

**Trattamenti termici e meccanico-biologici (TMB) del rifiuto
residuo: aspetti generali e considerazioni sull'applicabilità al
contesto della Provincia di Novara**

Parte I – aspetti generali e inquadramento tecnologico

Prof. Umberto Ghezzi, Dipartimento di Energia
Ing. Mario Grosso, DIAR – Sez. Ambientale
Politecnico di Milano

Milano, Settembre 2009

INDICE

INTRODUZIONE	1
1. TRATTAMENTI TERMICI PER RIFIUTI SOLIDI URBANI.	2
1.1. INTRODUZIONE.	2
1.2. TIPI DI PROCESSO.	3
1.2.1. <i>Combustione</i>	3
1.2.2. <i>Gassificazione</i>	4
1.2.3. <i>Pirolisi</i>	5
1.2.4. <i>Dissociazione molecolare</i>	5
1.2.5. <i>Plasma</i>	6
1.2.6. <i>Ossicombustione (combustione senza fiamma)</i>	8
1.3. TIPI DI IMPIANTI.	8
1.3.1. <i>Impianti di combustione convenzionale</i>	9
1.3.2. <i>Gassificazione e pirolisi</i>	19
1.3.3. <i>Sistemi al plasma</i>	24
1.3.4. <i>Dissociazione molecolare</i>	24
1.4. CONSIDERAZIONI AMBIENTALI.	25
1.5. RECUPERO ENERGETICO.	27
1.6. CONCLUSIONI.	29
1.7. RECUPERO ENERGETICO DAL CDR (COMBUSTIBILE DERIVATO DAL RIFIUTO).	30
1.8. VALUTAZIONE COMPLESSIVA DEI SISTEMI DI TRATTAMENTO TERMICO.	34
1.8.1. <i>Forni a griglia</i>	35
1.8.2. <i>Forni a letto fluido</i>	38
1.8.3. <i>Forni rotanti</i>	40
1.8.4. <i>Pirolisi – gassificazione</i>	41
1.8.5. <i>Dissociazione molecolare (a bassa temperatura)</i>	44
1.8.6. <i>Plasma (dissociazione ad alta temperatura)</i>	45
1.8.7. <i>Utilizzo di CDR</i>	46
1.9. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE.	46
2. TRATTAMENTI MECCANICO-BIOLOGICI APPLICABILI AL RUR	49
2.1. INQUADRAMENTO INTERNAZIONALE DELLA PRATICA DEL TMB.	51
2.1.1. <i>La situazione europea</i>	51
2.1.2. <i>La situazione italiana</i>	52
2.2. IMPOSTAZIONE IMPIANTISTICA.	53
2.2.1. <i>Trattamenti meccanici</i>	54
2.2.2. <i>Trattamenti biologici</i>	55
2.2.3. <i>Considerazioni sulla produzione di “sabbia sintetica” dal RUR</i>	57
2.3. PRESIDI AMBIENTALI PER GLI IMPIANTI TMB.	59
2.4. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE.	60
2.4.1. <i>Aspetti generali</i>	60
2.4.2. <i>Applicabilità al contesto della Provincia di Novara</i>	61
3. CONSIDERAZIONI COMPARATIVE	63
3.1. CONFRONTO ECONOMICO TMB – TERMOVALORIZZATORE.	63
3.1.1. <i>TMB</i>	63
3.1.2. <i>Termovalorizzatore</i>	64
3.1.3. <i>Brevi considerazioni sulla produzione di “sabbia sintetica”</i>	66
BIBLIOGRAFIA ESSENZIALE	67
APPENDICE – CENNI AI TRATTAMENTI APPLICABILI AI RESIDUI DEI PROCESSI DI TERMOVALORIZZAZIONE	68
A.1. CARATTERISTICHE DEI RESIDUI.	68
A.2. TRATTAMENTI APPLICABILI ALLE SCORIE.	70
A.3. TRATTAMENTI APPLICABILI AI RESIDUI DI DEPURAZIONE.	70

Introduzione

Il presente rapporto costituisce un'analisi delle alternative tecnologiche per il trattamento del rifiuto indifferenziato (più correttamente indicato come Rifiuto Urbano Residuo – RUR) prodotto nella Provincia di Novara. Si tratta di un'area caratterizzata da prestazioni del sistema di raccolta tra i migliori a livello nazionale, grazie all'applicazione estensiva di sistemi domiciliari comprensivi della raccolta dell'umido. La percentuale di raccolta differenziata (RD) ha sfiorato il 65% nel 2008, valore che la normativa nazionale (D.Lgs. 152/06) fissa come obiettivo da raggiungere entro la fine dell'anno 2012.

A fronte di una tale livello di differenziazione, la produzione di RUR si attesta attorno alle 65.000 tonnellate annue, con un valore obiettivo, nel caso di raggiungimento del 70% di RD, di poco superiore a 50.000 tonnellate. Resta dunque un discreto quantitativo di materiale residuo da trattare, per il quale in prospettiva dovrà essere abbandonato il ricorso allo smaltimento in discarica, sia per motivi strettamente normativi, sia, soprattutto, poiché tale forma di trattamento costituisce un mancato recupero di ulteriori risorse dal rifiuto urbano residuo.

Si sono dunque esaminate le principali alternative di trattamento del RUR, suddividendole tra processi di recupero energetico (Cap. 1) e processi di tipo meccanico-biologico – TMB (Cap. 2). Va rilevato che per alcune delle alternative considerate esiste una forte integrazione tra le due opzioni di trattamento, in quanto ad esempio le filiere che prevedono l'utilizzo a scopi energetici del combustibile derivato da rifiuto (CDR) devono necessariamente comprendere una prima fase di trattamento meccanico-biologico per la produzione del CDR stesso. Questo spiega perché il tema del CDR viene già affrontato all'interno del capitolo sul recupero energetico, per poi essere ripreso nel capitolo sul TMB.

Il Cap. 3 riporta infine alcune considerazioni comparative tra le due famiglie di processi considerate, inclusive di una valutazione economica preliminare.

L'Appendice conclusiva è dedicata ad alcuni cenni sul tema della gestione e trattamento dei residui prodotti dagli impianti di termovalorizzazione di rifiuti.

1. Trattamenti termici per rifiuti solidi urbani.

1.1. Introduzione.

Il trattamento termico dei rifiuti è senz'altro una delle tecniche più antiche di smaltimento.

Il processo fondamentale cui si è fatto riferimento è la combustione, cioè una ossidazione ad alta temperatura che ha subito però con il procedere dei tempi sostanziali modificazioni sia nelle modalità di gestione che nelle tecnologie applicative, in relazione allo evolversi delle scienze teoriche ed applicate e sotto la spinta delle problematiche che si sono affacciate negli ultimi decenni, quali la questione ambientale, il recupero energetico, etc.

Oltre alle tradizionali tecnologie che fanno riferimento alla combustione, sono attualmente disponibili, a vari livelli di applicazione, altre forme di trattamento termico dei materiali residui (rifiuti, etc.), che presentano specifiche particolarità e punti di interesse.

Si può ritenere in generale che tali forme di trattamento, più che una alternativa vera e propria alla convenzionale combustione, rappresentino un completamento del quadro di possibili trattamenti di tipo termico, permettendo in tal modo una scelta che facilita la individuazione del sistema ottimale.

Le problematiche che nascono in relazione all'impiego di tali trattamenti sono in genere legate al fatto che mentre i sistemi di combustione convenzionali (per rifiuti e/o materiali residui) sono realizzati in centinaia se non in migliaia di esemplari, per cui è possibile ottenere una oggettiva valutazione delle loro prestazioni sia dal punto di vista tecnico che gestionale ed economico, per altri tipi di processi le realizzazioni esistenti (con qualche eccezione come si vedrà), sono in numero limitato, fanno riferimento a diverse tecnologie impiantistiche e di processo, in molti casi sono di piccola taglia, a scala di pilota o sub industriale, rendendo problematica una effettiva valutazione che tenga conto per quanto possibile di tutti gli aspetti del problema e possa permettere un confronto realistico tra le differenti soluzioni.

(Anche per tale motivo tali impianti vengono qui chiamati non convenzionali).

Nel presente lavoro si cerca di fornire un quadro per quanto possibile realistico della attuale situazione, in modo anche di individuare quelle tecnologie che in qualche modo possano venire considerate come mature e consolidate.

Vengono dapprima considerati i vari tipi di processi al fine di metterne in evidenza le caratteristiche fondamentali.

Si passa poi a vedere come questi processi siano stati tradotti in realizzazioni impiantistiche, quale sia attualmente lo stato dell'arte e se sia possibile fare una valutazione delle specifiche caratteristiche delle tecnologie considerate.

Si effettuano poi sintetiche valutazioni connesse alle problematiche ambientali e di recupero energetico legate ai cosiddetti sistemi di trattamento non convenzionali.

Dal quadro così presentato si cerca poi di individuare qualche conclusione che possa fornire un orientamento nelle scelte e nelle valutazioni.

1.2. Tipi di processo.

E' presente sul mercato un numero di processi molto elevato che fa riferimento anche a sistemi termici alternativi alla combustione convenzionale.

Molti di questi processi si possono ricondurre ad un unico principio, altri sono meno facilmente classificati, su alcuni appare a volte problematico esprimere un giudizio.

Nel presente caso vengono considerati i processi che si ritengono più rilevanti ai quali, pur nelle differenziazioni tecnologie, si possono ricondurre gran parte dei sistemi attualmente proposti.

Al fine di poter effettuare una valutazione comparativa, si prende in esame, come processo di riferimento, la combustione convenzionale.

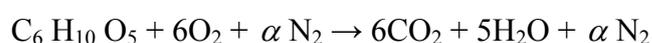
I processi che vengono presi in considerazione sono i seguenti:

- combustione,
- gassificazione,
- pirolisi,
- dissociazione molecolare,
- plasma,
- oxicombustione.

In quanto segue i processi diversi dalla combustione vengono denominati non convenzionali.

1.2.1. Combustione.

Nella combustione si ha l'ossidazione completa (se vi è sufficiente ossigeno, buon mescolamento, tempo di residenza adeguato, etc.) degli elementi combustibili (generalmente idrogeno e carbonio nel caso che qui interessa) secondo reazioni stechiometriche del tipo:



Il processo di combustione è esotermico e porta alla formazione di prodotti di combustione ad elevata temperatura e ad un residuo solido inerte in quantità percentuale rispetto alla massa in ingresso che dipende dalla composizione del rifiuto o residuo sottoposto al processo.

Il processo porta ad una notevole riduzione della massa e del volume del rifiuto.

La produzione di fumi è elevata come risulta dalle reazioni stechiometriche precedentemente riportate.

Le problematiche connesse al processo di combustione sono ben note e non vengono qui discusse.

Il numero di impianti che fanno riferimento a questo tipo di processo è di gran lunga il più rilevante nel panorama del trattamento termico dei rifiuti.

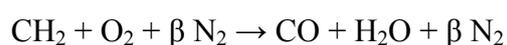
1.2.2. Gassificazione.

Per gassificazione si intende in generale la combustione parziale di un materiale in difetto di ossigeno, con formazione di un gas combustibile contenente prodotti di parziale ossidazione quali ossido di carbonio ed idrogeno.

In generale questo processo richiede un materiale abbastanza omogeneo, per cui può venire sottoposto preventivamente ad un trattamento (ad es. produzione di CDR).

La energia necessaria alla gassificazione viene in generale fornita dalle reazioni di ossidazione parziale, anche se a volte si ricorre anche ad un apporto esterno, seppur limitato (ad es. combustibile addizionale), per un miglior controllo del processo.

Una reazione stechiometrica di gassificazione può essere del tipo:



La gassificazione limita, rispetto ad altri processi (ad es. pirolisi), la percentuale di solidi e vapori condensabili rispetto alla frazione gassosa.

Come si può desumere da quanto detto le caratteristiche del gas prodotto (syngas) dipendono fortemente dalla quantità di ossigeno introdotto nel processo, in quanto ad essa sono collegate sia le concentrazioni dei singoli componenti sia il calore prodotto e quindi la temperatura.

In generale dalla gassificazione si ottiene un syngas a temperatura abbastanza elevata (700 ÷ 1200 K) che può essere sottoposto immediatamente a combustione oppure utilizzato in una fase successiva previa depurazione.

Il bilancio energetico globale della gassificazione è analogo a quello del processo di combustione, anche se poi nella realtà operativa, a causa della maggior complessità impiantistica e gestionale, si rileva, in generale, una perdita dell'ordine del 5 ÷ 10%.

1.2.3. Pirolisi.

Il processo di pirolisi consiste in un riscaldamento (in molti casi indiretto) del materiale in assenza di ossigeno, che porta alla rottura delle molecole complesse in genere di tipo organico, avendo come risultato, in seguito a processi di craking e di condensazione, frazioni gassose, liquide e solide (queste ultime in genere in percentuali maggiori rispetto alla gassificazione).

Una reazione di pirolisi può essere schematizzata come:



La corrente gassosa in uscita (syngas) è in genere costituita da un combustibile avente potere calorifico molto variabile a seconda delle condizioni operative (ad es. temperatura) tra 10.000 e 20.000 kJ/Nm³. contenente idrogeno (H₂) e prodotti di ossidazione del carbonio CO e CO₂, se è presente ossigeno nel materiale di partenza ed anche idrocarburi leggeri di vario tipo (saturi ed insaturi).

La frazione liquida (a temperatura ambiente) costituisce il cosiddetto TAR (simile ad un olio combustibile) e contiene composti organici, acqua e catrami.

In alcuni casi vengono classificati come pirolitici anche sistemi in cui l'apporto di calore per reazioni esotermiche sia insufficiente per mantenere il processo (le reazioni endotermiche sono prevalenti), il che si verifica in genere quando lo apporto di ossigeno è inferiore al 25 ÷ 30% di quello stechiometrico.

1.2.4. Dissociazione molecolare.

La cosiddetta "dissociazione molecolare" è un tipo di processo che rientra in quelli già precedentemente esaminati.

E' in pratica un processo di gassificazione che viene condotto con quantitativi di ossigeno molto limitati, in modo da avere temperature che non superano i 500 ÷ 550° C (viene dichiarato un campo operativo tra 300 e 550° C).

A causa delle temperature non particolarmente elevate il processo è lento e richiede tempo dell'ordine delle ventiquattro ore (secondo quanto dichiarato) per giungere ad una consistente demolizione del materiale di partenza.

Le temperature non elevate portano ad una introduzione di energia limitata (non vengono utilizzati bruciatori di supporto se non nella fase iniziale) e questo ha come conseguenza un riflesso sulle caratteristiche del prodotto (syngas).

Non si hanno a disposizione dati di comparazione, ma in generale in tali tipi di processo il peso molecolare medio dei prodotti tende a diminuire con lo aumentare della temperatura, che è un indice dello apporto energetico.

In relazione allo utilizzo del syngas si possono fare considerazioni analoghe a quelle precedentemente riportate.

1.2.5. Plasma.

Per lo smaltimento di rifiuti e residui possono essere messi in campo, almeno in specifiche situazioni, trattamenti al plasma.

Come noto il plasma è un gas conduttore ad altissima temperatura (per le applicazioni di cui qui si tratta in genere dello ordine di $5000 \div 12000$ K) elettricamente neutro (uguale carica complessiva delle particelle positive e negative).

Il plasma può venire generato con diverse modalità, ma comunque comporta la necessità di trasferire al gas di supporto elevatissime quantità d energia, in grado di provocare la ionizzazione.

Nelle presenti applicazioni la generazione del plasma avviene attraverso le cosiddette torce al plasma.

Le torce sono essenzialmente costituite da due elettrodi tra i quali si fa avvenire una scarica elettrica in grado di conferire energia sufficiente per ionizzare il gas che fluisce tra gli elettrodi, generando un dardo ad elevatissima temperatura.

Le torce possono assumere diversi tipi di configurazione.

Si ricordano tra le altre quelle ad arco non trasferito e ad arco trasferito.

Nel caso di arco non trasferito le torce comprendono entrambi gli elettrodi (anodo e catodo), mentre nel caso di arco trasferito uno degli elettrodi è incorporato nella torcia (anodo o catodo) e può essere ad es. costituito dal materiale da trattare.

Conviene mettere in evidenza che il dardo di plasma è solamente un elemento che trasferisce energia al rifiuto e che il prodotto che si genera dalla interazione del plasma con il rifiuto (gas e/o materiale prodotto) non ha assolutamente le caratteristiche del plasma (temperature elevatissime, conducibilità elettrica, riduzione dei componenti a livello atomico e/o a gruppi atomici e/o molecolari elementari) nelle ordinarie applicazioni ingegneristiche.

Per valutare correttamente la situazione è sufficiente un bilancio energetico.

Per ridurre allo stato atomico o comunque allo stato di plasma una tonnellata di rifiuto di composizione standard sarebbero necessarie potenze elettriche dell'ordine di $10 \div 20$ MW_e, mentre nelle ordinarie applicazioni le potenze elettriche utilizzate e/o installate sono dell'ordine di $1 \div 2$ MW_e (od anche inferiori) per tonnellata di rifiuto da trattare.

E evidente che aumentando la potenza specifica si aumentala quantità di energia trasferita al materiale da trattare e quindi è necessario valutare caso per caso le condizioni operative da utilizzare, in relazione ai risultati desiderati.

In pratica comunque si può ritenere che il processo al plasma sia un processo di gassificazione – pirolisi del rifiuto in ingresso, per cui ad esso si possono applicare alcune delle considerazioni precedentemente fatte.

Volendo entrare in un maggior dettaglio si può osservare che le principali reazioni che hanno luogo sono:

- reazioni di cracking termico e cinetico per cui le molecole più grandi vengono suddivise in altre più piccole e leggere sino a raggiungere frazioni volatili.

Si ha anche formazione di un residuo carbonioso (particolato) che viene trasportato con i gas ad elevata temperatura.

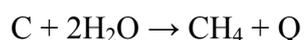
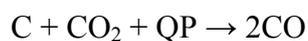
Questo insieme di reazioni è fortemente endotermico e porta alla formazione di idrocarburi gassosi ed idrogeno;

- ossidazione parziale della matrice carboniosa (in presenza di ossigeno nel materiale da trattare e/o in conseguenza dello invio di ossigeno e/o aria nel reattore), con formazione di monossido di carbonio (CO) ed altri prodotti.

Queste reazioni sono esotermiche e forniscono energia al processo contribuendo a diminuire la potenza elettrica da fornire alle torce.

Si possono avere anche processi di ossidazione completa di carbonio ed idrogeno con formazione di H₂O e CO₂, con vantaggio delle reazioni esotermiche, ma con diminuzione delle caratteristiche energetiche del syngas prodotto;

- reazioni di reforming che portano alla formazione di nuovi prodotti come: (QP = calore da plasma, Q = calore)



A causa delle elevate temperature che si hanno nel processo sono favorite specie come idrogeno e monossido di carbonio, più stabili a questi livelli termici rispetto ad anidride carbonica e metano.

Appare ad ogni modo evidente da quanto detto che il flusso energetico alle torce deve essere condizionato dagli obiettivi.

Se si desiderano temperature molto elevate nel materiale da trattare, ad es. per ottenerne la frazione (fusione delle scorie, vetrificazione di materiali residui, etc.) con temperature locali dell'ordine di

1500 ÷ 2000 K ed anche superiori, i flussi energetici debbono essere molto elevati (parecchi MW_e per tonnellata di scorie).

Se l'obiettivo è diverso, ad es. lo ottenimento di un syngas a temperatura dell'ordine di 800 ÷ 1000 K come nei processi di ordinaria gassificazione e/o pirolisi, gli input energetici diventano molto più contenuti, tenendo anche eventualmente conto di possibili reazioni esotermiche che si innescano a tali temperature in presenza di ossigeno.

Il processo comunque deve essere specializzato in relazione ai risultati che si desidera ottenere.

1.2.6. Ossicombustione (combustione senza fiamma).

E' un processo di combustione che può essere applicato in linea di principio a combustibili gassosi, liquidi e solidi.

Consiste nell'impiego di ossigeno come ossidante ed è caratterizzato da una forte ricircolazione dei gas di scarico.

Poiché la combustione in ossigeno produce essenzialmente CO₂ e H₂O, sostanze queste che sono fortemente attive nel campo dello infrarosso, si ha all'interno del combustore un forte campo radiante (in IR) che, unito al mescolamento turbolento opportunamente ottenuto, favorisce il raggiungimento di una forte omogeneità nel reattore.

Non si ha quindi una localizzazione della fiamma (fronte di fiamma, etc.) e per tale motivazione si parla di combustione senza fiamma.

In genere si opera a temperature dello ordine di 1700 ÷ 2000 K, con temperature di parete del reattore anch'esse molto alte (1500 ÷ 1700 K), in modo da favorire ulteriormente lo scambio radiativo.

Date le elevate temperature si ha in genere la fusione delle eventuali ceneri e scorie.

La produzione di ossidi di azoto è limitata dal fatto che anche in presenza di alte temperature la concentrazione di ossigeno è limitata dalla consistente diluizione con i gas di scarico, costituiti essenzialmente da CO₂ ed H₂O.

La assenza di azoto aumenta la concentrazione di CO₂ e ne facilita lo eventuale sequestro.

1.3. Tipi di impianti.

Vengono nel seguito analizzati i principali tipi di realizzazione impiantistiche che fanno riferimento ai processi che sono stati precedentemente presi in considerazione.

Per alcuni processi, come si vedrà, le realizzazioni impiantistiche sono abbondanti e tra loro differenziate, per altri la casistica è più limitata ed in alcuni casi può limitarsi alla messa in opera di sistemi pilota od a scala sub industriale.

1.3.1. Impianti di combustione convenzionale.

I sistemi di combustione ritenuti convenzionali, pur se adattati ed in linea con le più moderne tecnologie, sono sostanzialmente (nel campo del trattamento rifiuti):

- i forni rotanti,
- i forni a griglia,
- i forni a letto fluido.

Questi sistemi (specie rotanti ed a griglia) sono presenti in tutto il mondo in centinaia di esemplari per questo tipo di applicazione.

Le loro prestazioni e le loro caratteristiche vengono esaminate nel seguito.

FORNI A GRIGLIA

Configurazione di base.

