaggio in parallelo	10	
lunghezza totale campo elettrico	7,3	[m]
altezza piastre di captazione	6,5	[m]
superficie attiva di captazione	1186	[m ²]
numero di alimentatori in A.T.	2	
tensione di cresta	70	[kV]
velocità dei fumi	0,651	[m/s]
potenza installata totale	42	[kW]

La forza colombiana tra campo e particelle cariche convoglia queste ultime sugli elettrodi di captazione collegati a terra. Da qui la polvere raccolta viene fatta scendere verso il basso, nelle tramogge, da scuotimenti e vibrazioni impressi periodicamente ad una sezione di elettrodi per volta.

3.1.4.3 Reattore a secco

I principali inquinanti che si vogliono neutralizzare con questo sistema di depurazione sono i gas acidi (in particolare HCl e SO_x). Nel reattore a secco avvengono essenzialmente queste principali funzioni:

- neutralizzazione dei gas acidi;
- adsorbimento di microinquinanti inorganici (Hg) e organici (PCDD).

Dopo l'elettrofiltro, i fumi da depurare passano all'interno del reattore a secco, in cui vengono immessi i reagenti: calce idrata e carbone attivo.

La calce idrata consente una prima neutralizzazione degli inquinanti acidi. Il carbone attivo grazie alla sua porosità riesce ad adsorbire le sostanze inquinanti tra cui le diossine (PCDD), furani (PCDF) e metalli pesanti. Le reazioni fra gli acidi e la calce idrata avvengono in fase gas-solido e portano alla formazione di sali di calcio.

La miscelazione tra inquinante e reagente avviene grazie all'attraversamento di un sistema Venturi, che garantisce un aumento della velocità che favorisce il profondo contatto tra reagenti e le sostanza inquinanti.

3.1.4.4 Scambiatore riscaldamento fumi

Lo scambiatore è di tipo tubi a vetro, completo di cappe fumi ingresso-uscita con relativi passi d'uomo per l'ispezione. Lo scambiatore è fornito di un sistema di riscaldamento delle pareti interne soggette a condensazione acida. Il sistema di riscaldamento è realizzato a un ventilatore centrifugo e da canali di distribuzione con serrande di regolazione.

3.1.4.5 Filtro a maniche a celle escludibili

La funzione del filtro a maniche è l'abbattimento delle polveri contenute nei gas. È costituito da un insieme di cestelli cilindrici, ciascuno dei quali rivestito, lungo le pareti laterali, da un tessuto filtrante attraverso il quale avviene il passaggio della corrente aeriforme da trattare.

La corrente gassosa, attraversando il tessuto filtrante, si libera del materiale solido presente in sospensione (in particolare delle polveri ottenute dalla reazione con i reagenti aggiunti precedentemente); il contatto si completa nella superficie esterna delle maniche.

Il gas entra nella cella con andamento dall'alto verso il basso, per facilitare la caduta in tramoggia della polvere trattata. Inoltre i fumi attraversano la manica dall'esterno verso l'interno, a bassa velocità (1 m/min)

Il principio di funzionamento su cui si basano questi filtri è quello per cui un fluido convettore di polveri che attraversa un tessuto, vi deposita le polveri con granulometria maggiore delle maglie. L'effetto di filtrazione aumenta man mano che il film di polvere si deposita sulle maglie, consentendo una selezione più fine; ovviamente aumenta anche la resistenza al passaggio del gas per cui è necessario provvedere periodicamente alla rimozione delle particelle depositate.

Il ciclo di pulizia viene effettuato con impulsi ad aria compressa in controcorrente, in modo da "scrollare" meccanicamente le polveri che si depositano sulla manica. Le polveri vengono poi raccolte nelle apposite tramogge poste sul fondo del filtro e poi vengono periodicamente convogliate ai silos di stoccaggio.

Le maniche filtranti sono in fibra di vetro e sono chiuse ad una estremità da un fondo metallico, mentre rimangono aperte dall'altra, calettate e incravattate su un bocchello metallico bloccato su una piastra di lamiera.

3.1.4.6 Torre di assorbimento acido ad umido

Dopo un importante abbattimento delle polveri grazie al filtro a maniche, i fumi raggiungono una torre di lavaggio bistadio, nella quale viene introdotta la soda, per neutralizzare i gas acidi.

Il processo appunto si divide in due stadi: la parte bassa in cui viene raccolta la soluzione acida, in un serbatoio di soluzione acida e in caso spurgata (la soluzione spurgata va in una vasca di neutralizzazione degli spurghi).

Dalla seconda parte (quella più alta) viene spurgata la soluzione basica, che reintegra la colonna (insieme al dosaggio di soda).

È costituito da un grande cilindro in materiale plastico, all'interno del quale sono posti trasversalmente dei piatti forati, provvede alla solubilizzazione dei gas nocivi.

La colonna è divisa in tre sezioni: in quella inferiore i fumi in ingresso vengono raffreddati iniettando acqua, nella seconda si provvede all'assorbimento dell'acido cloridrico (HCl) e fluoridrico (HF) tramite la loro solubilizzazione in acqua; nella parte superiore si assorbe l'anidride solforosa e il rimanente acido cloridrico con una soluzione alcalina.

Fisicamente la separazione è realizzata mediante l'interposizione di una sezione centrale.

A causa della temperatura relativamente elevata dei gas in ingresso e della natura corrosiva dell'acido cloridrico, le pareti della torre sono rivestite con refrattario antiacido ed il piatto a campanelle è realizzato in grafite. Il liquido viene estratto dalla colonna e riciclato sul piatto. Prima di rientrare in colonna viene spurgata l'acqua che alimenta gli ugelli spruzzatori. I gas, prima di raggiungere il piatto camino, passano attraverso un mist-eliminator, dove le goccioline acide trascinate vengono separate.

La sezione superiore della torre di assorbimento SO_2 consiste in due piatti. Ogni piatto è caratterizzato da una serie di aperture circolari, sormontate da una valvola mobile che permette una regolazione automatica dell'area di passaggio proporzionalmente alla portata dei gas. Ogni valvola non può chiudere completamente l'apertura relativa, evitando così l'incollatura della valvola stessa al piatto. Il gas, passando attraverso le aperture del piatto, viene accelerato in velocità e deviato orizzontalmente nel liquido di lavaggio, atomizzandolo e, contemporaneamente, pulendo il piatto da ogni possibile accumulo di materiale solido. La turbolenza creata sul piatto favorisce l'intimo contatto gas-liquido, assicurando un efficiente trasporto di massa. Gli spurghi dei circuiti al ricircolo della torre di assorbimento vengono trattati nel modo seguente:

- lo scarico acido del ricircolo inferiore viene inviato all'impianto di neutralizzazione delle acque di scarico;
- lo scarico superiore e quindi basico per l'aggiunta di soda necessaria all'assorbimento dell'anidride solforosa, viene inviato alla torre di ossidazione ad aria ove i solfiti presenti vengono ossidati a solfati e quindi all'impianto di neutralizzazione.

All'uscita della colonna, i gas passano attraverso un separatore a lamelle, di sezione rettangolare e a flusso orizzontale e quindi vengono mandati allo scambiatore a piastre ove si riscaldano fino alla temperatura di 120-130°C a spese dei fumi in ingresso alla torre.

Il sistema di dosaggio è automatico: la portata di reagente iniettata aumenta o diminuisce in funzione delle concentrazioni di acido cloridrico rilevate a camino.

3.1.4.7 Ventilatore fumi

L'estrazione dei fumi dal forno e il loro avvio a camino è consentito dalla depressione creata dal ventilatore posto a camino.

Esso deve essere in grado di vincere le perdite di carico distribuite e concentrate e di imprimere ai fumi una certa energia cinetica che consenta loro l'arrivo a camino.

La regolazione della velocità è attuata in modo automatico grazie ad un sistema ad inverter in modo da mantenere sempre un certo livello di depressione al forno.

3.1.4.8 Ciminiera

È rivestita internamente con materiali antiacido; l'altezza è 40 m, il diametro interno allo sbocco è 1.6 m, il diametro esterno alla base 3.3 m, la temperatura di progetto è 230 °C.

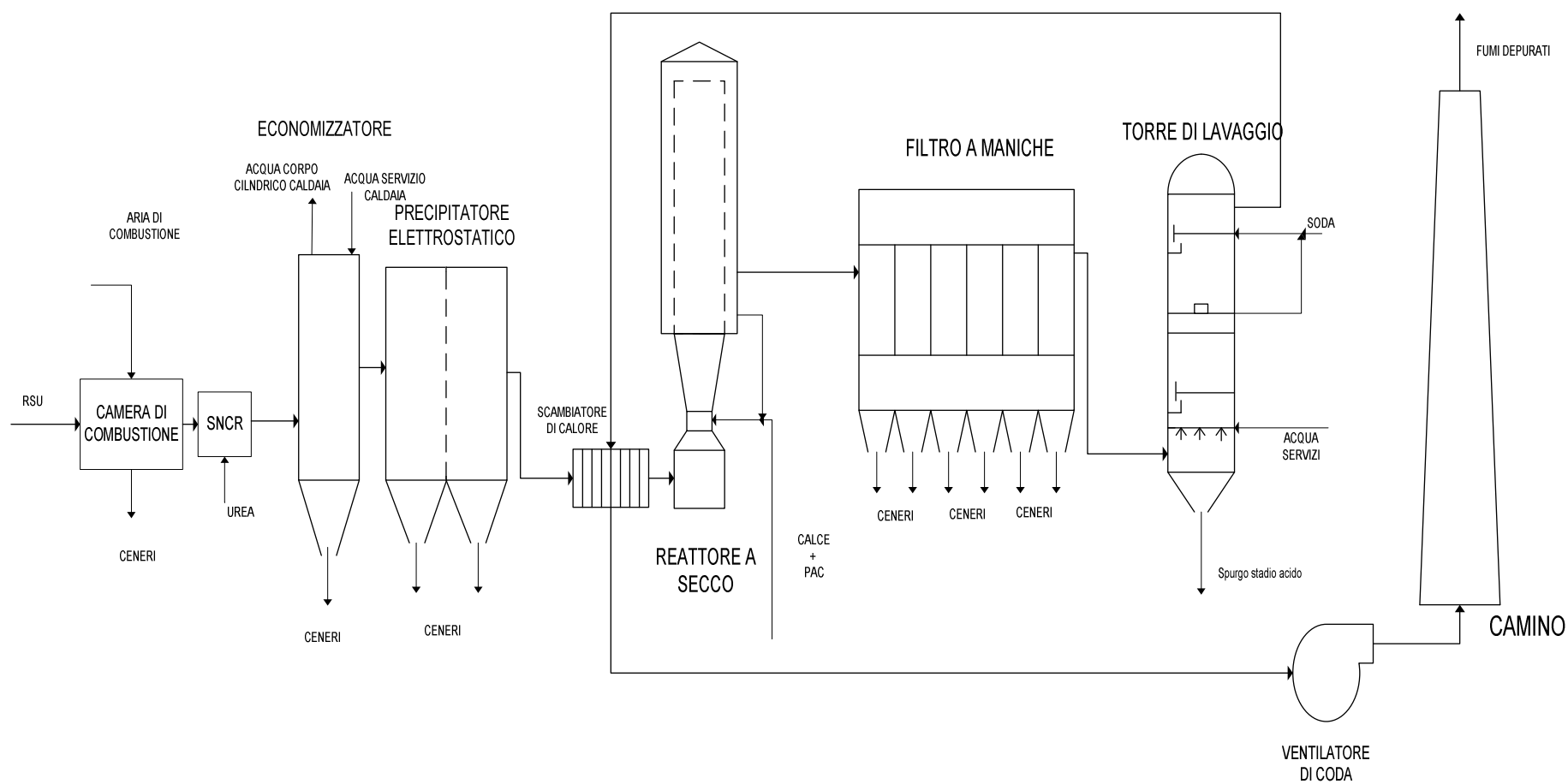


Figura 3.1 Schema semplificato della filiera di depurazione della Linea 2 prima del revamping.

3.2 Revamping della Linea 2

Il revamping dell'impianto è stato progettato per ridurre notevolmente le emissioni di NO_x, e quindi per migliorarne l'abbattimento.

Nel 2009 è stato messo a punto il nuovo progetto della Linea 2 che comprende una sostanziale modifica che ha interessato non solo l'installazione di un nuovo reattore, ma anche la maggior parte dell'assetto impiantistico della linea. In particolare sono state introdotte le seguenti apparecchiature:

- nuovo economizzatore;
- reattore SCR

sono stati sostituiti:

- il dosaggio di reagente nel reattore a secco;
- il tessuto delle maniche del filtro a maniche.

Inoltre sono state abbandonate le seguenti apparecchiature:

- la torre di assorbimento ad umido;
- lo scambiatore fumi-fumi.

Lo scopo dell'effettuazione del revamping è quello di migliorare il recupero di calore con l'introduzione del secondo economizzatore ma soprattutto quello di aumentare l'efficienza dell'abbattimento degli ossidi di azoto grazie all'introduzione del reattore catalitico SCR. Questa scelta ha inevitabilmente influenzato il processo di depurazione dei fumi a monte del nuovo reattore, infatti è stato sostituito il tessuto filtrante del filtro a maniche, in modo da garantire che il fumo da depurare abbia una concentrazione di polveri molto bassa per evitare l'intasamento dei letti catalitici.

Per effettuare le dovute modifiche si è garantito innanzitutto la presenza di disponibilità economiche e non di meno dello spazio adeguato per effettuare l'installazione delle apparecchiature.

Queste modifiche alla linea fanno in modo che le apparecchiature di cui è composta siano:

- camera di combustione
- economizzatore 1
- precipitatore elettrostatico a due campi
- economizzatore 2
- reattore con dosaggio di bicarbonato di sodio e carbone attivo
- filtro a maniche
- SCR.

Nel primo economizzatore viene effettuato uno scambio di calore tra i fumi di combustione che provengono dalla caldaia con l'acqua del corpo cilindrico della caldaia, come descritto in

precedenza. In basso vengono stoccate le ceneri che precipitano. Successivamente i fumi entrano in un precipitatore elettrostatico, dove avviene una maggiore depolverazione dei fumi. Nel secondo economizzatore si effettua un ulteriore scambio termico per il recupero dell'energia, e per abbassare la temperatura in entrata dei fumi nella torre reattiva, poiché il bicarbonato di sodio è in grado di abbattere efficacemente i composti solforati ad un certo intervallo di temperature, non troppo alte. In questa torre oltre al bicarbonato di sodio, viene aggiunto anche il carbone attivo. La fase successiva è quella di eliminare i sali sodici e altre polveri con l'ausilio dei filtri a maniche. Infine i fumi in uscita raggiungono poi il sistema SCR di abbattimento degli NO_x .

L'aggiunta del sistema DeNO_x è stata un'imposizione, ovvero una scelta obbligata, in quanto non si poteva raggiungere la soglia di abbattimento degli NO_x con il solo sistema SNCR.

Quindi l'installazione è stata una scelta obbligata in previsione di limiti futuri più restrittivi.

Infatti il sistema SNCR ha un'efficienza di abbattimento degli NO_x del 30-60%.

3.2.1 Motivazione della nuova soluzione impiantistica

In questo paragrafo vengono illustrate e motivate le scelte impiantistiche adottate con il revamping della Linea 2.

3.2.1.1 Bicarbonato di sodio

Nel settore specifico si sta sempre più affermando il trattamento fumi completamente a secco. L'utilizzo del bicarbonato di sodio come sorbente alcalino garantisce dei rendimenti di deacidificazione così favorevoli da rendere inutile l'utilizzo dei sistemi di lavaggio.

L'altro vantaggio è rappresentato dall'ampio intervallo di temperatura entro il quale il bicarbonato mantiene le caratteristiche di reattività. La ragione fondamentale del successo del bicarbonato sta proprio nell'altissima efficienza alla medesima temperatura di funzionamento del catalizzatore.

Il mantenimento di tutte le apparecchiature di trattamento (filtri e reattori) ad una temperatura di 180-210 °C permette di ottimizzare i risultati senza consumo di combustibile ausiliario.

Inoltre il bicarbonato riduce il contenuto di SO_x ad un valore così basso da poter utilizzare, senza particolari problemi di sporco da sali d'ammonio, il catalizzatore a nido d'ape a temperatura relativamente bassa.

3.2.1.2 Installazione del secondo economizzatore

Il sistema esistente non prevede un componente demandato al controllo della temperatura dei fumi in ingresso al reattore; come noto, detta temperatura è soggetta a variazioni del carico termico del gruppo forno-caldaia e si innalza nel tempo per effetto dello sporco della caldaia.

In questa ottica si è deciso di prevedere un'apparecchiatura ulteriore demandata al controllo della temperatura; essa consiste in un secondo economizzatore posizionato appena a monte del filtro elettrostatico.

Pertanto l'acqua di alimento caldaia entra prima nel nuovo banco e quindi in serie nel banco economizzatore esistente.

3.2.1.3 Filtro a maniche

Il filtro della linea 2 non subisce modifiche strutturali, ma solo la sostituzione delle maniche con una nuova muta in teflon e membrana microporosa, per abbattere ulteriormente le polveri, ma in particolare le diossine volatili, grazie ad una migliore filtrazione.

3.2.1.4 Disposizione "tail end" del reattore catalitico

Come descritto in precedenza, l'adozione di questa soluzione impiantistica ha il vantaggio di trattare i fumi di processo, con una bassa concentrazione in entrata di SO₂ e di polveri, questo comporta una bassa potenziale de attivazione del catalizzatore. Di conseguenza la programmazione della rigenerazione e dell'eventuale sostituzione dei letti catalitici è più dilatata nel tempo,riducendo in questo modo i costi.

Nella fase di avviamento, quando il forno viene riscaldato con gasolio, il catalizzatore viene escluso.

Il dimensionamento del catalizzatore è tale da ridurre tutto il contenuto di NO_x proveniente dalla combustione per cui l'attuale SNCR può essere eliminato o tenuto di riserva.

L'assorbimento dei metalli pesanti e dei composti organo clorurati è demandato, come nell'impostazione attuale, al dosaggio del carbone attivo, che viene alimentato nel flusso dei fumi insieme al bicarbonato di sodio.

Il catalizzatore completa l'abbattimento dei microinquinanti permettendo di garantire il prescritto limite regionale dell'emissione.

Il ventilatore di tiraggio non subisce modifiche in quanto, eliminando lo scambiatore fumi-fumi e la colonna di lavaggio, la nuova perdita di carico totale si riduce.

3.2.2 Strumentazione di analisi

L'impianto è dotato di strumentazioni che provvedono al monitoraggio in continuo dei valori di concentrazione dei macroinquinanti e dei parametri caratteristici dei fumi (portata, temperatura, pressione etc.).

La Linea 2 condivide il camino per l'uscita dei fumi con la Linea 1, ma il sistema di monitoraggio è composto da due sistemi, in modo da poter effettuare le analisi separatamente. Questi sistemi sono posizionati sul tratto orizzontale del condotto in uscita, a monte del camino.

I sistemi di monitoraggio sono in disposti secondo quanto previsto dall'All.1 comma c2 del D.M. 503/97, cioè devono essere misurati in continuo i macroinquinanti precedentemente citati nella descrizione della legge e alcuni parametri, ovvero:

Tabella 3.3 *Misurazioni effettuate al camino*

Condizioni operative	Inquinanti
portata dei fumi	acido cloridrico
tenore volumetrico di ossigeno	acido fluoridrico
tenore di vapore acqueo	ossidi di zolfo come SO ₂
temperatura	ossidi di azoto come NO ₂
pressione	carbonio organico totale COT
	monossido di carbonio
	ammoniaca

Per quanto concerne la rilevazione della concentrazione degli inquinanti, l'analisi viene effettuata con strumenti ad estrazione, ovvero i fumi vengono estratti dal flusso in uscita al camino e vengono portati nella cabina contenente gli analizzatori. Tale sistema utilizza la tecnologia FTIR.

Invece la misurazione delle polveri, oltre che della pressione e della temperatura, viene effettuata in loco, senza estrazione dei fumi.

In particolare la determinazione del tenore volumetrico di vapore acqueo viene effettuata tramite condensazione, con un apposito sistema refrigerato e successiva misura del vapore condensato. La temperatura viene misurata mediante termometro digitale e sonda termometrica e la determinazione della pressione differenziale media si effettua mediante tubo di Darcy collegato ad un manometro differenziale.

La corretta gestione del sistema SCR richiede di implementare gli strumenti di analisi dei fumi al fine di controllare in modo preciso il dosaggio di soluzione ammoniacale. con l'aggiunta di una strumentazione più completa è stato possibile raggiungere un significativo miglioramento anche nell'efficacia e nel risparmio, in termini economici, dell'iniezione di bicarbonato di sodio per l'abbattimento dei composti acidi.

3.2.2.1 Analisi a monte del trattamento fumi

Introdotta essenzialmente per valutare la percentuale di abbattimento del sistema di trattamento fumi, si è rilevata anche un sistema insostituibile per regolare con tempestività ed efficacia il dosaggio dei reagenti in connessione all'analisi a camino. La sola presenza di quest'ultima, caratterizzata da valori mediamente molto bassi, vicini al limite di rilevabilità degli analizzatori, si traduceva, di fatto in una regolazione ON/OFF anziché proporzionale. L'analisi sul grezzo non solo consente una misura più rapida e su concentrazioni elevate, a cui meglio rispondono gli strumenti ed il sistema di controllo nel suo complesso, ma fornisce anche all'operatore un'indicazione immediata del contenuto di alcuni inquinanti nel combustibile.

Tabella 3.4 *Concentrazioni medie di inquinanti in uscita caldaia*

Composto	Concentrazione [mg/Nm³]
Acido Cloridrico	700-800
Biossido di Zolfo	70-100
Ossido di Azoto	350
Ossido di Carbonio	50
Acqua	9 % in vol.
Ossigeno	11-12 % in vol

Misura delle emissioni a valle del filtro elettrostatico

È stato posizionato un analizzatore per l'analisi del grezzo a valle del filtro elettrostatico, affinché gli stessi possano lavorare in condizioni di basso contenuto di polveri, migliorando così le prestazioni. In questo caso infatti gli analizzatori del grezzo sono alloggiati in uscita dal secondo economizzatore, e quindi a valle dell'elettrofiltro.

Il sistema è costituito da cinque moduli funzionali:

- modulo di prelievo
- modulo di trasferimento gas
- modulo di analisi
- modulo di alloggiamento

Modulo di prelievo

il modulo è costituito da una sonda in acciaio inox, con lunghezza almeno pari a 1/3 del diametro interno del camino, provvista all'estremità esterna di un filtro riscaldato, per evitare la formazione di condense, e di media porosità, tale da poter essere facilmente estratto per la pulizia.

Modulo di trasferimento gas

è costituito da una linea riscaldata, con tubo interno in PTFE e diametro 3/8", che trasferisce il gas dalla sonda fino all'analizzatore. Deve essere posta particolare cura nel riscaldare tutto il condotto fino all'analizzatore, evitando le discontinuità fredde, che provocherebbero la condensazione dell'acido cloridrico (HCl) e degli idrocarburi pesanti, con forte riduzione del valore misurato.

Per garantire la stabilità della temperatura degli elementi riscaldati, i circuiti elettrici sono sotto il controllo di un regolatore di temperatura. La temperatura deve essere almeno mantenuta a 150°C, come previsto dalla normativa italiana, ma generalmente si tiene più alta per garantire lo stato gassoso degli idrocarburi nel condotto e nella cella.

Modulo di analisi

l'analizzatore deve rispondere alle seguenti caratteristiche generali:

- misura continua ed automatica delle concentrazioni degli inquinanti basata su principi fisici;
- certificazione da parte degli enti italiani o stranieri riconosciuti.

A causa del numero abbastanza elevato di inquinanti da misurare, la scelta ricade su un analizzatore multiparametrico, basato sulla tecnologia infrarossa.

Lo strumento sfrutta il fenomeno dell'assorbimento selettivo da parte delle molecole di un composto, dovuto alla risonanza molecolare provocata dall'irraggiamento con un raggio infrarosso di lunghezza d'onda specifica del componente.

Con questo analizzatore è possibile misurare contemporaneamente: CO, HCl, NO_x, SO₂.

Inoltre questo strumento misura anche la concentrazione di vapore d'acqua nei fumi al fine di eliminarne l'interferenza sulla misura degli altri inquinanti; tale misura consente anche di riportare al secco i valori emissivi, come prescritto dalle norme attuali.

Poiché la tecnologia dell'assorbimento infrarosso non è adatta alla misura dell'ossigeno, è stata inserita all'interno dello strumento una sonda all'ossido di zirconio.

Modulo di controllo

poiché lo strumento ha essenzialmente la funzione di sensore nei loop di regolazione dell'immissione del bicarbonato per l'abbattimento degli inquinanti acidi e dell'ammoniaca nel DeNO_x, il dispositivo di controllo è riunito nel DCS

Modulo di alloggiamento

lo strumento, previsto in specifica, è racchiuso in armadio di lamierino di acciaio, che garantisce sufficiente protezione, se collocato in ambiente coperto.

3.2.2.2 Modifiche al sistema di analisi fumi al camino

L'introduzione dell'SCR catalitico genera un'emissione di ammoniaca, che è necessario tenere sotto controllo. Allo scopo, senza modificare in maniera significativa il sistema SME esistente, gli strumenti FTIR sono stati programmati anche per misurare l'ammoniaca, facendo una semplice modifica al software.

Gli analizzatori con i relativi quadri sono posizionati in cabine chiuse e condizionate.

3.2.3 Cambiamento delle condizioni operative

Con l'introduzione del nuovo reattore, si è dovuto provvedere a fare delle modifiche delle condizioni operative sulla linea. In particolare il gas in entrata al reattore deve essere di compreso tra 180-190°C, questo significa che si è dovuto togliere la torre di lavaggio ad umido, la quale abbassava vigorosamente la temperatura.

La concentrazione degli acidi, deve essere ulteriormente ridotta, in quanto potrebbe rovinare il catalizzatore, abbassando così la resa dell'abbattimento. Per finalizzare tale obiettivo si è constatato che il bicarbonato di sodio, paragonato alla calce, ha un rendimento maggiore sull'abbattimento degli acidi nel reattore a secco, ed è quindi stato sostituito nella linea considerata. Inoltre il bicarbonato di sodio ha un'efficienza alta anche a maggiori temperature, per cui non è necessario abbassare in maniera brusca la temperatura in entrata al reattore a secco, e quindi viene tolto lo scambiatore fumi-fumi, per lasciar spazio all'economizzatore.

Infine per ridurre ulteriormente la concentrazione di polveri in entrata al reattore SCR, si sono sostituite le maniche del fabric filter, o filtro a maniche.

In definitiva, con questa nuova soluzione si avrà:

- una temperatura maggiore dei fumi in uscita al camino;
- un maggiore recupero termico, e quindi una maggiore produzione di vapore;
- un maggiore abbattimento di tutti gli inquinanti: ossidi di azoto, polveri, acidi.

Con il reattore catalitico SCR si adotta l'intervento in sezione, garantendo l'effettuazione di un adeguato sistema di trattamento dei fumi a monte (ad esempio non devo avere alte concentrazioni di gas acidi e di polveri a monte). Infatti la concentrazione di HCl non deve essere superiore ai 8 mg/Nm³ per la legge, ma devo garantire una concentrazione di gran

lunga inferiore per entrare nel reattore. Questo significa che si ha un auto controllo obbligatorio dal punto di vista tecnologico.

Si dimostra pertanto che il reattore SCR non garantisce solamente un'ulteriore diminuzione della concentrazione di NO_x in uscita dal camino, ma modificando anche il sistema di gestione e di progettazione a monte, obbliga anche gli altri inquinanti ad avere una concentrazione inferiore.

Infatti secondo i dati di progettazione il fumo in entrata deve avere le seguenti concentrazioni di inquinanti:

Tabella 3.3 Concentrazione degli inquinanti prima dello specifico abbattimento e valori garantiti della composizione del fumi in entrata al reattore SCR

Sostanza	Valore medio in ingresso	Valore massimo dell'emissione
	mg/Nm ³	mg/Nm ³
HCl	100	5
HF	20	0,05
Polveri	100	5

In definitiva la scelta di fare questo upgrade alla linea di incenerimento preesistente ha comportato una modifica complessiva a tale linea, in quanto bisognava garantire alcune condizioni.

Per non compromettere l'azione del catalizzatore e quindi per migliorare l'efficienza del sistema SCR è stato necessario garantire la minima presenza di polveri e di SO_2 nei fumi in entrata a tale reattore, di conseguenza sono state valutate e praticate le seguenti azioni:

- è stato sostituito il tessuto delle maniche dell'apposito filtro con goretex-teflon, in modo da garantire un migliore abbattimento delle polveri.
- Maggior riguardo è stato posto al problema dell'abbattimento di SO_2 , in quanto la sua presenza nei fumi in entrata al reattore DeNOx, grazie all'azione del catalizzatore, comportava un'ossidazione a SO_3 , il quale, reagendo con l'ammoniaca, va a formare i sali che sporcano il catalizzatore. per risolvere questo problema si è innanzitutto dovuto migliorare il sistema di abbattimento inquinanti precedente, ovvero nel reattore a secco, introducendo due reagenti: PAC (utilizzato anche nel sistema precedente) e il bicarbonato di sodio (sostituito alla precedente calce).
- Il bicarbonato di sodio, però, opera con maggiore efficienza in determinati range di temperatura. Per massimizzare l'abbattimento di SO_2 è stato necessario introdurre un ulteriore economizzatore, a valle del filtro elettrostatico, a monte del reattore a secco. L'alternativa sarebbe stata quella di inserire il secondo economizzatore tra quello precedente e l'elettrofiltro, questa opzione è stata scartata in quanto, si è cercato di ridurre il più possibile lo sporco dell'apparecchiatura in questione, infatti lo

sporciamento nelle superfici di scambio causa una diminuzione del flusso di calore, e potrebbe essere rilevante qualora il salto termico non sia di piccole proporzioni.

