REGIONE LIGURIA

PIANO REGIONALE DI GESTIONE DEI RIFIUTI E DELLE BONIFICHE

ALLEGATO 1

TECNOLOGIE UTILIZZATE PER IL TRATTAMENTO DEI RIFIUTI

Il responsabile del procedimento
Andrea Baroni

Indice

Introduzione **271**

Trattamenti meccanici **272**

Il trattamento di flussi di rifiuti da raccolta monomateriale 273
I trattamenti per il recupero di carta e cartone 273
I trattamenti per il recupero della plastica 273
I trattamenti per il recupero del vetro 274
Il trattamento di flussi di rifiuti da raccolta differenziata costituita da multimateriale 275

Trattamenti meccanico-biologici **276**

Produzione combustibile da rifiuti 280

Trattamenti Biologici **283**

La digestione anaerobica 283

Trattamenti aerobici (compostaggio, biostabilizzazione aerobica) 287
Compostaggio 287
Biostabilizzazione aerobica 289

Trattamenti di tipo termochimico **291**

Combustione 292

Pirolisi 294

Gassificazione 295

Il recupero energetico 298

Introduzione

Per gestione dei rifiuti s'intende l'insieme delle attività inerenti l'intero ciclo dei rifiuti, dalla loro produzione fino al loro destino finale (raccolta, trasporto, recupero, smaltimento).

Ad oggi esistono numerosi processi di trattamento dei rifiuti urbani indifferenziati e/o residuali (RUR) che in modo integrato consentono di chiudere il ciclo dei rifiuti urbani e permettono di ottenere il loro completo recupero o valorizzazione energetica in modo che, così come previsto dalle normative, si possa ridurre al minimo la quantità di rifiuti da destinare alla discarica di supporto per la chiusura del ciclo dei rifiuti.

Vengono di seguito esaminati i principi, le finalità e i campi di applicazione dei vari trattamenti applicabili ai RU, raggruppabili come:

- meccanici;
- meccanico-biologici;
- biologici;
- termochimici/termofisici.

Ovviamente ogni processo di trattamento va considerato come un vero impianto industriale per cui molta attenzione dovrà essere posta nella scelta dell'impianto, sia per ottimizzare il rendimento e sia per salvaguardare l'ambiente rispetto alle varie emissioni che vengono generate dallo specifico processo. Ne segue che assumeranno estrema importanza lo studio e le concessioni autorizzative previste per legge ed in particolare la definizione delle prescrizioni e i monitoraggi ambientali che dovranno essere dettagliatamente previste nelle specifiche autorizzazioni.

Trattamenti meccanici

Questa categoria include trattamenti che possono essere applicati sia ai rifiuti urbani provenienti da raccolta differenziata, sia ai RUR.

Nel primo caso lo scopo è di selezionare frazioni merceologiche valorizzabili (carta, plastica rigida e flessibile, legno, vetro, metalli ferrosi e non ecc.) in modo da renderle idonee per la successiva fase di riciclo.

Nel secondo caso invece l'obiettivo è quello di separare la frazione secca da quella umida in modo da favorire i successivi processi di stabilizzazione biologica e al contempo il recupero di materiali valorizzabili. I trattamenti meccanici includono anche le operazioni di confezionamento dei prodotti ottenuti ai fini del loro conferimento finale. Le principali finalità dei trattamenti meccanici includono dunque:

• la rimozione di frazioni indesiderate;

• la separazione di flussi di materiali ai fini della loro valorizzazione;

• la raffinazione dei prodotti ottenuti;

• la riduzione del tenore di umidità;

• il conferimento della forma finale ai materiali destinati al recupero.

Le tecniche adottate per conseguire tali obiettivi prevedono:

• la riduzione dimensionale;

• la vagliatura (di tipo dimensionale, gravimetrico o densimetrico);

• la separazione sulla base delle diverse proprietà elettrostatiche o ottiche dei materiali;

• la cernita manuale;

• l'essiccamento;

• la pressatura, l'estrusione, l'addensamento in balle.

La maggior parte delle tecniche sopra elencate sono comuni sia alle piattaforme di post raccolta differenziata sia agli impianti di trattamento meccanico-biologico che verranno descritti nel paragrafo successivo; alcuni tipi di selezione invece, come la cernita manuale e la separazione sulla base di proprietà ottiche ed elettrostatiche interessano solo i trattamenti di post raccolta differenziata, in quanto necessari per garantire il richiesto livello di qualità del prodotto finale.

Gli impianti di selezione post raccolta differenziata si articolano in operazioni di sola natura meccanica. Il materiale in ingresso può essere costituito sia da frazioni merceologiche omogenee (carta e cartone, plastica, vetro ecc.), sia miste, provenienti da raccolta

multimateriale (plastica, vetro, metalli). Tale circostanza condiziona l'articolazione delle successive operazioni di selezione.

Gli impianti di trattamento hanno come obiettivo di migliorare la qualità dei materiali raccolti e di renderli idonei per il riciclo o il riutilizzo in accordo alla vigente normativa (es.: DM 5 febbraio 1998) e nel rispetto di standard qualitativi quali quelli previsti dagli allegati tecnici all'Accordo Quadro ANCI-CONAI.

Il trattamento di flussi di rifiuti da raccolta monomateriale

Le frazioni provenienti da raccolta monomateriale possono riguardare:

- materiali cellulosici provenienti dalla raccolta stradale della carta, dalle rese di giornali e riviste, dal conferimento di imballaggi di cartone di esercizi commerciali ecc;
- bottiglie in PET e buste in PE provenienti da raccolta eterogenea della plastica alla quale si applicano trattamenti di selezione sulla base della densità o del colore; da questi trattamenti viene di norma scartata la plastica non proveniente da imballaggi come il polistirene (PS) e il cloruro di polivinile (PVC);
- rottame vetroso proveniente dalla raccolta stradale del vetro dal quale devono essere rimosse le impurezze (metalli, materiali organici, ceramici e porcellana, pietre);
- pallets e materiale ingombrante in legno, provenienti da conferimenti di esercizi commerciali, mercati ortofrutticoli e isole ecologiche.
- lattine e metalli, provenienti da esercizi commerciali e da piccole realtà produttive.

Nel seguito sono dettagliati i trattamenti che portano alla valorizzazione delle singole frazioni merceologiche

I trattamenti per il recupero di carta e cartone

I trattamenti per la selezione dei materiali cellulosici consistono per lo più in una cernita manuale seguita da compattazione e confezionamento del materiale in balle. In funzione dell'ingombro il cartone da imballaggio può essere sottoposto a triturazione e separato dalle frazioni più leggere per via gravimetrica. Per le riviste può essere previsto un trattamento a parte di disinchiostrazione che viene di norma effettuato in cartiera.

I trattamenti per il recupero della plastica

I rifiuti della raccolta monomateriale della plastica subiscono all'inizio una vagliatura dimensionale allo scopo di eliminare frazioni estranee di dimensioni piuttosto ridotte (metalli, oggetti in plastica ecc.). Per alcune configurazioni si hanno più stadi di vagliatura dimensionale allo scopo di produrre correnti di materiale di pezzatura uniforme da avviare a linee dedicate di cernita manuale. Questa può essere condotta per selezione negativa (scelta adottata di norma) eliminando il materiale di scarto e facendo proseguire la frazione valorizzabile ai successivi stadi di trattamento o per selezione positiva.

In alternativa alla selezione manuale gli impianti più recenti utilizzano lettori ottici per separare le plastiche secondo le diverse tipologie di polimero: polietilentereftalato (PET), polietilene (PE), polipropilene (PP). Alla separazione per polimero si può aggiungere quella per colore applicata di norma al PET. Le partite di resine selezionate vengono compattate e imballate per essere consegnate alle industrie di riciclaggio. Il materiale rimanente, costituito principalmente da metalli, viene trattato mediante correnti indotte e separazione magnetica. Lo scarto prima di essere inviato in discarica o ad incenerimento viene compattato e imballato.

I trattamenti per il recupero del vetro

Il rottame vetroso proveniente dalla raccolta viene trattato in impianti che applicano il principio della selezione negativa. Dopo un primo stadio di cernita manuale nel quale vengono rimossi materiali estranei (plastica, carta, inerti di varia natura ecc.) si ha uno stadio di separazione magnetica per l'allontanamento dei metalli, seguito da uno di separazione dimensionale per l'allontanamento dei fini e da uno di vagliatura gravimetrica per la separazione delle frazioni leggere (carta e plastica). Possono infine essere previsti ulteriori passaggi al separatore magnetico o al sistema a correnti indotte ed eventualmente la cernita manuale, in modo da ottenere un materiale "pronto forno".

Elaborazione ENEA

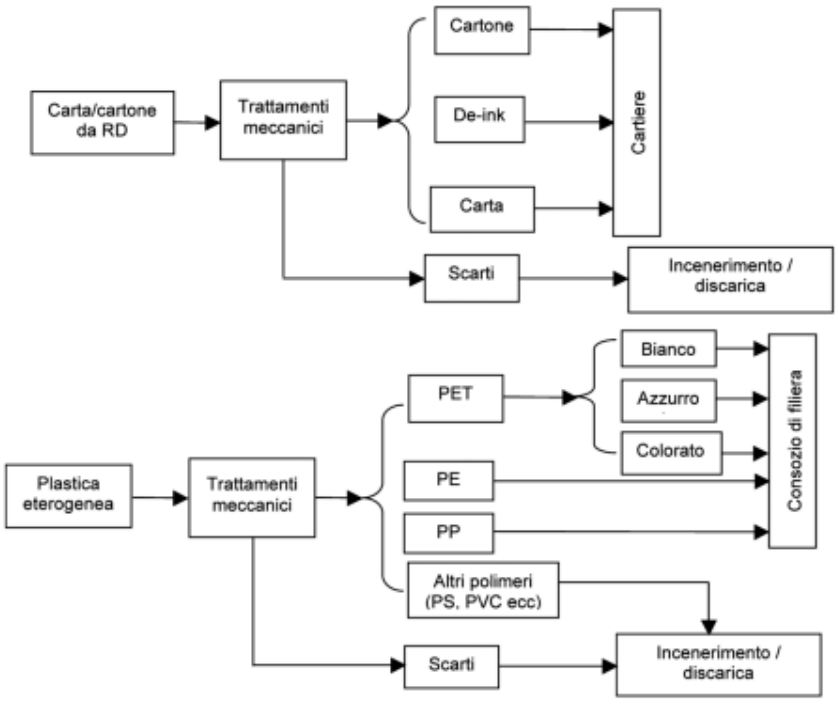


Figura 1: schema di principio della selezione di carta e plastica post RD monomateriale

Il trattamento di flussi di rifiuti da raccolta differenziata costituita da multi materiale

I trattamenti di selezione vengono applicati anche alle raccolte multimateriale di rifiuti di vetro, latte/lattine in metalli (ferrosi e non), imballaggi in PET e PE, film in PE, frazione mista contenente soprattutto carta. A causa degli standard qualitativi da garantire in uscita non si è ancora raggiunto un grado di automazione tale da poter prescindere da uno stadio di selezione manuale inserito lungo più sezioni della linea di trattamento. I sistemi automatici di selezione riescono invece a separare la frazione flessibile costituita da film di plastica e carta, da quella rigida costituita da bottiglie di plastica e barattoli di alluminio/banda stagnata secondo lo schema di principio rappresentato nella figura.