I forni a griglia costituiscono la tecnologia più consolidata e, come tale, di più largo impiego nella combustione dei rifiuti solidi, in particolare di quelli urbani, grazie alla flessibilità che ne caratterizza il funzionamento ed all'affidabilità pratica derivante dalle numerosissime applicazioni. Installazioni di questo tipo sono applicate per un ampio intervallo di potenzialità, compreso tra qualche decina di $t\ g^{-1}$ ($40-50\ t\ g^{-1}$) per gli impianti più piccoli sino a $800-1000\ t\ g^{-1}$ per quelli di maggiori dimensioni. I forni a griglia comportano comunque notevoli economie di scala per le grandi taglie e sono economicamente meno convenienti per le piccole taglie, in genere anche in ragione dei più bassi rendimenti di recupero. Nella loro configurazione generale essi sono costituiti da un sistema di alimentazione che, tramite una tramoggia di carico ed opportuni dispositivi di spinta, distribuisce il rifiuto sulla superficie della griglia: quest'ultima, che è l'elemento caratterizzante del forno, deve supportare il materiale durante la combustione rimescolando adeguatamente la massa solida, per favorirne il contatto con l'aria comburente, e provocarne nel contempo l'avanzamento verso la parte finale, ove avviene lo scarico dei residui incombusti del processo. Per poter svolgere in maniera ottimale tali funzioni la griglia è normalmente inclinata verso la sezione di uscita del forno ed è costituita da una serie di parti mobili che, nelle diverse configurazioni disponibili, assumono la forma di gradini, barrotti longitudinali o cilindrici o elementi basculanti; non mancano, peraltro, esempi di griglie fisse che, tuttavia, non vengono attualmente applicate allo smaltimento dei rifiuti urbani.

Sulla superficie della griglia il rifiuto si dispone sotto forma di letto di combustione che è in genere abbastanza spesso, dell'ordine almeno di qualche decina di centimetri, in modo da mantenere caratteristiche di combustione medie il più possibile costanti anche in presenza di variabilità e / o irregolarità nell'alimentazione. Lungo lo sviluppo longitudinale della griglia il rifiuto subisce dapprima un processo di essiccamento che avviene nella zona prossima all'alimentazione: le sostanze volatili che si liberano sono in gran parte costituite dall'umidità evaporata ed il rilascio di calore risulta modesto. Successivamente, sulla parte centrale della griglia il materiale essiccato, tramite fenomeni di combustione e gassificazione della componente organica, viene convertito in una frazione gassosa ed in un residuo solido incombusto, con la composizione dei gas prodotti che è sostanzialmente controllata dall'equilibrio della reazione del gas d'acqua:



Le scorie residue del processo vengono scaricate dalla parte finale della griglia con opportuni sistemi in vasche di accumulo a bagno d'acqua, per provvedere anche alloro raffreddamento, ed in genere miscelate con quelle più fini che passano attraverso la griglia e vengono raccolte sotto di essa tramite apposite tramogge. Il tempo di permanenza del rifiuto sulla griglia deve essere ovviamente tale da garantire il completamento delle diverse fasi del processo di combustione: in genere i valori adottati variano tra 30 e 60 min. Per garantire maggior flessibilità al processo, in corrispondenza delle inevitabili variazioni qualitative dell'alimentazione, l'avanzamento del rifiuto è altresì normalmente regolabile in modo indipendente per ogni zona della griglia (tramite il controllo della velocità di movimento degli elementi mobili).

Il parametro di maggior interesse per la valutazione delle prestazioni complessive della griglia è costituito dal carico termico superficiale, che deve essere idoneo ad assicurare un'elevata efficienza di combustione con tempi di residenza ragionevoli. Esso rappresenta, in pratica, la quantità di calore sviluppata dalla combustione del rifiuto per unità di tempo che l'unità di superficie della griglia è in grado di sopportare: i valori medi di più comune adozione pratica si collocano nell'intervallo $400.000 - 800.000 \text{ kcal m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ anche se non mancano esempi di installazioni che consentono valori superiori.

L'aria comburente necessaria al processo viene alimentata in parte sotto la griglia ed in parte sopra il letto di materiale, in modo da permettere il completamento della combustione. In linea generale la portata fornita sottogriglia (aria primaria) equivale grosso modo al volume d'aria stechiometrica richiesto dall'ossidazione del rifiuto, mentre quella iniettata al di sopra di essa (aria secondaria) corrisponde all'eccesso d'aria necessario per la combustione, e viene anche utilizzata per il controllo della temperatura.

Il completamento dell'ossidazione dei prodotti di gassificazione e pirolisi (CO , H_2 , idrocarburi leggeri, particolato a base anche organica) presenti nella fase gassosa proveniente dal letto di materiale sulla griglia avviene nella zona immediatamente superiore alla griglia stessa, che costituisce la camera di combustione del forno. Essa deve fornire un buon mescolamento tra i gas provenienti dal letto e l'aria secondaria, assicurando quindi contemporaneamente adeguate condizioni di turbolenza e disponibilità di ossigeno. I sistemi di immissione dell'aria secondaria devono essere opportunamente configurati, in modo che i getti possano interessare tutta la regione di combustione senza creare zone fredde che possono portare ad un rallentamento, o addirittura all'arresto, delle reazioni di conversione. Anche i tempi di residenza dei gas debbono essere idonei: in generale si adottano valori compresi tra i 2 e i 5 - 6 secondi. Il volume totale della camera è in genere tale da assicurare intensità volumetriche di combustione comprese tra 60.000 - 70.000 e 150.000 - 200.000 $\text{kcal m}^{-3} \text{h}^{-1}$.

Tendenze evolutive

Le principali linee di sviluppo della tecnologia di combustione dei rifiuti con forni a griglia comprendono alcune modifiche alla configurazione di base del sistema, orientate tanto al miglioramento delle sue prestazioni complessive che alle necessità di adeguarne alcune caratteristiche all'aumento pressoché generalizzato del potere calorifico dei rifiuti. A quest'ultimo proposito va segnalato come uno dei requisiti fondamentali della griglia, legato alla necessità di mantenerne un adeguato grado di copertura per contenere i fenomeni di usura legati ad eventuali surriscaldamenti, possa renderne problematica l'applicazione a combustibili con modesto contenuto di ceneri (inferiore al 15%-20% in peso) e PCI piuttosto elevati (3500 - 4000 kcal kg^{-1}), caratteristici di alcune tipologie di CDR.

Per ciò che si riferisce alla griglia vera e propria le modifiche di più recente introduzione riguardano i seguenti aspetti:

- diminuzione della inclinazione della griglia correlata alla maggiore facilità di combustione dei rifiuti che quindi richiedono una minore movimentazione. In alcuni casi si ricorre a griglie orizzontali al fine di controllare completamente la movimentazione dei rifiuti;
- configurazione della griglia idonea a limitare il trascinamento di polveri (minori salti);
- ottimizzazione della distribuzione dell'aria primaria sotto griglia finalizzata sia all'ottimizzazione del processo di combustione e del raffreddamento che alla riduzione del particolato trascinato;

- riconsiderazione della lunghezza della griglia in relazione alla maggiore facilità di combustione dei rifiuti, al fine di evitare zone non operative (non completamente coperte dal letto di materiale) e quindi soggette a maggiore usura;
- impiego di griglie raffreddate ad acqua per diminuire l'usura e rendere più facile l'applicazione con rifiuti ad elevato potere calorifico ($3500 \div 4000 \text{ kcal kg}^{-1}$);
- possibilità di scaricare le scorie con estrattori a secco per facilitarne la manipolazione e l'eventuale recupero di frazioni potenzialmente interessanti (metalli ferrosi e non ferrosi, frazioni grossolane inerti).

All'incremento del potere calorifico dei rifiuti è da associarsi l'evoluzione della configurazione della camera di combustione da un percorso fumi-rifiuto in controcorrente ad uno equicorrente. Il primo caso si presta particolarmente a materiali con basso potere calorifico ed elevata umidità, grazie al maggior tempo di contatto del rifiuto alimentato con i gas caldi, mentre il secondo è particolarmente indicato per rifiuti a potere calorifico e contenuto di volatili più elevato: configurazioni intermedie tra le due appaiono caratterizzate dal maggior grado di flessibilità. Sempre in relazione all'aumento del potere calorifico sono da ricondursi le necessità di provvedere ad un raffreddamento delle pareti in alcune zone del forno, per evitare le complicazioni gestionali derivanti dalla formazione di incrostazioni a seguito di fenomeni di fusione delle scorie. Il raffreddamento, che è divenuto una pratica abbastanza corrente negli impianti più moderni, può essere condotto sia con sistemi che utilizzano acqua o vapore circolanti in tubi esterni a contatto con la fiamma o interni al rivestimento refrattario che tramite aria in condotti interni alle pareti, e viene di norma applicato soprattutto nella zona di combustione immediatamente sopra la griglia. La presenza di zone fredde in corrispondenza delle pareti incrementa, peraltro, le possibilità di incompletezza della combustione dovute a fenomeni di "quenching" delle reazioni: è così necessario porre particolare attenzione all'ottimizzazione dei processi di mescolamento all'interno del forno e provvedere ad un accurato controllo della combustione tramite adeguati sistemi di monitoraggio.

Livelli di temperatura dell'ordine degli 850°C - 900°C sono ritenuti sufficienti, in corrispondenza di adeguati tenori di ossigeno (5% - 6%) e turbolenza, a garantire un coinvolgimento pressoché totale dei componenti organici nei processi di combustione, minimizzando le emissioni di microinquinanti. In tali condizioni le efficienze di conversione sono fortemente controllate dai processi di mescolamento: l'ottimizzazione del processo richiede quindi particolare attenzione ai livelli di turbolenza nella camera di combustione ed alla distribuzione ed alimentazione dell'aria primaria e quella secondaria, uniti alle necessità di evitare perdite di carico eccessive. L'importanza del mescolamento aumenta inoltre con l'incremento della temperatura media, a seguito della

maggior possibilità di fenomeni di impoverimento locale di ossigeno. L'impiego di modelli di simulazione numerica può fornire, a tali propositi, significativi contributi alla determinazione delle configurazioni più opportune della camera, del percorso fumi e dell'alimentazione del comburente.

Nell'ambito della gestione del processo i sistemi di monitoraggio in continuo hanno assunto notevole importanza nel garantire condizioni di funzionamento ottimali e stabili nel tempo. Il controllo della combustione viene generalmente effettuato tramite l'analisi di temperatura, ossigeno e CO all'uscita della camera di combustione e/odi post-combustione; sistemi più moderni prevedono anche la possibilità di analizzare la distribuzione spaziale della temperatura sul letto di combustione tramite sensori all'infrarosso mentre, in prospettiva, l'adozione di sensori laser e l'integrazione delle misure in logiche di controllo avanzate (di tipo "fuzzy") appaiono potenzialmente interessanti.

L'impiego di ossigeno puro o, più generalmente, di aria arricchita presenta aspetti di non trascurabile interesse nel campo dei sistemi di termodistruzione, e dei forni a griglia in particolare. L'arricchimento riduce innanzitutto, a parità di concentrazione di ossigeno in camera di combustione, il volume dei fumi prodotti ed ha quindi un effetto positivo sia sui rendimenti di recupero energetico (minore entalpia allo scarico a parità di temperatura) sia sulle dimensioni dell'impianto. Per contro esso comporta in generale un aumento della temperatura, a cui si può peraltro far fronte attuando una ricircolazione dei gas di scarico, con un concomitante effetto positivo relativo alla riduzione nella formazione di ossidi di azoto. L'adozione di aria arricchita può poi essere di grande interesse nel caso in cui si operi con combustibili di scarso potere calorifico, al fine di rendere più stabile, o al limite di permettere, il processo di combustione. L'aria arricchita, o l'ossigeno, possono essere alimentati sia sotto griglia che sopra la griglia (aria secondaria), abbinandoli ad un eventuale ricircolo dei gas di combustione per controllare adeguatamente la temperatura e promuovere, tramite l'incremento di portata, i processi di mescolamento. L'alimentazione di ossigeno (o di aria arricchita) sotto griglia può peraltro rendere necessaria l'adozione di sistemi di raffreddamento della griglia stessa, per evitare che aumenti locali di temperatura possano comprometterne la funzionalità e la durata: va tuttavia osservato che l'uso dell'arricchimento può essere limitato anche solo ad alcune sezioni della griglia. Nel valutare la fattibilità dell'adozione di tale tecnica vanno anche considerati i seguenti aspetti:

- modalità di approvvigionamento dell'ossigeno (generazione in loco, acquisizione dall'esterno);
- costi di acquisto e gestione;
- possibilità di variare la potenzialità dell'impianto in seguito al minor volume di fumi (se il carico termico lo consente).

Di recente sperimentazione risultano infine alcune tecniche, sviluppate per le combustioni convenzionali, orientate alla riduzione delle emissioni di ossidi di azoto. Le più semplici prevedono una modifica nella ripartizione dell'aria alimentata, riducendo quella primaria ed incrementando quella secondaria, in modo da limitare la presenza di ossigeno nelle zone a temperatura elevata: ciò richiede un accurato controllo del processo, per evitare peggioramenti nell'efficienza complessiva di combustione ed aumenti nelle emissioni di incombusti. Altre esperienze fanno invece riferimento all'utilizzo di tecniche di "reburning" in cui, alla riduzione della portata di aria primaria, viene affiancata l'alimentazione di gas naturale (eventualmente in miscela con gas ricircolato) al di sopra della zona di combustione primaria, in modo da creare un'atmosfera complessivamente riducente, demandando il completamento della combustione alla successiva zona di immissione dell'aria secondaria. Le prove a scala reale condotte sono tuttavia ancora molto limitate e non consentono di trarre indicazioni definitive sulla validità ed applicabilità della tecnica: i risultati ottenuti indicano consumi abbastanza sensibili di gas naturale (10-20% del flusso termico complessivo) e consistenti tempi di permanenza nella zona riducente, con conseguenti necessità di configurazione della camera di combustione non sempre facilmente ottenibili, soprattutto per gli impianti esistenti; il sistema è altresì soggetto a potenziali peggioramenti nell'efficienza di combustione, già evidenziati in precedenza. Allo stato attuale gli interventi più promettenti di riduzione degli NO_x in camera di combustione appaiono basati su processi di riduzione selettiva non catalitica (SNCR) tramite additivazione di ammoniaca o urea, supportata con il ricircolo dei gas, anche in virtù delle loro potenzialità nell'inibire i percorsi di sintesi de-novo responsabili della riformazione di diossine e furani a valle della combustione.

FORNI A TAMBURRO ROTANTE.

I forni rotanti, concettualmente molto semplici, per lo più impiegati attualmente nella combustione di rifiuti industriali pericolosi e non, sono essenzialmente costituiti da un tamburo rotante dotato di opportuna inclinazione (in genere 1-3%) per favorire il movimento del materiale quando sono alimentati con solidi. La combustione del letto avviene direttamente a contatto con la parete del forno, in molti casi rivestita di materiale refrattario: la carica del materiale avviene tramite opportune testate, collocate in corrispondenza di una estremità del forno, mentre lo scarico delle scorie e dei residui avviene all'estremità opposta. I forni rotanti, in quanto tipici forni a suola, sono caratterizzati da una maggior difficoltà di interazione tra combustibile e comburente rispetto a quello ottenibile con altre tipologie di installazioni (ad es. forni a griglia, nei quali l'aria viene insufflata direttamente attraverso il letto): l'efficienza del contatto può tuttavia essere incrementata mediante l'introduzione di strutture interne al tamburo, quali ad es. palettature che trascinano il

materiale verso l'alto e poi lo lasciano ricadere, che intensificando la movimentazione del letto ne migliorano il contatto con il comburente. Pur con tali accorgimenti l'intensità del mescolamento ed i tempi di residenza non sono, in genere, tali da garantire un adeguato completamento della combustione delle sostanze volatili sviluppate dal processo rendendo necessaria, in particolare per la combustione di rifiuti, l'adozione di strutture supplementari di post-combustione a valle del tamburo stesso.

I forni possono operare tanto con configurazioni in equicorrente che in controcorrente, a seconda che il flusso dei gas e del letto di combustibile avvenga nella stessa direzione od in direzioni opposte. Nella maggior parte dei casi, ed in particolare nelle applicazioni relative alla termidistruzione di rifiuti, la configurazione adottata è in equicorrente, ad evitare la maggior estrazione di sostanze volatili ed il loro scarico nei gas caldi tipica del flusso in controcorrente.

Per quel che riguarda le configurazioni costruttive il tamburo rotante può essere costituito da un semplice cilindro di acciaio senza rivestimento, può avere le pareti a tubi d'acqua per produzione di vapore, può essere costruito con pareti a tubi d'acqua intervallati da spazi per il passaggio dell'aria (tipo O'Connor Westinghouse) oppure, come avviene nella maggior parte dei casi, può avere le pareti rivestite in materiale refrattario. In quest'ultimo caso il refrattario, per ragioni costruttive, è posto direttamente a contatto con la parete metallica, senza interposizione di isolante che potrebbe subire fenomeni di distacco a seguito di variazioni di configurazione: la temperatura del mantello metallico esterno può così raggiungere valori dell'ordine dei 300° C (in genere è tra i 200 e i 300° C), con conseguenti dispersioni di calore verso l'esterno non trascurabili. Tale situazione condiziona le dimensioni minime dei forni, ed il diametro in particolare: per evitare eccessive perdite di calore, che possono superare il 10% del bilancio termico globale, è opportuno che i diametri minimi dei forni non siano inferiori a 1,5 - 2 metri, potendosi realizzare anche forni con diametri considerevoli (dell'ordine di 4,5 - 5 metri).

I principali parametri per il dimensionamento e la valutazione delle prestazioni dei forni a tamburo rotante sono l'intensità volumetrica di combustione ($\text{kcal m}^{-3} \text{ h}^{-1}$) e l'intensità di combustione riferita alla sezione del forno ($\text{kcal m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Il primo tiene conto del volume globale del tamburo, e quindi anche della sua lunghezza, ed è legato al tempo di permanenza necessario alla conversione del materiale, strettamente correlato alla natura e tipologia del rifiuto alimentato. Sul tempo di permanenza è possibile peraltro intervenire anche con altri parametri costruttivi, quali il diametro del forno, la sua inclinazione ed il numero di giri del tamburo. Il secondo parametro, rappresentativo del carico termico per unità di sezione, è collegato alle massime sollecitazioni termiche locali. Nei forni attualmente in esercizio l'intensità volumetrica di combustione è in genere compresa tra 50.000 - 100.000 $\text{kcal m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ e 150.000 - 200.000 $\text{kcal m}^{-3} \text{ h}^{-1}$, mentre l'intensità

per unità di sezione varia in genere nell'intervallo $500.000 - 1.000.000 \text{ kcal m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Per quanto riguarda il rapporto lunghezza/ diametro esso è in generale compreso nell'intervallo 2 - 5 (in molti casi è dell'ordine di 3 - 4), mentre la velocità di rotazione varia tra 0,2 ed 1 - 1,2 giri/minuto.

Dal punto di vista operativo le già accennate difficoltà di contatto combustibile/comburente rendono necessaria l'adozione di elevati eccessi d'aria, di norma compresi nell'intervallo 100%-150%. I forni a tamburo possono operare sia sotto il punto di rammollimento delle scorie che al di sopra di esso, con modalità dette appunto "a scoria fusa". Fenomeni di deformazione e fusione delle scorie cominciano a verificarsi attorno a temperature dell'ordine di $1110 - 1200^\circ\text{C}$: tuttavia, data la variabilità del punto di rammollimento, le condizioni di esercizio nei forni del primo tipo prevedono temperature non superiori ai $900 - 950^\circ\text{C}$, mentre le installazioni a scoria fusa possono raggiungere anche i $1400-1600^\circ\text{C}$. L'esercizio a scoria solida è più semplice e sollecita meno i refrattari mentre quello a scoria fusa garantisce migliori condizioni di combustione ma richiede, ovviamente, criteri di progettazione e di gestione più attenti.

La flessibilità del tamburo rotante nel trattare materiali con caratteristiche assai eterogenee, sia in termini di stato fisico (solido, liquido in fusti e non, fangoso) e pezzatura che di caratteristiche termiche, ne ha fatto l'installazione di più larga diffusione per la termodistruzione di rifiuti industriali. Le efficienze di combustione più ridotte rispetto ai forni a griglia, pur se attenuate dalla presenza della camera di post-combustione, ne rendono invece meno interessante l'utilizzo ai rifiuti urbani e prodotti da essi derivati. Non mancano, infine, esempi di applicazione di tali apparati operanti in difetto d'aria, inseriti in sistemi di gassificazione e pirolisi di prodotti residui di varia natura.

FORNI A LETTO FLUIDO

Il combustore a letto fluido è essenzialmente costituito da un cilindro verticale in cui il combustibile viene tenuto in sospensione (fluidificato) da una corrente d'aria inviata attraverso una griglia posta alla base del cilindro stesso. In molti casi il cilindro contiene un inerte, miscelato al materiale da bruciare all'atto dell'alimentazione, allo scopo di favorire i processi di scambio termico e fornire sufficiente inerzia termica al sistema, in modo da regolarizzare il processo di conversione. Un tipico inerte è costituito da sabbia.

In linea generale i reattori a letto fluido, sulla base della pressione di esercizio, si differenziano innanzitutto in letti fluidi a pressione atmosferica e letti in pressione. Questi ultimi, applicati a diversi processi in campo industriale, presentano particolare interesse per la loro potenzialità nel consentire l'integrazione tra termodistruzione e recupero energetico, tramite il loro inserimento come combustori in cicli di turbina a gas: tuttavia, le attuali problematiche nel trattamento dei gas

prodotti prima dell'invio in turbina ne limitano ancora l'applicazione al caso dei rifiuti, per i quali si adottano quasi esclusivamente letti a pressione atmosferica.

