



*UTN-Urban Technology Network  
(Iniziativa Comunitaria Interreg II C CADSES)*



*Ministero dei Lavori Pubblici*



*Unione Europea  
FESR*



*Regione Autonoma  
Friuli-Venezia Giulia*

## **Progetto UTN – Urban Technology Network**

**Workshop  
'Gestione integrata dell'ambiente urbano: rifiuti, acque e suolo'**

**Trieste, 30 maggio 2000  
AREA Science Park**

*'Aspetti tecnologici ed energetici dello smaltimento  
dei rifiuti'*

*ing. Adelmo Benassi  
META SpA*

## **ASPETTI TECNOLOGICI ED ENERGETICI DELLO SMALTIMENTO DEI RIFIUTI**

*ing. Adelmo Benassi - META SpA*

### **INTRODUZIONE**

La produzione annua di rifiuti urbani (RU), in Italia, ammonta a circa 27 milioni di tonnellate, di questi circa il 7 % viene smaltito mediante termotrattamento, approssimativamente una pari percentuale subisce un trattamento biologico finalizzato alla produzione di compost di qualità non sempre elevata, tutto il resto viene smaltito in discariche anche queste di “qualità” non sempre elevata.

Le politiche nazionali, materia di rifiuti, sintetizzate nel decreto legislativo n°22/97, il cosiddetto decreto Ronchi, si rivolgono alla riduzione dello spreco di materiale e di energia rappresentati dalla gestione dei rifiuti finora adottata nel nostro paese.

Le raccolte differenziate, tese al massimo recupero di materia, anche dopo che saranno raggiunti gli obiettivi sono fissati nel decreto Ronchi, lasceranno una considerevole quantità di rifiuti, non facilmente ed utilmente separabili, che in ogni caso contengono una risorsa ancora recuperabile: l'energia.

Già con le raccolte differenziate attuate ad oggi dalle amministrazioni locali, il rifiuto restante ha un potere calorifico compreso tra 9,2 MJ/kg e 11,3 MJ/kg, il che ne fa un combustibile utilmente impiegabile per produrre energia.

Il recupero di energia può essere effettuato in impianti dedicati, i cui aspetti tecnologici verranno illustrati, in modo sintetico, nella presente memoria; oppure producendo un combustibile derivato dai rifiuti, il cosiddetto CDR, da utilizzare in impianti industriali, quali i cementifici o le centrali termoelettriche a combustibili solidi, in sostituzione parziale dei combustibili tradizionali.

### **TECNOLOGIE APPLICABILI**

Possiamo sinteticamente ricondurre qualsiasi impianto destinato al trattamento termico dei rifiuti ad uno schema generale che prevede tre percorsi indipendenti ed al tempo stesso strettamente connessi:

- percorso dei rifiuti
- percorso dei prodotti di combustione
- percorso del fluido adibito al recupero, allo scambio e al vettoriamento dell'energia

Il primo prevede tutti i dispositivi preposti al trattamento dei rifiuti, dallo stoccaggio alla camera di combustione, all'evacuazione dei residui, fino agli impianti di trattamento finale delle scorie e ceneri prodotte.

Il secondo comprende tutti i dispositivi attraversati dai fumi caldi prodotti dall'incenerimento dei rifiuti, deputati alla sottrazione del calore per il recupero energetico e alla captazione degli inquinanti contenuti negli stessi.

Il terzo comprende gli impianti preposti allo scambio termico con il fluido termovettore e quelli per la conversione del calore in energia utile, termica e/o elettrica.

## CONFERIMENTO, STOCCAGGIO E ALIMENTAZIONE

I rifiuti vengono accumulati, previa pesatura e registrazione, in apposita fossa di stoccaggio, solitamente posta alla base dell'edificio principale.

La capacità di stoccaggio della fossa è in funzione della potenzialità dell'impianto, delle condizioni igienico sanitarie, legate a loro volta al tempo di ricambio del rifiuto, agli impianti di sicurezza (sia riguardo alla prevenzione incendi che alle condizioni igienico ambientali), alle esigenze dei servizi esterni di raccolta. La fossa può essere dimensionata in modo da garantire un'autonomia gestionale nei giorni festivi o di interruzione del servizio di raccolta.

Della sezione di conferimento, stoccaggio ed alimentazione fanno parte i seguenti elementi funzionali:

- piazzale di scarico automezzi,
- fossa per lo stoccaggio dei rifiuti, mantenuta in depressione mediante l'aspirazione dell'aria comburente necessaria ai focolari, per mantenerla in depressione al fine di minimizzare la fuoriuscita di polveri e esalazioni moleste.
- sistema di movimentazione e caricamento dei rifiuti nei forni
- copertura e tamponamento completo della fossa di stoccaggio e del piazzale di scarico

## TIPI DI FOCOLARE

### Forni a griglia

In questo tipo di focolare i rifiuti scorrono sopra elementi mobili (rulli rotanti, gradini mobili, tegoli alternativi, eccetera) che formano alcune griglie indipendenti attraverso le quali sale l'aria primaria di combustione che, passando attraverso il rifiuto, apporta l'ossigeno comburente necessario. Il rifiuto, scorrendo dall'ingresso verso l'uscita, perde via tutta l'umidità e la maggior parte di sostanza combustibile; il materiale scaricato dalla griglia contiene una parte delle sostanze incombustibili, l'altra parte è trascinata nei fumi come polveri, ed una piccola parte di sostanza combustibile non bruciata (incombusti) prodotti durante il processo.

Il materiale scaricato dalla griglia, le cosiddette scorie o ceneri pesanti, viene raffreddato in acqua ed allontanato dall'impianto. Quantitativamente, questo residuo solido costituisce il 25-28% in peso del rifiuto entrante nella camera di combustione; mentre ne costituisce meno del 10% del volume.

I parametri da tenere in considerazione in sede di progetto della camera di combustione sono:

- tempo di permanenza dei rifiuti necessario alla piena ossidazione
- temperatura di combustione e tenore di ossigeno nei fumi che tengano conto, oltre che della completa ossidazione del rifiuto e del miglior recupero energetico, minimizzazione degli inquinanti quali diossine, furani, IPA, ossidi di azoto, eccetera;
- eventuale preriscaldamento dell'aria di combustione, al fine di poter far fronte alle variazioni del potere calorifico dei rifiuti;
- condizioni di turbolenza dei fumi al fine di ottimizzare la combustione, che è il presupposto per minimizzare la formazione di alcuni inquinanti e migliorare il recupero energetico.

I forni a griglia sono tradizionalmente impiegati per l'incenerimento dei rifiuti solidi urbani, la loro potenzialità può variare da poche decine di t/d a qualche centinaio di t/d per ogni linea.

L'alimentazione di rifiuti avviene mediante sistemi di carico che favoriscono la formazione sulla griglia di un letto di rifiuti avente spessore di qualche decina di cm; concettualmente la griglia può essere divisa in una prima zona di essiccamento, prossima all'alimentazione, nella quale si ha l'evaporazione dell'umidità presente nei rifiuti, una successiva zona di combustione e una terza zona di completamento della combustione. La parte incombustibile dei rifiuti, che costituisce le scorie, una volta giunta alla zona finale della griglia viene scaricata in idonee tramogge.

