



TRATTAMENTI TERMICI DEI RIFIUTI

Prof.Ing.Andrea Corti - Sistemi di trattamento di Rifiuti

Indice Argomenti

1	Introduzione ai trattamenti termici dei rifiuti
2	Stato attuale degli impianti di trattamento termico in Italia e in Europa
3	Utilizzo dei rifiuti come fonte di energia
4	Processi di trattamento termico <ul style="list-style-type: none">combustione direttagassificazionepirolisi
5	Processi di recupero di energia <ul style="list-style-type: none">Caldaia adiabaticaCaldaia integrata
6	Bilancio energetico ed economico di un impianto WTE
7	Tecnologie <ul style="list-style-type: none">Area di conferimento, fossa, tramoggiaForni<ul style="list-style-type: none">Griglia (fissa o mobile)Letto fluido (bollente o circolante)Tamburo rotanteForno a piatti (Nichols - Herrshoff®)CaldaieLinee di trattamento effluenti gassosi

8

Altri aspetti ambientali: Trattamento degli effluenti solidi e liquidi

9

Esempi di impianti di termovalorizzazione esistenti

Combustione diretta, forno a griglia: ASM Brescia

Combustione diretta, forno a griglia: Colleferro (Roma)

Combustione diretta, forno a griglia: Ospedaletto (PI)

Combustione diretta, forno a griglia: Poggibonsi (SI)

.....

10

Particolari tecnologie innovative (Syncom® -arricchimento O₂, dosaggio puntuale di ossigeno (processo SOL®), ricircolo, torcia al plasma, sistemi avanzati combinati con tg, thermoselect e pirogas)

11

Confronto energetico ambientale tra la termoutilizzazione ed altre forme di smaltimento del rifiuto

Introduzione trattamenti termici

La normativa rifiuti è estremamente articolata e può basarsi in prima approssimazione sugli elementi definiti dal Decreto Ronchi e s.m.i. (D.Lgs. 22/97).

- I rifiuti sono distinti innanzi tutto in rifiuti urbani (RU) e rifiuti speciali (RS), una cui sottoclasse è rappresentata dai rifiuti speciali assimilabili (e/o assimilati) agli urbani (RSAU).
- I rifiuti urbani sono sottoposti a privativa comunale.
- I rifiuti sono ulteriormente distinti in pericolosi e non pericolosi con obbligo di non miscelazione.

A valle della fase di raccolta che può avvenire secondo approcci di tipo differenziato (RD) e di tipo indifferenziato (RUI), vi sono una moltitudine di soluzioni che permettono di trattare, e/o smaltire i rifiuti prodotti e raccolti in funzione della loro natura e della loro destinazione finale.

Introduzione trattamenti termici

Le diverse tipologie di trattamento e/o smaltimento e le diverse tecnologie operative possono essere suddivise in prima battuta nei seguenti:

**Trattamenti fisici
semplificati**

**Selezione preliminare, allontanamento di frazioni
specifiche, pressatura per riduzione di volume**

**Trattamenti meccanico-
biologici (MBT)**

**Selezione spinta mediante sistemi dimensionali,
magnetici, inerziali, gravitazionali, aerodinamici ed
ottici, integrati con Processi di trattamento aerobico
ed anaerobico di stabilizzazione e biodegradazione
chimico-biologica controllata**

**Trattamenti di posa a
discarica**

**Smaltimento a discarica controllata con eventuali
processi di utilizzo anche parziale dei sovvalli**

Trattamenti biologici

**Compostaggio e trattamento anaerobico e/o
anaerobico ed aerobico di matrici organiche per
stabilizzazione e biodegradazione chimico-biologica
controllata**

Trattamenti Termici

**Processi di degradazione e/o trasformazione termica
mediante processi sia con che senza ossigeno**

Trattamenti fisici

**Processi di inertizzazione con leganti fisici e chimico-
fiscici**

Introduzione trattamenti termici

I processi di trattamento termico sono nati come metodologia per la:

- riduzione dei quantitativi di materia da porre a smaltimento in discarica sia in termini volumetrici (riduzione al 10%) che massici (riduzione al 30%)
- totale riduzione del potere di putrescibilità del rifiuto stesso.

Al giorno d'oggi hanno assunto anche la funzione di produzione di energia elettrica e termica grazie all'entrata in vigore del **Dlgs. 22/97 (Decreto Ronchi)**:

- per i RU, al **1 gennaio 1999** *“la realizzazione e la gestione di nuovi impianti di incenerimento possono essere autorizzate solo se il relativo processo di combustione è accompagnato da recupero energetico con una quota minima di trasformazione del potere calorifico dei rifiuti in energia utile”*

In Italia l'interesse al recupero di energia da fonti rinnovabili è stato incentivato dalla legge sul risparmio energetico che prevede incentivi e sussidi nella costruzione di impianti termici che utilizzano combustibili poveri quali possono essere i rifiuti urbani e/o assimilabili (certificati verdi per la vendita di energia in rete).

Introduzione trattamenti termici

I processi di termovalorizzazione hanno a che fare con un combustibile tipicamente eterogeneo e fortemente variabile rispetto ad andamenti stagionali e giornalieri del ciclo di produzione e di raccolta dei rifiuti.