Nel campo dei letti a pressione atmosferica un'ulteriore suddivisione, relativa alle modalità di fluidificazione, distingue tra combustori convenzionali (o a letto bollente) ed a letto ricircolato. La distinzione si basa sui valori della velocità superficiale dell'aria (velocità di fluidizzazione), definita come rapporto tra la portata di aria alimentata (riferita, ad esempio, alle condizioni di temperatura e pressione al di sopra del letto) e la sezione del letto stesso, che costituisce il parametro che condiziona significativamente il regime di funzionamento del reattore. I letti fluidi convenzionali, costituiti essenzialmente da una colonna in cui l'aria viene insufflata dal basso ed il combustibile iniettato dall'alto o lateralmente, presentano velocità di fluidificazione dell'ordine di 3 m/s^{-1} nei letti ricircolati tale velocità raggiunge anche valori di $8 - 10 \text{ m s}^{-1}$ (comunque superiori ai $4 - 5 \text{ m s}^{-1}$) e determina un consistente trascinamento di materiale dal letto all'uscita del reattore, che viene separato tramite un ciclone e ricircolato nel reattore stesso. A fronte di una configurazione impiantistica più complessa i letti ricircolati presentano turbolenze più elevate, con conseguenti miglioramenti nell'efficienza di combustione e di scambio termico e nella riduzione delle disomogeneità trasversali, ed un tempo di contatto molto prolungato (grazie al ricircolo) che ne consentono l'operazione con carichi termici specifici assai elevati: i costi più elevati rispetto ai reattori convenzionali bollenti ne giustificano tuttavia l'adozione solo per potenzialità significative. Oltre che per specifiche applicazioni industriali il letto fluido ha trovato ampia diffusione nella combustione del carbone, della torba, di residui industriali ed agricoli (biomasse), tal quali o in miscela, ed in generale di solidi non polverizzabili. Le caratteristiche di funzionamento che ne rendono molto interessante l'utilizzo nei processi di combustione sono essenzialmente così riassumibili:

- elevata efficienza di combustione determinata sia dal grado di turbolenza che, soprattutto, dagli elevati tempi di residenza (non inferiori ai 5 – 6 secondi);
- basso contenuto di organico delle scorie. Processi ben condotti determinano tenori di incombusti nelle scorie anche inferiori allo $0,5 \div 1\%$: nei forni a griglia tali tenori sono dell'ordine di $1 \div 3 \%$;
- unità più compatte rispetto ai forni convenzionali come conseguenza dei maggiori carichi termici specifici applicabili;
- buona flessibilità rispetto al carico, ottenibile tramite il controllo dell'aria di combustione, anche in un ampio intervallo del carico specifico. L'elasticità di funzionamento è anche da attribuirsi all'inerzia termica del letto di materiale inerte;
- possibilità di operare in modo discontinuo a causa dei minori tempi di accensione e

spegnimento. Anche questa caratteristica è in buona parte collegata alla presenza del letto di inerte;

- ridotto numero di parti meccaniche in movimento e quindi, almeno in linea di principio, minori possibilità di interventi di manutenzione straordinaria dovuti a rotture e/o guasti;
- possibilità di operare con bassi eccessi d'aria (%), in quanto la temperatura è controllata anche mediante scambio termico (regime non adiabatico) e l'intensità di miscelazione è molto elevata. Questo comporta un minore volume di fumi, con effetti positivi sui rendimenti di recupero energetico e sulle dimensioni degli apparati di controllo delle emissioni;
- possibilità di adottare interventi di controllo delle emissioni in fase di combustione, sia tramite l'iniezione di additivi (tipicamente per la riduzione dei gas acidi) che per mezzo di opportune tecniche di conduzione della combustione stessa (riduzione degli ossidi di azoto).

A fronte di tali vantaggi la sua applicazione alla combustione dei rifiuti solidi urbani, o di prodotti da essi derivati, deve considerare le seguenti problematiche:

- possibilità di defluidificazione del letto dovuti all'insorgere di fenomeni di agglomerazione di ceneri basso fondenti;
- necessità di pretrattamenti più o meno spinti dei rifiuti,, finalizzati ad omogeneizzare le caratteristiche dimensionali del materiale alimentato per facilitarne la miscelazione e soprattutto lo scarico delle parti incombuste. Vanno segnalate, a tale ultimo proposito, configurazioni dei reattori in cui, grazie ad una differenziazione nella velocità di alimentazione dell'aria lungo la piastra inferiore di distribuzione, si creano moti rotatori che facilitano l'allontanamento delle scorie (letti fluidi rotanti);
- necessità di aumentare i punti di alimentazione del materiale o di incrementare la velocità di fluidificazione per insufficienze nel mescolamento trasversale;
- difficoltà di alimentazione dei rifiuti leggeri (ad es. RDF fluff), soprattutto per velocità di fluidificazione elevate (letti ricircolati);
- necessità di mantenere eccessi d'aria superiori a quelli strettamente richiesti per rispettare le normative che, per la combustione di rifiuti, richiedono generalmente valori minimi di ossigeno pari al 6%. Ciò si riflette, oltre che in una penalizzazione delle potenzialità del sistema, anche in un incremento dei consumi energetici, già di per sé elevati, per alimentare l'aria in eccesso;
- scarsa influenza dei vantaggi relativi alle migliori caratteristiche delle emissioni atmosferiche in virtù delle necessità di adottare comunque complessi sistemi di controllo a valle, a seguito delle restrizioni pressoché generalizzate nelle corrispondenti normative;

- necessità di ampliare le esperienze applicative del sistema a scala reale, soprattutto per i rifiuti tal quali e per i letti riciclati da considerarsi tuttora in fase di sviluppo tecnologico.

Sulla base di queste considerazioni e facendo riferimento ai forni convenzionali a griglia si può ritenere che il letto fluido presenti interessanti possibilità di applicazione per combustibili con poteri calorifici elevati e basso tenore di inerti, quali quelli ottenibili da operazioni di selezione e trattamento dei rifiuti urbani grezzi (ad es. RDF fluff e simili) che, come già illustrato, possono determinare notevoli difficoltà nella gestione delle griglie stesse.

Va ancora ribadito che i letti fluidi richiedono una alimentazione costante, in particolare per quanto riguarda la pezzatura che deve essere abbastanza uniforme e ridotta per favorire la sospensione. La elevata inerzia termica del letto, se da un lato ha effetti positivi, può d'altra parte avere come effetto una risposta lenta alle rapide variazioni di carico. Come già evidenziato il letto fluido deve essere specializzato in relazione alla tipologia del combustibile in alimentazione, per cui appare problematica una alimentazione con diversi tipi di combustibili (quali RSU, RSA, CDR, FSC, ecc.) da soli o congiuntamente, come può essere richiesto nell'ottica di una gestione integrata dello smaltimento dei rifiuti.

In generale inoltre i letti fluidi comportano un elevato trascinarsi di particolato con le conseguenze del caso (maggiore carico sul sistema di abbattimento, sporcamento delle superfici di scambio e possibili fenomeni erosivi, ecc.).

1.3.2. Gassificazione e pirolisi.

Gassificazione e pirolisi vengono esaminate insieme in quanto, come anche già rilevato, non sempre appare semplice effettuare una chiara distinzione.

Sono state messe in campo numerose realizzazioni impiantistiche che però non sempre hanno portato a progetti industriali.

Si osserva anche una differenziazione per aree geografiche (Europa, Giappone) nel tipo di diffusione ed anche nelle caratteristiche impiantistiche in molti casi.

Si esamineranno la situazione in Europa e quella in Giappone che sono le aree di maggior interesse per quanto riguarda tali tipologie impiantistiche.

a) Europa.

Diverse tipologie impiantistiche sono state messe in campo in Europa (e tali tipi di tecnologie sono state anche trasferite altrove con successo, come si vedrà), ma si può rilevare che in generale, escluse alcune specifiche situazioni come il caso della piattaforma Energos di seguito discusse, non si è arrivati ad una applicazione industriale consistente, per una serie di motivazioni non facili da

spiegare, ma che oltre a problematiche di tipo impiantistico e gestionale fanno anche riferimento a valutazioni economiche connesse con la rilevanza dei costi di sviluppo delle tecnologie.

Si ricordano comunque i principali tipi di realizzazione.

- **Processo Ansaldo Aerimpianti.**

Questo processo è stato realizzato presso l'impianto di Greve in Chianti e tratta circa 200 t/giorno di RDF (PCI \cong 6.000 kJ/kg).

La gassificazione avviene in due letti fluidi circolanti alla temperatura di circa 900° C, producendo circa 18.000 ÷ 20.000 Nm³/h di syngas a PCI \cong 5000 kJ/Nm³ (escluso il TAR).

Il gas prodotto viene bruciato direttamente (combustione e post – combustione) con successivo recupero energetico per produzione di energia elettrica.

La conversione del carbonio è dello ordine del 95%.

- **Processo KWU Siemens.**

Tale sistema abbina la pirolisi alla combustione ad alta temperatura ed impiega rifiuto tritato.

Il reattore di pirolisi è costituito da un tamburo rotante operante a temperatura abbastanza bassa (\cong 450° C), riscaldato dai gas caldi prodotti dalla combustione di combustibile ausiliario e syngas.

I gas in uscita dal tamburo vengono sottoposti ad un processo di combustione in una camera alimentata con aria, in modo da garantire elevata conversione del carbonio e basse emissioni di NO_x (ricircolo fumi e combustione a stadi).

Si ha poi recupero energetico in generatore di vapore per produzione di energia elettrica e/o cogenerazione e successiva depurazione dei fumi.

Il residuo carbonioso di pirolisi, dopo la separazione delle parti grossolane, viene alimentato alla camera di combustione insieme alle ceneri di caldaia ed alle ceneri volanti di depurazione fumi.

- **Processo Noell.**

Anche in questo caso si ha una prima fase di pirolisi del rifiuto tritato in un tamburo rotante che opera ad una temperatura di circa 550° C.

Il prodotto, che contiene una frazione condensabile ed un residuo solido, viene poi avviato al gassificatore che opera con ossigeno puro ad una pressione di 25 bar.

Al gassificatore viene anche alimentato il residuo solido di pirolisi dopo vagliatura.

Dopo la pirolisi si ha un raffreddamento con acqua, con produzione di particolato fine, tar ed oli, alimentati al gassificatore.

Il syngas uscente dal gassificatore viene poi sottoposto a successivo raffreddamento e depurazione per essere avviato allo utilizzo (come combustibile o come gas di sintesi, etc.).

- **Processo Thermoselect.**

Anche in questo caso si ha una pirolisi ed una successiva gassificazione con ossigeno, senza pretrattamento dei rifiuti.

La pirolisi avviene in un canale orizzontale riscaldato dall'esterno.

Il rifiuto è compresso fino a circa 2000 kg/m³) e produce una frazione gassosa ed un residuo solido successivamente gassificati con O₂ in un reattore verticale a letto fisso con temperature comprese tra 1600 e 2000°C.

Nel canale di pirolisi riscaldato con i fumi da combustione del gas, si raggiungono temperature della massa in ingresso reattore dell'ordine di 600° C.

Il gas prodotto a circa 1200° C viene raffreddato fino a circa 90°C con acqua ed avviato successivamente ai trattamenti di depurazione, per poi passare allo utilizzo in motori, etc.

La compressione del rifiuto ne riduce la umidità e limita lo apporto di calore necessario.

- **Processo Energos.**

In tale processo la gassificazione con aria avviene in una camera di precombustione in cui il rifiuto viene alimentato tramite una griglia, con aria sotto griglia dell'ordine circa del 50% dell'aria stechiometrica.

La combustione del gas prodotto avviene in una camera che segue la zona di gassificazione.

Viene utilizzato un forte ricircolo dei gas (fino al 30 ÷ 35%) per controllare la temperatura e la formazione degli ossidi di azoto.

Dopo la combustione si ha recupero energetico e trattamento fumi per controllo emissioni.

La tecnologia complessiva del sistema gassificatore – combustore è molto simile a quella dei forni a griglia.

Questa tecnologia attualmente ben referenziata con impianti operanti in Norvegia, Germania ed Inghilterra, è anche caratterizzata da:

- presenza di unità modulari nel campo delle taglie medio piccole con dimensioni impiantistiche contenute,
- elevata flessibilità in relazione alla possibilità di trattare diversi flussi di rifiuti (RSU, FSC, CDR, RSA) anche con caratteristiche fisiche diverse (ad es. pezzatura), come per altro si riscontra in genere nei sistemi a griglia,

- buona possibilità di un miglior controllo delle emissioni in fase di combustione, in relazione al fatto che si opera in pratica con un combustibile gassoso (ad es. per controllo di ossidi di azoto, ecc.),
- affidabilità del tutto comparabile con quella dei sistemi a griglia convenzionali.

In Europa attualmente sistemi di pirolisi – gassificazione di taglia consistente non sono particolarmente diffusi nel settore rifiuti, anche se da quanto precede risulta che diverse tecnologie sono state sperimentate anche a livello di realizzazione industriale.

Praticamente solo il sistema Energos è attualmente operante nel Nord Europa con quattro ÷ cinque impianti della potenzialità di circa 30.000 ÷ 40.000 t/anno, con risultati ritenuti soddisfacenti sia dal punto di vista dello smaltimento che del recupero energetico e delle emissioni.

b) Giappone.

In relazione ai processi qui considerati la situazione è molto diversa in Giappone, dove derivando tecnologie dalle industrie dell'acciaio e mantenendo anche esperienze europee che qui sono state abbandonate (Siemens, Thermosteel), sono stati realizzati negli ultimi anni un numero molto elevato di impianti che operano in modo soddisfacente.

Attualmente in Giappone operano oltre cento impianti di pirolisi – gassificazione che fanno capo a diverse tecnologie e ad un numero elevato di costruttori (circa venti), con un tonnellaggio complessivo ordinato per impianti di pirolisi – gassificazione paragonabile o superiore a quello degli impianti classici di trattamento termico dei rifiuti.

Va anche segnalato che in genere gli impianti di gassificazione nel contesto qui considerato, operano con RSU tal quali e non con loro derivati (FSC e/o CDR).

Vengono nel seguito sinteticamente considerate le principali tecnologie realizzate.

- **Gassificazione classica** (denominata shaft).

Questa tecnologia è sostanzialmente derivata dalla industria metallurgica. La gassificazione avviene in un reattore in genere con ossigeno e/o aria arricchita ed i gas di sintesi (syngas) vengono immediatamente sottoposti a combustione a valle del gassificatore. Alla combustione segue la depurazione fumi convenzionale. Gli impianti sono dotati di recupero energetico

Sono operanti od in costruzione circa cinquanta impianti di questo tipo.

- **Pirolisi con forno rotante.**

Tali impianti sono in genere di derivazione Siemens.

La gassificazione, in ambiente neutro (azoto), avviene in un tamburo rotante per scambio termico (pirolisi) ad una temperatura dell'ordine di 450° C.

Il fluido caldo è aria che viene portata ad elevata temperatura tramite uno scambiatore di calore inserito in zona di combustione. Il syngas prodotto viene sottoposto a combustione a valle della produzione. Si ha quindi la depurazione fumi. Il calore viene recuperato per produzione di energia. Sono operanti (od in avanzata fase di realizzazione) circa quindici impianti di questo tipo.

- **Letto fluido.**

In questo caso la gassificazione viene effettuata in un letto fluido.

Anche qui, dopo la gassificazione, il syngas viene avviato alla combustione ed i fumi, dopo il recupero di calore, sono avviati alla depurazione in una linea di trattamento classica.

Si ha in generale produzione di energia elettrica.

Esistono circa trentacinque impianti di questo tipo.

- **Gassificazione con depurazione syngas** (denominato convert).

Tale processo è di derivazione Thermoselect.

Il syngas, prodotto a temperatura molto elevata con impiego di ossigeno, viene sottoposto a trattamento di depurazione prima dello utilizzo (ad es. in motori alternativi o in turbine a gas o come gas sintetico nell'industria, etc.). Dopo la combustione nel caso di tale tipo di impiego del syngas, è richiesto un trattamento per il controllo degli ossidi di azoto.

Esistono attualmente sette impianti facenti capo a questa tecnologia.

Va comunque considerato che le problematiche di depurazione del syngas sono consistenti, specie se l'impiego avviene in motori che richiedono caratteristiche del combustibile in alimentazione molto controllate (ad es. turbine a gas).

In tutti gli impianti si ha la fusione delle ceneri e delle scorie, che in tale stato sono estratte dal sistema (gassificatore e/o combustore) e vengono poi solidificate con passaggio in acqua.

Le taglie degli impianti o delle piattaforme variano in un ampio campo, da qualche decina a qualche centinaio (400 ÷ 500) di tonnellate/giorno.

La taglia degli impianti è legata al fatto che si tende a smaltire localmente il rifiuto e quindi tale parametro è legato al bacino di utenza.

Per quanto riguarda il materiale in alimentazione, oltre ai rifiuti urbani vengono alimentati anche i rifiuti industriali ed RDF.

Da tale punto di vista gli impianti sono da ritenere abbastanza flessibili.

Il potere calorifico varia in un ampio campo (8.000 ÷ 20.000 kJ/kg) ed in alcuni casi, per ragioni anche non connesse con le caratteristiche del sistema di smaltimento, si ha un pretrattamento e triturazione (ad es. per esigenze di trasporto, etc.).

In generale, viene anche immesso nel gassificatore un combustibile addizionale (coke, metano, etc.) in percentuali dello ordine del 5 ÷ 10% del flusso termico in ingresso per ottimizzare il processo (maggiore controllo, stabilità, etc).

La affidabilità degli impianti è più che soddisfacente con ore di funzionamento annue dell'ordine di 7.500 ÷ 8.000.

1.3.3. Sistemi al plasma.

Come già messo in evidenza i sistemi al plasma sono in grado di trasferire energia al materiale da termodistruggere in funzione della potenza immessa nelle torce.

Applicazioni anche nel caso di grandi taglie di impianti (dell'ordine delle centinaia di t/giorno da trattare) sono possibili, ma le potenze da installare sono molto grandi se si vuole andare oltre un processo di normale gassificazione/pirolisi del rifiuto, per altro ottenibile anche con altre tecniche meno complesse e dispendiose

Non si hanno informazioni circa lo impiego del plasma in modo continuo ed operativo su impianti di questo tipo.

Per altro il plasma è tecnologia impiegata per specifiche problematiche, quali ad esempio la vetrificazione delle scorie, la distruzione di residui pericolosi o di particolare tipo (ad es. amianto), dove le limitate portate consentono lo impiego di potenze specifiche molto elevate (kW/kg da trattare) senza dover installare potenze elettriche estremamente rilevanti.

1.3.4. Dissociazione molecolare.

Il processo, come già messo in evidenza, ricade tra quelli di tipo pirolitico e/o gassificazione.

E' caratterizzato dalle basse temperature rispetto ad altri tipi di processo e dal fatto di operare in discontinuo.

La formazione del gas di sintesi avviene in celle che vengono caricate e poi richiuse e richiede, per iniziare, un innesco attraverso ad es. un bruciatore ausiliario.

La durata del processo è di circa ventiquattro ore; si può alimentare rifiuto indifferenziato.

Le celle sono modulari ed hanno capacità da 1 m³ a 90 m³.

Le celle di maggiori dimensioni possono trattare quantitativi di rifiuti dell'ordine di circa 30 t/giorno.

Il syngas prodotto, in uscita dalle celle viene sottoposto a trattamento prima dello utilizzo.

La produzione è discontinua nel caso di un solo modulo, con più moduli la discontinuità si può ridurre.

In base a quanto riportato in letteratura un certo numero di impianti è stato installato specie in zone critiche.

Appare problematico effettuare una valutazione circa le prestazioni impiantistiche e gestionali, in relazione al fatto che non si hanno esperienze dirette nei paesi e nel contesto europeo.

Tenendo conto del tipo di impianto è comunque da ritenere che le problematiche e le prestazioni, almeno in linea di principio, siano quelle caratteristiche di questi tipi di realizzazione.

- **Ossicombustione** (combustione senza fiamma).

Da un punto di vista di principio il processo è nato da tempo (10 ÷ 15 anni), ma si può affermare che dal punto di vista realizzativo il sistema di maggior rilevanza va sotto il nome commerciale di ISOTHERM.

E' stato realizzato un reattore della potenza termica di 5 MW_t che ha operato per 4.000 ÷ 5.000 ore prevalentemente con carbone.

Il reattore opera in pressione (4 ÷ 5 bar) ed è caratterizzato, come già detto, da un forte ricircolo.

Questo reattore dimostrativo, che comunque è parte di un impianto completo (boiler, trattamento emissioni, etc.), deve essere preliminare alla progettazione di un reattore da 50 MW termici da integrare in un ciclo comprendente generatore di vapore in pressione, etc.

Pur essendo, in linea di principio, possibile lo impiego nel campo dei rifiuti e di materiali residui, non si hanno specifici riferimenti a tale riguardo.

1.4. Considerazioni ambientali.

Molte delle spinte ad adottare tecnologie diverse da quelle classiche (griglia, letto fluido, rotante) nel trattamento dei rifiuti e dei materiali residui, derivano dalla necessità, per quanto possibile, di superare le problematiche ambientali che si ritengono connesse con le tecniche tradizionali.

Conviene a questo proposito premettere che per quanto riguarda le tecnologie attualmente prevalenti di combustione, i sistemi di controllo delle emissioni messi in campo sono in grado di assicurare emissioni (gassose, liquide, solide) ampiamente inferiori a quelle previste dalle attuali normative, per altro sempre più restrittive.

Si potrà obiettare che le normative sono carenti, non sufficientemente restrittive, etc, ma d'altra parte esse rispondono a quelli che internazionalmente vengono considerati validi criteri di precauzioni e sicurezza.

Non è ad ogni modo nella presente nota che si deve discutere questo problema.

Ci si deve piuttosto chiedere se le tecnologie non convenzionali sono in grado di limitare ulteriormente le emissioni come viene spesso riportato e dichiarato facendo ad esse riferimento.

La risposta non è semplice e probabilmente non univoca e definitiva.

Va rilevato innanzi tutto il fatto che molte delle problematiche che si hanno nei processi tradizionali nascono non tanto dalle tecnologie ma dalle caratteristiche dei materiali (composizione, stato di aggregazione, etc.), per cui è ovviamente necessario valutare il risultato delle applicazioni delle tecnologie non tradizionali in questo contesto.

Si possono osservare a tale proposito due tipi di tendenze, una che fa riferimento alle basse temperature e l'altra a temperature molto elevate.

Per quanto riguarda le tecnologie a basse temperature ($400 \div 600^\circ \text{C}$) c'è da rilevare che esse portano normalmente alla formazione di un prodotto gassoso che poi deve venire sottoposto a combustione.

Fermandosi a questo ultimo aspetto si può senz'altro rilevare che i risultati del processo dipendono dalle caratteristiche del gas bruciato, ad es. a quale tipo di depurazione è stato sottoposto, etc.

Per quanto riguarda l'impiego di basse temperature, tale procedura influenza le caratteristiche del gas prodotto nel senso, come già evidenziato, di limitare l'apporto energetico e quindi anche il tipo di rottura molecolare.

In sostanza temperature più basse significa frammenti di maggiori dimensioni, etc.

Per quanto riguarda la tecnica ad alte temperature c'è da osservare che esse senz'altro favoriscono le rotture molecolari e la formazione di frammenti semplici, ma se le temperature stesse sono molto elevate ($1500 \div 2000 \text{K}$), si possono avere passaggi in fase gassosa di metalli ed altre sostanze che altrimenti si ritroverebbero allo stato fuso, e quindi sarebbero più facilmente controllabili.

La valutazione delle condizioni operative ottimali è legata in generale alla analisi delle caratteristiche del materiale di partenza.

Volendo riferirsi specificamente alle tecnologie precedentemente ricordate, si può rilevare quanto segue.