In base alla complessità dell'impianto, il processo può limitarsi ad una prima grossolana separazione delle frazioni rigida/flessibile, da trattare in impianti successivi, o ad una ulteriore raffinazione delle singole frazioni merceologiche mediante operazioni successive di vagliatura. La separazione tra frazione rigida e flessibile si attua per via densimetrica sottoponendo il materiale ad un flusso di corrente d'aria in grado di trascinare la frazione flessibile più leggera e di lasciare depositata quella rigida più pesante.

Alla frazione flessibile si applica successivamente una vagliatura basata sulla differenza di densità e resistenza all'attrito in aria in modo da separare la carta dalla plastica presente come film. Alla frazione rigida si applica dapprima una separazione di tipo magnetico per rimuovere i barattoli in banda stagnata ed i metalli ferrosi, cui segue una separazione a correnti indotte per la rimozione dell'allumino. Segue poi una vagliatura basata sulla differenza di densità, inerzia o proprietà aerodinamiche per separare le bottiglie di plastica da una parte e il vetro e i ceramici dall'altra. Da ciascuna operazione di separazione/vagliatura si ottiene uno scarto di materiali misti di granulometria fine.

Elaborazione ENEA

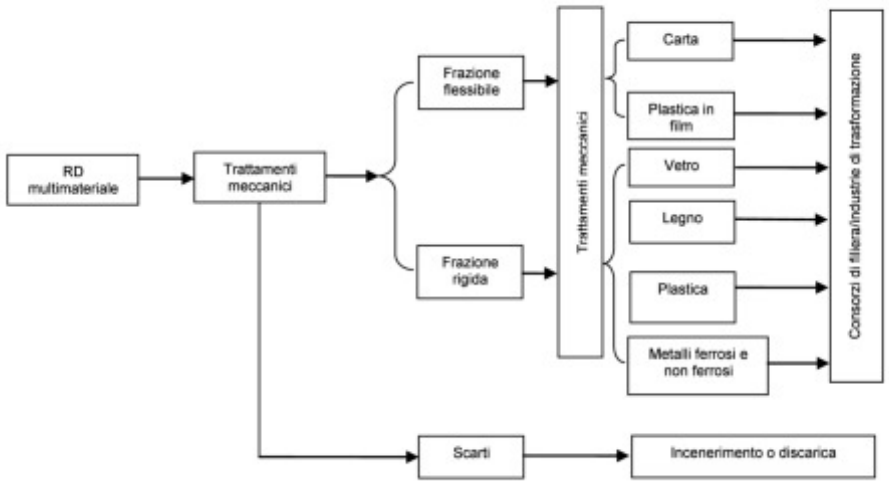


Figura 2: schema di principio della selezione post RD multimateriale

Nell'articolazione delle diverse fasi di trattamento possono essere presenti operazioni di pretrattamento che servono ad omogeneizzare, mescolare e preparare il materiale da separare (triturazioni e selezione manuale). In particolare, la selezione manuale ha il compito di rimuovere dalla linea di produzione principale il materiale estraneo e non processabile dall'impianto; questa operazione ha anche una funzione di protezione delle apparecchiature a valle, per impedirne possibili danneggiamenti. Negli impianti in cui è richiesta la separazione della plastica per tipologia di polimero o per colore, viene prevista ancora la selezione manuale oppure quella a lettura ottica.

Trattamenti meccanico-biologici

Scopo dei processi di trattamento a freddo dei rifiuti indifferenziati (che rimangono dopo la raccolta differenziata) è di recuperare una ulteriore parte di materiali riciclabili, ridurre il volume del materiale in vista dello smaltimento finale e di stabilizzare i rifiuti in modo tale che venga minimizzata la formazione dei gas di decomposizione ed il percolato. Fra questi processi si può includere, oltre ai processi aerobici, anche la digestione anaerobica che permette di ricavare energia dalla frazione organica mediante produzione controllata di biogas.

Il principale tipo di trattamento a freddo è il Trattamento meccanico-biologico (TMB). Esso separa la frazione organica ed i materiali riciclabili e permette di ottenere un biostabilizzato (anche denominato FOS, Frazione Organica Stabilizzata), che si distingue dal compost in quanto è prodotto a partire da rifiuti indifferenziati, mentre il secondo viene prodotto esclusivamente a partire da materiale organico raccolto in maniera differenziata.

Per tale motivo il biostabilizzato non viene usato come concime in agricoltura ma, essendo caratterizzato da una fermentescibilità ridotta fino al 90% può essere usato per attività paesistico ambientali, per le quali viene richiesta la disponibilità di sostanza organica stabilizzata al fine di migliorare le caratteristiche dei materiali inerti impiegati, ed in particolare:
-la sistemazione di aree di rispetto di autostrade e ferrovie (scarpate, argini, terrapieni);
-la costituzione di aree verdi di grandi dimensioni: costituzione di parchi pubblici, campi da golf, campi da calcio;
-il recupero ambientale di cave esaurite;
-il capping periodico durante la coltivazione delle discariche;
-la sistemazione post-chiusura di discariche esaurite.

L'obiettivo del sistema TMB è di ottenere, in seguito alla biossidazione della sostanza organica putrescibile, un prodotto stabile da un punto di vista biologico, tale da potersi ritenere "inerte".
La stabilità biologica viene raggiunta attraverso due possibili diversi trattamenti:

1) trattamento a "differenziazione di flussi", in cui si individuano tre tappe distinte:
-pre-trattamento meccanico: volto a separare la cosiddetta frazione "secca" (sovvallo) dalla frazione umida (sottovaglio) che concentra in sé il materiale organico;
-stabilizzazione della frazione umida: in seguito a processi ossidativi da parte di microrganismi, mediante il periodico rivoltamento, aerazione e bagnatura della massa, allo scopo di ottenere un prodotto il più possibile stabile da un punto di vista biologico;
-eventuale post-trattamento meccanico: per la raffinazione del materiale da destinare all'attività di ripristino ambientale o alla copertura giornaliera di discariche;

2) trattamento a "flusso unico", dove tutto il rifiuto in ingresso all'impianto subisce un trattamento biologico, mentre il trattamento meccanico si limita ad una semplice frantumazione del rifiuto.

Di seguito si riporta lo schema per il processo (TMB) di biostabilizzazione realizzato ad uno o due stadi e lo schema con bilancio di massa relativo al processo con metodo a separazione di flusso.

Elaborazione ENEA



Figura 3: schema di principio di TMB di biostabilizzazione a singolo (a) e a doppio stadio (b)

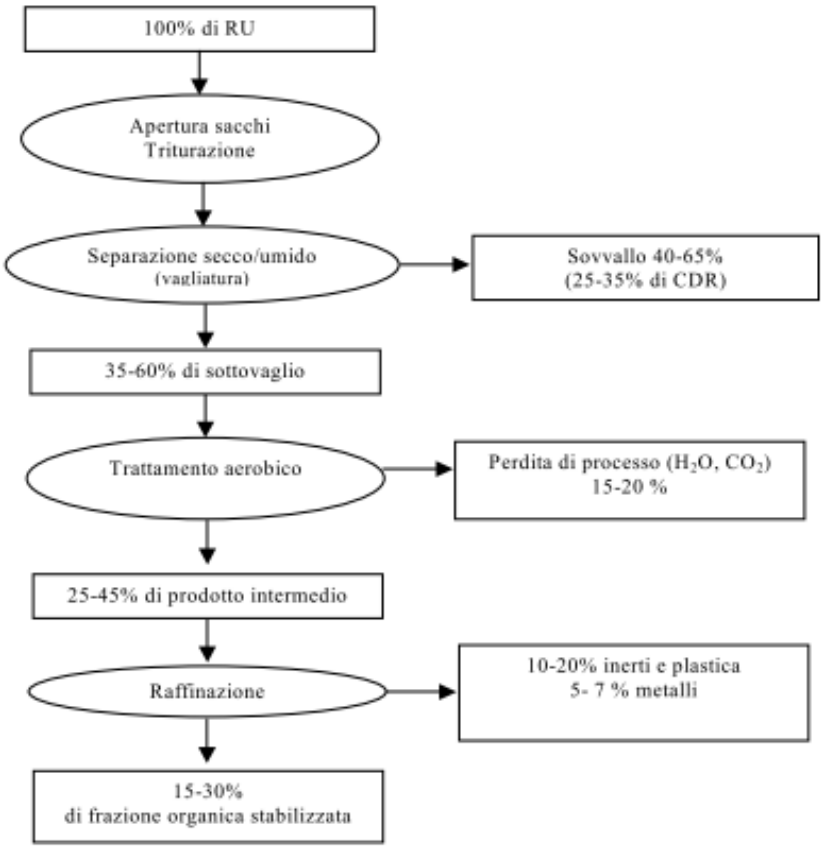


Figura 4: schema con bilancio di massa relativo al processo con metodo a separazione di flusso

