

RELAZIONE:

Vol. 3 capitoli 6 7 8 9

**APPROFONDIMENTI
STUDIO D'IMPATTO
AMBIENTALE (SIA)
TERMODISTRUTTORE DI
TREZZO SULL'ADDA**

A cura di:

Prof. G.A. De Leo

e

Ing. Paolo Greco

Ing. Gianluca Crapanzano

Ing. Mario Grosso

Cesare Vergottini

Gruppo di lavoro

Prof. G.A. De Leo

Docente di Ecologia presso il dipartimento di Scienze ambientali dell'Università degli studi di Parma e di Fondamenti di Valutazione d'Impatto Ambientale presso il Dipartimento di Elettronica del Politecnico di Milano.

Ing. Paolo Greco

– Università degli studi di Parma - Collaboratore del dipartimento di Scienze Ambientali

Ing. Gianluca Crapanzano

Etaconsult – Milano

Ing. Mario Grosso

PhD – Assegnista di ricerca presso il DIIAR (Sez. Ambientale) – Politecnico di Milano

Cesare Vergottini

Studente del 5° anno e laureando in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio del Politecnico di Milano

SOMMARIO

Il presente lavoro costituisce la documentazione tecnica dello studio condotto dal Prof. De Leo e dai suoi collaboratori nell'ambito del lavoro commissionato dal Comune di Trezzo sull'Adda per gli approfondimenti e la verifica/valutazione del SIA (Studio d'Impatto Ambientale) realizzato, su base volontaria, dalla società Prima/TTR per l'impianto d'incenerimento di RSU che si sta realizzando nello stesso comune.

Il primo capitolo introduttivo descrive cosa è uno Studio d'Impatto Ambientale (SIA) e una Valutazione d'Impatto Ambientale (VIA), il perché del presente studio condotto dall'università di Parma e dai suoi collaboratori.

Il secondo capitolo è stato dedicato alla normativa italiana sull'inquinamento atmosferico, le emissioni e la qualità dell'aria.

Il terzo capitolo descrive i principali inquinanti, le origini, i principali effetti sull'uomo e sull'ambiente.

Il quarto capitolo indaga le emissioni e le criticità ambientali dell'area intorno a Trezzo principalmente in termini d'inquinamento atmosferico intorno a Trezzo sulla base degli studi effettuati nel recente piano regionale della qualità dell'aria (PRQA).

Nel quinto capitolo è riportata la metodologia ed i risultati di un'analisi di rischio degli effetti sulla salute umana da parte dei microinquinanti emessi dall'inceneritore.

Nel sesto capitolo è presentata una panoramica delle migliori tecnologie disponibili (MTD) per gli impianti di termodistruzione e per l'abbattimento degli inquinanti. È descritta la tecnologia impiegata a Trezzo e quelle impiegate negli altri impianti lombardi.

Il settimo capitolo è dedicato ad un'analisi condotta sul territorio lombardo finalizzata a capire, dai vari punti di vista e sulla base delle diverse esperienze, quali problemi sociali, ambientali economici e gestionali si sono incontrati nelle varie realtà in cui sono stati realizzati impianti di termodistruzione di RSU, quali iniziative sono state prese per fronteggiare le richieste delle amministrazioni e dei cittadini e i risultati raggiunti.

L'ottavo capitolo è un report delle attività svolte con la società Prima/TTR, le richieste e le risposte, la verifica ed il giudizio dello studio d'impatto ambientale.

Il nono capitolo costituisce una breve relazione in cui, sulla base dello studio, sono espressi dei giudizi sulla situazione ambientale a Trezzo e sono riportati i suggerimenti rivolti all'amministrazione comunale, ai cittadini e ai gestori dell'impianto.

6

ASPETTI TECNOLOGICI DEGLI IMPIANTI DI TERMODISTRUZIONE

6.1	COMBUSTIONE E RSU	305
6.1.1	<i>Principi generali della combustione</i>	306
	I parametri del processo	307
	Combustione ed energia termica	308
6.1.2	<i>I RSU come combustibile</i>	309
6.2	IL RECUPERO DI ENERGIA DALLA COMBUSTIONE DEI RSU	310
6.2.1	<i>Recupero indiretto di energia: pirolisi e gassificazione</i>	310
6.2.2	<i>Il recupero di energia nella combustione diretta</i>	312
	Il materiale combustibile	312
	Il recupero di energia	313
	Produzione di calore	313
	Produzione di elettricità	314
	Produzione di calore ed elettricità (cogenerazione)	315
6.3	LE TECNOLOGIE DI COMBUSTIONE DIRETTA DEI RSU	317
6.3.1	<i>Forno a griglia</i>	317
	Linee di sviluppo	319
6.3.2	<i>Forno a tamburo rotante</i>	322
6.3.3	<i>Forno a letto fluido</i>	324
6.3.4	<i>Forno ad aria controllata</i>	327
6.4	TECNOLOGIE DI CONTROLLO DELLE EMISSIONI ATMOSFERICHE	328
	Macroinquinanti	329
	Microinquinanti inorganici	330
	Microinquinanti organici	330
6.4.1	<i>Il controllo preventivo delle emissioni atmosferiche</i>	333
6.4.2	<i>Processi di depurazione delle emissioni atmosferiche</i>	334
	Controllo del particolato	334
	Processi a secco	335
	Processi a umido	338
	Controllo dei gas acidi	339
	Processi a umido	339
	Processi a secco	344
	Controllo degli ossidi di azoto	346
	Il processo SNCR	346
	Il processo SCR	347
	Controllo dei microinquinanti	348
6.4.3	<i>Configurazioni impiantistiche dei processi di depurazione</i>	352
	Sistemi a secco	352
	Sistemi a semisecco	353
	Sistemi ad umido	354
	Sistemi ibridi	355
	Sistemi di controllo degli NO _x	356
6.5	LA MTD PER IL CONTROLLO DELLE EMISSIONI ATMOSFERICHE	358
6.5.1	<i>Monossido di carbonio (CO)</i>	359
6.5.2	<i>Ossidi di azoto (NO_x)</i>	359
	MTD assoluta	359
	MTD ragionevole	359
6.5.3	<i>Gas acidi (SO₂, HCl, HF)</i>	360
	MTD assoluta	360
	MTD ragionevole	361
6.5.4	<i>Polveri</i>	361

6.5.5	<i>Diossine e mercurio</i>	361
	MTD assoluta.....	361
	MTD ragionevole.....	362
6.5.6	<i>Schema di impianto attrezzato con le MTD</i>	362
6.6	CARATTERISTICHE E TRATTAMENTO DEI RESIDUI SOLIDI PRODOTTI.....	364
6.6.1	<i>Caratteristiche dei residui solidi prodotti</i>	364
	Le scorie.....	364
	Le ceneri volanti.....	364
	I residui derivanti dal controllo dei gas acidi.....	364
	Caratteristiche dei residui.....	365
6.6.2	<i>Trattamento dei residui solidi prodotti</i>	367
	Inertizzazione.....	367
	Detossificazione.....	368
6.7	IMPIANTI DI INCENERIMENTO IN LOMBARDIA.....	370
6.7.1	<i>Situazione generale e panorama sulle tendenze evolutive</i>	370
	Tipo di combustibile.....	370
	Tipologia del forno.....	372
	Controllo delle emissioni.....	372
6.7.2	<i>Impianti di incenerimento in Lombardia</i>	372
	Busto Arsizio_Varese.....	372
	Como.....	373
	Valmadrera _ Lecco.....	374
	Parona _ Pavia.....	375
	Corteolona _ Pavia.....	376
	Cremona.....	377
	Milano _ Silla 2.....	378
	Sesto S. Giovanni _ Milano.....	379
	Desio.....	379
	Abbiategrosso _ Milano.....	380
	Rovato _ Brescia.....	381
	Bergamo.....	382
	Dalmine _ Bergamo.....	382
	Brescia.....	383
	Lonato _ Brescia.....	384
6.7.3	<i>L'impianto di Trezzo sull'Adda</i>	386
	Conferimento e stoccaggio rifiuti.....	386
	Combustione rifiuti.....	386
	Depurazione fumi.....	387
	BIBLIOGRAFIA.....	391

In questo capitolo è presentata una panoramica sugli aspetti tecnologici legati agli impianti di termodistruzione di RSU, con particolare riferimento alla Miglior Tecnologia Disponibile (MTD) e alle caratteristiche degli impianti già in funzione o previsti in Lombardia.

Il primo paragrafo è dedicato ai principi generali della combustione e alle proprietà combustibili dei RSU.

Il secondo paragrafo affronta gli aspetti tecnologici connessi al recupero di energia dal trattamento termico dei rifiuti.

Nel terzo paragrafo sono descritte le principali tecnologie dei forni utilizzati per la combustione dei RSU.

Il quarto paragrafo descrive i processi di formazione degli inquinanti prodotti dalla combustione dei RSU e successivamente esamina i processi di depurazione e le configurazioni impiantistiche finalizzate alla minimizzazione delle emissioni atmosferiche.

Nel quinto paragrafo sono introdotti e descritti i concetti relativi alla MTD distinguendola tra *miglior tecnologia assoluta e ragionevole*.

Nel sesto paragrafo sono trattate le metodologie di smaltimento e le caratteristiche dei residui prodotti dal trattamento termico dei RSU.

Nel settimo paragrafo si descrive la situazione generale e le tendenze evolutive legate agli impianti di termodistruzione della Regione Lombardia, seguita da un'analisi più approfondita delle caratteristiche impiantistiche delle singole realtà, con particolare riferimento all'impianto di Trezzo sull'Adda.