In relazione ai processi di gassificazione e pirolisi (ivi compresa la cosiddetta dissociazione molecolare), è necessario distinguere il caso in cui si brucia direttamente il syngas da quello in cui il syngas stesso viene depurato e quindi utilizzato.

Nel caso di combustione diretta del syngas si può trarre qualche vantaggio dalla più ampia possibilità di operare una combustione a stadi, ad es. con forte ricircolo (per limitare la formazione degli NO_x), ed anche di potere limitare, a causa della maggiore facilità di mescolamento, la

concentrazione di ossigeno, in modo da ottenere più facilmente i livelli di temperatura che si ritengono ottimali, ad es. per limitare la formazione di microinquinanti.

Tali procedure sono utilizzate ma è da rilevare che anche in tali tipi di impianti sono installate linee di bonifica fumi del tutto analoghe a quelle dei sistemi tradizionali.

Quando si procede alla depurazione del syngas, che è in generale a temperatura abbastanza elevata, e quindi il trattamento non si presenta semplice, le emissioni sono legate alla composizione finale del combustibile da sottoporre a combustione.

In genere è necessario un sistema di trattamento a valle per gli ossidi di azoto, mentre per gli altri tipi di emissioni è necessario effettuare una specifica valutazione.

Per quanto riguarda i microinquinanti, in particolare di tipo organico, la loro presenza è fortemente legata alla efficienza della depurazione primaria (del syngas).

In generale, però, negli impianti esistenti le problematiche connesse con le emissioni gassose non si discostano fortemente da quelle dei tradizionali termovalorizzatori.

Un aspetto interessante è che in questi impianti in molti casi, in relazione alle elevate temperature disponibili in certe sezioni, si opera la fusione delle ceneri che in generale vengono ottenute dopo raffreddamento in forma vetrificata.

Per quanto riguarda gli impianti al plasma e ad ossicombustione (senza fiamma), si possono fare ipotesi, ma in relazione al fatto che non vi sono impianti a grande scala operanti, non è semplice fare previsioni utili per un confronto.

In relazione ai sistemi al plasma ci si può riferire in prima approssimazione, a quanto detto per impianti di gassificazione e pirolisi, mentre il comportamento dei processi senza fiamma appare più difficilmente estrapolabile senza dati sperimentali ottenuti sul campo e facenti riferimento allo specifico materiale in ingresso.

1.5. Recupero energetico.

Anche in relazione al recupero energetico si tratta di valutare quali siano le caratteristiche dei sistemi cosiddetti non convenzionali rispetto a quelli tradizionalmente utilizzati (griglia, letto fluido, rotante).

Conviene premettere che ad ogni modo, sia per sistemi tradizionali e non, il recupero energetico viene effettuato tramite recupero del calore e produzione di energia elettrica.

Si può recuperare solo calore o solo energia elettrica od entrambe contemporaneamente (cogenerazione).

Attualmente nei sistemi tradizionali il recupero di energia elettrica viene effettuato essenzialmente attraverso generatori di vapore a recupero.

La entità del recupero (rendimento energetico) dipende dal tipo di impianto, dalla taglia, dalle condizioni del territorio (ad es. se sia possibile effettuare o no il recupero di calore per teleriscaldamento ed altri usi), etc.

In generale con il solo recupero di energia elettrica si possono raggiungere rendimenti lordi dell'ordine del 30 ÷ 32% (nei grandi impianti), con il solo recupero del calore rendimenti molto più elevati (70 ÷ 75%) e nel caso di cogenerazione rendimenti intermedi (\cong 45 ÷ 55%).

Considerando gli impianti non convenzionali la possibile differenza consiste nelle possibilità, in questo caso, di potere disporre di un combustibile in fase gassosa che permette una maggior flessibilità, almeno in certe situazioni.

Le possibilità sono quelle di bruciare direttamente il syngas dopo la produzione, oppure depurarlo ed utilizzarlo in specifici sistemi.

Se il syngas viene bruciato direttamente dopo la produzione ad elevata temperatura, non si hanno in genere notevoli differenze rispetto al caso tradizionale.

L'entità del recupero dipende largamente da scelte che non hanno a che fare con il tipo di impianto.

Se il syngas viene depurato può poi essere utilizzato in sistemi dedicati, quali possono essere i motori alternativi e le turbine a gas, che permettono di ottenere rendimenti consistenti con impianti in genere più semplici dei cicli a vapore.

Con i motori alternativi si possono ottenere rendimenti di produzione di energia elettrica superiori al 40%, e nel caso cogenerativo (energia elettrica più recupero di calore), rendimenti complessivi dell'ordine del 70% ed anche superiori.

Nel caso di impiego di turbine a gas si possono ottenere, senza grosse problematiche, rendimenti elettrici superiori al 30% in impianti molto compatti e si può anche poi procedere alla messa in campo di cicli combinati, recuperando il calore di scarico delle turbine a gas in un ciclo a vapore, con rendimenti elettrici complessivi anche ampiamente superiori al 40%.

Questa ultima soluzione è comunque complessa e si può ritenere riservata ad impianti di grande taglia.

Da rilevare ad ogni modo che nella depurazione del syngas e nei processi collegati si ha in genere una perdita di energia dell'ordine del 5 ÷ 10% di quella in ingresso (per processi di raffreddamento, etc.).

Per un bilancio energetico complessivo c'è anche da tenere presente che in molti casi i processi di pirolisi/gassificazione richiedono l'aggiunta di un combustibile addizionale (5 ÷ 10% rispetto al flusso termico in ingresso, come anche precedentemente rilevato).

Quanto sopra f riferimento agli impianti che producono syngas.

In relazione agli impianti di ossicombustione che recuperano calore attraverso un generatore di vapore, si può fare riferimento a quanto detto per gli impianti tradizionali, nel caso di alimentazione a rifiuti, tenendo però conto che lo elevato livello termico dei fumi può in prospettiva permettere applicazioni più spinte.

1.6. Conclusioni.

Sono state esaminate in quanto precede le differenti tecnologie di tipo termico convenzionali (combustione) e non convenzionali applicabili ai rifiuti ed ai materiali residui.

Per quanto riguarda le tecnologie qui denominate convenzionali (griglia, letto fluido, forni rotanti) è disponibile una esperienza molto ampia, sia dal punto di vista tecnologico che gestionale, che permette di fornire delle valutazioni affidabili in relazione al loro comportamento nel settore di applicazione qui considerato (rifiuti), pur nelle possibili incertezze connesse alle caratteristiche del materiale in alimentazione.

In relazione alle tecnologie cosiddette non convenzionali alcuni sistemi sono stati consolidati, almeno in alcune aree, mentre altri sono allo stato di impianto pilota, ad un livello di applicazione tale per cui non appare semplice effettuare una valutazione complessiva del processo (tecnico, gestionale, economico, etc.) che permetta poi un effettivo confronto.

In base alla passata esperienza si può ad ogni modo affermare che solamente una sperimentazione reale sul campo con impianti di taglia industriale permette di avere a disposizione elementi che permettano una realistica comparazione.

In generale, i parametri che vengono presi in considerazione ai fini di una comparazione sono in gran parte legati al problema delle emissioni (almeno per quanto riguarda la valutazione di accettazione), ma anche gli altri aspetti del problema debbono essere attentamente valutati in quanto in stretta relazione con le possibili prestazioni ambientali (ad es. affidabilità, sicurezza di gestione, etc.).

Alcune delle tecnologie precedentemente esaminate sembrano avere applicazioni molto specifiche in relazione ad es. al tipo di materiale da trattare, alle portate, ecc., ed una estensione di tali applicazioni al di fuori del campo di ottimo può portare alla perdita ed alla diminuzione di quelle caratteristiche peculiari che ne costituiscono la caratteristica.

Per altri tipi di applicazioni si ritiene che attualmente non esistano sufficienti e qualificanti esperienze per esprimere un motivato giudizio.

E' da rilevare a tale proposito che in molti casi solo il funzionamento sul campo permette di ottenere quelle informazioni che poi alla fine portano alla ottimizzazione della tecnologia considerata.

In conclusione, tenendo conto che il problema dello smaltimento dei rifiuti e di residui è pressante e tende ad aggravarsi, appare del tutto positivo che vengano poste sul mercato sempre nuove e/o più sofisticate soluzioni, ma è anche necessario rendersi conto che ogni soluzione va convenientemente testata e che inoltre l'apparire di possibili alternative non deve essere un freno ed un pretesto per non effettuare una scelta.

1.7. Recupero energetico dal CDR (combustibile derivato dal rifiuto).

Tra i possibili trattamenti termici si può anche annoverare, indirettamente, la produzione di CDR (combustibile derivato dal rifiuto), in quanto tale materiale è destinato a processi di combustione o similari (gassificazione, pirolisi, ecc.) come sbocco finale (in impianti dedicati oppure in co-combustione in impianti esistenti).

Il CDR nelle sue due tipologie (CDR di qualità normale e CDR di qualità elevata, Tab. 1.1) è regolato da una precisa normativa (DM 5 febbraio 1998 e smi) che ne fissa tra l'altro le caratteristiche energetiche ed i limiti di composizione.

Tab. 1.1: Caratteristiche di legge per il CDR di qualità normale ed elevata

Caratteristica	CDR di qualità normale		CDR di qualità elevata	
	unità di misura	limite di accettabilità	unità di misura	limite di accettabilità
Umidità	% t.q.	max 25	% t.q.	max 18
PCI	$\text{kJ}\cdot\text{kg t.q.}^{-1}$	min 15.000	$\text{kJ}\cdot\text{kg s.s.}^{-1}$	min 20.000
Ceneri	% s.s.	max 20	% s.s.	max 15
Arsenico	$\text{mg}\cdot\text{kg s.s.}^{-1}$	max 9	$\text{mg}\cdot\text{kg s.s.}^{-1}$	max 5
Cadmio+ Mercurio	$\text{mg}\cdot\text{kg s.s.}^{-1}$	max 7	–	–
Cloro totale	% t.q.	max 0,9	% s.s.	max 0,7
Cromo	$\text{mg}\cdot\text{kg s.s.}^{-1}$	max 100	$\text{mg}\cdot\text{kg s.s.}^{-1}$	max 70
Rame solubile	$\text{mg}\cdot\text{kg s.s.}^{-1}$	max 300	$\text{mg}\cdot\text{kg s.s.}^{-1}$	max 50
Manganese	$\text{mg}\cdot\text{kg s.s.}^{-1}$	max 400	$\text{mg}\cdot\text{kg s.s.}^{-1}$	max 200
Nichel	$\text{mg}\cdot\text{kg s.s.}^{-1}$	max 40	$\text{mg}\cdot\text{kg s.s.}^{-1}$	max 30
Piombo volatile	$\text{mg}\cdot\text{kg s.s.}^{-1}$	max 200	$\text{mg}\cdot\text{kg s.s.}^{-1}$	max 100
Zolfo	% t.q.	max 0,6	% t.q.	max 0,3
Cadmio	–	–	$\text{mg}\cdot\text{kg s.s.}^{-1}$	max 3
Mercurio	–	–	$\text{mg}\cdot\text{kg s.s.}^{-1}$	max 1

Il CDR può venire ricavato unicamente dal Rifiuto Urbano Residuo (RUR) oppure da una opportuna miscelazione di quest'ultimo (che deve comunque costituire almeno il 50% del totale)

con alcune specifiche tipologie di rifiuti speciali non pericolosi (plastiche non clorurate, pneumatici fuori uso frantumati, gomme, poliaccoppiati, ecc).

Nel presente caso si fa riferimento a CDR ricavato unicamente da RUR.

Rimandando al successivo Cap. 2 per quanto riguarda gli aspetti tecnologici legati alla produzione del CDR, si vuole effettuare in questa sede una valutazione generale su quelle che sono le implicazioni connesse con tale tipo di scelta, sia dal punto di vista di gestione che di smaltimento e recupero energetico, tenendo anche conto del problema delle emissioni e, seppure molto sinteticamente, del fattore economico.

Da un punto di vista generale è da rilevare che in molti casi la scelta di indirizzarsi alla produzione di CDR, più che da una precisa analisi tecnico economica, è stata legata ad una mancanza di alternative idonee ad assicurare il possibile smaltimento dei rifiuti, in generale in carenza di uno stadio finale di trattamento che permettesse di chiudere il ciclo integrato.

In pochi casi il CDR è stato prodotto in relazione ad una specifica e ben chiara destinazione, che potesse assicurare una continuità di assorbimento.

In molti casi si è prodotto CDR perché questo comportava una più elevata facilità di trasferimento in altre sedi, ed anche con la finalità di eseguire sostanzialmente il trattamento termico in ambiti diversi dal luogo di produzione, cercando di evitare in tal modo scelte impiantistiche non facili.

Questo tende a portare ad una situazione in cui si hanno molti produttori e pochi utilizzatori di CDR.

Per quanto riguarda le specifiche problematiche a valle di queste considerazioni di carattere generale, nella situazione che qui viene considerata si può ritenere che, partendo dall'indifferenziato, si possa avere una resa in CDR dell'ordine del $60 \div 70\%$, per cui da una tonnellata in ingresso si possono ottenere circa 0,65 ton di CDR, circa 0,1 – 0,2 ton di materiale di scarto da avviare in discarica (FOS e/o inerti), oltre ad un modesto quantitativo di rottami ferrosi e non ferrosi. La parte restante è costituita dalle perdite di processo, associate alle fasi di trattamento biologico.

Per quanto riguarda le caratteristiche del CDR prodotto, oltre a quelle previste dalla normativa vigente, è possibile scegliere tra diverse opzioni, sia come pezzatura che come tipologia (fluff, coriandoli, pellets, ecc.), anche in relazione alle richieste del mercato.

Queste problematiche possono essere discusse in dettaglio, ma nella presente sede si vuole affrontare un discorso più generale al fine anche di avere elementi di valutazione per una scelta di indirizzo.

E' innanzi tutto da rilevare che produrre un CDR che risponda completamente a quanto previsto dalla normativa, sia in relazione al contenuto energetico che alla composizione (ad es. umidità, metalli, ecc.) non è del tutto semplice.

In molte circostanze le analisi, che da un punto di vista normativo debbono sempre venire effettuate, mostrano una difformità da quanto richiesto.

In sostanza non basta prevedere un tritatore ed un vaglio per produrre CDR.

Quando il materiale non è conforme non è possibile applicare la normativa (trasporto, smaltimento in impianti dedicati ed autorizzati a CDR, possibilità di trasferimento al di fuori della Regione di produzione, ecc.), per cui si pone in modo più complesso il problema dello smaltimento.

Quando inoltre il CDR non viene consumato in loco è necessario trovare l'utilizzatore.

La ricerca non è sempre semplice per le motivazioni cui si è precedentemente accennato.

In molti casi l'utilizzatore è collocato a distanze consistenti e questo comporta un aggravio dei costi di gestione per trasporti, ecc.

I grandi utilizzatori possibili, quali i cementifici e le centrali termoelettriche, non sono sempre disponibili e l'esperienza attuale dimostra in pratica che lo smaltimento in questa direzione è uno smaltimento di nicchia.

Solo l'intervento di una specifica normativa che in qualche modo spinga in tale direzione, potrebbe forse sbloccare la situazione per i grandi utilizzatori.

Non è poi da trascurare l'aspetto economico di cui si discuterà sinteticamente nel seguito.

Si possono a questo punto prendere in considerazione aspetti più legati alla tecnologia di utilizzo, quali il processo di combustione, le emissioni, il recupero energetico.

Dal punto di vista del processo di combustione (o pirolisi o gassificazione ecc.) è da rilevare che, entro certi limiti, il CDR può essere costruito in modo da soddisfare specifiche esigenze, ad es. di pezzatura, di umidità, di potere calorifico, di densità (ad es. fluff o materiale pellettizzato, ecc.).

Questo comporta la possibilità di produrre il CDR che si ritiene idoneo al tipo di utilizzo (ad es. per letto fluido o per processi di gassificazione e/o pirolisi o per altri tipi di trattamento).

Una scelta di questo genere comporta però la necessità di sapere a priori quella che sarà la destinazione finale del CDR prodotto, il che non è sempre possibile.

Anche in considerazione di tale fatto in molti casi si produce un CDR non ottimizzato per uno specifico impianto, ma di più facile collocazione.

In generale è da rilevare che comunque il CDR, da un punto di vista dell'utilizzo in processi di combustione, ecc., rappresenta sicuramente una situazione più favorevole, anche se è da rilevare che esistono impianti in grado di trattare in modo del tutto idoneo anche lo indifferenziato.

Per quanto riguarda le emissioni ed i residui, tali parametri sono legati alle modalità operative ed alla composizione.

In relazione ai residui si può stimare che mediamente la percentuale derivante dal processo di trattamento termico sia dell'ordine del 10-15%, inferiore ma non molto lontana da quanto rilevato nel trattamento del RUR.

Le emissioni gassose sono a loro volta dipendenti dalla gestione del processo.

In relazione ai composti del cloro (micro e macro) è da rilevare che la percentuale di Cl ammessa sul tal quale è dello 0,9%, del tutto analoga a quella che si trova nel materiale indifferenziato.

Durante il trattamento termico la gran parte del cloro diventa acido cloridrico ed è anche possibile, con meccanismi differenziati, la formazione di microinquinanti organoclorurati (diossine e furani).

L'uso di un combustibile più specializzato può permettere una maggiore libertà di manovra per la gestione, in particolare dei microinquinanti, ma in sostanza non sono state rilevate in tale direzione differenziazioni notevoli rispetto a quanto riscontrato nell'impiego dello indifferenziato.

Un discorso analogo si può fare per lo zolfo.

Facendo riferimento agli ossidi di azoto è da rilevare che tali composti sono molto sensibili alla modalità di combustione, per cui la possibilità di usare con CDR specifici sistemi di combustione, tipicamente ad letto fluido, può comportare un vantaggio. In questa tipologia di impianti è infatti possibile mantenere condizioni operative meno favorevoli alla produzione di NO_x, grazie ai minori eccessi d'aria e ai profili più omogenei di temperatura all'interno del forno. Pertanto si potranno prevedere sistemi più semplici per l'abbattimento degli NO_x residui.

Un discorso analogo si può fare per le polveri, usando ad es. sistemi di trattamento termico con basse velocità di trascinamento compatibili con il CDR.

In conclusione si può dire che sostanziali differenze non si riscontrano passando da CDR ad indifferenziato, tenendo comunque anche conto del fatto che il controllo delle emissioni gassose viene sempre fatto a valle del processo termico attraverso la linea di bonifica fumi. Vale la pena ricordare inoltre che i limiti emissivi per gli impianti di incenerimento sono oramai comuni per qualunque tipologia di processo termico e per qualunque tipologia di rifiuto trattato (si veda il Decreto Legislativo 133/05).

Il recupero energetico da CDR è fortemente legato alle caratteristiche dell'impianto in cui viene immesso.

Se impiegato in una centrale termoelettrica avrà sicuramente un rendimento di recupero superiore che nel caso ad es. di impiego in un forno rotante di piccole dimensioni.

E' da rilevare che, essendo il CDR un combustibile più pregiato del rifiuto di partenza, l'impiego in impianti di maggior sofisticazione può essere favorito con un più elevato margine di recupero.

Se il CDR viene utilizzato per produrre syngas, questo, convenientemente trattato, può venire utilizzato come combustibile in una turbina a gas con buoni rendimenti e con una configurazione impiantistica relativamente semplice, ad es. rispetto ad un ciclo a vapore.

E' però da rilevare che attualmente anche impianti che trattano termicamente l'indifferenziato sono in grado di offrire rendimenti di recupero (elettrico) molto consistenti, superiori al 30% lordo, specie se di taglia consistente.

Nel bilancio energetico complessivo è anche da considerare la spesa energetica per la produzione del CDR, che è molto variabile in relazione al prodotto finale ma che può essere valutata dell'ordine di $40 \div 50$ kWh/ton nel caso di CDR semplice, per giungere a valori dell'ordine di $100 \div 120$ kWh/ton ed anche superiori nel caso di produzione di pellets, ad es.

Volendo avanzare una sintetica valutazione economica, è necessario tenere conto sia delle spese di produzione del CDR che del costo di smaltimento.

Le spese di produzione sono abbastanza variabili anche in relazione alle tecnologie messe in campo ed attualmente si attestano nell'intervallo $50 \div 70$ €/ton (esclusi eventuali trasporti, ecc). Per quanto riguarda il bilancio economico complessivo di un impianto di produzione di CDR si rimanda al successivo Cap. 3.1.1. Si può per ora anticipare che l'intervallo di possibile variazione del costo complessivo è compreso tra 110 e 145 € per tonnellata di RUR trattata.

In conclusione si può dire che l'opzione CDR non risolve il problema dello smaltimento, ma può contribuire a dare una maggior elasticità operativa ad un settore fortemente legato a limitazioni normative e procedurali.

Dal punto di vista dei parametri operativi e di gestione, salvo specifiche situazioni di materiali fortemente specializzati con ben definita destinazione, non si osservano differenze sostanziali rispetto all'impiego del rifiuto secco a valle della raccolta differenziata, a sua volta comunque derivante da un procedura di selezione.

E' da mettere chiaramente in evidenza ancora una volta che la produzione di CDR non risolve il problema dello smaltimento e che la idonea collocazione del materiale non sempre è un problema di semplice soluzione.

Come già rilevato, anche la produzione di un CDR pienamente confacente a quanto previsto dalla normativa non è obiettivo di immediato conseguimento.

1.8. Valutazione complessiva dei sistemi di trattamento termico.

I sistemi di trattamento termico precedentemente esaminati vanno inseriti ed integrati in un complesso impiantistico più ampio, che comprende oltre al trattamento termico ad es. il recupero energetico, il trattamento degli effluenti, la gestione complessiva, ecc.

In relazione a quanto sopra i sistemi di trattamento termico precedentemente considerati vengono sinteticamente valutati anche con considerazione comparative, in relazione ai seguenti aspetti:

- processo di combustione o trattamento termico,
- trattamento emissioni (in relazione al tipo di processo termico considerato),
- recupero energetico (i relazione al tipo di processo),
- diffusione sul mercato.

I sistemi di trattamento presi in considerazione sono:

- forni a griglia,
- forni a letto fluido,
- forni rotanti,
- sistemi di pirolisi e/o gassificazione
- dissociazione molecolare (a bassa temperatura),
- plasmi (dissociazione molecolare ad alta temperatura),
- produzione di CDR.

1.8.1. Forni a griglia.

Si possono considerare in tale classe di sistemi anche i forni a griglia, che operano una gassificazione del combustibile con modalità molto simili alla combustione.

a) Trattamento termico.