A secondo della tecnologia adottata, la fase del trattamento meccanico può precedere o seguire la fase di trattamento biologico ed è utilizzato principalmente per:
a) raggiungere la stabilizzazione della sostanza organica (ossia la perdita di fermentescibilità) mediante la mineralizzazione delle componenti organiche più facilmente degradabili, con produzione finale di acqua ed anidride carbonica;
b) conseguire l'igienizzazione del materiale trattato;
c) ridurre il volume e la massa dei materiali trattati tramite l'evaporazione dell'acqua.
La trasformazione in composti stabilizzati dei rifiuti urbani indifferenziati si basa su un processo biologico di decomposizione e stabilizzazione aerobica delle sostanze organiche presenti. La frazione putrescibile dei rifiuti urbani viene stabilizzata utilizzando l'azione di microrganismi (batteri, funghi) che si accompagnano normalmente ai rifiuti stessi o che vengono inoculati in essi nella fase di trasformazione.
Tali trasformazioni sono esotermiche e danno luogo ad un aumento della temperatura sino a 60-70 °C, garantendo igienicità al prodotto finale in quanto viene eliminata la maggior parte dei microrganismi patogeni e dei parassiti dannosi.
I fattori fisico-chimici che condizionano l'andamento delle reazioni biologiche che caratterizzano il processo di biotrasformazione sono i seguenti:
- gestione, controllo ed abbattimento dei potenziali impatti odorigeni delle fasi critiche, individuabili soprattutto in quelle iniziali;
- la concentrazione di ossigeno e l'aerazione;
- l'umidità, che deve essere sufficiente alle attività microbiche, ma non eccessiva in quanto occupando gli spazi vuoti ostacolerebbe il rifornimento di ossigeno;
- la ricerca delle condizioni termometriche ottimali nelle diverse fasi del processo; infatti se per il conseguimento della pastorizzazione il materiale va mantenuto per un tempo relativamente prolungato a temperature relativamente elevate (almeno 3 giorni a 55°C, secondo quanto previsto dalla normativa vigente in materia), la massima velocità delle attività microbiche si consegue, in realtà, successivamente in condizioni mesofite (40-50°C) con un forte rallentamento al di sopra dei 55°C;
Lo strumento principale di gestione del processo è rappresentato dalla gestione dei flussi di aria alla biomassa che può essere estratta o insufflata. L'aria fa da vettore di ossigeno, garantendo l'aerobiosi del processo; contemporaneamente assicura il drenaggio di calore (soprattutto nel caso dell'areazione forzata, le deboli correnti convettive che si hanno nel caso dell'areazione naturale danno un contributo limitato alla termoregolazione), e consente, dunque, il controllo termico delle condizioni di processo, evitando il surriscaldamento della biomassa; infine, diventa inevitabilmente il vettore degli effluenti aeriformi potenzialmente odorigeni. Senza una sufficiente ossigenazione la microflora microbica anaerobica prende il sopravvento portando all'accumulo di composti ridotti caratterizzati da odore aggressivo ed elevata fitotossicità. Con il trattamento delle arie esauste mediante specifiche tecnologie si consegue poi la riduzione e l'abbattimento degli odori.
Il mantenimento di un ambiente ossidativo all'interno della biomassa, in corso di stabilizzazione, è quindi importante anche per impedire le reazioni di decomposizione anaerobica. Il sistema di areazione, naturale o forzata, deve poi essere coordinato con la eventuale movimentazione/rivoltamento della biomassa a seconda delle principali caratteristiche della biomassa stessa, quali la sua altezza, porosità e fermentescibilità; il

rivoltamento inteso a ricostruire nella massa il grado di strutturazione necessaria alla diffusione dell'aria, dovrà essere tanto più frequente quanto minore è la percentuale di materiale di struttura nella miscela di partenza, e quanto maggiore risulta l'altezza dello strato di biomassa.
Ad influenzare la scelta di un particolare sistema di trattamento aerobico sono di norma la quantità di rifiuto da stabilizzare, la disponibilità di spazio per il trattamento, l'entità dell'investimento stanziato per le strutture impiantistiche, l'incidenza della manodopera sull'operatività del sistema, la dislocazione topografica del sito destinato alla stazione di trattamento e una molteplicità di considerazioni di carattere ambientale, infrastrutturale e sociale. Una ulteriore classificazione rilevante ai fini della individuazione della tecnologia da adottare è quella tra i sistemi che propongono meccanismi periodici o continui di movimentazione della biomassa ("dinamici") e quelli che ne prevedono l'immobilità ("statici").
Il processo di biostabilizzazione permette di ottenere la parziale evaporazione della frazione umida (pari al 15-20 % in peso), una quota di metalli e di inerti (circa il 5-10 %) e un materiale biostabilizzato da smaltire in discarica (pari al 70-80 % in peso).

Produzione combustibile da rifiuti

Il trattamento meccanico-biologico è, come evidenziato sopra, finalizzato alla stabilizzazione della frazione organica presente nel rifiuto indifferenziato residuo, ma anche all'eventuale valorizzazione della frazione ad elevato potere calorifico mediante la produzione di combustibile da rifiuti.
Con il dlgs n. 205/2010 (recepimento direttiva 98/2008/CE) all' art. 183 comma 1 lettera cc) del dlgs 152/06 è stato introdotta la definizione di CSS - Combustibile Solido Secondario – disciplinato quanto a caratteristiche e classificazione dalla norma UNI CEN 15359 - classificato come rifiuto speciale. Il CSS, un combustibile solido recuperato da rifiuti non pericolosi e destinato alla produzione di energia presso impianti di incenerimento e/o co-incenerimento. di fatto, "sostituisce" il CDR e ne amplia le gamma tipologica.

I CSS vengono classificati in base a tre parametri:
• il potere calorifico inferiore
• il contenuto di cloro
• il contenuto di mercurio

Il potere calorifico inferiore (PCI) è un indicatore rappresentativo del valore energetico e quindi economico, il contenuto di cloro descrive l'indice di aggressività sugli impianti e il contenuto di mercurio è indicatore dell'impatto ambientale del rifiuto.
Questo criterio di classificazione prevede diverse classi di CSS (per il CDR ne esistevano solamente due) a seconda della combinazione dei tre parametri e fornisce all'utilizzatore un'informazione immediata e chiara del combustibile. Ciascun CSS è quindi univocamente determinato da una terna di valori corrispondenti alle classi in cui cadono. La specifica del CSS deve essere completata grazie all'analisi di alcuni altri parametri chimico-fisici obbligatori: diametro e forma delle particelle, contenuto di umidità, contenuto di cenere, contenuto di metalli pesanti elencati nella direttiva di incenerimento rifiuti.

A livello normativo nazionale il CSS è stato disciplinato dal Decreto MATTM del 14.02.2013 nel quale si prevede che il CSS con determinate caratteristiche e con l'emissione della dichiarazione di conformità, cessa di essere rifiuto se destinato a recupero per produzione di energia termica o elettrica in:

- Cementifici con capacità produttiva > 500 ton/g di clinker in regime di AIA e certificato ISO 14001 ovvero EMAS
- Centrali Termoelettriche (CTE) con potenza termica > 50 MWt in regime di AIA e certificato ISO 14001 ovvero EMAS

Il successivo DM MATTM 20 marzo 2013 ha modificato l'allegato X alla parte V del dlgs 152/06 aggiungendo il CCS-Combustibile fra i combustibili

Per preparare un materiale combustibile partendo da rifiuti contenenti una frazione biodegradabile, quali i rifiuti urbani, in generale è possibile distinguere due tipi di Trattamenti Meccanici e Biologici (TMB):
1) trattamento di selezione a doppio flusso;
2) trattamento di biostabilizzazione-bioessiccazione a flusso unico.

Lo schema di figura aiuta ad individuare le differenze tra le due modalità di trattamento. Come si può rilevare nel caso di flusso separato le due correnti vengono ottenute mediante un'operazione di vagliatura primaria.

Il sopravaglio o sovvallo è costituito da un materiale secco di pezzatura grossolana, ricco di componenti ad elevato potere calorifico; il sottovaglio è caratterizzato invece da una pezzatura ridotta ed è ricco di materiale organico putrescibile da avviare al successivo trattamento di biostabilizzazione. Nel caso di flusso unico il trattamento biologico costituisce la prima operazione mentre il trattamento meccanico successivo ha il compito di raffinare il prodotto organico stabilizzato rimuovendo ogni residuo estraneo agli usi finali, come plastica, carta, metalli, vetro, inerti.

Elaborazione ENEA

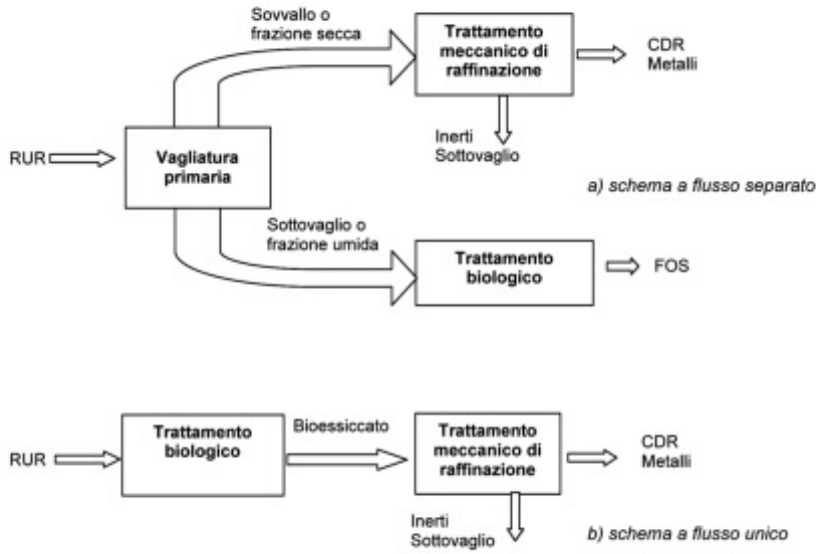


Figura 4: schema di principio della configurazione a flusso unico e separato

Nello schema a flusso unico, i processi ossidativi innescati dai microrganismi sono accompagnati da rilascio di calore che induce una forte perdita di umidità (dell'ordine del 7-15 %, in funzione dell'umidità iniziale) e di peso con conversione di parte della frazione biodegradabile in anidride carbonica. Nel materiale bioessiccato i processi fermentativi risultano inibiti, ma non si consegue la completa stabilizzazione del materiale a causa della ridotta durata del trattamento e della presenza di contaminanti inorganici (metalli, vetro, plastica ecc.).

In uscita dallo stadio biologico il materiale bioessiccato può essere sottoposto ad una fase di raffinazione mediante operazioni meccaniche (triturazione, vagliatura ecc.) finalizzate alla rimozione di metalli ed inerti.

Il materiale ottenuto con questo processo presenta buon potere calorifico e, qualora raffinato, risponde alle caratteristiche di un combustibile da rifiuto. E' da rilevare che, rispetto a quello prodotto con le modalità del flusso separato, il CDR da bioessiccazione ingloba anche la frazione organica privata di gran parte dell'umidità. E' quindi possibile conseguire maggiori rese percentuali (40- 50%) rispetto alla modalità tradizionale (25-35%), a parità di quantitativi di RUR in ingresso.