Data le particolari caratteristiche fisico-chimiche del rifiuto non è possibile l'utilizzo dei normali impianti per la produzione di energia elettrica da combustibili fossili.



Impianti dedicati sviluppati ad hoc che superano sia problemi di tipo tecnologico che ambientale

La forte variabilità nella composizione del rifiuto può essere ridotta mediante l'utilizzo di sistemi di pretrattamento del rifiuto prima dell'utilizzo energetico e adottando specifici impianti per la combustione di **CDR** (combustibile derivato dai rifiuti), materiale ricavato dai rifiuti solidi urbani che possiede le caratteristiche individuate da specifiche norme tecniche (DM 5/2/98).

L'utilizzo di un rifiuto pretrattato comporta però:

- Minor recupero netto energetico rispetto all'utilizzo di RSU tal e quale e maggiori costi;
- Notevoli consumi energetici per i trattamenti di selezione e triturazione;
- Complicazioni impiantistiche e gestionali;
- Presenza di un sottovaglio da destinare comunque a discarica.

Riguardo al minor recupero di energia rispetto all'utilizzo del tale e quale si può stimare un contributo di circa:

- 570 kWh/t RSU per l'incenerimento del rifiuto urbano indifferenziato
- 490 kWh/t RSU per l'incenerimento del rifiuto urbano dopo selezione
- 385 kWh/t RSU per l'incenerimento del CDR

Introduzione trattamenti termici

L'energia contenuta nel rifiuto può essere utilizzata per:

- produzione di solo **calore**
- produzione di sola **elettricità**
- produzione combinata di **elettricità e calore (cogenerazione)**

La soluzione ottimale è da ricercarsi nella produzione combinata di energia termica ed elettrica, rispondente ai requisiti delle **BAT** espressi dal “BRef for Waste Incineration” per il caso specifico dei RU, che possono essere così sintetizzati:

- la localizzazione di nuovi impianti deve tenere conto della possibilità di massimizzare l'esportazione di energia termica sotto forma di calore e /o vapore;
- sia comunque assicurato un carico minimo di produzione di calore/vapore da destinare, tramite la stipula di contratti a lungo termine, alla fornitura di energia termica a utenze terze;
- siano garantiti su base annua, anche nel caso di cogenerazione, dei livelli minimi di produzione unitaria (MWh/t) di energia elettrica, in funzione del PCI dei rifiuti alimentati;
- siano minimizzati gli autoconsumi dell'impianto.

Introduzione trattamenti termici

Il recupero di energia dai rifiuti può essere:

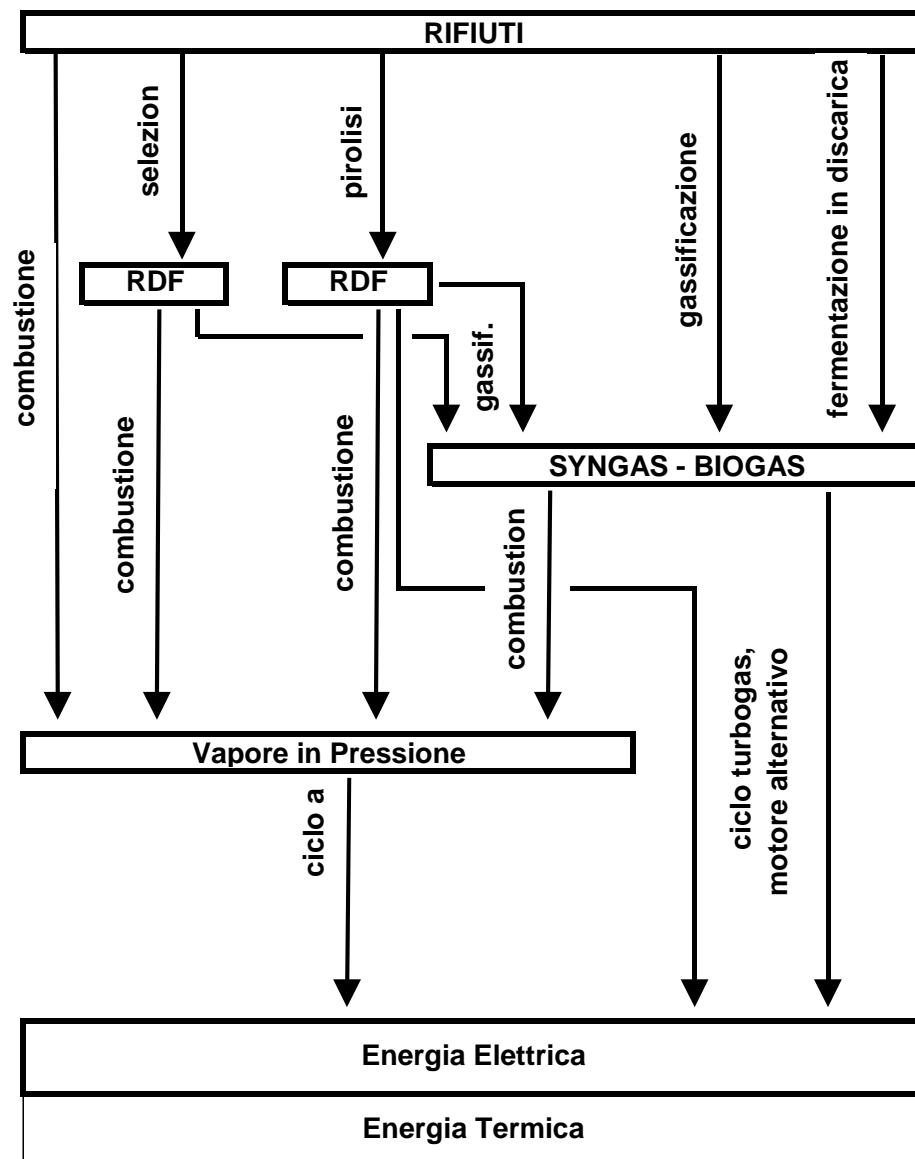
Diretto: mediante cicli sottoposti generalmente a vapore d'acqua ottenuto in un'apposita caldaia tramite il calore derivante dal raffreddamento dei fumi di combustione;