L'elemento principale del forno è la griglia, che con i suoi movimenti favorisce l'avanzamento, il mescolamento e l'omogeneizzazione dei rifiuti; la griglia può essere raffreddata o solamente mediante il passaggio dell'aria di combustione o anche attraverso sistemi di raffreddamento ad acqua, quest'ultimo tipo di griglia è stato messo a punto per il trattamento di rifiuti ad elevato potere calorifico, superiore a 13MJ/kg.

Questo tipo di focolare è di gran lunga il più utilizzato per la termodistruzione dei rifiuti; ciò è dovuto alla sua capacità di accettare rifiuti fortemente disomogenei sia per quantità che per qualità.

### **Forni a letto fluido**

I forni a letto fluido sono costituiti da camere verticali con pareti refrattariate o membranate all'interno del quale il rifiuto da termodistruggere viene mantenuto in sospensione da una corrente d'aria ascendente. Per fornire maggiore inerzia termica al sistema e favorire i processi di scambio termico viene dosata sabbia, o un materiale inerte similare, assieme al rifiuto.

Derivato dalla tecnologia per la combustione del carbone, il forno a letto fluido è impiegato soprattutto per la termodistruzione di RdF o di altro rifiuto preventivamente tritato e ridotto alla pezzatura idonea: le problematiche legate ai sistemi di alimentazione e alla possibilità di agglomerazione del letto hanno finora limitato la diffusione di tale tipologia di forno per la combustione dei RU tal quali.

I forni a letto fluido, che vengono realizzati a partire da potenzialità di 50 - 200 t/d hanno alcune interessanti peculiarità, collegate sia alla presenza del letto di materiale inerte, quali la maggiore flessibilità a variazioni del carico e la relativa rapidità di accensione e spegnimento, che alle caratteristiche complessive del sistema quali la possibilità di operare con bassi eccessi d'aria, il ridotto numero di parti in movimento, l'elevata efficienza di combustione, il basso contenuto di incombusti nelle scorie e la possibilità di controllare la formazione di inquinanti in fase di combustione, sia mediante aggiunta di reagenti che tramite il controllo della combustione.

### **Forni a tamburo rotante**

I forni a tamburo rotante sono costituiti da un cilindro metallico in rotazione, leggermente inclinato sull'orizzontale (1 - 3%) per favorire l'avanzamento del materiale. Il tamburo è tipicamente rivestito all'interno da materiale refrattario per proteggere l'involucro metallico dalla temperatura elevata e dall'aggressione chimica: in alcune applicazioni il tamburo può essere realizzato in pareti a tubi d'acqua per la produzione di vapore.

Nelle applicazioni ai processi di termodistruzione, i rifiuti vengono alimentati in corrispondenza della testata equipaggiata con bruciatore ed avanzano in equicorrente ai fumi sino alla zona di scarico presso la testata opposta.

I forni a tamburo rotante, che possono essere alimentati sia con solidi, che con liquidi e fusti, sono utilizzati soprattutto per lo smaltimento dei rifiuti industriali perché si prestano alla combustione di qualsiasi rifiuto senza particolari pretrattamenti.

## **ALTRE TIPOLOGIE: PIROLISI, GASSIFICAZIONE, PLASMA**

### **Pirolisi**

Il processo di pirolisi consiste in una conversione termochimica che consente di trasformare la sostanza organica presente nel rifiuto in prodotti finali (solidi, liquidi e gassosi) combustibili. La pirolisi avviene in assenza di agenti ossidanti, o con una presenza così limitata di questi tale da poter trascurare le reazioni di ossidazione. Il calore necessario per l'evoluzione del processo può essere fornito indirettamente, attraverso le pareti del reattore (trasporto di calore per convezione ed irraggiamento), oppure direttamente ricircolando un mezzo riscaldante nel letto (trasporto di calore per conduzione).

I prodotti di pirolisi, pur variando a seconda del materiale alimentato, possono essere classificati nel seguente modo:

- un gas combustibile avente un medio potere calorifico (13-21 MJ/Nm<sup>3</sup>), costituito principalmente da CO, CO<sub>2</sub>; tale gas può essere bruciato per fornire calore allo stesso reattore di pirolisi, oppure può essere impiegato come combustibile per turbogas o motori a combustione interna;
- un prodotto liquido che, nella maggior parte dei casi, non è direttamente impiegabile come combustibile a causa della sua elevata viscosità ed acidità dovuta alla presenza di composti organici ossigenati, ma necessita di un trattamento;
- un prodotto solido (char), costituito da residuo carbonioso e da ceneri, usato come combustibile o nell'industria chimica.

In generale si può comunque affermare che un processo di pirolisi deve minimizzare la produzione delle correnti liquide, tar e soluzione acquosa che, specialmente nel caso della seconda, creano i maggiori problemi tecnici e ambientali.

Nonostante che il processo di pirolisi sia tutt'altro che consolidato dal punto di vista tecnologico, esistono diversi esempi di impianti industriali. Tali impianti, nella maggior parte dei casi, sono stati realizzati per il trattamento di alcune categorie particolari di rifiuti, quali scarti di pneumatici o gomma, biomasse e CDR

### **Gassificazione**

La gassificazione è un processo termico che avviene in una limitata e controllata quantità di ossigeno, o di un altro agente gassificante, in modo tale da realizzare una combustione parziale che fornisca l'energia necessaria all'avanzamento delle reazioni endotermiche: in sostanza si impiegano rifiuti per la produzione di un gas di sintesi con un processo autotermico. Come nel caso della pirolisi, la gassificazione del rifiuto non si propone l'immediata fruizione del suo contenuto energetico bensì persegue la sua trasformazione in combustibile.

Il processo viene schematizzato secondo tre stadi che hanno luogo contemporaneamente in sezioni diverse del reattore:

- essiccamento del rifiuto, a temperature relativamente modeste, per contatto con i gas caldi;
- pirolisi, a temperature più elevate ( $T > 400\text{ °C}$ ), con formazione di volatili leggeri (gas), volatili pesanti (tar) e residuo solido (char);
- gassificazione-combustione del char e reazioni in fase gas dei prodotti volatili della pirolisi.

La combustione parziale del solido fornisce il calore necessario al sostentamento del reattore, in modo tale da renderlo autotermico.

I prodotti generati da un impianto di gassificazione sono:

- un gas avente potere calorifico medio-basso ( $4-15\text{ MJ/Nm}^3$ ), costituito principalmente da CO e H<sub>2</sub> ;
- un residuo solido (char) avente una composizione intermedia tra quella di un residuo di pirolisi e di incenerimento, che deve essere smaltito in discarica (in alcuni casi può essere usato come additivo per la produzione di cemento).

### **Plasma**

Il processo al plasma prevede la degradazione a livello molecolare della sostanza trattata.

Definizione di plasma: "quarto stato della materia" caratterizzato da distanze intermolecolari maggiori di quelle dei gas.

I plasmi vengono generati mediante scariche elettriche ad alto voltaggio in un gas fluente tra due elettrodi oppure mediante radiazione con microonde o onde radio.

La tipologia e la pressione del gas determina la temperatura e le proprietà di trasporto di ciascun plasma, permettendo così di "progettare" il plasma in funzione dell'applicazione prevista.

