

I sistemi di depurazione

Corso di formazione APAT: Progettazione eco-compatibile, metodologie e strumenti per l'innovazione ed il miglioramento dei cicli produttivi

Roma 17 febbraio 2005

Ing. Giorgio Grimaldi

Sistemi di depurazione

Le attività industriali generano quasi sempre, oltre ai beni prodotti, sostanze indesiderate potenzialmente dannose per l'ambiente e per la salute, che possono interessare alcune o tutte le matrici ambientali (aria, acqua, suolo). Pertanto è necessario prevedere sia la valutazione qualitativa e quantitativa degli inquinanti, che il trattamento necessario prima dell'immissione nell'ambiente.

La composizione degli inquinanti, ed il relativo impatto ambientale, è funzione ovviamente del processo produttivo.

L'impatto è ulteriormente complicato dalla possibilità che le sostanze tossiche contenute negli scarichi possano interagire tra di loro, rinforzando i propri effetti dannosi e producendo un danno complessivo maggiore della somma dei singoli contributi.

I tipi di trattamento da adottare per prevenire, o almeno per ridurre i danni ambientali, ed i processi di depurazione necessari, devono essere scelti in funzione delle caratteristiche sia degli inquinanti che del corpo ricettore, e dei limiti di accettabilità ammessi, definiti nella normativa pertinente.

Il primo passo per progettare un trattamento di depurazione è la caratterizzazione degli inquinanti.

Infatti è necessario:

- conoscere le caratteristiche dinamiche del flusso emissivo (continuo o discontinuo) ed i relativi parametri quantitativi (portata e velocità);
- definire le proprietà fisiche degli inquinanti: stato di aggregazione, viscosità, caratteristiche termiche, conducibilità, odore, colore, ecc.;
- analizzare i costituenti chimici e le rispettive concentrazioni;
- tener conto delle caratteristiche biologiche;
- studiare le possibili interazioni.

Vanno poi progettati, realizzati e verificati i sistemi di trattamento più adeguati, con riferimento alle migliori tecnologie disponibili ed in un'ottica di ottimizzazione costi/benefici.

Nei successivi paragrafi viene data una panoramica generale degli aspetti tecnici prevalenti relativi ai sistemi di depurazione delle acque ed ai trattamenti per l'abbattimento degli inquinanti aeriformi.

Per ulteriori approfondimenti riguardanti i trattamenti di rimozione, le migliori tecnologie disponibili, gli aspetti economici, i bilanci tra vantaggi e svantaggi nell'applicare una o l'altra tecnologia si rinvia ai BREF (Best available techniques reference document) disponibili in ambito europeo, elaborati

dall'apposito gruppo di lavoro dell'U. E. e disponibili on-line all'indirizzo:
<http://eippcb.jrc.es/pages/Fmembers.htm>

Come utile esempio di riferimento si cita il BREF: "Common Waste Water And Waste Gas Treatment / Management Systems in the chemical Sector".

1. Sistemi di depurazione delle acque

La direttiva CEE n.91 del 24/09/1996 definisce cosa significa inquinare le acque, nei termini che seguono:

<<L'inquinamento idrico è l'effetto dello scarico in ambiente acquoso di sostanze o di energie tali da:

- compromettere la salute umana,
- nuocere alle risorse dei viventi e al sistema ecologico idrico,
- costituire ostacolo a qualsiasi legittimo uso delle acque, comprese le attrattive ambientali>>.

Per *acque reflue industriali* si intende qualsiasi tipo di acque reflue scaricate da edifici o da installazioni in cui si svolgono attività commerciali o di produzione di beni, diverse dalle acque reflue domestiche e dalle acque meteoriche di dilavamento.

Le sostanze inquinanti possono essere caratterizzate in maniera diversa, a seconda della loro natura e degli effetti che producono.

In tabella 6.1 sono elencati i maggiori agenti inquinanti presenti nei reflui industriali, raggruppati per tipologia.