Indiretto: mediante processi termici di **pirolisi o gassificazione** mirati ad ottenere sovralli di processo di interesse energetico (combustibili gassosi, liquidi e solidi).

Un caso limite può essere rappresentato dai processi a bassa temperatura di **digestione anaerobica**

	Tecnologie adottabili per produrre:		
	calore	elettricità	calore + elettricità
Combustione diretta RSU o RDF	forno + caldaia per la produzione di vapore o acqua calda	forno + ciclo a vapore a condensazione	forno + 1) ciclo a vapore a contropressione 2) ciclo a vapore a condensazione e spillamento
Pirolisi/gassificazione + depurazione	caldaia per produzione vapore o acqua calda	in funzione della qualità di RDF o RU: 1) ciclo a vapore 2) motore alternativo 3) turbogas/ciclo combinato	

Introduzione trattamenti termici



Possibili soluzioni per il recupero di energia da rifiuti

Introduzione trattamenti termici

Nei sistemi a **combustione diretta** sono piuttosto ingenti le portate volumetriche dei fumi da trattare sia per le basse pressioni di lavoro (pressione atmosferica) che per la diluizione causata dall'azoto presente nell'aria (79% a fronte di un 21% di O₂).

Grande interesse è dunque riposto nei processi di gassificazione e pirolisi mediante depurazione del combustibile, mediante processi di selezione, prima della combustione e con la possibilità di operare a pressioni più elevate rispetto a quella atmosferica riducendo notevolmente le portate da trattare.

I **progressi tecnologici** maggiori nel settore della termovalorizzazione dei rifiuti si sono avuti fondamentalmente nel settore del recupero di energia, con rendimenti lordi sempre più vicini a cicli convenzionali a vapore surriscaldato, e nel settore del controllo degli impatti ambientali, con il raggiungimento di livelli di emissione inferiori anche di ordini di grandezza rispetto a impianti di vecchia generazione.

Le operazioni di trattamento termico dei rifiuti generano impatti prevalentemente sul comparto ambientale "aria" mentre se gli impianti sono ben realizzati e gestiti i rilasci verso gli altri comparti ambientali acqua e suolo sono praticamente nulli.

Stato impianti Italiano ed Europeo

Situazione in Italia

Dati relativi all'anno 2003, APAT, ONR:

Il recupero energetico realizzato nel 2003 dagli impianti che trattano rifiuti urbani ammonta ad oltre 1,88 milioni di MW

incremento rispetto al 2002 → oltre il 24%,
incremento rispetto al 2001 → 54%

L'incremento registrato nel corso degli ultimi anni è conseguenza di una modifica significativa del quadro tecnologico degli impianti operativi.

2003	n. impianti	totale rifiuti trattati	ReEnergético(±)		Produzione specifica	
			REElettrico (MWh)	RETermico (Gcal)	MWh/ t Elettrico	Gcal/ t Termico
Impianti SRE(*)	4	60.671	-	-	-	-
Impianti con RET&E	8	1.297.135	788.071	593.678	0,61	0,46
Impianti con REE	37	2.115.705	1.092.888	-	0,52	-
totale	49	3.473.511	1.880.959	593.678	0,55	0,46

(*) Recupero energetico totale comprensivo dell'autoconsumo

Legenda - SRE=impianti senza recupero energetico; RET&E=impianti con ciclo cogenerazione; REE=impianti con solo recupero energetico elettrico; RET=impianti con solo recupero termico

Stato impianti Italiano ed Europeo

Regione	2000	2001	2002	2003	n. impianti operativi 2004	n. impianti previsti
Piemonte	2	2	2	2	2	3
Valle d'Aosta	-	-	-	-	-	-
Lombardia	12	14	14	13 ⁽¹⁾	14 ⁽⁶⁾	14
Trentino-Alto Adige	1	1	1	1	1	2 ⁽⁷⁾
Veneto	3	3	4	4	4	4
Friuli-Venezia Giulia	3	3	3	2 ⁽²⁾	2	2
Liguria	-	-	-	-	-	-
Emilia-Romagna	9	9	10	9 ⁽³⁾	8	9 ⁽⁸⁾
Totale Nord	30	32	34	31	31	34
Toscana	8	6	8	8 ⁽⁴⁾	8	8
Umbria	1	1	1	1	1	1
Marche	1	1	1	1	1	1
Lazio	-	-	2	3 ⁽⁵⁾	3	3
Totale Centro	10	8	12	13	13	13
Abruzzo	-	-	-	-	-	-
Molise	-	-	-	-	-	-
Campania	-	-	-	-	-	1 ⁽⁹⁾
Puglia	-	-	1	2	2	2
Basilicata	-	-	1	1	1	2 ⁽¹⁰⁾
Calabria	-	-	-	-	-	-
Sicilia	1	1	1	1	1	4
Sardegna	2	2	2	2	2	2
Totale Sud	3	3	5	6	9	11
Totale Italia	43	43	51	50	53	58

