

I **forni a tamburo rotante** sono caratterizzati da elevata flessibilità e da una semplicità costruttiva abbastanza evidente: si tratta infatti di sistemi con camera cilindrica leggermente inclinata (in genere 1-3 per cento) rotante attorno al proprio asse.

Trovano impiego solitamente per lo smaltimento dei rifiuti industriali (solidi, liquidi, pastosi), anche pericolosi. I principali svantaggi di tale tecnologia sono:

necessità di una camera di post-combustione per il completamento del trattamento in fase gassosa a causa del ridotto volume del forno;

controllo della temperatura mediante eccesso di aria di combustione o acqua di raffreddamento, soprattutto in caso di rifiuti con elevato potere calorifico, in quanto il processo si svolge in condizioni adiabatiche;

capacità di trattamento ridotta, per cui risulta necessaria a volta la installazione di più unità in parallelo.

Per questi motivi, tale tecnologia difficilmente permette l'ottenimento di un adeguato recupero energetico e di conseguenza trova scarsa applicazione nel trattamento dei rifiuti urbani, come del resto evidenziato nell'analisi del quadro impiantistico nazionale.

Il **forno a letto fluido** è costituito da una camera di combustione dove è allocato un letto di materiale inerte (di solito sabbia) tenuto in sospensione da una corrente di aria che fluisce dal basso verso l'alto svolgendo anche il ruolo di comburente. L'aria viene insufflata attraverso una griglia al fondo del combustore. Tale sistema, sfruttando il movimento della sabbia, assicura un adeguato contatto rifiuto-aria ed una significativa uniformità di temperatura.

Nella seguente tabella si riportano i confronti qualitativi fra le diverse tipologie introdotte.

Tipologia di forno	Vantaggi	Svantaggi
A griglia mobile	- collaudata e affidabile - migliaia di applicazioni a livello mondiale - buoni livelli di recupero energetico - idonea per trattare rifiuti a diversa pezzatura - nessun pretrattamento	- di efficienza non elevatissima per rifiuti ad elevato PCI (>20MJ/kg) - non idonea per rifiuti pastosi, pulverulenti e melme - fattibilità economica in caso di impianti medio-grandi
A tamburo rotante	- idonea per il trattamento di rifiuti a qualsiasi stato fisico, anche in combinazione - scarsa sensibilità al variare delle caratteristiche chimico-fisiche del materiale - semplicità costruttiva e elevata affidabilità	- usura e problemi di tenuta delle parti in movimento - necessita di una camera di post-combustione - elevato eccesso di aria - rapido consumo del materiale refrattario - ridotta efficienza di recupero energetico

Tipologia di forno	Vantaggi	Svantaggi
A letto fluido	– elevata efficienza di combustione – basso contenuto di incombusti nelle scorie (0,2-0,3%) – unità più compatte – tempi di avviamento ridotti – possibilità di funzionamento in discontinuo – ridotto numero di parti in movimento – possibilità di operare a ridotti eccessi di aria – rimozione parziale di gas acidi in fase di combustione iniettando sorbenti alcalini	– rischio di defluidizzazione del letto – pretrattamento necessario – aumento dei punti di alimentazione o aumento della velocità di fluidizzazione a causa dello scarso mescolamento trasversale – difficoltà di alimentazione di combustibili leggeri (es. CDR fluff) – ridotte applicazioni industriali sui rifiuti urbani – maggiori carichi di polveri da trattare

Confronto qualitativo tra le principali tecnologie di incenerimento dei rifiuti (GTR, 2004).

4.3.2.2. Trattamento dei fumi.

L'impatto usualmente ritenuto più gravoso connesso alla combustione dei rifiuti è sicuramente l'emissione di polveri e inquinanti in atmosfera. Tali composti si suddividono in macro e microinquinanti.

Con il termine «**macroinquinanti**» si identificano quei contaminanti presenti in concentrazioni dell'ordine dei mg/Nm³ e sono in particolare:

- polveri
- ossidi di zolfo, in particolare l'anidride solforosa SO₂
- ossidi di azoto, ovvero gli NO_x
- monossido di carbonio CO
- acidi alogenidrici, in particolare l'acido cloridrico HCl e l'acido fluoridrico HF.

I «**microinquinanti**» invece si caratterizzano per concentrazioni dell'ordine dei mg/Nm³, sono inorganici ed organici e si identificano in:

- metalli pesanti (cadmio, cromo, mercurio, piombo, ecc.)
- PCDD (policloro-dibenzodiossine)
- PCDF (policloro-dibenzofurani)
- IPA (idrocarburi policiclici aromatici)
- COV (composti organici volatili).

Alcuni microinquinanti pur in concentrazioni dell'ordine dei ng/Nm³ sono molto pericolosi per l'uomo. In particolare, il termine «diossina» identifica 210 composti, ovvero 75 diossine e 135 furani, diversi tra di

loro dal punto di vista chimico e tossicologico, e caratterizzati da diversi atomi di cloro (da 1 a 8).