Tab. 1.1: Principali inquinanti delle acque reflue industriali

Agenti inquinanti
carboidrati, grassi, composti proteici, aminoacidi, sostanze azotate
cloruri, sali ammoniacali
sali, calcio e magnesio (precipitati)
colloidi, materiali organici
acidi forti
basi forti
anidride solforosa, solfiti, idrosolfiti, sali di ferro e manganese
sali di potassio, fosfati, nitrati
cromati, cianuri, sali di Zn, Cu, Ni, Pb, cloroderivati, pesticidi
idrocarburi, catrame, grassi, oli vegetali, fenoli
acque di refrigerazione (calore)
saponi, detergenti, alcali
coloranti, tannino più ioni metallici, colloidi, idrocarburi
tronchetti, segatura, fibre, carniccio
sabbie, pietrisco, materiali organici

radioisotopi
pH
composti organici volatili : formaldeide, etc.

Le sostanze chimiche più frequentemente oggetto di inquinamento industriale sono: acidi, alcali, cloro, ammoniaca, idrogeno solforato, metalli pesanti, oli e idrocarburi.

In Italia le caratteristiche delle acque reflue industriali sono disciplinate innanzitutto dal Decreto Legislativo n. 152/1999, che fissa tra l'altro le concentrazioni massime ammissibili dei composti inquinanti.

Con il D. Lgs. n. 258 del 18/8/2000 sono state apportate modifiche e integrazioni al D. Lgs 152 relativamente alle competenze, alle aree sensibili, alla salvaguardia delle acque destinate al consumo umano, al bilancio idrico, alla temporaneità delle concessioni per il prelievo delle acque, alla disciplina degli scarichi, alla domanda di autorizzazione agli scarichi di acque reflue industriali, alle sanzioni amministrative e penali.

La fase attuativa di vigilanza e controllo è demandata alle regioni, che fissano proprie norme con riferimento ai suddetti Decreti.

Un ruolo essenziale nel trattamento delle acque reflue industriali è svolto da un adeguato sistema di raccolta delle acque di scarico.

Occorre anche dividere le acque di processo a seconda del loro carico di contaminanti, installando sistemi separati di drenaggio, allo scopo di prevenire la miscelazione di reflui non contaminati con reflui contaminati.

Quando possibile, è anche opportuno prevedere canalizzazioni fuori terra, più facilmente ispezionabili.

Per la depurazione delle acque reflue industriali si impiegano processi di depurazione che devono assolvere ad alcune funzioni fondamentali:

- separazione dei materiali galleggianti e dei materiali in sospensione;
- insolubilizzazione e successiva separazione delle sostanze disciolte;
- rimozione delle sostanze disciolte;
- trasformazione delle sostanze biodegradabili;
- disinfezione da microrganismi dannosi.

1.1 Trattamenti preliminari

Relativamente ai sistemi di trattamento degli inquinanti, in molti casi è necessaria una predepurazione per rimuovere i solidi sospesi (TSS), ovvero i solidi di dimensioni superiori a 0,45 µm, allo scopo di limitare danni o rotture agli impianti della linea di depurazione, e per non inficiare l'efficienza delle fasi successive di trattamento.

Nella tab.1.2 che segue sono elencate le tecniche di rimozione dei TSS, nel caso in cui non contengano metalli pesanti o fanghi attivi.

Tab. 1.2: Trattamenti per la rimozione dei TSS.

Trattamento	Descrizione	Vantaggi	Svantaggi
Sedimentazione/ Flottazione	Con la flottazione si ha l'aggregazione delle particelle, che si ingrossano fino a diventare sedimentabili.	<ul style="list-style-type: none"> - Semplicità di installazione e ridotta tendenza a rotture - L'efficienza può essere aumentata con l'aggiunta di additivi 	<ul style="list-style-type: none"> - Non adatta per materiale fine ed emulsioni stabili, anche con additivi - Il fiocco può avere contaminanti che possono dare problemi di smaltimento del fango
Filtrazione meccanica	Il refluo scorre attraverso uno strato di materiale inerte (ghiaia, fibre sintetiche ecc.), che opera come una sorta di setaccio e trattiene le particelle in sospensione.	<ul style="list-style-type: none"> - Alta efficienza di separazione - Ampio raggio operativo 	<ul style="list-style-type: none"> - Intasamento e sporramento - Rottura del letto filtrante
Microfiltrazione/ ultrafiltrazione	Processo a membrana che segrega un liquido che diffonde attraverso la membrana. Il processo è governato dalla differenza di pressione. La scelta tra MF e UF dipende dalle dimensioni delle particelle.	<ul style="list-style-type: none"> - Alta efficienza di separazione - Sistemi modulari (uso flessibile) 	<ul style="list-style-type: none"> - Intasamento e sporramento - Alta pressione operativa - Ridotta stabilità meccanica