6.1 Combustione e RSU

La termodistruzione dei rifiuti è stata sviluppata sul finire del secolo scorso con una duplice finalità:

- Riduzione del volume dei rifiuti da smaltire in discarica: il residuo solido della combustione occupa il 10-15% del volume iniziale.
- Igienizzazione del rifiuto: il trattamento termico ad elevata temperatura garantisce una distruzione pressoché completa delle componenti organiche, inclusi eventuali agenti patogeni (il rischio di epidemie e infezioni connesse allo smaltimento dei rifiuti è infatti sempre stato presente nella storia dell'uomo).

Inizialmente, quindi, sia negli Stati Uniti che in Europa il recupero di energia non figurava tra gli obiettivi del trattamento termico dei rifiuti. Questo era dovuto ai modesti poteri calorifici del rifiuto medio dell'epoca ($1000 \text{ kcal kg}^{-1}$ circa), che rendevano necessari sistemi alimentati con combustibili fossili per sostenere la combustione e portare la reazione di ossidazione a completamento.

Durante gli ultimi decenni, il continuo aumento del potere calorifico del rifiuto ha fatto sì che l'aspetto energetico dell'operazione di termodistruzione diventasse sempre più rilevante, così da rendere il recupero dell'energia non solo conveniente, bensì un elemento determinante sia per il bilancio economico dell'investimento dell'impianto (Consonni 1999) che per quello ambientale legato al risparmio di risorse combustibili.

Questa considerazione ha portato ad un interesse crescente nei riguardi della combustione dei rifiuti, tant'è che molti operatori preferiscono utilizzare il termine di *termovalorizzazione*, a sottolineare l'importanza di questo aspetto all'interno del processo.

Attualmente, in Europa, Giappone e Stati Uniti, il trattamento dei rifiuti mediante incenerimento risulta una pratica sempre più diffusa.

La Tabella 6.1 evidenzia la percentuale di rifiuti trattati rispetto al totale, con riferimento al recupero energetico effettuato.

Le ragioni della sua diffusione possono essere così riassunte:

- riduzione del volume del rifiuto da avviare in discarica: i residui del trattamento rappresentano circa il 10% in volume e il 30% in peso rispetto all'originale;
- possibilità di ottenere energia dai rifiuti: con una tonnellata di RSU con PCI pari a $2500 \text{ kcal kg}^{-1}$ si possono ricavare da 500 a 700 kWh di energia elettrica;
- difficoltà nel reperire terreni idonei alla creazione di discariche
- miglioramenti nei sistemi di controllo delle emissioni e nell'affidabilità degli impianti: i livelli emissivi imposti dalla attuale normativa sono, in alcuni casi, vicini al limite della capacità di rilevazione degli strumenti a disposizione.

Tabella 6.1 La temodistruzione in Europa, Giappone e USA

PAESE	N° IMPIANTI	TOTALE INCENERITO		FRAZIONE INCENERITA CON RECUPERO DI ENERGIA (%)
		t/a * 10 ³	QUOTA SU RSU TOTALI (%)	
Belgio	28	2.123	23,4	30
Danimarca	48	1.577	65	100
Francia	309	7.730	42,3	29
Germania	44	7.997	40	40
Gran Bretagna	39	2.758	17,6	20
Italia	52	1.910	9,5	40
Olanda	11	2.323	32	50
Spagna	9	672	6,4	59
Svezia	23	1.650	55	60
Giappone	1.843	32.500	75	80
USA	210	24.000	15	n.d.

(fonte: Consonni 1999)

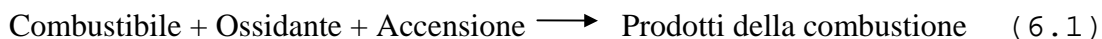
6.1.1 Principi generali della combustione

Il termine combustione indica un processo di ossidazione rapido, che avviene con emissione di luce e di calore (fiamma), durante il quale l'energia chimica si degrada in energia termica (Silvestroni 1989).

Una reazione di combustione, come avviene per la gran parte delle reazioni, aumenta la propria velocità con l'aumentare della temperatura.

Esiste, in particolare, un valore di quest'ultima, definita *Temperatura di Ignizione*, alla quale la massa inizia a bruciare sviluppando rapidamente calore. Raggiunta tale temperatura, si passa da una reazione lenta, senza rapido sviluppo di calore, ad una reazione caratterizzata da un'elevata quantità di calore sviluppata nell'unità di tempo.

La generica reazione di combustione può essere espressa nella forma:



Le sostanze combustibili più comuni contengono principalmente tre elementi: carbonio, idrogeno e zolfo.

Lo zolfo rappresenta una fonte di energia termica minore rispetto alle altre due e pone seri problemi dal punto di vista dell'inquinamento dell'aria (Cheremisinoff 1992).

Durante la combustione questi elementi, così come altri eventualmente presenti nel combustibile, si combinano con l'ossigeno attraverso varie reazioni formando i prodotti di combustione. La Tabella 6.2 riporta a titolo di esempio alcune reazioni che coinvolgono comunemente gli elementi dei combustibili più diffusi.

Tabella 6.2 Esempi di reazioni di combustione

Combustibile	Peso Molecolare	Reazione	Energia Termica Rilasciata (kWh/kg)	Fabbisogno teorico di aria (kg/kg di elemento)
Carbonio	12	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	9,12	11,52
Idrogeno	2	$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$	39,50	34,50
Zolfo	32	$S + O_2 \rightarrow SO_2$	2,59	4,32
Metano	16	$CH_4 + 2 O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$	15,44	17,28
Propano	44	$C_3H_8 + 5 O_2 \rightarrow 3 CO_2 + 4 H_2O$	14,00	15,68

(fonte: Cheremisinoff 1992)

I principali prodotti della combustione completa sono anidride carbonica (CO_2), acqua (H_2O) e biossido di zolfo (SO_2); nel caso di utilizzo di aria come sostanza comburente, un ulteriore prodotto è rappresentato dall'azoto (N_2) che, essendo un gas inerte, rimane inalterato durante il processo. Essi costituiscono lo stadio finale del processo di ossidazione rappresentato dalla combustione, portato a completamento. In realtà non tutto il materiale reagente viene convertito nei prodotti finali. Parte di esso può presentarsi incombusto nei gas in uscita, oppure essere solo parzialmente ossidato, ad esempio il carbonio a monossido di carbonio (CO) anziché anidride carbonica (CO_2), etc.

I parametri del processo

Al fine di assicurare la completa ossidazione del materiale attraverso la combustione, e limitare quindi la presenza nelle emissioni gassose di sostanze indesiderabili o inquinanti, occorre considerare attentamente alcuni parametri del processo. In particolare le cosiddette “tre T” della combustione: *Temperatura*, *Tempo di residenza*, *Turbolenza*. Esiste anche una “quarta” T, di importanza analoga alle altre, che indica il *Tenore di ossigeno*.

Per quanto riguarda la **temperatura**, i termini di riferimento per assicurare una combustione completa sono due:

- La *temperatura di ignizione*, già precedentemente introdotta, che rappresenta il valore al quale il processo di combustione di un dato combustibile si “auto-sostiene” senza bisogno di un apporto termico esterno; varia considerevolmente, dipendendo, oltre che dalla composizione stessa del materiale da incenerire, dall'omogeneità della miscelazione aria/combustibile, dalla configurazione della camera di combustione, dalla eventuale presenza di catalizzatori, etc..
- La *temperatura di fiamma adiabatica*, definita come la massima temperatura teorica sviluppabile dalla combustione completa del combustibile senza prelievo di calore.

Il **tempo di residenza**, è un parametro che rappresenta il periodo durante il quale la miscela aria/combustibile risulta esposta ad una temperatura adeguata a promuovere il completamento della reazione. Se la combustione viene fermata prima del tempo necessario al completamento della reazione, non tutto il combustibile verrà ossidato.

Per quasi tutte le reazioni chimiche, la velocità di reazione aumenta molto rapidamente con il crescere della temperatura. Pertanto, la via generale per ottenere la distruzione dei contaminanti mediante combustione è quella di portare materiale e aria ad una temperatura sufficientemente alta, e per un tempo sufficientemente lungo, a far avvenire la reazione mostrata nell'Eq. (6.1) (Botta 1999).

I fattori influenzanti il tempo di residenza comprendono la geometria della camera di combustione, il profilo di temperatura all'interno di essa e le modalità di afflusso dell'aria.

La **turbolenza** è un parametro che fa riferimento alle condizioni di miscelazione, in camera di combustione, di aria e combustibile. Affinché una reazione di combustione possa avvenire, il combustibile e l'ossidante, che normalmente è l'ossigeno dell'aria, devono essere intimamente mescolati. Se così non fosse, anche in presenza di una quantità sufficiente di aria, la combustione non sarebbe completata perché una parte del combustibile non verrebbe a contatto con l'aria nelle zone ad alta temperatura della camera di combustione.

In sintesi, una buona turbolenza in camera di combustione consente di operare una riduzione dell'eccesso d'aria rispetto a condizioni di miscela stechiometrica. Infatti in presenza di valori estremamente elevati di eccesso d'aria si avrebbe l'utilizzazione completa di tutto il combustibile anche in condizioni di cattiva miscelazione, ma ciò si tradurrebbe in un aumento del volume dei fumi da trattare, in dispersioni di calore attraverso i gas in uscita dal camino e, in mancanza di interventi esterni, in un abbassamento della temperatura in camera di combustione.

Combustione ed energia termica

Il *Calore di Combustione* è la quantità finita di energia, sotto forma di calore, che è possibile ottenere dalla reazione di una quantità nota di combustibile e una quantità appropriata di ossidante, riportando i prodotti di combustione alla temperatura di partenza (Botta 1999).