Con riferimento alle *polveri* (o particolato), esse possono esistere in fase solide o sotto forma di aerosol. Sono generate dalle sostanze organiche contenute nei rifiuti e trascinate dal flusso gassoso, da composti organometallici, da molecole incombuste del rifiuto. Sono costituite da inerti, ossidi metallici, metalli adsorbiti, IPA, ecc. Le particelle con dimensione superiore ai 10 µm sono visibili e provocano sporcamento delle superfici e corrosione; quelle con dimensioni inferiori, le cosiddette polveri sottili o respirabili, riescono ad attraversare le vie respiratorie e sono dannose, soprattutto quelle con diametro inferiore a 2,5 µm. Nella seguente Tabella si riportano in maniera sintetica le caratteristiche e le prestazioni dei sistemi di rimozione degli inquinanti.

Processo	Trattamento	Inquinanti	Note
Filtrazione/ Adsorbimento	– A secco – A semisecco	– Polveri, metalli pesanti adsorbiti, gas acidi – Polveri, metalli pesanti adsorbiti, gas acidi	– Prestazioni medio-buone in funzione del reagente impiegato – Buone prestazioni, consumi medi di reagente
Assorbimento	– Ad umido – Ad umido con additivi specifici	– Polveri, metalli pesanti, gas acidi, aerosols – Polveri, metalli pesanti, gas acidi, aerosols, diossine	– Alte prestazioni, ridotti consumi di reagenti – Come «ad umido», ma con rimozione anche di diossine
Adsorbimento	– Iniezione di carbone attivo	– Hg, diossine, altri micro-inquinanti organici	– Efficiente rimozione di diossine e mercurio
Ossidazione/ – Riduzione	– DeNO _x SNCR – DeNO _x SCR	– NO _x – NO _x , diossine	– Rimozione e distruzione di NO _x – Efficiente rimozione e distruzione di NO _x e diossine

Caratteristiche e prestazioni dei sistemi di rimozione degli inquinanti (GTR, 2004).

Nella seguente Tabella si riporta il confronto qualitativo tra le tecniche di rimozione di gas acidi.

Processo		Vantaggi	Svantaggi
SECCO	Calce	– Realizzazione impiantistica semplice – Basso costo di investimento – Assenza di effluenti liquidi – Manodopera ridotta – Facilità di inertizzazione dei residui	– Gestione poco flessibile – Alto eccesso stechiometrico – Bassa reattività per singolo passaggio – Necessità del ricircolo – Notevole produzione di scarti da smaltire in discarica
	– Bicarbonato di sodio	– Realizzazione e gestione impiantistica semplici – Costi di investimento e gestione ridotti – Manodopera ridotta – Assenza di effluenti liquidi – Recupero dei residui sodici – Ampio campo di temperature	– Apprezzabile consumo massiccio di reattivo – Costo elevato del reattivo – Residui solidi più solubili: senza valorizzazione, la stabilizzazione è più difficile
SEMI-SECCO		– Costi di investimento limitati – Assenza di effluenti liquidi	– Consumo di acqua – Produzione significativa di residui (< processi a secco) – Consumo significativo di reattivo (< processi a secco) – Possibilità di ricircolo – Gestione delicata soprattutto per la preparazione del reagente
UMIDO		– Basso consumo di reattivi – Bassa produzione di residui solidi e residui separati – Lisciviazione dei metalli pesanti – Flessibilità impiantistica – Flessibilità di funzionamento	– Trattamento reflui di scarico – Grande produzione di reflui – Costi di investimento elevati – Notevoli consumi di acqua ed elettricità – Manodopera supplementare

Confronto qualitativo tra le tecniche di rimozione di gas acidi (GTR, 2004).

I **metalli pesanti**, ovvero i microinquinanti inorganici, sono presenti nei fumi allo stato solido o di vapore. Durante il trattamento dei fumi essi condensano e si concentrano nelle polveri. Per tale motivo, la loro rimozione è strettamente connessa alla efficienza dei depolveratori. Attualmente possono raggiungersi rendimenti di abbattimento del 96-99 per cento: fa eccezione il mercurio, che, per la sua volatilità, è presente sotto forma di vapore. La rimozione del mercurio si attua in sistemi ad umido o in sistemi a secco o semisecco con iniezione di carboni attivi (nei sistemi a secco insieme alla calce). In tal modo si raggiungono efficienze del 97 per cento (GTR, 2004).

La emissione di **diossine**, invece, può essere controllata operando direttamente sui parametri di combustione e post-combustione, ma l'esperienza ha dimostrato che ciò non è sufficiente a limitarne i valori. Pertanto, il rispetto dei limiti normativi ($0,1 \text{ ng/Nm}^3 \text{ TE}$) è possibile solo ricorrendo al chemi-adsorbimento su carboni attivi (passaggio da vapore a fase condensata adsorbita sui carboni). Valori bassi della temperatura favoriscono il processo. Di solito i carboni attivi sono iniettati nei fumi a monte del filtro a maniche.

4.3.2.3. *Recupero energetico.*

Il recupero energetico consiste in un recupero di calore dal raffreddamento dei fumi della combustione necessario al loro trattamento successivo. Tale recupero può portare alla produzione di energia elettrica e/o termica, ottenuta impiegando il vapore generato in una caldaia che funziona da scambiatore di calore tra acqua e fumi.