I *metalli pesanti* non possono essere distrutti; è necessario isolarli, per quanto possibile, e usare tecniche di estrazione (vedi tabella 1.3) che consentano il massimo recupero possibile.

Tabella 1.3: Trattamenti per la rimozione di metalli pesanti.

Trattamento	Descrizione	Vantaggi	Svantaggi
--------------------	--------------------	-----------------	------------------

<p>Precipitazione/ Sedimentazione</p>	<p>I metalli possono essere precipitati come idrossidi, come solfuri o come carbonati. La separazione del precipitato avviene poi per sedimentazione.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Semplicità di installazione e scarsa tendenza a rotture. - L'efficienza può essere aumentata da aggiunta di additivi. 	<ul style="list-style-type: none"> - Il precipitato può avere contaminanti che danno problemi di smaltimento del fango. - Quando vi sono sostanze odorose, è necessario coprire il sedimentatore e convogliare il gas ad un sistema di trattamento.
<p>Cristallizzazione</p>	<p>Formazione di un precipitato prodotto su supporto come sabbia o minerali che compongono un letto fluido in reattori. I cristalli crescono e si spostano verso il basso nel reattore. L'efficacia del processo dipende dal dosaggio di reagenti e dal pH.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Unità compatte e flessibili - Nessuna produzione di fanghi - Cristalli privi di acqua con alta purezza che permettono il riciclo o riutilizzo dei metalli in altri settori - Recupero/riciclo di materie prime - Processo quasi senza rifiuti 	<ul style="list-style-type: none"> - Applicabile solo a sostanze ioniche che formano sali poco solubili o insolubili - I reattivi precipitanti aggiunti non devono essere pericolosi
<p>Scambio ionico</p>	<p>Processo che si basa sullo scambio di ioni presenti in soluzione con altri contenuti nella resina. Gli ioni in soluzione hanno maggiore affinità con la resina rispetto a quelli presenti su di essa.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - In teoria tutte le specie ioniche o ionizzabili possono essere rimosse - Non è sensibile a variazioni di portata - Alta efficienza - Possibile recupero di sostanza 	<ul style="list-style-type: none"> - Richiesta prefiltrazione - Crescita di batteri e sporco causati da precipitazione o adsorbimento - Interferenze di ioni competitivi del refluo - Attrito dovuto alle particelle di

		– Possibile recupero di acqua	resina
Nanofiltrazione (NF) o Osmosi inversa (RO)	<p>Processo di permeazione attraverso una membrana di un liquido, che viene diviso in permeato che passa e concentrato che è trattenuto.</p> <p>Guida del processo è la differenza di pressione attraverso la membrana.</p> <p>NF si usa per rimuovere gli ioni multivalenti e riusare il refluo.</p> <p>RO si usa quando è richiesto un elevato grado di purezza.</p>	<ul style="list-style-type: none"> – Alta efficienza di separazione – Sistemi modulari, uso flessibile – È possibile riciclare permeato e concentrato – Bassa temperatura operativa – Possibilità di completa automazione 	<ul style="list-style-type: none"> – Possibili intasamenti – Compattazione in presenza di ammorbidenti – Richiesta alta pressione – Basso flusso di permeato

La *rimozione di oli e/o idrocarburi* dalle acque di processo è necessaria soprattutto nelle industrie che trattano plastica, legno, carta, vernici, petrolio e suoi derivati.