L'energia termica effettivamente liberata nella reazione dipende dalle condizioni alle quali avviene il processo di combustione, ma è convenzione quantificare la "potenzialità energetica" di un combustibile facendo riferimento alla combustione isobara a 1 atm (101.325 Pa) con reagenti e prodotti alla temperatura di 25 °C.

In particolare, si definisce *Potere Calorifico Superiore (PCS)* la quantità di calore sviluppata nelle condizioni predette ammettendo che l'acqua prodotta nella combustione condensi, cedendo così il suo calore di combustione latente.

Il *Potere Calorifico Inferiore (PCI)* ammette viceversa che l'acqua lasci il combustore sotto forma di vapore.

La differenza tra i due è rappresentata dal calore latente di evaporazione dell'acqua contenuta nei fumi di combustione.

Ai fini pratici l'interesse è concentrato sul Potere Calorifico Inferiore, in quanto nei dispositivi di combustione normalmente impiegati tutta l'acqua contenuta nei gas generati dalla combustione è allo stato di vapore.

6.1.2 I RSU come combustibile

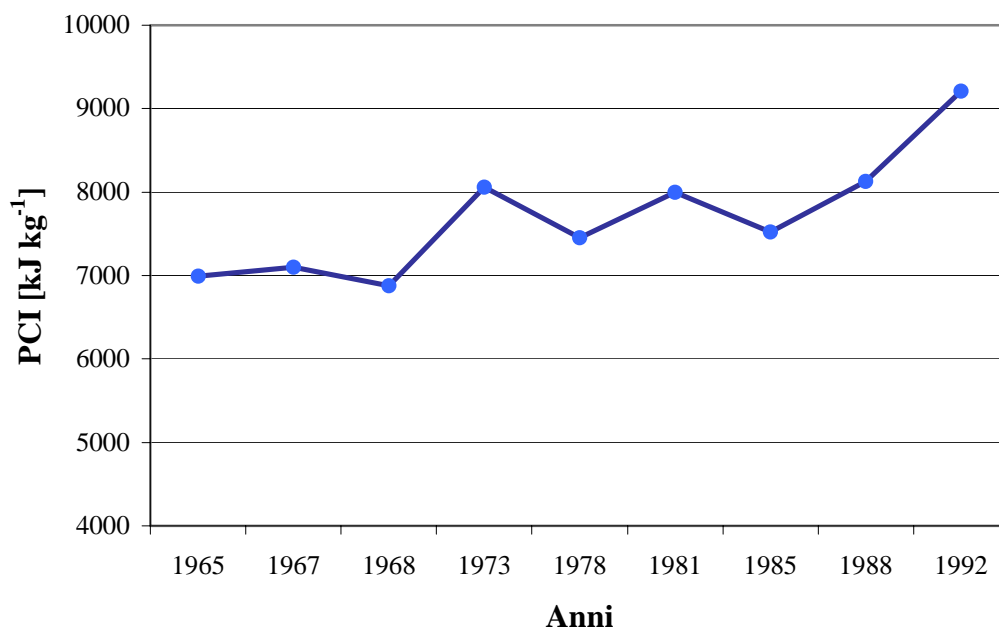
La possibilità di generare energia in forma utile (calore o elettricità) dai rifiuti deriva dalla presenza, nei rifiuti stessi, di materiale combustibile dotato di potere calorifico elevato. Come accennato nel Paragrafo 6.1.1, in questo secolo, di pari passo con l'aumento della produzione di rifiuti, si è avuto un incremento nel loro potere calorifico. A titolo di esempio, nel grafico in Figura 6.1 è riportato l'andamento temporale del PCI dei RSU prodotti nella città di Milano.

Tale fenomeno è imputabile all'aumentata presenza delle frazioni merceologiche che più contribuiscono al PCI del rifiuto (principalmente carta e plastica). Il tutto è correlato allo stile di vita e alla propensione al consumo tipica dei paesi sviluppati, che incide particolarmente sulla produzione di rifiuti cartacei e plastici, mantenendo sostanzialmente immutata, o in lieve decremento, la frazione organica legata al consumo alimentare.

Da un punto di vista energetico si può considerare il rifiuto come l'insieme di tre componenti:

- *Umidità*. Acqua liquida presente nel materiale combustibile. Diminuisce il PCI di una quantità pari al suo calore latente di evaporazione (583,5 kcal/kg a 25 °C).
- *Ceneri*. Materia minerale non combustibile. Durante il processo di combustione non subisce alcuna modificazione del proprio stato fisico. Nei sistemi di termo-utilizzazione dei rifiuti si ritrova dunque sul fondo della camera di combustione (scorie di sottogriglia) e nelle polveri trasportate dai gas e raccolte dai filtri.
- *Solidi volatili*. Frazione del rifiuto che durante la combustione subisce una radicale modificazione della propria composizione chimica e del proprio stato fisico, generando prodotti gassosi per lo più ossidati attraverso reazioni fortemente esotermiche. È composta prevalentemente da atomi di carbonio, idrogeno, ossigeno, con presenza di zolfo, fosforo, etc.

Figura 6.1 Andamento del PCI dei rifiuti urbani (RSU) raccolti a Milano nel tempo



L'insieme di ceneri e solidi volatili è comunemente definito come *frazione secca* del rifiuto, ovvero ciò che rimane dopo la rimozione dell'umidità.

La relazione che lega l'umidità al PCI del rifiuto fa riferimento all'energia termica necessaria per vaporizzare l'acqua in esso presente:

$$PCI = [PCI_{secco} (100 - U) - q_e U] / 100 \quad (6.2)$$

dove il termine PCI_{secco} indica il potere calorifico della frazione secca (generalmente tanto più elevato quanto maggiore è la presenza di plastiche nei rifiuti), U è l'umidità percentuale massica del rifiuto, q_e è il calore latente di evaporazione dell'acqua (2500 kJ kg^{-1}). Alla diminuzione della frazione organica, e quindi dell'umidità del rifiuto, corrisponde pertanto un incremento del suo potere calorifico inferiore.

L'incremento del potere calorifico dei rifiuti urbani ha degli interessanti risvolti in termini di progetto e gestione degli impianti di incenerimento. Uno degli effetti che si osservano è la riduzione della portata di alimentazione ai vecchi forni di incenerimento, oggi molto inferiore ai valori progettuali originali. Questo perché le camere di combustione vengono dimensionate per una certa potenzialità termica (data dal prodotto della portata in massa per il corrispondente PCI): nel momento in cui aumenta il PCI dei rifiuti, necessariamente deve diminuirne la portata per non superare il carico termico ammissibile. Valori elevati del PCI dei rifiuti, inoltre, consentono di raggiungere e mantenere le alte temperature (superiori a 850°C) atte a garantire la distruzione completa delle sostanze inquinanti anche in un vano non adiabatico. Considerato che i rifiuti attuali hanno PCI anche superiore ai $12.000 \text{ kJ kg}^{-1}$ (circa $3.000 \text{ kcal kg}^{-1}$) si è potuto dunque passare dai vecchi progetti di camere di combustione adiabatiche alle moderne *camere radianti* analoghe ai tradizionali generatori di vapore (Pinzone 2000). Si assiste dunque ad una integrazione sempre maggiore tra il forno e la caldaia, un tempo mantenuti rigorosamente indipendenti.

Questa situazione ha aperto la strada ad un recupero energetico sempre più spinto dei rifiuti solidi prodotti.

6.2 Il recupero di energia dalla combustione dei RSU

Le caratteristiche chimico-fisiche dei RSU impongono processi di conversione ad hoc, sia per problemi tecnologici quali l'elevato tenore di umidità e inerti o la corrosione, che per problemi ambientali concernenti la generazione di prodotti estremamente tossici.

Tali processi possono seguire due filosofie: la trasformazione dei RSU in un *combustibile intermedio*, attraverso tecnologie di pirolisi e gassificazione, o il recupero di energia mediante *combustione diretta*.

6.2.1 Recupero indiretto di energia: pirolisi e gassificazione

La **pirolisi** è un processo di conversione che, a partire da materiale a base organica quale il rifiuto, genera sostanze solide, liquide o gassose aventi caratteristiche combustibili.

I rifiuti sono riscaldati a temperature comprese tra 300°C e 500°C in presenza di quantità estremamente limitate di aria. In tale processo il materiale gassifica, viene cioè distillata la frazione organica dando origine ad un gas che, non essendo ancora stato ossidato, possiede un potere calorifico piuttosto elevato.

¹ In Italia noto come *Combustibile da Rifiuti* (CDR), come definito nel DM 5/2/98.

Il gas che si sviluppa rappresenta dal 15% al 30% in peso del materiale organico originario, a seconda della temperatura del processo. Esso è formato essenzialmente da anidride carbonica, ossido di carbonio, idrogeno, metano e idrocarburi leggeri.

Il potere calorifico inferiore del gas sviluppato risulta generalmente compreso tra le 2.000 kcal m⁻³ e le 3.000 kcal m⁻³.

Il residuo liquido ottenuto per condensazione della fase vapore è assimilabile ad un olio combustibile, si aggira sul 50% - 60% in peso del materiale iniziale ed è costituito da acqua, catrame e composti organici.

Il residuo solido, di volume e peso notevolmente ridotto rispetto all'inizio, contiene componenti combustibili e incombustibili ed è costituito essenzialmente da carbonio, inerti e ceneri. Il suo PCI è compreso tra 5.000 kcal kg⁻¹ e 6.000 kcal kg⁻¹.