La preferenza verso un tipo di energia da recuperare (elettrica, termica o entrambe in caso di cogenerazione) dipende da numerosi fattori. In particolare, la produzione di energia termica da vendere a terzi per usi civili (teleriscaldamento/refrigerazione, produzione di acqua sanitaria) o industriali (vapore o acqua calda di processo) consente di ridurre le perdite di recupero legate sostanzialmente alla natura aggressiva dei fumi, fenomeno questo che invece è più evidente nel recupero di energia elettrica. Per contro, la richiesta di energia termica è fortemente variabile nel tempo e soggetta a variazioni stagionali, mentre la produzione di energia elettrica è indipendente dalla richiesta delle utenze e può consentire l'accesso ad eventuali incentivi previsti per l'impiego di fonti rinnovabili. Ma mentre i rendimenti di conversione, in caso di recupero di energia termica, sono confrontabili con quelli delle apparecchiature industriali a combustibile fossile tradizionale, nel caso del recupero di energia elettrica gli inceneritori sono ancora lontani dai livelli propri delle classiche centrali termoelettriche. Allo stato attuale gli impianti medio-grandi che producono solo energia elettrica hanno un rendimento del 25-30 per cento al lordo dei consumi interni, mentre di cogenerazione arrivano ad efficienze dell'80-90 per cento del PCI del rifiuto trattato (GTR, 2004).

4.3.3. Trattamenti termici alternativi.

4.3.3.1. Gassificazione

Il processo di gassificazione consiste in una parziale ossidazione del rifiuto in presenza di un ossidante (aria, aria arricchita con ossigeno, ossigeno puro) caratterizzato da un quantitativo di ossigeno minore di quello stechiometrico. Tale ossidazione comporta la produzione di un gas contenente ancora sostanze non del tutto ossidate, utilizzabili quindi in una ossidazione successiva ai fini di un recupero energetico (Belgiorno et al., 2003).

I prodotti della gassificazione sono:

- un gas derivato o «syngas», che è il prodotto principale, il quale può contenere frazioni che condensano a temperatura ambiente e costituiscono il «tar»;
- un residuo solido costituito dagli inerti e da una frazione carboniosa non trasformata («char»).

Con riferimento al char, il decreto legislativo n. 133/2005 (articolo 8, comma 2) prevede che i residui non possano contenere un tenore di incombusti maggiore del 3 per cento in peso, misurato come carbonio organico totale (TOC), o una perdita di ignizione maggiore del 5 per cento in peso sul secco.

4.3.3.2. Pirolisi.

La pirolisi è un processo di natura termochimica consistente nella degradazione termica della sostanza organica in totale assenza di ossigeno. Il processo è endotermico per cui necessita di apporto di calore dall'esterno, solitamente fornito dalla combustione di parte dei prodotti della pirolisi, soprattutto quelli gassosi.

Il processo di pirolisi si sviluppa solitamente intorno a temperature dell'ordine dei 400-800°C. In tali condizioni si verifica la rottura delle molecole complesse e la formazione di composti leggeri, con produzione di un gas di pirolisi o *syngas*, di un residuo solido carbonioso ancora combustibile o *char* e di una frazione liquida a temperatura ambiente (olio pirolitico o *tar*).

Oltre che dalla temperatura, la natura e la quantità dei prodotti dipendono dalle condizioni operative, soprattutto dal tempo di permanenza del solido a trattamento.

La Tabella seguente sintetizza vantaggi e svantaggi della pirolisi. In Europa risulta attivo ad Arras, in Francia, un solo impianto di pirolisi dei rifiuti urbani a scala industriale, in funzione dal 2004 con una potenzialità di 50000 t/a.

Attualmente in alcune zone d'Italia è allo studio la possibilità di utilizzare impianti di questo tipo; essi, tuttavia, vengono chiamati impropriamente, impianti di «dissociazione molecolare».

Vantaggi	Svantaggi
– Quantità di fumi ridotti rispetto all'incenerimento – Maggiore resa di produzione di energia elettrica, mediante l'uso di motori a gas – Recupero di materia - Metalli nel char	– Energeticamente ed economicamente svantaggioso in caso di materiale umido e alta presenza di sostanze non combustibili – Char con carbonio organico totale > 3% – Triturazione del materiale in ingresso – Metalli pesanti nel char – Trattamento spinto dei fumi per abbattimento metalli in caso di combustione del char

Vantaggi e svantaggi della pirolisi.

4.3.3.3. Altre tecnologie.

La quantità di fumi prodotta dalla combustione è legata alla presenza di azoto nell'aria comburente, in percentuale molto elevata (circa 80 per cento in volume), il che comporta non solo un sovradimensionamento degli impianti di abbattimento delle emissioni gassose ma anche una riduzione in generale di recupero energetico.

All'uopo sono state messe appunto alcune tecnologie che si basano sull'utilizzo nell'incenerimento di aria arricchita con ossigeno oppure ossigeno puro. Si tratta dei processi SYNCOM/SYNCOM-PLUS e del processo DISMO.

Il processo **SYNCOM** (SYNthetic COMbustion) non è altro che un processo di combustione su griglia in presenza di aria arricchita di ossigeno, con una conseguente riduzione di portata dei fumi pari al 35 per cento e quindi di dimensioni e costi delle unità di trattamento delle emissioni gassose.