Le relative tecnologie, di impiego più diffuso, sono elencate nella tabella 1.4 sottostante.

Tab: 1.4: Trattamenti per la rimozione di oli e idrocarburi

Trattamento	Descrizione	Vantaggi	Svantaggi
Microfiltrazione	<p>Processo a membrana che segrega un liquido che diffonde attraverso la membrana.</p> <p>Il processo è governato dalla differenza di pressione.</p>	<ul style="list-style-type: none"> – Alta efficienza di separazione – Sistemi modulari (uso flessibile) 	<ul style="list-style-type: none"> – Intasamento e sporco – Alta pressione operativa – Ridotta stabilità meccanica
Separazione API	<p>Consiste in un bacino rettangolare aperto e di un raschiatore mobile che muove il fango verso una fossa di raccolta e l'olio verso</p>	<ul style="list-style-type: none"> – L'olio può essere recuperato e riciclato – Protegge gli stadi successivi 	<ul style="list-style-type: none"> – Non si separano sostanze solubili – Se non sono coperti

	uno schiumatore.	di processo da grandi macchie di olio.	diventano fonti di emissioni di VOC e di forti odori
Filtrazione su mezzo granulare	Passaggio di refluo attraverso un mezzo poroso che può essere sabbia, carboni attivi, resine.	<ul style="list-style-type: none"> - Alta efficienza di separazione - Ampio raggio operativo 	<ul style="list-style-type: none"> - Intasamento e sporcamento - Rottura del letto filtrante
Flottazione con aria	Solidi e particelle liquide sono separate dalla fase acquosa per mezzo di bolle d'aria, eventualmente con l'aggiunta di coagulanti quali sali ferrici e di alluminio, silice attivata.	<ul style="list-style-type: none"> - Alta efficienza di separazione - Possibile recupero di materia - Efficienza di rimozione indipendente da portata 	<ul style="list-style-type: none"> - Alto potenziale di rilascio di odori - Alti costi operativi - Possibile intasamento di valvole

I *composti azotati e fosforati* vanno tenuti a basse concentrazioni prima dell'immissione finale nel ricettore, in quanto possono provocare l'accrescimento o la moltiplicazione abnorme di vegetali acquatici.

In tabella 1.5 sono riportati i trattamenti di rimozione dei sali inorganici e degli acidi.

Tab.1.5: Trattamenti di rimozione sali inorganici e acidi

Trattamento	Descrizione	Vantaggi	Svantaggi
Evaporazione	Processo di distillazione in cui l'acqua è la sostanza volatile e lascia un residuo di fondo concentrato da smaltire. Il vapore viene poi condensato e l'acqua riciclata, eventualmente dopo trattamento.	<ul style="list-style-type: none"> - Possibile recupero di materiale - Rimozione di composti organici refrattari e/o tossici - Riduce la quantità di acqua necessaria per i processi - Riduce quantità e volume di rifiuti pericolosi 	<ul style="list-style-type: none"> - Residui da smaltire - Contaminanti volatili inquinano il condensato (necessari altri trattamenti) o sono emessi come gas - Sensibile a sporco, corrosione e schiuma - Alto consumo di energia
Scambio ionico	Si basa sullo scambio tra ioni presenti in	<ul style="list-style-type: none"> - Teoricamente tutte le specie ioniche o 	<ul style="list-style-type: none"> - Richiesta prefiltrazione - Crescita di

	soluzione nel refluo aventi maggiore affinità con la resina e quelli già presenti su quest'ultima.	<p>ionizzabili possono essere rimosse</p> <ul style="list-style-type: none"> - Non è sensibile a variazioni di portata - Alta efficienza - Possibile recupero di sostanza - Possibile recupero di acqua - Molte resine specifiche sono disponibili 	<p>batteri e sporco causati da precipitazione o adsorbimento</p> <ul style="list-style-type: none"> - Interferenze di ioni competitivi del refluo - Attrito delle particelle di resina
Osmosi inversa (RO)	Processo di permeazione di un liquido attraverso una membrana, che viene diviso in permeato che passa e concentrato che è trattenuto. La guida del processo è la differenza di pressione attraverso la membrana. RO si usa quando è richiesto un elevato grado di purezza.	<ul style="list-style-type: none"> - Alta efficienza di separazione - Sistemi modulari, uso flessibile - È possibile riciclare permeato e concentrato - Bassa temperatura operativa - Possibilità di completa automazione 	<ul style="list-style-type: none"> - Possibili intasamenti - Compattazione in presenza di ammorbidenti - Richiesta alta pressione - Basso flusso di permeato