La **gassificazione** può essere definita come il processo di *conversione termochimica* di un liquido o un solido a *matrice carboniosa* in un gas combustibile, in presenza di un *agente gassificante*.

La *conversione termochimica* è una trasformazione chimica di una sostanza caratterizzata o dal consumo di energia o dalla produzione di energia sotto forma di calore.

Per *matrice carboniosa* si intende una sostanza la cui struttura chimica è basata su lunghe catene, più o meno ramificate, di atomi di carbonio, il che coincide praticamente con tutte le sostanze di origine organica.

Infine, l'*agente gassificante* è un composto gassoso in grado di intervenire sulle caratteristiche del gas prodotto, sia modificando gli equilibri in fase gassosa, sia favorendo la decomposizione della matrice solida.

Il gas combustibile prodotto contiene di norma CO₂, CO, H₂, CH₄, H₂O, tracce di idrocarburi di maggior peso molecolare e vari contaminanti tra i quali spicca il *tar*, ovvero l'olio bituminoso prodotto a seguito delle reazioni di pirolisi e presente in forma di vapore all'interno del gas.

Proprio per le problematiche connesse alla presenza di tali sostanze nel gas, gli impianti per il recupero energetico richiedono pretrattamenti finalizzati al miglioramento della qualità del combustibile realizzato. In particolare nei cicli combinati (turbina a gas – turbina a vapore) i rendimenti raggiungibili, limitati da questa necessità, si attestano su valori compresi tra il 33% e il 40%, in funzione della tecnologia e della dimensione dell'impianto. Per le comuni turbine a gas l'utilizzo del prodotto di gassificazione impone essenzialmente modifiche al bruciatore e al combustore (Della Rocca 2001).

Un ulteriore problema legato alla gassificazione è dato dalla necessità di impiegare un materiale abbastanza omogeneo nel reattore. Per tale ragione, nel caso dei RSU, tale tecnologia è generalmente applicata sul CDR, preferibilmente pelletizzato, anche se non mancano esperienze di gassificazioni condotte sui RSU tal quali.

Le migliori tecnologie in uso prevedono, in generale, l'applicazione di due tipi di gassificatori: gasogeno a letto fisso con griglia mobile e gasogeno a letto fluido (Zagaroli, De Stefanis 1996).

Tra le tecnologie che in questo campo hanno destato il maggior interesse, si cita il processo *Thermoselect*. Esso è basato sulla combinazione di una pirolisi a bassa temperatura dei rifiuti con una gassificazione ad alta temperatura condotta con ossigeno quale agente gassificante.

Le diverse fasi possono essere così riassunte:

- pressatura del rifiuto in un canale orizzontale riscaldato dall'esterno, in assenza di aria, con conseguente essiccamento e trasformazione della frazione organica in un gas (gas di pirolisi) ed in un residuo carbonioso (coke di pirolisi);
- gassificazione ad alta temperatura (2000 °C) con ossigeno del residuo carbonioso in un reattore verticale, con produzione di un gas combustibile costituito da H₂, CO, H₂O e CO₂;

- depurazione del gas combustibile (gas di sintesi) consistente in un raffreddamento con acqua a meno di 90 °C, in un lavaggio acido, in un lavaggio basico ed in un trattamento finale di adsorbimento su carbone attivo. Il raffreddamento rapido da 1200 °C (uscita reattore) a circa 90 °C, in assenza di ossigeno, impedisce che si riformino composti organoclorurati quali diossine e furani;
- utilizzo del gas in un motore endotermico o in una turbina a gas in ciclo combinato per la produzione di energia elettrica.

L'alta temperatura a cui opera il reattore di gassificazione assicura la fusione dei metalli e delle scorie e la completa distruzione delle molecole organiche, in particolare di quelle organoclorurate (PCDD e PCDF). Le scorie sono ottenute in forma vetrosa e granulare mediante raffreddamento in un bagno d'acqua e, in quanto inerti, possono essere utilizzate come materiale di costruzione o di riempimento.

Il processo Thermoselect, dopo un lungo periodo di sperimentazione nell'impianto dimostrativo di Verbania, è stato realizzato su scala industriale (capacità 225.000 t anno⁻¹ di rifiuti) a Karlsruhe (Germania) (Basaldella 2000).

Il principale motivo di interesse dell'applicazione dei processi di pirolisi e gassificazione ai rifiuti solidi e urbani e prodotti derivati è legato alla possibilità di trasformare materiali a base organica, disomogenei e difficili da stoccare, in prodotti con buone proprietà combustibili, caratteristiche qualitative costanti e maggior flessibilità di utilizzo (Ghezzi 1999). Tali potenzialità si scontrano però, allo stato attuale, con la presenza nel gas di componenti minori quali gas acidi (HCl, H₂S), ammoniaca e idrocarburi pesanti condensabili, che rendono necessari trattamenti preliminari di depurazione. Questi trattamenti, di norma anche complessi, oltre ad un impatto negativo sulla gestione del processo diminuiscono il contenuto energetico del gas e in definitiva il suo interesse applicativo. Inoltre la scarsità di impianti operanti su scala reale limita lo sviluppo e la diffusione di questa tecnologia, così come una valutazione completa su di essa.

6.2.2 Il recupero di energia nella combustione diretta

Il materiale combustibile

Il recupero di energia da combustione diretta sfrutta il calore prodotto dal processo di incenerimento del RSU, che può essere bruciato:

- come rifiuto tal quale;
- previa raccolta differenziata a monte;
- a seguito di processi di selezione a valle del rifiuto tal quale;
- come Combustibile Da Rifiuti¹ (CDR), ottenuto dal rifiuto tal quale mediante una serie di processi fisici: vaglio, separazione metalli, macinazione, etc, che isolano la frazione a più elevato potere calorifico. In seguito il prodotto viene confezionato in varie modalità (bricchette, pellets, fluff) a seconda dello specifico risultato che si vuole ottenere, ma in genere le sue caratteristiche si discostano considerevolmente dal materiale iniziale.

¹ In letteratura inglese il CDR è noto come *Refuse Derived Fuel* (RDF).

Per poter essere definito tale, il CDR deve possedere le caratteristiche specifiche definite dalla normativa (DM 5/2/98), tra cui si cita un valore minimo di PCI pari a $3600 \text{ kcal kg}^{-1}$ e un'umidità e una quantità di ceneri massime pari rispettivamente al 25 e al 20%. Il rispetto di questi valori comporta necessariamente lo scarto del 60 – 70 % del materiale contenuto nel rifiuto tal quale, con rese di produzione del CDR che sono pertanto pari al 30 – 40 %.

La *selezione a valle* della raccolta comporta, invece, una serie di trattamenti meccanici, che consistono per lo più in vagliatura e deferrizzazione, finalizzati a migliorare le caratteristiche del rifiuto da incenerire, ma senza il vincolo del raggiungimento dei requisiti di legge, come per il CDR.

Nella vagliatura, il flusso entrante indifferenziato viene suddiviso in un sottovaglio ad alto contenuto di frazione organica che viene inviato al trattamento di biostabilizzazione aerobica, e in un sopravaglio dotato di un PCI elevato, con valori anche superiori a $3000 \text{ kcal kg}^{-1}$. La composizione e le caratteristiche chimico-fisiche sono, in questo caso, simili al RSU di partenza, pur variando in funzione dell'apertura delle maglie del vaglio, della composizione merceologica e dell'assortimento dimensionale del rifiuto trattato (Masi *et al.* 2001). In particolare la Tabella 6.4 mostra le percentuali di separazione ponderale del sopravaglio in funzione del diametro di vagliatura utilizzato. Nel caso specifico lo strumento di separazione impiegato è stato un vaglio a tamburo rotante con velocità di rotazione pari a 8 giri min^{-1} (Masi *et al.* 2001).

Tabella 6.4 Percentuali di separazione ponderale del sopravaglio in funzione del diametro di vagliatura

FRAZIONE	DIAMETRO DI VAGLIATURA				
	40 mm	60 mm	80 mm	100 mm	120 mm
Carta	100%	100%	100%	70%	60%
Plastica	100%	100%	100%	70%	60%
Vetro e inerti	58,9%	44,4%	22%	10%	1%
Metalli	100%	100%	100%	50%	35%
Tessili, legno, cuoio	50%	40%	30%	20%	10%
Organico	60%	45%	25%	10%	5%

(fonte: Masi *et al.* 2001)

Il recupero di energia

Il recupero di energia dalla combustione dei RSU può essere effettuato attraverso la produzione di *calore*, di *elettricità* o di una combinazione di entrambi, definita *cogenerazione*.