A valle dei trattamenti di raffinazione il CDR prodotto può essere ulteriormente elaborato per rispondere ai requisiti richiesti dall'utilizzatore finale. Il prodotto finale può presentarsi in forma sfusa, granulare, addensato in balle o compresso in pellets (cilindretti) o bricchette (parallelepipedi).

Ciascuna di queste alternative richiede specifici trattamenti meccanici costituiti da:

• triturazione e vagliatura dimensionale (CDR sfuso);

• pressatura e/o densificazione (CDR in balle);

• compressione ed estrusione (CDR in pellets/bricchette).

Il CDR di elevata qualità è un combustibile di buona qualità, arricchito rispetto alla formulazione ottenuta dai semplici RU, studiato per l'utilizzazione in co-combustione nelle Centrali Termoelettriche (CTE), a parziale sostituzione dei combustibili fossili tradizionali (quota in peso del CDR di elevata qualità del 10–20%). La scelta dei rapporti di massa, la tipologia delle materie prime impiegate e la forma fisica delle singole componenti del combustibile prodotto dall'impianto è tale da rendere possibile un'omogenea alimentazione al bruciatore della caldaia di utilizzazione, consentendo di evitare separazioni, sedimentazioni e compattamenti.
Nei cementifici, alla luce delle sperimentazioni condotte sia all'estero che in Italia, è stata ipotizzata una quota media di sostituzione dei combustibili tradizionali dell'ordine del 20-30%, espressa come apporto termico al processo. Tenuto conto dei livelli di fabbisogno energetico da combustibili fossili che si possono stimare in circa di 2 Mtep/anno (Mtep = milioni di tonnellate equivalenti di petrolio, al quale viene assegnato un PCI di 41,9 MJ/Kg), la potenzialità di utilizzo di CDR risulta dell'ordine di 0,8-1,3 Mt/a nell'ipotesi, ottimistica, che tutti i cementifici sul territorio nazionale si dotino degli impianti e delle infrastrutture necessarie per la co-combustione. Ne consegue, in definitiva, una potenzialità massima di utilizzo del CDR pari a 1,5-2 Mt/a.
A secondo dell'applicazione, possono cambiare i requisiti richiesti. Il processo di raffinazione viene spinto o meno in funzione del tipo di rifiuto in ingresso e dell'uso finale del combustibile da rifiuti. I processi di produzione del combustibile da rifiuti non sono ancora processi standardizzati.

Trattamenti Biologici

La digestione anaerobica

La digestione anaerobica sta ottenendo, in particolare in questi ultimi anni, sempre maggiore attenzione tra le tecnologie per il trattamento dei rifiuti putrescibili incentivando molti progettisti a esaminare le possibili integrazioni dei due processi al fine di ottimizzarne i rispettivi pregi e minimizzarne gli svantaggi (produzione di energia e ridurre o eliminare l'emissione odorigeni). A livello internazionale, gli esperti che hanno contribuito alla redazione della BAT ritengono che la digestione anaerobica della frazione organica dei rifiuti urbani sia una tecnologia ormai divenuta, in ambito europeo, nota e affidabile.
La digestione anaerobica è un processo biologico complesso per mezzo del quale, in assenza di ossigeno, la sostanza organica viene trasformata in biogas, costituito principalmente da metano e anidride carbonica. La percentuale di metano nel biogas varia

a secondo del tipo di sostanza organica digerita e delle condizioni di processo, da un minimo del 40% fino all'80% circa.
Il vantaggio del processo è che l'energia biochimica contenuta nella sostanza organica, anziché venire liberata sotto forma di calore da allontanare dal sistema, si conserva grazie alla parziale conversione in metano ed è utilizzabile a scopo energetico.
I principali vantaggi e svantaggi dei due processi (anaerobico ed aerobico) possono essere così sintetizzati:

1) la digestione anaerobica produce energia rinnovabile (biogas) a fronte del trattamento aerobico che consuma energia;
2) gli impianti anaerobici sono in grado di trattare tutte le tipologie di rifiuti organici, indipendentemente dalla loro umidità, a differenza del trattamento aerobico che richiede un certo tenore di sostanza secca nella miscela di partenza;
3) gli impianti anaerobici sono reattori chiusi e quindi non vi è rilascio di emissioni gassose maleodoranti in atmosfera, come può avvenire durante la prima fase termofila del trattamento aerobico;
4) nella digestione anaerobica si produce acqua di esubero che necessita di uno specifico trattamento, mentre nel pretrattamento aerobico le acque di percolazione possono essere ricircolate come agente umidificante sui cumuli in fase termofila;
5) gli impianti di digestione anaerobica richiedono investimenti iniziali maggiori rispetto a quelli di pretrattamento aerobico.
6) Il digestato, in uscita dalla digestione anaerobica, non è assimilabile al compost in quanto a possibili applicazioni in ragione del potenziale fitotossico ancora relativamente elevato (per la presenza di ammoniaca e la natura ancora relativamente fermentescibile della sostanza organica residua) e va dunque generalmente inteso e gestito come un fango da biostabilizzare aerobicamente (vedere produzione FOS).

Nel processo di digestione anaerobica, schematizzato nella figura seguente, si possono distinguere 3 fasi:

1) fermentativo o di acidificazione;
2) acetogenica;
3) metanigena.

Elaborazione ENEA

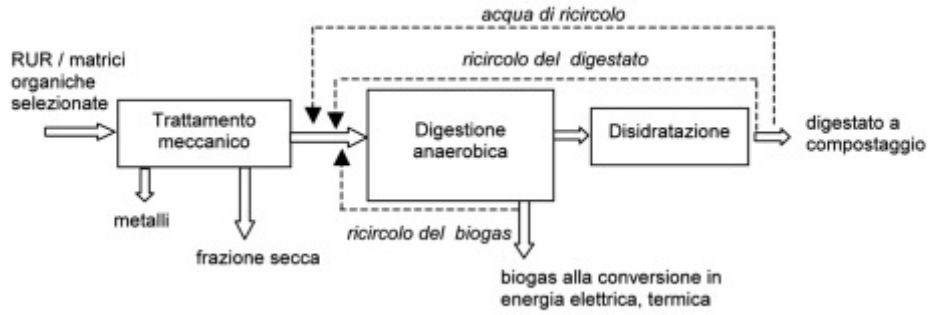


Figura 5: schema di principio della digestione anaerobica

La digestione anaerobica può essere condotta in condizioni mesofile (circa 35°C) o termofile (circa 55°C); la scelta tra queste due condizioni determina in genere anche la durata (il tempo di residenza) del processo.
Con la digestione anaerobica, si possono ottenere fino a 90 mc di metano per tonnellata di RSU. I vantaggi della digestione anaerobica sono legati alla produzione di biogas a fini energetici e alla minor produzione di fanghi da smaltire in discarica.

Se, però, i trattamenti anaerobici e aerobici vengono applicati in serie ai rifiuti urbani, l'integrazione dei due processi può comportare dei notevoli vantaggi, in particolare:

- si migliora nettamente il bilancio energetico dell'impianto, in quanto nella fase anaerobica si ha in genere la produzione di un surplus di energia rispetto al fabbisogno dell'intero impianto;
- si possono controllare meglio e con costi minori i problemi olfattivi; le fasi maggiormente odorigene sono gestite in reattore chiuso e le "arie esauste" sono rappresentate dal biogas (utilizzato e non immesso in atmosfera). Il digestato è già un materiale semi-stabilizzato e, quindi, il controllo degli impatti olfattivi durante il post-compostaggio aerobico risulta più agevole;
- si ha un minor impegno di superficie a parità di rifiuto trattato, pur tenendo conto delle superfici necessarie per il post-compostaggio aerobico, grazie alla maggior compattezza dell'impiantistica anaerobica;
- si riduce l'emissione di CO_2 in atmosfera da un minimo del 25% sino al 67% (nel caso di completo utilizzo dell'energia termica prodotta in cogenerazione).

E' importante, infatti, sottolineare come la digestione anaerobica e il trattamento aerobico non siano in realtà tecnologie in contrapposizione, ma anzi, perfettamente integrabili, secondo un processo di trattamento complessivo che prevede dapprima la degradazione della frazione putrescibile con recupero del biogas (e quindi di energia), e successivamente, la stabilizzazione aerobica del materiale residuo al fine di ottenere un prodotto finale adatto all'uso agricolo (compost). La produzione specifica di biogas è un parametro molto importante e che viene generalmente assunto quale indice di confronto tra differenti tipologie di processo.

Il rendimento in biogas e quindi energetico del processo è molto variabile e dipende dalla biodegradabilità del substrato trattato. Relativamente al trattamento della frazione organica dei rifiuti urbani derivante da raccolta differenziata e/o alla fonte, in letteratura si riportano valori di conversione in biogas compresi tra un minimo di 0,40-0,50 m3/kgSV alimentati, per la digestione in mesofilia, e un massimo di 0,60-0,85 m3/kgSV alimentati, per la digestione in termofilia. In genere durante la digestione anaerobica si ottiene una riduzione di almeno il 50% dei Solidi Volatili (SV) alimentati. Il digestato rappresenta, in questo caso, normalmente il 30% in peso del materiale trattato.
La gestione delle acque reflue, nel caso della digestione anaerobica, da luogo ad un flusso netto dall'impianto in eccesso rispetto alle capacità di riassorbimento da parte del processo stesso. La localizzazione dell'impianto di pretrattamento dei RU residui e, eventualmente, anche dell'impianto di trattamento della frazione organica da RD, deve quindi tenere in debita considerazione tale aspetto.
Oltre al biogas e agli scarti di processo, l'output principale dei processi di digestione anaerobica da rifiuto tal quale è un materiale semitrasformato palabile o pompabile rappresentato dal residuo della biomassa digerita – chiamato anche digestato - per il quale risulta molto problematico lo smaltimento in discarica. Si renderebbe quindi necessaria, come già sottolineato, la combinazione con una successiva fase di biostabilizzazione aerobica del digestato tramite insufflazione d'aria in un'altra sezione chiusa dell'impianto e la miscelazione del fango con materiali ligneo cellulosici.
Il trattamento a flusso unico tramite digestione anaerobica e successiva biostabilizzazione permette di ottenere la conversione in biogas del carbonio organico per una quota corrisponde al 15-20 % del rifiuto sottoposto a digestione anaerobica, di ottenere la parziale evaporazione della frazione umida (pari al 15-20 % in peso) e una quota di metalli e di inerti (circa il 5-10 %). Il materiale biostabilizzato da smaltire in discarica sarebbe quindi pari al 50-60 % in peso.
Da punto di vista reattoristico la realizzazione di un impianto aneorobico è molto semplice, basti pensare che il più grosso reattore a biogas realizzato a celo aperto è proprio una discarica. In generale rispetto alla modalità di alimentazione al reattore, il trattamento può essere continuo o discontinuo. Il primo è più diffuso perché assicura un maggiore controllo degli odori e in tal caso si utilizza un reattore che in funzione del tipo di miscelazione, può essere:

• continuo ad agitazione ("continuous stirred tank reactor", CSTR);

• a flusso a pistone ("plug-flow reactor") se la sospensione viene spinta lungo l'asse longitudinale attraverso fasi di processo via via diverse.