Le acque di scarico biodegradabili possono essere trattate in sistemi biologici appositi, eventualmente anche come fase finale di affinamento dopo trattamenti preliminari come quelli precedentemente accennati.

Alcune tra le migliori tecnologie impiegate in questo campo sono:

- Filtri percolatori. Consistono in una struttura contenente il materiale di riempimento del letto filtrante, il sistema di distribuzione del refluo, il sistema di drenaggio e di sostegno del riempimento;
- Processi anaerobici e aerobici a letto fisso. I microrganismi attecchiscono alla superficie di speciali supporti presenti nel reattore

biologico, attraverso lo sviluppo di una pellicola biologica di spessore diverso, a seconda del carico organico associato al refluo in ingresso;

- Processi anaerobici a letto espanso. La biomassa viene tenuta in sospensione attraverso l'insufflazione di aria (reattori aerati) o grazie alla presenza di mixer (reattori anaerobici o atossici);

Per il trattamento dei fanghi è necessario considerare una serie di operazioni, prima dello smaltimento finale:

- ispessimento ed idratazione,
- stabilizzazione e condizionamento;
- trattamento termico;
- essiccamento.

2. Sistemi di abbattimento degli inquinanti aeriformi

La necessità di limitare l'immissione di sostanze inquinanti nell'aria comporta l'utilizzo di adeguati sistemi di abbattimento.

Questi sistemi si sono rivelati pressoché indispensabili nell'ambito delle attività industriali, che possono produrre inquinanti aerodispersi in grandi quantità.

L'immissione di inquinanti in atmosfera assume particolare rilievo sia per l'impatto immediato sulla salute, per effetto di inalazione diretta; sia per la possibilità di diffusione degli inquinanti su aree estese; sia per l'impatto sull'ambiente globale, in particolare in termini di cambiamenti climatici.

2.1 Riferimenti normativi

L'inquinamento atmosferico di origine industriale è regolato su tutto il territorio nazionale dalle norme seguenti:

- D.P.R. 203/88. E' la legge quadro italiana sull'inquinamento atmosferico. Prevede per i nuovi impianti l'autorizzazione in fase progettuale. Abroga parzialmente la precedente legge 615/66 sull'inquinamento atmosferico che rimane in vigore solo per gli impianti termici;
- D.P.C.M. 21/07/89. Integra e chiarisce il DPR 203/88, in particolare distingue tra impianti nuovi ed impianti esistenti;
- D.M. 12/07/90, fissa i valori limite di emissione, ma solo per gli impianti esistenti;
- D.P.R. 25/07/91. Definisce le attività che non necessitano di autorizzazione (emissioni poco significative) e le attività cui è applicabile una procedura semplificata di autorizzazione (attività a ridotto inquinamento atmosferico);
- D.M. 15/04/1994, emanato dal Ministero dell'Ambiente di concerto con il Ministero della Sanità. Fissa "norme tecniche in materia di livelli e stati di attenzione e di allarme per gli inquinanti atmosferici delle aree urbane (ai sensi degli articoli 3 e 4 del D.P.R. n. 203/88, e dell'art. 9 del D.M. 20 maggio 1991");
- D.P.C.M. 02/10/95. Disciplina le caratteristiche dei combustibili da usare negli impianti (abroga e sostituisce il capo III della legge 615/66 sull'impiego dei combustibili);
- D.Lgs. n. 351/1999. Definisce (nell'allegato I) gli inquinanti atmosferici da considerare nel quadro della valutazione e della gestione della qualità dell'aria ambiente. Attua la direttiva n. 96/62/CE in materia di valutazione e gestione della qualità dell'aria ambiente;
- D.Lgs. n. 372/1999. Attua la direttiva n. 96/62/CE in materia di prevenzione e riduzione integrale dell'inquinamento (IPPC) emanata dal consiglio dell'Unione Europea. Il fine è di evitare o ridurre al minimo le emissioni in aria, nell'acqua e nel terreno provenienti da impianti industriali, per raggiungere un elevato livello di tutela ambientale;
- D.M. 02/04/2002 n.60, emesso dal Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio di concerto con il Ministero della salute. Stabilisce i valori limite e le soglie di allarme per gli inquinanti biossido di zolfo, biossido di azoto, ossidi di azoto, materiale particolato, piombo, benzene e monossido di carbonio;