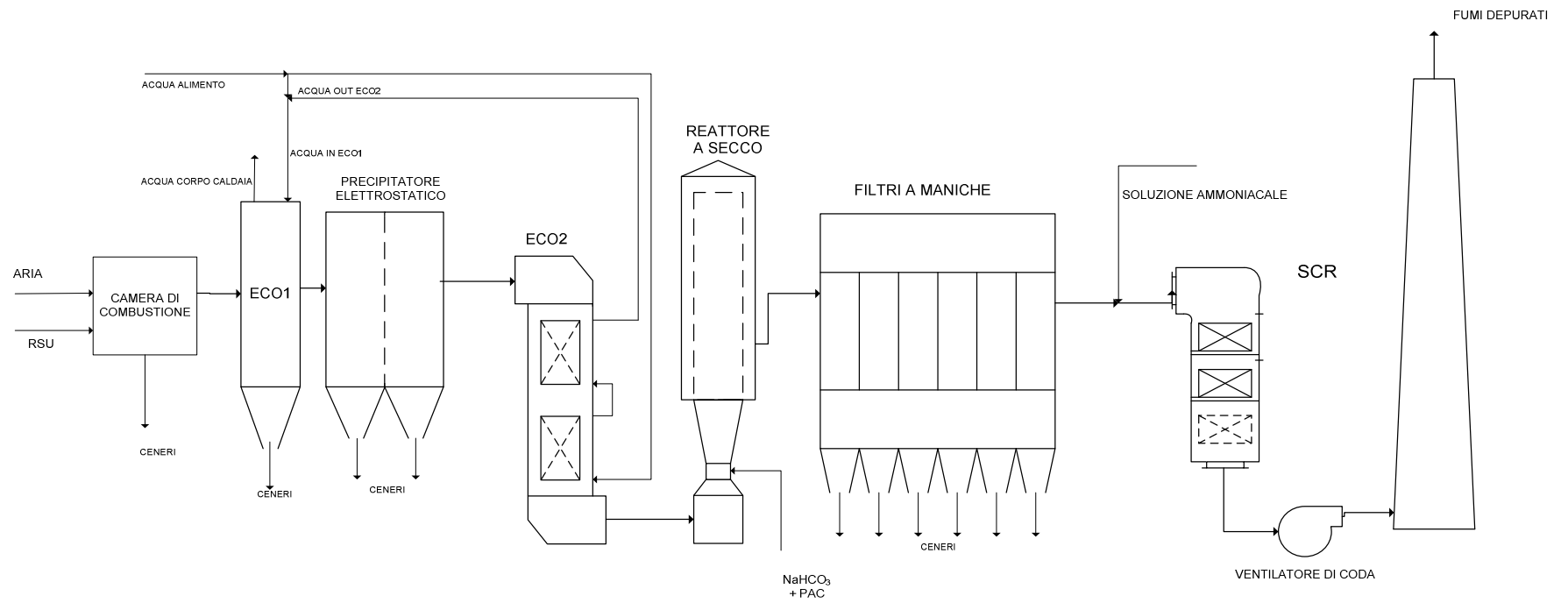


Figura 3.2 Schema semplificato della filiera di depurazione della Linea 2 dopo il revamping..

Capitolo 4

Sistema di abbattimento NO_x

Il sistema adottato per la riduzione degli ossidi di azoto nella Linea 2 del termovalorizzatore di Schio non comprende solamente il reattore, ma anche tutto il sistema di dosaggio e iniezione della soluzione ammoniacale.

Di seguito verrà presentata ciascuna struttura, con i relativi dati tecnici.

4.1 Sistema di stoccaggio e dosaggio della soluzione ammoniacale

Il sistema DeNO_x non è formato semplicemente dal reattore, ma una parte di fondamentale importanza di questo sistema è costituita dal dosaggio della soluzione ammoniacale e parallelamente anche del suo sistema di stoccaggio.

L'ammoniaca funge da agente riducente nella reazione DeNO_x, pertanto il suo dosaggio è importante per l'abbattimento degli ossidi di azoto.

L'ammoniaca è un gas combustibile che può essere stoccato come una soluzione acquosa al 25% o in un o stato liquido alla pressione di circa 1.7 MPa a 20°C.

In questo caso l'ammoniaca è presente in soluzione acquosa al 25%. Così facendo si abbassa la pericolosità della sostanza, semplificando anche i metodi di stoccaggio, trasporto e distribuzione.

Lo stoccaggio è unico per le Linee 2 e 3, questo significa che il serbatoio contenente la soluzione ammoniacale è unico e viene distribuito alle due linee con un dosaggio effettuato per mezzo delle valvole gestite dal sistema di controllo.

L'impianto in questione può essere suddiviso in 2 zone distinte, ciascuna delle quali caratterizzata dalle apparecchiature o impianti come di seguito indicato:

1 – Scarico autocisterna e stoccaggio soluzione ammoniacale

- Pompa di riempimento;
- Serbatoio stoccaggio ammoniaca;
- Serbatoio di guardia idraulica;
- Sistema antincendio.

2 – Dosaggio soluzione ammoniacale

- Gruppo Filtrazione;
- Pompe dosaggio ammoniacale.

È importante introdurre due parametri di temperatura della soluzione di NH_3 al 25%:

- Temperatura di ebollizione a temperatura atmosferica: 40°C
- Temperatura di congelamento -55°C

Questo per avere un'indicazione sullo stato della soluzione. Infatti, soprattutto in fase di dosaggio di reagente, la soluzione che viene preriscaldata si presenta già in fase gassosa, questo aumenta l'efficacia del miscelamento con i fumi in entrata al reattore ed evita un abbassamento di temperatura a causa del calore latente dell'acqua che causerebbe di fatto un cattivo funzionamento del sistema catalitico.

4.1.1. Scarico autocisterna e stoccaggio soluzione ammoniacale

In questa sezione verranno elencate le diverse strutture che compongono lo stoccaggio e il dosaggio della soluzione ammoniacale, con un breve cenno sulla procedura per effettuare le operazioni.

4.1.1.1 Pompa di riempimento:

L'ammoniaca viene scaricata dall'autocisterna con una pompa centrifuga a trascinamento magnetico, e stoccata in un serbatoio in acciaio inox collocato, per ragioni di sicurezza, entro un bacino di contenimento in cemento armato.

Questo tipo di pompa è adatta al pompaggio di liquidi altamente corrosivi, poiché, grazie al trascinamento magnetico, si riducono al minimo i rischi di perdite e i costi di manutenzione; infatti la trasmissione del moto avviene tramite giunti magnetici, senza l'utilizzo di tenute meccaniche, garantendo una maggiore sicurezza ed efficienza. La pompa di riempimento viene utilizzata in fase di carico della cisterna contenente soluzione ammoniacale. In questa fase si segue dettagliatamente la procedura di scarico dell'ammoniaca dall'autoveicolo, per la quale viene utilizzato un sistema a circuito chiuso per evitare la propagazione di vapori in atmosfera. Per tale motivo due tubi flessibili compositi, con l'interno in PTFE, e dotati di attacchi accoppiatori rapidi TODO permettono di effettuare tale operazione in sicurezza. Infatti l'ammoniaca in presenza di ossigeno ed in determinate concentrazioni può dar luogo a miscele infiammabili.

La pompa in questione ha le seguenti caratteristiche:

Tabella 4.1 *Caratteristiche della pompa scarico di soluzione ammoniacale*

POMPA SCARICO SOLUZIONE AMMONIACALE		
Portata	40	[m ³ /h]
Prevalenza	20	[m.c.l.]

4.1.1.2 Serbatoio di stoccaggio della soluzione ammoniacale:

Il serbatoio è stato posizionato in una vasca di cemento armato, precedentemente utilizzata per la neutralizzazione dello spurgo dal circuito della colonna di lavaggio della Linea 2.

Il serbatoio di forma cilindrica, in posizione verticale, con fondo piano e tetto bombato. Le dimensioni sono riportate in tabella 4.2.

La vasca è dotata di una pompa di sentina per lo svuotamento delle eventuali perdite o dell'acqua di raffreddamento del serbatoio.

Poiché il serbatoio è esposto ad un forte irraggiamento solare d'estate, va previsto uno schermo realizzato in carpenteria e fissato al serbatoio sul lato esposto.

Tabella 4.2 *Dimensioni del serbatoio di soluzione ammoniacale*

SERBATOIO AMMONIACA		
Volume	30	[m ³]
Altezza	6	[m]
Diametro	2,5	[m]
Materiale	AISI 316 L	

In estate è possibile raffreddare l'esterno del serbatoio con acqua industriale spruzzata.

Il serbatoio di stoccaggio è dotato di un indicatore/trasmittitore di pressione che segnala aumenti anomali di pressione all'interno dello stesso.

4.1.1.3 Serbatoio di guardia idraulica

Gli eventuali vapori in uscita dal serbatoio di stoccaggio vengono captati in un serbatoio di guardia idraulica contenente acqua, questo contenitore ha lo scopo di mantenere il serbatoio principale a pressione atmosferica.

Tale serbatoio infatti garantisce il mantenimento della pressione all'interno del serbatoio di soluzione ammoniacale diluendo le emanazioni gassose di ammoniaca che provengono dal

serbatoio ammoniacca con il gorgogliare delle bolle gassose nell'acqua nei momenti di sovrappressione.

Il livello del liquido, nel serbatoio di guardia, è mantenuto da un sistema a galleggiante che gestisce, e garantisce, le eventuali aggiunte d'acqua nel serbatoio di tenuta.

L'acqua contenuta all'interno del serbatoio di guardia, assorbe i vapori ammoniacali rilasciati dalla soluzione al 25% contenuta nel serbatoio di stoccaggio.

Tabella 4.3 *Dimensioni del serbatoio di guardia idraulica*

SERBATOIO GUARDIA IDRAULICA		
Volume	1	[m ³]
Altezza	2,095	[m]
Diametro	0,95	[m]
Materiale	AISI 316 L	

Con l'assorbimento l'acqua diventa essa stessa una soluzione ammoniacale la cui concentrazione va progressivamente aumentando nel tempo, per cui si rende necessario la periodica sostituzione della soluzione per riportare i valori nei limiti previsti. La sostituzione deve avvenire quando la concentrazione di NH₃ raggiunge il 5% del peso totale.

4.1.1.4 Sistema antincendio

Un indicatore/trasmittitore di temperatura segnala eventuali aumenti che, se superiori ad una soglia prefissata, attivano l'impianto di raffreddamento e antincendio ed irrorano il serbatoio di acqua nebulizzata aprendo l'apposita valvola.

La zona di caricamento e stoccaggio dell'ammoniaca è equipaggiata con un sistema di nebulizzazione d'acqua ad ugelli attivati dall'apertura della valvola (tipo ON-OFF).

Il sistema di nebulizzazione viene attivato per altissima temperatura, relativa alla sonda di temperatura interna al serbatoio, e l'altissima concentrazione di NH₃, generata dall'allarme.

C'è da specificare che l'ammoniaca anidra ha un LEL relativamente alto (15%) in aria; ma è di difficile accensione, perché i vapori sono più leggeri dell'aria, ci vuole pertanto un'alta energia di innesco. All'aperto una sua emissione allo stato gassoso si diffonde rapidamente, cosicché eventuali atmosfere esplosive risultano di dimensioni trascurabili.

Inoltre l'ammoniaca è una sostanza tossica e letale già a basse concentrazioni in aria ≈1%, per cui le soluzioni impiantistiche adottate sono state scelte in modo da ridurre al minimo la possibilità di una sua fuoriuscita nell'ambiente.



Figura 4.1 Serbatoio di stoccaggio della soluzione ammoniacale. In alto è posizionato il serbatoio di guardia idraulica.

4.1.2. Dosaggio soluzione ammoniacale

Il sistema di dosaggio che comprende anche l'iniezione di reagente per il reattore catalitico SCR della Linea 3, comprende il sistema di filtrazione, e le pompe di dosaggio.

4.1.2.1 Sistema filtrazione

La valvola manuale sul serbatoio intercetta l'alimentazione delle pompe dosatrici a doppia membrana. Tali pompe sono protette, da eventuali impurità che fossero presenti nella soluzione ammoniacale, da due filtri a cartuccia di cui uno normalmente aperto, mentre il secondo rimane chiuso, pulito, e pronto all'utilizzo.

Uno strumento differenziale di pressione indica il grado di sporco del filtro e quindi la necessità di pulirlo o sostituirlo.

4.1.2.2 Pompe dosaggio ammoniacale

Per la distribuzione della soluzione ammoniacale agli utilizzi vi è un anello mantenuto in pressione da due pompe, delle quali solo una alimenta la linea, mentre l'altra è di soccorso.

La portata delle pompe dosatrici viene regolata da un segnale 4-20 mA sulla base dell'analisi degli NO_x al camino. Ogni pompa, le cui caratteristiche sono descritte in tabella 4.4, è dotata di valvola di sicurezza, inoltre su ogni linea è installata una valvola di contropressione. Il gruppo di dosaggio del reattivo è costituito da due elettropompe dosatrici a membrana, una in funzione ed una in stand-by per ciascuna linea; il dosaggio avviene in feed-back dall'analizzatore di NO_x al camino, con un sistema i/p che modifica la corsa del pistone della pompa secondo un regolatore PID i cui valori di funzionamento sono impostabili a supervisione.

Tabella 4.4 *Caratteristiche delle pompe della soluzione ammoniacale.*

POMPE SOLUZIONE AMMONIACALE	
portata	0,8 [m ³ /h]
prevalenza	6 [bar]
potenza motore	2,2 [kW]
materiale	AISI 316 L
numero di pompe in marcia	1
numero di pompe in riserva	1

Il sistema è protetto da una valvola di sicurezza tarata a 8,5 bar; un pressostato di massima (tarato a 8 barg) ha la duplice funzione di bloccare la pompa dosatrice di alimentazione (chiudendo contemporaneamente la valvola pneumatica) ed effettuare la depressurizzazione scaricando il fluido a valle della valvola regolatrice attraverso una valvola elettropneumatica. A valle della valvola regolatrice è installato un indicatore di pressione e di temperatura.

4.1.3 Sistema di controllo della soluzione ammoniacale

A causa dell'alto rischio che ha l'ammoniaca sulla salute dell'uomo e dell'ambiente, il suo trasporto, stoccaggio e movimentazione devono avvenire assicurando un sistema di monitoraggio in grado di evitarne le eventuali perdite.

Caricamento e stoccaggio.

In questa parte viene effettuato lo scarico dall'autocisterna per il riempimento del serbatoio di stoccaggio di soluzione ammoniacale.

In particolare le condizioni di riempimento dell'ammoniaca nel serbatoio vengono controllate e gestite attraverso un sensore di livello. La soglia di alto livello interrompe automaticamente

il caricamento. Un'ulteriore sicurezza, al fine di evitare un troppo pieno durante le operazioni di riempimento nel serbatoio, è fornita dal controllo digitale di livello, il quale ha la stessa funzione, ovvero interrompere immediatamente il caricamento. Durante la fase di caricamento anche la pressione all'interno del serbatoio viene controllata, in questo modo se supera una soglia di allarme prefissata si procede manualmente con l'arresto del caricamento. È previsto inoltre un altro sistema di controllo di livello, ma nel bacino di contenimento del serbatoio di stoccaggio della soluzione ammoniacale, infatti qualora fosse presente l'allarme di alto livello nella vasca di raccolta degli sversamenti, un'apposita pompa entra in azione e si arresta non appena il segnale non è più presente.

Sistema di nebulizzazione

La zona di caricamento e stoccaggio dell'ammoniaca è equipaggiata con un sistema di nebulizzazione d'acqua ad ugelli attivati dall'apertura di una valvola di tipo ON/OFF.

Tale sistema di nebulizzazione viene attivato da un allarme di altissima temperatura, relativa alla sonda di temperatura interna al serbatoio.

Vi è inoltre un sistema di analisi della concentrazione di ammoniaca nell'aria, realizzata da tre sonde locali in zona carico e stoccaggio che generano due soglie, una di alta e una di altissima concentrazione di ammoniaca nell'aria, e il superamento di tali soglie determina l'attivazione dell'allarme.

Guardia idraulica

Il livello dell'acqua nel serbatoio è mantenuto costante per mezzo di un sistema meccanico a galleggiante. Eventuali anomalie sul sistema di caricamento sono segnalate da tre contatti montati sull'indicatore di livello che segnalano l'allarme di alto, basso e bassissimo livello.

Un analizzatore misura la concentrazione di NH₃ nel serbatoio e qualora raggiungesse un valore stabilito, apre la valvola sottostante al serbatoio di guardia idraulica e ne scarica il contenuto al serbatoio principale, di conseguenza scatterà l'allarme di bassissimo livello che chiuderà la valvola di scarico.

Infine vi è un controllo di temperatura che va ad agire sugli allarmi, in modo che se si raggiunge una temperatura troppo bassa, l'operatore sarà incaricato di attivare la resistenza, che funge perciò da antigelo nel serbatoio.

Eventuali anomalie sul sistema di caricamento sono segnalate da tre contatti montati sull'indicatore di livello, che segnalano l'allarme di alto livello basso e bassissimo.

La regolazione della concentrazione di NH₃ nel serbatoio è effettuata dalla valvola (tipo ON-OFF), il cui funzionamento è regolato dall'analizzatore. Il superamento della soglia alta aprirà la valvola, il ritorno della concentrazione sotto la soglia bassa richiederà la valvola. Perciò quando la concentrazione di NH₃ nel serbatoio secondario sale, un analizzatore provvede a

scaricare la soluzione nel serbatoio principale sottostante, ed il livello viene ripristinato in automatico con acqua demineralizzata o osmotizzata.

Poiché normalmente il contenitore è pieno d'acqua, vi è in inverno il pericolo di gelo, per cui è prevista una tracciatura elettrica finalizzata ad evitare detto fenomeno.

Sia il serbatoio di stoccaggio che quello di guardia sono forniti di indicatori di livello. Quello di guardia è dotato di allarmi di alto e basso livello.

La concentrazione della soluzione ammoniacale all'interno della guardia idraulica è verificata in continuo da un sistema di misurazione e trasmissione della conducibilità elettrica, è opportuno comunque, periodicamente, analizzare la concentrazione ammoniacale nell'acqua del serbatoio di guardia, prelevando un campione aprendo in l'apposita valvola. Quando la concentrazione della soluzione ammoniacale raggiunge il 5% del peso totale, automaticamente viene scaricata una parte della soluzione ed integrata con acqua demineralizzata.

Pompe di ricircolo NH_3 e sistema di dosaggio

Il dosaggio di ammoniaca ha lo scopo di ridurre la concentrazione dell' NO_x nei fumi al camino nel rispetto dei limiti consentiti.

Il prelievo dell'ammoniaca dal serbatoio è effettuato da due elettropompe a membrana (una in servizio e una di riserva). Prima di arrivare alla pompa la soluzione in questione passa attraverso un filtro per eliminare eventuali impurezze, in maniera tale prevenire l'integrità della pompa. Un apposito controllo di perdita di carico viene effettuato tra le estremità del sistema di filtrazione, questo sistema di controllo è finalizzato a programmare l'eventuale sostituzione o rigenerazione del filtro stesso.

Sulla linea di mandata della soluzione ammoniacale è presente un sistema di controllo per la pressione, in modo da segnalare gli eventuali valori di bassa e alta pressione.

Il dosaggio della soluzione all'interno del reattore avviene con un regolatore che riceve il segnale proveniente dal valore NO_x calcolato nei fumi uscenti dal camino (regolazione FB) e quelli in uscita dall'economizzatore (regolazione FF). Questi due segnali elettrici si sommano con "pesi" diversi (infatti il segnale FF conta solo il 5% del comando finale effettivo) e vengono confrontati con il set point e quindi al regolatore, il quale comanda l'apertura della valvola che fa passare la soluzione ammoniacale per mandarla al preriscaldatore a valle del reattore catalitico della Linea 2.

Il sistema di controllo ha un sistema i/p che controlla la corsa del pistone della pompa tramite un regolatore PID.

Il dosaggio dell'ammoniaca inoltre è controllato da un sensore di altissima e di bassissima temperatura, il dosaggio avviene nel range limitato da questi due valori, se il valore misurato

è inferiore a quello di temperatura minima o superiore a quello della temperatura massima le valvole di dosaggio vengono chiuse.

Un ulteriore controllo è dato dalla deviazione massima del valore di NO_x.

Vi è un ulteriore trasmettitore che fornisce l'allarme di alta e bassa portata.

Nella griglia di iniezione è montato l'analizzatore che misura il livello di concentrazione di NH₃ nell'aria, se il valore di misura supera una certa soglia di allarme, viene arrestato il dosaggio di ammoniaca.

Una valvola in ingresso alla griglia di iniezione NH₃, resta chiusa durante il dosaggio di ammoniaca, mentre si apre qualora fosse necessario il passaggio in by-pass del gruppo SCR, o se il sistema di iniezione dell'ammoniaca viene disinserito dall'operatore.

Le condizioni di allarmi vengono segnalate con l'allarme di alta pressione.

Pertanto la gestione degli inquinanti NO_x viene controllata tramite l'analizzatore di misura, e la loro azione combinata permette di avere un sistema di controllo Feed-Forward/Feedback.

- AI 5L110A, posto in uscita dell'economizzatore 2. Si tratta di una regolazione FF poiché serve ad anticipare l'azione correttiva finalizzata dalla regolazione FB, viene calcolata la quantità teorica da iniettare $. Inq_{in}$
- AI 5M110B, a valle del dosaggio, ovvero in uscita al camino. Regolazione FB, serve per la finalizzazione del dosaggio del reagente. Il regolatore è PID e il set point sarà l'impostazione del valore massimo da tenere al camino. Inq_{out}

L'operatore può decidere se tenere la regolazione FF/FB oppure solo FB, ovviamente non viene mai utilizzata la sola regolazione FF.

4.1.4 Legge di controllo per il dosaggio della soluzione ammoniacale

Originariamente il processo di controllo è stato progettato per seguire il sistema di regolazione mista "Feed Forward/Feedback", cioè si avevano due tipi di regolazione combinati.

La prima regolazione "Feed Forward" si basa sull'analizzatore NO_x a monte del dosaggio di NH₃, e serve per "anticipare" l'azione correttiva poi finalizzata dalla regolazione "Feedback", in sostanza viene calcolata la quantità teorica di reagente da iniettare.

La seconda regolazione "Feedback" si basa sull'analizzatore a valle del dosaggio di NH₃, e serve per la "finalizzazione" del dosaggio del reagente, viene utilizzato un regolatore PID il cui Set point sarà l'impostazione del valore massimo di inquinanti da tenere al camino.

Il dosaggio secondo il controllo FF viene calcolato con la seguente formula:

$$QN H_3_{-FF} = QN H_3^{th} * K^A \quad (4.1)$$

Dove:

QNH_3_{FF} = Valore effettivo del dosaggio di ammoniaca [l/h];

QNH_3^{th} = Valore teorico stechiometrico di dosaggio di ammoniaca [l/h];

K^A = Eccesso stechiometrico.

Significa che, una volta calcolato il quantitativo teorico di reagente, questi deve essere moltiplicato per un fattore K^A che rappresenta l'eccesso stechiometrico al quale si dovrà lavorare per raggiungere l'obiettivo.

Il valore teorico viene calcolato con la seguente formula:

$$QNH_3^{th} = \frac{QNO_x * 1.46}{K_{CA_} K^{NH_3}} \quad (4.2)$$

Dove:

QNO_x = portata [kg/h] di NO_x in entrata al sistema di abbattimento degli NO_x . [kg/h]

$K_{CA_} K^{NH_3}$ = coefficiente densità della soluzione ammoniacale ed è posto pari a 0.91 [kg/l]

$$QNO_x = \frac{NO_{x,in} * Q_{fumi}}{10^6} \quad (4.3)$$

In cui:

$NO_{x,in}$ = concentrazione degli NO_x misurati con l'analizzatore a monte dell'SCR;

Q_{fumi} = portata dei fumi tal quale, ovvero senza la consueta normalizzazione e senza riferirli a una determinata concentrazione di ossigeno e di umidità.

Per quanto riguarda la regolazione Feedback, espresso in [l/h] invece, viene utilizzata la seguente formula:

$$QNH_3_{FB} = \% Inq^{reg} * KCA_{FY5m302} \quad (4.4)$$

Dove:

$\% Inq^{reg}$ = è pari all'uscita (positiva o negativa) in percentuale del regolatore in questione;

$KCA_{FY5M302}$ = coefficiente calcolo portata coclea dosatrice [l/h].

La quantità di reagente immesso QNH_3_{FB} derivante dalla formula precedente, rappresenta il valore del dosaggio che si ottiene dopo che è stata effettuata una regolazione, non è la legge di regolazione.

Non si è riusciti a risalire alla legge di regolazione FB, ma si sono riportati i parametri di regolazione nel Capitolo 6.

La quantità di reattivo immesso sarà determinato dunque dalla formula seguente:

$$QNH_3^{eff} = QNH_3_{-FF} + QNH_3_{-FB} \quad (4.5)$$

In realtà si è visto in sede di sala controllo che la regolazione FF influisce circa per il 5% sul segnale di dosaggio finale dell'ammoniaca, mentre la maggior parte del segnale è costituito dalla regolazione FB.

Nello specifico il setpoint è fissato per il valore di uscita degli NO_x pari a 40 [mg/Nm³], questo significa che la soluzione ammoniacale comincia ad essere dosata quando la concentrazione di NO_x in uscita supera questo valore. In verità la valvola è stata programmata in modo da garantire un dosaggio minimo quando si è al di sotto del setpoint. Infatti l'apertura della valvola varia da 18% quando si è al di sotto del setpoint, garantendo così l'iniezione di ammoniaca di 5 l/h; questa operazione è dovuta al fatto che se la valvola rimanesse chiusa quando il segnale di uscita degli NO_x fosse inferiore rispetto al segnale del setpoint, non ci sarebbe il dosaggio, questo significa che la quantità che entra nel reattore SCR è la stessa dell'uscita, non essendoci l'agente riducente (l'ammoniaca) necessaria per la reazione in questione.

D'altra parte la percentuale di apertura della valvola è limitata anche da un valore massimo, corrispondente al 44% della corsa del stelo. Tale percentuale corrisponde ad un dosaggio della soluzione ammoniacale di 18 l/h. Questo per garantire che non ci sia un sovradosaggio di tale soluzione che può non solo compromettere l'efficienza del catalizzatore, ma soprattutto si avrebbe un'alta concentrazione di ammoniaca in uscita al camino (slip di ammoniaca).

La quantità di ammoniaca che viene iniettata è determinata in modo automatico dal sistema di controllo, sulla base dei seguenti parametri:

- tenore di NO_x nei fumi grezzi
- tenore NO_x nei fumi a camino
- portata fumi
- tenore di O₂
- concentrazione di NH₃ a camino.

la regolazione automatica si basa quindi sulla determinazione della quantità di ammoniaca da iniettare nei fumi partendo dalle misurazioni sopracitate, effettuate in continuo.

La portata di ammoniaca viene controllata da una valvola regolatrice controllata da un regolatore PID, il cui set point è funzione del valore di NO_x desiderato al camino.

4.2 Il sistema catalitico SCR

Tra le varie configurazioni per la scelta della posizione dell'abbattimento degli ossidi di azoto nella linea in questione, si è deciso di scegliere lo schema Tail-End, ciò significa che il reattore viene posizionato come ultimo elemento della linea, dopo aver effettuato l'abbattimento delle polveri e dei gas acidi.

Il motivo di tale scelta è dovuta alla minor complessità impiantistica, in quanto introdurre il sistema catalitico a valle della filiera di depurazione dei fumi comporta un minor spostamento di apparecchiature.

Il sistema catalitico SCR è composto da:

- bruciatore per il preriscaldamento dei fumi;
- reattore
- vaporizzazione e iniezione della soluzione ammoniacale
- by-pass



Figura 4.2. *Reattore catalitico SCR della Linea 2 (a destra si nota il filtro a maniche).*

4.2.1 Il bruciatore

Il ruolo del bruciatore, in generale è quello di garantire che i fumi abbiano una temperatura minima in entrata al reattore SCR. Il consumo del metano dovuto allo svolgimento di questa funzione è la voce che più pesa nel bilancio economico della gestione dell'impianto, per quanto riguarda il sistema DeNO_x, ed inoltre ha lo svantaggio di essere una potenziale fonte di NO_x.

Nel caso dell'inceneritore di Schio, il bruciatore installato a monte del sistema SCR è adibito alla sola funzione di riscaldamento del catalizzatore in fase di avvio dell'impianto, con il fine di preparare il gruppo SCR al passaggio dei fumi caldi.

Questa operazione di preriscaldamento è eseguita per evitare la formazione di condense, che possono essere causate dalla notevole differenza di temperatura tra i fumi caldi provenienti dal filtro e l'interno del reattore SCR. Tali condense infatti potrebbero causare problemi di malfunzionamento nel gruppo SCR.

La modalità di funzionamento dell'operazione di preriscaldamento è controllata dalla temperatura in ingresso dei fumi in entrata al gruppo SCR. Il regolatore controllerà quindi, la modulazione dell'apertura, o della chiusura della valvola modulante per la regolazione della fiamma al bruciatore, preservando in tal modo l'integrità del gruppo SCR, e permettendo una regolare rampa di preriscaldamento SCR.

L'avvio, e l'arresto del ciclo di preriscaldamento, è gestito da due soglie programmabili da SPV relative alla temperatura della sonda.

Il motivo per cui il bruciatore non è in funzione durante la marcia dell'impianto è che tramite le modifiche effettuate si è riusciti ad avere una temperatura in ingresso dei fumi di processo superiore a 180°C, rammentando che il range consentito per l'abbattimento con i catalizzatori utilizzati è di 180-350°C.