Note:

(1) L'impianto di Abbiategrasso ha cessato l'attività. L'impianto di Milano Silla 1 ha cessato l'attività ad agosto del 2003. L'impianto di Bergamo per RU ha cessato l'attività a gennaio 2003 ed è stato sostituito con un nuovo impianto funzionante a CDR.

(2) L'inceneritore di Gorizia (Moraro) ha cessato l'attività nel 2003

(3) L'impianto di Parma ha cessato l'attività nel 2003; l'impianto di Reggio Emilia risulta non operativo nel 2003, sarà riattivato dopo i lavori di adeguamento.

(4) L'impianto di Falascaia (LU) da agosto 2003 tratta CDR; nel 2002 ha funzionato solo per un breve periodo utilizzando biomasse legnose

(5) A colferero sono attivi due impianti identici funzionalmente separati, in grado di trattare ciascuno circa 85.000 t/a di CDR

(6) Da febbraio 2004 è operativo l'impianto alimentato a CDR di Corticolona (PV) con una capacità di circa 67.000 t/a. L'impianto di Dalmine è in fermo impianto, la relativa autorizzazione è scaduta a gennaio 2004.

(7) In fase di realizzazione l'impianto in località Ischia Podetti (TN)

(8) L'impianto di Bologna sarà sostituito da uno nuovo con potenzialità di 180.000 t/a.

(9) Dovrebbe essere realizzato l'impianto di Aceria (CE)

(10) Dovrebbe entrare in attività l'impianto di Potenza

(11) Nel piano regionale sono previsti 4 nuovi impianti uno dei quali sostituirà quello attualmente operativo a Messina

Numero di impianti di incenerimento e termovalorizzazione operativi in Italia

Stato impianti Italiano ed Europeo

Paese	Rifiuti Urbani 1000 (t/a)	Riciclo	Compostaggio	Discarica	Incenerimento	Altro
EU-25	238908	14%	10%	54%	16%	6%
EU-15	212993	16%	11%	49%	18%	6%
Belgium	4746	19%	16%	27%	34%	4%
Czech-Republic	2865	15%	1%	70%	14%	0%
Denmark	3560	18%	14%	8%	60%	0%
Germany	48836	27%	15%	25%	22%	11%
Estonia	604	3%	2%	84%	0%	10%
Greece	4559	8%	1%	91%	0%	0%
Spain	26340	11%	10%	60%	6%	13%
France	32174	12%	13%	43%	32%	0%
Ireland	2376	11%	1%	87%	0%	0%
Italy	29409	9%	8%	67%	9%	8%
Cyprus	490	0%	0%	90%	0%	10%
Latvia	2254	1%	1%	81%	2%	14%
Lithuania	1046	0%	0%	100%	0%	0%
Luxembourg	285	1%	14%	21%	44%	20%
Hungary	4815	1%	0%	88%	8%	2%
Malta	217	1%	14%	85%	0%	0%
Netherlands	9790	22%	23%	8%	33%	14%
Austria	4634	23%	37%	30%	10%	1%
Poland	11108	1%	3%	96%	0%	0%
Portugal	4696	7%	6%	69%	19%	0%
Slovenia	929	2%	7%	82%	0%	9%
Slovakia	1588	2%	3%	78%	10%	7%
Finland	2440	24%	0%	64%	11%	1%
Sweden	3930	29%	10%	22%	38%	1%
United-Kingdom	34851	10%	2%	80%	7%	0%

Situazione in Europa
(dati:anno 2001)

Fonte: Eurostat, *Energy, Transport and Environment Indicators*, European Communities, 2004

Stato impianti Italiano ed Europeo

Nazione	Numero impianti	Numero linee di combustione	Quantitativi trattati (t/a)	Numero di linee a griglia mobile	Numero di linee a letto fluido	Altri tipi di impianti (****)
Austria	2	5	406.700	5	-	-
Belgio	18	(**)	2.652.000	(**)	(**)	(**)
Danimarca	32	69	3.136.000	55	-	14
Francia	112	221	11.965.800	189	5	27
Germania	60	174	16.787.400	152	3	19
Inghilterra	3	8	1.071.000	2	-	6
Italia	51 (*)	93	3.488.776	66	14	13
Norvegia	4	6	273.000	6	-	-
Olanda	11	32	4.412.000	32	-	-
Portogallo	2	5	933.800	5	-	-
Spagna	8	16	1.070.300	9	4	3
Svezia	19	40	2.344.000	32	6	2
Svizzera	31	60	3.150.700	59	1	-
Ungheria	1	4	420.000	4	-	-
Totale	354	733 (***)	52.111.476	616 (***)	33 (***)	84(****)

(*)Dati 2003, Fonte APAT/ONR Rapporto Rifiuti 2004

(**) Dati non disponibili

(***) Escluso il Belgio

(****) Per altri tipi si intendono sistemi a griglie fisse, tamburi rotanti, sistemi con gassificazione, con pirolisi

La tabella fornisce il quadro degli impianti di trattamento termico dei rifiuti a livello europeo con l'indicazione del numero di linee di trattamento installate e della tecnologia di combustione. L'analisi dei dati evidenzia la larga diffusione del sistema a griglia rispetto ad altre tecnologie di trattamento: su 733 linee di combustione, 616 sono, infatti, a griglia mobile.