Il trattamento termico operato da forni a griglia è ampiamente il più diffuso nel campo dei rifiuti ed è applicato anche in altri settori a prevalente interesse ambientale (ad es. biomasse, residui, ecc.).

Le caratteristiche del processo sono ben note e come messo precedentemente in evidenza la tecnologia ha subito notevole evoluzione negli ultimi dieci – quindi anni, mettendo a disposizione sistemi di sicuro interesse.

I rendimenti di combustione ottenibili sono molto elevati (oltre il 99%) ed anche le caratteristiche operative permettono una gestione del sistema di non specifica problematicità.

In relazione alle caratteristiche dei rifiuti in alimentazione, questo tipo di forno è abbastanza elastico e permette di operare in ampio campo di potere calorifico e di potenzialità ponderata, come testimoniato dai diagrammi di combustione.

Il sistema tollera anche pezzature in alimentazione abbastanza differenziate, materiali in specifici contenitori (ad es. rifiuti ospedalieri), fanghi, ecc.

L'interno del forno è di facile accessibilità per manutenzioni ed interventi.

Ha una consistente inerzia termica specie nel caso adiabatico.

Attualmente i forni a griglia integrati con il recuperatore di calore hanno una maggior elasticità anche da tale punto di vista.

Complessivamente è da ritenere una tecnologia del tutto matura.

b) Trattamento emissioni.

Le emissioni prodotte dal forno a griglia sono di tipo solido e gassoso.

Per quanto riguarda le emissioni di tipo solido, esse sono costituite essenzialmente da scorie in percentuali, rispetto all'alimentazione, dell'ordine in genere del $15 \div 20\%$ in massa secondo le caratteristiche del prodotto in ingresso.

Queste scorie possono venire parzialmente o totalmente recuperate od anche inviate in discarica per lo smaltimento.

Per quanto riguarda le emissioni gassose la loro composizione dipende dalle caratteristiche del prodotto in ingresso e dal tipo di processo, o da come viene condotta la combustione.

A parte i principali prodotti di ossidazione quali CO_2 ed H_2O , che dipendono sostanzialmente dalla stechiometria, le altre componenti sono fortemente legate al tipo di conduzione, se si esclude almeno in generale l'acido cloridrico, che deriva dalla trasformazione pressoché totale del cloro presente.

Il particolato trascinato dipende dalla velocità dei fumi nel sistema di combustione, e si può ritenere dell'ordine di qualche grammo ($1 - 5 \text{ g}$) per Nm^3 .

Gli ossidi di azoto dipendono della gestione ed in genere si collocano nello intervallo $100 \div 400 \text{ mg/Nm}^3$ (all'11% di O_2), anche se come messo in evidenza esistono procedure di controllo in fase di combustione idonee a limitare le emissioni.

La produzione di CO è legata al processo di combustione, ma in genere le concentrazioni sono dell'ordine dei ppm od al massimo di qualche decina se la conduzione del processo è corretta.

Un discorso specifico richiedono i microinquinanti organici ed inorganici.

Per quanto riguarda gli organici sono possibili, sia in fase di combustione che in fase di bonifica fumi, dei processi di formazione e riformazione (nel sistema di recupero del calore), che portano a concentrazioni allo scarico (prima della linea di bonifica fumi) superiori a quelle massime previste dalle normative (in genere da dieci a cento volte superiori).

Per quanto riguarda i metalli (microinquinanti inorganici) la loro concentrazione nei fumi è legata al tipo di processo.

Una parte dei metalli rimane nelle scorie, una parte evapora (basso bollenti) ed una parte si ritrova come particolato in genere aggregato alle polveri.

In generale si può dire che nei moderni forni a griglia le emissioni gassose allo scarico sono fortemente ridotte rispetto a quanto si riscontrava nel passato.

E' tuttavia da rilevare che per conformarsi a quanto previsto dalle normative è comunque necessaria una linea di bonifica fumi le cui caratteristiche dipendono dai risultati che si vogliono ottenere.

Si può giungere comunque a valori delle emissioni ampiamente inferiori (anche di uno o due ordini di grandezza per alcuni parametri) rispetto a quanto richiesto dalle più stringenti normative.

In conclusione si può dire che la integrazione tra i sistemi di combustione a griglia e le linee di bonifica funi ha raggiunto livelli prestazionali molto elevati, sia dal punto di vista dei risultati conseguibili che della affidabilità.

c) Recupero energetico.

In generale il recupero energetico dei forni a griglia passa attraverso la produzione di vapore con successiva produzione di energia elettrica ed anche, quando possibile, con recupero del calore (assetto cogenerativo).

Il rendimento elettrico è fortemente dipendente dalla taglia impiantistica in quanto, con piccole potenzialità (100 ÷ 200 ton/giorno in alimentazione), non è sempre conveniente spingere le caratteristiche impiantistiche.

Attualmente i rendimenti lordi sono nello intervallo 15 ÷ 18% → 30 ÷ 33%.

Come si può rilevare nel caso di grandi impianti, caratterizzati dai rendimenti più elevati, si ottengono prestazioni di tutto rispetto.

Nel caso in cui vi sia anche recupero del calore si ha in generale una diminuzione del rendimento elettrico (impianti a contropressione), ma si acquisiscono rendimenti complessivi molto consistenti (anche oltre il 50 ÷ 60%).

Il recupero del calore e della energia da questo tipo di impianti ha una diffusione molto ampia ed è ben sperimentato in tutti i suoi aspetti.

Anche le problematiche connesse con i processi di corrosione negli scambiatori di calore nella zona ad alta temperatura (parte iniziale del generatore di vapore), sono in via di superamento con la introduzione dei rivestimenti di metalli speciali (ad es. inconel) nelle parti più esposte.

E' da rilevare ad ogni modo che cicli termici per la produzione di energia con cicli a vapore sono abbastanza complessi dal punto di vista impiantistico e richiedono un insieme di sistemi ausiliari di supporto comunque essenziali (trattamento acque, condensatore, ecc.).

d) Diffusione sul mercato.

Quanto più un impianto è diffuso sul mercato tanto maggiori sono i dati e le informazioni che si possono acquisire, sia di tipo tecnico che economico.

Come già messo in evidenza i forni a griglia sono ampiamente diffusi nel campo del trattamento dei rifiuti (costituiscono oltre l'ottanta per cento dei forni operanti in Europa e negli Stati Uniti).

La casistica disponibile è molto ampia con ampio intervallo di taglia in operazione, per cui è possibile avere informazioni dettagliate circa il loro funzionamento, la affidabilità, i costi di gestione, le problematiche, ecc.

In relazione a quanto deducibile dallo esame delle unità in operazione, si può dire che il trattamento termico basato su forni a griglia rappresenta una opzione di sicuro interesse, specie in relazione al fatto che è possibile valutare quantitativamente in modo corretto le prestazioni complessive.

1.8.2. Forni a letto fluido.

a) Trattamento termico.

Dopo i forni a griglia si può attualmente ritenere che i forni a letto fluido siano i sistemi di trattamento termico di maggiore diffusione nelle possibili configurazioni disponibili (un discorso a parte va fatto per i forni rotanti).

La efficienza di combustione ottenibile è molto elevata ed anche la elasticità di funzionamento è rilevante, con possibilità di contenere i tempi di transitorio per accensione e spegnimento.

In relazione al materiale in alimentazione i forni a letto fluido richiedono una maggiore attenzione rispetto ai forni a griglia.

Il materiale deve essere selezionato, di pezzatura idonea, non deve dare origine a fusione, ad intasamenti, ecc.

Per tali motivazioni una tipica modalità di alimentazione dei letti fluidi è rappresentata dal CDR.

Di conseguenza la introduzione sul mercato di questo tipo di combustibile ha portato ad un ampliamento del campo di applicazione dei letti fluidi.

In sintesi la tecnologia dei letti fluidi con applicazione ai rifiuti è da considerare acquisita, tenendo conto del fatto che è necessario valutare con attenzione le caratteristiche del material in alimentazione che in generale deve essere pretrattato.

b) Trattamento emissioni.

Molte delle considerazioni che sono state condotte per i forni a griglia sono da considerare valide anche in questo caso.

La tecnologia dei letti fluidi nel campo dei rifiuti si è evoluta e perfezionata, mettendo a punto procedure operative idonee a limitare, già in fase di combustione, la formazione di sostanze inquinanti (criteri di distribuzione aria, controllo della temperatura e della turbolenza, eventuale iniezione di reagenti nel letto di combustione, ecc.).

Per quanto riguarda il trascinamento di particolato, che può essere critico in questo tipo di sistemi, anche per eventuali problematiche connesse a fenomeni di tipo erosivo, esso è legato al tipo di forno (ricircolato, bollente) ed anche al materiale inviato nel letto.

Con velocità di flusso elevate (letto ricircolato ad es.) il particolato fine presente e/o generato tende ad essere massicciamente trascinato nei fumi anche in presenza di sistemi di separazione meccanica come i cicloni.

Comunque anche qui è da rilevare che a valle del trattamento termico e del recupero di calore è necessaria una linea di bonifica fumi, le cui prestazioni dipendono dalla configurazione della linea stessa, ma sono sostanzialmente analoghe a quelle impiegate nel caso di forni a griglia.

c) Recupero energetico.

Anche in questo caso in generale il recupero energetico avviene attraverso la produzione di vapore con successiva generazione di energia elettrica e/o recupero di calore.

Le considerazioni generali che si possono condurre (ad es. in relazione ai rendimenti) sono del tutto analoghe a quelle relative ai forni a griglia.

In generale, nel caso di letti fluidi le temperature di ingresso nel generatore di vapore possono essere inferiori a quelle caratteristiche di una griglia e questo può limitare le problematiche di corrosione che però possono presentarsi con maggior rilevanza quanto lo scambio termico avvenga anche nel letto.

Lo scambiatore di calore può per altro essere interessato da fenomeni erosivi più consistenti nel caso di forte trascinamento di particolato.

d) Diffusione sul mercato.

I sistemi a letto fluido, come detto, hanno una buona diffusione nel mercato dei rifiuti (circa il 15% degli impianti in Italia) e questo permette di effettuare una valutazione realistica delle prestazioni di questi impianti.

Complessivamente le prestazioni possono ritenersi analoghe a quelle dei forni a griglia, tenendo però conto del fatto che il letto fluido richiede una specifica attenzione al materiale in alimentazione.

Non valutare in modo conveniente questo fattore può portare a problematiche di tipo gestionale ed avere anche riflessi sulla economia complessiva della piattaforma.

In non pochi casi il non sufficiente controllo delle caratteristiche del combustibile in alimentazione (ad es. pezzatura, densità, punto di fusione ceneri, ecc.) ha provocato consistenti problematiche negli impianti, con fermate e blocchi della piattaforma.

1.8.3. Forni rotanti.

a) Trattamento termico.

I forni rotanti sono tra quelli che hanno avuto maggior diffusione, in generale, nel settore della combustione.

Anche nel campo dei rifiuti sono stati ampiamente utilizzati nel passato in relazione allo loro elasticità operativa, alla possibilità di alimentarli con quasi tutte le tipologie di materiali, ecc.

Non sono comunque forni da considerare specializzati nel campo dei rifiuti, per cui complessivamente il loro utilizzo nel settore degli urbani è stato fortemente ridotto, mentre permane un forte interesse nelle applicazioni che coinvolgono industriali e speciali, o comunque rifiuti di tipo particolare.

Il processo di combustione è meno efficiente che nei casi precedentemente considerati a causa della difficoltà di mescolamento tra combustibile e comburente.

Si chiede in genere di operare con forti eccessi d'aria, aumentando tra l'altro il volume dei fumi da trattare.

In gran parte dei casi queste considerazioni portano alla necessità di una regione di post combustione, circa adiabatica, a valle del forno.

In conclusione, queste macchine, ampiamente impiegate in passato nel campo dei rifiuti, sono attualmente indirizzate verso specifiche applicazioni.

b) Emissioni.

Il processo di combustione in un rotante, come già messo in evidenza, è meno controllabile se confrontato ad es. con quello in forno a griglia ed in un letto fluido

L'efficienza di combustione è inferiore e questo porta ad incrementare gli incombusti nei fumi (ed anche a volte nelle scorie).

Inoltre appare più problematico mettere in campo, ad es., tecniche di controllo degli ossidi di azoto.

In generale le condizioni sono più critiche rispetto a quanto avviene in altri sistemi.

L'impiego della post combustione e di una idonea linea di bonifica fumi è comunque in grado di portare le emissioni ampiamente entro i limiti richiesti dalle vigenti normative.

c) *Recupero energetico.*

Anche in relazione al recupero energetico valgono sostanzialmente tutte le condizioni precedentemente svolte (recupero con produzione vapore, energia elettrica, ecc.).

La considerazione aggiuntiva è che nel caso dei forni rotanti si hanno in genere dispersione di calore più elevate, in quanto il mantello non viene in genere isolato.

d) *Diffusione sul mercato.*

Come già detto la diffusione sul mercato è molto ampia e di conseguenza le caratteristiche prestazionali dei rotanti sono ben note.

Questo ha portato come conseguenza delle valutazioni operative ed un impiego limitato dei rotanti nello specifico campo degli urbani, riservando questa tecnologia a specifiche applicazioni ove le caratteristiche possano venire utilizzate al meglio.

1.8.4. Pirolisi – gassificazione.

a) *Trattamento termico.*

Le condizioni operative sono differenziate a seconda che il syngas prodotto venga immediatamente bruciato o che venga sottoposto ad un processo di depurazione prima del successivo utilizzo.

Nel primo caso, non si ha una sostanziale differenziazione nel complesso rispetto ai sistemi più tradizionali

Le tecnologie messe in campo sono diverse, ed alcune che si rifanno allo impiego di griglia operanti in difetto di aria, sono molto simili ai forni a griglia tradizionali, con possibilità di trattare diverse tipologie di rifiuti come precedentemente messo in evidenza in relazione al processo Energos.

Lo ottenimento di un gas di sintesi permette comunque una buona elasticità operativa nella zona di combustione, specie in relazione al mescolamento gas – aria, ad es. per il controllo di alcuni tipi di emissione.

Da tenere presente però che in questo caso il gas di sintesi contiene particolato e materiale che può condensare, ad es., sulle superfici di scambio quando si ha un abbassamento della temperatura.

Quando il gas viene depurato (con rimozione di particolato, acido cloridrico, ecc.), le successive modalità di impiego sono anche legate alla efficienza del processo di trattamento.

In generale con un trattamento spinto il syngas può venire considerato alla stregua di un normale combustibile gassoso e come tale impiegato.

Da rilevare che in genere il potere calorifico del syngas (kJ/Nm^3) è limitato e quindi le portate possono essere consistenti, per cui le dimensioni degli impianti di depurazione sono non trascurabili. Dal punto di vista del processo di combustione l'impiego del syngas offre comunque un'ampia possibilità operativa, come nel seguito evidenziato.

Le caratteristiche del combustibile in alimentazione vanno valutate in relazione al tipo di processo adottato.

b) Emissioni.

Una prima considerazione da fare riguardo alle emissioni solide (scorie) è che in questo tipo di impianto viene in generale prevista la fusione delle scorie, che vengono raccolte come solido circa vetrificato.

La fusione delle scorie richiede però un impiego di combustibile addizionale ed una opportuna predisposizione impiantistica, per cui è da valutare se questo tipo di soluzione nell'attuale contesto Italiano ed Europeo sia conveniente, tenendo conto della realistica possibilità, attualmente esistente, di potere recuperare le scorie stesse parzialmente o totalmente.

Per quanto riguarda le emissioni gassose, nel caso di combustione diretta del syngas, la situazione non è molto diversa da quella degli impianti tradizionali.

Si può rilevare che in presenza del syngas si può operare a temperature più elevate (maggior facilità di controllo del rapporto locale aria – combustibile), al fine, ad es., di limitare la produzione di microinquinanti.

E' da rilevare, d'altra parte, che temperature molto elevate possono essere problematiche per le superfici di scambio termico deputate al recupero del calore immediatamente a valle della zona di combustione.

In generale la linea di bonifica fumi di questi tipi di impianti è del tutto simile a quella utilizzata negli impianti più tradizionali (con presenza di SCR, ecc.), con maggior possibilità di controllo dei livelli di inquinanti in fase di combustione, come già messo in evidenza, e con la conseguente possibilità di alleggerire, almeno in relazione ad alcuni tipi di emissione, la linea di trattamento fumi.

Per quanto riguarda l'utilizzo del syngas dopo depurazione le emissioni sono legate a quelle che sono le caratteristiche del prodotto dopo trattamento.

Se il trattamento è molto spinto si procede come per un combustibile gassoso convenzionale, utilizzando ad es. le tecnologie disponibili per i bruciatori a bassa emissioni, ecc., mentre se la depurazione non è completa si procede con le tradizionali modalità.

E' da mettere in evidenza che la depurazione del syngas, specie se molto spinta, è un processo complesso tenuto conto sia della composizione che della temperatura dello effluente da trattare.

c) *Recupero energetico.*

E' innanzi tutto da rilevare che in molti casi il processo di pirolisi – gassificazione richiede l'impiego di un combustibile addizionale in percentuali di flusso termico del $5 \div 10\%$ rispetto al flusso principale, al fine di stabilizzare il processo.

Inoltre, se si desidera la fusione delle scorie, è necessario un ulteriore apporto di combustibile come già messo in evidenza.

Nel caso di combustione diretta del syngas le considerazioni che possono venire avanzate sono del tutto analoghe a quelle che valgono per i sistemi tradizionali.

Da tenere presente il fatto che se non si opera in modo opportuno possono verificarsi sporcamenti sulle superfici di scambio, come già messo in evidenza.

Nel caso di syngas depurato questo può venire utilizzato, ad es., in motori a combustione interna ed in turbine a gas con rendimenti elettrici elevati (nel caso di motori a combustione interna dell'ordine del 40% e nel caso di turbine a gas dell'ordine del $25 \div 35\%$ ed anche maggiori indipendenza dalla taglia).

Da rilevare che questo tipo di utilizzo è legato ad una conveniente depurazione del syngas.

Anche in questo caso al recupero elettrico si può associare il recupero termico.

Nel caso di turbina a gas si può anche adottare la soluzione di ciclo combinato, se la taglia impiantistica è sufficiente.

d) *Diffusione sul mercato.*

Si fa riferimento alla situazione Europea in quanto, come già considerato, il Giappone rappresenta un caso particolare non facilmente trasferibile al contesto Italiano e comunitario.

In Europa il numero degli impianti esistenti ed operanti nel settore dei rifiuti è molto limitato e le tecnologie impiegate sono differenziate.

E' attualmente in fase di avviamento a Roma una piattaforma che si rifà alla tecnologia Thermoselect sviluppata in Giappone.

Effettuare una valutazione complessiva sulle caratteristiche economico gestionali e di affidabilità in queste condizioni appare molto problematico.

L'unico gruppo di impianti con caratteristiche simili si rifà ai forni a griglia (tecnologia Energos).

Questo tipo di impianto (quattro o cinque in Europa) opera con risultati più che soddisfacenti. La tecnologia, come già detto, va ricondotta a quella dei forni a griglia anche per quanto riguarda il

recupero energetico. Per le emissioni, in tale configurazione, è possibile un miglior controllo in fase di combustione almeno per alcuni tipi di inquinanti.

1.8.5. Dissociazione molecolare (a bassa temperatura).

a) Trattamento termico.

Il processo denominato dissociazione molecolare (a bassa temperatura $300 \div 500^\circ \text{C}$) è da considerare una gassificazione – pirolizzazione e vale per esso quanto precedentemente detto.

Poiché i prodotti di pirolisi – gassificazione dipendono dalla temperatura operativa, in tali condizioni è da ritenere che la rottura delle molecole più complesse sia limitata.

Il processo ricorda quello che avveniva nei cosiddetti forni ad aria controllata, in uso anche in Italia per impianti di dimensioni piccole o medio piccole.

In tali forni, che operavano in modo discontinuo, vi era una prima sezione dove avveniva una combustione incompleta con iniezione di aria stechiometrica, ed una seconda sezione di post combustione dove veniva completato il processo di combustione con l'eventuale ausilio di un bruciatore.

Tali tipi di forni sono poi usciti dall'uso anche per le difficoltà di mantenere le emissioni entro i limiti che andavano sempre più restringendosi.

Tipica collocazione di queste macchine era, ad es., nel campo del trattamento dei rifiuti ospedalieri.

b) Emissioni.

Anche in relazione alle emissioni vale quanto precedentemente detto.

Se il syngas prodotto viene depurato si ricade nei casi precedentemente esaminati.

Nel caso di combustione diretta appare abbastanza problematico, al momento attuale, fornire delle indicazioni specifiche in quanto non si hanno dati concreti sulla composizione del gas di sintesi, specie in relazione al contenuto di sostanze che debbono venire controllate (quali, ad es., acido cloridrico, particolato, metalli, eventuali microinquinanti).

E' da ritenere necessaria una linea di bonifica fumi del tutto analoga a quella impiegata negli impianti tradizionali.

c) Recupero energetico.

Anche nel caso del recupero energetico vale quanto precedentemente rilevato per i processi di pirolisi – gassificazione.

d) Diffusione sul mercato.

A conoscenza, in Europa esiste un numero estremamente limitato di impianti che si possono considerare aventi le caratteristiche della cosiddetta dissociazione molecolare.

Appare quindi del tutto problematico esprimere un parere riguardo alle caratteristiche di gestione, di affidabilità, ecc.

Ci si può rifare, per una valutazione, agli impianti ad aria controllata, come già detto praticamente abbandonati nell'attuale panorama impiantistico.

Indipendentemente da valutazioni che entrino nel merito delle prestazioni, la configurazione impiantistica che viene presentata è tipica delle realizzazioni di piccole dimensioni da applicare a condizioni dove la problematica di maggior rilevanza sia quella dello smaltimento, con minori considerazioni di quelle che sono le esigenze di recupero energetico e di controllo delle emissioni.

1.8.6. Plasma (dissociazione ad alta temperatura).

a) Trattamento termico.

Anche i processi al plasma sono da ricondurre a pirolisi e/o gassificazione, come messo precedentemente in evidenza e quindi valgono anche per essi le considerazioni già fatte.

Si mette ancora in evidenza che il processo al plasma opera un trasferimento di energia dal plasma al rifiuto che viene portato ad una temperatura in genere dell'ordine di $800 \div 1.000^{\circ} \text{C}$ e non subisce quindi una demolizione nelle componenti atomiche o di molecole elementari (il che richiederebbe parecchi MW elettrici di potenza installata per tonnellata trattata).

b) Emissioni.