Il consumo di metano Q in m^3/h , per aumentare la temperatura in entrata dei fumi al gruppo SCR può essere espresso dalla seguente formula:

$$Q = \frac{V \cdot \Delta t \cdot \rho_f \cdot c_f}{P_{CH_4}} \quad (4.6)$$

In cui:

V la portata dei fumi da riscaldare m^3/h ;

Δt l'aumento di temperatura che si vuole ottenere °C;

ρ_f la densità dei fumi è circa pari a $1.25 \text{ kg}/m^3$

c_f calore specifico dei fumi, pari a $0.40 \text{ kcal}/\text{kg}^\circ\text{C}$; il valore è maggiore rispetto al calore specifico dell'aria poiché avendo i fumi un'elevata percentuale volumetrica di vapore acqueo c

P_{CH_4} calore di combustione del metano: $8400 \text{ kcal}/m^3$.

Con questa formula si può calcolare approssimativamente l'eventuale consumo di metano. Sotto, in tabella 4.5, si riportano i risultati relativi all'ipotesi di un innalzamento di 10°C della temperatura dei fumi

Tabella 4.5 Calcolo indicativo del consumo di metano per innalzare la temperatura dei fumi in entrata al reattore SCR.

Calcolo consumo metano	
portata	30000 Nm ³ /h
ΔT	10 °C
peso specifico fumi	1,25 kg/m ³
calore specifico fumi	0,4 kcal/kg °C
calore di combustione CH ₄	8400 kcal/m ³
densità CH ₄	0,71 kg/m ³
costo CH ₄	0,35 €/m ³
consumo CH ₄	17,86 m ³ /h
	12,68 kg/h
costo totale annuo CH ₄	54750 €/anno

Il costo annuale del metano per aumentare di 10°C la temperatura dei fumi in ingresso allo SCR (preriscaldamento) ammonterebbe a circa 55.000 €/anno.

Tabella 4.6 Dati operativi del bruciatore di preriscaldamento del catalizzatore..

Bruciatore di preriscaldamento del catalizzatore	
combustibile	metano
potenza termica	980 [kW]
portata max metano	100 [Sm ³ /h]
rapporto di regolazione	1.10
potenza ventilatore aria	3 [kW]

La ragione per cui si può operare ad una temperatura relativamente bassa, avendo comunque un'alta efficienza di abbattimento degli ossidi di azoto, va ricercata nella bassa concentrazione degli SO₂ in entrata al reattore, grazie al dosaggio di bicarbonato di sodio e al filtro a maniche.

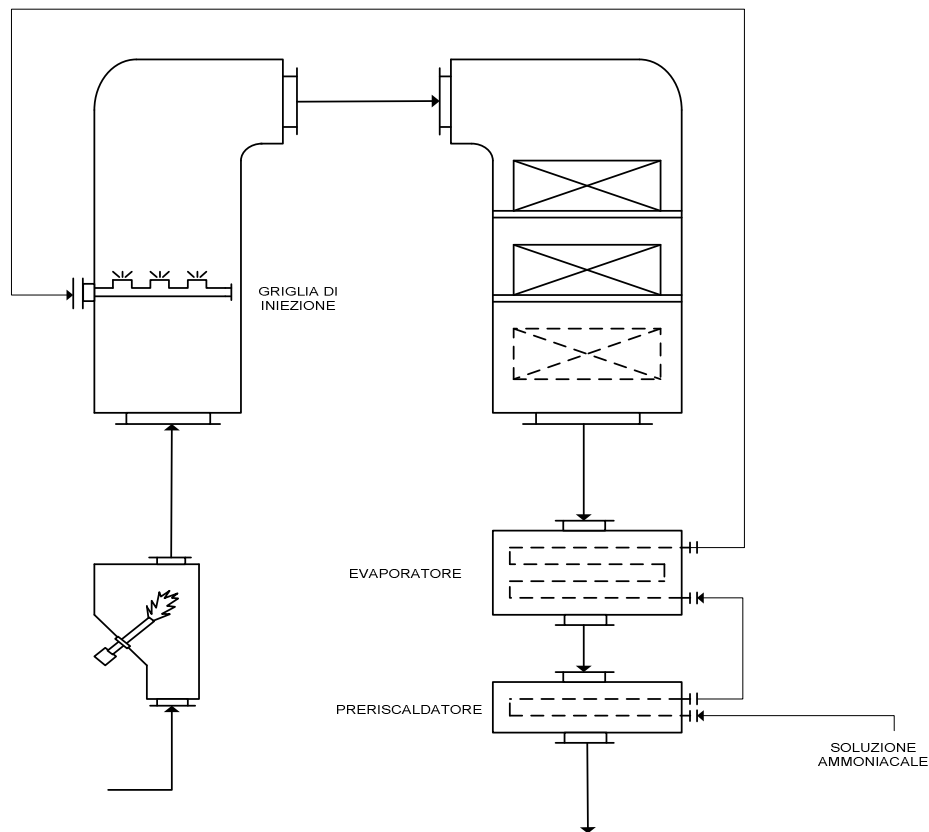


Figura 4.3 Illustrazione sistema catalitico SCR, comprendente il bruciatore, la griglia di iniezione e il reattore.

4.2.2 Vaporizzazione e iniezione della soluzione ammoniacale

Sono stati installati due scambiatori di calore alla fine del collettore di uscita del reattore, con il fine di innalzare la temperatura della soluzione ammoniacale che quindi viene iniettata in fase vapore, per aumentare il grado di miscelazione e per evitare un ulteriore abbassamento dei fumi in entrata al reattore, dovuto al calore latente dell'acqua in fase liquida.

Il sistema di riscaldamento e iniezione della soluzione ammoniacale si divide in:

Preriscaldatore soluzione ammoniacale

Dopo esser stata dosata la soluzione ammoniacale passa attraverso uno scambiatore che ha la funzione di preriscaldare la soluzione con i fumi in uscita del reattore SCR. Il preriscaldamento a 70°C circa avviene per mezzo di un'apposita serpentina di preriscaldamento con le parti a contatto in Hastelloy. Successivamente viene inviata nella batteria di vaporizzazione

Evaporatore soluzione ammoniacale

Dopo aver effettuato il preriscaldamento, la soluzione ammoniacale, prima di essere iniettata nel condotto del reattore, passa attraverso un altro scambiatore: l'evaporatore. Grazie al calore

scambiato con i fumi in uscita dal reattore, si garantisce che la soluzione ammoniacale raggiunga una temperatura tale da poter essere iniettata in fase vapore. Si tratta di uno scambiatore di tipo a fascio tubiero, ed è realizzato in acciaio inox AISI 316.

C'è da specificare che nel progetto iniziale della modifica dell'impianto non erano previsti gli scambiatori, poiché si voleva iniettare direttamente la soluzione ammoniacale con aria atomizzata per favorire la miscelazione del fluido. In realtà la soluzione adottata evita di abbassare notevolmente la temperatura dei fumi in entrata al reattore, evitando anche il problema delle eventuali condense che potrebbero causare problemi di corrosione all'impianto, nonché diminuire l'efficienza della reazione De NOx.

Griglia di iniezione soluzione ammoniacale

Sul condotto di collegamento tra il filtro a maniche ed il reattore catalitico, a valle del bruciatore di post riscaldamento, è montato il sistema di iniezione del reagente.

Dopo l'evaporatore, l'iniezione della soluzione ammoniacale nei fumi avviene con una griglia composta da tubi forati in AISI 316L.

La griglia di distribuzione dell'ammoniaca viene installata all'interno del condotto fumi di adduzione al reattore SCR, a valle del bruciatore in linea ed a sufficiente distanza dal reattore DeNOx, completa dei relativi miscelatori statici e distributori di flusso che consentono la completa miscelazione del reagente iniettato all'interno della corrente di fumi e l'omogenea distribuzione dell'ammoniaca sull'intera sezione di flusso dei fumi stessi, nonché una corretta equalizzazione della temperatura sull'intera sezione di passaggio del flusso gassoso.

La quantità di reagente inviata dal sistema di dosaggio viene quindi iniettata direttamente nel condotto fumi in ingresso al reattore DeNOx SCR (condotto di miscelazione), secondo il principio dell'iniezione diretta, tramite lance di iniezione a doppio flusso.

La griglia di distribuzione della soluzione ammoniacale viene completamente realizzata in acciaio inossidabile, ed integra a livello di fabbricazione tutti i miscelatori statici e distributori di flusso che vengono previsti in fase di progettazione.

La portata di soluzione ammoniacale necessaria è controllata dalla regolazione automatica, tramite una valvola di controllo sul collettore di adduzione ammoniacale ai vari ugelli di atomizzazione.

4.2.3 Reattore

La forma prescelta del catalizzatore è di tipo nido d'ape o honey-comb, il motivo di questa scelta rispetto al catalizzatore plate è dovuta alla maggiore area disponibile per l'abbattimento degli ossidi di azoto. Il catalizzatore è costituito da un supporto poroso ceramico realizzato con fibre rinforzate di diossido di titanio (TiO₂). Il supporto è impregnato omogeneamente da

componenti che attivano la reazione DeNO_x: triossido di tungsteno (WO₃) e pentossido di vanadio (V₂O₅).

Tabella 4.7 *Composizione chimica del catalizzatore del reattore SCR.*

COMPOSIZIONE CHIMICA		
pentossido di Vanadio	0,1 – 4	[%]
triossido di Tungsteno	2 –10	[%]
diossido di silice	5 – 10	[%]
diossido di titanio	70 –80	[%]
fibre	8 –12	[%]

Il risultato è un catalizzatore con un'alta superficie specifica, avendo una struttura porosa con i composti attivi finemente dispersi sull'intera superficie e di conseguenza si aumenta il numero dei siti attivi.

Il catalizzatore è molto resistente agli sbalzi termici, infatti la geometria del catalizzatore e il materiale prevengono l'accumulo degli stress termici. Il peso è anche più basso rispetto ai piatti convenzionali o al catalizzatore estruso.

Tabella 4.8 *Proprietà fisiche del catalizzatore,*

PROPRIETÀ FISICHE		
spessore parete	0,4	[mm]
diametro idraulico dei canali	3,4	[mm]
passo della cella	4,1	[mm]
passo del piatto	4,1	[mm]
densità della cella	39	[CPSI]
area specifica	885	[m ² /m ³]
grado di vuoto	76	[%]

Tabella 4.9 *Dimensioni degli elementi catalitici alloggiati all'interno del reattore SCR*

DIMENSIONE ELEMENTI		
lunghezza dell'elemento	466	[mm]
larghezza dell'elemento	466	[mm]
altezza dell'elemento	322	[mm]
profondità rete catalizzatore	250	[mm]

I fumi depolverati e neutralizzati escono dal filtro a maniche ed entrano nel tratto di condotto verticale ascendente dove avviene l'iniezione della soluzione ammoniacale vaporizzata. Il reattore DeNO_x è realizzato in modo da consentire l'alloggiamento di due strati di catalizzatore, comunque cautelativamente è stato previsto il volume di riserva disponibile per l'alloggio di un ulteriore strato di catalizzatore.

Tabella 4.10 Misure e disposizione del letto catalitico.

LETTO CATALITICO		
tipo catalizzatore	DNX-939	
volume catalizzatore	4,07	[m ³]
numero di reattori per unità	1	[-]
volume di catalizzatore per reattore	8,14	[m ³]
numero di strati	2	[-]
arrangement dell'elemento	5 x 5	[-]
numero di elementi per strato	25x2	[-]
dimensione elemento (LxWxH)	466 x 466 x 572/322	[mm]
net catalyst depth	1,5	[m]
dimensioni richieste per il reattore	2,5 x 2,5	[m]
totale numero di elementi per reattore	50 + 50	[-]
peso di ciascun elemento ca.	40 + 20	[kg]
peso totale di tutti gli elementi	3,0	[ton]

Il fornitore del catalizzatore ha preso in considerazione le seguenti caratteristiche del gas in entrata, per la progettazione del reattore.

Tabella 4.11 Dati di progettazione presi in considerazione in fase di progettazione del reattore catalitico. In particolare sono dati relativi alle condizioni del gas in entrata al reattore.

DATI DI PROGETTAZIONE		CONDIZIONI	
PARAMETRI		MASSIME	NOMINALI
portata	[Nm ³ /h]	34000	33300
temperatura	[°C]	190	190
pressione	[mmH ₂ O]	-583,8	-583,8
NO _x (11% O ₂ ,dry)	[mg/Nm ³]	350	,50,0
NO _x (come NO ₂)	[%]	5	5
O ₂	[% vol]	12,77	12,77
H ₂ O	[% vol]	8,24	8,24
CO ₂ (11% O ₂ ,dry)	[% vol]	5,39	5,39
SO ₂ (11% O ₂ ,dry)	[mg/Nm ³]	10	10
SO ₃ (11% O ₂ ,wet)	[% vol]	0,05	0,05
diossine	[ng TEQ/Nm ³]	0,1	0,1
polvere	[mg/Nm ³]	5	5
maldistribuzione del gas	[%]	15	15
maldistribuzione di NH ₃ /NO _x	[%]	5	5
maldistribuzione di temperatura	[°C]	±10	±10

Se le caratteristiche del gas entrante nel reattore non si discostano molto dalla tabella precedente, e se le condizioni con le quali il catalizzatore opera sono in accordo con quanto specificato nelle apposite istruzioni, il processo è in grado di garantire le seguenti condizioni di uscita del gas.

Tabella 4.12 Performance garantite dal fornitore del letto catalitico.

PERFORMANCE GARANTITE		CONDIZIONI	
PARAMETRI		MASSIME	NOMINALI
NO _x out (11% O ₂ , dry)	mg/Nm ³	50	42
NH ₃ -slip (11% O ₂ , dry)	mg/Nm ³	5	5
diossine out	ng TEQ/Nm ³	<0,02	<0,02
consumo NH ₃	kg/h	2,98	2,8
caduta di pressione	mmH ₂ O	49	43

Infatti il volume del catalizzatore SCR è stato progettato per uno slip di ammoniaca come specificato dalla tabella. Ovviamente cambi repentini di carico potrebbero causare un sorpasso di questi valori.

Si può facilmente calcolare anche il tempo di residenza dei fumi, ovvero, il tempo di contatto con il letto con catalitico, dividendo il volume del letto catalitico (4.07 m³) per la portata grezza (non normalizzata per temperatura, pressione e umidità).

Il risultato che si ottiene oscilla tra 0.25 e 0.3 s poiché si ha una grande variabilità del carico in entrata e quindi anche della portata.

La garanzia della performance del catalizzatore è stata calcolata perlopiù da condizioni di massimo disturbo della distribuzione della portata del gas alla superficie catalitica di 15%; e al massimo scostamento per la distribuzione del rapporto NH₃/NO_x del 10%.



Figura 4.4 *Disposizione del letto catalitico all'interno del reattore. Fonte Topsoe*

Il massimo periodo di attività calcolato per il catalizzatore è di 3 anni.

La *reactor-house* modulare è composta da:

- una cappa di ingresso dei fumi,
- un casing con 3 pini per alloggio catalizzatore,
- due livelli di catalizzatore pieni,
- l'ultimo strato di catalizzatore vuoto,
- una valvola di uscita dal reattore,

una cappa di uscita fumi.

Sopra la *reactor-house* è posizionata la struttura di sostegno superiore, composta da profilati in acciaio zincato a caldo, da un paranco per il sollevamento dei moduli, montato su una rotaia.

Il sistema SCR sostenuto da carpenteria in acciaio zincato a caldo, posta solette in cemento armato. Il piping a bordo dello stoccaggio e di collegamento dallo stoccaggio al SCR è costruito in acciaio inox AISI 316.

Il sistema di controllo del reattore si compone di:

- controllo della temperatura attraverso 4 sonde situate:
 - o nel I strato catalitico;
 - o tra il I e il II strato catalitico;

- tra il II e il III strato catalitico (eventuale strato catalitico)
- uscita dal reattore DeNO_x SCR.
- controllo della pressione che si compone di:
 - controllo della pressione dei fumi in ingresso al reattore, a monte dell'iniezione della soluzione ammoniacale;
 - controllo di pressione in uscita dal reattore;
 - caduta di pressione attraverso il reattore.

tali controlli sono collegati ad un allarme. Pertanto qualora la temperatura o la pressione superasse una certa soglia prefissata, si attiva l'allarme corrispondente.

4.2.4 Bypass

In caso di fermata dell'impianto, oppure nell'eventualità che la temperatura in entrata al reattore scenda al di sotto di una soglia prefissata, i fumi in uscita dal filtro a maniche vengono by-passati, per raggiungere direttamente il ventilatore di coda e quindi il camino.

In questo modo viene prevenuta l'integrità del reattore, evitando che i fumi freddi passino attraverso il sistema catalitico.

Il condotto si stacca appena a valle del filtro a maniche e si innesta nella conduttura principale a valle del reattore catalitico.

Il by-pass è formato da tre serrande di intercettazione. Particolare attenzione viene posta alla serranda posizionata sul condotto di by-pass che rimane normalmente chiusa e, non essendo percorsa da fumi, fredda.

Per evitare il pericolo di condense e quindi di corrosione, la serranda, del tipo a farfalla, è doppia, con le due pale affiancate; nell'intercapedine viene insufflata una piccola portata di aria riscaldata elettricamente avente la funzione di flussare e riscaldare al contempo la serranda.

Il flussaggio assicura la perfetta tenuta al passaggio dei fumi. Le altre due serrande, immerse nel flusso dei fumi, rimangono sempre calde e non hanno bisogno di accorgimenti particolari.

Dall'operatore viene dato il comando tramite la selezione "Normale SCR" o "By-pass SCR".

Il comando delle serrande è automatico, mediante cilindri pneumatici.

L'intercettazione dei fumi nel SCR della linea 2, avviene nella modalità "By-pass SCR" attraverso la chiusura della serranda di ingresso fumi, posizionata a monte del bruciatore, e quella di uscita dal preriscaldatore della soluzione ammoniacale e quindi a monte del ventilatore, permettendo così di escludere il passaggio dei fumi attraverso il gruppo SCR. Mentre durante il ciclo di marcia nella modalità di "Normale SCR", le medesime valvole rimangono aperte per permettere il passaggio dei fumi all'interno del gruppo SCR.

La temperatura in ingresso al SCR viene controllata dal trasmettitore il quale fornisce l'allarme di altissima e bassissima temperatura. In modo tale che, qualora vi sia in presenza di uno di questi allarmi, ha luogo il passaggio del sistema in modalità "By-pass SCR".

Dopo la chiusura delle valvole precedentemente descritte, con il by-pass del gruppo SCR ha luogo anche l'apertura di due serrande, per evitare il passaggio attraverso il reattore. ovviamente quando il sistema è in modalità "normale SCR" le valvole rimangono chiuse.

Tabella 4.13 *Caratteristiche delle serrande di by-pass.*

Serrande di by-pass	
numero serrande	3
tipo	a farfalla
diametro del condotto	1.00 [mm]
tipo di comando	pneumatico
funzione	on/off

4.2.5 Procedura di avvio

All'inizio l'unità DeNOx deve essere preriscaldata con aria calda. Generalmente il catalizzatore dovrebbe essere riscaldato ad una temperatura di minimo 20°C sopra il punto di rugiada dell'acqua del gas di processo.

L'iniezione della soluzione ammoniacale¹ comincia quando la temperatura dei gas del reattore raggiunge una certa temperatura determinata in sede di sala controllo, indicativamente è posta sotto ai 180 °C. Questo è dovuto al fatto che se la temperatura fosse inferiore a tale valore si potrebbe avere un alto slip di ammoniaca, dovuto alla riduzione di attività del catalizzatore a basse temperature.

Il catalizzatore inoltre è resistente ai cambiamenti di temperatura ed è capace di tollerare variazioni corrispondenti ai cambiamenti di carico.

4.2.6 Controllo di processo

I più importanti parametri di per il controllo della prestazione del catalizzatore SCR sono:

- Misure degli NOx in entrata al reattore,
- Misure degli NOx in uscita dal reattore,
- Caduta di pressione attraverso il reattore
- Controllo del consumo di NH3
- Misura dello slip di ammoniaca dal reattore

¹ Si vuole specificare che la soluzione ammoniacale iniettata è sempre vaporizzata.

- Contenuto di ossigeno
- Contenuto di acqua
- Portata del gas di processo.

L'analisi della concentrazione degli NO_x è effettuata con degli analizzatori in linea, uno in uscita dell'economizzatore 2 e uno al camino. Questi dovrebbero essere tarati e in buono stato. Sono importanti per indicare l'efficienza del catalizzatore.

La temperatura in entrata è molto importante per garantire che la temperatura di processo sia superiore alla temperatura minima operativa del catalizzatore, per evitare un eccessivo slip di ammoniaca.

La caduta di pressione attraverso il reattore può aumentare durante il primo anno di operatività del reattore, questo è dovuto alle polveri fini che si depositano sul sito catalitico. Questa misura deve essere monitorata continuamente, per evitare un eventuale intasamento del reattore.

Il controllo del dosaggio di ammoniaca è di aiuto nel momento in cui si effettua una valutazione tra il consumo di ammoniaca e gli NO_x che entrano nel reattore.

4.2.7 Arresto dell'impianto

In caso di arresto della linea in questione, il dosaggio di soluzione ammoniacale viene bloccato non appena la temperatura all'interno dell'SCR è inferiore alla temperatura fissata. Prima dell'arresto, il reattore DeNO_x viene sfiatato immettendo aria, per evitare che il catalizzatore sia esposto al gas di processo durante l'arresto.

Il catalizzatore inoltre deve essere ispezionato ad intervalli regolari. Per pulire il catalizzatore da eventuali depositi si dovrebbe effettuare il sottovuoto, è sconsigliato invece soffiare con aria pressurizzata o il lavaggio con acqua.

4.2.8 Costi

Effettuando la scelta di adottare il sistema SCR si deve far fronte soprattutto al rilevante costo economico legato ad esso.

Innanzitutto l'incremento dei costi è dovuto alle modifiche che riguardano l'assetto impiantistico. Infatti oltre ai costi legati alla costruzione del reattore e alla sua struttura di sostegno, al catalizzatore, all'equipaggiamento ausiliare (vaporizzatore di soluzione ammoniacale, pompe, nuove condutture), vi sono anche significative spese aggiuntive

derivanti da demolizioni, e sostituzioni di materiali e spostamenti di apparecchiature. Per tale motivo è buona norma valutare un'eventuale futura presenza del reattore SCR già in fase di progettazione della linea.

L'introduzione di tale reattore introduce anche una serie di costi gestionali cui bisogna porre una particolare attenzione, e tali costi sono caratterizzati da: consumo di metano dovuto al bruciatore, aumento del consumo elettrico da parte del ventilatore di coda causato dall'aumento delle perdite di carico, ma soprattutto dal dosaggio di soluzione ammoniacale. Pertanto successivamente verrà intrapreso uno studio per evitare tali costi, al fine di ottimizzare la gestione dell'impianto.

Infine periodicamente si dovrà far fronte ai costi dovuti alla manutenzione del reattore, principalmente derivanti dal lavaggio del letto catalitico.

Indicativamente il costo del reattore, provvisto di due letti catalitici delle dimensioni precedentemente descritte ha un costo di circa 200.000 €, solo per il materiale.

Capitolo 5

Analisi tecnico-ambientale della Linea 2 di termovalorizzazione

Al fine della tesi vengono considerati gli aspetti tecnici ed ambientali dopo l'introduzione del sistema SCR nell'impianto di termovalorizzazione di Schio.

Per quanto riguarda gli aspetti tecnici sono stati valutati:

- le cadute di pressione attraverso il reattore, confrontandole con il resto dell'impianto;
- l'andamento della temperatura all'interno del reattore SCR;
- il dosaggio di soluzione ammoniacale.

5.1 Cadute di pressione attraverso il reattore

Un aspetto tecnico da considerare per la valutazione dell'introduzione della tecnologia SCR all'impianto è senz'altro la caduta di pressione attraverso il reattore. Infatti, allo scopo di ridurre il rischio di un avere un importante fattore di perdita di carico all'interno del reattore, è stato fornito un sistema di monitoraggio composto da un trasmettitore differenziale di pressione che effettua la rilevazione continua delle perdite di carico della griglia di distribuzione e del modulo catalizzatore dell'SCR .

Questo parametro è fondamentale per due motivi:

- dato che l'impianto è messo in depressione per il tiraggio dei fumi, dall'analisi si ottiene così un'idea delle perdite di carico che avvengono attraverso questo reattore rispetto a tutte le altre zone dell'impianto.
- si può facilmente valutare il livello di intasamento del catalizzatore, potendo così programmare i cicli di pulizia e manutenzione del catalizzatore stesso.

I fumi di processo dopo aver attraversato il filtro a maniche vengono miscelati con la soluzione ammoniacale e continuano il loro percorso passando attraverso il reattore SCR. Come già descritto in precedenza, il reattore SCR è composto da due strati di catalizzatore con altezza di 0.64 m e con un grado di vuoto del 76%, pertanto ci si può aspettare una perdita di carico consistente tra l'entrata e l'uscita del reattore. La perdita di pressione va ad incidere sul ventilatore di fumi a valle dell'intero impianto, in quanto per garantire l'uscita dei fumi al camino deve vincere tutte le perdite di carico presenti nelle varie sezioni della linee. Infatti l'intero sistema è mantenuto in depressione, e più ci si allontana dal ventilatore di tiraggio, più la pressione aumenta, o meglio, più la depressione diminuisce.

Le misure di pressione calcolate lungo la linea sono ubicate:

- in camera di combustione, tale valore è una variabile controllata del processo, in quanto il suo valore viene fissato a circa $-4 \text{ mmH}_2\text{O}$, questa condizione viene raggiunta variando l'intensità assorbita dal ventilatore di coda, in base al dosaggio di aria combustibile immessa nel forno.
- in entrata all'elettrofiltro;
- in entrata al reattore SCR, a monte della griglia del dosaggio della soluzione ammoniacale e a valle del bruciatore
- in uscita al reattore SCR, più precisamente dopo il preriscaldatore, quindi poco prima del ventilatore di tiraggio dei fumi.

Invece per quanto riguarda le perdite di carico i valori più rilevanti misurati riguardano il passaggio attraverso:

- il reattore a secco;
- il filtro a maniche;
- il reattore SCR, in particolare la misurazione avviene a monte del passaggio attraverso il primo strato di catalizzatore e a valle dell'eventuale terzo strato.

Dopo aver descritto il funzionamento dell'impianto verrebbe da ipotizzare che la sezione che ha più perdite di carico sia il filtro a maniche, in quanto il processo richiede un gran dispendio di energia per far passare i fumi attraverso le maglie.

In realtà si è osservato che a parità di condizioni anche il reattore a secco presenta delle perdite di carico che sono pari se non addirittura superiori al filtro a maniche.

Si è effettuato un periodo di osservazione nei mesi di gennaio e febbraio 2012, ottenendo i seguenti risultati:

Tabella 5.1 Medie mensili valori di pressione a monte e a valle della linea 2

	P camera combustione [mmH ₂ O]	P uscita SCR [mmH ₂ O]
Gennaio 2012	-4,0	-376,3
Febbraio 2012	-4,0	-339,8

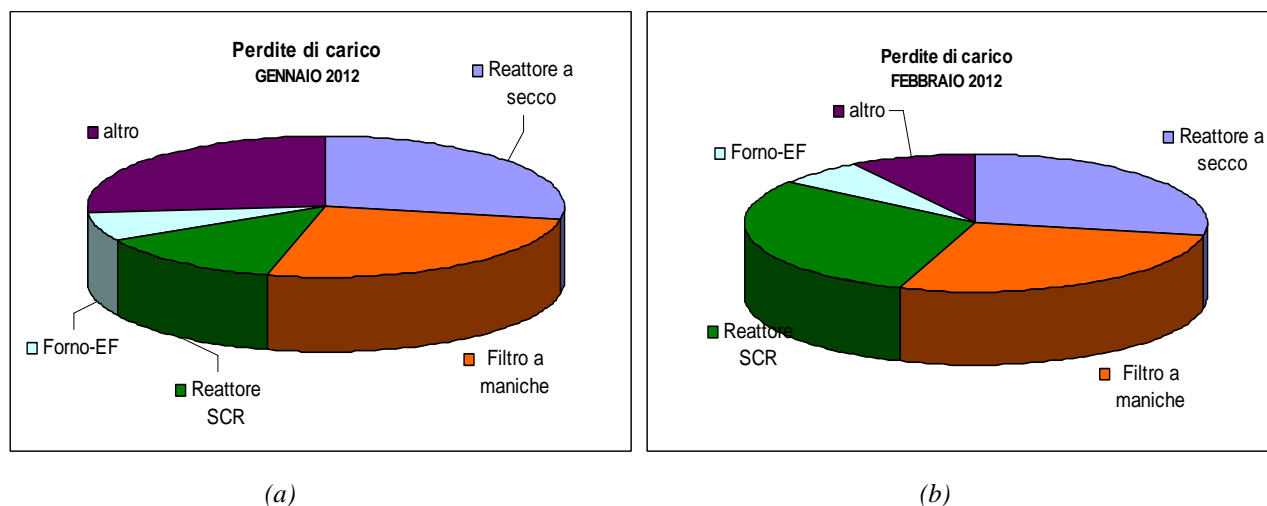
Tabella 5.2 Medie mensili delle perdite di carico nelle sezioni di abbattimento della Linea2

	ΔP reattore a secco [mmH ₂ O]	ΔP filtro a maniche [mmH ₂ O]	ΔP reattore SCR [mmH ₂ O]	ΔP forno-EF [mmH ₂ O]
Gennaio 2012	102,8	96,9	46,9	24,6
Febbraio 2012	93,9	91,1	99,8	21,3

Dalla tabella 5.2 è possibile notare come le perdite di carico relative al passaggio dei fumi attraverso il reattore SCR siano notevolmente aumentate, addirittura raddoppiando in un mese.