Fonte: ISWA,2002

Stato impianti Italiano ed Europeo

La tabella fornisce il quadro del coefficiente medio di conversione energetica al trattamento termico dei rifiuti rispetto a tre indicatori:

- il valore di energia elettrica (in kWh) recuperata;
- il valore di fonti energetiche primarie convenzionali complessivamente sostituite sia per conversione termica che elettrica (in kWh);
- il valore di energia termica (in kWh) recuperata;

			[t/a]
ITA 1997	0.170	[kWh/kg]	1,719,714
	0.567	[kWh comb.foss./kg]	
	0.089	[kWh/kg]	
Zurich2 1994	0.076	[kWh/kg]	175,000
	1.615	[kWh comb.foss./kg]	
	1.130	[kWh/kg]	
FRA 2001	0.260	[kWh/kg]	3,569,780
	1.078	[kWh comb.foss./kg]	
	0.307	[kWh/kg]	

La situazione italiana degli impianti è di limitato recupero energetico complessivo.

La situazione di Zurigo mostra le condizioni di un impianto dedicato prioritariamente alla produzione di calore per teleriscaldamento urbano.

La situazione francese mediamente mostra una ripartizione bilanciata tra recupero energetico a fini elettrici e a fini termici.

Utilizzo di rifiuti come Energia

Il rifiuto rappresenta una fonte energetica da non sottovalutare in quanto contiene elementi ossidabili (essenzialmente carbonio e idrogeno) in grado di liberare energia.

Ipotizzando di impiegare tutto il residuo della raccolta differenziata in impianti di termovalorizzazione sarebbe possibile generare quasi il 5% dell'energia richiesta dalla rete elettrica italiana, un contributo rilevante date le caratteristiche del combustibile utilizzato.

Aumento negli anni del contenuto di energia dei rifiuti dovuto a:

- aumento della frazione di materiale cellulosico e plastico
- diminuzione della frazione organica putrescibile

Rispetto al passato il potere calorifico dei rifiuti mediamente raccolti ha caratteristiche che ne rendono possibile il trattamento termico di combustione completa anche in assenza di combustibile addizionale (non necessario per valori di PCI superiori ai 1500 kcal/kg).

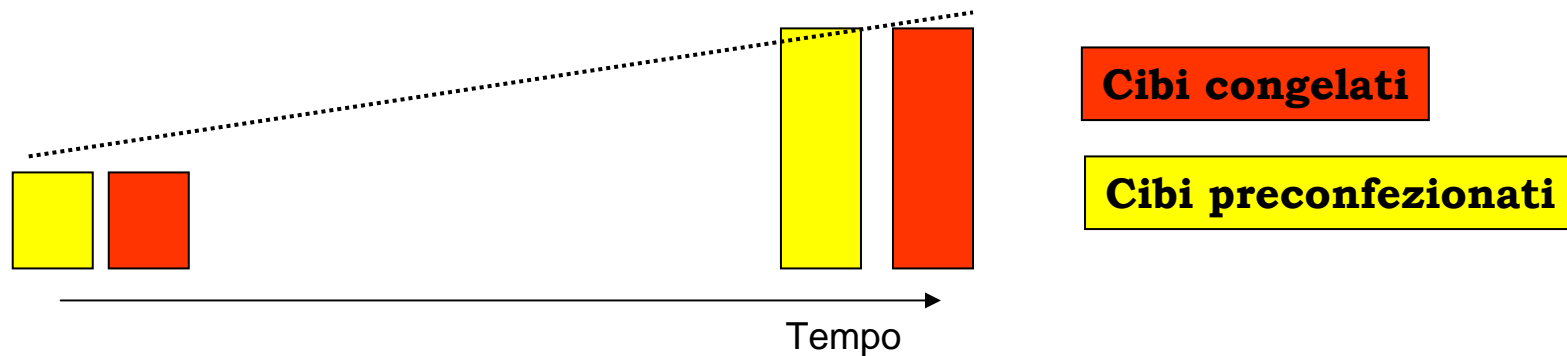
PCS = potere calorifico superiore, calore liberato dalla combustione isobara a 1 atm, 25°C nel caso in cui tutta l'acqua generata dalla combustione si trovi allo stato liquido

PCI = potere calorifico inferiore, calore liberato dalla combustione isobara a 1 atm, 25°C nel caso in cui tutta l'acqua generata dalla combustione si trovi allo stato gassoso

Ai fini pratici si fa riferimento al PCI in quanto nei sistemi di combustione normalmente impiegati tutta l'acqua contenuta nei gas è allo stato gassoso

Utilizzo di rifiuti come Energia

Esempio di modificazione dei regimi di consumo



Effetti sul consumo (RU):

- ⇒ riduzione frazioni organiche
- ⇒ incremento imballaggi (contenitori)
- ⇒ incremento PCI