L'utilizzo della tecnologia al plasma, a scala industriale, è ormai consolidato nel settore siderurgico e, più in generale, metallurgico.

In linea di principio, potendo superare localmente i  $10.000\text{ °C}$ , il plasma può demolire a livello elementare le molecole complesse in tempi brevissimi (millisecondi): il risultato finale consiste in un processo di vetrificazione-pirolisi che può essere applicato a rifiuti solidi eterogenei e a rifiuti organici pericolosi. Nel primo caso si ottiene una scoria vetrificata non lisciviabile nel secondo si hanno atomi ionizzati che si ricombinano successivamente formando composti non più pericolosi e, in perfetta analogia con la pirolisi tradizionale precedentemente vista, spesso combustibili.

La tecnologia del plasma è molto complessa e di esercizio economico ancora oneroso per l'applicazione su larga scala nel settore di trattamento dei rifiuti. Infatti, a tutt'oggi, sono stati realizzati solo pochi impianti a livello per lo più ( $\text{max. 1t/h}$ ) dimostrativo, quasi tutti dedicati al trattamento dei PCB.

## **RECUPERO ENERGETICO**

Gli impianti di incenerimento, come loro funzione principale, hanno lo smaltimento dei rifiuti in condizioni di sicurezza per l'ambiente, pertanto dal punto di vista sia progettuale che gestionale assumono valenze prioritarie l'affidabilità del sistema di combustione, le unità di trattamento dei fumi e dei reflui e sistemi per il controllo delle emissioni.

Il recupero energetico in un impianto di incenerimento, pur rivestendo un ruolo notevolmente importante, deve essere considerato come un accessorio dell'attività di smaltimento.

### **Generatore di vapore.**

Il generatore di vapore è usualmente del tipo a "piccolo volume d'acqua" ed è normalmente costituito da tre sezioni così suddivise in base al percorso dei fumi:

- la sezione di vaporizzazione, dove l'acqua di alimento diviene vapore saturo;
- il surriscaldatore per la trasformazione del vapore saturo in surriscaldato: grado di surriscaldamento medio compreso tra i 100-150 °C;
- l'economizzatore per il recupero di parte dell'energia termica ancora presente nei fumi per il preriscaldamento dell'acqua di alimento prima dell'immissione nel corpo cilindrico.

I fumi in uscita dalla camera di combustione si immettono nel generatore di vapore ad una temperatura dell'ordine di 900°C (valore di temperatura ottimale per evitare fenomeni di corrosione tra gli acidi presenti nei fumi ed il carbonio costituente i tubi vaporizzanti) ed escono ad una temperatura non inferiore a 200 °C per evitare fenomeni di corrosione sui tubi dell'economizzatore a causa delle possibili condense acide.

La pressione di esercizio del generatore di vapore è di norma intorno a 40 bar con una temperatura del vapore surriscaldato in uscita generatore di vapore dell'ordine dei 380-400 °C.

Il generatore di vapore è provvisto di sistemi per la pulizia dai depositi di cenere sia dei tubi vaporizzanti sia dei banchi di surriscaldamento quali, ad esempio, soffiatori a vapore a parete per la sezione vaporizzante, di tipo retrattili per il surriscaldatore che tramite l'immissione di vapore ad alta pressione rimuovono i depositi di cenere dai tubi.

Il generatore di vapore è alimentato da acqua privata di sali e ossigeno per cui dovrà essere previsto un impianto di demineralizzazione e un degasatore termo fisico.

### **Turbina a vapore.**

Il vapore surriscaldato in uscita dal generatore di vapore tramite le valvole di intercettazione e di regolazione viene immesso nella turbina a vapore; questa può essere del tipo con palettatura ad azione o ad azione-reazione e condensazione del vapore tramite condensatore ad aria o, se in prossimità di un corso d'acqua di adeguata portata, con un condensatore ad acqua; quest'ultimo permette un più elevato rendimento poiché il salto entalpico può essere utilizzato fino ad una pressione 0,08-0,10 bar, valori non raggiungibili con un condensatore ad aria.

Per l'ottimizzazione del rendimento la velocità del rotore della turbina è dell'ordine dei 10.000 g/min.

Qualora il recupero energetico non abbia come unico fine solo la produzione di energia elettrica ma sia prevista la cogenerazione, nella zona della palettatura a media pressione della turbina sarà realizzato lo spillamento di una parte del vapore che sarà inviato ad uno scambiatore di calore per la produzione di acqua calda, o surriscaldata, da inviare agli utilizzatori di energia termica quale può essere, ad esempio, un sistema di teleriscaldamento.

### **Produzione di energia elettrica**

La produzione di energia elettrica avviene, come è ovvio, in maniera del tutto simile a come avviene nelle centrali termoelettriche a questo scopo dedicate.

La produzione di energia elettrica, pur non essendo la funzione prioritaria di un impianto di termodistruzione dei rifiuti, riveste essa stessa un'importanza particolare, dal punto di vista ambientale, in quanto va a sostituire energia normalmente prodotta con fonti non rinnovabili e, dal punto di vista della produzione di "gas serra", meno neutra rispetto ai rifiuti.

Riveste importanza la vicinanza ad una stazione di trasformazione di energia elettrica al fine di minizzare i costi di allacciamento alla rete elettrica di distribuzione.

### **Produzione di calore per teleriscaldamento**

Il vapore in uscita dal generatore viene inviato ad uno scambiatore di calore vapore / acqua calda o surriscaldato che a sua volta sarà inviato agli utilizzatori.

Nel caso di un generatore per la produzione di vapore esclusivamente per teleriscaldamento, la pressione e la temperatura di esercizio sono molto più basse che per la produzione di energia elettrica; l'acqua calda in uscita dallo scambiatore è surriscaldata con una pressione di 1,5-2,0 bar ed una temperatura dell'ordine dei 120 °C; i valori di pressione e temperatura dell'acqua calda sono funzione della rete di distribuzione e del tipo di utilizzatori.

## **SISTEMI DI TRATTAMENTO DEI FUMI**

La sezione di trattamento dei fumi di un impianto di incenerimento ha lo scopo contenere entro i limiti di emissione previsti dalla normativa le concentrazioni di inquinanti presenti nei fumi di combustione.

Appare evidente che questa parte dell'impianto costituisce la sezione più sensibile dal punto di vista ambientale, sulla quale è bene che si concentri l'attenzione di tutti coloro che, progettisti, costruttori e gestori, si occupano in modo professionale di incenerimento dei rifiuti.

### **Inquinanti presenti nei fumi di combustione**

#### **Polveri**

Con il termine "polveri" vengono identificate le particelle solide trascinate dalla corrente dei fumi, esse possono contenere una vasta gamma di materiali come:

- carbonio incombusto;
- ossidi metallici,
- silicati;
- alluminati;
- sali;
- composti in fase gassosa che condensano.

La composizione delle polveri è molto variabile. La natura degli elementi contenuti nel particolato fine (inferiore al micron) deriva dalla condensazione di sostanze della fase gassosa sulla superficie delle particelle e può procurare alle stesse proprietà chimiche e catalitiche.