Infatti ripartendo le perdite di carico dell'impianto, come in figura 5.1, si evince che nel mese di febbraio il reattore SCR acquisisce un ruolo fondamentale per quanto riguarda le perdite di carico totali dell'impianto. si può dire che più della metà della perdita di carico va associata alle seguenti sezioni d'impianto:

- reattore a secco;
- filtro a maniche;
- reattore SCR

**Figura 5.3** Perdite di carico nelle varie sezioni della Linea 2 nei mesi di gennaio2012 (a) e febbraio 2012(b).

La porzione “altro” comprende le perdite di carico dovute a passaggio attraverso le tubazioni, ma soprattutto è dovuta all'iniezione dei reagenti.

La diversa distribuzione delle perdite di carico nei due mesi presi in considerazione, suggerisce di fare una più accurata analisi, soprattutto per quanto riguarda il mese di febbraio, in cui si nota un'inversione di tendenza.

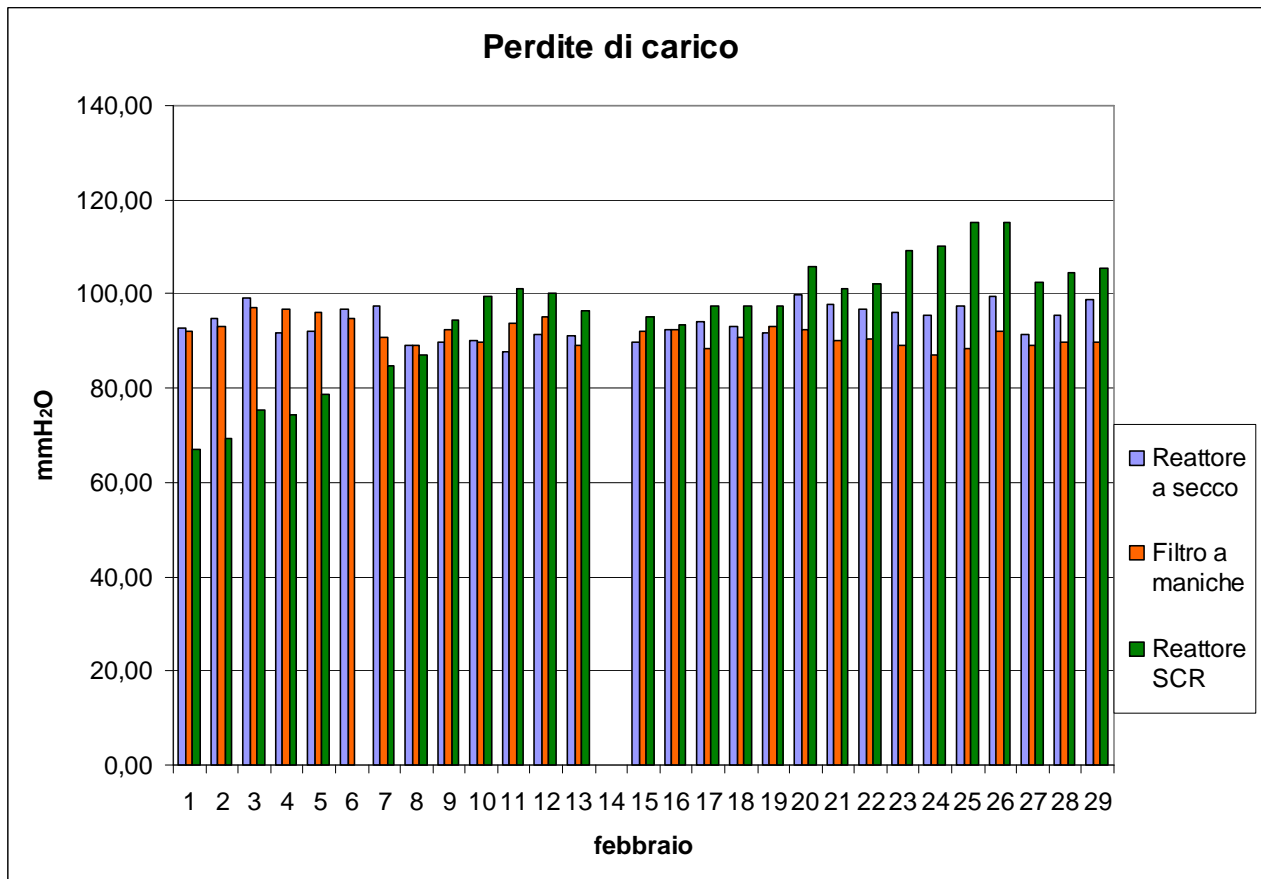


Figura 5.4 Andamento delle perdite di carico della linea 2 nelle 3 sezioni considerate.

Dalla figura 5.4 è interessante notare un lento aumento della caduta di pressione attraverso il reattore SCR.

Inoltre la linea è stata fermata il giorno 14, successivamente è stato riscontrato un ulteriore innalzamento delle perdite di carico tra l'entrata e l'uscita del reattore SCR.

Le possibili cause possono essere ricercate:

- nella fase di avvio dell'impianto è probabile che il preriscaldamento del catalizzatore e dei fumi in entrata non sia avvenuto in maniera corretta, ovvero si può ipotizzare che l'iniezione di ammoniaca ad una temperatura più bassa delle condizioni operative dell'impianto abbia causato un intasamento degli spazi di passaggio dei fumi attraverso il catalizzatore, dovuto alla precipitazione di ammoniaca in sali di ammonio.

- Un'altra causa potrebbe essere l'alta concentrazione di polveri in uscita dal filtro a maniche. Valori superiori di polverosità portano ad un incremento delle perdite di carico dovute ad un graduale e progressivo intasamento dei moduli.

Questa possibilità però è da escludersi, come suggerisce la Tabella 5.3, in quanto la concentrazione delle polveri a camino, per il mese di febbraio è inferiore a tutti gli altri mesi precedenti, in particolare, rispetto a gennaio.

Tabella 5.3 *Confronto della concentrazione delle polveri nel periodo ottobre - febbraio, per verificare un'eventuale anomalia nelle emissioni (Dati : report giornalieri).*

mesi considerati	concentrazione polveri [mg/Nm ³]	
	media	massimo
Ottobre 2011	0,31	0,34
Novembre 2011	0,35	0,43
Dicembre 2011	0,33	0,36
Gennaio 2012	0,31	0,34
Febbraio 2012	0,31	0,33

Pertanto è possibile verificare che rispetto ai mesi precedenti le emissioni delle polveri per il mese di febbraio non sono anomale, ma al di sotto della media. Questo permette di scartare l'ipotesi che l'aumento di perdita di carico attraverso il reattore catalitico della Linea 2 sia dovuto ad un'alta concentrazione delle polveri.

In generale, se le perdite di carico aumentano eccessivamente, fino a raggiungere una soglia di 200 mmH₂O, il sistema di controllo prevede che tale misurazione venga segnalata tramite allarme.

La misura della caduta di pressione risulta molto importante per programmare la rigenerazione del letto catalitico. Qualora la rigenerazione del letto catalitico si renda necessario, tale procedura prevede di mettere il catalizzatore in un forno riscaldandolo, in modo tale che i sali depositati subiscano la reazione inversa.

5.1.1 Consumo di elettricità del ventilatore

Una verifica dell'effetto delle perdite di carico si possono vedere dopo aver fatto un'analisi sul consumo di elettricità del ventilatore di coda.

Il dato ricavato dalla sala controllo indicativo dell'intensità elettrica assorbita dal ventilatore, è stata moltiplicata per il voltaggio dello strumento (380 V) al fine di ricavare la potenza assorbita dallo strumento stesso in Watt.

Inoltre il valore riportato è normalizzato rispetto al volume dei gas di combustione, in questo modo si vuole tener conto della differenza del consumo elettrico a causa della diversa portata dei gas. Il risultato riportato è espresso in W/Nm^3 .

Sono stati raccolti i dati ne è stato ricavato il seguente grafico:

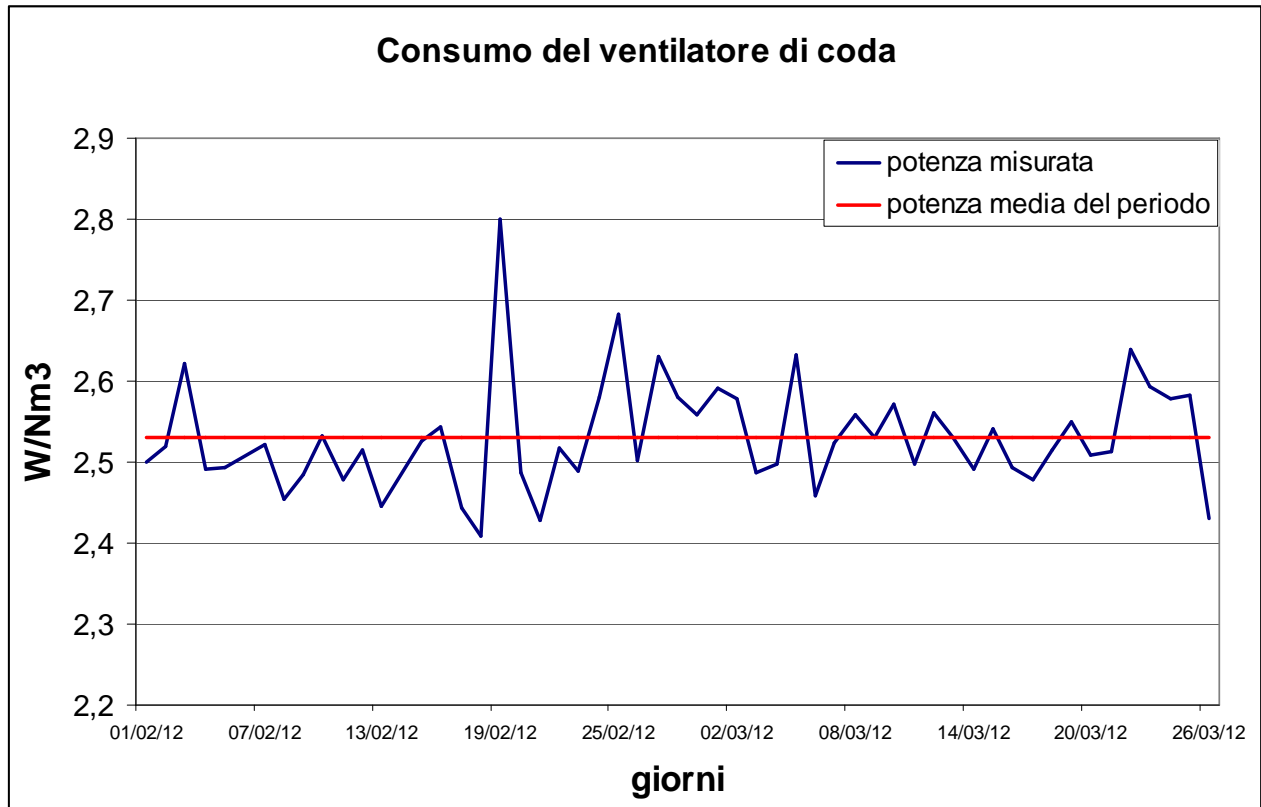


Figura 5.5 :Consumo del ventilatore di tiraggio dei fumi febbraio/marzo normalizzato per la portata.

Dai dati così ricavati nei mesi di febbraio e marzo si nota una grande variabilità delle misurazioni effettuate. Il valore medio si assesta circa ai 2,5 W per Nm^3 , con valori che variano da 2,4° 2,6, con punte che sfiorano i 2,7 W/ Nm^3 fino ed eccezionalmente arriva al valore di 2.8.

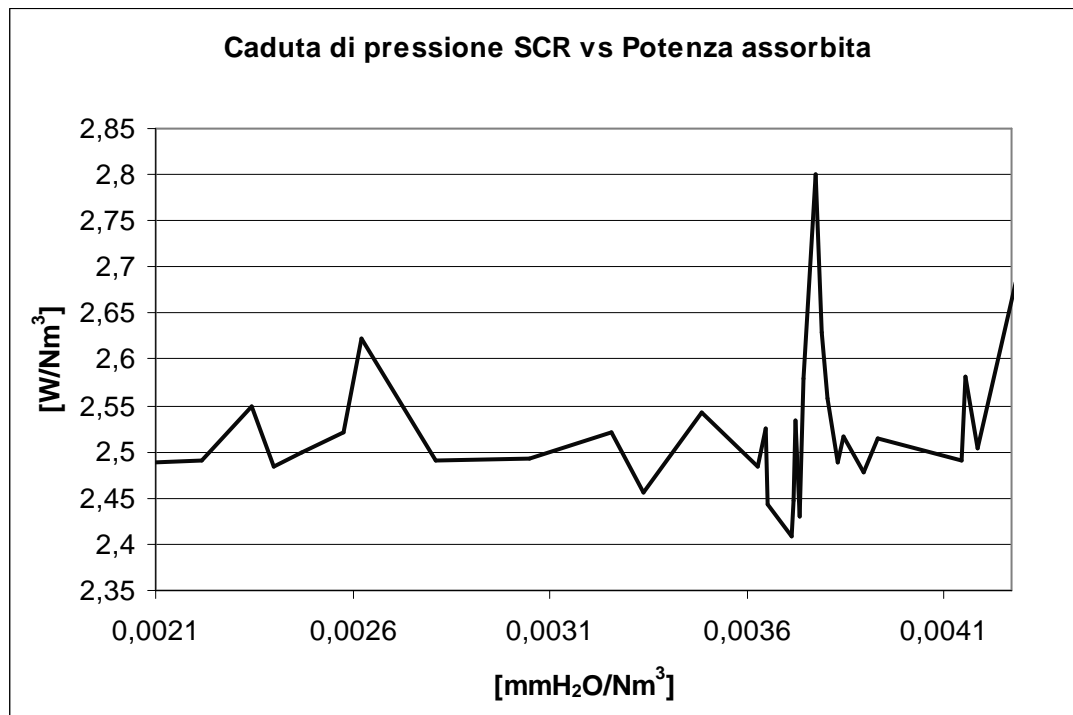


Figura 5.6. Dipendenza della potenza assorbita dal ventilatore di coda in funzione dell'aumento della caduta di pressione attraverso l'SCR.

Al fine di verificare se le perdite di carico incidono sulla potenza assorbita, si sono messi in relazione i dati raccolti relativi al consumo elettrico del ventilatore e alla caduta di pressione, normalizzati entrambi per la portata di riferimento (figura 5.6).

In questo senso vengono confrontati i dati del mese di febbraio, in cui si è verificato il picco della caduta di pressione attraverso il reattore (da 55 a 115 mmH₂O), si evince che un aumento anche considerevole della perdita di carico non va ad incidere sul consumo elettrico finale del ventilatore. Pertanto si può affermare che non c'è una forte dipendenza tra le due voci.

Si può quindi concludere che un aumento delle perdite di carico non influenza il consumo elettrico assorbito dalla linea, la quale invece è in forte dipendenza dalla portata dei fumi.

Con il revamping non è stata effettuata nessuna modifica al numero di giri del motore del ventilatore di coda. questo è dovuto al fatto che le perdite di carico non son aumentate rispetto all'assetto impiantistico precedente.

5.2 Andamento della temperatura nel reattore

Affinché il reattore possa avere un'elevata efficienza di abbattimento degli ossidi di azoto, la temperatura dei fumi deve essere superiore ai 180°C. Infatti ad una temperatura inferiore si verrebbero a formare i sali di ammonio che potrebbero andare ad ostruire il passaggio stesso dei fumi attraverso il reattore.

Al fine di ottenere un alto abbattimento degli ossidi di azoto, e per non compromettere l'attività del catalizzatore, è stato messo appunto un sistema di controllo della temperatura nel gruppo SCR.

Questo sistema comprende ben 8 misuratori di temperatura, disposti come in figura 5.7. divisi nelle sezioni di:

- preriscaldamento fumi in entrata al gruppo SCR;
- dosaggio della soluzione ammoniacale;
- reattore.

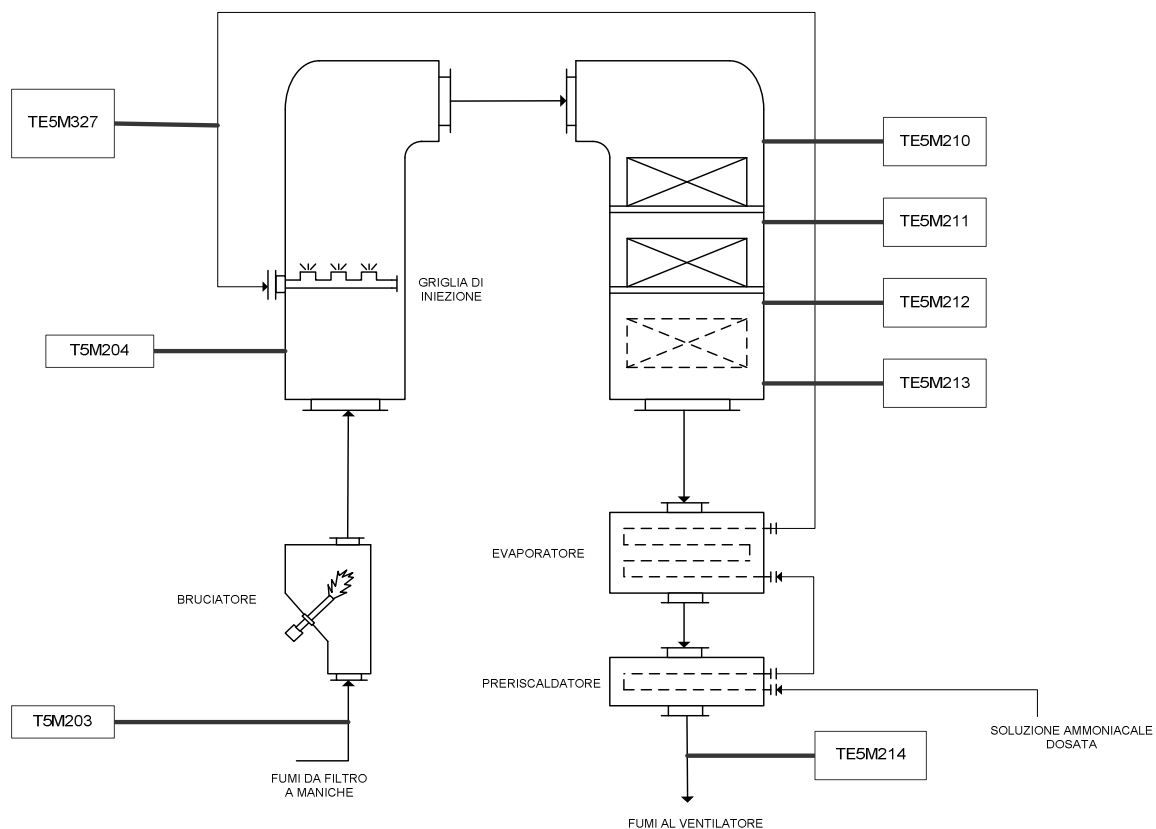


Figura 5.7 Gruppo SCR e relativi misuratori di temperatura.

Il preriscaldamento dei fumi in entrata consiste nel preriscaldare il gruppo SCR ad una temperatura ideale per il passaggio dei fumi, con il fine ultimo di preparare il gruppo SCR al passaggio dei fumi caldi. Questa operazione di preriscaldamento è eseguita per evitare la formazione di condense, che possono essere causate dalla notevole differenza di temperatura tra i fumi caldi

provenienti dal filtro e l'interno del SCR. Tali condense infatti potrebbero causare problemi di malfunzionamento nel gruppo SCR.

L'operazione di preriscaldamento, e la conseguente temperatura dei fumi in ingresso al gruppo SCR, è gestita dal regolatore di temperatura (TIC 5M203) che controllerà, per mezzo di un set-point di temperatura, l'apertura della valvola di regolazione fiamma al bruciatore, e di conseguenza la temperatura in ingresso al catalizzatore SCR. In questo modo viene preservata l'integrità del gruppo SCR, permettendo una regolare rampa di preriscaldamento SCR.

In questa sezione del gruppo SCR le misure di temperatura vengono effettuate:

- nei fumi in uscita dal filtro a maniche;
- a valle del bruciatore, prima di raggiungere la griglia di iniezione.

Tra queste due misurazioni la temperatura subisce una diminuzione di circa 2.4 °C in media.

Grazie a questa misura, insieme alla misurazione della portata il calore specifico si può misurare la perdita di calore in kW che i fumi subiscono dall'uscita del filtro a maniche fino al misuratore antistante la griglia di dosaggio di soluzione ammoniacale grazie alla formula:

$$Q = m c_p (T_2 - T_1) \quad (5.1)$$

m = portata volumetrica dei fumi in Nm^3/h ;

c_p = calore specifico medio dei fumi risulta essere pari a $0.327 \text{ kcal}/Nm^3 \text{ } ^\circ C$;

T_1 = T in uscita dal filtro a maniche $^\circ C$;

T_2 = T a valle del bruciatore $^\circ C$.

Grazie alle misurazioni effettuate durante il mese di gennaio, è stato possibile calcolare il calore medio mensile disperso nella sezione presa in riferimento:

Tabella 5.3 *Calcolo del calore disperso dai fumi tra il filtro a maniche e l'entrata al gruppo SCR.*

T_1 [°C]	T_2 [°C]	ΔT [°C]	m [Nm ³ /h]	c_p [kcal/Nm ³ °C]	Calore disperso [kW]
187,0	184,6	2,4	28373	0,4	31.4

Dalla tabella 5.3 è possibile avere un'idea del calore disperso dei fumi in entrata al gruppo SCR. Si precisa che le tubazioni sono già coibentate, quindi risulta difficile ridurre ulteriormente il calore disperso in questo tratto.

Il passo successivo è il dosaggio di soluzione ammoniacale. L'iniezione avviene attraverso l'apposita griglia, grazie la quale avviene la miscelazione dei fumi con il reagente riducente.

La soluzione ammoniacale è liquida a temperatura ambiente, in quanto l'ammoniaca in soluzione al 25% ha il punto di ebollizione a circa 38°C; per questo motivo si provvede ad effettuare uno scambio termico tra i fumi in uscita dal reattore SCR e la soluzione

ammoniacale già dosata, in modo da garantire che la sua iniezione avvenga in fase vapore. Se d'altro canto venisse iniettata in fase liquida, si avrebbe una diminuzione della temperatura dei fumi dovuta al calore latente dell'acqua durante il passaggio di stato.

Dopo il dosaggio della soluzione ammoniacale ci si attende un ulteriore abbassamento della temperatura, in quanto tale reagente è iniettato in griglia ad una temperatura di circa 89°C. Pertanto bisogna considerare innanzitutto la portata volumetrica di reagente gassoso iniettato. Il reagente essendo misurato in l/h deve essere trasformato in m³/h, come fase gassosa, per avere un confronto con la portata dei fumi. Quindi, grazie a dati di letteratura si è provveduto a fare una stima del rapporto che intercorre tra il dosaggio in litri e in m³. Tale parametro è approssimabile a circa 1.54 m³/l. In questo modo è stato possibile confrontare l'aumento della portata volumetrica del gas di processo dopo l'iniezione della soluzione ammoniacale. Si è constatato che l'aumento della portata volumetrica del flusso gassoso totale dopo l'iniezione è trascurabile, in quanto si ha un aumento in media di circa lo 0.05%, e in caso di massima portata della soluzione ammoniacale (corrispondente a 18 l/h) la percentuale raddoppierebbe (0.1%).

Ci si aspetta che la conseguente diminuzione di temperatura dovuta alla differenza di temperatura dei gas miscelati non sia in grado di compromettere il funzionamento del reattore SCR, in realtà dai dati medi misurati in impianto nel mese di gennaio in figura 5.8, si evince che la temperatura dopo l'iniezione della soluzione ammoniacale si abbassa notevolmente.

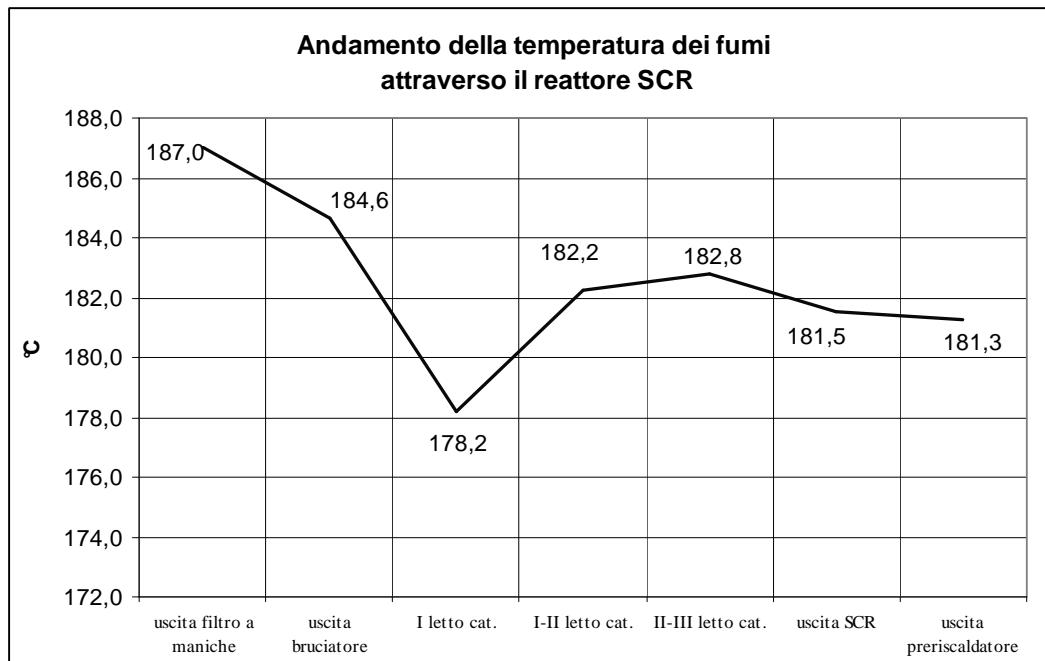


Figura 5.8. Temperature lungo il reattore (dati medi mese di gennaio) Set-Point 40mg/Nm³.

Un altro motivo di questo brusco abbassamento della temperatura prima del passaggio attraverso il primo letto catalitico è spiegabile dal fatto che la misurazione della temperatura antistante al primo letto catalitico è limitata dalla posizione, in quanto questa viene effettuata nel gomito della tubazione, in un punto poco raggiunto dai fumi, e per questo motivo si può dire che il valore misurato potrebbe scostarsi anche di qualche grado rispetto al valore reale.

Successivamente, quando i fumi attraversano il primo strato catalitico si riscontra un aumento di temperatura, che subisce un ulteriore incremento dopo il passaggio del secondo (ed ultimo) letto catalitico. L'aumento di temperatura attraverso i letti è motivata dal fatto che la reazione di riduzione degli ossidi di azoto è esotermica.

Un'ulteriore controllo di temperatura viene effettuato in uscita dal reattore (idealmente dopo il terzo letto catalitico), dove si verifica una piccola perdita di calore.

Nella tabella 5.4. sono riassunti le differenze di temperature medie della sezione d'impianto che comprende il reattore SCR. Dove, prendendo come riferimento i misuratori di temperatura presenti in figura 5.5:

$$\Delta T_1 = T_{5M204} - T_{E5M210}$$

$$\Delta T_2 = T_{5M210} - T_{E5M211}$$

$$\Delta T_3 = T_{5M211} - T_{E5M212}$$

$$\Delta T_4 = T_{5M213} - T_{E5M213}$$

Tabella 5.4. ΔT del reattore (entrata -uscita).

ΔT_1 [°C]	ΔT_2 [°C]	ΔT_3 [°C]	ΔT_4 [°C]
6,5	-4,1	-0,5	1,2

Con l'analisi di temperatura di questa sezione d'impianto, si può concludere che si ha il maggior sbalzo termico tra i misuratori di temperatura posti a monte e a valle della griglia di iniezione della soluzione ammoniacale, pertanto, sebbene il dosaggio di reagente vada ad aumentare di poco il volume totale dei fumi, va ad agire comunque in modo molto efficace sull'abbassamento di temperatura in entrata al reattore.

Dai dati raccolti sulla temperatura all'interno del reattore SCR risulta che i valori misurati per la temperatura variano di molto, ad esempio, la temperatura dei fumi a valle del bruciatore varia dai 175 ai 195 °C. Questo è dovuto principalmente al carico termico del rifiuto, ma anche alle condizioni in cui vengono trattati in fumi nel processo depurativo a monte dell'SCR.

Una così ampia variazione delle condizioni in entrata nel sistema SCR dei fumi da trattare, comporta anche una variazione sul sistema di abbattimento NO_x, in quanto tale sistema è sensibile al cambiamento di temperatura.

Il fatto di maggiore interesse riguarda in particolare lo slip di ammoniaca al camino. Infatti con l'abbassarsi della temperatura si ha una minore attività del catalizzatore, questo significa che l'ammoniaca dosata entrante nel reattore non è in grado di reagire con gli ossidi di azoto ed esce in camino. Al contrario, per quanto riguarda le emissioni di ossidi di azoto e la portata di ammoniaca dosata, non viene riscontrata una dipendenza nei confronti della temperatura dei fumi che raggiungono il gruppo SCR.

In questo caso in figura 5.9 si sono riportati i valori di temperatura a monte dell'iniezione della soluzione ammoniacale, a causa della poca affidabilità del misuratore posto dopo all'entrata del reattore.