- D.Lgs. 21/05/2004 n.183, definisce valori bersaglio e obiettivi a lungo termine per l'ozono; attua la direttiva 2002/3/CE relativa all'ozono nell'aria.

2.2 Trattamenti di depurazione

I maggiori inquinanti dell'aria da fonti industriali sono riportati nella tabella sottostante, suddivisi in fonti a bassa temperatura e ad alta temperatura.

Tabella 2.1: Agenti inquinanti dell'aria

Fonti a bassa temperatura	Fonti ad alta temperatura
Materiale particolato	
<i>Polvere</i> <i>Alcali</i> <i>Metalli pesanti</i>	<i>Polvere</i> <i>Alcali</i> <i>Metalli pesanti</i>
VOC (sostanze organiche volatili) e composti organosilicati	Composti organici clorurati
Composti diversi da VOC	
Biossido di carbonio: CO ₂ Ossidi di azoto: NO _x Ossidi di zolfo: SO ₂ Ammoniaca: NH ₃ Alogeni e loro composti Composti da combustione incompleta H ₂ S	HCl HF Ossidi di zolfo: SO ₂ Ossidi di azoto: NO _x

La scelta delle tecnologie da utilizzare per la riduzione dell'inquinamento dell'aria dipende dalle caratteristiche chimiche e fisiche degli effluenti. Ad esempio, nel caso in cui gli inquinanti presenti nelle emissioni siano caratterizzati da un elevato potere calorifico può risultare opportuno l'impiego di un processo di *combustione*, con il recupero dell'energia prodotta, oppure, laddove sia possibile il recupero ed il riciclo, ci si orienterà verso l'*adsorbimento* o la *condensazione*.

La *predepurazione* è un processo spesso necessario in campo industriale e consiste in un trattamento preliminare dell'aria contaminata tramite l'abbattimento parziale degli inquinanti.

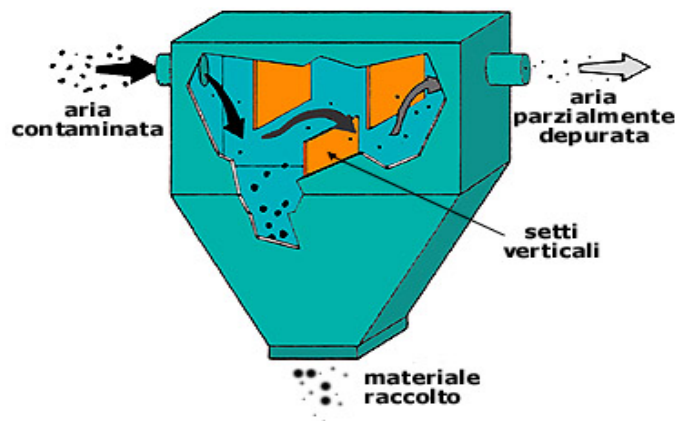
Lo scopo principale è quello di ridurre la concentrazione del materiale particolato.

I flussi pretrattati sono poi convogliati ad altri sistemi di abbattimento più costosi ed efficaci che vengono sempre posti a valle dei predepuratori.