Produzione di calore

Il rapporto tra il calore recuperato e il calore immesso nel sistema con i rifiuti è definito *rendimento termico lordo* del processo di incenerimento. Nel caso di un impianto destinato alla sola produzione di calore, esso costituisce il principale parametro di merito del sistema di recupero energetico. Se il calore è destinato ad alimentare una rete di teleriscaldamento, occorre considerare le perdite termiche della rete stessa, stimabili pari al 10 – 15% del calore immesso. Il

¹ DPCM n° 503 del 19.11.1997

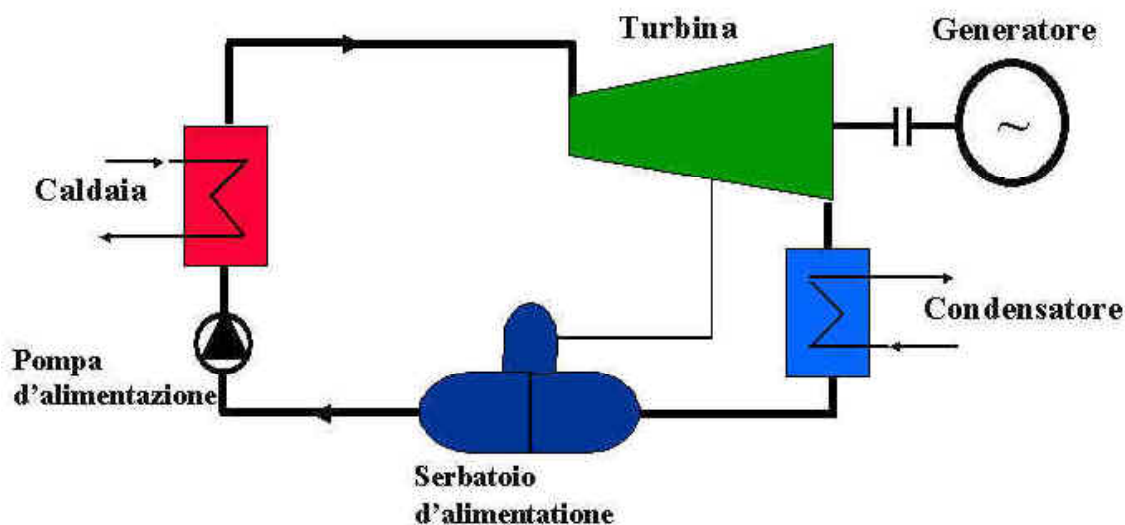
rendimento termico netto del teleriscaldamento con RSU è generalmente pari al 70% – 75% (Consonni 1999)

Produzione di elettricità

Il recupero di elettricità dai rifiuti solidi è basato sul processo Rankine. Nel ciclo di Rankine (Figura 6.2) viene usato un fluido condensabile, raccolto nel serbatoio di alimentazione, che quasi sempre è acqua. La produzione di energia è basata sull'alternarsi tra due stati dell'acqua: liquido e vapore. Il liquido viene vaporizzato nella *caldaia*, in seguito l'energia potenziale del vapore viene trasformata in energia cinetica nei condotti che il vapore percorre prima di arrivare in turbina. In *turbina* il flusso di vapore investe le palette mobili mettendo in moto il rotore che, collegato ad un alternatore, produce energia elettrica. All'uscita della turbina il vapore entra nel condensatore dove parte del calore viene recuperato (es. riscaldamento fumi per il trattamento) e avviene il passaggio dalla fase vapore alla fase liquida.

Generalmente si usa aumentare la temperatura del vapore (*surriscaldamento*) attraverso scambi termici, successivi alla fase di evaporazione, con i fumi in caldaia. Questa fase si realizza nel passaggio del vapore nel *surriscaldatore*, posto in una zona della caldaia a valle dell'evaporatore, e serve ad aumentare il contenuto energetico potenziale sotto forma di energia termica.

Figura 6.2 Schema del ciclo Rankine utilizzato per il recupero energetico nei processi di termodistruzione di RSU (tratta da Nvmann 1999)



In genere, le prestazioni ed i parametri relativi al recupero energetico nei processi di termodistruzione di RSU assumono valori modesti, specie se confrontati con quelli ottenibili nelle centrali termoelettriche convenzionali.

I rendimenti di produzione dell'energia elettrica risultano infatti limitati per:

- La natura molto corrosiva dei fumi di combustione dei rifiuti, (dovuta alla presenza di gas acidi quali HCl), che impone di limitare la temperatura massima del vapore nel surriscaldatore a circa 400 °C (problemi di corrosione ad alta temperatura). Tale questione verrà meglio approfondita nelle pagine successive.

- La necessità di limitare la frazione di liquido all'uscita della turbina e, soprattutto, la temperatura della parete dei tubi dell'evaporatore a contatto con i fumi della combustione, che richiede di non oltrepassare valori della pressione di evaporazione di 40 – 45 bar. L'adozione di parametri più spinti nelle condizioni di ammissione in turbina (50 – 60 bar, 420 – 450 °C) richiede materiali estremamente costosi, ed è giustificabile solo in impianti di grande taglia con elevata valorizzazione dell'energia prodotta.
- La necessità di un trattamento spinto dei fumi di combustione, che condiziona il recupero di calore imponendo temperature tipiche di uscita dalla caldaia non minori di 180-200 °C. L'intervallo termico sfruttabile (e quindi il rendimento) sarebbe maggiore se si potessero ammettere minori temperature di uscita dei fumi di combustione dalla caldaia; purtroppo gli interventi finalizzati all'abbattimento degli inquinanti necessitano di una temperatura minima che normalmente si aggira sui 200 °C.
- Le piccole taglie degli impianti italiani di vecchia generazione (raramente superiori a 10 MWe), che hanno un rendimento della turbina a vapore e degli ausiliari nettamente inferiore a quello dei grandi impianti. Inoltre al diminuire della taglia aumentano tutti i costi specifici quali: investimento per kW producibile, investimento per t/h smaltibile, etc. Questo induce alla moderazione dei parametri del ciclo al fine di ridurre i costi, causando un'ulteriore diminuzione del rendimento.

In ultima analisi, il rendimento del ciclo a vapore difficilmente supera il 30%, mentre il rendimento elettrico di tutto l'impianto, al netto degli autoconsumi, risulta normalmente inferiore al 25%.

Come accennato in precedenza, un aspetto particolarmente problematico e che incide sensibilmente sull'efficienza del ciclo di produzione di energia elettrica è quello rappresentato dai *fenomeni di corrosione del surriscaldatore*. La corrosione della superficie degli scambiatori di calore degli inceneritori è principalmente dovuta alla presenza di HCl nei fumi. Questi presentano due picchi di aggressività in corrispondenza di due differenti intervalli di temperatura (intorno a 100-150 °C e intorno a 600-700 °C).

Nelle caldaie per la produzione di vapore saturo o acqua surriscaldata (teleriscaldamento) il fenomeno della corrosione è pressoché assente, dato che le temperature di parete lato fumi non sono superiori a 300 °C. Viceversa, nelle caldaie che producono vapore surriscaldato si tende a raggiungere livelli di temperatura più alti al fine di ottenere buoni rendimenti in termini di conversione di energia elettrica, compatibilmente ad una vita accettabile del surriscaldatore. In questi ultimi la temperatura della parete a contatto con i fumi dipende sia dalla temperatura dei fumi che dalla temperatura del vapore. In particolare si possono avere differenze di temperatura tra la parete ed il vapore surriscaldato maggiori di 25-30 °C. Di conseguenza, con temperature di vapore surriscaldato maggiori di 350-380 °C è possibile raggiungere all'esterno dei condotti, a contatto con i fumi, valori di temperatura maggiori di 400 °C, entrando in una zona dove l'aggressione acida incrementa rapidamente.

Lavorando a temperature di surriscaldato prossime a 380 °C, si è constatata la necessità di sostituzione completa dei surriscaldatori ogni 6 mesi. Al contrario, con temperature dei fumi di 500 °C e temperature di parete di 350 °C, la vita utile dei surriscaldatori può salire fino a qualche anno (Bianchini 2001).

Produzione di calore ed elettricità (cogenerazione)

Il vapore scaricato dalla turbina deve essere, come detto, riportato allo stato liquido mediante un condensatore. Il calore di condensazione può essere, quindi, parzialmente recuperato laddove

esistano degli utilizzi del vapore a temperature relativamente basse. Questo può essere il caso del teleriscaldamento, cioè della distribuzione di acqua calda ad uso di riscaldamento civile mediante un'opportuna rete interrata.

L'impianto, definito cogenerativo, presenta due soluzioni realizzative:

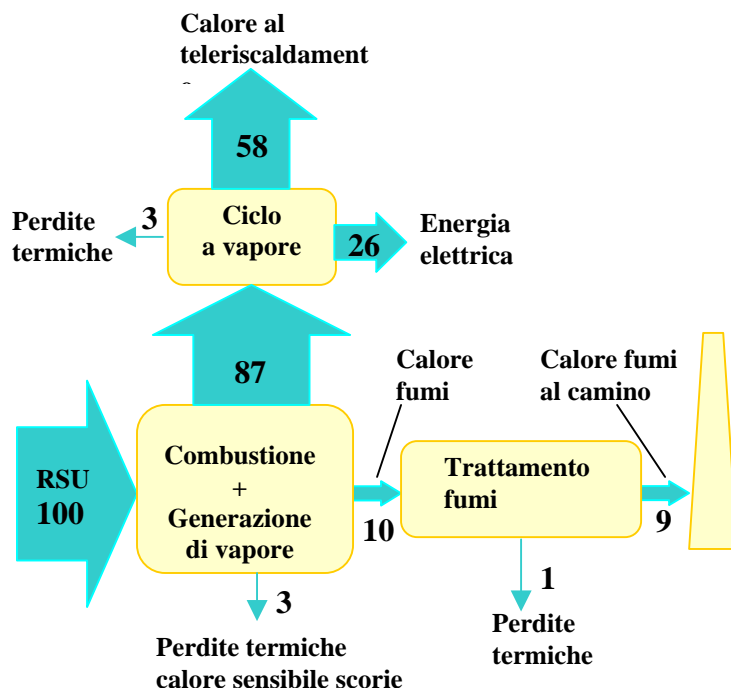
- Ciclo a contropressione. Configurazione analoga a quella per sola produzione di potenza, con la differenza che il condensatore, alla temperatura che soddisfa l'utenza termica, è raffreddato dal fluido vettore del calore destinato al teleriscaldamento.
- Ciclo a condensazione e spillamento. Il calore è fornito spillando vapore dalla turbina ad una pressione che è funzione della temperatura alla quale si richiede calore.