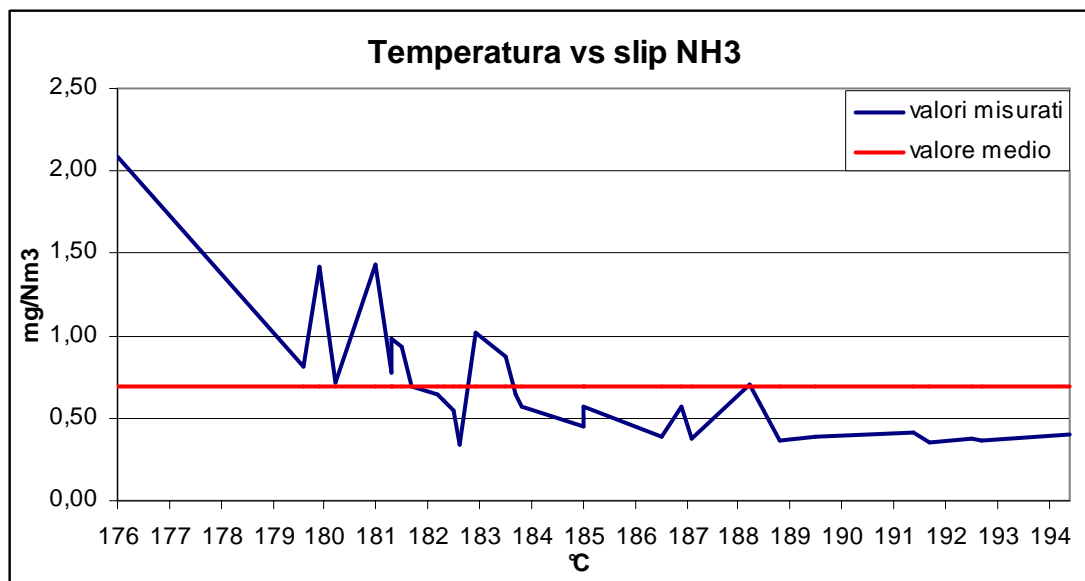


Figura 5.9 Dipendenza dello slip ammoniacale dalla temperatura nel reattore SCR nel periodo gennaio 2012, valori medi giornalieri. Set-point: 40mg/Nm³.

Il grafico mostra come lo slip al camino dipenda dalla temperatura. In particolare si nota che oltre i 184°C non si raggiunge mai il valore di slip di 1 mg/Nm³ ed inoltre i valori sono ben al di sotto della media.

Dopo questa verifica si può concludere che in caso si abbia un'elevata concentrazione di ammoniaca in uscita, si può andare ad agire attivando il bruciatore, in modo da riscaldare i fumi prima del raggiungimento del letto catalitico, in questo modo aumenta l'attività del catalizzatore che di conseguenza trattiene l'ammoniaca per reagire con gli ossidi di azoto.

5.3 Verifica delle emissioni di NO_x

Sono stati raccolti i dati delle emissioni degli NO_x e dello slip di ammoniaca in uscita al camino. I valori corrispondono ai giorni in cui la linea era in marcia, in periodo compreso tra giugno 2011 e febbraio 2012.

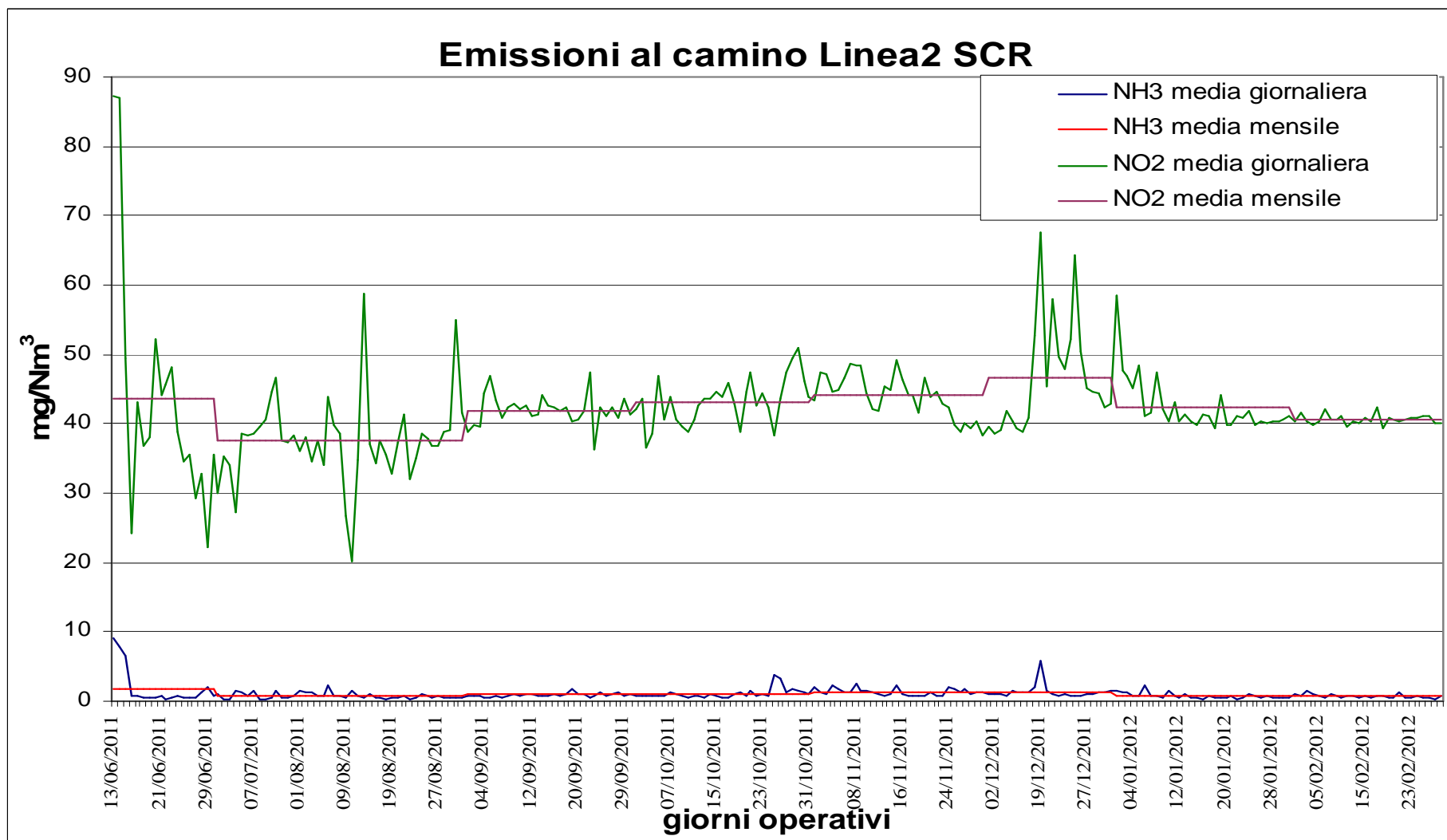


Figura 5.10 Emissioni di NO₂ e NH₃, linea 2, set point NO₂ 40 mg/Nm³

Si nota subito l'ampia oscillazione dei valori, dovuto in gran parte alla variabilità della composizione del rifiuto, soprattutto per quanto riguarda la composizione dell'azoto, unita alla modesta potenzialità dell'impianto.

Le medie mensili subiscono una grande variazione attorno il valore fissato di set point ($40\text{mg}/\text{Nm}^3$).

Trascurando i giorni successivi al primo avviamento dell'impianto, si registrano picchi piuttosto elevato di NO_2 , fino a raggiungere valori di $60\text{-}70\text{ mg}/\text{Nm}^3$, ma corrispondenti alle fasi critiche della linea, ovvero, l'arresto e l'avvio dopo un breve periodo di manutenzione, poiché il reattore catalitico è particolarmente sensibile alle variazioni delle condizioni operative, soprattutto per quanto riguarda la temperatura. Per questo motivo non si può dire che siano dati eccezionali, ma attendibili.

Lo slip ammoniacale, mensilmente assume valori omogenei, salvo presentare alcuni picchi nelle medie giornaliere, per i motivi sopra citati. Infatti qualora il reattore non raggiungesse il range termico previsto per la reazione, preriscaldando il letto catalitico, non si raggiunge l'abbattimento degli ossidi di azoto desiderato, per questo una elevata quantità di ammoniaca non reagisce e viene registrata dall'analizzatore al camino.

5.3.1 Comparazione con la Linea 3

La Linea 3 nell'impianto AVA, come già precedentemente accennato ha una capacità di 90 t rifiuto/giorno. Utilizza le stesse apparecchiature di rimozione degli inquinanti della Linea 2, ed inoltre è stata anch'essa soggetta al recente revamping, che ha portato all'introduzione del reattore catalitico SCR.

In quest'ottica è interessante osservare la differenza di efficienza di abbattimento degli ossidi di azoto del gas di processo a diversa portata. Ovviamente il reattore SCR della Linea 3 è stato progettato tenendo conto della maggior portata volumetrica dei fumi.

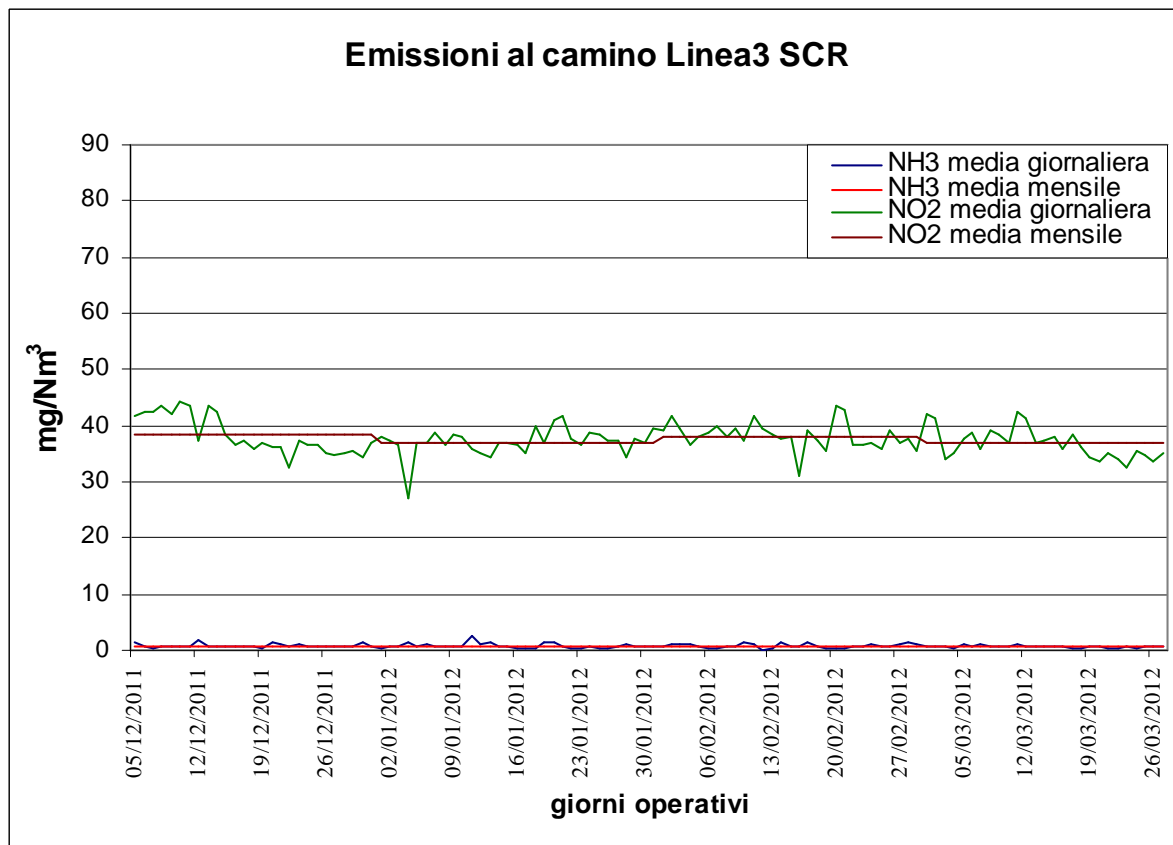


Figura 5.11 Grafico emissioni di NO₂ e NH₃, linea 3, set point NO₂ 40 mg/Nm³

Dalla figura 5.11 si nota un particolare stabilità nei valori registrati dello slip ammoniacale e delle emissioni di NO₂ rispetto a Linea 2 forse dovuto ad una migliore miscelazione di reagente nei fumi in entrata al reattore, derivante dal fatto di avere una maggiore portata. infatti un impianto più è elevata la capacità della linea, più è in grado di ammortizzare un eventuale disturbo in entrata al processo.

Dai risultati ottenuti si evince che nella Linea 3, per l'abbattimento degli ossidi di azoto necessita in proporzione, un minor dosaggio di soluzione ammoniacale. tale fatto è dovuto probabilmente al maggior grado di miscelazione dei gas di processo con il reagente, prima dell'entrata nel reattore.

In realtà, calcolando approssimativamente il tempo di contatto dei gas con il catalizzatore, si dimostra che tale tempo di residenza è maggiore per la linea tre. Assumendo una portata di fumi tal quale di circa 70000 m³/h, ed essendo il volume di un letto catalitico pari a 6,33 m³, si ottiene un tempo di superiore a 0,3 s, maggiore rispetto al tempo di contatto della Linea 2 che oscillava tra 0,25 e 0,3 s. Questo tempo aggiuntivo può essere il motivo del maggiore abbattimento verificato per la Linea 3.

5.4 Confronto con i limiti attuali

Il principale impatto che si ottiene dalla combustione dei rifiuti sono le emissioni delle sostanze inquinanti in atmosfera. Gli inquinanti di cui si farà di seguito riferimento si dividono in macroinquinanti e microinquinanti. Con macroinquinanti si intendono quelle sostanze presenti nelle emissioni dei fumi al camino con una concentrazione dell'ordine dei mg/Nm^3 , entrano in questa categoria le polveri, gli acidi alogenidrici (cloridrico HCl, fluoridrico HF), il carbonio organico totale COT ed infine gli ossidi di azoto, espressi come NO_2 e gli ossidi di zolfo (espressi come SO_2).

Diversamente, con microinquinanti si individuano le sostanze che sono presenti in quantità nettamente inferiore, tra i quali spiccano principalmente i metalli pesanti, e le diossine, le cui emissioni sono dell'ordine dei ng/Nm^3 , ma non per questo trascurabili, a causa dell'estrema pericolosità delle diossine per la salute umana anche a bassissime concentrazioni.

Alla Linea 2 dell'impianto di Schio sono stati fissati dei limiti provvisori per quanto concerne il valore delle emissioni dei macroinquinanti. Tali limiti; riportati in Tabella 5.5, linea fanno riferimento al sistema di abbattimento degli NO_x non catalitico SNCR, e per questo motivo i valori degli ossidi di azoto risultano più alti.

Con l'introduzione del sistema catalitico SCR, in sostituzione al sistema SNCR, comporta che l'attuale valore autorizzato di $180 \text{ mg}/\text{Nm}^3$, media giornaliera, venga sostituito da un valore obbligatoriamente compreso tra 40 e $100 \text{ mg}/\text{Nm}^3$, secondo l'applicazione della norma BBC (2010/75/UE). In applicazione a questa direttiva è stata emanata una linea guida che prevede, per quanto riguarda i limiti delle emissioni, l'intervallo di valori che possono essere conferiti all'esercizio di un impianto.

Tabella 5.5 Intervalli di valori delle emissioni in atmosfera associate all'utilizzo delle BAT Medie giornaliere e semiorarie (dati normalizzati a gas secco, 11% O_2 , 273K).

Sostanza	Unità di misura	Valori limite giornalieri attuali Linea2	BAT (tabella 5.2 BREF WI)	
			medie giornaliere	medie semiorarie
Polveri totali	mg/Nm^3	7	1-5	1-20
COT	mg/Nm^3	8	1-10	1-20
HCl	mg/Nm^3	8	1-8	1-50
HF	mg/Nm^3	<1	<1	<2
SO_2	mg/Nm^3	40	1-40	1-150
NO_2	mg/Nm^3	180	40-100	40-300
CO	mg/Nm^3	45	5-30	5-100
NH_3	mg/Nm^3		<10	1-10

5.4.1 Verifica sperimentale della rispondenza del nuovo SCR alla linea guida.

Con l'introduzione del reattore SCR, ci si aspetta non solo una riduzione delle emissioni di ossidi di azoto, ma anche degli acidi e delle polveri, per questo motivo chi adotta questa tecnica deve fare interventi a monte del gruppo SCR per prevenire qualsiasi causa di malfunzionamento del sistema catalitico. Tra le possibili fonti di danneggiamento si enumerano:

- la presenza dell'acido cloridrico e dell'acido fluoridrico, in quanto corrodono il sistema catalitico,
- un'alta concentrazione di polveri che intasano il passaggio dei fumi;
- gli ossidi di zolfo che, a temperature favorevoli, possono portare alla formazione di sali che compromettono l'efficienza di abbattimento degli ossidi di azoto.

Ciò significa che una bassa concentrazione di tali inquinanti, non solo permette di essere entro i limiti stabiliti, ma è anche nell'interesse della gestione dell'impianto. Si vedano, ad esempio, le due immagini sotto, tratte dalla letteratura:

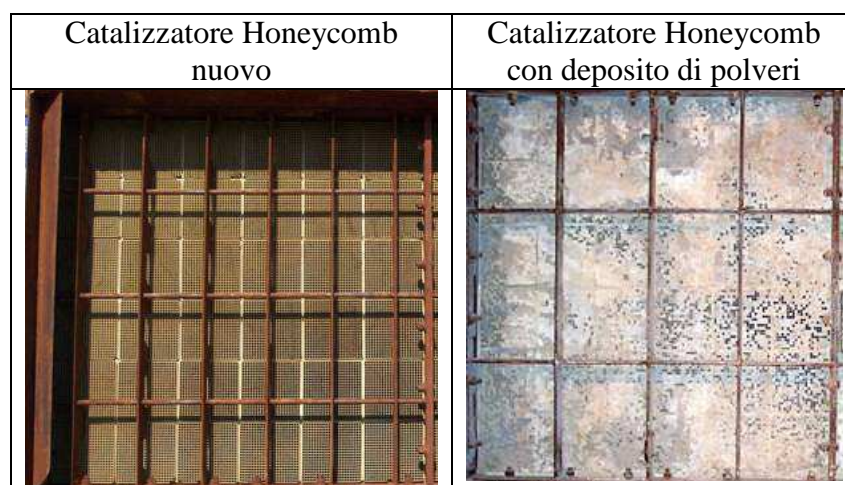


Figura 5.12 L'immagine rappresenta la differenza tra il catalizzatore per l'abbattimento degli ossidi di azoto nuovo, e come si presenta dopo un certo periodo operativo.

Per capire se in futuro la tecnologia SCR adottata potrà garantire il rispetto dei limiti anche con il valore limite legislativo più restrittivo delle BAT (media giornaliera: 40 mg/Nm³), è stata effettuata una verifica delle emissioni giornaliere riportate nei rapporti di analisi per individuare i valori più alti registrati.

Nello specifico, il parametro che più interessa ai fini dello studio sono le concentrazioni degli ossidi di azoto e dell'ammoniaca, poiché la futura autorizzazione richiederà di rispettare dei limiti più severi.

Si deve specificare che, per quanto riguarda l'intervallo degli ossidi di azoto, si tiene conto dell'utilizzo dell'SCR come BAT. Nel precedente caso (utilizzo di SNCR), si aveva un range di limiti di 120-180 mg/Nm³. Il limite attuale della linea 2 per gli ossidi di azoto sono di 180 mg/Nm³ poiché l'ultima autorizzazione concessa considerava la tecnica SNCR per l'abbattimento.

Per ciascun mese sono stati riportati i dati riguardanti le emissioni presenti nei report giornalieri, e si sono individuati i valori massimi.

È stata stilata la Tabella 5.6 che riassume i valori delle concentrazioni degli inquinanti massimi registrati nei mesi presi in considerazione, ovvero, per ogni mese è stato riportato il valore medio giornaliero più alto registrato per ciascun macroinquinante.

Tabella 5.6 *Massimi valori medi giornalieri delle emissioni, corrispondenti ai mesi di riferimento . (set point 40mg/Nm³)*

TABELLA RIASSUNTIVA	HCl mg/Nm³	CO mg/Nm³	NO₂ mg/Nm³	SO₂ mg/Nm³	HF mg/Nm³	COT mg/Nm³	Polveri mg/Nm³	NH₃ mg/Nm³
Giugno	2,4	38,1	76,9	0,00	0,31	3,9	1,6	9.0
Luglio	3,5	8,5	30,2	0,80	0,00	5,1	0,60	1.5
Agosto	7,4	1,4	45,5	0,70	0,00	0,35	1,9	2.4
Settembre	3,8	2,8	25,8	2,1	0,00	0,00	0,64	1.8
Ottobre	2,4	8,3	28,4	2,6	0,00	0,72	0,43	3.9
Novembre	0,85	13,5	27,6	0,00	0,00	0,00	0,43	2.6
Dicembre	1,4	13,8	47,2	2,1	0,00	0,77	0,36	5.9
Gennaio	0,97	2,7	36,5	0,48	0,00	0,00	0,34	2.3
Febbraio	0.65	2.7	21.4	1.5	0.00	0.00	0.33	1.4
Marzo	1,4	1,3	26.4	1.3	0.00	0.00	0.35	1.3

Dai valori riportati si evince che per quanto riguarda gli ossidi di azoto, la concentrazione di giugno è la più elevata, ed è in corrispondenza al primo giorno di avviamento dell'impianto con l'introduzione del SCR. Infatti prendendo in considerazione l'intero periodo, i valori più alti di questo inquinante sono registrati in corrispondenza dei primi due giorni dell'avvio dell'impianto, la causa va ricercata nel tentativo di aggiustare il dosaggio del reagente, al fine di raggiungere il dosaggio ottimale. Anche il valore anomalo di dicembre è dovuto all'avvio dell'impianto.

Il dato di agosto corrisponde al giorno in cui è stata arrestata la Linea 2 per manutenzione.

In generale si è osservato che i valori più alti mensili sono stati registrati in occasione dell'avvio e nell'arresto dell'impianto, questo perché le condizioni operative ottimali vengono raggiunte dopo un certo tempo.

Nei mesi più recenti è facile osservare che l'impianto si è assestato, ovvero presenta misurazioni che sono ben al di sotto dei limiti di legge.

Pertanto si può affermare che i valori di NO_2 che superano un ipotetico valore di 40 mg/Nm^3 (il valore minimo che può essere concesso) sono rari, e si sono verificati nelle fasi di criticità dell'impianto. Durante la normale marcia dell'esercizio della Linea 2, si è verificato un altro caso di superamento del limite minimo, ma talmente vicino alla soglia, da non meritare ulteriore attenzione per l'approfondimento.

In tabella 5.6. vengono inoltre evidenziati i valori che cadono all'interno del range fissato per i possibili limiti applicabili alla linea. C'è da specificare però che l'ammoniaca non è presente nei report giornalieri, ma è stato riportato il valore giornaliero dalla media fatta sulle semiore registrate per la linea. Come per gli altri macroinquinanti si osserva che il valore massimo registrato corrisponde al primo giorno di avviamento della linea, anche l'elevato valore di dicembre corrisponde al giorno di avviamento dell'impianto, dopo una lunga sosta dovuta a manutenzione.

Tra i diversi macroinquinanti, si considera in particolare l'acido cloridrico, il quale presenta valori che molto spesso si inseriscono all'interno del range fissato dal BAT.

Un valore anomalo per quanto riguarda l' HCl è stato riscontrato nel mese di agosto, molto vicino agli attuali limiti di legge.

Se in sede di autorizzazione integrata ambientale venisse fissato il limite minimo, si avrebbero molte occasioni di superamento di tale limite.

In generale il valore medio giornaliero dell'acido cloridrico varia tra $0.5\text{-}2 \text{ mg/Nm}^3$.

Il monossido di carbonio presenta un alto valore in corrispondenza dell'avviamento dell'impianto, ma generalmente i valori nel report giornaliero, raramente superano i 5 mg/Nm^3 .

L'acido fluoridrico, invece è presente in una quantità tale da essere in competizione con il limite di rilevabilità dello strumento, il valore massimo registrato nei mesi presi in considerazione, è di gran lunga inferiore al limite.

In conclusione si può affermare che in generale i massimi valori registrate per le emissioni dei macroinquinanti sono di gran lunga inferiori al limite massimo imponibile dall'autorizzazione.

5.4.2 Previsione del futuro limite

Dopo aver analizzato le concentrazioni medie giornaliere degli ossidi di azoto, si può affermare che l'impianto è in grado di soddisfare i futuri limiti, anche qualora venga disposto il limite minimo di 40 mg/ Nm^3 , sebbene si dovrà cercare di porre una maggiore attenzione in fase di avvio e di arresto dell'impianto.

D'altro canto è estremamente improbabile che venga fissato questo limite, ma piuttosto un valore mediano. Questa ipotesi è stata fatta in merito alle seguenti considerazioni:

- la Linea 2 è attiva dal 1991, per cui, per installare il reattore catalitico è stata fatta una modifica ad un impianto già esistente;
- la stessa linea ha una piccola potenzialità (60 ton/giorno), ciò comporta che risulta molto soggetto alla variabilità delle condizioni operative; contrariamente se gli stessi disturbi colpissero un impianto con una potenzialità maggiore, le condizioni operative sarebbero più ammortizzati.
- Si deve tener conto dell'invecchiamento e quindi della diminuzione della prestazione del catalizzatore. Infatti lo stesso letto catalitico non è in grado di garantire la stessa efficienza di abbattimento anche dopo 2/3 anni, e quindi dovrebbe essere sostituito più frequentemente, aumentando così i costi gestionali dell'impianto.

Per questi motivi, si può affermare con certezza che non verrà imposto il minimo limite.

La decisione del limite di emissione imponibile per quanto riguarda gli ossidi di azoto verrà effettuata in sede regionale, tenendo conto delle caratteristiche della linea, del territorio in cui si trova, e in base ai limiti imposti agli altri impianti della regione.

5.4.3 Confronto con le emissioni prima del revamping

Con l'introduzione del reattore catalitico, sono state richieste modifiche aggiuntive nel layout dell'impianto. Infatti per poter operare in condizioni favorevoli, è stato necessario garantire una maggiore depurazione dei fumi a monte del processo SCR, per i motivi elencati precedentemente.

Queste azioni forzate hanno comportato una minore concentrazione dei macroinquinanti nei fumi in uscita dal processo, determinata non solo dal più che dimezzamento degli ossidi di azoto, ma anche degli altri inquinanti, come dimostrano le tabelle 5.7 e 5.8.

Tabelle 5.7. Medie mensili delle emissioni prima del revamping (gas secco, 11% O₂). Anno 2010.

ANNO 2010	HCl	CO	NO ₂	SO ₂	HF	COT	Polveri
	[mg/Nm ³]	[mg/Nm ³]	[mg/Nm ³]	[mg/Nm ³]	[mg/Nm ³]	[mg/Nm ³]	[mg/Nm ³]
Gennaio	<0,26	0,68	113,1	<0,27	<0,12	<0,29	0,68
Febbraio	<0,26	0,55	126,5	<0,27	<0,12	<0,29	0,91
Marzo	<0,26	1,16	107,2	1,43	<0,12	<0,29	0,93
Aprile	<0,26	2,11	136,9	1,94	<0,12	<0,29	0,74
Maggio	<0,26	1,99	133,4	3,89	<0,12	<0,29	0,68
Giugno	2,12	4,1	118	2,81	<0,12	<0,29	0,9
Luglio	5,00	1,98	127,3	5,09	<0,12	<0,29	1,3
Agosto	4,49	2,3	137	6,68	<0,12	<0,29	1,18
Settembre	4,75	3,15	124,5	3,58	<0,12	<0,29	1,26
Ottobre	3,55	2,28	133,7	4,74	<0,12	<0,29	2,24
Novembre	3,32	1,79	144,4	1,64	<0,12	<0,29	2,27
Dicembre	4,74	2,09	128,2	<0,27	<0,12	<0,29	3,33
Media anno 2010	2,30	1,9	127,4	2,7	0,0	0,0	1,4

Tabella 5.8 Medie mensili delle emissioni dopo l'introduzione dell'SCR (gas secco, 11% O₂) Anno 2011.

Anno 2011	HCl	CO	NO ₂	SO ₂	HF	COT	Polveri
	[mg/Nm ³]	[mg/Nm ³]	[mg/Nm ³]	[mg/Nm ³]	[mg/Nm ³]	[mg/Nm ³]	[mg/Nm ³]
Luglio	1,23	0,84	18,24	<0,27	<0,12	<0,29	0,03
Agosto	1,84	<0,23	19,31	<0,27	<0,12	<0,29	0,11
Settembre	1,31	<0,23	20,91	<0,27	<0,12	<0,29	0,31
Ottobre	1,08	1,37	21,76	<0,27	<0,12	<0,29	0,41
Novembre	<0,26	1,73	22,5	<0,27	<0,12	<0,29	0,35
Dicembre	0,48	1,27	24,78	0,27	<0,12	<0,29	0,33
Media	1,03	0,945	21,25	<0,27	<0,12	<0,29	0,26

In ciascuna tabella si sono riportati i valori medi mensili delle emissioni risultanti dai report giornalieri. tutte le concentrazioni sono normalizzate alla temperatura di 273 K, la pressione di 101.3 kPa, riferite al gas secco e con una con tenore di O₂ del 11%.

L'impianto, dopo l'effettuazione del revamping, è stato avviato il 13 giugno 2011, in questo periodo si sono riscontrati molti dati fuori norma, dovuti al fatto che l'impianto doveva assestarsi in una condizione di stazionario. Per tale motivo si è evitato di riportare il mese di giugno per quanto riguarda l'anno 2011.

È evidente che la linea 2, prima del revamping, aveva una notevole emissione di ossidi di azoto al camino, infatti in generale, il sistema di abbattimento SNCR ha un'efficienza di abbattimento del 30-60%, rispetto all'80-90% che caratterizza il sistema SCR.

Per meglio comprendere l'ulteriore abbattimento degli NO_x grazie al sistema SCR si può fare un semplice calcolo, assumendo la portata nominale di 30000 Nm³/h e ipotizzando 365 giorni operativi all'anno, si arriva alla conclusione che con l'attuale Linea 2, rispetto al layout precedente riduce le emissioni di NO₂ di circa 28 tonn.NO₂/anno. Questo dato fa subito pensare all'immediato beneficio derivato esclusivamente dall'aggiunta del reattore catalitico.