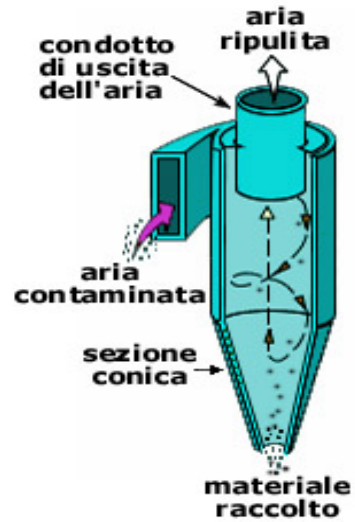
In genere la predepurazione viene utilizzata quando l'aria da trattare presenta una concentrazione di polveri estremamente alta o quando deve essere rimosso del materiale grossolano aerodisperso che potrebbe danneggiare i successivi dispositivi di depurazione più fragili.

I principali sistemi di predepurazione sono:

- *Camere a deposizione*: dispositivi che si sviluppano orizzontalmente, a rettangolare ed allungata, con l'apertura di entrata da una parte e l'uscita dalla parte opposta. La rimozione delle particelle inquinanti è ottenuta per effetto della forza di gravità, che prevale rispetto al trascinamento del flusso d'aria;



- *Cycloni e multicicloni*: sistemi di abbattimento di forma cilindrica che permettono di raccogliere le particelle aerodisperse sfruttando la loro forza di inerzia. In questi dispositivi il flusso contaminato viene fatto entrare dall'alto e tangenzialmente in modo da assumere un moto a spirale direzionato verso il basso. Per effetto della forza centrifuga, il particolato di dimensioni maggiori fuoriesce dal flusso e, per inerzia, va a contatto con le pareti interne del ciclone, scivola poi per gravità sul fondo del dispositivo dove viene raccolto in un'apposita tramoggia che viene periodicamente svuotata.



A valle della predepurazione, possono essere utilizzati altri dispositivi di abbattimento del materiale particolato, per aumentarne l'efficienza di rimozione delle particelle. Nella tabella seguente sono descritti alcuni di questi processi.

Tab.2.2 Trattamenti per abbattimento del particolato atmosferico

Trattamento	Descrizione	Vantaggi	Svantaggi
Filtri di nebbie (per aerosol e gocce)	Filtri con riempimento a maglie di materiale metallico o sintetico, che viene posizionato in fondo al letto filtrante.	Proprietà di autolavaggio quando è usato per rimuovere particelle liquide	<ul style="list-style-type: none"> – Il liquido di lavaggio del filtro risulta inquinato – Rischio di intasamento
Lavaggi ad umido	<p>Per particelle con $d > 1 \mu\text{m}$: il meccanismo di depurazione è dato dall'impatto dei contaminanti con le gocce del liquido o con le superfici bagnate della struttura.</p> <p>Per il particolato con $d < 1 \mu\text{m}$: la depurazione avviene per assorbimento nella sostanza liquida.</p>	<ul style="list-style-type: none"> – Tecnologia semplice e compatta – Alta efficienza di rimozione – Manutenzione semplice – Possono essere neutralizzati gas corrosivi e polveri 	<ul style="list-style-type: none"> – Le polveri, separate come fango, necessitano di un trattamento per il riuso o devono essere smaltite – Possibili corrosioni – Necessità di agenti condizionanti – Trattamento dell'acqua di lavaggio per il riuso
Precipitatori elettrostatici	Utilizzo di un campo elettrico ad alta tensione che carica positivamente o negativamente le particelle solide o liquide presenti nelle emissioni gassose.	<ul style="list-style-type: none"> – Alta efficienza di abbattimento – Si possono trattare flussi di notevole rilevanza – Recupero del particolato senza modificarlo 	Gli elettroliti mal si adattano a condizioni variabili
Filtri a maniche	Passaggio del gas attraverso maniche di tessuto molto resistente, avente determinate caratteristiche chimiche e fisiche. Le maniche di tessuto provvedono alla captazione del materiale.	<ul style="list-style-type: none"> – Alta efficienza per particelle fini – Separazione in secco del materiale che può essere riciclato per nuovo uso – Operazioni relativamente semplici 	<ul style="list-style-type: none"> – Rischio di esplosioni – Non sono permessi in entrata umidità o polveri appiccicose

Le *diossine* sono composti organici clorurati prodotti da inceneritori, impianti di combustione industriali e di riscaldamento, industrie metallurgiche, fornaci e camini, stabilimenti per il candeggio della carta, stabilimenti per la produzione di erbicidi e pesticidi.