Effetti sulla catena produttiva (RS):

- ⇒ incremento produzione di rifiuti
- ⇒ incremento scarti organici

Caratterizzazione rifiuto solido mediante:

- **Analisi elementare:** caratterizzazione del rifiuto in base al contenuto di acqua, ceneri e composizione chimica elementare: *C,H,O,N,S,Cl,F etc*

- **Analisi merceologica:** caratterizzazione dei rifiuti in base alle frazioni delle principali classi di prodotti in essi contenuti

Dal punto di vista energetico la caratterizzazione più utile è l'analisi elementare in quanto il processo di ossidazione necessario per generare energia comporta la perdita dell'identità fisica e chimica del rifiuto

contenuto di umidità

Frazione secca { *contenuto di ceneri*
contenuto di solidi volatili: atomi C,H,O,N,S,Cl,F etc.

Caratterizzazione chimica del rifiuto tramite:

- **proximate analysis** (ANSI/ASTM standards D 3172) - permette di stimare la composizione percentuale di un rifiuto (o di altro combustibile) in termini di composti volatili, umidità e inerti
- **ultimate analysis** (ASTM standards D 3176) - finalizzata alla caratterizzazione della esatta composizione chimica elementare del rifiuto (o di altro combustibile) in termini di carbonio, idrogeno, azoto, ossigeno, zolfo (eventualmente può essere interessante la caratterizzazione anche di cloro e fluoro).

Utilizzo di rifiuti come Energia

	Carbonio	Idrogeno	Ossigeno	Azoto	Zolfo	Cenere
Rifiuti alimentari	48.0	6.4	37.6	2.6	0.4	5.0
Carta	43.5	6.0	44.0	0.3	0.2	6.0
Cartone	44.0	5.9	44.6	0.3	0.2	5.0
Plastica	60.0	7.2	22.8	-	-	10.0
Tessuti	55.0	6.6	31.2	4.6	0.1	2.5
Gomma	78.0	10.0	-	2.0	-	10.0
Pelle	60.0	8.0	11.6	10.0	0.4	10.0
Rifiuti di giardino	47.8	6.0	38.0	3.4	0.3	4.5
Legno	49.5	6.0	42.7	0.2	0.1	1.5

Composizione elementare della frazione secca per ogni categoria merceologica

Per la stima del PCI si impiegano solitamente misure su campioni di rifiuto, secondo procedure ben determinate (UNI 9246), eseguite mediante bomba di Mahler, che permette di stimare il potere calorifico superiore (PCS).

Nota la composizione chimica del rifiuto è possibile stimare l'energia associata (PCI) tramite formule empiriche quali la formula di DuLong:

$$PCI = 8080 C + 28750 (H - O/8) + 2500 S - r \cdot H_2O$$

dove:

r = valore del calore latente dell'acqua (circa 2500 kJ/kg)

C,H,O,S = percentuali di carbonio, idrogeno, ossigeno, zolfo nel rifiuto

Utilizzo di rifiuti come Energia

Per la stima del PCI si possono impiegare una notevole serie di formule empiriche di definizione basate sulla composizione chimica elementare.

(formula di Shien e Fan) in [kcal/kg]

$$PCI = 7838 \cdot C + 33889 \cdot \left(H_2 - \frac{O_2}{8} \right) + 3829 \cdot S + 4447 \cdot F + 1791 \cdot Cl + 682 \cdot Br + 335 \cdot I - r_0 \cdot HU$$

(formula di Chang) in [kcal/kg]

$$PCI = 8561,11 \cdot C + 179,72 \cdot H - 63,89 \cdot S - 111,17 \cdot O - 91,11 \cdot Cl - 64,94 \cdot N - r_0 \cdot HU$$

(formula di Boie) in [kcal/kg]

$$PCI = 8322 \cdot C + 27430 \cdot H - 2580 \cdot O + 1500 \cdot N + 940 \cdot Cl + 6500 \cdot P - r_0 \cdot HU$$

Utilizzo di rifiuti come Energia

Stima del Potere Calorifico Inferiore (PCI) medio delle famiglie di frazioni merceologiche presenti nei rifiuti

	PCI [kcal/kg]	inerti [%]	umidità [%]
carta	3,000	4.68	15.0
cartone	3,150	4.11	12.5
altri cellulosici	2,750	1.59	20.0
tessili	3,400	2.00	20.0
legno	3,300	1.09	22.0
plastica	6,800	9.40	6.0
gomma	5,000	7.84	2.0
organico domestico	500	2.85	70.0
residui verdi	1,450	3.00	50.0
organico da grandi utenze	500	2.70	70.0
sottovaglio	1,300	24.50	30.0
totale	2,247	21.90	25.2

Utilizzo di rifiuti come Energia

Un'attenta analisi delle caratteristiche del rifiuto è il punto di partenza fondamentale per la progettazione di un impianto di trattamento termico con eventuale recupero di energia. Tale variabile può infatti influenzare sia il recupero di calore dalla combustione, sia la tipologia di inquinanti prodotti dall'impianto.

Il potere calorifico e la portata dei rifiuti in ingresso all'impianto definiscono la **Taglia nominale dell'impianto** (MW_t o kcal/h) calcolata come:

Portata oraria (massima) x Potere Calorifico Inferiore (PCI) dei rifiuti alimentati.