Anche per quanto riguarda gli altri macroinquinanti si ha un maggiore abbattimento dopo la modifica alla linea. È un fatto del tutto aspettato, in quanto le polveri sono diminuite grazie alla sostituzione del tessuto filtrante del filtro a maniche, e le concentrazioni degli acidi si sono ulteriormente ridotte per merito dell'utilizzo del bicarbonato di sodio, anziché della calce nel reattore a secco, in quanto il bicarbonato di sodio presenta una maggiore efficienza di abbattimento, almeno nelle condizioni di esercizio.

Il bicarbonato di sodio, sostituito alla calce raggiunge un'alta performance, rispetto a quest'ultima nell'abbattimento di HCl e SO₂.

In generale si può affermare che i sistemi di trattamento dei fumi di combustione della Linea 2 raggiungono un ottimo livello di rimozione degli inquinanti, non solo in merito ai limiti

giornalieri già fissati, ma, per quanto riguarda gli ossidi di azoto, anche in previsione del più restrigente limite futuro.

Un'ulteriore considerazione va fatta in merito al consumo di reagente per la reazione DeNOx prima e dopo il revamping della linea.

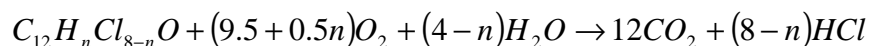
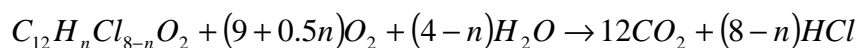
Lo schema precedente adottava infatti l'urea come reagente riducente della reazione, il cui consumo però variava dai 17 ai 19 l/h, questo sovradosaggio è dovuto alla regolazione in manuale. Il costo dell'urea di circa 0.17 €/kg è lievemente inferiore rispetto a quello della soluzione ammoniacale, si ha 0.21 €/kg, il cui consumo medio giornaliero è di circa 9-11 l/h. Pertanto con il sistema SCR si ha un doppio abbattimento degli ossidi di azoto, dosando la metà del reagente.

5.5 Verifica abbattimento delle diossine

Per ossidazione catalitica vengono rimosse anche tracce di composti organici.

La maggior parte di questo composto è principalmente adsorbito dal carbone attivo, nel reattore a secco, inoltre, grazie ad un filtro a maniche più efficiente, che abbatte meglio le polveri, quindi anche le diossine volatili.

Test di laboratorio e applicazioni commerciali hanno dimostrato che i catalizzatori SCR-DeNOx riducono in modo significativo (con efficienze di abbattimento da 50% fino all'80%) le tracce di composti organici contemporaneamente alla eliminazione dei NOx secondo le seguenti reazioni:



Si può avere una dimostrazione della decomposizione delle diossine grazie al revamping, osservando le emissioni al camino prima e dopo la modifica alla linea.

Non avendo a disposizione un analizzatore che permetta la lettura in continuo delle emissioni delle diossine, ci si affida ai valori misurati dai laboratori accreditati che effettuano la misurazione di taluni composti definiti dalla legge, con cadenza pressoché quadrimestrale.

Nel caso della Linea 2, i dati oggetti di studio riguardano le campagne di analisi dei fumi effettuate nel 2010 (prima del revamping) e nel 2011 (con l'introduzione del sistema SCR), dalle quali si sono ricavati i risultati riportati in Tabella 5.9. Si rammenta che vengono riportate le concentrazioni in massa e in tossicità equivalenti, in quanto le diossine si differenziano in diversi composti, ciascuno con un proprio livello di tossicità.

Tabella 5.9. Misurazione delle concentrazioni delle diossine nei fumi, prima e dopo il revamping, sulla Linea 2

Data effettuazione dell'analisi	media 3 campionamenti [ng I-TEQ/Nm³]	media analisi [ng I-TEQ/Nm³]	flusso di massa [µg I-TEQ/Nm³]	flusso di massa medio analisi [µg I-TEQ/Nm³]
SNCR				
25/05/2010	0,0208	0,0190	0,49	0,447
27/10/2010	0,0173		0,403	
SCR				
22/11/2011	0,0127	0,0127	0,32	0,32

Il risultato del confronto dei due diversi layout della Linea 2 per quanto riguarda le emissioni delle diossine è subito evidente. Con l'introduzione del sistema SCR infatti si ha un'ulteriore riduzione delle diossine, le quali comunque vengono già ampiamente ridotte grazie all'utilizzo del carbone attivo. Si deve però considerare la variazione della composizione del rifiuto, in quanto va ad influenzare in modo consistente la concentrazione delle diossine in uscita.

Capitolo 6

Variazione sperimentale del set-point

Al fine di ottimizzare il dosaggio della soluzione ammoniacale, sono state effettuate delle osservazioni variando il set point del valore degli ossidi di azoto in uscita.

I valori delle concentrazioni di NO_x registrati al camino dimostrano che si è molto al di sotto al limite di emissione fissato dall'autorizzazione (180 mg/Nm^3), questo significa che si ha a disposizione un range operativo in cui si può aumentare il set point fissato per la concentrazione di NO_x al camino, diminuendo l'iniezione di reagente e di conseguenza anche i costi operativi.

6.1 Descrizione della prova

Il set point inizialmente di 40 mg/Nm^3 , verrà poi aumentato di 10 mg/Nm^3 per volta. Quindi i casi analizzati saranno:

- 40 mg/Nm^3 ;
- 50 mg/Nm^3 ;
- 60 mg/Nm^3 ;
- 70 mg/Nm^3 .

Conseguentemente alla modifica del set-point, verranno poi valutati i dati degli ossidi di azoto e NH_3 in uscita e del dosaggio di soluzione ammoniacale, calcolandone parallelamente la media e la deviazione standard dei valori.

In base ai dati raccolti sui consumi e sulle emissioni, ne seguiranno delle considerazioni sulla gestione dell'impianto.

Lo scopo di questa prova è quello di riuscire a identificare un set point di ottimo, in cui sia garantiti il rispetto dei limiti in uscita, in modo da essere il migliore compromesso tra il consumo della soluzione ammoniacale e l'efficienza del reattore.

Infine viene verificato se esiste o meno una certa linearità tra il set-point e il dosaggio.

6.2 Modalità del dosaggio

La regolazione del dosaggio del reagente è stata progettata in maniera da garantire il dosaggio minimo anche qualora non venga raggiunto il valore di set point. In tal caso l'apertura della valvola sarà del 18% rispetto al totale della corsa, corrispondente ad un dosaggio di 5 l/h di soluzione ammoniacale, in modo da garantire un dosaggio minimo; infatti se la valvola venisse chiusa, non si avrebbe il dosaggio di reagente necessario per la reazione di riduzione. Inoltre è stato fissato un limite anche sulla massima apertura della valvola, relativo al 44%, grazie al quale vengono dosati 18 l/h. questo limite imposto all'apertura della valvola, permette di evitare il sovradosaggio di reagente, che potrebbe causare un aumento dello slip di ammoniaca al camino.

Le caratteristiche del dosaggio vengono riassunte nelle tabelle 6.1 e 6.2:

Tabella 6.1 Caratteristiche del regolatore

Regolatore	FIC_5M302
tipo	PI
Guadagno proporzionale	0,5
Tempo integrale	900 [sec]

Tabella 6.2 Modalità di dosaggio

Valvola di dosaggio	[%]	dosaggio [l/h]
apertura minima	18	3
apertura massima	44	18

Da osservazioni svolte in sede di sala controllo, si ottiene il la figura 6.1 che dimostra come il dosaggio vari in funzione dell'apertura della valvola.

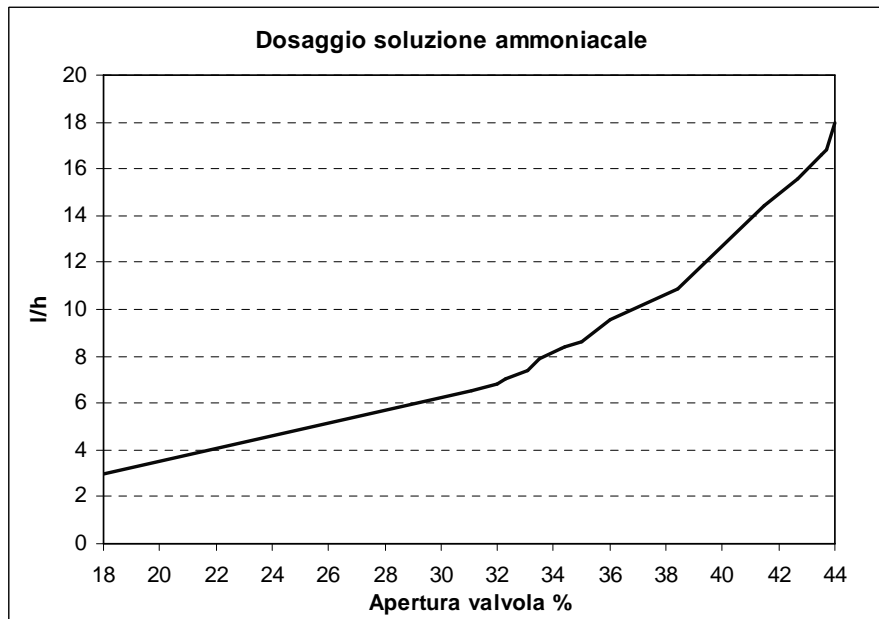


Figura 6.1: Variazione del dosaggio ammoniacale in funzione dell'apertura della valvola

6.3 Parametri analizzati e indici di performance

Di seguito vengono riportati i risultati conseguenti a ciascuna variazione di set point. Per ogni caso sono stati riportati seguenti valori ricavati dal sistema di monitoraggio della sala controllo:

- Concentrazione di NO_x (come NO_2), in mg/Nm^3 , nei fumi grezzi, ovvero in uscita dal secondo economizzatore riferito a gas secco, e all'11% di O_2 ;
- Concentrazione di NO_x (come NO_2) in mg/Nm^3 in uscita dal camino, alle stesse riportate alle stesse condizioni di sopra;
- Portata dei gas in uscita dal camino in Nm^3/h , riferito al gas secco, ma non riferito all'11% di ossigeno;
- Portata di soluzione ammoniacale dosata in l/h;
- Percentuale volumetrica O_2 in uscita;
- Lo slip di ammoniaca al camino in mg/Nm^3 .

Si nota immediatamente che la portata in uscita non è normalizzata per l'ossigeno. In seguito dovrà essere moltiplicata per la concentrazione degli ossidi di azoto, pertanto dovrà essere riferita anch'essa all'11% di ossigeno, per cui verrà effettuata la seguente operazione:

$$Q_{,11\% \text{O}_2} = Q_{mis} * \frac{(21 - O_{2,mis})}{(21 - O_{2,rif})} \quad (6.1)$$

Da questi dati si procede poi con il calcolo dell'efficienza DeNO_x, ovvero dell'efficienza di abbattimento del reattore catalitico SCR

$$\varepsilon = \frac{NO_{x,in} - NO_{x,out}}{NO_{x,in}} \quad (6.2)$$

L'efficienza di abbattimento degli ossidi di azoto è un parametro molto utile per verificare la prestazione del reattore SCR. È il rapporto tra la quantità di NO_x rimossa dal sistema e la concentrazione in entrata a tale sistema.

Un altro indice per valutare la performance del reattore e del dosaggio è il rapporto NH₃/NO₂. Questo rapporto indica quante moli di NH₃ sono necessarie per abbattere una mole di NO₂. Per ottenere questo dato è stata moltiplicata la soluzione ammoniacale per la densità, pari a 0.91 kg/l, ottenuto così il valore del dosaggio in kg/h, si è provveduto ad ottenere il quantitativo corrispondente di NH₃, poiché è presente nella soluzione ammoniacale al 25%, sottraendolo al quantitativo che non reagisce, ovvero allo slip di ammoniaca registrato al camino.

6.4 Risultati ottenuti

Dalle prove condotte in impianto, sono stati raccolti i risultati relativi alla variazione del set point. Sono stati scelti dei giorni indicativi per ciascun caso, riportando le medie orarie misurate dal sistema adottato in sala controllo. Infine è stata calcolata la media giornaliera e la deviazione standard dei valori medi orari sulla media giornaliera, ottenendo i valori riportati nelle tabelle 6.3 - 6.6. Inoltre si è voluto proporre le figure 6.2 -6.5 dei valori registrati in sede di sala controllo, al fine di poter essere un ulteriore supporto alle argomentazioni proposte.

Tabella 6.3 Risultati ottenuti con il set point pari a 40 mg/Nm³.

13/03/2012	NO _{2,in}	NO _{2,out}	sol.amm.		portata	O ₂	portata @11%O ₂	NH ₃		abbattimento NO ₂			slip NH ₃		NH ₃ reagito	NH ₃ /NO ₂	eff. DeNOx
Medie orarie	mg/Nm ³	mg/Nm ³	l/h	kg/h	Nm ³ /h	%	Nm ³ /h	kg/h	mol/h	mg/Nm ³	kg/h	mol/h	mg/Nm ³	mol/h	mol/h	[-]	[-]
0.00	425,1	32,3	14,4	13,1	29579	13	23663	3,6	211,4	392,8	9,3	202,0	3,21	4,45	206,9	1,025	0,924
1.00	397,2	35,9	8,4	7,6	29200	13	23360	2,1	123,3	361,3	8,4	183,4	0,97	1,32	122,0	0,665	0,910
2.00	394,7	42,4	12,6	11,5	29270	13,4	22245	3,2	185,0	352,3	7,8	170,3	1,12	1,46	183,5	1,078	0,893
3.00	400,9	46,2	11	10,0	29007	13,1	22916	2,8	161,5	354,7	8,1	176,6	1,05	1,41	160,1	0,906	0,885
4.00	406,3	40,7	15,2	13,8	29639	12,5	25193	3,8	223,1	365,6	9,2	200,1	2,05	3,03	220,1	1,100	0,900
5.00	414,9	42,4	11,9	10,8	29814	12,6	25044	3,0	174,7	372,5	9,3	202,7	0,97	1,42	173,3	0,855	0,898
6.00	423,4	32,7	12,9	11,7	29235	13,6	21634	3,2	189,4	390,7	8,5	183,7	1,40	1,77	187,6	1,021	0,923
7.00	374,8	37,8	8,8	8,0	28631	13,7	20901	2,2	129,2	337,0	7,0	153,1	0,68	0,83	128,3	0,839	0,899
8.00	332,4	32,7	7,9	7,2	23362	13,1	18456	2,0	116,0	299,7	5,5	120,2	0,53	0,57	115,4	0,960	0,902
9.00	344,3	40,2	6,9	6,3	29194	13,8	21020	1,7	101,3	304,1	6,4	138,9	0,40	0,49	100,8	0,726	0,883
10.00	385,0	53,1	12,9	11,7	29417	13,4	22357	3,2	189,4	331,9	7,4	161,2	0,86	1,12	188,2	1,168	0,862
11.00	350,0	18,2	7,8	7,1	27033	13,7	19734	2,0	114,5	331,8	6,5	142,3	0,41	0,47	114,0	0,801	0,948
12.00	360,0	56,5	8,3	7,6	27871	13,2	21739	2,1	121,8	303,5	6,6	143,4	0,51	0,64	121,2	0,845	0,843
13.00	332,2	39,2	10,5	9,6	29697	12,8	24352	2,6	154,1	293,0	7,1	155,0	0,54	0,77	153,4	0,989	0,882
14.00	378,6	38,4	10,7	9,7	29102	13,6	21535	2,7	157,1	340,2	7,3	159,2	0,58	0,73	156,3	0,982	0,899
15.00	315,5	25,9	5,7	5,2	27192	14	19034	1,4	83,7	289,6	5,5	119,8	0,25	0,27	83,4	0,696	0,918
16.00	318,8	47,6	6,9	6,3	27064	14	18945	1,7	101,3	271,2	5,1	111,6	0,31	0,34	100,9	0,904	0,851
17.00	322,0	43,3	7,7	7,0	27290	13,9	19376	1,9	113,0	278,7	5,4	117,3	0,39	0,44	112,6	0,960	0,866
18.00	357,0	44,2	9,8	8,9	27888	13,7	20358	2,5	143,9	312,8	6,4	138,4	0,55	0,66	143,2	1,035	0,876
19.00	386,3	39,7	9,9	9,0	28927	13,9	20538	2,5	145,3	346,6	7,1	154,7	0,39	0,47	144,9	0,937	0,897
20.00	390,3	44,4	11,9	10,8	24848	13,5	18636	3,0	174,7	345,9	6,4	140,1	0,80	0,87	173,8	1,241	0,886
21.00	337,7	16,5	7	6,4	27516	14,1	18986	1,8	102,8	321,2	6,1	132,5	0,34	0,37	102,4	0,773	0,951
22.00	384,9	73,5	12,2	11,1	28625	13,5	21469	3,1	179,1	311,4	6,7	145,3	1,07	1,35	177,7	1,224	0,809
23.00	406,7	22,4	10,1	9,2	29069	13,7	21220	2,5	148,3	384,3	8,2	177,2	0,80	0,99	147,3	0,831	0,945
media giorn.	372,5	39,4	10,1	9,2	28270	13,5	21363	2,5	147,7	333,0	7,2	155,4	0,838	1,09	146,6	0,940	0,894
dev. standard	34,3	12,2	2,6	2,3	1579	0,448	2003	0,642	37,7	35,1	1,2	27,0	0,651	0,94	37,0	0,157	0,033

Tabella 6.4 Risultati ottenuti con il set point pari a 50 mg/Nm³.

21/03/2012	NO _{2,in}	NO _{2,out}	sol.amm.		portata	O ₂	portata @11%O ₂	NH ₃		abbattimento NO ₂		slip NH ₃		NH ₃ reagito	NH ₃ /NO ₂	eff. DeNOx	
Medie orarie	mg/Nm ³	mg/Nm ³	l/h	kg/h	Nm ³ /h	%	Nm ³ /h	kg/h	mol/h	mg/Nm ³	kg/h	mol/h	mg/Nm ³	mol/h	mol/h	[-]	[-]
0.00	407,3	68,8	8,8	8,0	27345	13,6	20235	2,2	129,2	338,5	6,8	148,8	0,86	1,02	128,17	0,861	0,831
1.00	395,4	46,0	12,5	11,4	27959	12,8	22926	3,1	183,5	349,4	8,0	174,1	1,64	2,21	181,29	1,041	0,884
2.00	396,9	47,5	7,8	7,1	27811	13,2	21693	2,0	114,5	349,4	7,6	164,7	0,60	0,76	113,74	0,691	0,880
3.00	395,6	60,9	11,3	10,3	27313	13,3	21031	2,8	165,9	334,7	7,0	153,0	1,03	1,27	164,62	1,076	0,846
4.00	370,9	31,0	5,6	5,1	25191	13,6	18641	1,4	82,2	339,9	6,3	137,7	0,70	0,76	81,45	0,592	0,916
5.00	418,4	83,5	14,5	13,2	29164	12,2	25664	3,6	212,9	334,9	8,6	186,8	1,60	2,41	210,45	1,127	0,800
6.00	404,0	19,5	7,6	6,9	28803	13,5	21602	1,9	111,6	384,5	8,3	180,5	0,82	1,04	110,53	0,612	0,952
7.00	338,5	62,4	5,99	5,5	26676	13,9	18940	1,5	87,9	276,1	5,2	113,6	0,59	0,66	87,28	0,768	0,816
8.00	400,3	71,6	13,6	12,4	23936	12,7	19867	3,4	199,6	328,7	6,5	141,9	1,73	2,02	197,63	1,393	0,821
9.00	327,5	17,1	4,5	4,1	26965	13,4	20493	1,1	66,1	310,4	6,4	138,2	0,59	0,70	65,36	0,473	0,948
10.00	315,9	59,0	4,4	4,0	26835	13,5	20126	1,1	64,6	256,9	5,2	112,4	0,31	0,37	64,23	0,572	0,813
11.00	365,9	70,4	9,2	8,4	25856	14,1	17841	2,3	135,1	295,5	5,3	114,6	0,83	0,86	134,19	1,171	0,808
12.00	352,3	39,3	8,9	8,1	27110	13,2	21146	2,2	130,7	313,0	6,6	143,8	0,81	1,00	129,65	0,901	0,888
13.00	327,9	41,3	5,5	5,0	28315	12,9	22935	1,4	80,7	286,6	6,6	142,8	0,42	0,56	80,18	0,561	0,874
14.00	336,2	71,0	8,4	7,6	27727	13,2	21627	2,1	123,3	265,2	5,7	124,6	0,71	0,90	122,41	0,982	0,789
15.00	363,1	51,3	13,6	12,4	28705	12,3	24973	3,4	199,6	311,8	7,8	169,2	1,37	2,01	197,64	1,168	0,859
16.00	322,5	20,0	4,1	3,7	26568	13,7	19395	1,0	60,2	302,5	5,9	127,5	0,30	0,34	59,85	0,469	0,938
17.00	327,7	70,7	5,4	4,9	26384	13,6	19524	1,4	79,3	257,0	5,0	109,0	0,47	0,54	78,73	0,722	0,784
18.00	372,0	64,1	13,2	12,0	29575	12,5	25139	3,3	193,8	307,9	7,7	168,2	1,09	1,61	192,17	1,143	0,828
19.00	395,7	43,5	9,3	8,5	29501	13,1	23306	2,3	137,1	352,2	8,2	178,4	0,47	0,64	136,47	0,765	0,890
20.00	404,5	61,8	12,7	11,6	23793	12,8	19510	3,2	186,4	342,7	6,7	145,3	1,12	1,28	185,16	1,274	0,847
21.00	395,1	25,3	8,7	7,9	31167	13	24934	2,2	127,7	369,8	9,2	200,4	0,53	0,78	126,94	0,634	0,936
22.00	298,1	62,2	7,9	7,2	29878	13,9	21213	2,0	116,0	235,9	5,0	108,7	0,47	0,58	115,39	1,061	0,791
23.00	398,1	53,7	13,2	12,0	31202	13,1	24650	3,3	193,8	344,4	8,5	184,5	0,67	0,97	192,81	1,045	0,865
media giorn.	367,9	51,7	9,0	8,2	27657	13,2	21559	2,3	132,6	316,2	6,8	148,7	0,82	1,053	131,5	0,879	0,859
dev. standard	35,7	18,8	3,3	3,0	1930	0,501	2281	0,833	48,9	38,3	1,3	27,4	0,42	0,586	48,4	0,271	0,053

Tabella 6.5 Risultati ottenuti con il set point pari a 60 mg/Nm³.

31/03/2012	NO _{2,in}	NO _{2,out}	sol.amm.		portata	O ₂	portata @11%O ₂	NH ₃		abbattimento NO ₂		slip NH ₃		NH ₃ reagito	NH ₃ /NO ₂	eff. DeNOx	
Medie orarie	mg/Nm ³	mg/Nm ³	l/h	kg/h	Nm ³ /h	%	Nm ³ /h	kg/h	mol/h	mg/Nm ³	kg/h	mol/h	mg/Nm ³	mol/h	mol/h	[-]	[-]
0.00	398,0	59,0	11,4	10,4	29845	13,5	22384	2,9	167,4	339,0	7,6	164,9	0,31	0,41	166,94	1,012	0,852
1.00	343,0	35,5	4,6	4,2	28111	13,9	19959	1,2	67,5	307,5	6,1	133,4	0,31	0,36	67,16	0,504	0,897
2.00	356,0	83,3	7,5	6,8	29000	13,3	22330	1,9	110,1	272,7	6,1	132,3	0,88	1,15	108,95	0,823	0,766
3.00	397,0	75,5	14,3	13,0	29703	13	23762	3,6	209,9	321,5	7,6	166,0	0,63	0,87	209,05	1,259	0,810
4.00	410,0	45,6	7,6	6,9	29976	13,4	22782	1,9	111,6	364,4	8,3	180,4	0,76	1,02	110,55	0,613	0,889
5.00	427,5	81,1	14,3	13,0	30667	12,9	24840	3,6	209,9	346,4	8,6	187,0	1,11	1,62	208,30	1,114	0,810
6.00	431,5	48,0	10,2	9,3	30765	12,9	24920	2,6	149,7	383,5	9,6	207,7	1,04	1,51	148,22	0,714	0,889
7.00	396,3	61,5	13,6	12,4	30682	12,8	25159	3,4	199,6	334,8	8,4	183,0	0,70	1,03	198,61	1,085	0,845
8.00	320,0	20,6	4,4	4,0	26967	13,5	20225	1,1	64,6	299,4	6,1	131,6	0,21	0,24	64,35	0,489	0,936
9.00	316,8	52,4	5,7	5,2	23501	13,5	17626	1,4	83,7	264,4	4,7	101,3	0,27	0,27	83,40	0,824	0,835
10.00	280,1	38,9	4	3,6	28453	14,2	19348	1,0	58,7	241,2	4,7	101,4	0,23	0,26	58,46	0,577	0,861
11.00	351,9	108,7	10,5	9,6	28050	13,2	21879	2,6	154,1	243,2	5,3	115,6	2,20	2,83	151,31	1,309	0,691
12.00	404,9	63,3	14,5	13,2	30266	12,5	25726	3,6	212,9	341,6	8,8	191,0	0,95	1,43	211,43	1,107	0,844
13.00	434,1	81,4	13,1	11,9	29004	12,8	23783	3,3	192,3	352,7	8,4	182,3	1,62	2,26	190,05	1,043	0,812
14.00	426,2	38,9	8,2	7,5	29811	12,9	24147	2,1	120,4	387,3	9,4	203,2	0,50	0,71	119,67	0,589	0,909
15.00	385,2	68,9	9,9	9,0	28083	12,9	22747	2,5	145,3	316,3	7,2	156,3	0,52	0,69	144,64	0,925	0,821
16.00	310,4	36,9	5,3	4,8	23731	13,5	17798	1,3	77,8	273,5	4,9	105,8	0,14	0,15	77,66	0,734	0,881
17.00	294,6	42,3	3,6	3,3	26491	13,9	18809	0,9	52,8	252,3	4,7	103,1	0,13	0,14	52,70	0,511	0,856
18.00	312,1	71,9	4,7	4,3	27132	13,9	19264	1,2	69,0	240,2	4,6	100,5	0,65	0,73	68,27	0,679	0,770
19.00	361,0	94,5	14,6	13,3	29099	13,1	22988	3,7	214,3	266,5	6,1	133,1	1,05	1,41	212,92	1,599	0,738
20.00	435,5	40,8	10	9,1	29329	13,2	22877	2,5	146,8	394,7	9,0	196,2	0,86	1,15	145,65	0,742	0,906
21.00	452,8	84,4	14,6	13,3	26028	12,8	21343	3,7	214,3	368,4	7,9	170,9	0,95	1,19	213,14	1,247	0,814
22.00	443,3	50,8	10,7	9,7	30708	12,7	25488	2,7	157,1	392,5	10,0	217,4	0,88	1,31	155,77	0,717	0,885
23.00	463,9	75,4	14,8	13,5	30176	12,9	24443	3,7	217,3	388,5	9,5	206,3	1,33	1,91	215,35	1,044	0,837
media giorn.	381,3	60,8	9,7	8,8	28566	13,2	22276	2,4	142,0	320,5	7,2	157,1	0,76	1,03	140,9	0,886	0,840
dev. standard	54,9	21,9	4,0	3,6	2050	0,447	2468	0,998	58,6	53,3	1,8	39,3	0,50	0,69	58,2	0,296	0,058

Tabella 6.6 Risultati ottenuti con il set point pari a 70 mg/Nm³.