Nel caso di processo discontinuo il tipo di reattore adottato è quello ad agitazione.

Dal punto di vista generale il processo, nel caso in cui viene applicato a matrici organiche selezionate, può essere rappresentato così come riportato nella seguente figura. In questo caso il processo prevede un trattamento di tipo biologico che può consistere alternativamente in un singolo stadio di sola digestione anaerobica o meglio in un doppio stadio così articolato:

• un trattamento di digestione anaerobica finalizzato alla produzione di biogas;

• un trattamento secondario di digestione aerobica applicato al digestato e ad altre eventuali matrici organiche, per la produzione di compost o di un biostabilizzato.

Come è oramai consolidato il processo in questi casi sono preceduti da un trattamento meccanico che consiste in operazioni di riduzione della pezzatura e successiva vagliatura, nonché da un'eventuale miscelazione allo scopo di adattare l'alimentazione alle condizioni ottimali del processo biologico di digestione in assenza di ossigeno. Successivamente si realizza il processo anaerobico (a temperatura ambiente o a ca 55°C), successivamente il digestato subisce il processo di stabilizzazione ossidativo seguito da un processo di raffinazione.

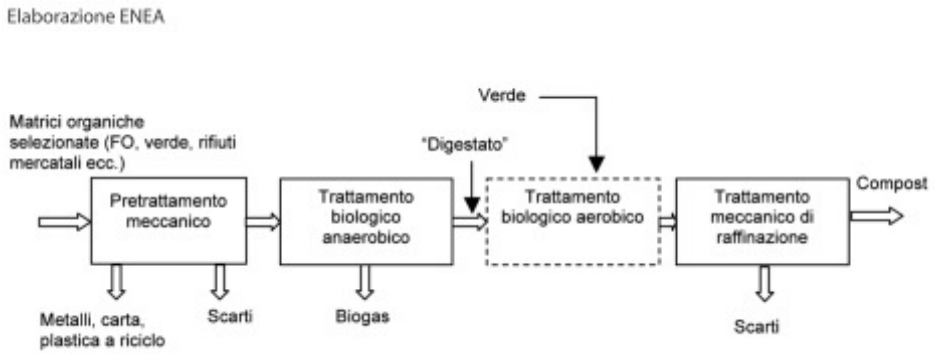


Figura 6: schema di principio della digestione anaerobica con produzione biogas

Trattamenti aerobici (compostaggio, biostabilizzazione aerobica)

Compostaggio

Il compostaggio, come la biostabilizzazione, è un trattamento di digestione aerobica, operato in questo caso su matrici organiche selezionate da RD, non contaminate all'origine da sostanze tossiche o che potrebbero causare danno alle colture agricole. Di fatto i materiali riciclabili ed utilizzabili in agricoltura come ammendanti devono avere delle caratteristiche merceologiche severe e previste in modo rigoroso dalla normativa vigente. Ciò è di estrema importanza in quanto la sicurezza e il tipo di materia organica ottenuta dalla raccolta differenziata è una garanzia sulla qualità e quindi sul potenziale riutilizzo in campo agricolo del compost che ne deriva. Diversamente, così come succede per l'organico del sottovaglio per le RUR il prodotto organico così essiccato e stabilizzato va a costituire il FOS.

Da quanto precisato si può facilmente osservare che il compostaggio è facilmente realizzabile là dove vi sono rifiuti agricoli, e/ o rifiuti organici urbani ottenuti per raccolta differenziata costituiti in particolare da scarti alimentari, da materiale da giardini o aree verdi.

Fatta questa premessa, la digestione aerobica può aver luogo o in cumuli aerati attraverso un solo stadio naturale di ossidazione, o in un reattore chiuso che consente di ridurre i tempi di trattamento, al quale fa seguito uno stadio finale di maturazione in cumuli aerati.

L'impianto può trattare direttamente un biodigestato ottenuto dal processo anerobico o opportunamente miscelato secondo rapporti adeguati, insieme o singolarmente, a matrici costituiti da scarti ligno-cellulosici (verde, ramaglie ecc.). I parametri da tenere sotto controllo nell'evoluzione del processo sono:

• l'umidità;

• la presenza di nutrienti (carbonio, azoto, fosforo);

• il pH;

• la temperatura ;

• il grado di aerazione.

La componente putrescibile è caratterizzata da maggiore tenore di umidità e di biodegradabilità rispetto a quella strutturante. Nel caso quindi di trattamento combinato a monte della digestione aerobica vera e propria viene previsto uno stadio di miscelazione, accompagnata da un'eventuale umidificazione con acqua (richiesta di norma nel caso di compostaggio del verde).

Le due matrici in ingresso possono essere soggette a pretrattamenti meccanici.

Sia la matrice putrescibile che il verde possono essere soggetti inoltre ad un trattamento di triturazione per aumentare la superficie specifica e favorire le reazioni biologiche in presenza di aria. Il trattamento meccanico è presente anche a valle dello stadio di maturazione, allo scopo di rimuovere ulteriormente i materiali estranei (film di plastica, inerti ecc.), non allontanati in fase di pretrattamento.

Nella figura sottostante è riportato lo schema di principio di un impianto di compostaggio.

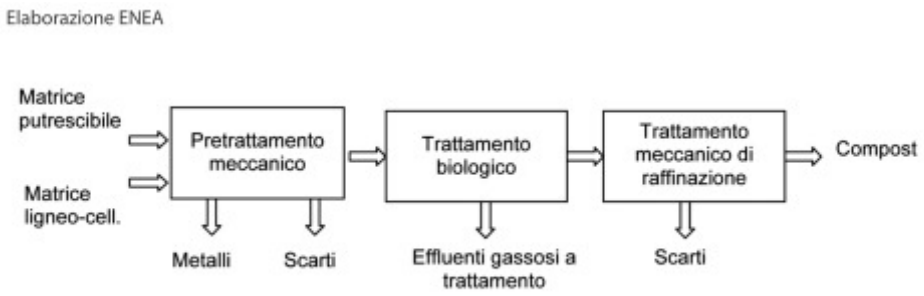


Figura 7: schema di principio del compostaggio

Biostabilizzazione aerobica

La biostabilizzazione consiste nella produzione di frazione organica stabilizzata (FOS) a partire dalla frazione organica proveniente sia dalla frazione organica della raccolta differenziata, sia dalla frazione umida dei RUR ottenuta dalle frazioni sottovaglio.

I trattamenti aerobici, come più volte accennato, sono essenziali per la biostabilizzazione delle sostanze organiche, il concetto base è che in una miscela organica essiccata (secca) non può avvenire nessun tipo di metabolismo biologico, per cui il materiale in questa fase non è biodegradabile e rimane stabile nel tempo. Tale processo risulta essenziale per rendere stabile qualsiasi sostanza organica rimuovendo completamente l'acqua, quindi anche nel caso di produzione di compostato ottenuto dalla frazione residua del processo anaerobico o di produzione di FOS a partire dalle frazioni organiche ROB contenute nella RUR .

Al fine di realizzare una corretta gestione del processo di trasformazione del substrato, costituito dalla frazione putrescibile del rifiuto indifferenziato, è necessario modulare le reazioni biologiche attraverso il controllo di fattori fisico-chimici attinenti alle specifiche caratteristiche del substrato, quali:

- concentrazione di ossigeno ed aerazione;

- condizioni termometriche ottimali per tutte le diversi fasi del processo;

- umidità, sufficiente a garantire lo svolgimento delle attività microbiche (l'assenza di umidità causerebbe l'arresto del processo biologico, mentre se l'umidità fosse maggiore del necessario, la presenza di acqua nei pori ostacolerebbe la circolazione di ossigeno); - gestione, controllo ed abbattimento dei potenziali impatti odorigeni delle fasi critiche.

L'aerazione può essere naturale (per diffusione) o forzata, e rappresenta lo strumento principale di gestione del processo, senza la quale si svilupperebbe una anaerobiosi nella biomassa con probabile sviluppo di composti ridotti caratterizzati da odori aggressivi ed elevata fitotossicità.

L'aria garantisce, infatti, l'aerobiosi del processo, nonché il drenaggio del calore sviluppato durante il processo, evitando il surriscaldamento della biomassa, e costituisce il vettore degli effluenti aeriformi potenzialmente odorigeni.

Accanto alla corretta gestione dell'aerazione per il mantenimento di un ambiente ossidativi, è necessario garantire la movimentazione/rivoltamento della biomassa in funzione delle principali caratteristiche della stessa, quali altezza del cumulo, porosità e

fermentescibilità, assicurando il giusto grado di strutturazione necessario alla diffusione dell'aria.

La scelta del metodo di trattamento aerobico dipende da una molteplicità di considerazioni di carattere tecnico, ambientale, infrastrutturale, economico e sociale. In particolare, la tipologia di matrici organiche da trattare rappresenta il fattore discriminante nell'adozione di un metodo piuttosto che di un altro.

Nel panorama tecnologico, si riconoscono essenzialmente tre tipologie generali di metodi di trattamento: in cumuli periodicamente rivoltati, in cumuli statici aerati e in bioreattori (sistemi semiaperti e chiusi).

Esiste, anche, il cosiddetto trattamento passivo. Il trattamento può consistere in un semplice ammasso della matrice organica putrescibile, la quale viene poi lasciata indisturbata per lunghi periodi di tempo (molti mesi), senza condizionamento alcuno delle reazioni di degradazione e trasformazione.

Rientra in questa categoria il trattamento delle deiezioni animali presso la maggior parte delle aziende agricole. Oppure mediante una apposita compostiera vicinale a seconda della densità di produzione della fase organica.