Il dimensionamento dell'intero processo è dipendente dalla taglia nominale di impianto ed in alcuni casi dalla portata di rifiuti massima ammissibile.

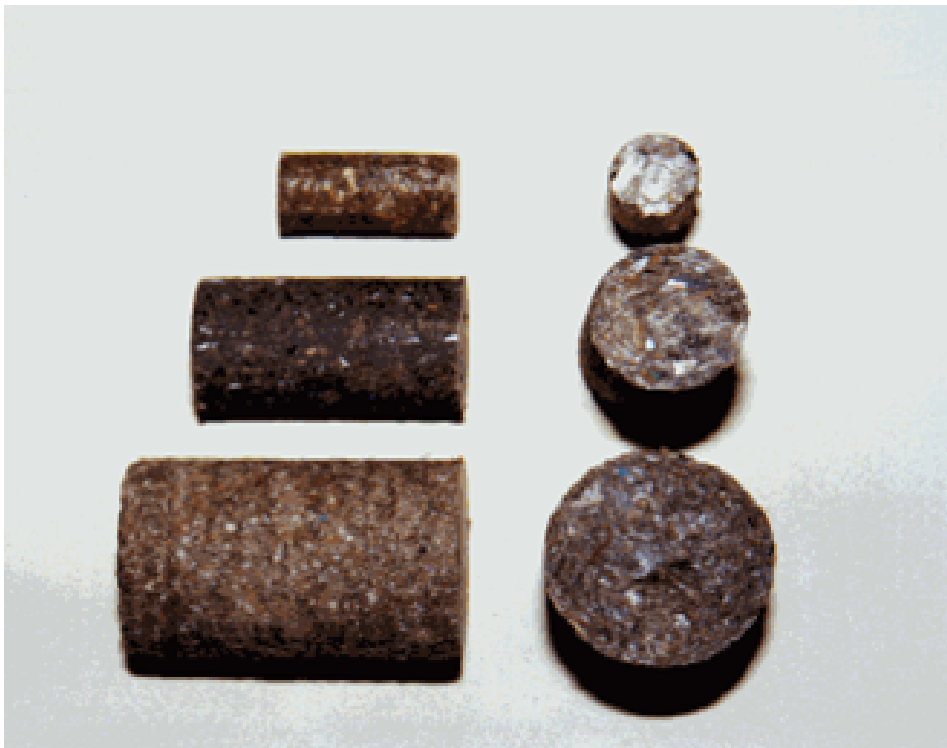
Il potere calorifico inferiore di un rifiuto urbano può essere fortemente variabile a seconda della provenienza, della % di raccolta differenziata, del maggior contenuto di elementi ad elevato PCI (plastiche, gomma, carta). Si può considerare comunque un valore che si aggira intorno alle 2100-2900 kcal/kg.

Un CDR invece, provenendo da un un processo di raffinazione della frazione secca attraverso una serie di trattamenti quali triturazione, essiccamento, addensamento, eventuale miscelazione con rifiuti ad alto potere calorifico, presenta un PCI più elevato (non deve essere inferiore ai 15000 kJ/kg secondo i limiti qualitativi imposti dal DM 5/2/98).

Utilizzo di rifiuti come Energia

Il **CDR** corrisponde ad un prodotto reso il più possibile omogeneo (pur essendo riconoscibili le diverse frazioni componenti) ottenuto da processi di selezione meccanica e di trattamento biologico (processi MBT) e/o di trattamento termico (processi di essiccazione per allontanamento del contenuto di acqua), finalizzati all'incremento del PCI rispetto al rifiuto tal quale.

Il **CDR** è un rifiuto speciale e per essere certificato deve rispondere alle specifiche chimico fisiche previste dalla normativa (DM 5 febbraio 1998).



Il **CDR** si può presentare a seconda degli usi successivi sia in stato di residui finemente tritati semplici (fluff) che in stato di aggregati per estrusione meccanica di forme e dimensioni diverse.

Processi di trattamento termico

Il recupero di energia dai rifiuti può essere effettuato attraverso diverse modalità. La più utilizzata consiste nella **combustione diretta**, sia del rifiuto tale e quale che del rifiuto preventivamente trattato.

Si stanno comunque affacciando sul mercato nuove tecnologie di trattamento termico basate su processi di pirolisi e gassificazione che permettono la conversione del rifiuto in un combustibile intermedio liquido o gassoso da impiegare poi in normali caldaie, motori alternativi o turbine a gas (**combustione indiretta**).

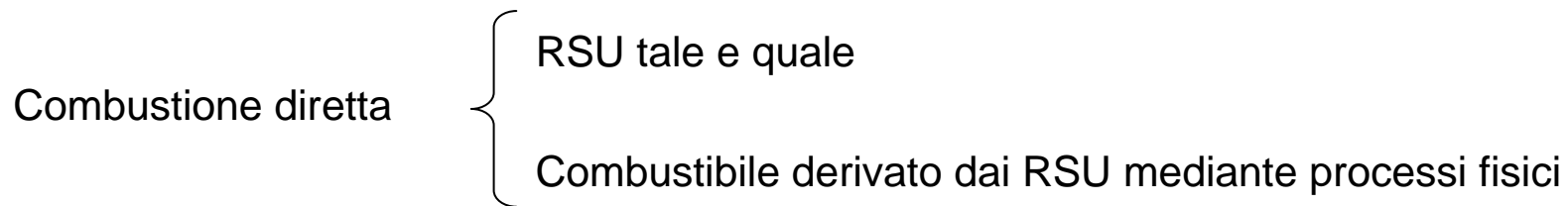
In termini energetico-ambientali le tecnologie di gassificazione e pirolisi presentano potenziali aspetti interessanti quali:

- Possibilità di conseguire un maggiore rendimento di conversione del contenuto energetico del rifiuto;
- Riduzione delle portate di effluenti gassosi;
- Miglioramento delle caratteristiche di inocuizzazione e maggiori potenzialità di riutilizzo dei residui solidi prodotti dal processo.