03/04/2012	NO _{2,in}	NO _{2,out}	sol.amm.		portata	O ₂	portata @11%O ₂	NH ₃		abbattimento NO ₂			slip NH ₃		NH ₃ reagito	NH ₃ /NO ₂	eff. DeNOx
Medie orarie	mg/Nm ³	mg/Nm ³	l/h	kg/h	Nm ³ /h	%	Nm ³ /h	kg/h	mol/h	mg/Nm ³	kg/h	mol/h	mg/Nm ³	mol/h	mol/h	[-]	[-]
0.00	424,3	82,6	15,3	13,9	30372	13	24298	3,8	224,6	341,7	8,3	180,4	0,55	0,78	223,82	1,241	0,805
1.00	384,0	46,7	6,2	5,6	29715	14,1	20503	1,6	91,0	337,3	6,9	150,3	0,24	0,28	90,73	0,604	0,878
2.00	343,9	81,7	6,3	5,7	29013	13,8	20889	1,6	92,5	262,2	5,5	119,0	0,46	0,56	91,92	0,772	0,762
3.00	381,6	74,5	9,4	8,6	29799	13,4	22647	2,4	138,0	307,1	7,0	151,1	0,46	0,61	137,39	0,909	0,805
4.00	366,8	57,2	7,2	6,6	29421	13,5	22066	1,8	105,7	309,6	6,8	148,4	0,40	0,52	105,18	0,709	0,844
5.00	412,0	95,5	12,9	11,7	29657	13,3	22836	3,2	189,4	316,5	7,2	157,1	0,84	1,13	188,25	1,199	0,768
6.00	422,0	47,1	9,3	8,5	31330	13,4	23811	2,3	136,5	374,9	8,9	194,0	0,59	0,82	135,71	0,700	0,888
7.00	390,5	91,3	12,9	11,7	30782	13,4	23394	3,2	189,4	299,2	7,0	152,1	0,77	1,06	188,31	1,238	0,766
8.00	402,4	46,1	7	6,4	30224	13,2	23575	1,8	102,8	356,3	8,4	182,5	0,36	0,49	102,27	0,560	0,885
9.00	345,6	70,0	6,7	6,1	25350	13,9	17999	1,7	98,4	275,6	5,0	107,8	0,42	0,44	97,92	0,908	0,797
10.00	266,0	47,7	3,8	3,5	28541	13,5	21406	1,0	55,8	218,3	4,7	101,5	0,41	0,52	55,27	0,544	0,821
11.00	347,4	89,6	9,4	8,6	29268	13,7	21366	2,4	138,0	257,8	5,5	119,7	0,42	0,52	137,47	1,149	0,742
12.00	318,0	48,3	5	4,6	28253	13,9	20060	1,3	73,4	269,7	5,4	117,6	0,51	0,60	72,80	0,619	0,848
13.00	386,8	113,7	11,8	10,7	29483	12,8	24176	3,0	173,2	273,1	6,6	143,5	1,76	2,49	170,73	1,190	0,706
14.00	384,5	49,6	12,7	11,6	28934	11,4	27777	3,2	186,4	334,9	9,3	202,1	0,76	1,24	185,20	0,916	0,871
15.00	436,6	91,4	11,8	10,7	29640	12,7	24601	3,0	173,2	345,2	8,5	184,5	0,96	1,38	171,84	0,931	0,791
16.00	408,1	46,8	9,3	8,5	28930	13,1	22855	2,3	136,5	361,3	8,3	179,4	0,45	0,60	135,93	0,758	0,885
17.00	376,8	84,9	8,4	7,6	29313	12,2	25795	2,1	123,3	291,9	7,5	163,6	0,74	1,11	122,20	0,747	0,775
18.00	411,3	72,0	12	10,9	30467	13,4	23155	3,0	176,2	339,3	7,9	170,7	0,70	0,95	175,21	1,026	0,825
19.00	400,6	67,6	9,8	8,9	29619	12	26657	2,5	143,9	333,0	8,9	192,9	0,99	1,55	142,31	0,738	0,831
20.00	393,6	72,1	11,5	10,5	29871	13,1	23598	2,9	168,8	321,5	7,6	164,9	1,21	1,68	167,14	1,014	0,817
21.00	381,6	41,8	7,3	6,6	25592	14	17914	1,8	107,2	339,8	6,1	132,3	0,76	0,79	106,37	0,804	0,890
22.00	395,8	95,9	12,8	11,6	30676	12,6	25768	3,2	187,9	299,9	7,7	167,9	0,86	1,29	186,61	1,111	0,758
23.00	428,6	64,1	10,8	9,8	30968	12,8	25394	2,7	158,5	364,5	9,3	201,1	0,62	0,92	157,62	0,784	0,850
media giorn.	383,7	69,9	9,6	8,7	29384	13,2	23022	2,4	140,4	313,8	7,3	157,7	0,67	0,93	139,5	0,882	0,817
dev. standard	38,4	20,5	2,9	2,7	1425	0,661	2476	0,737	43,3	39,5	1,4	29,8	0,33	0,50	43,0	0,221	0,052

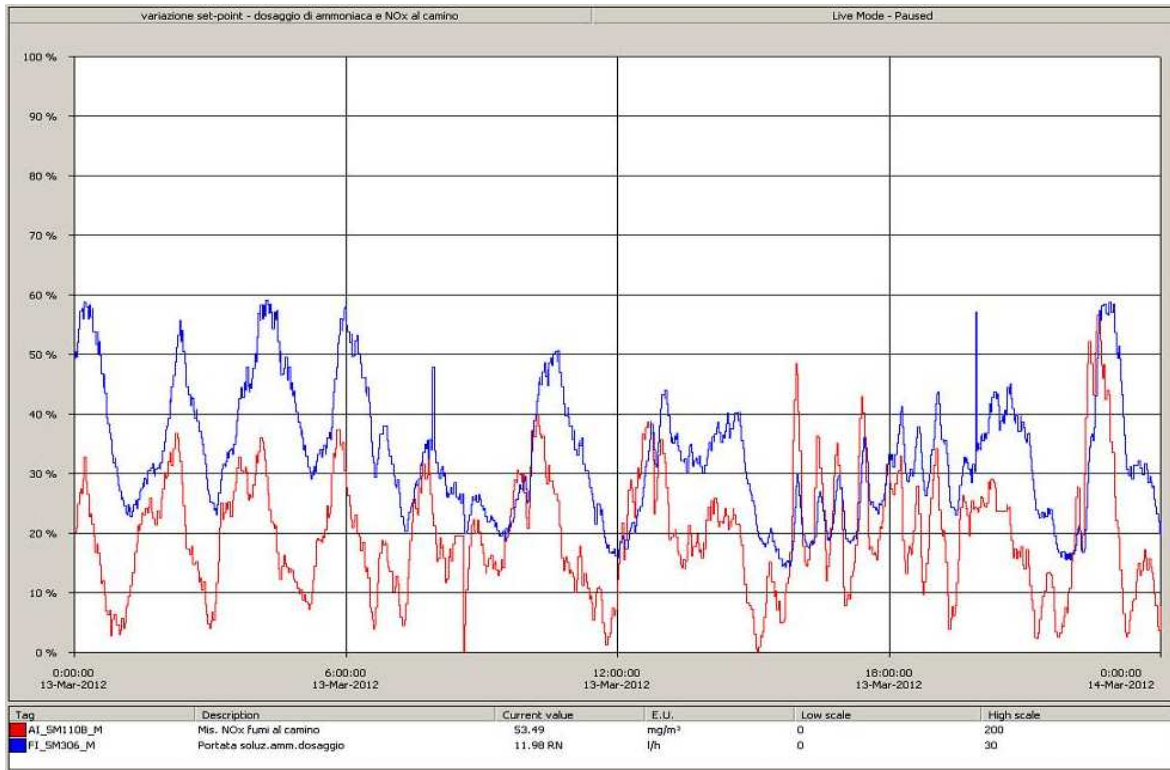


Figura 6.2 Andamento del dosaggio di soluzione ammoniacale (in blu, scala 0-30 l/h) e della concentrazione degli NO_x al camino (in rosso, scala: 0-200 mg/Nm³) effettuati nel giorno 13/03/2012 Set point: 40 mg/Nm³

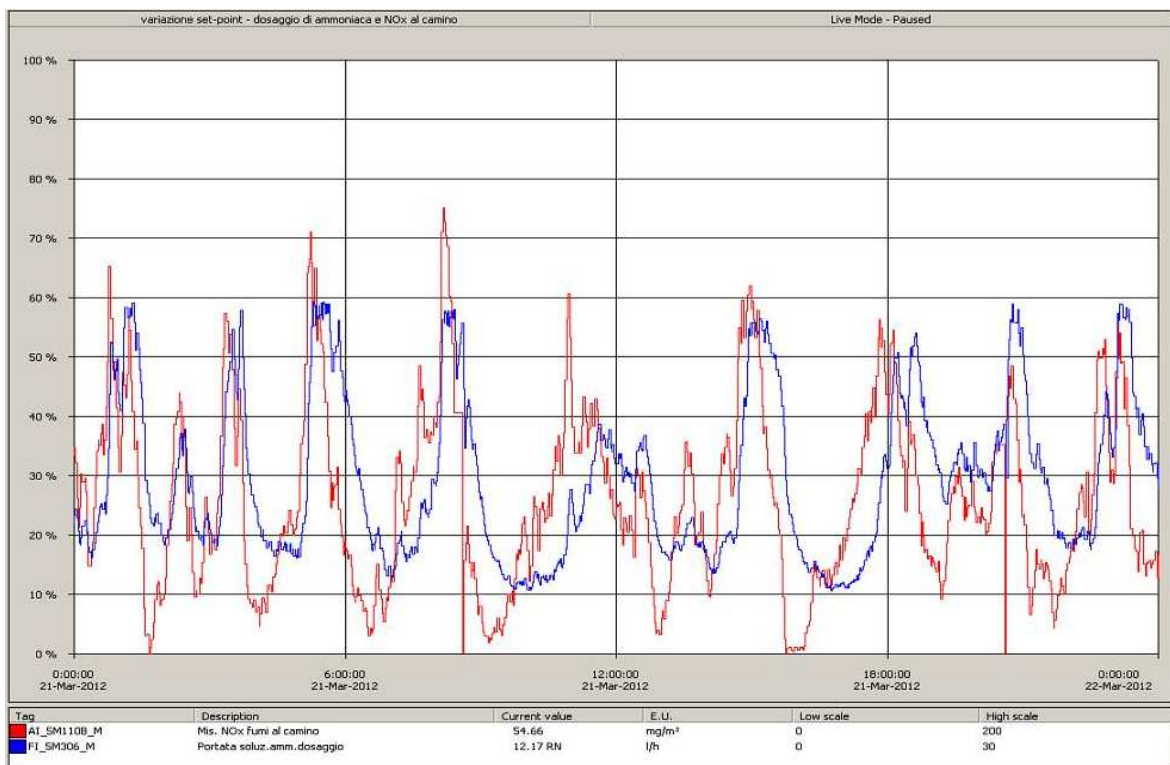


Figura 6.3 Andamento del dosaggio di soluzione ammoniacale (in blu, scala 0-30 l/h) e della concentrazione degli NO_x al camino (in rosso, scala: 0-200 mg/Nm³) effettuati nel giorno 21/03/2012 Set point: 50 mg/Nm³

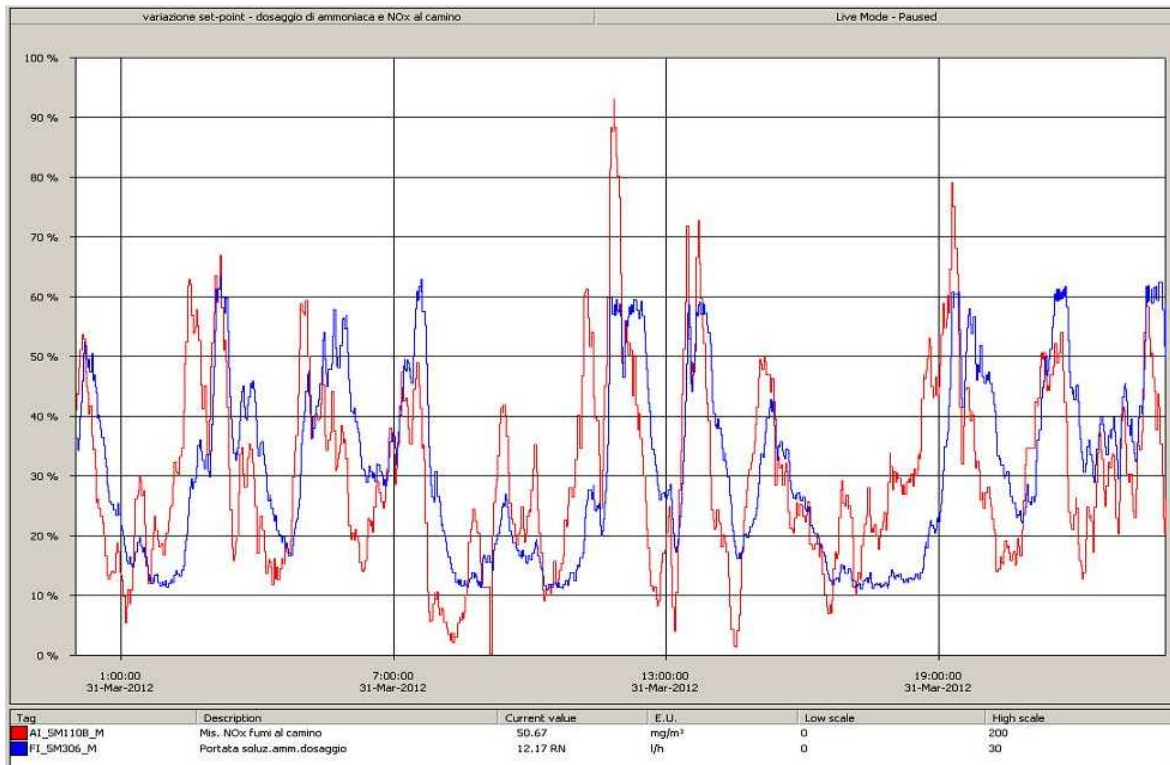


Figura 6.4 Andamento del dosaggio di soluzione ammoniacale (in blu, scala 0-30 l/h) e della concentrazione degli NO_x al camino (in rosso, scala: 0-200 mg/Nm³) effettuati nel giorno 31/03/2012 Set point: 60 mg/Nm³

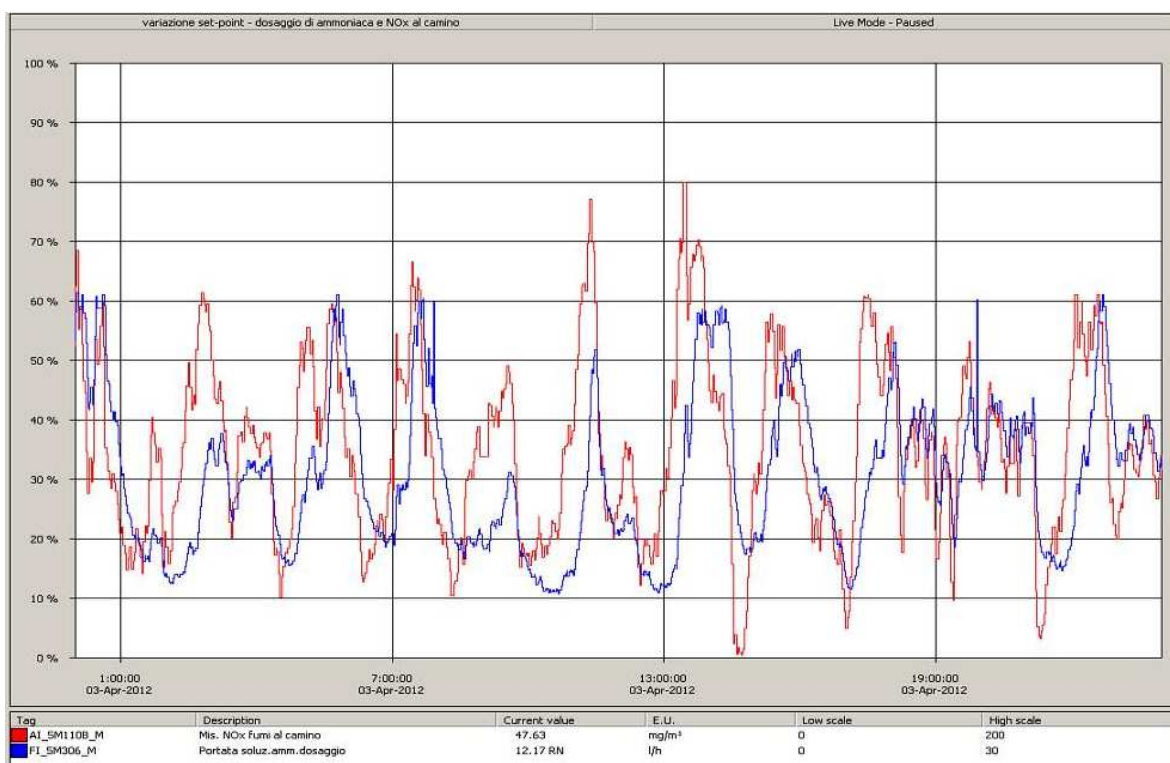


Figura 6.5 Andamento del dosaggio di soluzione ammoniacale (in blu, scala 0-30 l/h) e della concentrazione degli NO_x al camino (in rosso, scala: 0-200 mg/Nm³) effettuati nel giorno 03/04/2012 Set point: 70 mg/Nm³

6.5 Analisi dei risultati

Dalla visualizzazione dei grafici ottenuti riportati dalla sala controllo corrispondenti alle tabelle dei valori (figure 6.2 – 6.5), risulta più chiaro fare osservazioni sull'andamento del dosaggio in funzione del set point.

Facendo un confronto tra le figure 6.2 e 6.5, si nota immediatamente la differenza del comportamento del regolatore.

Infatti per quanto riguarda il set point a 40 mg/Nm³ e a 70 mg/Nm³, si evince un'inversione di tendenza .

Infatti per quanto riguarda il set point a 40 mg/Nm³, si nota una minore ampiezza delle oscillazioni sia per quanto concerne il dosaggio che per gli ossidi di azoto al camino. Infatti la deviazione standard per questi parametri è la minore registrata rispetto ai vari set point .

Dal primo avviamento dell'impianto, dopo il revamping, il dosaggio della soluzione ammoniacale veniva effettuata con in base ad un valore di set point di NO₂ al camino pari a 40 mg/Nm³, riferito al gas secco e all'11% di umidità.

In generale si afferma che sebbene il set point sia stato fissato pari a 40 mg/Nm³, questo non significa che in uscita viene verificato lo stesso valore, poiché dipende dalla risposta del sistema alla variazione del dosaggio e dalla concentrazione in entrata di NO_x.

Infatti la figura 5.4 mostra i valori medi giornalieri degli NO₂ in uscita al camino, i quali sono estremamente variabili, anche in termini di medie mensili.

Dalla prova effettuata in impianto, modificando il valore di set point sono state fatte le seguenti considerazioni.

Le medie giornaliere dei valori in uscita degli NO_x sono esattamente pari al valore fissato dal set point. Di conseguenza, all'aumentare del valore degli ossidi di azoto di set point, si riduce l'efficienza dell'abbattimento DeNO_x.

Pertanto come si nota dal grafico sottostante l'efficienza di abbattimento DeNO_x decresce in maniera lineare con il set point, come mostrato in figura 6.6

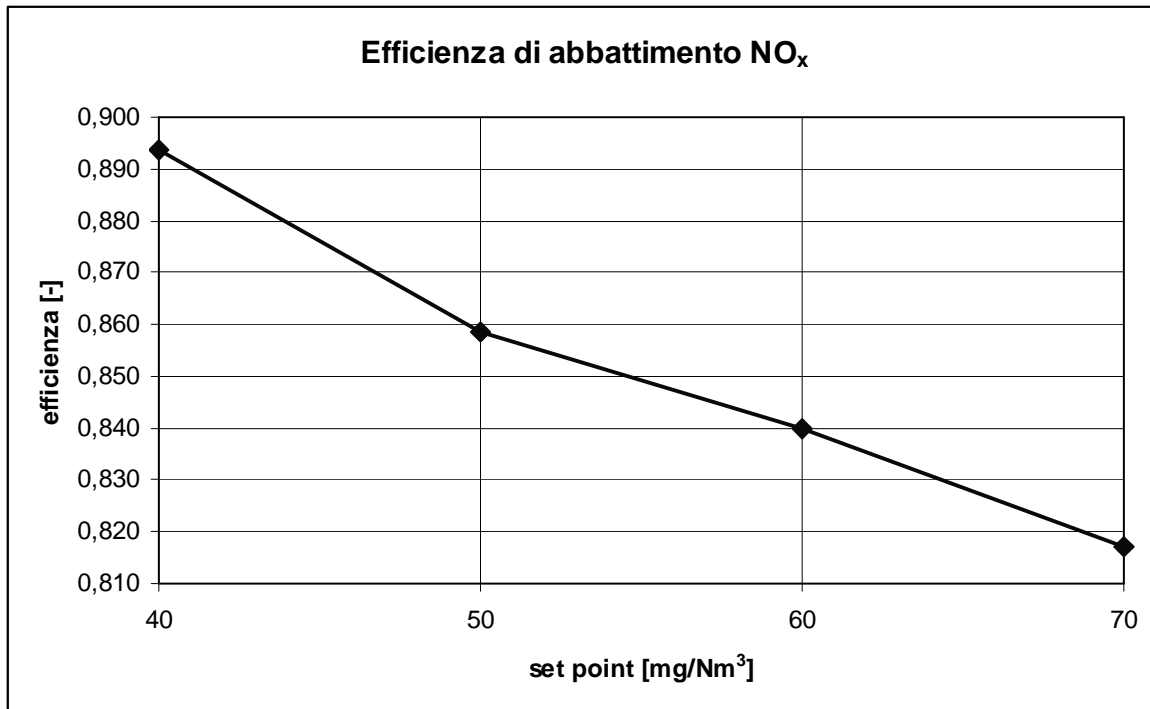


Figura 6.6 Andamento dell'efficienza di abbattimento in funzione della variazione di set point.

Utilizzando il set point di mg/Nm^3 si ha quindi uno spinto abbattimento degli NO_x , ma non sempre questa condizione è da considerarsi la migliore. Infatti bisogna tener conto dello slip ammoniacale al camino, il quale è dovuto all'ammoniaca dosata non reagita, a causa di un sovradosaggio stimato dal valore di set point.

Infatti si nota al camino una concentrazione dello slip ammoniacale che decresce progressivamente con l'aumento del set point come mostra la figura 6.7

Sebbene, venga dimostrata la relazione tra set point e la concentrazione di ammoniaca al camino, questo slip di ammoniaca non è sufficiente a decretare l'utilizzo di un valore ottimale di set point, poiché, anche in ogni caso trattato si è visto che la concentrazione è molto spesso inferiore a $1 \text{ mg}/\text{Nm}^3$.

Un'osservazione generale va fatta in merito alla formazione degli ossidi di azoto. Si nota infatti che la concentrazione degli ossidi di azoto in entrata al reattore è molto elevata, soprattutto rispetto al parametro di progettazione utilizzato di $350 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ valori che possono sfiorare anche i $450 \text{ mg}/\text{Nm}^3$, derivano dalla composizione in azoto del rifiuto in entrata. Pertanto qualora in futuro si verifichi una riduzione delle prestazioni del reattore, si può pensare di intervenire con un abbattimento primario degli ossidi di azoto, in particolare effettuando un ricircolo dei fumi.

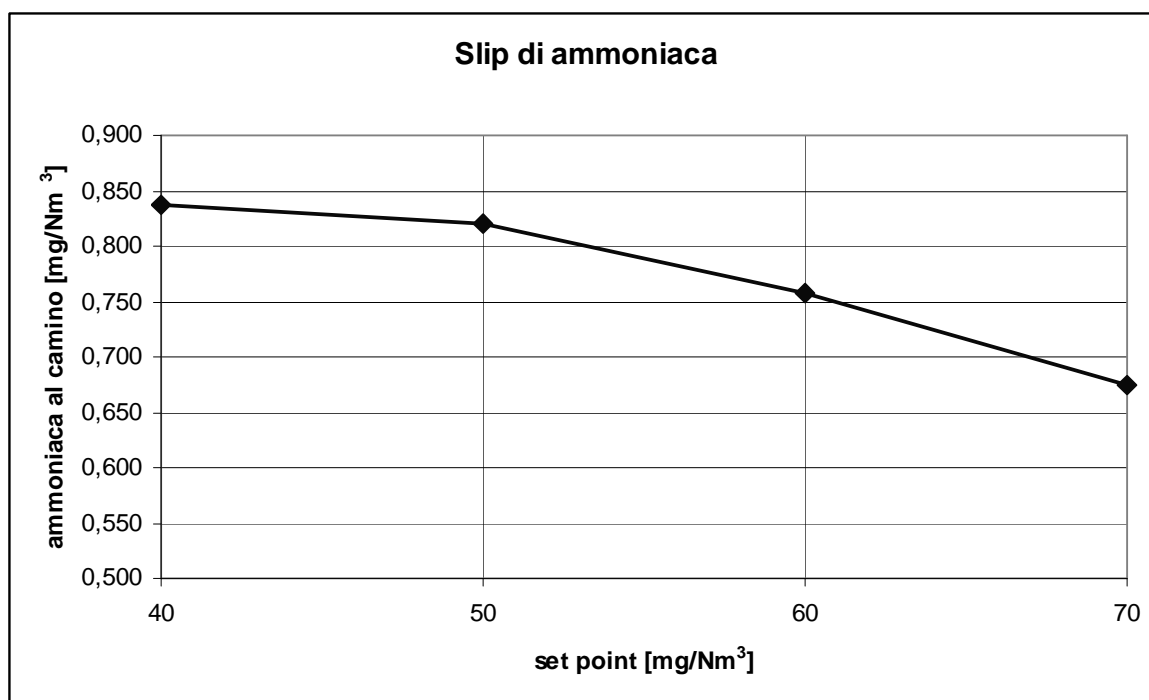


Figura 6.7 Variazione dello slip di ammoniaca al camino (mg/Nm^3) in funzione della variazione di set point.

Pertanto il valore ottimale va ricercato qualora vengano fissati nuovi limiti di legge.

Insieme ai dati riportati vengono calcolate anche le medie giornaliere e le variazioni standard delle diverse voci. La deviazione standard esprime la dispersione dei dati sperimentali attorno ad un valore medio, pertanto è indice della variabilità dei valori misurati

A favore del caso con il set point di $40 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ si può dire che ha la minore deviazione standard per quanto riguarda gli NO_2 in uscita, questo valore sale con l'aumento del set point del regolatore. D'altro canto lo slip di ammoniaca oscilla con maggiore ampiezza.

Il dosaggio della soluzione ammoniacale è in funzione del valore della concentrazione in uscita degli ossidi di azoto, i quali, a dosaggio costante, variano a seconda degli NO_x in entrata, pertanto il valore misurato non è indicativo dell'assoluta misura della portata corrispondente al set point.

I risultati devono essere normalizzati per la quantità degli NO_x in entrata al reattore.

Al fine di verificare se c'è una linearità tra il valore dato al set point e il dosaggio effettuato del reagente è necessario calcolare il rapporto tra i kg/h di $\text{NO}_{x,\text{IN}}$ presenti nei fumi a monti del trattamento attraverso il reattore catalitico SCR, con i kg/h della soluzione ammoniacale dosata.

L'utilità di questo rapporto sta nel verificare ogni quanti kg di NO_x viene iniettato un kg di reagente.

Per questo motivo dai dati giornalieri registrati è stata fatta una media per ciascuna variazione del set point, ottenendo la tabella 6.7 che riassume i risultati:

Tabella 6.7 Risultati della variazione di set point: In particolare ogni quanti kg di NO_x in entrata viene dosato un kg di soluzione ammoniacale.

Valore set point	Rapporto NO _{x,in} /sol.amm.
mg/Nm ³	[-]
40	0,90
50	1,01
60	0,98
70	1,02

Dai dati presenti in tabella 6.7 è stato poi elaborato il seguente grafico (figura 6.8).

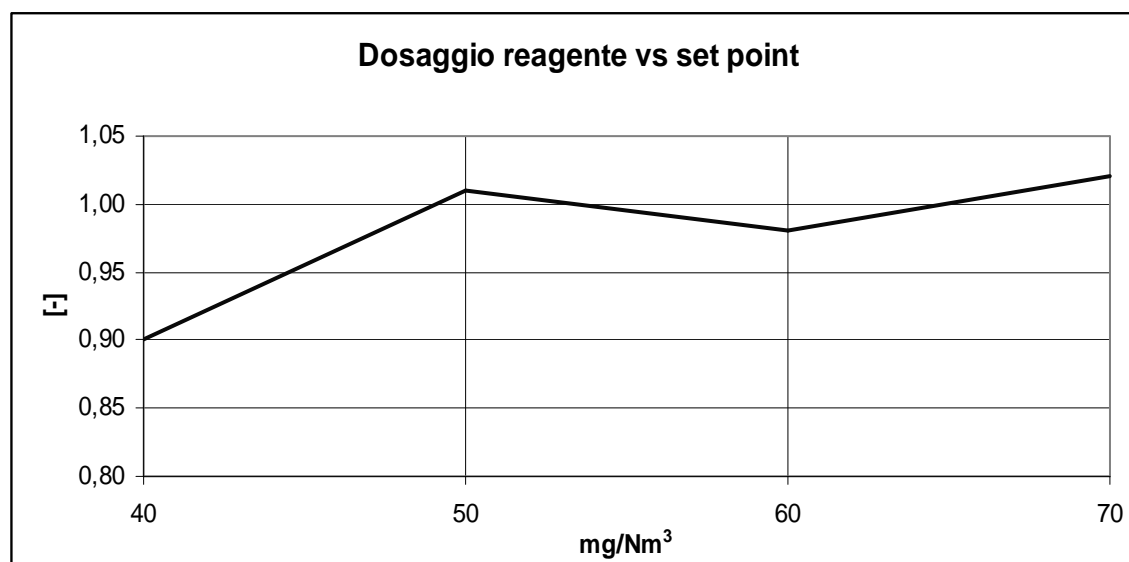


Figura 6.8 Rappresentazione dei dati ottenuti con la prova sperimentale della variazione del set point.

Un progressivo aumento del rapporto era già atteso, interessante è notare la notevole variazione del dosaggio modificando il set point da 40 a 50 mg/Nm³, poiché cambia di circa 0,1 (-).

Questo significa che per abbattere una stessa quantità di NO_x in entrata, con un set point di 50 mg/Nm³ viene dosato meno reagente.

Tra tutti i casi presi in considerazione, il set point a 40 mg/Nm³ risulta il più sconsigliato. Si stima che a parità della concentrazione entrante di NO_x, il consumo della soluzione ammoniacale sia pari a:

Tabella 6.8 Consumo di reagente stimato per ogni caso di set point, a pari condizioni di NOx in entrata al processo.

Valore set point	Consumo reagente stimato
mg/Nm³	l/giorno
40	246
50	219
60	226
70	217

La tabella 6.8 dimostra che il set point fissato per 70 mg/Nm³ permette il minor dosaggio di soluzione ammoniacale, ma non è di molto superiore al set point a 50 mg/Nm³.

Se si considera l'abbattimento più efficace la scelta del set point verte sul valore di 50 mg/Nm³.

6.6 Proposta del valore di set point

La questione del dosaggio non è solo economica, ma è di notevole importanza anche per quanto riguarda le condizioni operative del reattore catalitico. Infatti un eccessivo dosaggio può abbassare, anche se di poco, la temperatura in entrata al reattore, influenzando la reazione di riduzione degli ossidi di azoto.

Se si considerano i report giornalieri si evince che con un set point di 50 mg/Nm³, i valori di NO₂ registrati nei rapporti di analisi oscillano intorno ai 30 mg/Nm³, con un massimo di 35 mg/Nm³.

Parallelamente, ad un ulteriore aumento di set point corrisponde anche un aumento della concentrazione registrata, poiché con un limite di 60 il valore medio giornaliero massimo supera appena i 40 mg/Nm³.

Infine per quanto riguarda il più alto set point fissato, si nota che nessun valore dichiarato è inferiore a 40 mg/Nm³, bensì varia intorno al valore di 50 mg/Nm³, fino a raggiungere i 54 mg/Nm³.

Un'ulteriore prova sperimentale è stata condotta tenendo selezionando il set point a 50 mg/Nm³, ma abbassando la minima apertura della valvola da 18% al 12%, in questo modo il dosaggio minimo da 3 l/h diventa di circa 1,8 l/h.