Il trattamento aerobico diventa più efficiente nel caso in cui si operi in cumuli statici aerati dove il sistema di aereazione avviene attraverso appositi sistemi di tubi diffusori, viene mantenuta l'ossigenazione del materiale sena la necessità di movimentazione. L'aerazione nei cumuli può essere passiva o forzata.

Con il trattamento aerobico in bioreattori si indica la stabilizzazione della biomassa substrato in particolari strutture di contenimento, dove tecniche di movimentazione e di aerazione forzata della matrice sono variamente combinate. I "bioreattori" possono essere contenitori chiusi o semplici vasche aperte. La maggior parte di questi apparati assolve solo ad una prima parziale omogeneizzazione e trasformazione delle matrici organiche. La stabilizzazione aerobica finale vera e propria del materiale in uscita dai reattori avviene, di solito, attraverso uno dei numerosi sistemi in cumulo.

Da un punto di vista delle applicazioni Industriali di tali tecnologiche si usano reattori che realizzano il processo in modo più intensivo, i più diffusi sono:

- **Cilindri rotanti/biotamburi:** Si tratta di grandi cilindri disposti orizzontalmente e sistemati su speciali ingranaggi che ne consentono un lento movimento rotatorio. Il substrato viene alimentato attraverso una tramoggia sistemata ad una estremità del cilindro che, a seguito del movimento rotatorio, viene miscelata e spinta attraverso tutta la lunghezza del cilindro, per poi venir scaricata all'estremità opposta a quella di carico. All'interno, il cilindro può essere completamente aperto oppure diviso in due o tre compartimenti, separati da porte di trasferimento manovrabili. L'aria è alimentata dalla estremità di scarico della matrice e si muove, nel cilindro, in direzione opposta rispetto all'avanzamento del substrato. Nel cilindro si raggiungono temperature > 55 °C che contribuiscono ad una drastica disattivazione degli eventuali microorganismi patogeni. I processi di decomposizione iniziano rapidamente, preparando il substrato alla stabilizzazione successiva, fuori del

reattore ove avviene la quasi totalità del processo. La velocità di rotazione e il grado di inclinazione dell'asse del cilindro determinano il tempo di ritenzione del materiale caricato.

- **Silos:** Sono reattori cilindrici, verticali, solitamente chiusi. Le più moderne tecnologie prevedono la rimozione giornaliera dal fondo del reattore della porzione di substrato parzialmente stabilizzata attraverso uno speciale apparato estrattore, mentre nuova matrice fresca viene alimentata dall'alto. L'aerazione attraverso tutto il profilo del materiale è attuata per mezzo di un sistema di diffusori posti al fondo del silo. L'aria esausta viene raccolta all'estremità del silo e convogliata in un filtro per l'abbattimento degli odori. Dopo la rimozione dal silo, la matrice viene avviata alla fase di completa stabilizzazione in cumulo ovvero in un secondo silo, anch'esso aerato. La tecnologia a silo è poco diffusa in Italia. Questi sistemi – in particolare, quelli monostadio - tendono a presentare un limite operativo nei frequenti ed attendibili compattamenti della massa e nelle difficoltà di diffusione dell'ossigeno all'interno della intera massa contenuta, laddove le altezze della biomassa ammassata nel singolo stadio tendono a superare i 4 metri.

- **Biocelle e i biocontainers**: Sono reattori chiusi a sviluppo orizzontale, tipicamente statici (alcuni tipi prevedono sistemi di movimentazione interna) e con aerazione forzata. La biomassa viene disposta in letti dell'altezza massima di circa 2-3 metri, altezza che tende a prevenire il compattamento e favorisce la diffusione dell'aria all'interno. A livello terminologico si distingue generalmente tra biocontainer (nel caso di strutture in carpenteria metallica) e biocelle (nel caso di strutture in calcestruzzo). I tratti comuni dei due sistemi sono l'adozione della aerazione forzata e la canalizzazione delle arie esauste verso sistemi di trattamento.

Trattamenti di tipo termochimico

I trattamenti di tipo termochimico sfruttano l'azione del calore (ottenuto tramite la combustione del rifiuto stesso o tramite una sorgente esterna di energia) per far avvenire reazioni di tipo chimico in grado di trasformare la frazione organica dei rifiuti (solidi, nel caso dei RU) in composti più semplici, per lo più di tipo gassoso.

I trattamenti di tipo termochimico sono tutti riconducibili all'applicazione (anche combinata) di tre distinti processi individuabili come:

• combustione;

• pirolisi;

• gassificazione.

Combustione

La combustione diretta dei rifiuti è un processo di ossidazione delle sostanze combustibili presenti nei rifiuti (del tutto simile a quello che avviene nella combustione di combustibili fossili per la produzione di energia), il cui scopo principale è quello di convertire composti ossidabili come qualsiasi sostanza organica putrescibili presente nei RU in composti gassosi (acqua, anidride carbonica) ed in residui solidi praticamente inerti (scorie o ceneri pesanti).

Esso è dunque una tecnica di smaltimento di rifiuti finalizzata all'ossidazione della frazione combustibile, con conseguenti notevoli riduzioni in massa e volume. D'altra parte, però, dalla combustione, è anche possibile ottenere un recupero energetico (sotto forma di energia elettrica e/o termica) del calore contenuto nei fumi della combustione stessa.

Di seguito, vengono presi in esame i mezzi tecnologici solitamente impiegati negli impianti di termotrattamento.

Il **forno a griglia** rappresenta la soluzione più consolidata nel campo della termodistruzione dei RSU. Questo tipo di forno è costituito da una camera in refrattario alla base della quale vi è la zona di combustione formata da griglie a gradini. Il rifiuto viene introdotto tramite tramoggia nella parte più alta della griglia stessa dalla quale un sistema a "spintone" lo avvia verso i gradini inferiori. L'aria di combustione viene immessa sia nel sottogriglia e sia nella camera di combustione stessa.
Il rifiuto generalmente viene introdotto nella camera di combustione senza seguire pretrattamenti (quali l'omogeneizzazione). All'aumentare della temperatura del forno i processi di pirolisi e gassificazione del rifiuto portano alla frammentazione della sostanza organica ed al suo trasferimento in fase gassosa. La reazione prevalente nella camera di combustione risulta, comunque, essere l'ossidazione della materia organica.
La tecnologia connessa con tali forni prevede la distinzione tra griglie fisse, caratterizzate da una potenzialità piuttosto bassa, e griglie mobili di più larga applicazione.

Gli impianti a griglia mobile sono gli impianti più utilizzati in Europa per il trattamento termico dei rifiuti urbani e speciali. Le ragioni di questo successo sono da ricercare nel fatto che garantisce una elevata affidabilità del sistema, un discreto livello di recupero energetico, la relativa facilità di conduzione e la possibilità di trattare senza particolari problemi anche il rifiuto tal quale.
Per contro tale impianto evidenzia una serie di problematiche, la prima delle quali è rappresentata dalla scarsa miscelazione tra l'aria comburente e lo strato di rifiuti combustibili posizionato sulla griglia mobile. Ovviamente questi fenomeni sono accentuati nel caso di alimentazione con rifiuti tal quale.
L'effetto di questa non perfetta combustione si ripercuote sulla necessità di operare con un elevato eccesso d'aria, rispetto alla quantità necessaria (circa il 100-120% in più rispetto al quantitativo necessario a livello stechiometrico) per cercare di aumentare la superficie di scambio aria comburente-combustibile. Bisogna così sovradimensionare la sezione di postcombustione per trattare gli incombusti gassosi. Si ottengono inoltre delle ceneri di bassa qualità (cioè ancora relativamente ricche di carbonio organico incombusto cioè completamente mineralizzato).

Altro punto critico è il fatto di avere delle parti meccaniche mobili sottoposte ad alta temperatura (le griglie appunto). Queste parti sono sottoposte ad alta usura e sono soggette a fondersi nel caso localmente si abbiano dei valori elevati di temperatura (con emissioni incontrollate in atmosfera). Questo sistema non è quindi idoneo per rifiuti a elevato PCI (> 3000 kcal/kg), non si adatta a rifiuti polverulenti, pastosi, melme, liquidi e presenta una sostenibilità economica ristretta a taglie di impianto medio-alte.
Va infine considerato che questa tecnologia necessita ormai di una soglia minima di potenzialità che possa rendere l'investimento sostenibile economicamente. Tale soglia si aggira attualmente attorno alle 250.000-300.000 tonnellate annue di RU.

Le tendenze evolutive dei forni a griglia mobile si rivolgono a tecnologie che offrano la possibilità di trattare rifiuti con alto potere calorifico e la riduzione delle ceneri prodotte.
Va infatti considerato che, con l'aumento dei livelli di raccolta differenziata (ed in particolare della frazione organica e del vetro), il potere calorifico dei RU è aumentato considerevolmente e questo cambiamento ha indotto i costruttori di impianti di incenerimento ad introdurre sul mercato le griglie raffreddate ad acqua. Questa innovazione, che permette l'impiego del forno a griglia anche per la combustione di rifiuti con poteri calorifici massimi dell'ordine dei 3.000 kcal/kg, consente di evitare le conseguenze dell'elevato calore di combustione, che sono il surriscaldamento della griglia stessa e la fusione delle scorie.
Un'altra tipologia di forni è quella **a letto fluido**, in cui la camera di combustione è costituita da un letto di materiale granulare inerte che durante l'esercizio è mantenuto a temperature comprese fra i 750 e gli 850 °C. I tempi di permanenza relativamente lunghi, l'uniformità della temperatura nella massa in agitazione e la possibilità di integrare il letto con materiali assorbenti (calce e carbonati per i gas acidi), consentono una ottimizzazione della combustione e una riduzione delle emissioni di macro e microinquinanti. L'impiego dei forni a letto fluido, per la necessità di essere alimentati con materiali a elevata omogeneità, è consigliato soprattutto per il trattamento di rifiuti preselezionati (frazione combustibile dei rifiuti) e di rifiuti che presentano all'origine una certa uniformità nelle caratteristiche compositive. Rispetto ad un inceneritore a griglia il trattamento fumi degli impianti a letto fluido può essere semplificato in particolare per quanto riguarda la sezione di denitrificazione.
La camera di combustione è a forma di tino, cioè di forma cilindrica, verticale; l'ingresso del rifiuto avviene nella parte bassa, sopra gli ugelli di distribuzione dell'aria comburente, che mantengono in sospensione il combustibile. Il gas esce dalla parte superiore e la temperatura del letto viene controllata asportando calore, in genere mediante produzione di vapore con fasci tubieri disposti attorno al forno.
Si possono distinguere due categorie di forni a letto fluido, in base alla quantità di particelle solide trascinate dal flusso di gas:
- forni a letto bollente: la velocità del gas uscente dal letto è relativamente bassa [1÷1.5 m/sec]. Nella parte alta del forno può essere presente un bruciatore ausiliario;
- forni a letto ricircolante: la velocità dei gas uscenti è elevata [4÷8m/sec]. I gas in questo caso trascinano notevoli quantità di solidi: il gas viene quindi fatto passare in un ciclone, e le particelle più pesanti sono reintrodotte nel forno.