Tenendo conto delle osservazioni precedentemente fatte, per le emissioni vale quanto già affermato sia in relazione alla depurazione del syngas che alla combustione diretta.

c) Recupero energetico.

Quanto detto nel caso di pirolisi – gassificazione è applicabile in relazione agli impianti al plasma.

d) Diffusione sul mercato.

Sono stati realizzati numerosi impianti al plasma di potenzialità medio piccola per il trattamento dei rifiuti ad alta tossicità (quali ad es. amianto o liquidi come PCB, ecc.), ma non esistono attualmente impianti di dimensioni medie o medio grandi dedicati al trattamento dei rifiuti (esistono applicazioni di questo tipo su navi con potenzialità di qualche ton/giorno, ma in tale situazione le problematiche ed anche le normative sono del tutto diverse).

In relazione a quanto sopra esprimere una valutazione oggettiva, specie per quanto riguarda la affidabilità e le caratteristiche anche tecnico- economiche di gestione, è molto difficile e comunque in tale situazione è del tutto problematico potere istituire dei paragoni con altri tipi di impianti.

1.8.7. Utilizzo di CDR.

Le problematiche connesse alla produzione ed allo impiego del CDR sono state precedentemente trattate.

In relazione alla diffusione sul mercato, è da rilevare che esiste attualmente un consistente numero di impianti di produzione che producono diverse tipologie di CDR e che quindi hanno per certi versi caratteristiche operative e progettuali diversificate.

E' possibile comunque effettuare delle valutazioni relative alle caratteristiche operative degli impianti.

Da rilevare, come già messo in evidenza, che la produzione di un CDR rispondente alla norma presenta un insieme di vincoli da non sottovalutare.

1.9. Considerazioni conclusive.

Sono state presentate le possibili opzioni in relazione ai trattamenti termici dei rifiuti, mettendone in evidenza le specifiche caratteristiche.

A questo punto, se ci si orienta verso un impianto di trattamento termico, si deve effettuare una scelta od almeno individuare un orientamento progettuale.

La valutazione non è semplice, anche tenendo conto del grande numero di informazioni che sono disponibili e che comunque vengono messe sul mercato.

In quanto segue si cercherà di effettuare una valutazione, per quanto possibile oggettiva, della situazione, non tanto per giungere ad una scelta precisa, ma per fornire elementi che, calati nella specifica situazione, possano fornire un utile orientamento.

Una prima indicazione riguarda la taglia impiantistica.

Indipendentemente dal tipo di scelta, un impianto di trattamento termico è comunque complesso, per cui viene giustificato se è assicurato un input minimo in alimentazione.

Al fine di poter assicurare l'adozione di tecnologie ragionevoli, si ritiene che la taglia minima da proporre sia dell'ordine di una potenzialità di trattamento dell'ordine delle cento ton/giorno e preferibilmente spostata verso le 200 t/g.

Impianti di taglia inferiore sono ovviamente possibili, ma dovrebbero essere riservati a specifiche situazioni.

In relazione alla produzione di CDR ed al suo utilizzo valgono considerazioni analoghe.

Se la produzione di CDR è consistentemente inferiore a quanto precedentemente menzionato, la soluzione è lo smaltimento verso l'esterno.

Una volta superata questa barriera si può passare a valutare le diverse opzioni impiantistiche.

E' innanzi tutto da rilevare che l'impianto deve fornire un pubblico servizio e quindi requisiti fondamentali sono la affidabilità e la certezza delle prestazioni, sia tecniche che economiche.

Da tale punto di vista, nel contesto Europeo le soluzioni che da tale punto di vista offrono le maggiori garanzie sono rappresentate dai forni a griglia, inclusi quelli che operano una gassificazione del combustibile.

Come detto questi tipi di impianto sono largamente diffusi ed è possibile effettuare delle valutazioni oggettive.

Il numero delle realizzazioni in Italia ed in Europa certifica la presenza di un realtà industriale in grado di portare a termine realizzazioni complesse ed impegnative anche di grandi dimensioni.

Anche le altre tecnologie di tipo termico, ed in particolare i processi di pirolisi e gassificazione propriamente detti, presentano notevole interesse, ma la esperienza nel settore appare più limitata sia in relazione alle problematiche gestionali che costruttive, per cui nell'attuale contesto una scelta in tale direzione deve avere delle buone motivazioni .

Per quanto riguarda i processi cosiddetti di dissociazione molecolare a bassa ed alta temperatura (plasma), si ritiene che attualmente la diffusione impiantistica e la disponibilità di informazioni di tipo gestionale, tecnico ed economico, con difficoltà possano orientare una scelta in tale direzione.

Nel futuro la situazione potrà subire delle modificazioni, ma allo stato questo appare essere la realistica valutazione.

Volendo entrare in qualche maggior dettaglio si possono avanzare le seguenti affermazioni.

Mentre il forno a griglia è molto elastico in relazione alle caratteristiche in alimentazione, il letto fluido richiede materiale pretrattato.

Per quanto riguarda i processi di pirolisi e gassificazione alcuni sistemi, ad es. Energos per rifarsi ad una esperienza Europea, possono trattare il tal quale (rifiuto indifferenziato), altri richiedono invece una opportuna preparazione del materiale in alimentazione.

In relazione alle emissioni gassose è da rilevare che tutti i sistemi considerati richiedono un trattamento degli effluenti al fine di soddisfare le normative, per cui si può in pratica considerare che le caratteristiche degli effluenti, più che dal processo di termoutilizzo, dipendano dalle caratteristiche della linea di bonifica fumi.

Come già messo in evidenza alcuni processi permettono di ottimizzare certi tipi di emissioni (ad es. ossidi di azoto o microinquinanti, ecc.), ma in generale questo non è sufficiente per cui si richiede un ulteriore intervento.

Le linee di trattamento fumi di tutti gli impianti di trattamento termico sono tra di loro molto simili e le eventuali differenziazioni non sono in genere legate al trattamento termico ma ad altro tipo di considerazioni.

Nel caso in cui si abbia depurazione del syngas il trattamento viene anticipato rispetto al processo di combustione, consentendo di trattare un minore volume di fumi, ma con maggiori complicazioni di processo a causa della elevata temperatura ed anche delle caratteristiche del syngas prodotto.

In sostanza è da ritenere che le problematiche connesse alle emissioni gassose siano abbastanza slegate dal tipo di trattamento termico.

Un discorso abbastanza simile si può fare in relazione al recupero energetico.

La entità del recupero più che al tipo di trattamento termico è legato ad altre considerazioni, quali la taglia dell'impianto, la possibilità di poter recuperare anche calore oltre che energia elettrica, il fatto di alimentare rifiuto tal quale o CDR, ecc.

Quelli che sono i rendimenti di recupero ottenibili nelle diverse situazioni (produzione di energia elettrica e/o cogenerazione) sono stati precedentemente evidenziati.

Nel caso di depurazione del syngas e di utilizzo in turbina a gas, si può valutare la possibilità di cicli combinati per massimizzare la produzione di energia elettrica.

In tali condizioni ci si preclude però ingenerale, la possibilità di recuperare il calore in quanto la condensazione del vapore avviene a temperature tali da rendere molto problematico il recupero.

Inoltre la adozione di un ciclo combinato può essere presa in considerazione nel caso di impianti di grande taglia (turbine a gas di potenza almeno di 10 ÷ 15 MW elettrici).

E' anche da considerare che la depurazione del syngas prevede in molti casi un processo di raffreddamento (quenching) senza recupero di calore (per problematiche di gestione degli scambiatori) e questo comporta una perdita di energia che influisce sul bilancio finale (in genere raffreddamento da 700 ÷ 1.200° C a 200 ÷ 300° C).

In sintesi è da ritenere che il recupero dell'energia non costituisca una discriminante primaria nella scelta del sistema.

L'insieme delle considerazioni che precedono permettono un primo orientamento in relazione al tipo di impianto di trattamento termico, anche se la valutazione finale non può prescindere dalle specifiche condizioni che caratterizzano il bacino di utilizzo.

2. Trattamenti meccanico-biologici applicabili al RUR

Per “trattamento meccanico-biologico” (TMB, o MBT nella dicitura anglosassone) si intende il processamento del rifiuto urbano residuo (RUR), ovvero del materiale misto che residua dalle operazioni di raccolta differenziata, secondo tecniche combinate di tipo meccanico e di tipo biologico.

L’obiettivo ultimo di questo genere di trattamento è molteplice, e fortemente dipendente da una serie di fattori quali:

- caratteristiche del materiale da trattare, a loro volta influenzate dalla modalità di raccolta differenziata che viene attuata a monte
- tipologia di trattamenti previsti a valle del trattamento TMB, ed in particolare recupero energetico, recupero di materia, smaltimento in discarica
- nel caso di conferimento in discarica dei residui, vincoli legislativi sulle caratteristiche di biodegradabilità e sul potere calorifico inferiore (PCI) massimo.

Sulla base dell’elenco non esaustivo dei fattori appena indicati, l’obiettivo ultimo di un trattamento TMB potrà essere quello di ridurre i quantitativi di rifiuto da smaltire, di stabilizzarlo, di renderlo più idoneo agli utilizzi successivi.

Un importante riferimento sulla tematica degli impianti TMB è costituito dal Rapporto della società inglese Juniper, pubblicato nel 2005 (“Mechanical-Biological-Treatment: a guide for decision makers. Processess, policies and markets”). Il rapporto individua 8 principali opzioni tecnologiche, illustrate a titolo di esempio nelle Figg. 2.1a e 2.1b. Va detto tuttavia che l’impostazione dello studio è condizionata piuttosto pesantemente dal contesto anglosassone, dove la situazione gestionale dei rifiuti urbani è piuttosto differente rispetto alla realtà italiana, ed in particolare a quanto accade in Province particolarmente “virtuose” nella raccolta differenziata, quale la Provincia di Novara. In particolare nella realtà italiana sono ragionevolmente escludibili le opzioni n. 2 e 3, a causa delle scadenti caratteristiche dei materiali prodotti, mentre le opzioni n. 7 e 8 paiono critiche in relazione all’applicazione della digestione anaerobica sul flusso di materiale organico “sporco” in quanto proveniente da separazione meccanica del RUR e non da raccolta differenziata. Tale aspetto verrà ripreso nel seguito.

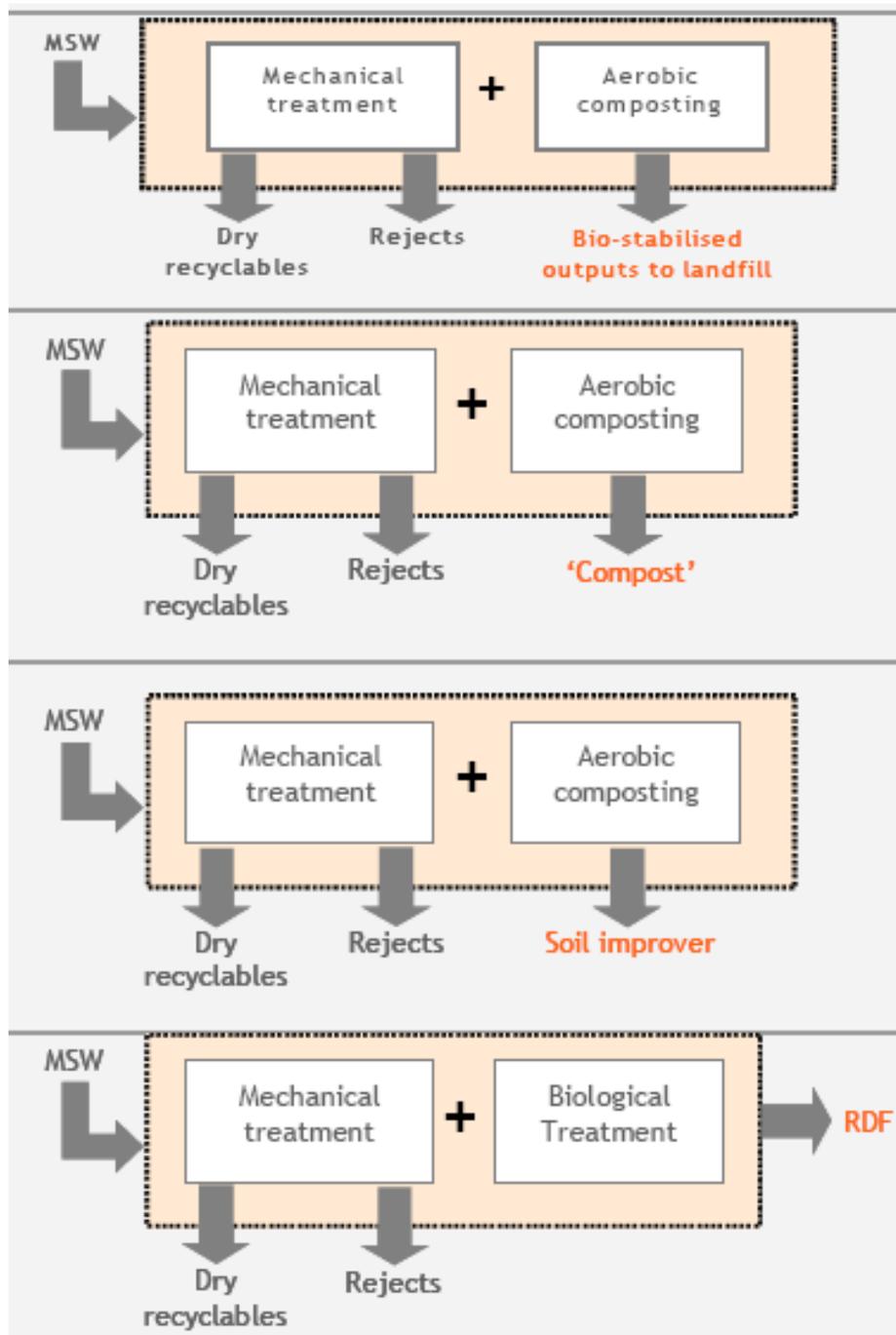


Fig. 2.1a: Schemi concettuali delle possibili configurazioni di impianti TMB (dall'alto verso il basso: 1. stabilizzazione prima dello smaltimento in discarica; 2. produzione di "compost" da rifiuto; 3. produzione di un ammendante di bassa qualità; 4. Produzione di CDR). Fonte: Juniper, 2005

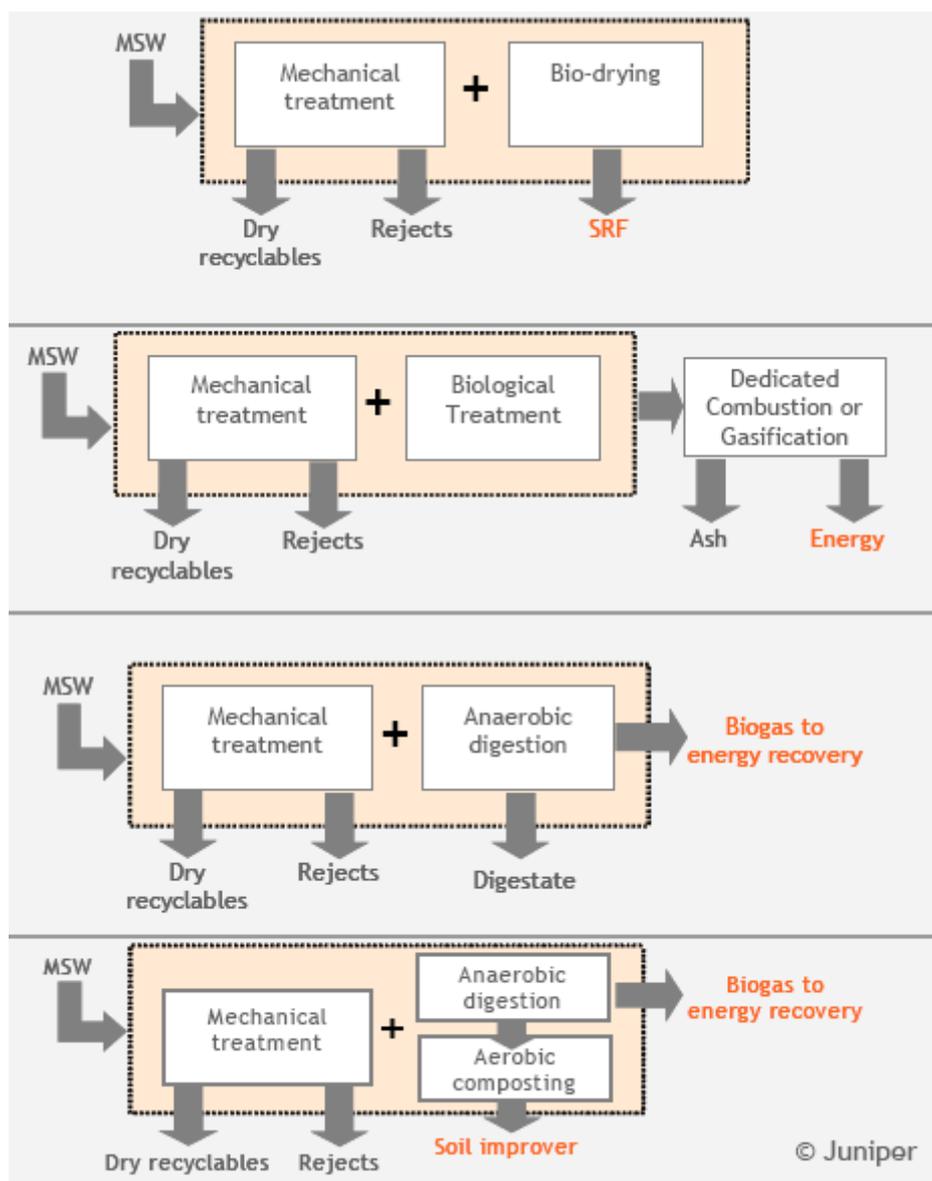


Fig. 2.1b: Schemi concettuali delle possibili configurazioni di impianti TMB (dall'alto verso il basso: 5. Produzione di CDR mediante bioessiccazione; 6. Riduzione dell'esigenza di trattamento termico; 7. Produzione di biogas; 8. Produzione di biogas + ammendante). Fonte: Juniper, 2005

2.1. Inquadramento internazionale della pratica del TMB

2.1.1. La situazione europea

A livello Europeo, la più elevata capacità installata di impianti TMB si osserva in Italia, come meglio specificato nel paragrafo successivo. Seguono la Germania (5 milioni di tonnellate), la Spagna (3 - 4 milioni di tonnellate) e l'Austria (circa 1 milione di tonnellate). Molti altri Stati stanno introducendo questa tecnologia, in particolare il Regno Unito, la Francia e alcuni Stati dell'Est europeo (Kuehle-Weidemeier, 2009). Mentre in Germania, Austria e Italia lo scopo

prevalente degli impianti TMB è quello di stabilizzare il materiale prima dell'avvio a discarica, negli altri Stati la produzione di un "compost" di scarsa qualità è spesso parte integrante dell'approccio TMB. Tuttavia, a causa dell'elevata presenza di sostanze inquinanti rispetto al compost prodotto a partire da materiale organico selezionato alla fonte, l'utilizzo di tale compost è una pratica controversa, come sarà meglio ripreso nel seguito.

2.1.2. La situazione italiana

Con l'esclusione della discarica, il ricorso al trattamento meccanico-biologico risulta l'opzione più praticata in Italia, e soprattutto quella caratterizzata dai tassi di crescita più elevati negli ultimi anni. Nel 2006 gli impianti TMB hanno trattato ben 9 milioni di tonnellate di rifiuto indifferenziato, rispetto ai 2 milioni trattati nel 1999. La potenzialità di trattamento teorica risulta ancora più elevata, e pari a ben 13,7 milioni di tonnellate, ovvero il 57% della produzione complessiva di RUR al 2006. Addirittura si può facilmente stimare che, nell'ipotesi di raggiungimento dell'obiettivo di raccolta differenziata complessiva del 65%, come richiesto dal D.Lgs. 152/06 per l'anno 2012, l'attuale capacità installata di impianti TMB sarebbe già in grado di trattare con un discreto margine di sicurezza la totalità del rifiuto urbano residuo prodotta in Italia!

Le criticità di questa opzione di trattamento, che risulta peraltro particolarmente diffusa nel Sud Italia, emergono tuttavia quando si analizzano quantitativi e tipologie dei materiali in uscita. Sempre secondo il Rapporto Rifiuti di APAT, le diverse frazioni che costituiscono l'output di tali impianti ammontano a 7,7 milioni di tonnellate, ovvero l'85% dell'input! E ancora più dolente risulta l'analisi delle caratteristiche di tali materiali, costituiti per il solo 10% da materiale "certificato" (il CDR), per il 34% da "frazione secca" (materiale privo di qualsiasi specifica tecnica di riferimento, e pertanto estremamente differente nel panorama nazionale), per il 22,5% da biostabilizzato (idem come sopra) e per il 24% da scarti.

Sicuramente sui dati medi nazionali qua riportati hanno un peso non marginale i contributi della sciagurata gestione della Regione Campania, tuttavia questa situazione apparentemente anomala del contesto italiano (non tanto la presenza di numerosi impianti TMB ma soprattutto la incertezza relativa alle caratteristiche e all'effettiva destinazione dei materiali prodotti) è sicuramente per moltissimi casi da ricercare nella maggiore facilità di collocazione di questa tipologia di impianti sul territorio, generalmente meno invisibili alla popolazione rispetto ad esempio a quelli di recupero energetico. Va da sé che scelte di questo genere non possono essere demandate a

soli aspetti contingenti o “di comodo”, ma devono essere basate su circostanziate valutazioni energetiche, ambientali ed economiche.

2.2. Impostazione impiantistica

Un generico impianto TMB sarà costituito dall’opportuna combinazione, principalmente in serie ma talvolta anche in parallelo, di un certo numero di “unità di processo” (UP) riconducibili ad operazioni di tipo meccanico e ad operazioni di tipo biologico. Per UP si intende una singola fase di trattamento deputata a raggiungere uno specifico obiettivo.

Un primo ed importante elemento di distinzione e classificazione dei possibili impianti TMB risiede nella collocazione relativa dei trattamenti meccanici rispetto a quelli biologici (Fig. 2.2). In particolare, se il trattamento biologico viene effettuato come prima fase di trattamento (a valle ovviamente di un’operazione, formalmente meccanica, di apertura dei sacchi), si parla di sistemi “a flusso unico”; se invece il trattamento biologico si applica solo ad uno dei flussi originatisi da una prima fase di separazione meccanica (generalmente effettuata mediante vagliatura), allora si parla di sistemi “a flusso separato”.