Variante al processo SYNCOM è l'opzione tecnologica SYNCOM-PLUS che consente di trattare le scorie e le ceneri leggere (per un massimo di 75 per cento del totale) direttamente in camera di combustione così da generare uno scarto sinterizzato a scarsa lisciviabilità.

La Tabella seguente mostra le caratteristiche dei due processi.

Processo	SYNCOM	SYNCOM-PLUS
Dati caratteristici	– Aria arricchita con ossigeno – Ricircolo ei fumi – Controllo della combustione con camera IR	<i>(addizionali):</i> – Trattamento scorie combustione – Ricircolo scorie non sinterizzate – Ricircolo di parte delle ceneri leggere

Processo	SYNCOM	SYNCOM-PLUS
Prestazioni (rispetto a griglia tradizionale)	– Portata fumi ridotta del 35% – Temperatura del letto superiore – Minori quantità di ceneri leggere	<i>(addizionali):</i> – Residui sinterizzati senza ulteriori trattamenti – Perdita di ignizione < 0,1% – Bassa lisciviabilità dei metalli – Ridotte quantità di ceneri (< 7 kg/t di rifiuto)
Stato di sviluppo	– Tre impianti pilota operativi – Impianto industriale in realizzazione	– Singoli componenti collaudati industrialmente – Un impianto semi-industriale operativo (Yokohama) – Un impianto semi-industriale in costruzione (Clausthal)

Caratteristiche dei processi SYNCOM e SYNCOM-PLUS.

Il processo **DISMO** (DISsociazione MOlecolare) consiste in una combustione con aria arricchita di ossigeno, anche fino a 100 per cento di ossigeno stesso, in condizioni di pressione variabile tra 2 e 10 bar.

In questo modo è possibile ottenere:

- elevate temperature (2000-2200°C);
- ridotte quantità di fumi (per l'assenza di azoto) con relativa semplificazione delle unità di trattamento degli stessi e maggiore recupero energetico;
- una migliore combustione anche in caso di rifiuto a basso PCI.

I fumi prodotti subiscono poi una espansione semi-adiabatica in una seconda camera, con separazione degli inerti e dei metalli dai rifiuti.

Altri vantaggi connessi al DISMO sono:

- sicurezza e controllo delle reazioni interne;
- ridotte dimensioni e facilità di manutenzione;
- bassi costi d'investimento (4 milioni di euro contro i 180 di un sistema convenzionale);
- bassi costi di gestione (13 cents al kg di rifiuti contro i 50-55);
- produzione di ceneri pari al 3 per cento del rifiuto trattato (a differenza del 20-25 per cento dei combustori tradizionali).

Per contro, si deve evidenziare come il ricorso all'ossigeno puro comporti uno svantaggio dal punto di vista energetico ed economico nonché di sicurezza impiantistica. Si tratta comunque di un processo che ben si adatta alla combustione di rifiuti industriali (pericolosi e non) contenenti sostanza organica.

La prima apparecchiatura fu acquistata dalla Seabo (Hera) nel 2002 e attivato accanto al vecchio inceneritore del Frullo nel bolognese; attualmente il primo impianto a livello industriale è stato utilizzato per trattare ceneri pesanti da inceneritore (riduzione volumetrica fino all'80 per cento), plastiche, carta e pellicole, pitture sintetiche e vernici, adesivi e sigillanti, oli con Pcb, pesticidi, solventi, farmaci scaduti.

La **distruzione al plasma** può essere considerata un processo di pirolisi o di piro-gassificazione (qualora sia presente l'ossigeno) in cui una torcia al plasma fornisce l'energia termica necessaria generando correnti gassose a temperature elevatissime (fino a 10000°C).

Il plasma è un gas ad altissima temperatura fortemente ionizzato prodotto applicando ad un gas una scarica elettrica per mezzo di un arco elettrico. Esistono due tipologie di reattori: ad arco non trasferito e ad arco trasferito. Nel primo caso i due elettrodi all'interno della torcia non partecipano al processo ma hanno la sola funzione di generare il plasma; nel secondo caso uno degli elettrodi fa parte della sostanza da trattare. Una volta creato il plasma fortemente ionizzato e dopo che le molecole o gli atomi del gas abbandonano l'eccitazione per portarsi ad un livello energetico inferiore, viene emessa energia radiante che a sua volta è assorbita dal materiale in trattamento. Questa energia comporta un aumento della temperatura e di fatto provoca l'attivazione di fenomeni di pirolisi e gassificazione, e quindi di distruzione dei rifiuti.

4.4. IL COMPOSTAGGIO DI RIFIUTI.

4.4.1. *Frazioni trattabili per via biologica.*

In generale i materiali che possono essere sottoposti a trattamenti biologici sono: rifiuti di provenienza alimentare collettiva, domestica e mercatale (da raccolte «secco-umido» in ambito urbano); rifiuti vegetali provenienti da attività di manutenzione del verde pubblico e privato e scarti lignocellulosici naturali (trucioli e segature non contaminati, cassette e bancali non trattati); materiale cartaceo.