Dopo essere state immesse nell'aria dagli scarichi industriali, le diossine finiscono inevitabilmente nella catena alimentare, accumulandosi nei tessuti adiposi. Il solo controllo dei parametri della combustione e post-combustione (tempo, temperatura, turbolenza) non è condizione sufficiente a garantire valori di emissione in accordo alle normative vigenti; occorre, pertanto, effettuare l'abbattimento attraverso il meccanismo di *chemiadsorbimento*, cioè il passaggio dalla fase vapore a quella condensata adsorbita su superfici solide.

Per l'abbattimento dei *VOC* nel caso in cui non sia possibile il recupero, occorre prima dare la precedenza a processi di depurazione a bassa energia, poi prevedere eventualmente tecniche di combustione.

Alcune tecniche che prevedono il recupero di materia sono descritte in tabella 2.3.

Tab.2.3: Trattamenti per il recupero dei VOC

Trattamento	Descrizione	Vantaggi	Svantaggi
Lavaggio ad umido	<p>Per particelle con $d > 1 \mu\text{m}$: il meccanismo di depurazione è dato dall'impatto dei contaminanti con le gocce del liquido o con le superfici bagnate della struttura.</p> <p>Per il particolato con $d < 1 \mu\text{m}$: la depurazione avviene per assorbimento nella sostanza liquida.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Tecnologia semplice e compatta - Alta efficienza di rimozione - Semplice manutenzione - Possono essere neutralizzati gas corrosivi e polveri 	<ul style="list-style-type: none"> - Le polveri, separate come fango, necessitano di trattamento per il riuso o devono essere smaltite - Possibili corrosioni - Necessari agenti condizionanti - Trattamento dell'acqua di lavaggio per il riuso
Condensazione	<p>Permette di rimuovere i vapori contaminati cambiandone lo stato fisico da vapore a liquido. Solitamente la condensazione può essere ottenuta con un aumento di pressione, con una riduzione di temperatura, o con la loro combinazione.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Alta efficienza di rimozione - Tecnologia compatta - Può essere condotto anche manualmente 	<ul style="list-style-type: none"> - Utilizzo limitato a processi che prevedono emissioni di vapori inquinanti con alte concentrazioni e basse portate - Periodiche manutenzioni ordinarie e di pulizia
Separazione a membrana	<p>Sfrutta la permeabilità selettiva dei vapori organici nell'attraversare la membrana. Il permeato può subire poi condensazione o adsorbimento, in caso di recupero.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Possibilità di recupero del materiale - Semplicità dell'operazione - Non vengono prodotti rifiuti 	<ul style="list-style-type: none"> - Rischio di esplosione - Sono necessari più passaggi
Adsorbimento	<p>L'aria da trattare viene fatta fluire attraverso un materiale poroso; il materiale, adsorbente, è in grado di trattenere gli inquinanti sulla sua superficie e permette così di ripulire il flusso di contaminanti volatili.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Alta efficienza di rimozione - Possibilità di rigenerazione del materiale adsorbente - tecnologia semplice e robusta 	<ul style="list-style-type: none"> - Limite superiore di concentrazione per pericolo di esplosione - Monitoraggio continuo della temperatura e della portata di flusso.

Per i composti diversi da VOC le tecniche di rimozione utilizzabili sono:

- incenerimento per CO e H₂S;
- riduzione catalitica per emissioni ad alta temperatura, riduzione non catalitica per NO_x a basse temperature;
- lavaggio ad umido per SO₂ (anche a secco per alta temperatura);
- lavaggio ad umido, trattamento biologico per NH₃;
- lavaggio ad umido a 2 stadi, oppure a secco o semisecco, per HCl e HF;
- lavaggio ad umido per Cl₂.