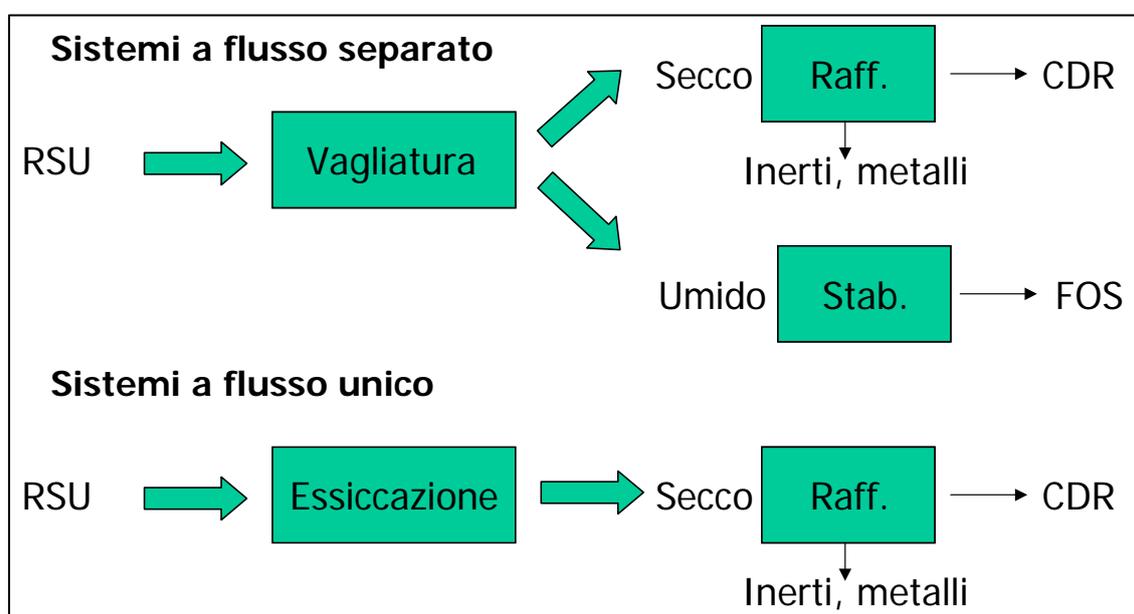


Fig. 2.2: Schemi concettuali dei due principali processi di produzione del CDR.

Un secondo elemento di distinzione è relativo alla tipologia di processo biologico adottato, ed in particolare alla scelta tra processi di tipo aerobico e processi di tipo anaerobico. Innanzitutto è opportuno rilevare come quest’ultima tipologia di processi consente di avere, come output

dall'impianto, un flusso di tipo energetico (il biogas, appunto), in aggiunta ai flussi di materiali tipici e generalmente esclusivi degli impianti TMB.

La scelta tra trattamento aerobico ed anaerobico non è ovviamente indipendente dalla scelta relativa alla tipologia di flusso (unico o separato): sistemi a flusso unico non potranno che essere basati su processi di tipo aerobico (la bioessiccazione, in particolare), mentre sistemi a flusso separato potranno fare ricorso anche a fasi anaerobiche, pur con le problematiche che verranno evidenziate nel seguito. Nella stragrande maggioranza delle applicazioni, infatti, la fase biologica di un sistema a flusso separato è costituita dalla cosiddetta "biostabilizzazione", ovvero dalla aerazione della frazione organica putrescibile nell'ambito di un processo concettualmente analogo al compostaggio ma che porta alla produzione appunto del "biostabilizzato", materiale non normato, di scarsa qualità e di difficile collocazione.

2.2.1. Trattamenti meccanici

In linea del tutto generale, per quanto riguarda i trattamenti meccanici si fa riferimento a macchinari di derivazione dell'ingegneria mineraria e opportunamente adattati alla lavorazione del rifiuto.

Le differenti UP utilizzabili sono riconducibili alle seguenti famiglie:

- macchine finalizzate a separare il materiale in due o più flussi
 - vagli
 - classificatori ad aria
 - separatori magnetici, per la rimozione del ferro
 - separatori a correnti indotte, per la rimozione dei metalli amagnetici
 - sensori ottici, per la separazione dei differenti polimeri costituenti le materie plastiche e dei flussi caratterizzati da colorazioni differenti
- macchine finalizzate a modificare la distribuzione dimensionale del materiale
 - laceratrici
 - trituratori primari e secondari
- macchine finalizzate a compattare il materiale
 - addensatrici
 - pellettizzatrici
 - presse imballatrici

Stabilizzazione aerobica

La biostabilizzazione si applica, come detto, in sistemi a flusso separato, laddove consente di trasformare la Frazione Organica Putrescibile (FOP) ottenuta dalla separazione meccanica preliminare di tipo “secco-umido” in Frazione Organica Stabilizzata (FOS). Si tratta di un processo della durata di circa 4 settimane, che avviene generalmente in sistemi dinamici aerati, ossia con insufflazione di aria forzata all’interno del materiale e suo periodico rivoltamento. Dal punto di vista del bilancio di materia, si hanno mediamente perdite di processo (costituite da CO₂, H₂O e altre sostanze gassose minori) pari al 40% circa rispetto alla FOP in ingresso; la FOS sarà dunque pari al 60% circa in massa rispetto alla FOP, e circa il 20% rispetto al rifiuto complessivamente entrante nell’impianto TMB.

Il materiale così ottenuto, la FOS appunto, si presenta stabilizzato (ovvero con un IRDP¹ < 1000 mgO₂ kg_{SV}⁻¹ h⁻¹) e dalle caratteristiche di un terriccio vagamente simile a compost, contaminato tuttavia da sostanze indesiderate quali plastiche leggere, materiali inerti e soprattutto metalli pesanti. Questo materiale non trova codificazione normativa a livello nazionale, in quanto sicuramente non rispetta i limiti imposti dal D.Lgs. 217/06 per l’ammendante compostato di qualità (ACQ), mentre ad esempio la Regione Lombardia lo classifica come “compost grigio” (DGR 16/04/03) e lo destina ad utilizzi secondari, quali ad esempio la ricopertura giornaliera delle discariche.

Vale la pena citare a tale proposito un pronunciamento della Conferenza dei Presidenti delle Regioni e delle Province Autonome² che, affrontando le problematiche relative all’elaborazione del “Programma per la riduzione dei rifiuti biodegradabili da collocare in discarica” (ai sensi del D. Lgs. 36/03), ha valutato come “limitatissima la possibilità di impiego della FOS sia come ripristini ambientali che come ricopertura di discariche”, e pertanto ha ritenuto “opportuno disincentivare la realizzazione di nuovi impianti con produzione di frazione organica sporca da stabilizzare e da smaltire in discarica”.

Essiccamento biologico

La bioessiccazione prevede l’avvio al trattamento biologico, di tipo rigorosamente aerobico, di tutta la massa del RUR conferito, previa una semplice operazione di apertura dei sacchi, da effettuarsi con un apposito macchinario lacerasacchi. L’innesco delle reazioni di degradazione

¹ Tra i metodi di misura del consumo di ossigeno, e quindi della stabilità biologica, quello più utilizzato è l’Indice Respirometrico Dinamico Potenziale (IRDP), messo a punto dal Dipartimento di Produzione Vegetale dell’Università di Milano (Adani e Tambone, 1998)

² Conferenza dei Presidenti delle Regioni e delle Province Autonome. Documento interregionale per la predisposizione entro il 24 marzo 2004 del programma di riduzione dei rifiuti biodegradabili da smaltire in discarica ai sensi dell’art. 5 del D.Lgs. n. 36/03. Roma, 4 marzo 2004

biologica aerobica, conseguenti ad un massiccio apporto di aria ottenuto mediante insufflazione forzata, consente, grazie alla loro esotermia, l'evaporazione di parte del contenuto di umidità del materiale. Dal punto di vista del bilancio di materia, in funzione del contenuto di sostanza organica del RUR, si può osservare una perdita in peso compresa tra il 10 e il 25% circa, rispettivamente per le situazioni con basso (8%) e alto (50%) contenuto di organico, con una durata del processo non superiore a 15 giorni. Il materiale in uscita dalla fase biologica, cosiddetto "bioessiccato" presenta caratteristiche che lo rendono più idoneo rispetto al RUR al trattamento di raffinazione meccanica, finalizzato a produrre CDR o a effettuare ulteriori recuperi di materiali potenzialmente riciclabili.

Digestione anaerobica

La digestione anaerobica prevede l'avvio della FOP, prodotta sempre nell'ambito di un processo a flusso separato, ad un trattamento biologico di tipo anaerobico anziché alla stabilizzazione aerobica. I principali elementi di differenza rispetto a quanto illustrato in precedenza sono relativi alla produzione di biogas, sfruttabile a scopi energetici, ad una stabilizzazione meno spinta del materiale (che richiederà dunque una fase di post-trattamento aerobico) e una gestione più complessa dei flussi liquidi di scarico, soprattutto nel caso della scelta di un processo anaerobico ad umido.

Va rilevato che, almeno per quanto riguarda le esperienze italiane, l'applicazione della digestione anaerobica a materiale "sporco" quale la FOP si è spesso rilevata fallimentare. Si veda in proposito quanto riportato da Giacetti in "Compost ed energia da biorifiuti" (Vismara, Grosso, Centemero, 2009), ma considerazioni analoghe sono state rilevate da altri gestori di impianti. Tutte le realizzazioni più avanzate attualmente funzionanti in Italia (Bassano del Grappa, Camposampiero, Pinerolo, Montello) operano infatti su organico di qualità separato alla fonte, sia da grandi utenze (mense, mercati rionali, ecc.) che da utenze domestiche.

2.2.3. Considerazioni sulla produzione di "sabbia sintetica" dal RUR

E' stata recentemente proposta la possibilità di effettuare un recupero del RUR mediante tecnologie di estrusione e produzione della cosiddetta "sabbia sintetica"³. Questo processo, messo a punto all'interno del Centro Riciclo di Vedelago (TV), trova applicazione prevalente nel processamento dei flussi di scarto dei materiali plastici raccolti per via differenziata, altrimenti destinati a recupero energetico. Prevede l'effettuazione di ulteriori lavorazioni molto spinte su

³ La definizione corretta è "miscele di materiali polimerici di riciclo e di altri materiali a base cellulosa di riciclo da utilizzarsi come aggregati nelle malte cementizie" (Norma UNI 10667-14). Si tratta in pratica di un materiale granulato che può essere tritato in maniera più o meno spinta in funzione delle esigenze dell'utilizzatore finale.

questi flussi allo scopo di tritarli finemente e rimuovere tutte le componenti indesiderate (metalli in particolare), per arrivare ad un contenuto complessivo di plastiche non inferiore all'84%. Il materiale così ottenuto viene alimentato ad un processo di estrusione che permette di conseguire un minimo di "agglomerazione" (grazie alla parziale fusione della componente plastica), che ne consenta un migliore utilizzo successivo. L'estrusione comporta anche una diminuzione dell'umidità, a causa del surriscaldamento.

La "sabbia sintetica" viene venduta ad aziende operanti nel settore dello stampaggio delle materie plastiche oppure operanti nel settore dell'edilizia, per la produzione di miscele di calcestruzzo e di manufatti in cemento.

Il valore dell'84% di contenuto minimo di materiali plastici, precedentemente citato, deriva dall'indicazione specifica della Norma di riferimento (UNI 10667-14). Il restante 16% dovrà essere costituito da materiali a base cellulosica, mentre gli elementi indesiderati (vetro, metalli ed inerti) non possono superare l'1% in peso della miscela totale.

In tempi recenti è stata proposta l'applicazione di questa tecnologia anche al RUR, con specifico riferimento a quello prodotto in realtà molto particolari, caratterizzate da livelli estremamente elevati di raccolta differenziata, accompagnati da importanti politiche di sensibilizzazione ed incentivazione verso pratiche virtuose di minimizzazione della produzione di rifiuti, quali ad esempio l'utilizzo di pannolini lavabili o compostabili.

A tale scopo è stata effettuata, a cura dei gestori stessi del Centro Riciclo Vedelago, un'analisi merceologica anche sul RUR prodotto in Provincia di Novara, campionato presso la discarica di Barengo in data 8 Aprile 2009. I risultati, sebbene non particolarmente rappresentativi, hanno evidenziato una presenza considerevole di materiali indesiderabili per il processo di estrusione, ed in particolare: circa 7% di carta, circa 39% di organico, circa 4% di legno, vetro ed inerti. Il 10% circa è costituito da pannolini, anch'essi materiali non lavorabili. La conclusione degli estensori del rapporto è stata che *"il trattamento in un processo di estrusione e granulazione della frazione residua secca esaminata risulta possibile se viene ridotta la presenza della frazione umida e dei pannolini"*, frazione che, come detto, rappresenta nel campione analizzato circa il 50% in peso!

Anche facendo riferimento alle caratterizzazioni merceologiche ufficiali effettuate dall'ATO rifiuti novarese⁴ ci si trova ben lontani da un RUR compatibile con tale processo: risulta infatti un contenuto di materiali plastici compreso tra il 14 e il 22% circa, valori ben lontani da quanto richiesto dalla Norma di riferimento (il già citato 84%).

Pare dunque quantomeno azzardata l'ipotesi di basare la gestione complessiva del RUR provinciale su un processo caratterizzato:

- innanzitutto dal non essere adatto a trattare in maniera autonoma lo stesso RUR attualmente prodotto, e comunque ben difficilmente anche in prospettiva futura
- da una conseguente fortissima sensibilità alla variazione delle caratteristiche qualitative del RUR
- dalla necessità di operare miscele con rilevanti quantitativi di materiali di scarto a matrice plastica, per i quali deve essere garantita la disponibilità.

A ciò si aggiunga il fatto che sussistono alcuni dubbi in merito all'effettiva applicabilità, quantomeno a livello formale e di rispetto legislativo, di un trattamento di questo genere al RUR. La Norma UNI fa infatti sempre riferimento a materiali "provenienti dalla raccolta differenziata".

Infine l'ipotesi che ulteriori forti incrementi della raccolta differenziata a livello provinciale possano garantire la produzione di un RUR già idoneo al trattamento pare tutt'altro che realistica, in particolare perché l'attuale composizione del RUR risulta molto differente da quella necessaria per la sua alimentazione al processo di estrusione. E pertanto risulterebbe necessario richiedere ai cittadini un ulteriore importante sforzo di differenziazione del rifiuto, difficilmente sostenibile e realizzabile in un contesto già particolarmente avanzato quale quello in esame.

2.3. Presidi ambientali per gli impianti TMB

Gli impianti TMB richiedono la messa in opera di adeguati presidi ambientali, relativi in particolare al controllo delle emissioni atmosferiche. In tal senso le fasi più critiche sono ovviamente costituite dai processi biologici, dai quali si originano flussi gassosi contaminati da un ampio spettro di sostanze inquinanti, riconducibili alle due famiglie dei composti organici volatili (COV) e dei cataboliti ridotti di processo (ammoniaca – NH₃ – e acido solfidrico – H₂S – in primis). Elemento comune di questi gruppi di sostanze è la caratteristica odorigena che li contraddistingue.

⁴ Trattati dallo stralcio di piano d'ambito per lo smaltimento del rifiuto indifferenziato, Febbraio 2009

Inoltre, da tutte le fasi del trattamento e dunque anche da quelle meccaniche, è opportuno controllare l'emissione di materiale particolato, tanto più rilevante con il diminuire dell'umidità del materiale.

Per questi motivi tutte le fasi del trattamento devono avvenire al chiuso, con aspirazione dell'aria interna. In particolare l'aria aspirata dalle zone dei trattamenti meccanici potrà essere convenientemente utilizzata come aria di processo per il trattamento biologico (se aerobico), e quella in uscita da quest'ultimo verrà convogliata agli appositi dispositivi di abbattimento.

La rimozione delle sostanze odorigene viene condotta mediante il ricorso a processi di tipo biologico, chimico-fisico o termico. In Italia le tecnologie più diffuse sono quelle basate sul principio della biofiltrazione, efficace nei confronti dell'abbattimento degli odori, meno nei confronti dell'abbattimento dei COV totali. Se ci si prefigge un abbattimento spinto di questi ultimi è allora necessario il ricorso a tecnologie di tipo termico (combustori termici rigenerativi oppure catalitici), i quali però comportano elevati costi di installazione e gestione, consumo di combustibili fossili, produzione di inquinanti aggiuntivi (NO_x, CO₂ fossile).

Maggiori dettagli su questi aspetti sono riportati in Cernuschi e Rigamonti (2009), all'interno del volume "Compost ed energia da biorifiuti" (Vismara, Grosso, Centemero).

2.4. Considerazioni conclusive

2.4.1. Aspetti generali

Il ricorso all'impiantistica TMB per il trattamento del RUR può trovare giustificazione in situazioni caratterizzate da modesti livelli di raccolta differenziata generali, ed in particolare da una raccolta dell'umido scarsa o assente. Un impianto TMB può consentire infatti un discreto livello di recupero di materiali secchi riciclabili (metalli ferrosi e non ferrosi in particolare), una stabilizzazione della componente biodegradabile ai fini del conferimento in discarica ed un'eventuale preparazione di CDR, da avviare preferibilmente ad utenze industriali. Un ulteriore aspetto importante a favore di una scelta di questo tipo è la maggiore facilità di collocazione sul territorio rispetto all'impiantistica di conversione termica, ed in particolare a quella di combustione.

Questi aspetti favorevoli non devono però trarre in inganno, né portare a sottovalutare gli aspetti di criticità associati alla scelta TMB, associati prevalentemente alla collocazione dei materiali recuperati. Quest'ultimo aspetto, particolarmente rilevante per materiali quali FOS o CDR, può risultare altrettanto importante anche per i materiali riciclabili, come si osserva proprio in questo periodo a seguito della crisi finanziaria globale e della conseguente saturazione dei mercati del recupero dei materiali, associata al crollo generalizzato dei prezzi.

Il gestore dell'impianto, e più in generale il gestore del servizio integrato, devono pertanto essere ben consci di questo aspetto in sede di pianificazione complessiva.

2.4.2. Applicabilità al contesto della Provincia di Novara

La Provincia di Novara si colloca tra le realtà più virtuose in assoluto, a livello italiano ma non solo, per quanto riguarda la differenziazione dei rifiuti, le modalità di raccolta e tutti gli aspetti indiretti ad essi associati. Si consideri ad esempio la produzione totale di rifiuti, che si attesta su valori decisamente più bassi rispetto alla media nazionale, e che risulta già stabilizzata da alcuni anni, se non addirittura in diminuzione.

La caratterizzazione merceologica del rifiuto residuo, effettuata nell'autunno 2008 presso la discarica di Barengo, mostra una modesta presenza di materiale organico (rifiuti da cucina e da giardini), pari all'8% circa. Anche sommando il 70% del sottovaglio, che si può ragionevolmente ritenere costituito da materiale organico, si raggiunge un contenuto complessivo di organico di circa il 13%. Nell'ipotesi di applicare un processo di bioessiccazione (sistema a flusso unico), la perdita in peso sarà compresa tra l'8 e il 10% (si veda ad esempio quanto riportato da Ragazzi e Rada in Vismara, Grosso, Centemero, 2009), valore decisamente modesto nell'ottica della riduzione del materiale da conferire in discarica. Analogamente, l'ipotesi di applicare un sistema a flusso separato pare di scarso interesse, sia per quanto già illustrato in merito alle problematiche di collocazione della FOS, sia a causa dei ridotti quantitativi di organico residuo. D'altro canto gli elevatissimi livelli di raccolta differenziata raggiunti nel bacino servito (63% al 2008) portano a ritenere che i materiali residui presenti nel RUR presentino caratteristiche qualitative decisamente modeste e siano pertanto poco o per nulla riciclabili.

In un contesto di questo genere il RUR risulta caratterizzato da una produzione quantitativa modesta, da una discreta eterogeneità residua, ma soprattutto dalla presenza di materiali ormai

scarsamente riciclabili e che comunque difficilmente sono in grado di generare prodotti appetibili dal mercato. Inoltre, dal punto di vista della presenza di materiale biodegradabile residuo, si può facilmente stimare che il RUR rispetta già tutti gli obiettivi fissati, nel breve e medio termine, dal D.Lgs. 36/03.

Sulla base di recenti acquisizioni in ambito tecnico-scientifico (Giugliano, Grosso e Rigamonti, 2009) relative all'integrazione tra recupero di materia e recupero di energia in sistemi integrati di gestione dei rifiuti, ferma restando la priorità del recupero di materia, emerge l'importante ruolo del recupero di energia dal RUR e più in generale da tutti i flussi di scarto generati dalle operazioni di selezione e riciclo. Si ritiene che questa sia la strada preferenziale da percorrere anche nel bacino della Provincia di Novara, a causa di tutte le considerazioni sopra esposte.

3. Considerazioni comparative

3.1. Confronto economico TMB – termovalorizzatore.

Il confronto ha lo scopo di determinare il costo per tonnellata di rifiuto da trattare.

Si fa riferimento ad un impianto per il trattamento di 60.000 t/anno di rifiuto con potere calorifico PCI \cong 14.000 kJ/kg (3.350 kcal/kg).

Nella valutazione si farà riferimento, per entrambi i casi, ai soli costi e ricavi associati a costruzione e gestione degli impianti. I valori finali riportati sono pertanto da ritenersi al netto degli eventuali utili di impresa.

3.1.1. TMB

Il costo di trattamento per tonnellata di RUR si determina tenendo conto del costo di impianto e del prezzo di smaltimento dei materiali prodotti. Tenendo anche conto del quantitativo annuo da smaltire, si fa riferimento ad un impianto per la produzione di CDR.

Questi tipi di impianti sono tra i più diffusi e con prestazioni note.

Si considera che da una tonnellata di rifiuto di partenza si ottenga:

- un quantitativo di CDR compreso tra 0,6 e 0,7 tonnellate (questi valori sono relativamente alti rispetto alla media italiana, ma trovano ragione nell'elevato PCI del RUR sottoposto a trattamento, già prossimo a quello del CDR a norma di legge)
- circa 0,1 t di Frazione Organica Stabilizzata (FOS) oppure di materiale inerte, in funzione della tecnologia di produzione di CDR considerata. Entrambi questi materiali andranno smaltiti in discarica, seppure a costi differenti.

Negli impianti attuali il costo di produzione per un buon CDR si può stimare compreso tra 50 e 70 € per tonnellata di materiale in ingresso, comprensivo di tutte le opere civili ed elettromeccaniche, dei sistemi di trattamento delle emissioni atmosferiche ed idriche, ecc.

Per lo smaltimento dei materiali prodotti si hanno invece prezzi molto differenziati in funzione delle loro caratteristiche, dell'entità del trasporto, ecc.