I letti fluidi possono essere suddivisi anche in base alle pressioni di esercizio per le quali sono realizzati:
- a pressione atmosferica;
- in pressione (10÷18 bar).

La tecnologia del forno a letto fluido, è largamente applicata per impianti che inceneriscono fanghi, combustibile da rifiuto, frazione secca di rifiuti urbani o rifiuti urbani che residuino da modalità di raccolta differenziata spinta a elevate percentuali preliminarmente vagliati e triturati.
La combustione di frazione secca o combustibile da rifiuto in impianti a letto fluido (bollente o circolante) viene quindi ormai considerata una tecnologia matura e ben collaudata anche se non presenta lo stesso numero di realizzazione degli inceneritore a griglia mobile.
Le ragioni di questa minore diffusione sono da ricercarsi nel fatto che si tratta di una tecnologia sviluppata più recentemente (negli ultimi venti-venticinque anni) e che non risulta adatta a trattare i rifiuti tal quali, ma necessita di un impianto di preparazione a monte che garantisca la granulometria costante del rifiuto in alimentazione e richiede una gestione più accurata.
Il buon scambio termico consente di operare con valori di eccesso d'aria minori rispetto ad un forno a griglia per cui si avrà circa il 30-50% di riduzione della portata di fumi al camino.
La qualità delle ceneri è, quindi, più elevata, sostanzialmente prive di carbonio organico e mediamente la resa energetica è superiore di 1 – 2 punti percentuali rispetto al griglia mobile.
Il difetto principale di tale tecnologia è la formazione di blocchi di agglomerati costituiti dalla sabbia del letto fluido e dal rifiuto che tendono a intasare il sistema di evacuazione delle ceneri e della sabbia. Si preferiscono a tal motivo i forni a letto fluido bollente. Ciò in ogni caso comporta la necessità di periodiche fermate per pulire il fondo del reattore e per sostituire la sabbia, parte integrante del letto fluido.

Accanto ai forni a griglia e a letto fluido, possiamo annoverare il **forno a tamburo rotante**, in cui la combustione dei rifiuti avviene all'interno di un cilindro rotante, le cui pareti sono rivestite da materiale refrattario. Sui rifiuti solidi urbani può fornire prestazioni inferiori a quelle dei sistemi a griglia mobile, per via di una minore efficacia del contatto tra il rifiuto ed il comburente. Questo trattamento viene utilizzato di norma per l'incenerimento dei rifiuti industriali

Pirolisi

Il processo di pirolisi consiste in una decomposizione chimica e fisica delle materia organica per azione del calore a temperature comprese tra 400 ° e 900 °C in assenza di ossigeno o di altri ossidanti. A differenza della combustione, la pirolisi dà luogo ad una reazione endotermica e necessita, quindi, di calore fornito dall'esterno per poter distillare tutte le componenti volatili presenti nella materia organica. I principali prodotti che si ottengono sono una frazione gassosa, costituita da H_2, CH_4, CO e CO_2; una frazione liquida contenente catrame ed acqua con sostanze disciolte (acido acetico, acetone,

metanolo ecc.); un residuo solido costituito da una sostanza carboniosa contenente tutti i materiali inerti presenti nel rifiuto di partenza. Tutte le sostanze ottenute hanno caratteristiche combustibili e quindi impiegabili per un recupero energetico.
Il processo di pirolisi viene descritto nella parte successiva insieme a quello di gassificazione.

Gassificazione

La gassificazione è un processo termochimico che si svolge in atmosfera carente di O_2 che consente un'ossidazione parziale del rifiuto solido, che viene trasformato in un gas combustibile, composto per lo più da CO e H_2. Il processo endotermico si autosostiene grazie al calore generato dalle reazioni esotermiche che avvengono in difetto di ossigeno. Il gas di sintesi ottenuto viene depurato e utilizzato per fini energetici. Il risultato di questa operazione è la trasformazione della sostanza solida combustibile di partenza in un gas combustibile di sintesi in cui viene trasferita la maggior parte del contenuto energetico iniziale.
Il processo, applicato a rifiuti solidi contenenti carbonio, può prevedere una prima fase di pirolisi (in assenza di comburente) con la quale la sostanza solida viene trasformata in char (idrocarburi solidi), ceneri, olio di pirolisi e gas di sintesi per azione termica, e successivamente una fase di gassificazione che permette la rottura dei legami C-C e C-H presenti nelle molecole che costituiscono la fase organica che porta, in presenza anche di piccole quantità di O_2 all'ulteriore formazione di gas di sintesi mediante reazioni di ossidazione parziale. Tali processi si dimostrano vantaggiosi con alimentazioni di rifiuto ad alto contenuto di carbonio.

Il gas di sintesi prodotto, chiamato syngas, è composto principalmente da idrogeno (circa 50 %) e monossido di carbonio (circa 30 %), anidride carbonica e metano. Il syngas può essere utilizzato sia per la produzione diretta di energia nello stesso sito di produzione sia come materia prima per l'industria di processo.
I processi di pirolisi possono avvenire anche a basse temperature (circa 400 °C), mentre la gassificazione in unico stadio o come fase successiva (nel tempo o nello spazio) della pirolisi utilizza temperature più elevate. All'aumentare della temperatura di processo diminuisce la percentuale tra fase liquida/solida dei prodotti; all'aumentare della quantità di comburente diminuisce la quantità della fase solida e varia la composizione sia della fase solida sia del syngas.
Nel processo di gassificazione in unico stadio per garantire l'apporto energetico necessario a raggiungere e mantenere le temperature di processo (dai 1500 ai 2000 °C) utili alla formazione di solo syngas, scorie e ceneri, viene attuata una combustione controllata mediante l'aggiunta di carbon-coke o equivalente. Per aumentare la qualità del syngas prodotto (in termini di potere calorifico) si può invece utilizzare aria arricchita o ossigeno come comburente.
Le fasi principali di un processo di pirolisi / gassificazione con recupero energetico in situ applicato ai rifiuti solidi possono pertanto essere cosi distinte:

1) eventuale preparazione del combustibile mediante pretrattamento (separazione di vetro e metalli);
2) gassificazione con produzione syngas;
3) depurazione del syngas (di solito mediante scrubbing);
4) utilizzo del syngas per la produzione di energia elettrica (mediante motori a combustione interna, cicli combinati, celle a combustibile previa ulteriore depurazione).

I processi di pirolisi/gassificazione possono essere realizzati in reattori a tino o tubolari a letto fisso o mobile, e in reattori a letto fluido sia a bassa sia ad alta pressione. La modularità è elevata e le taglie ottimali dei reattori sono leggermente inferiori a quelle utilizzate per il termotrattamento in letti fluidizzati e notevolmente minori di quelle degli inceneritori a griglia.
La maggior parte delle tecnologie attualmente proposte per la termovalorizzazione dei rifiuti solidi mediante tali processi utilizzano una combinazione di pirolisi e gassificazione ad alta temperatura e prevedono l'utilizzo in situ del syngas prodotto mediante combustione.

Gli impianti di gassificazione e successivo recupero energetico **a fusione diretta** prevedono sostanzialmente una combustione a due stadi: nel primo stadio il rifiuto è alimentato dall'alto in un forno a tino (spesso miscelato con reagenti quali il carbone di legna o coke e calcare). In questa fase si ha la gassificazione del rifiuto utilizzando ossigeno puro o aria arricchita di ossigeno in dosi sub-stechiometriche quale agente gassificante. La temperatura nel crogiuolo del reattore è superiore ai 1500°C. A questa temperatura si ha la fusione diretta e completa del rifiuto che può essere periodicamente colato e granulato in analogia con la tecnologia dell'altoforno.
Il prodotto ottenuto è costituito da ossidi metallici inerti vetrificati non lisciviabili. Queste scorie possono essere utilizzate in edilizia e/o abbancate in discarica per inerti.

Il syngas prodotto nel reattore è completamente ossidato nel post-combustore senza preventiva depurazione. Trattandosi di una combustione aria comburente-gas si può ritenere che si eviti la formazione di incombusti. La composizione dei fumi in uscita è pertanto sostanzialmente simile a quella di un impianto di combustione tradizionale.
L'eccesso d'aria totale con cui opera tale sistema, come somma dell'aria substechiometrica insufflata nel gassificatore e dell'aria inviata nel post-combustore è inferiore a quello del forno a griglia per cui anche la quantità di fumi al camino risulta essere inferiore, nonostante la necessità di fornire l'aria comburente per la combustione del carbone di legna o del coke.
I processi di pirolisi/gassificazione, pur potendo trattare anche i rifiuti tal quali, garantiscono buone prestazioni su rifiuti omogenei per cui, nel caso di trattamento di rifiuti solidi urbani si rendono opportune azioni di pretrattamento. Il principale vantaggio di queste tecnologie è la riduzione dell'impatto ambientale legato al conferimento dei rifiuti in discarica perché i residui possono essere riutilizzati in quanto non pericolosi e potenzialmente commerciabili e, nel caso dei forni a fusione diretta, si raggiunge un significativo tasso di riduzione del volume rispetto ai volumi in ingresso e una produzione di syngas elevata, poiché il fumo in controcorrente garantisce un efficace scambio di massa all'interno della fornace.

Tali processi applicati ai RUR/combustibile da rifiuto possono essere classificati come processi di pirolisi/gassificazione (spesso in combinazione fra di loro) nei quali l'energia necessaria viene trasferita ai rifiuti attraverso un gas ionizzato ("plasma") ottenuto tramite la somministrazione di una scarica elettrica. Sebbene percepita come una forma innovativa di trattamento ad alto contenuto tecnologico e promossa soprattutto a livello politico in molte realtà si tratta di una tecnica consolidata da decenni per applicazioni industriali di nicchia (es.: deposizione di rivestimenti su materiali metallici o vetrosi).