Il risultato ottenuto da questa prova non è soddisfacente, poiché il rapporto tra NOx in entrata e la portata ponderale di reagente risulta pari a 0,94; significa che il dosaggio di ammoniaca non è stato ottimizzato dopo questa modifica.

Il motivo di tale risultato è da ricercare proprio nella diminuzione del dosaggio minimo. Infatti, qualora venga dosato il minimo ammissibile dalla valvola, l'efficienza

dell'abbattimento degli ossidi di azoto si riduce, provocando un aumento considerevole della concentrazione degli NO_2 in uscita, come dimostra la tabella 6.9., contenente i risultati della prova, e di conseguenza, aumenta anche il eccessivamente la portata di reagente dosata dal regolatore.

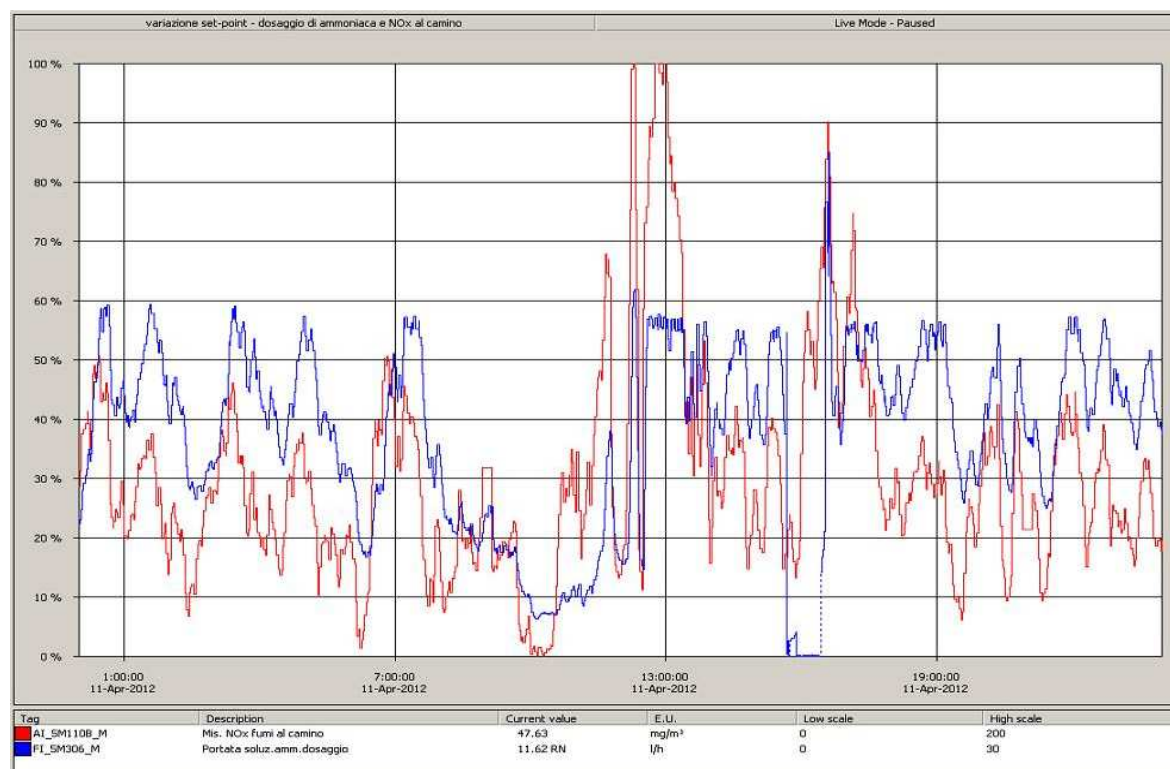


Figura 6.9 Andamento del dosaggio di soluzione ammoniacale (in blu, scala 0-30 l/h) e della concentrazione degli NO_x al camino (in rosso, scala: 0-200 mg/Nm^3) effettuati nel giorno 11/04/2012 Set point: 50 mg/Nm^3 , minime apertura della valvola : 12%, anziché 18%.

Quest'ultima modalità di controllo del dosaggio risulta alquanto instabile, come si nota in figura 6.10 in cui sia il valore degli ossidi di azoto in uscita che della portata di dosaggio oscillano in maniera ampia raggiungendo anche valori considerati fuori legge.

Questa affermazione trova riscontro in tabella 6.9 in cui si nota che la deviazione standard è molto superiore rispetto ai precedenti casi analizzati.

Tabella 6.9 Risultati ottenuti con il set point pari a 50 mg/Nm, abbassando l'apertura minima della valvola: da 18% a 12 %.

11/04/2012	NO _{2,in}	NO _{2,out}	sol.amm.		portata	O ₂	portata @11%O ₂	NH ₃		Abbattimento NO ₂		slip NH ₃		NH ₃ reagito	NH ₃ /NO ₂	eff. DeNOx	
Medie orarie	mg/Nm ³	mg/Nm ³	l/h	kg/h	Nm ³ /h	%	Nm ³ /h	kg/h	mol/h	mg/Nm ³	kg/h	mol/h	mg/Nm ³	mol/h	mol/h	[-]	[-]
0.00	441,0	72,2	13,4	12,2	30774	13,6	22773	3,4	196,7	368,8	8,4	182,5	0,86	1,14	195,57	1,072	0,836
1.00	415,5	54,1	14,6	13,3	21433	13,1	16932	3,7	214,3	361,4	6,1	133,0	1,64	1,63	212,70	1,600	0,870
2.00	405,6	39,3	10,6	9,6	31411	12,6	26385	2,7	155,6	366,3	9,7	210,0	0,60	0,93	154,68	0,737	0,903
3.00	433,6	63,7	14,5	13,2	31331	13	25065	3,6	212,9	369,9	9,3	201,5	1,03	1,51	211,35	1,049	0,853
4.00	458,9	50,0	12,9	11,7	30748	13	24598	3,2	189,4	408,9	10,1	218,6	0,70	1,00	188,37	0,862	0,891
5.00	389,0	40,3	12,4	11,3	31632	11,8	29101	3,1	182,0	348,7	10,1	220,5	1,60	2,73	179,30	0,813	0,896
6.00	422,6	53,6	9,1	8,3	31462	14,5	20450	2,3	133,6	369,0	7,5	164,0	0,82	0,98	132,60	0,809	0,873
7.00	432,3	55,8	13,8	12,6	32091	14,3	21501	3,5	202,6	376,5	8,1	175,9	0,59	0,74	201,84	1,147	0,871
8.00	379,7	33,7	6,7	6,1	29113	14,7	18341	1,7	98,4	346,0	6,3	137,9	1,73	1,86	96,49	0,700	0,911
9.00	307,4	26,9	5,1	4,6	23814	14,4	15717	1,3	74,9	280,5	4,4	95,8	0,59	0,54	74,33	0,776	0,912
10.00	317,5	25,7	2,5	2,3	26627	12,1	23698	0,6	36,7	291,8	6,9	150,3	0,31	0,43	36,27	0,241	0,919
11.00	389,3	69,7	5,5	5,0	28547	13	22838	1,4	80,7	319,6	7,3	158,6	0,83	1,11	79,63	0,502	0,821
12.00	385,1	139,3	12,8	11,6	29819	13,4	22662	3,2	187,9	245,8	5,6	121,0	0,81	1,07	186,83	1,544	0,638
13.00	409,5	107,9	14,9	13,6	30463	12,7	25284	3,7	218,7	301,6	7,6	165,7	0,42	0,62	218,12	1,316	0,737
14.00	450,6	59,5	13,4	12,2	29836	13,9	21184	3,4	196,7	391,1	8,3	180,0	0,71	0,88	195,83	1,088	0,868
15.00	409,3	49,9	9,5	8,6	30396	13,2	23709	2,4	139,5	359,4	8,5	185,2	1,37	1,91	137,55	0,743	0,878
16.00	432,6	114,9	6,7	6,1	30364	13,6	22469	1,7	98,4	317,7	7,1	155,1	0,30	0,39	97,97	0,632	0,734
17.00	458,5	86,9	15,3	13,9	31164	12,9	25243	3,8	224,6	371,6	9,4	203,8	0,47	0,70	223,91	1,099	0,810
18.00	498,3	57,2	14,6	13,3	30966	12,9	25082	3,7	214,3	441,1	11,1	240,4	1,09	1,61	212,72	0,885	0,885
19.00	469,8	40,0	11,9	10,8	30566	12,9	24758	3,0	174,7	429,8	10,6	231,2	0,47	0,68	174,01	0,753	0,915
20.00	460,6	27,0	12,5	11,4	27912	13,8	20097	3,1	183,5	433,6	8,7	189,4	1,12	1,32	182,18	0,962	0,941
21.00	439,3	55,8	11,5	10,5	25224	13,3	19422	2,9	168,8	383,5	7,4	161,9	0,53	0,60	168,22	1,039	0,873
22.00	468,6	28,1	14,8	13,5	31029	12,2	27306	3,7	217,3	440,5	12,0	261,4	0,47	0,75	216,52	0,828	0,940
23.00	446,2	46,1	12,9	11,7	31618	12,1	28140	3,2	189,4	400,1	11,3	244,7	0,67	1,11	188,26	0,770	0,897
media giorn.	421,7	58,2	11,3	10,3	29514	13,2	23032	2,8	166,3	363,5	8,4	182,8	0,82	1,094	165,2	0,915	0,861
dev. standard	45,1	29,0	3,6	3,3	2706	0,786	3391	0,902	52,9	51,3	1,9	41,4	0,42	0,555	52,8	0,303	0,071

Capitolo 7

Sistema SCR:

Interventi migliorativi applicabili

Con il recente avviamento del reattore catalitico SCR si sono introdotti anche nuovi problemi riguardo la gestione della linea, i quali riguardano essenzialmente:

- la caduta di pressione attraverso il reattore
- il dosaggio della soluzione ammoniacale,
- lo slip di ammoniaca al camino.

Si è ritenuto pertanto di individuare e, se del caso, applicare ulteriori interventi migliorativi. Il condizionale è legato anche alle condizioni autorizzative future e quindi alle restrizioni sui limiti. Non è inoltre possibile prevedere con adeguata certezza gli effetti dell'invecchiamento del catalizzatore, avendo lo stesso ancora meno di un anno di esercizio.

Sulla base dei risultati misurati nell'impianto in questione, in questo capitolo vengono riportati alcuni suggerimenti e ipotesi sul futuro andamento del sistema catalitico SCR.

7.1 Caduta di pressione

Il problema delle perdite di carico è uno dei svantaggi del sistema SCR, in quanto questa tecnica di abbattimento degli ossidi di azoto implica il passaggio del gas di processo attraverso il reattore composto da letti catalitici con un certo grado di vuoto.

I dati di progettazione dell'impianto però garantiscono un efficiente abbattimento delle polveri, a monte di tale processo, grazie ad una sostituzione del tessuto delle maniche dell'apposito filtro. Per questo motivo la modalità *Tail end* è il sistema che garantisce il minor intasamento dei moduli.

Malgrado ciò, nell'ultimo periodo, è stato riscontrato un aumento delle perdite di carico attraverso il reattore, e si è voluto verificare riguardo ad un eventuale influenza nel ventilatore di coda.

Dai dati raccolti e analizzati, si è visto che l'influenza tale parametro non incide sulla potenza assorbita del ventilatore di tiraggio dei fumi, e quindi non è causa di un aumento del consumo di elettrici della Linea 2.

La caduta di pressione deve essere sempre monitorata al fine di programmare la rigenerazione dei letti catalitici, sebbene l'alta efficienza di abbattimento delle polveri e degli SO₂ a monte del reattore consentono di prevenire efficacemente gli eventuali intasamenti del letto catalitico.

7.2 Temperatura

La temperatura dei gas è un parametro estremamente importante monitorare, per questo motivo nel gruppo SCR sono stati installati 8 misuratori di temperatura che funzionano in continuo. La temperatura del gas in entrata al reattore è usata come il principale segnale che determina quando mettere i fumi di processo in by-pass e di conseguenza fermare l'iniezione del reagente.

Il reattore catalitico è stato progettato per avere una buona efficienza di abbattimento anche a basse temperature (180-250 °C). Per questo motivo si è deciso di installare il reattore a valle della linea di depurazioni dei fumi, e, cosa di maggior rilievo, senza effettuare il preriscaldamento in entrata per mezzo del bruciatore. Questo è un motivo di grande interesse in quanto, garantendo una temperatura in entrata compresa nel range, si evitano i costi gestionali derivanti dal consumo di metano (per alzare la temperatura di 10°C, si stima la spesa di circa 50000 euro/anno).

Grazie ai numerosi misuratori di temperatura alloggiati in vari punti del gruppo SCR, si è rilevato una grande diminuzione di temperatura durante il passaggio dei fumi tra il filtro a maniche e la sezione di abbattimento degli ossidi di azoto. Le tubazioni sono coibentate pertanto non sarebbe necessario un ulteriore intervento.

7.3 Dosaggio di reagente

Nel tentativo di ottimizzare il dosaggio di reagente, sono state svolte delle prove in impianto consistenti nel modificare il set point degli ossidi di azoto in uscita dal camino.

La scelta finale è stata effettuata valutando non solo la portata di dosaggio, ma anche lo slip ammoniacale, l'efficienza di abbattimento, ma soprattutto si sono considerati i futuri limiti legislativi, uniti alla variabilità dei dati ottenuti.

Si è deciso quindi di scegliere un set point pari a 50 mg/Nm³, in quanto garantisce un inferiore dosaggio di soluzione ammoniacale, garantendo in ogni occasione il rispetto anche del più

severo limite sull'emissione degli ossidi di azoto, e uno slip di ammoniaca sempre inferiore ad 1 mg/Nm^3 .

Un'ulteriore verifica è stata fatta abbassando l'apertura minima della valvola, ma si è notato un peggioramento del dosaggio, e conseguentemente una grande oscillazione della concentrazione di NO_2 .

7.4 Migliorare l'abbattimento

Nel caso si volesse aumentare ulteriormente l'efficienza di abbattimento degli ossidi di azoto, le possibilità sono:

- utilizzare il bruciatore, per far avvenire la reazione DeNO_x ad una finestra di temperatura più elevata in cui si ha una migliore riduzione degli ossidi di azoto.
- avere una minor dissipazione di calore a monte del reattore catalitico, in modo che i fumi passino attraverso i letti catalitici con una temperatura maggiore, quindi agire sulla coibentazione delle tubazioni.
- fare un ricircolo dei fumi per diminuire gli ossidi di azoto in entrata. Poiché si è registrata un'alta concentrazione degli ossidi di azoto in entrata al reattore.

Il ricircolo dei fumi, facendo diminuire gli NO_x in entrata, contribuiscono anche ad una diminuzione del dosaggio di reagente. In questa tecnica, parte dei gas povera in ossigeno, viene fatta ricircolare nell'aria di combustione. Il ricircolo dei gas comporta due effetti:

- Diminuzione della concentrazione di ossigeno nella zona della fiamma primaria.
- Si riduce il picco di fiamma della temperatura.

Si dimostra in figura 7.1 che la riduzione degli NO_x sia in funzione della quantità di gas ricircolato,

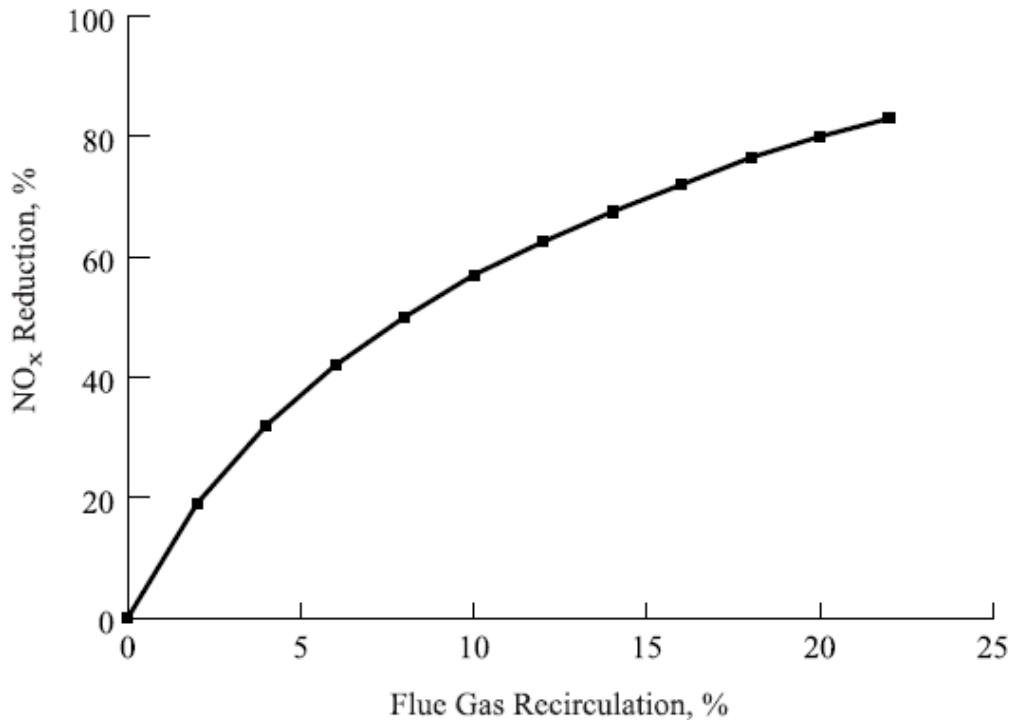


Figura 7.1 . Effetto della ricircolazione dei fumi. Fonte: *Air Pollution Control Technology Handbook*

7.5 Limiti futuri

Alla scadenza dell'autorizzazione, al termovalorizzatore di Schio verranno concessi altri limiti, per quanto riguarda le emissioni in atmosfera di azoto. In particolare subiranno una riduzione in accordo con il sistema di abbattimento adottato. Dalle considerazioni fatte ci si aspetta un valore medio tra il range fissato di 40-100 mg/Nm³. I report giornalieri dimostrano il rispetto anche del limite minimo fissabile, sebbene alcuni valori, in corrispondenza dei periodi di avviamento e di fermata dell'impianto dimostrano un superamento, seppur contenuto.

A tal riguardo è consigliabile prestare una maggior attenzione in fase di fermata, ma soprattutto di avviamento dell'impianto, in particolare cercando di attivare il bruciatore finché il letto catalitico non abbia raggiunto la condizione di temperatura ottimale.

7.6 Slip di ammoniaca

I limiti delle emissioni riguardano non solo la concentrazione degli ossidi di azoto, ma anche l'ammoniaca. Per questo motivo è monitorata in continuo in impianto. Inoltre è indice delle condizioni del catalizzatore, poiché un eventuale aumento dell'ammoniaca dimostra che

una maggiore quantità di reagente non abbia partecipato alla reazione di riduzione degli ossidi di azoto.

Nel caso si verificasse un eccesso di slip di ammoniaca al camino, le soluzioni da adottare sono:

- attivazione del bruciatore per alzare la temperatura dei fumi in entrata, poiché si è visto che lo slip cala in maniera lineare con l'aumento della temperatura.
- Diminuire il dosaggio di soluzione ammoniacale, aumentando il set point, ma prestando attenzione alla concentrazione degli NO_2 al camino.
- In caso estremo, effettuare la rigenerazione del letto catalitico.

7.7 Considerazioni sul funzionamento

Dalle analisi svolte in impianto sono state fatte alcune considerazioni in merito alla tecnica di abbattimento degli ossidi di azoto SCR.

Il reattore SCR svolge una migliore prestazione in impianti di alta potenzialità, poiché maggiori sono le dimensioni della linea, più facile è attutire un eventuale disturbo in entrata.

Dai campionamenti svolti periodicamente si è verificato che, con l'introduzione del reattore catalitico SCR, la Linea 2 effettua un ulteriore abbattimento delle diossine, anche se la maggior parte di questo microinquinante viene abbattuto con il carbone attivo.

7.8 Rigenerazione e sostituzione del letto catalitico

Con l'aumento delle ore operative di funzionamento, il catalizzatore, può iniziare a perdere progressivamente efficienza di abbattimento. I "sintomi" si riassumono in:

- aumento della caduta di pressione,
- elevato slip di ammoniaca,
- elevata concentrazione degli ossidi di azoto registrata al camino.

La causa di queste condizioni sono: aumento delle polveri e dei sali di solfato di ammonio che aumentano la perdita di carico, ma anche fanno diminuire l'attività del catalizzatore dovuto all'invecchiamento o all'avvelenamento dei siti attivi.

Nel caso in cui l'attività del catalizzatore diminuisca notevolmente, è necessario provvedere alla rigenerazione o alla sostituzione dello stesso.

In generale è preferibile effettuare la rigenerazione, qualora fosse possibile, per le seguenti motivazioni:

- evitare di aumentare i costi di impianto per la sostituzione del catalizzatore;
- eliminazione dei costi di smaltimento;
- riduzione dei costi operativi.

La rigenerazione viene eseguita con l'impianto fermo, indicativamente una volta all'anno.

Può essere effettuato off-line, mediante lavaggio, in alternativa è accettata una rigenerazione di tipo termico on-line.

Il processo di lavaggio deve aumentare il più possibile il numero dei centri attivi presenti nel catalizzatore. Viene effettuato il lavaggio del catalizzatore con un mezzo liquido, preferibilmente acqua, la quale, ovviamente, viene modificata aggiungendo tensioattivi e composti metallici che creano nel catalizzatore centri aggiuntivi.

In impianto viene effettuata per via termica, in questo modo si vuole evitare l'utilizzo di liquidi, per non compromettere l'azione dei siti attivi. Per lo stesso motivo si preferisce non utilizzare neanche l'aria compressa

Qualora la rigenerazione del catalizzatore non fosse più efficace, si procede alla sostituzione dei letti come in figura 7.2, che mostra un tipico ciclo di sostituzione del catalizzatore per un sistema composto da tre letti catalitici.

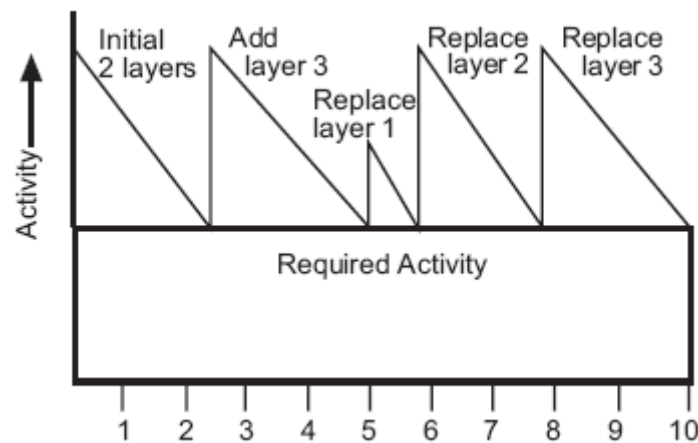


Figura 7.2 Programmazione della sostituzione dei letti in base all'attività del catalizzatore necessaria per il processo. In ascissa sono riportati gli anni indicativi di tali programmazioni Fonte: Control of nitrogen oxides emissions.

Conclusioni

La normativa nazionale ed europea influenza fortemente le condizioni operative e le soluzioni impiantistiche degli impianti di incenerimento dei rifiuti. In particolare, per l'impianto di termovalorizzazione AVA sito in Schio, è stata addirittura prescritta dalla commissione VIA regionale l'installazione del sistema catalitico SCR sulle tre linee di incenerimento.

Nel caso di studio si è presa in considerazione la Linea 2, per le motivazioni spiegate precedentemente. L'attenzione è stata dunque rivolta verso il nuovo sistema catalitico SCR, recentemente installato per l'abbattimento degli ossidi di azoto. Si è valutata la performance dell'SCR, in relazione alle varie problematiche connesse con la gestione della Linea. Nel contempo, essendo state introdotte nuove condizioni operative da rispettare, quali maggior efficienza di depolverazione dei fumi e più elevato abbattimento dei gas acidi a salvaguardia del reattore SCR ed anche ai fini di una più elevata efficienza. Ciò ha comportato la necessità di importanti modifiche impiantistiche a monte dello SCR. In particolare, si è dimostrata anche l'importanza della temperatura al fine di garantire un efficiente abbattimento degli NO_x . Dopo aver analizzato le emissioni in uscita, le diverse condizioni di funzionamento del reattore e dell'impianto, si è garantito il rispetto del futuro restringimento dei limiti, suggerendo le condizioni per un buon funzionamento.

Le prove sperimentali svolte in merito alla variazione del set-point della regolazione del dosaggio di soluzione ammoniacale, hanno evidenziato il valore ottimale sotto il profilo gestionale del parametro NO_x a 50 mg/Nm^3 , considerando sia lo slip di ammoniaca, sia l'efficienza di abbattimento.

Si è verificata una riduzione di due terzi delle emissioni di NO_x rispetto alla situazione ante revamping e una forte riduzione dello slip di NH_3 , dimostrando il pieno successo del revamping.

Il limite di questo studio è inerente al fatto che i dati acquisiti descrivono il funzionamento del reattore che è stato installato recentemente (il primo avviamento risale a meno di un anno), pertanto non si è potuto fare una considerazione sugli effetti della progressiva disattivazione del catalizzatore dovuto a fattori riguardanti l'invecchiamento e l'avvelenamento da parte di sostanze quali l'arsenico e altri metalli.

La situazione descritta dimostra come l'autorità competente possa intervenire obbligando un impianto di termovalorizzazione ad adottare le migliori tecniche disponibili, da essa prescritte. Pertanto ci si aspetta in futuro un ruolo sempre più importante per le autorità competenti riguardo alle scelte decisionali impiantistiche del settore dell'incenerimento dei rifiuti, ed in generale nelle grandi attività regolate dalla direttiva europea IPPC. .

Riferimenti bibliografici

- APAT (2011) Rapporto rifiuti urbani 2011 Capitolo2: gestione dei rifiuti urbani.
- Direttiva 2010/75/UE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 24 novembre 2010, relativa alle emissioni industriali (prevenzione e riduzione integrate dell'inquinamento).
- European commission (2006). Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration.
- European commission, E.Tzimas and S.D. Peteves. NOx and Dioxin emission from waste incineration plants.
- Granger P., Parvulescu V.I. (2007) Past and present in DeNOx catalysis from molecular modelling to chemical engineering. Elsevier. 227-228.
- Grassian V.H. (2005). Environmental Catalysis. Taylor & Francis. **8**
- Gruppo Tecnico Ristretto della Commissione Nazionale (2005). Linee guida relative ad impianti esistenti per le attività rientranti nelle categorie IPPC: 5 Gestione dei rifiuti.
- Kamuk B. (2009) Is DeNOx by SCR to be the future in US?- Tecnology and tendencies within APC Equipment.
- Kreith. Air Pollution Control Technology Handbook (2002). CRC Press..**8,17**
- Richards J. R. (2000) Control of Nitrogen Oxides Emissions. **2, 11.**
- Stubenvoll J., Böhmer S., Szednyi I. State of the Art for Waste Incineration Plants (2002), Federal Ministry of Agriculture and Forestry, Environment and Water Management, presentato a Vienna, November 2002.31-37
- Turns S. R. (2000) An introduction to combustion. Concepts and applications. Mc-Graw Hill. Cap 15
- Zandaryaa S., Buekens A., Pollution Control Technologies - Vol I Control of Nitrogen Oxides. 153-160

Siti web

www.arpa.veneto.it (ultimo accesso: 30/03/2012)

www.altovicentinoambiente.it (ultimo accesso: 15/04/2012)

Allegato 1: La società A.V.A.

Nasce nel 1978, quando i Comuni dell'Alto Vicentino costituiscono un "*Consorzio per l'impianto e l'esercizio del servizio di smaltimento dei rifiuti solidi urbani*". Nel 1999 il Consorzio si trasforma in società a responsabilità limitata, oggi partecipata da 31 Comuni dell'Alto Vicentino e dalla Comunità Montana "Spettabile Reggenza dei Sette Comuni".

Alto Vicentino Ambiente ha per oggetto la gestione di servizi ambientali.

- gestione dei rifiuti urbani e speciali, nonché dei residui riutilizzabili compresa la loro commercializzazione;
- progettazione, costruzione e gestione di impianti per lo svolgimento dei servizi ad essa affidati e per conto terzi;
- organizzazione e gestione di servizi di igiene ambientale;
- rilevamento e controllo delle emissioni e delle acque reflue;
- costruzione e gestione di impianti di trattamento e depurazione delle acque reflue;
- gestione di laboratori di analisi chimiche e microbiologiche;
- bonifica, risanamento e ripristino ambientale;
- acquisto, produzione, trasporto, trasformazione, distribuzione, scambio e cessione di energia elettrica;
- produzione, trattamento, distribuzione e gestione di calore;
- attività di autotrasporto di cose conto terzi;
- attività promozionali per la salvaguardia dell'ambiente, analisi, controlli, studi e ricerche in campo ambientale;
- formazione, aggiornamento e riqualificazione del personale;
- riscossione delle tariffe dei servizi.

Alto Vicentino Ambiente srl è proprietaria e gestore dei seguenti impianti:

- impianto di incenerimento dei rifiuti urbani costituito da tre linee: la prima - entrata in funzione nel 1983 - da 36 t/g, la seconda - entrata in funzione nel 1991 - da 60 t/g e l'ultima - entrata in funzione nel 2003 - da 100 t/g;
- discarica per rifiuti urbani con annesso impianto di selezione ed igienizzazione, nel Comune di Asiago;
- 23 "eco stazioni" per la raccolta differenziata dei rifiuti urbani, situate nel territorio degli enti soci.

Inoltre gestisce, per conto del Comune di Thiene, una discarica per rifiuti inerti a Thiene.

Alto Vicentino Ambiente, attraverso la società controllata GRETA Alto Vicentino, gestisce i servizi di raccolta e trasporto di rifiuti urbani e speciali.

Tutti gli impianti sono certificati secondo le norme ISO 9001:2008 e ISO 14001:2004.