A queste frazioni possono poi essere assimilate per omogeneità dei flussi e costanza delle caratteristiche chimiche e merceologiche, anche le seguenti categorie di rifiuti agricoli e speciali: fanghi di depurazione civile; altre biomasse agricole ed agroindustriali (paglie, lolla, graspi e vinacce, fanghi agroindustriali, ecc.).

Per quanto riguarda invece i residui organici presenti nei rifiuti indifferenziati da destinare a smaltimento finale si possono individuare i seguenti materiali da trattare biologicamente: rifiuti indifferenziati tal quali; frazione organica ottenuta per separazione meccanica da un flusso di rifiuti indifferenziati.

4.4.2. Trattamenti biologici.

Con la definizione di «trattamenti biologici», si intende il complesso delle operazioni, processi ed attività a carico di materiali biodegradabili di varia natura, che sfruttando le potenzialità degradative e di trasformazione da parte di sistemi biologici (essenzialmente legati all'attività di microrganismi decompositori), consentono una mineralizzazione delle componenti organiche maggiormente degradabili (processo definito anche come «stabilizzazione» della sostanza organica) e l'igienizzazione per pastorizzazione della massa di rifiuti.

Scopo dei trattamenti biologici è quindi:

raggiungere la stabilizzazione della sostanza organica (ossia la perdita di fermentescibilità) mediante la mineralizzazione delle componenti organiche più aggredibili, con produzione finale di acqua ed anidride carbonica e loro allontanamento dal sistema biochimico; tale processo è inteso a garantire la compatibilità tra i prodotti finali e le ipotesi di impiego agronomico o la loro collocazione in ambito confinato (discarica); un prodotto organico «stabile», infatti nel suolo agricolo non produce più metaboliti (intermedi di degradazione) ad effetto fitotossico, né consuma ossigeno (necessario per la trasformazione delle componenti organiche «fresche»), sottraendolo alle piante ed alla microflora del terreno; in discarica, il materiale organico stabilizzato non comporta massicci processi di degradazione anaerobica a carico delle componenti organiche facilmente degradabili di cui la sostanza organica «fresca» è invece ricca (con conseguente produzione di biogas e percolato ad elevata aggressività).

conseguire la igienizzazione della massa; ciò consente di debellare i fitopatogeni presenti nei residui vegetali, impedendo che il *compost* ne diventi vettore, nonché i patogeni umani veicolati presenti nei materiali di scarto (es.: fanghi civili);

ridurre il volume e la massa dei materiali trattati al fine di renderne più agevole ed economico il trasporto e, nel caso di materiale da destinare a smaltimento in discarica, di ridurre il volume occupato rispetto ai rifiuti non trattati.

Il trattamento biologico delle frazioni organiche di rifiuto può essere realizzato con differenti tecnologie e processi, riconducibili a tre tipologie, che è opportuno mantenere terminologicamente distinte:

compostaggio di qualità, a carico di biomasse di buona qualità selezionate alla fonte, indirizzato alla produzione di materiali valorizzabili nelle attività agronomiche e commerciabili in coerenza con il disposto del decreto legislativo 29 aprile 2006, n. 217, in materia di fertilizzanti

trattamento biologico di biostabilizzazione o bioessiccazione, a carico di matrici organiche di qualità inferiore (quali frazioni organiche da separazione meccanica del rifiuto indifferenziato, fanghi biologici con pre-

senza relativamente elevata di metalli pesanti, ecc.); l'obiettivo può essere variamente inteso come:

- *stabilizzazione pre-discardica*, intesa come «trattamento» in coerenza con la Direttiva 99/31/CE sulle discariche e con l'art. 5 comma 6 del decreto legislativo n. 22 del 1997;

- *produzione di materiali stabilizzati* (spesso definiti come «Frazioni Organiche Stabilizzate» o «compost da rifiuti» o «compost grigio») per applicazioni controllate in attività paesistico-ambientali;

- *bioessiccazione*, ossia asportazione relativamente veloce (nell'arco di 15-20 giorni) di gran parte dell'umidità originariamente presente, in modo da aumentare il potere calorifico della massa in previsione di utilizzi energetici; l'obiettivo viene perseguito mediante lo sfruttamento delle capacità di asportazione di umidità da parte delle arie di processo insufflate nella massa, e si avvale comunque del concorso dei processi di degradazione parziale della sostanza organica, grazie all'aumento delle capacità evaporative del sistema per il calore biogeno generato appunto da tali processi di degradazione;

- *digestione anaerobica* in cui la fase di degradazione intensiva viene gestita in ambiente anossico allo scopo di conservare l'energia biochimica della sostanza organica sotto forma di biogas; la digestione anaerobica può avvenire a carico di matrici organiche di elevata qualità selezionate alla fonte (e dunque essere inserita in una filiera di valorizzazione agronomica) o di materiali di qualità inferiore (da selezione meccanica o con contaminazioni relativamente elevate in metalli pesanti); in quest'ultimo caso il digestato (ossia il materiale palabile residuo dalla fase di digestione) può essere poi indirizzato alla stabilizzazione pre-discardica, alla bioessiccazione od alla produzione di materiali per applicazioni controllate paesistico-ambientali. Per il pieno conseguimento di tali obiettivi la digestione anaerobica richiede generalmente l'integrazione con una fase di finissaggio aerobico (ossia una sezione di post-compostaggio del digestato, che altrimenti va gestito come un fango ai sensi e per gli effetti di quanto previsto dal decreto legislativo n. 99 del 1992 sulla applicazione dei fanghi in agricoltura).