Il recupero energetico consente in questo modo di diminuire il ricorso ai combustibili tradizionali (tipicamente utilizzati nelle caldaie domestiche), con un ritorno positivo in termini di bilancio ambientale.

In Figura 6.3 è rappresentato il bilancio termico dell'impianto di termoutilizzazione di Brescia in assetto cogenerativo (Consonni 2000).

Una interessante estensione riguarda la possibilità di ricorrere alla produzione combinata di energia termofrigorifera per bacini di utenza situati in aree meridionali a clima mediterraneo. Uno studio recente ha analizzato il possibile utilizzo del vapore prodotto da un termoutilizzatore in un impianto termofrigorifero ad assorbimento di bromuro di litio per la climatizzazione estiva-invernale di un bacino di utenza di 150.000 abitanti (Campione *et al.* 2001).

Figura 6.3 Bilancio termico dell'impianto di termoutilizzazione di Brescia in assetto cogenerativo (Consonni 2000).



6.3 Le tecnologie di combustione diretta dei RSU

Il forno costituisce la parte dell'impianto in cui avviene la distruzione termica del rifiuto, sia in un processo di combustione diretta, cioè il vero e proprio incenerimento, che nella conversione dei RSU in un combustibile intermedio attraverso processi di pirolisi e/o gassificazione.

Esso rappresenta il cuore del processo di termodistruzione ed è in grado di influenzare le prestazioni complessive del sistema, anche dal punto di vista delle emissioni. Infatti, benché la linea di bonifica e trattamento fumi sia fondamentale per il raggiungimento di questo obiettivo, una buona combustione è il primo fattore da considerare nel controllo delle emissioni.

Le particolari caratteristiche del combustibile utilizzato e le molteplici esigenze ad esso correlate hanno richiesto lo sviluppo di diversi tipi di forni:

- Forno a griglia
- Forno a tamburo rotante
- Forno a letto fluido
- Forno ad aria controllata

Alcuni hanno caratteristiche molto elastiche, potendo essere alimentati anche con materiali estremamente diversi tra loro. Altri sono progettati per trattare materiali aventi caratteristiche ben specifiche.

6.3.1 Forno a griglia

I forni a griglia rappresentano la tecnologia più diffusa e sperimentata nella combustione dei rifiuti solidi urbani. La loro elevata affidabilità pratica e la notevole flessibilità ne permettono l'applicazione per un ampio intervallo di potenzialità, compreso tra le 40 – 50 t g⁻¹ degli impianti più piccoli e le 800 – 1000 t g⁻¹ degli impianti di maggiori dimensioni.

La configurazione di un forno a griglia prevede:

- una tramoggia di carico dei rifiuti;
- un condotto di alimentazione e un successivo dispositivo di spinta del rifiuto sulla griglia;
- la griglia vera e propria, sulla quale avviene la combustione del rifiuto e l'avanzamento dello stesso verso lo scarico finale.

La *griglia* è formata da elementi mobili (eventualmente alternati con elementi fissi) che, nelle diverse configurazioni disponibili, assumono la forma di gradini, barrotti longitudinali, cilindri o elementi basculanti (Figura 6.4).

Il movimento di ciascun elemento è regolabile indipendentemente in modo da poter stabilire il tempo di permanenza del rifiuto nelle varie zone della griglia (Figura 6.5). Poiché le griglie sono sottoposte a forti sollecitazioni meccaniche e termiche, i materiali utilizzati sono ghisa o acciai molto legati.

Figura 6.4 Elementi della griglia raffreddata ad aria Babcock & Wilcox Volund. I fori per il passaggio dell'aria primaria sono equidistanziati di 30-70 mm



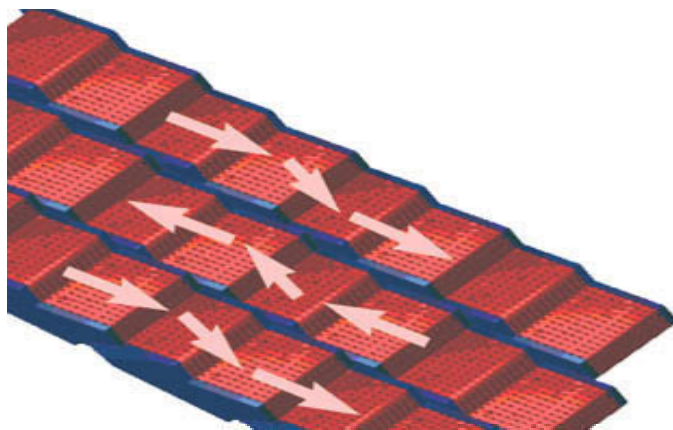
Sulla superficie della griglia il rifiuto si dispone a formare uno strato in genere spesso qualche decina di centimetri (Figura 6.6). Lungo lo sviluppo longitudinale della griglia il rifiuto subisce dapprima un processo di essiccamento che avviene nella zona prossima all'alimentazione: le sostanze volatili che si liberano in questa fase sono in gran parte costituite dall'umidità evaporata ed il rilascio di calore risulta pertanto modesto.

Successivamente, sulla parte centrale della griglia il materiale viene convertito, tramite fenomeni di combustione e gassificazione della componente organica (Giugliano *et al.*, 1995), in una frazione gassosa ed in un residuo solido incombusto. La composizione dei gas prodotti è sostanzialmente controllata dall'equilibrio della reazione del gas d'acqua:



Le scorie residue del processo sono scaricate dalla parte finale della griglia, con opportuni sistemi, in vasche di accumulo a bagno d'acqua, per abbassarne la temperatura. In genere, le scorie sono miscelate con quelle più fini che passano attraverso la griglia e vengono raccolte sotto di essa tramite apposite tramogge.

Figura 6.5 Meccanismo di movimentazione dei rifiuti della griglia progettata dalla Babcock & Wilcox Volund



Il tempo di permanenza del rifiuto sulla griglia deve essere tale da garantire il completamento delle diverse fasi del processo di combustione: in genere i valori adottati variano tra 30 e 60 minuti.

Il parametro di maggior interesse per la valutazione delle prestazioni complessive della griglia è costituito dal carico termico superficiale. Esso rappresenta 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 kcal m⁻² h⁻¹ anche se non mancano esempi di installazioni che consentono valori superiori (Ghezzi 1999).

L'aria comburente necessaria al processo affluisce in parte da sotto la griglia ed in parte sopra il letto di materiale combustibile, in modo da permettere il completamento della combustione. In linea generale la portata fornita sottogriglia, definita *aria primaria*, equivale grossomodo al volume di aria stechiometrica richiesto dall'ossidazione del rifiuto. La portata iniettata al di sopra dello stesso, definita *aria secondaria*, corrisponde all'eccesso d'aria necessario per la combustione, e viene anche utilizzata per il controllo della temperatura.

La zona immediatamente superiore alla griglia stessa costituisce la camera di combustione del forno. In essa avviene il completamento dell'ossidazione dei composti presenti nella fase gassosa proveniente dalla gassificazione del rifiuto sulla griglia. La sua configurazione deve quindi poter garantire un buon mescolamento tra i gas provenienti dal letto e l'aria secondaria, attraverso adeguate condizioni di turbolenza, disponibilità di ossigeno e temperatura. Analogamente, anche i tempi di residenza dei gas debbono essere idonei: in generale si adottano valori compresi tra 2 e 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 kcal m⁻³ h⁻¹. In Tabella 6.5 sono sinteticamente riportati i principali parametri operativi dei forni a griglia.

Linee di sviluppo

Le principali linee di sviluppo della tecnologia di combustione dei rifiuti con forno a griglia interessano alcune modifiche alla configurazione di base del sistema, orientate sia al miglioramento delle prestazioni complessive che all'adeguamento nei confronti dell'aumentato potere calorifico dei rifiuti.

Con particolare riferimento alla griglia vera e propria, le modifiche più recenti sono rappresentate da:

- Diminuzione della inclinazione della griglia correlata alla maggiore facilità di combustione dei rifiuti che quindi richiedono una minore movimentazione;
- Ottimizzazione della distribuzione dell'aria primaria sotto griglia finalizzata sia al miglioramento del processo di combustione e del raffreddamento che alla riduzione del particolato trascinato;
- Impiego di griglie raffreddate ad acqua per diminuire l'usura e renderne più facile l'applicazione con rifiuti ad elevato potere calorifico (3.500 – 4.000 kcal kg⁻¹);
- Possibilità di scaricare le scorie con estrattori a secco per facilitarne la manipolazione e l'eventuale recupero di frazioni potenzialmente interessanti quali metalli ferrosi e non ferrosi.

Tabella 6.5 parametri di progetto e condizioni operative dei forni a griglia

PARAMETRO	VALORE	UNITÀ DI MISURA
Parametri di progetto		
Carico termico su griglia	400.000 – 800.000	kcal m ⁻² h ⁻¹
Carico termico volumetrico	60.000 – 200.000	kcal m ⁻³ h ⁻¹
Tempo di permanenza rifiuti	30 – 60	min.
Carico termico superficiale	500.000 – 1.000.000	kcal m ⁻² h ⁻¹
Tempo residenza fumi	2 – 6	sec.
Condizioni operative		
Temperatura di esercizio	850 – 900	°C
Rendimento energetico	20 - 60	%
Eccesso d'aria	70 - 100	%

L'aumento del potere calorifico dei rifiuti ha comportato modifiche anche alla configurazione della camera di combustione. Tali modifiche si sono concretizzate nel passaggio da un percorso fumi-rifiuto in controcorrente ad uno equicorrente. Quest'ultimo, infatti, è particolarmente indicato per rifiuti a potere calorifico e contenuto di volatili più elevato, mentre per una maggior flessibilità è opportuno ricorrere a soluzioni intermedie.