#### **Ossi di Azoto NO<sub>x</sub>**

Le fonti di ossidi di azoto, NO<sub>x</sub>, tipiche dei processi di combustione sono essenzialmente due:

- ossidazione di azoto molecolare, N<sub>2</sub>, ad elevate temperature: si hanno i cosiddetti NO<sub>x</sub> termici;
- ossidazione di composti azotati presenti nel combustibile alimentato: si hanno i cosiddetti NO<sub>x</sub> da combustibile.

La fonte predominante nei processi in esame è l'ossidazione di azoto molecolare. Poiché l'energia di attivazione di molte delle reazioni di formazione coinvolte nella produzione degli NO<sub>x</sub> termici sono elevate, la velocità di formazione degli stessi dipende fortemente dalla temperatura. Gli NO<sub>x</sub> termici si formano durante la combustione di tutti i combustibili nella regione di massima temperatura della fiamma: temperature elevate ed alte concentrazioni di ossigeno ne favoriscono la formazione.

#### **Macroinquinanti acidi**

A questa famiglia appartengono:

- acido cloridrico (HCl);
- acido fluoridrico (HF);
- anidride solforosa (SO<sub>2</sub>).

La presenza di zolfo ed alogeni nei rifiuti porta, in fase di combustione, alla formazione di questi composti gassosi; in particolare:

### **Zolfo**

Lo zolfo è presente nei seguenti rifiuti costituiti da pneumatici, gesso, pannelli murari ed altri; la sua combustione porta alla formazione di anidride solforosa, composto che, alla temperatura di fiamma, è sostanzialmente stabile. A bassa temperatura c'è la possibilità che SO<sub>2</sub> possa in parte ossidarsi ad anidride solforica (SO<sub>3</sub>) grazie all'azione catalitica del particolato: normalmente tale conversione non supera il 10%.

Il tenore in zolfo in uscita dalla sezione di combustione è normalmente compreso tra 50 e 250 mg/Nm<sup>3</sup>.

### **Cloro e fluoro**

La presenza di cloro e fluoro nei rifiuti supera largamente quella riscontrabile in tutti i combustibili convenzionali.

Il cloro è presente nei prodotti organoclorati utilizzati nella fabbricazione delle plastiche (polivinilcloruro, PVC), nei solventi clorati utilizzati nella fabbricazione di inchiostro e di caoutchou, nei prodotti fitosanitari e negli insetticidi; come sale (cloruro di calcio e di sodio) contenuto in carta e cartoni, rifiuti alimentari e vegetali.

La trasformazione del cloro è pressoché quantitativa e la possibilità di ossidazione da HCl a cloro molecolare è praticamente nulla (non risente dell'azione catalitica del particolato).

Normalmente i tenori in acido cloridrico in uscita dalla sezione di combustione sono compresi tra 600 e 2.000 mg/Nm<sup>3</sup> (in funzione per lo più della percentuale di rifiuti ospedalieri che vengono alimentati al forno). La sua ripartizione all'interno dei vari flussi in uscita dall'impianto è la seguente:

- 70% sotto forma di HCl nei fumi;
- 10% all'interno delle scorie del forno;
- 20% trattenuto dalle ceneri volanti.

Il fluoro è per lo più presente nei materiali inerti, nelle bottiglie, nell'alluminio, nelle materie plastiche sotto forma di polifluorurati (per lo più imballaggi medici), nei tessuti sintetici e nei residui di pesticidi.

Il tenore in fluoro in uscita dalla sezione di combustione è compreso tra 0,5 e 20 mg/Nm<sup>3</sup>. La sua ripartizione all'interno dei vari flussi in uscita dall'impianto è la seguente:

- 35% nelle scorie;
- 40% nelle ceneri volanti,
- 25% sotto forma di HF nei fumi.

Questi acidi (HCl, HF e SO<sub>3</sub>) causano seri problemi in termini di corrosione alle strutture per condensazione acida a basse temperature e per l'azione degli acidi disciolti nei sali fusi ad alte temperature. Per questi motivi il loro abbattimento diventa estremamente importante, oltre che per minimizzare l'impatto ambientale, anche per il buon mantenimento dell'impianto.

### **Metalli pesanti e volatili**

Nei rifiuti alimentati al forno sono presenti, in tracce, i seguenti metalli pesanti potenzialmente tossici:

- Mercurio (Hg) ed i suoi composti,
- Cadmio (Cd) ed i suoi composti,
- Piombo (Pb) ed i suoi composti,
- Nichel (Ni) ed i suoi composti,
- Arsenico (As) ed i suoi composti.

Per ognuna delle suddette famiglie di metalli pesanti, i principali composti che derivano dalla combustione dei rifiuti sono:

- metalli pesanti allo stato elementare,
- composti clorati,

- composti ossidati,
- composti solforati.

### **Microinquinanti organici**

Con il termine microinquinanti organici si identificano i composti che si raggruppano sotto il nome di “diossine” e “furani”: tale appellativo si riferisce ai 75 cogeneri di composti policlorurati dibenzo-p-diossine (PCDD) ed ai 135 cogeneri dei policlorurati dibenzofurani (PCDF). Tra questi 210 composti;

- tossici nei confronti di numerosi animali da laboratorio;
- persistenti agli attacchi chimici, biologici e fisici.

Queste caratteristiche portano le diossine ad accumularsi nell’ambiente con conseguente bioaccumulo in animali ed esseri umani.

Le principali ipotesi fino ad ora formulate per spiegare la presenza delle diossine e dei furani nei fumi uscenti dalla zona di combustione degli impianti di termoincenerimento sono:

- i PCDD/PCDF sono già presenti nel rifiuto in entrata;
- i PCDD/PCDF sono prodotti dai relativi precursori clorurati (pre-diossine come policloro benzeni, fenoli clorurati e benzeni clorurati);
- i PCDD/PCDF possono essere formati attraverso processi di pirolisi di composti chimici di composti clorocarburici e/o dalla combustione di materiale organico non clorurato come polistirene, cellulosa, lignina, carbone e particolari composti carboniosi in presenza di clorodonoratori.

Uno dei più importanti meccanismi di formazione di PCDD/PCDF vede come coprotagonista le ceneri volanti ed ha luogo quando la temperatura del flusso gassoso diminuisce, raggiungendo l’intervallo tra 450 e 250 °C. Tale reazione prende il nome di “sintesi De Novo”.

### **Idrocarburi incombusti**

#### **Carbonio organico totale (C.O.T.)**

Fanno parte di questa classe di inquinanti gli idrocarburi che, a causa di zone di combustione incompleta, possono ritrovarsi nei fumi in uscita dalla sezione di combustione.

#### **Composti organici volatili (C.O.V.)**

Con il termine “Composti Organici Volatili” (COV) si identificano, in generale, gli idrocarburi evaporati ed i solventi. In genere questi derivano da macromolecole organiche che, in fase di combustione, non si decompongono completamente. Alcuni di questi composti fanno parte di particolari “sottogruppi”, come ad esempio gli “Idrocarburi Policiclici Aromatici” (IPA).

Quando si liberano nell’atmosfera, i Composti Organici Volatili vi possono dimorare per un tempo sufficientemente lungo (carattere “persistente”) da partecipare a delle reazioni chimiche (carattere “reattivo”).