4.4.3. Generalità sul compostaggio di qualità.

Il compostaggio di qualità può interessare come matrici in ingresso sia i soli scarti lignocellulosici raccolti in purezza, sia gli scarti organici da raccolta differenziata secco-umido (scarti alimentari da utenze domestiche, commerciali, di servizio) in miscela con gli scarti lignocellulosici (materiale strutturante o di «bulking») ed eventualmente anche con fanghi che abbiano adeguate caratteristiche qualitative ed altre matrici compostabili ad elevata fermentescibilità, umidità e basso grado di strutturazione (es. scarti agroindustriali, liquami zootecnici, ecc.).

A seconda della tipologia delle matrici trattate devono essere predisposti adeguati sistemi tecnologici di processo e di presidio; il compostaggio di soli scarti lignocellulosici, quali le risulti da manutenzione del

verde, può avvalersi delle condizioni favorevoli di aerazione naturale per processi diffusivi e convettivi nella massa, favoriti dalla buona porosità della stessa, mentre il basso potenziale odorigeno di tali materiali facilita la prevenzione di fenomeni odorosi mediante alcuni accorgimenti gestionali relativamente semplici.

Invece, la fermentescibilità tipica di scarti quali le matrici alimentari richiede di considerare la disposizione di adeguati sistemi di governo del processo mediante l'adduzione di flussi d'aria alla massa (per drenare il calore in eccesso ed apportare ossigeno) e generalmente - a meno di localizzazioni favorevoli e basse capacità operative - l'allestimento di tecnologie di presidio ambientale per il controllo e l'abbattimento degli odori.

Come già sottolineato, l'obiettivo ultimo del compostaggio di qualità è la produzione di materiali stabilizzati ed igienizzati, con basso contenuto di sostanze potenzialmente inquinanti, manipolabili, commerciabili ed utilizzabili in agricoltura in coerenza con il disposto del decreto legislativo n. 217 del 2006 il tutto garantendo al contempo la minimizzazione dei disturbi ambientali indotti, con particolare riferimento all'abbattimento delle potenziali molestie olfattive.

4.4.4. *Descrizione del processo di compostaggio.*

Il processo di compostaggio può essere descritto e suddiviso in due fasi:

fase attiva (anche definita di «biossidazione accelerata» o «ACT», per *active composting time*), in cui sono più intensi e rapidi i processi degradativi a carico delle componenti organiche maggiormente fermentescibili: in questa fase, che si svolge tipicamente in condizioni termofile, si raggiungono elevate temperature, si palesa la necessità di drenaggio dell'eccesso di calore dal sistema e si ha una elevata richiesta di ossigeno necessario alle reazioni biochimiche;

fase di maturazione (o di *curing*), in cui si completano i fenomeni degradativi a carico delle molecole meno reattive ed in cui intervengono reazioni di trasformazione e polimerizzazione a carico delle stesse (con particolare riferimento alla lignina) che portano alla «sintesi» delle sostanze humiche. Sia le esigenze di drenaggio di calore che quelle di adduzione di ossigeno al sistema sono minori rispetto alla fase attiva.

I fattori principali di controllo del processo, che garantiscono le ottimali condizioni di sviluppo della microflora e che consentono di accelerare le reazioni di decomposizione-trasformazione, sono rappresentati da:

concentrazione di ossigeno (e rapporto ossigeno/anidride carbonica); la permanenza della concentrazione di ossigeno a livelli superiori al 15 per cento garantisce il perdurare delle condizioni di perfetta aerobiosi indispensabile per la accelerazione del metabolismo batterico aerobio; ciò a sua volta consente di ridurre od annullare i fenomeni putrefattivi (causa primaria di genesi di odori molesti); il flusso di aria deputato alla adduzione di ossigeno all'interno della massa di rifiuti in compostaggio,

garantisce contestualmente l'asportazione del calore in eccesso e (se necessario) l'allontanamento dell'eccesso di umidità sotto forma di vapore acqueo.

temperatura; la temperatura si innalza come conseguenza del calore biogeno sviluppato dai processi degradativi; il suo accumulo nella massa dipende dall'equilibrio tra

sviluppo/dispersione di calore (legato alla fermentescibilità degli scarti alla quantità di materiale trattato, nonché alla sua umidità, dal momento che l'evaporazione di acqua assorbe calore sia per l'innalzamento della temperatura dell'acqua stessa che per il suo passaggio allo stato di vapore; nella fase attiva, con biomasse non eccessivamente umide e cumuli di dimensioni adeguate, la temperatura può anche superare agevolmente i 70°C, garantendo in tal modo le condizioni per la igienizzazione del materiale (3 giorni a 55°C per la legislazione italiana); le condizioni termometriche ottimali per i processi di stabilizzazione sono invece quelle tendenzialmente mesofile (attorno a 40-45°C); per tale motivo è opportuno adottare sistemi di rimozione del calore in eccesso, utilizzando efficacemente i flussi d'aria naturali (per diffusione e convezione) od indotti (sistemi di aerazione forzata della biomassa); in molti sistemi di processo la temperatura viene in realtà mantenuta attorno ai 50°C, per ricercare un compromesso tra le esigenze di asportazione del calore in eccesso (che richiederebbero flussi d'aria anche superiori), quelle di risparmio energetico e quelle di prevenzione dei disseccamenti precoci (che richiedono invece un abbassamento delle dimensioni dei flussi d'aria).