In alcune zone del forno, si provvede al raffreddamento delle pareti per evitare la formazione di incrostazioni a seguito di fenomeni di fusione delle scorie.

Il raffreddamento si realizza utilizzando acqua o vapore circolanti in tubi interni al rivestimento refrattario o tramite aria in condotti interni alle pareti, e interessa soprattutto la zona di combustione immediatamente sopra la griglia.

La presenza di zone fredde in corrispondenza delle pareti incrementa la possibilità di incompletezza della combustione, imponendo quindi una particolare attenzione all'ottimizzazione dei processi di mescolamento all'interno del forno e un accurato monitoraggio dei parametri della combustione.

Figura 6.6 materiale in combustione distribuito su griglia (Silla 2)



Il controllo della combustione viene generalmente effettuato tramite l'analisi di temperatura, ossigeno e monossido di carbonio all'uscita dalla camera di combustione e/o di post – combustione. Esiste anche la possibilità di monitorare la distribuzione spaziale della temperatura sul letto di combustione tramite sensori all'infrarosso.

Valori di temperatura di 850 °C – 900 °C e tenore di ossigeno del 6% - 8% mantenuti nella zona di post-combustione sono ritenuti sufficienti a garantire il completamento del processo, minimizzando l'emissione di microinquinanti. Con queste premesse l'ottimizzazione del processo di combustione si realizza attraverso la massima attenzione nei riguardi della distribuzione dell'aria primaria e secondaria, e nel garantire condizioni di turbolenza in camera di combustione prevenendo fenomeni di impoverimento locale di ossigeno.

Un aspetto di sicuro interesse nella tecnologia di incenerimento dei rifiuti tramite forno a griglia è rappresentato dall'impiego di ossigeno puro o, più generalmente, di aria arricchita. Innanzitutto l'arricchimento riduce, a parità di concentrazione di ossigeno in camera di combustione, il volume dei fumi prodotti, consentendo un incremento nel recupero energetico e una riduzione nelle dimensioni dell'impianto. Permette inoltre di agevolare il processo di combustione in presenza di materiali a basso potere calorifico. Di contro, esso comporta un aumento della temperatura in camera di combustione, per cui si rende opportuno un ricircolo del gas di scarico con un concomitante effetto positivo dovuto alla riduzione nella formazione degli ossidi di azoto (NO_x). 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. Se l'alimentazione è effettuata sotto griglia, può essere necessaria l'adozione di sistemi di

raffreddamento della griglia stessa, tra i quali spicca la tecnologia ad acqua, per evitare che aumenti locali di temperatura possano comprometterne la funzionalità e la durata.

Alcune tecniche sviluppate per ridurre la formazione degli ossidi di azoto nei processi di combustione convenzionali sono in via di sperimentazione anche nel campo dei RSU. Tra queste, le più semplici prevedono un incremento della quota di aria secondaria associato ad un decremento dell'aria primaria, al fine di limitare la presenza di ossigeno nelle zone a temperatura elevata: ciò richiede un accurato controllo del processo, per evitare la formazione di prodotti incombusti.

Le emissioni di ossidi di azoto possono essere limitate anche attraverso l'utilizzo di tecniche di *ricombustione* in cui, ad una riduzione di aria primaria, viene affiancata l'alimentazione di gas naturale al di sopra della zona di combustione in modo da creare un'atmosfera complessivamente riducente.

I risultati di una prima esperienza effettuata a Olmsted negli stati Uniti sono stati presentati dall'Institute of Gas Technology. Iniettando gas naturale equivalente al 12-15% del potere calorifico dei rifiuti urbani direttamente nella zona di combustione primaria e iniettando l'8% di fumi riciclati nel focolare, le emissioni di NO_x (50-60 ppm) sono state ridotte del 60%, mantenendo una combustione stabile (20-30 ppm di CO). Tuttavia la ricerca in questo settore è ancora da sviluppare e i dati non sono per ora sufficienti a dare indicazioni definitive in merito.

6.3.2 Forno a tamburo rotante

I forni a tamburo rotante sono costituiti da un cilindro rotante inclinato sull'orizzontale per facilitare l'avanzamento dei rifiuti. Sono caratterizzati da una elevata flessibilità di utilizzo, che permette di trattare solidi, fusti, fanghi e liquidi, ma anche da una bassa efficienza di recupero termico che li rende adatti a rifiuti con poteri calorifici costanti ed elevati.

Il forno rotante viene generalmente utilizzato nelle situazioni in cui il rifiuto contiene materiale di natura variabile e di difficile incenerimento (vegetali, pezzi di legno, fanghi, liquidi, certi tipi di carta), se l'umidità del rifiuto è soggetta a continue e rapide variazioni. I rifiuti con tali caratteristiche richiedono infatti tempi di residenza nell'apparato di combustione che variano da una a tre ore e mezza e un impianto a griglia può incontrare molte difficoltà nel loro trattamento. Generalmente è prevista una camera di post-combustione, in quanto l'efficacia del mescolamento e i tempi di residenza all'interno del tamburo possono non essere tali da garantire il completamento del processo di ossidazione dei composti volatili generati.

Il corpo rotante è costituito da un cilindro in acciaio rivestito da materiale refrattario. In alcuni casi, lungo le pareti possono essere presenti tubi d'acqua, eventualmente intervallati da spazi per il passaggio di aria, per la generazione di vapore. A seconda delle caratteristiche realizzative del rivestimento refrattario, la temperatura del mantello metallico esterno può raggiungere valori molto alti, compresi tra 200 °C e 300 °C. Questo condiziona le dimensioni dei forni, in particolare il diametro, che per evitare eccessive dispersioni di calore presenta valori massimi di 1,5 – 2 metri.

La Tabella 6.6 riporta sinteticamente i principali parametri costruttivi adottati per la realizzazione di un forno a tamburo rotante.

Nella valutazione del dimensionamento e delle prestazioni si fa riferimento all'intensità volumetrica di combustione ($\text{kcal m}^{-3} \text{h}^{-1}$) e all'intensità di combustione riferita alla sezione del forno ($\text{kcal m}^{-2} \text{h}^{-1}$).

Il primo parametro 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 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 $500.000 - 1.000.000 \text{ kcal m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ (Ghezzi 1999).

Le configurazioni tipiche prevedono forni a tamburo semplice, operanti a temperature non superiori a 950°C , e forni a scoria fusa, nei quali si raggiungono anche i 1600°C . Questi ultimi garantiscono una migliore combustione a fronte di una maggiore attenzione nella fase progettuale e di gestione.

In sintesi, il tamburo rotante è una tecnologia di termodistruzione contraddistinta da elevata flessibilità e che quindi trova vasta applicazione in campo industriale. L'utilizzo per rifiuti urbani risulta invece penalizzato dalla ridotta efficacia di combustione.

Tabella 6.6 Parametri costruttivi dei forni a tamburo rotante adottati per la termodistruzione dei rifiuti.

PARAMETRO	VALORE	UNITÀ DI MISURA
Parametri di progetto		
Rapporto lunghezza/diametro	2 - 5	m
Carico termico volumetrico	50.000 – 200.000	$\text{kcal m}^{-3} \text{ h}^{-1}$
Tempo di permanenza rifiuti	30 – 60	min.
Carico termico superficiale	500.000 – 1.000.000	$\text{kcal m}^{-2} \text{ h}^{-1}$
Temperatura di mantello	150 - 300	$^\circ\text{C}$
Condizioni operative		
Temperatura di esercizio	850 – 900 ⁽¹⁾	$^\circ\text{C}$
	1000 – 1200 ⁽²⁾	
Rendimento energetico	15 – 16	%
Eccesso d'aria	100 - 150	%
Velocità di rotazione	0,2 – 1,2	giri min^{-1}
(1) senza fusione di scorie (2) a scoria fusa		

6.3.3 Forno a letto fluido

I forni a letto fluido sono formati da un cilindro verticale al cui interno un letto di materiale inerte, costituito da sabbia e ceneri di combustione, è mantenuto in sospensione (fluidizzazione) da un flusso d'aria proveniente da una piastra perforata alla base del cilindro.

I rifiuti, normalmente pretrattati, vengono immessi dall'alto o lateralmente. Una volta a contatto con i granuli di sabbia costituenti il letto e avvolto dall'aria comburente, il materiale subisce una rapida e completa combustione.

Sulla base della pressione di esercizio si usa distinguere tra *letti fluidi a pressione atmosferica* e *letti fluidi in pressione*. Per questi ultimi la pressione d'esercizio viene innalzata di 5 - 10 atm, consentendo, a parità di capacità produttive, apparecchi di minori dimensioni ed elevate potenzialità energetiche (Mariani 1992). Nonostante ciò il recupero energetico in queste condizioni risulta problematico in relazione ad accentuati fenomeni di erosione delle parti metalliche e al necessario trattamento dei gas prima dell'invio in turbina.

I letti fluidi a pressione atmosferica si distinguono ulteriormente, a seconda della modalità di fluidificazione, in combustori a *letto bollente* e a *letto ricircolato*. La distinzione si basa sui valori della velocità superficiale dell'aria, detta anche velocità di fluidizzazione, definita come rapporto tra la portata d'aria alimentata e la sezione del letto stesso. La Tabella 6.7 mostra i principali parametri relativi ad entrambe le realizzazioni.