I principali composti raggruppati nei COV sono:

- idrocarburi saturi ed insaturi,
- idrocarburi lineare e ciclici,
- idrocarburi sostituiti e non,
- idrocarburi aromatici,
- aldeidi,
- chetoni,
- acidi.

La classificazione può essere fatta in due grandi famiglie:

- idrocarburi “petroliferi”: alcani, olefine, idrocarburi benzenici e naftenici della serie ciclica (tra i quali gli IPA) ed i loro derivati alogenati.
- solventi organici: alcool, chetoni, esteri, solventi clorati.

### **Monossido di carbonio**

Il monossido di carbonio (CO) è prodotto dalla combustione incompleta dei rifiuti solidi o liquidi. Se la combustione è effettuata con una quantità di aria sufficiente, il carbonio reagisce quasi totalmente con l'ossigeno dell'aria, portando alla formazione di anidride carbonica (CO<sub>2</sub>).

La combustione incompleta si verifica a causa di insufficienza di ossigeno, dovuta a cattive condizioni di miscelazione in camera di combustione, oppure di temperatura insufficiente a causa di un eccesso di aria (cool combustion).

Il monossido di carbonio deve la sua pericolosità alle sue caratteristiche fisiche (incolore, inodore, infiammabile) e chimiche (alta reattività con l'emoglobina del sangue, che causa il mancato trasferimento dell'ossigeno alle cellule del corpo umano, arrivando a causare la morte per asfissia).

## **SISTEMI DI ABBATTIMENTO**

Riguardo al trattamento dei prodotti di combustione a valle del processo, le tipologie di depurazione sono molteplici; in generale si può dire che tra tutti i sistemi non ne esiste uno che sia in assoluto migliore degli altri, ma piuttosto va detto che per ogni tipo di problema può esservi una soluzione impiantistica differente, e, talvolta, sistemi di depurazione pur ispirati al medesimo principio possono risultare efficaci oppure no solo per via di piccole differenze costruttive apparentemente poco significative.

### **Polveri**

Si parla di depolverazione quando una corrente gassosa che trasporta particelle solide viene convogliata ad un sistema che separa la fase solida da quella gassosa.

L'efficienza degli impianti di depurazione dei fumi è direttamente legata alle prestazioni del sistema di filtrazione utilizzato; per ottimizzarne la scelta bisogna prendere in considerazione diversi fattori:

- limiti di emissione da rispettare
- portata dei fumi
- tipologia e qualità del particolato
- temperatura e umidità del gas
- presenza di agenti corrosivi
- lo spazio disponibile
- caratteristiche costruttive dell'impianto stesso
- costi di investimento e di funzionamento

I principali sistemi dedicati all'abbattimento delle polveri sono:

- cicloni
- elettrofiltri (o precipitatori elettrostatici)
- filtri a maniche

### **Cicloni**

Nei depolveratori a ciclone il gas inquinato è sottoposto ad un movimento rotatorio; sotto l'azione della forza centrifuga, le particelle si dirigono verso le pareti dei cicloni dove si agglomerano e, sotto l'azione della forza peso, vengono a cadere nella tramoggia posta alla base del ciclone.

Essendo la velocità radiale di sedimentazione inversamente proporzionale al raggio del ciclone, si tende a realizzare delle batterie formate da tanti piccoli cicloni posti in parallelo, di alcune decine di centimetri di diametro ciascuno, o gruppi di cicloni posti in serie. Comunque questa tecnologia non consente di captare particelle di diametro inferiore ai 5-10 micron, lasciando così passare la maggior parte dei metalli pesanti condensati sulle particelle di diametro inferiore. Sono comunque apparecchiature semplici ed affidabili, anche se esiste sempre il rischio di intasamento e quello di perdita di efficienza per variazione della portata fumi. Attualmente vengono per lo più utilizzati per una fase di pre-depolverazione.

### **Elettrofiltri**

Si basano sul fenomeno fisico della precipitazione elettrostatica che si ottiene facendo passare la corrente dei fumi tra due elettrodi:

- uno emissivo (di carica negativa) filiforme
- uno ricettivo (di carica positiva) costituito da una superficie di ricezione

Le particelle di polveri vengono caricate dagli ioni prodotti per effetto corona dall'elettrodo emittente che si trova sotto una alta tensione (circa 50 kV). Grazie all'effetto del campo elettrico che si viene ad instaurare tra i due elettrodi, le particelle caricate sono attratte dall'elettrodo ricettore e fatte ricadere da questo in una tramoggia di raccolta tramite scuotimento.

Questi filtri possono essere costituiti da uno o più campi di captazione disposti in serie. La maggior parte degli elettrofiltri è costituito da almeno due campi fino ad un massimo di quattro o cinque, ciascuno costituito da elettrodi emissivi e ricettivi, posizionati verticalmente in modo che le direzioni dei campi risultino alternate.

Il rapporto tra la lunghezza e l'altezza delle placche è generalmente compresa tra 0,9 e 1,5, per garantire una migliore efficienza del singolo campo. L'efficienza degli elettrofiltri aumenta all'aumentare del numero di campi.

Per ciò che riguarda il funzionamento, il parametro che più influenza il funzionamento di un elettrofiltro è la resistività delle particelle di polvere; le condizioni ottimali prevedono una resistività compresa tra 108 e 1011 ohmcm, tipica della maggior parte delle polveri. Resistività inferiori provocano un facile "scaricamento" delle particelle sulle placche ricettrici e la loro reimmissione in circolo causata dalla velocità dei fumi. Resistività maggiori provocano un fenomeno di contro emissione in seguito all'aumento di resistenza dello strato di polveri sugli elettrodi ricettori. In entrambi i casi si osserva una diminuzione di rendimento.

Per ovviare a valori di resistività troppo alti o troppo bassi si gioca sulla velocità dei gas: normalmente questa si attesta intorno a 1-1,2 m/s, ma può arrivare fino a 1,8 m/s per particelle più resistenti.

Gli elettrofiltri sono costruiti in materiale metallico e possono sopportare temperature dei gas superiori ai 400°C. La temperatura di esercizio si attesta normalmente in un intervallo compreso tra 200 e 300°C.

Le perdite di carico sono relativamente basse; il valore tipico è compreso tra 1 e 3 mbar

L'efficienza di un elettrofiltro diminuisce all'aumentare del tenore di polveri presenti nella corrente dei fumi; ne consegue che, data una superficie di captazione ed un numero di campi, l'efficacia dell'elettrofiltro è funzione della portata di fumi trattata.

### **Filtri a manica**

Sono costituiti da un tessuto tubolare sostenuto da un cestello portante interno, solitamente in acciaio.

Il grado di separazione totale è influenzato dallo spessore dello strato filtrante, dal diametro delle fibre e dal grado di separazione della fibra singola, influenzato a sua volta dalle dimensioni e dalla velocità della particella.