Nel campo del trattamento dei rifiuti il suo impiego è stato sinora ristretto alla trasformazione, ad elevate temperature, di rifiuti particolari, quali quelli altamente pericolosi o radioattivi, in residui "inerti", previa loro fusione. Ad oggi impianti di questo tipo sono anche usati per il processo di inertizzazione dei materiali che contengono fibre di amianto. Allo stato attuale il processo condotto a così alte temperature può essere ritenuto una tecnologia valida ma non ancora completamente matura per l'applicazione industriale ai rifiuti di origine urbana.

Tuttavia ad oggi, occorre rilevare che al termine "gassificazione" può essere attribuito un significato piuttosto ampio, comprendente, in senso lato, qualsiasi trattamento termico innovativo di materiali solidi di scarto, finalizzato alla produzione di un gas derivato ("syngas") da impiegare principalmente come combustibile per la produzione di energia. In tale accezione essa include il processo combinato di pirolisi seguito dal processo di gassificazione condotto ad alta temperatura al fine di garantire la completa termodecomposizione delle molecole organiche ed ottenere un gas di sintesi di elevata qualità.

L'interesse nei confronti di queste tecniche innovative di trattamento termico è determinato essenzialmente dalle potenzialità che esse offrono in termini di incremento del rendimento di recupero del contenuto energetico dei rifiuti, di riduzione delle portate di effluenti gassosi da sottoporre a trattamenti depurativi, di miglioramento delle emissioni e delle caratteristiche d'inertizzazione dei residui solidi.

A questi potenziali vantaggi fanno riscontro alcuni aspetti, principalmente di carattere tecnico-economico, che ne hanno frenato ad oggi la loro applicazione su vasta scala, quali i problemi di natura tecnica tuttora irrisolti (scale-up degli impianti alla scala industriale, tecniche e sistemi di pretrattamento ed alimentazione dei rifiuti, di depurazione spinta del syngas grezzo, di conversione dello stesso in energia elettrica tramite soluzioni impiantistiche ad elevata efficienza), le incertezze di tipo economico legate alla definizione dei costi di trattamento (a causa della limitata esperienza acquisita nell'esercizio di impianti industriali).

Occorre infine rilevare che con il termine incenerimento viene di norma identificata la combustione diretta dei rifiuti anche se, in accordo a quanto enunciato all'art. 3 della direttiva 2000/76/CE (ripresa a livello nazionale dal DLgs 133/2005) in tale accezione sono inclusi anche "…altri procedimenti di trattamento termico quali, ad esempio, la pirolisi.

E' da sottolineare come i tre processi (combustione, pirolisi, gassificazione) siano omnicomprensivi di tutte le tecnologie di trattamento termico dei rifiuti che possono essere sempre ricondotte ad uno o ad una combinazione dei suddetti processi. Anche altre

tecnologie, caratterizzate spesso da nomi fantasiosi, possono essere sempre ricondotte ad uno o più dei suddetti processi. Tra questi la più nota è sicuramente la "dissociazione molecolare" che ha individuato in passato una combustione ad alta temperatura con ossigeno puro e, più recentemente, un processo discontinuo di gassificazione con aria.

In altre parole anche gli impianti basati su processi termici operanti in condizioni parzialmente ossidative (gassificazione) o in atmosfera inerte (pirolisi), qualora i prodotti risultanti dal trattamento (principalmente il gas derivato o "syngas" e, in misura minore le frazioni liquide o"tar" e solide o "char" combustibili) siano combusti "tal quali", senza alcun trattamento preventivo, all'interno dello stesso impianto sono, dal punto di vista normativo equiparate alla combustione diretta dei rifiuti.

Il recupero energetico

Nel caso della combustione diretta la produzione di energia elettrica può essere realizzata unicamente attraverso l'adozione di un ciclo termico che prevede la produzione di vapore surriscaldato che tramite la sua espansione in una turbina trascina un generatore.

Ai fini del trattamento i RUR si possono individuare due possibili strade:

• avvio dei rifiuti direttamente alla valorizzazione energetica senza alcun pretrattamento, fatta eccezione per la rimozione dei cosiddetti "rifiuti ingombranti" (mobilio, apparecchiature elettriche/elettroniche, elettrodomestici ecc.);

• avvio dei rifiuti ad un impianto di pretrattamento dove attraverso una serie di operazioni di trattamento di tipo TMB è possibile ottenere la "frazione secca" o il combustibile da rifiuto, caratterizzato da una migliore omogeneità e da un ridotto contenuto di umidità, oltre che da un minore contenuto di inquinanti.

La soluzione di cui al punto a) pare più opportuna per i grossi centri urbani (elevata produzione di rifiuti) mentre l'alternativa b) potrebbe trovare applicazione in contesti caratterizzati da ridotte produzioni di rifiuti diffuse sul territorio, che possono rendere antieconomico la realizzazione di termovalorizzatori di piccole dimensioni. Il combustibile prodotto dai rifiuti dovrebbe trovare in tal caso impiego preferibilmente come combustibile alternativo in impianti industriali esistenti.

Per quanto riguarda la gassificazione, (intesa nell'accezione più ampia che include anche la pirolisi ed i processi combinati), anche se non esiste una definizione "codificata", occorre distinguere due diverse modalità di sfruttamento energetico del syngas che prevedono rispettivamente:

• la combustione diretta del gas così come prodotto oppure dopo trattamenti grossolani, in sistemi convenzionali di combustione (es.: generatore di vapore) basati sull'impiego di un ciclo termico per la produzione di energia elettrica, del tutto simile a quello adottato nel caso di combustione diretta dei rifiuti (convenzionalmente definibile come gassificazione di tipo "termico" e rappresentato in figura sottostante)

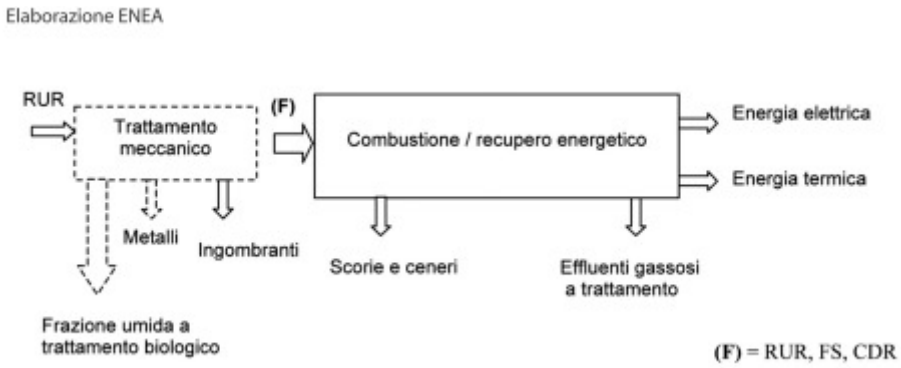


Figura 8: schema di principio della combustione diretta con recupero energetico

• l'utilizzo del gas di sintesi in installazioni non costituite da centrali termiche convenzionali, ma bensì di trasformazione diretta ad elevata efficienza (motori alternativi, turbine a gas, cicli combinati), previa depurazione spinta (identificabile come gassificazione di tipo "elettrico" e riportato nella figura sottostante)

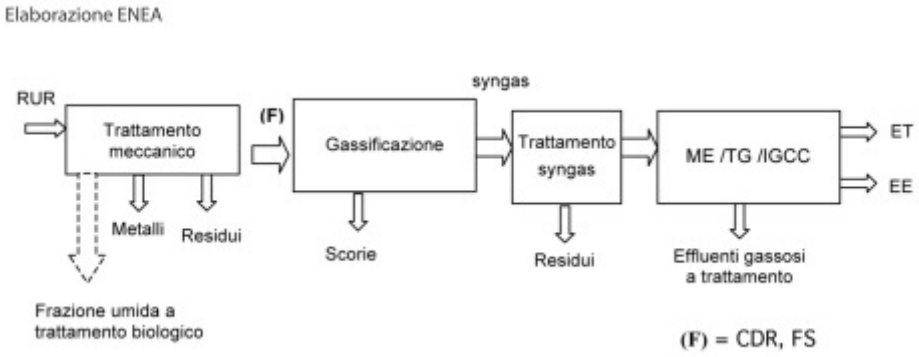


Figura 9: schema di principio della gassificazione di "tipo elettrico"

Legenda: EE = produzione di energia elettrica; ET = produzione di energia termica tramite scambiatori di calore; ME = motore endotermico; TG = turbina a gas; IGCC = ciclo combinato)

Nella gassificazione di tipo "termico" il gas grezzo prodotto viene combusto senza prevedere trattamenti preventivi di depurazione tesi all'eliminazione delle polveri trascinate, del TAR (idrocarburi a lunga catena) e degli altri inquinanti presenti (HCl, H_2S, SO_2 ecc.), in modo da produrre energia elettrica tramite un ciclo termico a vapore. I fumi esausti debbono, ovviamente, essere trattati a valle della combustione, come avviene in un tradizionale impianto di combustione diretta dei rifiuti, dalla quale questa soluzione non differisce sostanzialmente. La differenziazione diviene pressoché formale in alcuni casi nei quali non è possibile separare fisicamente la fase di pirolisi/gassificazione da quella di combustione finale del gas derivato, per cui il trattamento viene a configurarsi come un incenerimento in due stadi e come tale, giustamente, sottoposto a tutte le prescrizioni e le normative ad esso applicabili.

Nella gassificazione di tipo “elettrico”, invece, risultano ben distinte le due fasi della “produzione del gas derivato” e del suo successivo “impiego in turbina o motore endotermico” per la produzione di energia elettrica, previo un trattamento spinto di depurazione.

La produzione di un vero e proprio combustibile gassoso destinato ad essere impiegato in una turbina consente l’adozione di cicli combinati turbina a gas/turbina a vapore, soluzione che offre la possibilità di incrementare notevolmente il rendimento di conversione in energia elettrica, con conseguenti benefici di carattere economico ed ambientale.

Tuttavia, allo stato attuale, la quasi totalità degli impianti attualmente operativi (salvo rare eccezioni, come si vedrà meglio in seguito) adotta la soluzione di tipo “termico” principalmente a causa delle difficoltà di carattere tecnico-gestionale, che implicano risvolti negativi sul piano economico, connesse con la depurazione spinta del syngas, dalla quale non è possibile prescindere nel caso dell’alternativa di tipo “elettrico”.

In pratica tale tecnica non differisce sostanzialmente da quanto avviene in una camera di combustione nella quale ad una prima fase di condizioni substechiometriche segue un secondo stadio di combustione con eccesso di ossigeno, ottenuto tramite l’iniezione di aria secondaria.