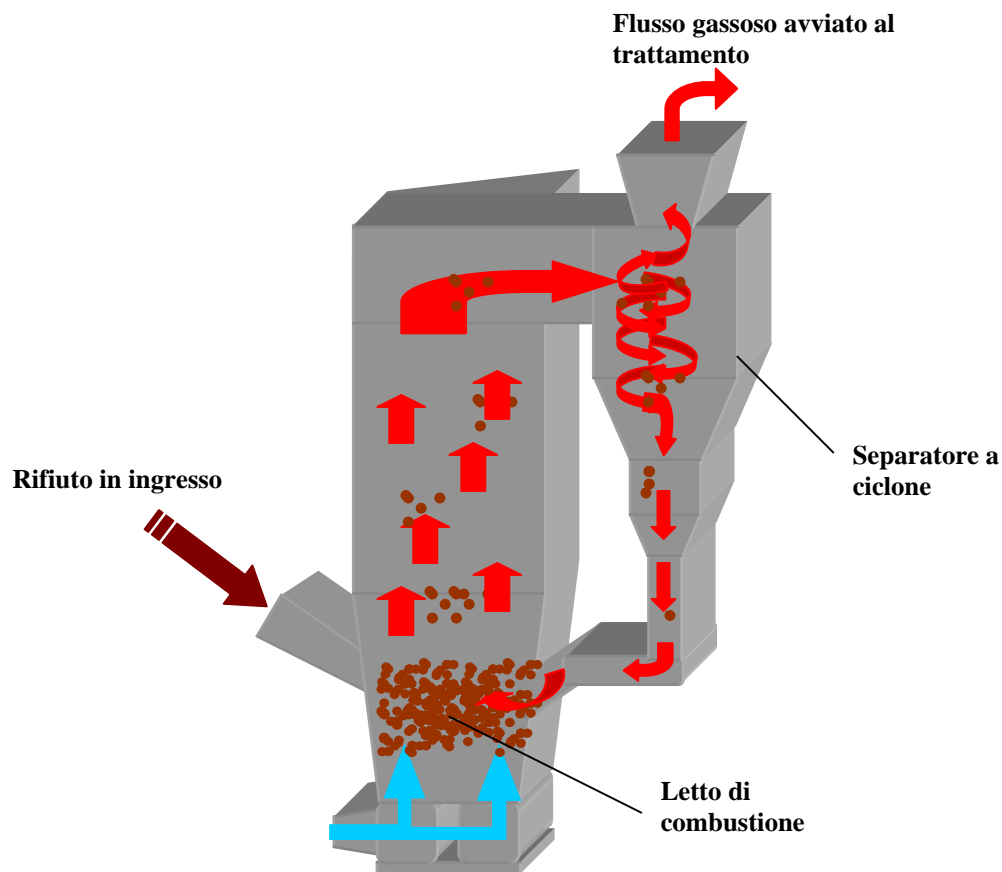
Tabella 6.7 Parametri di progetto e condizioni operative dei forni a letto fluido

PARAMETRO	VALORE	UNITÀ DI MISURA
Parametri di progetto		
Velocità di fluidificazione	1 - 4 ⁽¹⁾	m s ⁻¹
	5 - 10 ⁽²⁾	
Carico termico volumetrico	150.000 - 200.000	kcal m ⁻³ h ⁻¹
Tempo di permanenza rifiuti	50 - 90	min.
Carico termico	10 - 50 ⁽¹⁾	MWth
	40 - 80 ⁽²⁾	
Tempo residenza fumi	> 3	sec.
Condizioni operative		
Temperatura di esercizio	850 - 900	°C
Rendimento energetico	23 - 25	%
Eccesso d'aria	30 - 40	%
(1) letto fluido bollente (2) letto fluido ricircolato		

Nei letti fluidi bollenti la velocità dell'aria non supera i 3 - 4 m s⁻¹. Con questi valori il trascinamento dei solidi al di sopra della zona del letto di combustione è minimo poiché le particelle tendono a ricadere rapidamente entro il letto facendo assumere a questo l'aspetto di un liquido in ebollizione. La ridotta velocità di fluidizzazione comporta tuttavia un aumento della superficie del letto, necessaria per mantenere elevate capacità di combustione. Questo si riflette

in limitazioni e difficoltà nel raggiungere condizioni omogenee di temperatura e alimentazione (Dinale *et al.* 1991).

Figura 6.7 Schema di impianto a letto fluido ricircolato



Nei letti fluidi ricircolati, per ovviare a questo problema, la velocità del flusso d'aria raggiunge valori comunque superiori a $4 - 5 \text{ m s}^{-1}$, potendo arrivare anche a $8 - 10 \text{ m s}^{-1}$. In queste condizioni, si ha un forte trascinamento di particelle da parte del gas, particelle che debbono essere captate e riportate in circolo prima della depurazione dei gas stessi (Figura 6.7). Le prestazioni fornite dai combustori a letto fluido ricircolato sono superiori a quelle dei combustori a letto bollente, con una efficienza più marcata per gli impianti a potenzialità maggiori. Questo non soltanto grazie alla velocità, e quindi alle turbolenze, più elevate che si riflettono in una combustione più efficiente, ma anche al ricircolo che garantisce un tempo di contatto prolungato.

In generale la tecnologia di termodistruzione dei rifiuti mediante letto fluido presenta caratteristiche di utilizzo estremamente interessanti.

Sinteticamente è possibile rilevare:

- Elevata efficienza di combustione;
- Basso tenore di incombusti nelle scorie (0,2% – 0,3%);
- Minor ingombro delle unità;
- Buona elasticità di funzionamento;
- Necessità di un minor eccesso d'aria, conseguente alla maggior turbolenza.

Di contro sussistono aspetti problematici che vanno rilevati:

- possibilità di defluidificazione per la formazione di agglomerati da parte delle ceneri basso fondenti, soprattutto in impianti a letto bollente;
- difficoltà di alimentazione con rifiuti leggeri, soprattutto per impianti a letto ricircolato, a causa della elevata velocità del flusso d'aria;
- necessità di realizzare pretrattamenti dei rifiuti al fine di omogeneizzare le caratteristiche del materiale da trattare;
- la possibilità di mantenere eccessi d'aria più contenuti è tuttavia contrastata dalla necessità di ottemperare alle normative vigenti (tenore di ossigeno in post-combustione > 6 %), per cui è comunque necessario operare con un eccesso superiore a quello che sarebbe tecnicamente sufficiente.

Negli aspetti problematici sopra riportati, particolare rilevanza assume la necessità di un pretrattamento spinto del materiale conferito. Questa tipologia di impianti, infatti, richiede una maggiore attenzione nelle caratteristiche del rifiuto alimentato, una pezzatura adeguata e la rimozione di materiali incombustibili quali metalli (compreso alluminio per la bassa temperatura di fusione) e vetro (Basaldella 2000).

A titolo d'esempio, può essere utile accennare una descrizione del processo di recupero dei materiali riciclabili e di produzione CDR dell'impianto di Parona (Pv).

I RSU conferiti subiscono una prima macinazione in un tritratore a coclea, cui segue un vaglio rotante a due stadi che separa 3 frazioni:

- Una ricca di materiali organici con pezzatura < 60 mm;
- una ricca di metalli con pezzatura compresa tra 60 mm e 120 mm;
- una costituita prevalentemente da carta, cartone e plastica con pezzatura > 120 mm.

La frazione organica subisce un processo di stabilizzazione aerobica che dura circa un mese, seguito da una vagliatura spinta, eseguita con un vaglio dotato di fori di diametro 2 cm, per la rimozione dei pezzetti di carta e plastica. Il terriccio ottenuto viene poi raffinato utilizzando un classificatore pneumatico che separa i solidi inerti costituiti in prevalenza da vetro.

La frazione intermedia proveniente dal vaglio primario, dopo il recupero di ferro e alluminio realizzato rispettivamente con magneti separatori ad induzione, viene riunita alla frazione combustibile.

La frazione combustibile che costituisce il sopravaglio, dopo la rimozione dei metalli, viene tritata in un mulino a martelli fino ad ottenere particelle di dimensioni < 10 cm, idonee alla combustione.

I prodotti recuperati costituiscono il 40% in peso circa dei rifiuti, mentre il restante 60% rappresenta il combustibile che alimenta l'impianto (Fava 1999).

In definitiva si può ritenere che il letto fluido presenti interessanti possibilità di applicazione per combustibili (CDR) con poteri calorifici elevati e basso tenore di inerti, quali quelli ottenibili da operazioni di selezione e trattamento dei rifiuti urbani grezzi che, come rilevato precedentemente, possono procurare grosse difficoltà negli impianti a griglia (Ghezzi 1999).

6.3.4 Forno ad aria controllata

I forni ad aria controllata sono utilizzati per potenzialità ridotte, in genere inferiori ad 1 t h^{-1} . Il sistema è composto da due camere di combustione, generalmente adiabatiche, definite primaria e secondaria.

Nella *camera di combustione primaria* il rifiuto è bruciato con una portata d'aria inferiore a quella stechiometrica. La temperatura raggiunta in questa fase è compresa tra 700°C e 900°C . Le sostanze volatili generate dalla combustione incompleta nella camera primaria passano successivamente nella *camera secondaria*. Qui, in presenza di eccesso d'aria, la combustione viene portata a completamento con temperature che raggiungono i 1000°C – 1100°C .

Per garantire un adeguato controllo delle condizioni operative entrambe le camere sono dotate di bruciatori ausiliari a combustibile convenzionale, sebbene i livelli termici desiderati siano regolati agendo sulla portata d'aria.

Il caricamento, specie negli impianti di minori dimensioni, è discontinuo e si esegue ad intervalli di qualche ora.