La filtrazione non è semplicemente una "setacciatura" della polvere contenuta nel fluido gassoso che la tiene in sospensione e la trasporta. Il fenomeno è più comprensibile se lo si pensa in termini probabilistici: una particella delle dimensioni di pochi micron che attraversa il feltro di cui è composta la manica filtro ha, relativamente alle sue dimensioni, un percorso lunghissimo da compiere: più piccoli e tortuosi sono i "canali" che deve percorrere, più è bassa la sua velocità e, più grandi sono le sue dimensioni, più alta è la probabilità che essa interferisca, meccanicamente o attraverso gli altri meccanismi citati, con il mezzo filtrante.

Per un mezzo filtrante, sia feltro che tessuto, la permeabilità all'aria, definita come la portata che causa, sulla superficie unitaria, la perdita di carico di 200 Pa, è un indice abbastanza significativo della capacità di trattenimento: a minore permeabilità corrisponde una maggiore capacità di trattenimento.

Il modo di lavorare del filtro è diverso a seconda del tipo di pulizia (filtri meccanici o pneumatici) sia perché anche lo strato di polvere che si forma sulle maniche partecipa al processo di filtrazione, sia perché più alta è la velocità del gas, più grosse sono le particelle che riescono a superare lo spessore del mezzo.

Le prestazioni del filtro non potranno quindi essere definite né con le dimensioni della più piccola particella filtrabile, (ad esempio fino a 10 micron), né con una efficienza ponderale, (ad esempio 99,9%), dato che la quantità di polvere che esce dipende poco da quanta entra nel filtro: il modo corretto di definire le prestazioni di un filtro è con la concentrazione di polvere in uscita in mg/mc. Una indicazione sulla concentrazione di polvere in uscita dal filtro potrà essere fornita quindi solo sapendo la natura e l'analisi granulometrica della polvere, nonché la velocità

di filtrazione, intesa come rapporto tra portata e superficie. Questa è anzi la variabile di progetto più importante: senza conoscere questo dato, la scelta del mezzo filtrante più appropriato non può essere fatta.

I dati di esercizio forniti dalle schede tecniche dei vari mezzi filtranti sono quindi solo indicativi, non potendo abbracciare tutta la casistica delle varie polveri e dei vari filtri: le velocità di filtrazione vanno intese senz'altro come valori massimi, validi per polveri di discrete dimensioni; in casi estremi (polveri submicroniche) esse subiscono un drastico ridimensionamento: in alcuni casi vanno adottate velocità inferiori a 1 m/min.

La scelta del mezzo filtrante è molto vasta. Si impiegano sia tessuti che feltri: i tessuti agiscono come un supporto sul quale la polvere, depositandosi, forma uno strato microporoso capace di fermare le particelle più fini; i feltri sono essi stessi uno strato di fibre che, intrecciandosi, formano dei micropori. I feltri permettono rapporti di filtrazione più elevati ma richiedono sistemi di pulizia più sofisticati, mentre i tessuti vengono usati con velocità di attraversamento più basse e vengono puliti meno frequentemente.

Le proprietà chimiche e fisiche della fibra tessile di cui il mezzo filtrante (feltro o tessuto) è composto influenzano grandemente l'efficienza e la stabilità del mezzo: fattori di origine chimica e fisica propri del processo agiscono su fibre diverse in modi differenti.

La conoscenza della stabilità delle varie fibre è essenziale nella scelta del mezzo filtrante più adatto a un determinato processo di filtrazione. Un'indicazione di massima delle caratteristiche dei vari tessuti è riportata di seguito:

### Fibre sintetiche

Tipo di fibra	Temperatura massima	Resistenza agli acidi	Resistenza agli alcali	Resistenza alla ossidazione
Polipropilene	100	Ottima	Ottima	Cattiva
Poliolfina per alta T°	130	Ottima	Ottima	Cattiva
Poliammide	115	Moderata	Buona	Moderata
Poliacrilonitrile cop.	115	Moderata	Moderata	Buona
Poliacrilonitrile omo	140	Buona	Moderata	Buona
Poliestere	150	Moderata	Cattiva	Buona
M-aramide	220	Moderata	Moderata	Buona
Polifenilensolfuro	200	Ottima	Ottima	Buona
Poliimide	260	Buona	Moderata	Buona
Politetrafluoroetilene	280	Ottima	Ottima	Ottima

Si noti che la temperatura di esercizio di un filtro deve essere sempre superiore al punto di rugiada della miscela di gas da depolverare: se la temperatura scende sotto il dew-point l'acqua in fase vapore contenuta nel gas condensa: le gocce di acqua in fase liquida non solo inumidiscono lo strato di polvere depositato sulle maniche aumentandone così la resistenza al passaggio dell'aria (e quindi la Delta P del filtro), ma disciolgono anche eventuali composti acidi causando corrosione su maniche, cestelli porta maniche e carpenteria del filtro.

In passato la scelta tra un filtro a maniche ed un elettrofiltro era delicata e veniva "giocata" su considerazioni di natura economica che, a seconda della tipologia impiantistica, poteva premiare ora l'una ora l'altra tecnologia.

Attualmente, e sempre di più in futuro, i limiti di emissione richiesti per le polveri sono tali da impedire pressoché completamente l'utilizzo del solo elettrofiltro.

La sua funzione è comunque sempre di primo piano, soprattutto se consideriamo che vi sono tecnologie di depurazione dei fumi (utilizzanti bicarbonato di sodio a secco) che, nel caso di una doppia filtrazione (normalmente con elettrofiltro e filtro a maniche), danno la possibilità di diminuire drasticamente l'impatto ambientale dovuto dal conferimento in discarica dei prodotti di filtrazione portando al recupero e alla valorizzazione dei residui che vengono trasformati in materia prima.

## Tabella comparativa tra i diversi sistemi

	VANTAGGI	SVANTAGGI
<b>CICLONE</b>	Basso costo di investimento	Bassa efficienza
	Basso costo di funzionamento	Problemi di intasamento
	Assenza di usura e di fragilità che riducono le prestazioni.	Captazione inferiore rispetto a quella dei filtri a maniche
<b>ELETTROFILTRO</b>	Costi di gestione ridotti	Performance funzione del tenore di polveri nei fumi
	Costi di investimento ragionevoli (per installazioni di grandi capacità)	Per piccole installazioni il costo di investimento non è sopportabile
		Con l'utilizzo di reattivi a secco comporta un sovradosaggio degli stessi
	Performance molto elevate	Presenza di pezzi soggetti ad usura: costi di gestione elevati
<b>FILTRO A MANICHE</b>	Costo di investimento inferiore per piccole e medie capacità	Prestazioni ridotte a causa della rottura di qualche manica
	Compatibile con l'iniezione di reattivi a "secco"	Rischio di infiammabilità e di potenziale esplosione nel caso di presenza di polveri combustibili

### NO<sub>x</sub>

Gli ossidi di azoto possono essere ridotti ottimizzando il progetto ed il funzionamento della camera di combustione e installando dispositivi supplementari quali:

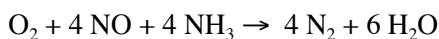
- sistemi catalitici
- sistemi non catalitici
- sistemi chimici

Queste misure possono essere adottate singolarmente o in combinazione fra loro.