Si assume che:

- lo smaltimento in discarica della FOS abbia un costo compreso tra 80 e 120 €/t, inclusivo del trasporto;
- lo smaltimento in discarica dei materiali inerti abbiano un costo compreso tra 40 e 60 €/t, inclusivo del trasporto;

- lo smaltimento del CDR abbia un costo compreso tra 80 e 90 €/t, inclusivo del trasporto⁵.

Sulla base di queste ipotesi, il prezzo complessivo dell'opzione TMB risulta compreso all'incirca nell'intervallo 110 – 145 €/t, con un valore medio di circa 125 €/t.

La successive Tabb. 3.1 e 3.2 illustrano la variazione del costo complessivo in funzione del valore assunto dai due parametri più critici: costo di smaltimento di FOS, CDR e materiali inerti.

Tab. 3.1: Costo complessivo del trattamento TMB (€/tRUR) in funzione del costo di smaltimento di FOS e CDR (*Ipotesi: sistema a flusso separato; costo di impianto 50 €/tRUR; produzione CDR 0,7 t/tRUR; produzione FOS 0,1 t/tRUR*).

Smaltimento FOS (€/t) → Smaltimento CDR (€/t) ↓	80	90	100	110	120
70	107	108	109	110	111
80	114	115	116	117	118
90	121	122	123	124	125
100	128	129	130	131	132

Tab. 3.2: Costo complessivo del trattamento TMB (€/tRUR) in funzione del costo di smaltimento di inerti e CDR (*Ipotesi: sistema a flusso unico; costo di impianto 70 €/tRUR; produzione CDR 0,6 t/tRUR; produzione inerti 0,1 t/tRUR*).

Smaltimento inerti (€/t) → Smaltimento CDR (€/t) ↓	40	50	60
70	116	117	118
80	122	123	124
90	128	129	130
100	134	135	136

3.1.2. Termovalorizzatore.

Considerando per il termovalorizzatore un funzionamento pari ad 7.500 ore/anno si ha una portata oraria di rifiuti pari a 8 t/h con un flusso termico complessivo pari a 31 MW termici.

Si considera un costo di impianto pari a 2 milioni di € per MW termico, compresa la somma a disposizione, per cui si ha un costo complessivo pari a 62 milioni di €.

⁵ Esiste in Italia una realtà dove il conferimento del CDR ad un utilizzatore industriale avviene a costo nullo o addirittura con un minimo ricavo da parte del conferitore. Si tratta tuttavia di una situazione molto specifica e difficilmente replicabile altrove, in quanto strettamente legata ad un favorevole contesto locale e comunque associata ad una valenza anche “politica” dell’intera operazione. Anche le esperienze straniere di utilizzo del CDR in utenze industriali – Germania in primis – sono tutte basate sul riconoscimento di una tariffa di conferimento al gestore dell’impianto utilizzatore del CDR. Questo trova giustificazione nell’aumento delle problematiche operative-gestionali associate all’utilizzo del CDR, che compensano i benefici economici associati al risparmio di combustibile fossile.

Si assume un ammortamento in 15 anni con una spesa annua per il finanziamento pari a 6,15 milioni di €.

Si considera che l'impianto produca energia elettrica con un rendimento netto pari al 22% (avendo già escluso gli autoconsumi, per cui questo parametro fornisce già la energia elettrica vendibile sul mercato).

- Costo di investimento compresi oneri sicurezza	62 milioni di €
- Oneri finanziari ammortamento	6,15 milioni di €/anno
- Personale	1 milione di €/anno
- Chemicals	0,5 milioni €/anno
- Manutenzione ordinaria e straordinaria \cong 3%	1,9 milioni €/anno
- Smaltimento scorie ⁶	0,75 milioni €/anno
- Smaltimento polveri	0,5 milioni €/anno
- Spese generali ed amministrative ⁷	0,5 milioni €/anno
- Produzione teorica energia elettrica: $0,22 \times 31 \times 7.500 = 51.150$ MWh/anno	

Si considera, in via cautelativa, un coefficiente di sfruttamento pari a 0,9⁸, per cui la produzione netta vendibile è pari a circa 46.000 MWh/anno.

Per quanto riguarda i ricavi dalla vendita di energia elettrica, è opportuno mantenere distinta la quota associata al prezzo di mercato da quella associata alle incentivazioni previste per questa tipologia di impianti ("Certificati Verdi"). Sulla base delle ultime rilevazioni ufficiali (anno 2008) si assume un valore di 80 €/MWh per entrambi i prezzi, con la differenza che l'incentivazione si applica solo al 51% dell'energia prodotta (Legge 30 Dicembre 2008).

Sulla base di queste ipotesi, il prezzo complessivo dell'opzione termovalorizzazione risulta compreso tra un massimo di 126 €/t e un minimo di 95 €/t, rispettivamente senza incentivazione dell'energia elettrica prodotta e con incentivazione del 51% della stessa.

⁶ E' prassi sempre più diffusa anche in Italia effettuare il recupero completo delle scorie, mediante separazione di ferro e metalli non ferrosi, e successivo utilizzo del materiale inerte in attività di costruzione (tipicamente per sottofondi stradali). Tale costo è dunque destinato a subire una riduzione (si veda quanto riportato in Appendice).

⁷ In tale costo sono inclusi possibili oneri di sviluppo (quali consulenze tecniche, legali, finanziarie, amministrative di interfaccia con gli enti finanziatori, in particolare nel caso di ricorso alla formula del "Project financing").

⁸ Il coefficiente di sfruttamento tiene conto, in modo forfaitario, di tutte le situazioni di mancata produzione o di produzione inferiore rispetto a quella nominale che si possono verificare nel corso di un anno di funzionamento dell'impianto

Il bilancio economico può risultare più favorevole nell'ipotesi di funzionamento cogenerativo, ovvero di cessione del calore di scarto ad utenze termiche. Questa ipotesi non è stata in questa sede considerata.

3.1.3. Brevi considerazioni sulla produzione di “sabbia sintetica”.

Il centro riciclo di Vedelago, dove si effettua la produzione di sabbia sintetica, tratta attualmente circa 20.000 t/anno di rifiuti ed ha un personale di circa 60 addetti.

Il costo dell'impianto è valutato dell'ordine di 5 ÷ 6 milioni di €.

Volendo trattare circa 60.000 t/anno di materiale l'impianto andrebbe triplicato ed è quindi valutabile un costo dell'ordine di 15 ÷ 18 milioni di € (contrariamente agli impianti di termovalorizzazione, che beneficiano di un notevole effetto scala nel caso di unità di grossa taglia, per impianto di tipo meccanico si può considerare un andamento lineare dei costi con la potenzialità di trattamento, a causa della modularità di costruzione che li caratterizza. Un medesimo discorso vale per il personale, che andrebbe triplicato arrivando a circa 180 addetti.

Volendo applicare i criteri economici già usati per il termovalorizzatore, si avrebbe un costo annuo del personale pari a 7,2 milioni di € ed un ammortamento annuo, sempre facendo riferimento a quanto precedentemente assunto (15 anni), pari a 2 milioni di €.

Quindi, senza tenere conto di altre spese quali energia elettrica, acqua, manutenzione impiantistica, ecc., si avrebbe una spesa annua pari a circa 9,2 milioni di € e quindi una spesa per ton di rifiuto pari a 153 €/t.

Non è chiaro se vi può essere un introito dai materiali prodotti, ma il costo per t così ricavato porta a qualche necessaria meditazione.

Bibliografia essenziale

M. Giugliano, M. Grosso, L. Rigamonti (a cura di) (2009). *La gestione integrata dei rifiuti*. CIPA Editore, Collana Ambiente – Volume 32 – ISBN 978-88-95591-04-9

R. Vismara, M. Grosso, M. Centemero (a cura di) (2009). *Compost ed energia da biorifiuti*. Dario Flaccovio Editore, ISBN 978-88-7758-861-6, pagg. 456

Juniper Consultancy Services Ltd. (2005). *Mechanical-Biological-Treatment: a guide for decision makers. Processes, policies and markets*. Disponibile su www.juniper.co.uk

Kuehle-Weidemeier (2009). *Proceedings of the III International Symposium MBT and MRF*. Hannover, 12-14 Maggio

Appendice – cenni ai trattamenti applicabili ai residui dei processi di termovalorizzazione

A.1. Caratteristiche dei residui

I moderni impianti di termodistruzione dei rifiuti producono tre distinte tipologie di residui solidi: le scorie separate direttamente in fase di combustione, le ceneri volanti trattenute dalle apparecchiature di depolverazione ed i sottoprodotti derivanti dal controllo delle emissioni gassose, sia se effettuati con processi a secco o semisecco (residui solidi dell'assorbimento) che con sistemi di lavaggio ad umido (fanghi provenienti dalla depurazione degli spurghi dalle torri di lavaggio).

Le principali caratteristiche qualitative e quantitative delle singole tipologie di residui, nonché l'entità dei corrispondenti flussi e la loro ripartizione percentuale sul complesso del materiale prodotto, sono strettamente correlate alla natura del rifiuto trattato, alle modalità di combustione ed alla configurazione del sistema di controllo delle emissioni.

La produzione specifica complessiva di residui (Tab. A.1) può considerarsi attualmente compresa tra 160 e 330 kg per tonnellata di rifiuto trattato, con il limite inferiore dell'intervallo rappresentativo della combustione di rifiuti derivanti da operazioni di preselezione piuttosto spinte o da contesti territoriali caratterizzati da elevati livelli di raccolta differenziata, quale quello in oggetto. A titolo di esempio la Fig. A.1 mostra l'evoluzione della produzione complessiva di residui in funzione dell'incremento della raccolta differenziata in un bacino rappresentativo del Nord Italia. E' evidente come già valori del 40-45% di RD comportino una produzione complessiva di residui inferiore al 22% in peso del rifiuto bruciato, con ulteriori margini di riduzione nel caso di incrementi della RD fino ai valori attualmente osservati nelle aree di studio (Novara e VCO).

Tab. A.1: Produzione specifica di residui da attività di termodistruzione di rifiuti urbani.

Residuo	Produzione specifica ¹ (kg t ⁻¹ rifiuto)
Scorie	150-250 ²
Ceneri volanti + polveri di caldaia	10-30 ²
Residui dell'assorbimento	
Secco (calce)	20-45
Secco (bicarbonato)	15-20
Semisecco (calce)	15-35
Umido	0,2-3
Carbone attivo	0,5-1
TOTALE	160 – 330

Note: ⁽¹⁾ Base secca.

⁽²⁾ Valori tipici rilevabili su forni a griglia; nei forni a letto fluido il rapporto tra scorie e ceneri volanti risulta invertito, con quantitativi di queste ultime che possono arrivare a costituire l'80-90% del totale.

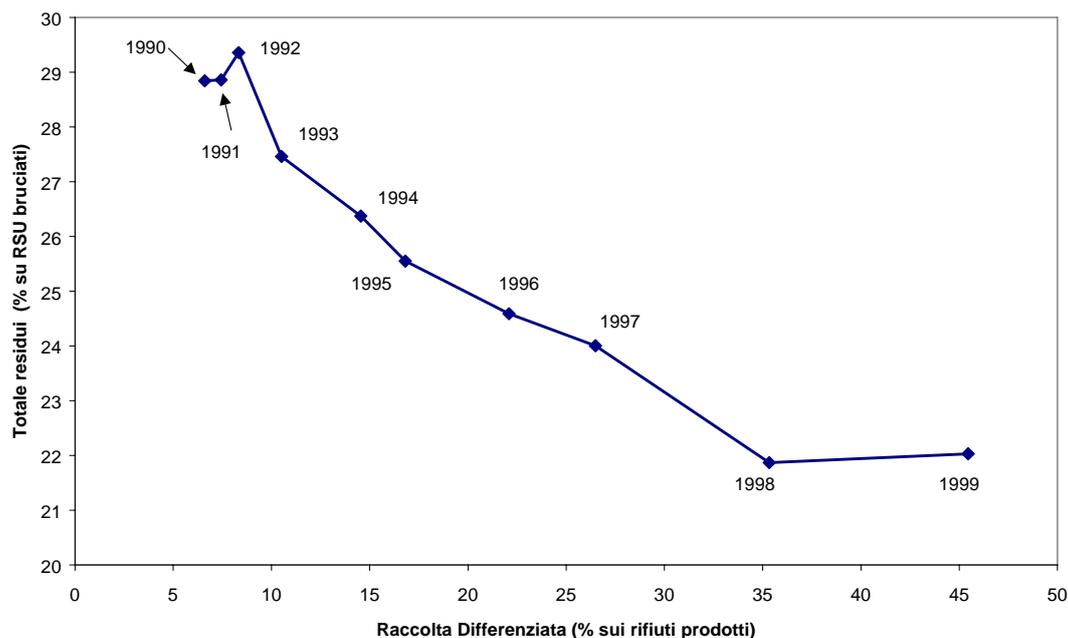


Fig. A.1 - Effetto della raccolta differenziata sulla produzione totale di residui solidi da un impianto di termovalorizzazione

Le scorie di fondo costituiscono la frazione più rilevante; per camere di combustione a griglia, che rappresentano la tecnologia preponderante nel settore, si possono considerare produzioni comprese tra 150 e 250 kg per tonnellata di rifiuto trattato (tra il 5%-10% in termini di volume del materiale alimentato), in funzione dell'estensione delle iniziative di raccolta differenziata o dell'utilizzo di schemi di preselezione più o meno spinti. Materiale assai eterogeneo e di pezzatura variabile, le scorie sono costituite dalle sostanze inerti originariamente presenti nel rifiuto, da residui metallici minerali e da un limitato contenuto di organici incombusti.

Le ceneri volanti separate dai dispositivi di depolverazione, per le installazioni ad alta efficienza di più comune adozione (filtri a tessuto, depolveratori elettrostatici), risultano indicativamente comprese tra 10 e 30 kg per tonnellata di rifiuto trattato. Le ceneri volanti sono caratterizzate da granulometrie notevolmente più ridotte ed uniformi, con particelle quasi esclusivamente costituite dai residui inorganici del processo di combustione ed in particolare arricchite di metalli pesanti volatili (cadmio, piombo), che su di esse si concentrano.

La produzione di residui dai sistemi di controllo delle emissioni gassose presenta le variazioni più significative, strettamente correlate alla configurazione impiantistica adottata: la Tab. A.1 ne riassume, a titolo indicativo, i quantitativi specifici attesi per le diverse tipologie di sistemi. Negli impianti a secco e semisecco i residui sono essenzialmente costituiti dai sali prodotti dalle reazioni di neutralizzazione, dall'eccesso di reagente utilizzato, dal carbone attivo dosato per il controllo dei microinquinanti e dalle ceneri volanti, il cui contributo ponderale dipende dall'adozione o meno di un'operazione di depolverazione a monte.

Le tendenze impiantistiche più recenti indicano un ricorso sempre più frequente a linee di depurazione degli effluenti gassosi completamente a secco, ovvero senza l'utilizzo di acqua o prodotti liquidi in generale. Questo è possibile grazie alle interessanti prestazioni ottenibili con il ricorso ad alcuni reagenti neutralizzanti in forma solida (bicarbonato di sodio, in particolare), ormai molto simili a quelle tipiche dei sistemi ad umido. Ciò consente, oltre ad una notevole

semplificazione impiantistica e gestionale, di escludere il comparto ambientale acquatico dai possibili elementi recettori dell'inquinamento causato da questa tipologia di impianti, in accordo con le più recenti indicazioni normative in materia di prevenzione e controllo integrato (IPPC).

Come indicato in Tab. A.1, il bicarbonato di sodio risulta peraltro il reagente che comporta la minore produzione di residui rispetto a quelli considerati. E consente inoltre un recupero quasi totale dei sali in esso contenuti, come verrà meglio descritto nel seguito.

A.2. Trattamenti applicabili alle scorie

Il recupero delle scorie è prassi piuttosto consolidata in numerosi stati europei, ed in particolare in quelli dove è maggiore il ricorso alla termovalorizzazione dei rifiuti (Francia, Paesi Bassi, Danimarca, Belgio). In Italia si osserva proprio in questi ultimi anni un crescente interesse verso questa pratica, spinto da una serie di motivazioni, sia di tipo economico (in particolare il prezzo crescente delle materie prime, che rende interessante il recupero delle componenti ferrose e soprattutto non ferrose), che di tipo ambientale (la “chiusura del ciclo” del processo di incenerimento). La conseguenza è stata la nascita di numerose iniziative di nuove piattaforme di recupero delle scorie, sia da parte degli stessi gestori degli impianti di termovalorizzazione (A2A, Hera, ENiA) che di società private che intendono entrare nel settore proponendosi come recuperatori per conto terzi. Questi ultimi sono spesso utilizzatori finali di materiali edili oppure fornitori di industrie quali quella della produzione del cemento.

I trattamenti applicabili alle scorie fanno dunque riferimento all'estrazione della frazione ferrosa e non ferrosa dei metalli in essi contenuta, collocabili all'interno dei rispettivi settori produttivi (acciaio ed alluminio in primis) e alla preparazione di prodotti recuperabili nell'industria dei materiali da costruzione (cementifici) e nel settore dei sottofondi stradali. Il tutto adottando sistemi di trattamento relativamente semplici (separazione magnetica e non magnetica – a correnti indotte, frazionamento granulometrico, triturazione). La separazione dimensionale può essere effettuata mediante processi a secco o a umido; mentre i primi fanno ricorso a tradizionali vagli piani o a tamburo, con luci di maglia negli intervalli 20-50 mm e 2-10 mm, allo scopo di separare la frazione grossolana da quella fine, quelli ad umido combinano il principio della separazione fisica con quello dell'estrazione in acqua dei componenti solubili, in particolare cloruri, piombo e rame. La scelta è anche legata alle caratteristiche richieste dagli utilizzatori finali dei materiali.

Una delle conseguenze del forte incremento che si osserva nel recupero delle scorie (come alternativa al loro smaltimento in discarica controllata) è quello della diminuzione dei costi di trattamento. Nelle ultime rilevazioni (Luglio 2009) questi si stanno assestando intorno a 40-50 €/t, a fronte di valori decisamente più elevati (anche doppi) registrati negli anni scorsi.

A.3. Trattamenti applicabili ai residui di depurazione

Nel caso dei residui prodotti dai trattamenti di depurazione dei fumi (ceneri volanti, residui dell'assorbimento), le possibilità di recupero appaiono limitate dalle caratteristiche intrinseche dei materiali nonché dai costi dei pretrattamenti richiesti che rendono poco sostenibili i processi

adottabili allo scopo, considerando anche la qualità dei materiali ottenibili ed il modesto valore economico di quelli potenzialmente sostituibili. Pertanto fino ad oggi numerosi gestori di impianti si limitavano a conferire il materiale a smaltitori terzi autorizzati, senza preoccuparsi del destino finale. Quest'ultimo era molto spesso rappresentato da uno smaltimento in cavità profonde (miniere di sale) in Germania.

L'eccezione al riguardo, di crescente applicazione, è costituita dal recupero di sali all'interno di processi produttivi. Di particolare interesse è il caso del processo NEUTREC®, espressamente dedicato ai residui derivanti dal trattamento dei fumi mediante bicarbonato di sodio (reagente che, come accennato in precedenza, risulta peraltro particolarmente performante sull'abbattimento dei gas acidi). In tale processo, sviluppato dalla Solvay (Fig. A.1), il materiale solido, costituito dai sali prodotti delle principali reazioni di neutralizzazione (NaCl , NaF , Na_2SO_4), dagli eventuali additivi adsorbenti (carbone attivo) e da ceneri volanti residue dall'operazione di depolverazione condotta a monte, viene miscelato con una soluzione acquosa contenente additivi in condizioni di pH controllato, in modo da disciogliere i sali più solubili e precipitare i metalli. La sospensione prodotta viene successivamente inviata ad un'operazione di filtropressatura per separare il solido insolubile dalla salamoia grezza che, dopo trattamento di finitura su carbone attivo e resine a scambio ionico, viene riutilizzata nell'impianto di produzione della soda. Il residuo della filtropressa (costituito dai metalli precipitati, dall'adsorbente e dalle ceneri volanti), prodotto in quantità pari al 10% - 20% in peso del materiale trattato, è avviato allo smaltimento finale, previo trattamento di inertizzazione: a tale proposito è stata anche messa a punto una variante del processo che prevede una miscelazione preliminare del materiale da trattare con leganti idraulici prima della fase di dissoluzione, in modo da ottenere un prodotto solido finale in grado di stabilizzarsi senza la necessità di ulteriori manipolazioni.

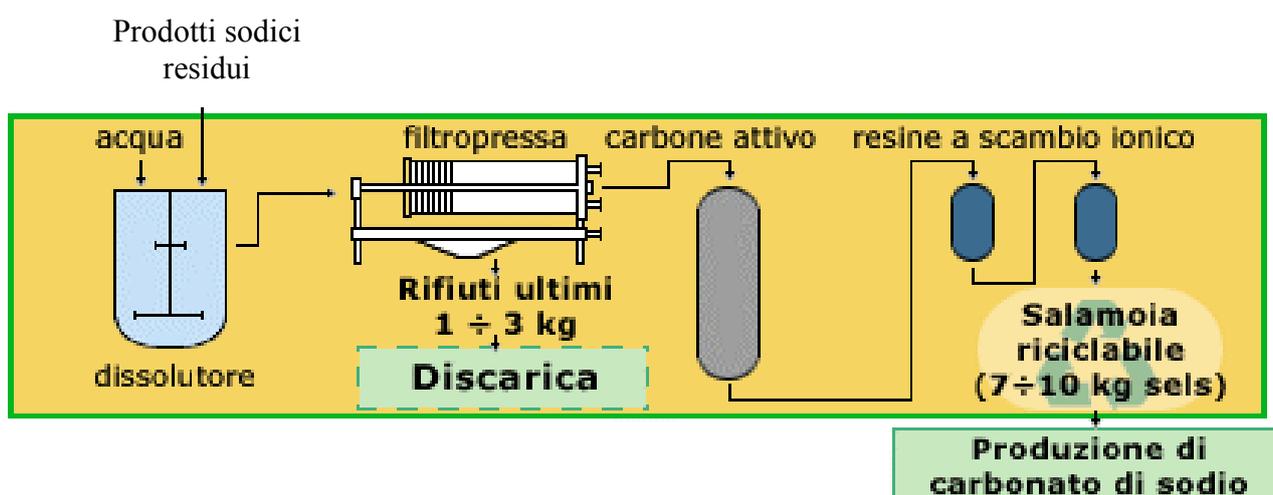


Fig. A.1: Rappresentazione del processo Neutrec® per il recupero dei Prodotti Sodici Residui (i valori riportati fanno riferimento a 1 t di rifiuti inceneriti)