umidità: è indispensabile per lo sviluppo microbico che risente fortemente sia di eccessi di umidità (con rischio di occupazione totale della porosità della biomassa da parte dell'acqua, e dunque di anaerobiosi del sistema) che di mancanza (che comporta la stasi dei processi degradativi). I valori ottimali della umidità della massa tendono a decrescere con il procedere dei processi di stabilizzazione e conseguentemente con il decremento delle attività biologiche a carico della massa in trasformazione. Il materiale iniziale deve invece presentare una umidità relativamente elevata per esaltare le funzioni di termoregolazione collegate alla evaporazione della stessa e evitare al contempo disseccamenti precoci.

nutrienti; sotto tale profilo è importante il ruolo giocato dal rapporto C/N, che esprime il rapporto tra le sostanze che forniscono ai microrganismi energia per le loro reazioni metaboliche (composti carboniosi) e materiali plastici per la loro moltiplicazione (composti azotati); il C/N ideale è compreso tra 25 e 30 unità, tenendo presente che ogni scostamento medio da questi valori porta a carenze o eccessi che condizionano fortemente le attività biologiche, determinando una massiccia perdita di azoto (nel caso di valori bassi di C/N) o un rallentamento delle reazioni metaboliche, nel caso di valori alti di C/N

In realtà gli impianti nascono ed operano per garantire il trattamento delle diverse biomasse generate sul territorio e di cui viene programmata la selezione e l'avvio a compostaggio. Il controllo su questo parametro

non rientra dunque in genere nella consuetudine operativa, pur aiutando l'interpretazione di certi fenomeni (es. difficoltà di avvio della fase termofila per alto C/N) laddove questi si presentino.

L'evoluzione della sostanza organica durante il compostaggio procede sia quantitativamente, con una evidente riduzione volumetrica e ponderale, che qualitativamente, con una modificazione anche consistente delle caratteristiche chimiche della sostanza organica contenuta nel *compost* rispetto a quella originaria delle biomasse ad inizio trattamento. Dal punto di vista qualitativo la sostanza organica, una volta terminato il processo di compostaggio, si presenta:

stabile, cioè con processi degradativi di natura biologica alquanto rallentati; la misura della stabilità di una biomassa si può concretizzare attraverso la determinazione analitica di

- contenuto residuo in sostanza organica (od in solidi volatili);
- indici di respirazione statico o dinamico (legati alla attività metabolica residua)
- concentrazione di ammoniaca (legata alla persistenza di attività di degradazione e proteolisi in misura superiore a quelle di nitrificazione dell'ammoniaca);

matura, cioè non presenta fenomeni di fitotossicità, misurabili con l'omonimo test;

umificata, cioè dotata opportunamente di molecole umiche (humus) originatesi da reazioni di umificazione a carico delle componenti della sostanza organica più recalcitranti alla mineralizzazione.

4.5. IMPIANTI DI TRATTAMENTO MECCANICO BIOLOGICO DI RIFIUTI.

In generale il trattamento meccanico biologico (MBT, per *Mechanical Biological Treatment*) consta di due fasi distinte. La prima è il trattamento meccanico, nel quale il rifiuto viene vagliato per separare le diverse frazioni merceologiche e/o condizionato per raggiungere gli obiettivi di processo, e la seconda è il trattamento biologico, che ha l'obiettivo di stabilizzare (mineralizzare) le componenti organiche maggiormente degradabili e inoltre di igienizzare e pastorizzare il prodotto. Complessivamente quindi i trattamenti biologici hanno lo scopo di:

stabilizzare la frazione organica, mineralizzandola e facendole perdere fermentescibilità, con il risultato finale di trasformare la parte fermentescibile in anidride carbonica e acqua, da allontanare dal processo;

igienizzare la massa di rifiuto, debellando i batteri fitopatogeni presenti nei residui vegetali e i patogeni umani eventualmente presenti in materiali di scarto come i fanghi da reflui civili;

ridurre in massa e volume i materiali trattati.

Attualmente in Italia e in Europa si possono identificare due tipologie di trattamento MBT, e cioè quella che tratta una frazione organica deri-

vante da una separazione meccanica del rifiuto originale (solitamente tale frazione organica viene «individuata» come quella avente granulometria inferiore a 50–90 mm, mentre la frazione avente granulometria maggiore viene individuata come «frazione secca» e viene destinata alla valorizzazione energetica o al conferimento in discarica), e il trattamento a flusso unico, in cui tutto il rifiuto viene sottoposto alla stabilizzazione biologica e il trattamento meccanico si limita ad una semplice frantumazione.