### Sistemi SCR (Riduzione Catalitica Selettiva)

#### Funzionamento

Si inietta ammoniaca nel gas di combustione, a monte di un letto catalitico. La reazione chimica che ne deriva è la seguente:



NO<sub>x</sub> e NH<sub>3</sub> si combinano sulla superficie del catalizzatore, formando una sale di ammonio intermedio che, successivamente, si decompone per produrre azoto elementare ed acqua. Il catalizzatore ha il compito di abbassare l'energia di attivazione della reazione di decomposizione degli NO<sub>x</sub>, consentendo l'uso della tecnologia a temperature più basse: l'intervallo ideale è 300-370°C.

Questo processo rimuove il 70-90% degli NO<sub>x</sub> con un residuo di ammoniaca non reagita comunque inferiore alle 10 ppm.

#### Componenti principali

Un sistema di riduzione catalitica è formato dai seguenti componenti:

- reattore catalitico

- griglia di iniezione dell'ammoniaca
- unità di stoccaggio dell'ammoniaca
- eventuale post riscaldamento dei fumi

#### Condizioni operative

L'ammoniaca può essere iniettata sotto forma anidra o come soluzione acquosa. I tempi di residenza variano da 0,5 a 1 secondo, sufficienti a garantire una adeguata miscelazione  $\text{NO}_x$  -  $\text{NH}_3$  prima del letto catalitico.

#### Fattori primari

I fattori primari che influenzano il processo sono:

- la temperatura;
- la composizione e configurazione del catalizzatore;
- il contenuto in zolfo e in metalli pesanti del combustibile;
- il progetto del sistema di iniezione dell'ammoniaca.

#### Catalizzatori

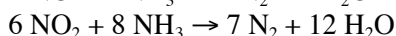
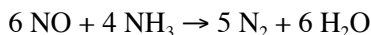
Sono disponibili in commercio in una vasta gamma di materiali e di forme; per i primi i più utilizzati sono i metalli, quali titanio, vanadio e platino, le zeoliti e le ceramiche

Gli inconvenienti principali dei catalizzatori derivano dalla sua ostruzione da parte di polveri di particelle fini, dal suo "avvelenamento" da parte di sostanze chimiche, in particolare  $\text{SO}_2$ , e dalla conversione di  $\text{SO}_2$  a  $\text{SO}_3$  con conseguenti problemi di corrosione nella sezione a valle dell'impianto, ancora a temperature inferiori a  $270^\circ\text{C}$  avviene la formazione di bisolfito di ammonio sul catalizzatore, infine le perdite di carico rilevanti (da 7,6 a 10,1 mbar)

### Sistemi SNCR (Riduzione Selettiva Non Catalitica) a base di ammoniaca o di urea

#### Funzionamento

Si inietta ammoniaca o urea ad alta temperatura (normalmente nella parte alta della camera di combustione o in una sezione a valle favorevole termicamente); tale iniezione porta alle seguenti reazioni:



L'urea, ad alta temperatura, si decompone in ammoniaca e anidride carbonica. L'utilizzo di un reagente a base di urea è più sicuro e più agevole rispetto all'ammoniaca.

Si arriva ad una riduzione degli ossidi di azoto dell'ordine del 50%, con una fuga di ammoniaca inferiore ai 10 ppm.

La temperatura ideale è tra  $850$  e  $1000^\circ\text{C}$ ; a temperature superiori l'ammoniaca reagisce più con l'ossigeno che con  $\text{NO}$ , aumentando la concentrazione di  $\text{NO}_x$ , mentre a temperature inferiori la velocità di reazione diminuisce, con conseguente diminuzione dell'abbattimento degli  $\text{NO}_x$  e maggior quantità di  $\text{NH}_3$  non reagita che sfugge nell'effluente.

I principali inconvenienti si manifestano in caso di eccesso di reagente, in quanto questo può reagire con l'acido solforico, prodotto da una precedente reazione tra  $\text{SO}_3$  e  $\text{H}_2\text{O}$ , portando alla formazione di solfato e bisolfato di ammonio; il bisolfato contribuisce a sporcare e corrodere i dispositivi di recupero del calore a bassa temperatura (in fase di raffreddamento); si può altresì formare cloruro di ammonio indesiderabile in quanto provoca pennacchi visibili.

### Sistemi chimici (TORRE A CLORITO E SODA)

Il sistema in esame prevede una torre ad umido, funzionante a due stadi, nella quale i fumi entrano ad una temperatura compresa tra i  $90$  ed i  $100^\circ\text{C}$ , e, per questo, posizionata in coda all'impianto. All'interno della torre vengono abbattuti i gas acidi eventualmente ancora presenti e gli ossidi di azoto. Il funzionamento è il seguente: il primo stadio è costituito da una soluzione

ricca di clorito di sodio che ossida gli NO ad NO<sub>2</sub>; quest'ultimo viene quindi abbattuto nel secondo stadio, contenente una soluzione a pH basico (soluzione a base di NaOH). Il sistema può essere integrato da un abbattitore di umidità che ha la funzione di limitare il trascinarsi delle torri.

La percentuale di abbattimento è funzione del dosaggio dei reagenti chimici e può arrivare a valori intorno al 90% con completa assenza di slip ammoniacali.

L'utilizzo di un sistema "ad umido" comporta un maggior investimento economico in rapporto ai sistemi non catalitici, investimento che deve tener conto sia di un trattamento chimico fisico dei reflui liquidi in uscita dalle torri sia del costo di gestione imputabile alla necessità di post riscaldare i fumi che, uscendo dal suddetto sistema ad una temperatura di circa 50-65°C, devono essere portati a 110-115°C per poter essere espulsi al camino.

La scelta del sistema di abbattimento degli ossidi di azoto avviene in considerazione delle concentrazioni di NO<sub>x</sub> rilevate, dei limiti imposti dalla normativa e, nel caso di impianti già esistenti, dal lay-out dell'impianto, a questi parametri si aggiungono quelli riguardanti le valutazioni tecniche ed economiche.

### **Gas acidi**

Per la rimozione dei gas acidi vengono impiegati sia sistemi ad umido che sistemi a secco nonché eventuali combinazioni di questi ultimi.

#### **Sistemi ad umido**

Le torri di lavaggio ad umido sono colonne cilindriche verticali all'interno delle quali si creano le condizioni per un intimo contatto tra i fumi ed il fluido lavante, onde consentire l'assorbimento dei gas acidi nel fluido di lavaggio.

Generalmente le torri ad umido sono suddivise in due stadi in serie: il primo per la rimozione di HCl ed HF mediante lavaggio con acqua ed il secondo per l'abbattimento degli SO<sub>x</sub> con soluzioni alcaline.

Le colonne di lavaggio hanno anche una buona efficienza per l'abbattimento dei metalli solubili in acqua: l'efficienza di abbattimento, crescente con l'abbassamento della temperatura, può essere migliorata mediante il sottoraffreddamento delle acque di lavaggio.

I fumi in uscita dalle colonne di lavaggio sono in condizioni di umidità e temperatura di saturazione (circa 60-70 °C) e richiedono un postriscaldamento prima della loro immissione nel camino.

I reflui liquidi prodotti presentano un elevato contenuto salino e richiedono di norma un trattamento chimico-fisico di neutralizzazione e precipitazione.

L'abbassamento della temperatura dei fumi a seguito del loro trattamento in colonne di lavaggio si rivela estremamente importante per quanto concerne la rimozione di microinquinanti volatili, soprattutto quando le colonne sono dotate di dispositivi antitrascinamento per trattenere il particolato più fine e gli aerosoli ricchi di elementi condensati.

#### **Sistemi a secco**

Nella configurazione base tali sistemi sono costituiti da un reattore di adsorbimento dei gas acidi e da un depolveratore. Tali sistemi si differenziano soprattutto in funzione del tipo di reagente alcalino utilizzato per effettuare la neutralizzazione degli acidi.

Questi sistemi di abbattimento consentono di ridurre le concentrazioni di metalli pesanti, quali il mercurio, oltre ai microinquinanti organici quali le diossine (PCDD) ed i furani (PCDF), mediante l'iniezione di carbone attivo, nella corrente dei fumi, i quali hanno la proprietà di adsorbire queste sostanze e rimuoverle dai fumi.

#### **Calce**

La temperatura viene abbassata fino al valore ottimale (130-150°C); successivamente, al reattore viene alimentata la calce per la rimozione dei gas acidi; la calce reagisce con gli acidi presenti in fase gassosa formando i sali di calcio corrispondenti.

Essendo l'efficienza della reazione relativamente bassa, al fine di ridurre gli eccessi di reagente, si rende necessario predisporre un sistema di ricircolazione del reagente, in modo da consentire più passaggi all'interno del reattore di contatto diminuendo così la percentuale di calce che non ha reagito. La bassa efficienza di conversione per singolo passaggio e la conseguente necessità

di predisporre il ricircolo del reagente ha come principali conseguenze una rilevante quantità di prodotto in circolo e le dimensioni notevoli delle apparecchiature.

I Prodotti Calcici Residui (P.C.R.), formati dai sali a base calcio e dalla quota parte di calce che non ha reagito, corrispondenti a circa 1,5 volte la quantità di calce in peso alimentata al reattore, vengono raccolti mediante un sistema di depolverazione ed inviati all'inertizzazione e, successivamente, conferite in discarica.

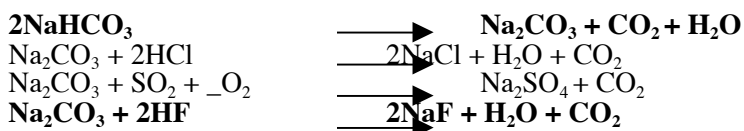
### Bicarbonato di sodio

Il bicarbonato di sodio viene utilizzato in un ampio intervallo di temperatura (dai 130 fino ai 500°C) senza sensibile variazione dell'efficienza della reazione che, sfruttando l'alta reattività del reagente, consente un utilizzo dello stesso in quantità molto prossime al teorico (o stechiometrico) rendendo assolutamente superfluo un sistema di ricircolo, in quanto l'efficienza di reazione per singolo passaggio supera il 99%. Questa caratteristica consente di rispettare i limiti più severi in emissione richiesti dalle normative, minimizzando al contempo le quantità di reagente utilizzate.

Il bicarbonato di sodio viene alimentato dal silo di stoccaggio ad un mulino di macinazione con lo scopo di ottenere la granulometria ottimale (15-20 micron). All'uscita dal mulino il bicarbonato di sodio finemente macinato viene iniettato per via pneumatica all'interno della corrente dei fumi; per effetto termico il bicarbonato si trasforma in carbonato di sodio, liberando acqua ed anidride carbonica, diminuendo così il peso molecolare effettivo del reagente, a questa prima riduzione in peso si aggiunge quella caratterizzante i sali di sodio prodotti dalla reazione bicarbonato/acidi che presentano un peso molecolare sensibilmente inferiore (da 1 kg di bicarbonato si ottengono circa 700 grammi di sali). Tali sali, al cui interno si trova una minima quantità di carbonato di sodio che non ha reagito possono seguire due strade:

- essere conferiti in discarica previa inertizzazione ;
- essere valorizzati attraverso un processo industriale che mira ad eliminare gli inquinanti presenti all'interno della matrice salina andando a produrre una materia prima riutilizzabile nell'industria chimica.

Riassumendo, le reazioni che hanno luogo sono le seguenti:



### Sistemi a semi umido

Nei sistemi a semi umido l'attemperamento dei fumi avviene mediante iniezione nel reattore di una soluzione acquosa alcalina nebulizzata. L'alimentazione del carbone attivo avviene a valle del reattore di attemperazione mediante un diffusore (carbone iniettato sulla gola del Venturi) per ottenere un miglior mescolamento, data l'elevata turbolenza in tale sezione, e per garantire un adeguato tempo di contatto.

### Confronto dei sistemi di rimozione dei gas acidi

La tabella seguente pone a confronto, in maniera sintetica i diversi sistemi di abbattimento utilizzanti reagenti.

		VANTAGGI	SVANTAGGI
SECCO	CALCE	Realizzazione impiantistica semplice	Gestione poco flessibile: operazione di iniezione calce delicata; regolazione difficile; basso margine di variazione della T°
		Basso costo di investimento	Alto eccesso stechiometrico (nell'ordine di 3)
		Assenza di effluenti liquidi	Bassa reattività per singolo passaggio: necessità di effettuare ricircoli
		Manodopera ridotta	In caso di regolamentazioni più severe, non offre margini di evoluzione
		Facilità di inertizzazione dei P.C.R.	Importante produzione di residui solidi da conferire in discarica (previa inertizzazione)
	BICARBONATO DI SODIO	Realizzazione impiantistica e gestione dell'impianto semplici	Apprezzabile consumo massiccio del reattivo (anche se si utilizza un debole eccesso in confronto allo stechiometrico: $K \approx 1,2$ )
		Costi di investimento e di gestione ridotti	Costo del reattivo elevato (anche se l'insieme delle voci del costo di gestione risulta ridotto)
		Manodopera ridotta	
		Assenza di effluenti liquidi	Residuo solido (P.S.R.) più solubile: in assenza di valorizzazione, la stabilizzazione diventa più difficile (se si usano leganti idraulici tradizionali)
		Possibilità di riciclare i prodotti sodici residui nell'industria chimica (riduzione della quantità di rifiuti da conferire in discarica)	
SEMI-UMIDO	Costi di investimento limitati (intermedi tra il processo a secco e quello ad umido)	Consumo di acqua	
	Assenza di effluenti liquidi	Produzione importante di residui (anche se inferiore ai processi a secco)	
		Consumo importante di reattivo (anche se inferiore ai processi a secco) possibilità di ricircolo	
		Gestione delicata dovuta alla fase di preparazione del reagente	
UMIDO	Basso consumo di reattivi (soda)	Necessità di un trattamento acque	
		Grande produzione di effluenti liquidi	
	Bassa produzione di residui solidi e residui separati (ceneri volanti – torta, ecc.)	Costi di investimento elevati (legati al trattamento delle acque)	
	Lisciviazione dei metalli pesanti contenuti nella torta minimizzata	Importante consumo di acqua e di elettricità	
	Possibilità di evoluzione facile (basta aggiungere una seconda torre)	Manodopera supplementare in rapporto agli altri processi (sorveglianza e mantenimento della catena di condizionamento degli effluenti)	
Grande flessibilità di funzionamento			