4.5.1. *Biostabilizzazione.*

La biostabilizzazione è attualmente il più diffuso tra i processi MBT, soprattutto in Germania. Tale processo consiste nell'ossidazione biologica della sostanza organica putrescibile contenuta nel rifiuto, con l'obiettivo di arrivare ad un prodotto «inerte». Il processo può essere condotto sia in configurazione «a flusso unico», senza cioè una preventiva separazione delle varie frazioni trattate, sia in una configurazione con separazione meccanica. In questa seconda configurazione (che è quella più spesso utilizzata) le fasi del processo sono:

- a) pretrattamento meccanico di separazione della frazione secca da quella umida, che concentra in sé la frazione organica;
- b) stabilizzazione della frazione umida mediante processi ossidativi condotti da microrganismi (con periodico rivoltamento dei cumuli di materiale trattato, aerazione e bagnatura della massa allo scopo di ottenere un prodotto quanto più è possibile stabile;
- c) eventuale post-trattamento meccanico per la raffinazione del materiale da destinare ad attività di ripristino ambientale e alla copertura di discariche.

4.5.2. *Bioessiccazione (Mechanical-Biological and Stabilate Method).*

Tale processo mira a ridurre l'umidità del rifiuto mediante una fase di bioossidazione della frazione organica con l'obiettivo di ridurre la fermentescibilità del rifiuto in vista di una sua maggiore stoccabilità (in pratica si cerca di igienizzare il rifiuto e di controllare le emissioni maleodoranti) e di un suo utilizzo in processi di termovalorizzazione. Rispetto al processo delineato nella sezione precedente in questo caso si cerca di tenere alto il contenuto di carbonio del rifiuto, proprio in vista della valorizzazione energetica.

Il processo viene condotto sottoponendo il rifiuto ad una blanda triturazione allo scopo di aumentare la superficie di contatto solido-gas e quindi di favorire l'evaporazione dell'acqua, e quindi sottoponendo la massa macinata ad un'aerazione forzata, in modo da favorire le reazioni di ossidazione biologica, le quali peraltro, essendo esotermiche, accelerano l'evaporazione dell'acqua.

Il prodotto finale solitamente ha un'umidità del 7 per cento-15 per cento, e quindi sufficientemente bassa per consentire lo stoccaggio per periodi relativamente lunghi, in attesa dell'avvio alla termovalorizzazione.

4.5.3. *Digestione anaerobica.*

Con il termine *digestione anaerobica* si intende un processo biologico di stabilizzazione di un substrato organico putrescibile, che porta alla riduzione del suo contenuto di carbonio (e di azoto) condotto in uno o più reattori chiusi in assenza di ossigeno, in cui avvengono processi di *idrolisi*, *metanogenesi* e *acidogenesi*. Lo scopo del processo è quello di ottenere una stabilizzazione del rifiuto intesa come riduzione della sua frazione volatile, e inoltre quello di ottenere un recupero energetico dalla combustione del biogas prodotto, ricco in metano.

I processi di digestione anaerobica sono piuttosto complessi, e coinvolgono diverse fasi elementari. Essi possono essere classificati rispetto alla temperatura alla quale vengono condotti (si parla di processi *mesofili* quando la temperatura è intorno ai 35°C, di processi *termofili* quando la temperatura è superiore a 55°C e raramente di processi *psicrofili*, quando la temperatura è intorno ai 20°C), rispetto al contenuto di solidi nel reattore di digestione (si parla di processi *a umido* quando il solido nel reattore ammonta al 5 per cento-10 per cento della massa totale ivi contenuta, di processi *a semi secco* quando il solido contenuto nel reattore ammonta al 10 per cento – 20 per cento e processi *a secco* quando il solido è superiore al 20 per cento), e infine rispetto alla tipologia di reattori (si parla di processi *a fase unica* quando l'intera catena microbica che provvede alla digestione è mantenuta in un unico reattore, e di processi *a fasi separate* quando invece le fasi di *idrolisi* e *metanogenesi* sono separate da quella di *acidogenesi*).

4.5.3.1. *Digestione anaerobica – processo wet.*

Questo processo è stato il primo ad essere utilizzato nel trattamento della frazione organica dei rifiuti urbani. Esso prevede che il rifiuto di partenza venga opportunamente trattato e diluito al fine di raggiungere un tenore in solidi totali inferiore al 10 per cento, attraverso il ricorso a diluizione con acqua così da poter poi utilizzare un reattore completamente miscelato del tipo applicato nella stabilizzazione dei fanghi biologici negli impianti di depurazione. In generale, il processo prevede, dopo la fase di pre-trattamento del rifiuto, finalizzata alla rimozione di plastiche ed inerti e di corpi grossolani che potrebbero danneggiare gli organi meccanici del reattore, uno stadio di miscelazione in cui si ottiene una miscela con caratteristiche omogenee e un opportuno contenuto in solidi. La diluizione può avvenire tramite aggiunta di acqua di rete o dal parziale ricircolo dell'effluente del reattore.

4.5.3.2. *Digestione anaerobica – processo semi-dry.*

Nella digestione semi-dry il contenuto di sostanza solida che caratterizza il rifiuto trattato si pone nell'intervallo intermedio rispetto ai processi *wet* e *dry*; opera, infatti, con rifiuti con un contenuto in solidi del 10-20