A volte in letteratura sono classificati come sistemi di pirolisi dei reattori in cui la quantità di ossigeno disponibile sia inferiore al 30% del fabbisogno stechiometrico; al di sotto di tale soglia prevalgono le reazioni endotermiche su quelle esotermiche con la conseguenza che è necessario fornire al reattore un apporto di energia

Combustione diretta

Il processo di combustione consiste in una ossidazione degli elementi combustibili presenti nel rifiuto in condizioni di forte eccesso di ossigeno, con rilascio di energia termica verso l'esterno. I prodotti sono costituiti da fumi di combustione e dal residuo solido inerte.



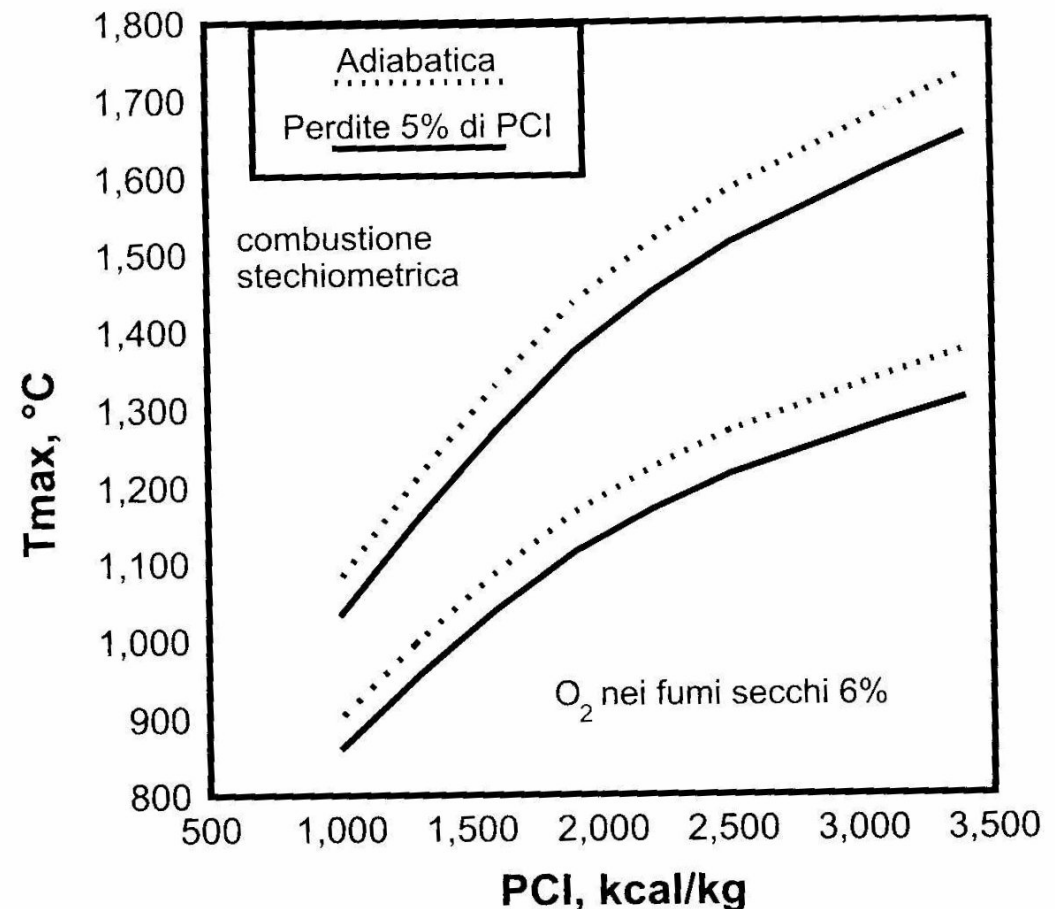
La combustione diretta porta ad una forte riduzione della massa (70-80%) e del volume (85-90%) del rifiuto.

I sistemi di combustione diretta rendono particolarmente impegnativo il trattamento dei fumi. A causa della diluizione in aria e della pressione di lavoro (circa atmosferica) le portate da trattare sono ingenti, questo richiede grandi dimensioni dei dispositivi per il trattamento e maggior difficoltà nel separare i composti indesiderati a causa della diluizione in azoto.

Processi di trattamento termico

La figura esemplifica l'andamento della temperatura dei prodotti di combustione in funzione del potere calorifico dove quest'ultimo varia in conseguenza della variazione del tenore di umidità e inerti mantenendo la stessa composizione dei solidi volatili (52,5% carbonio, 7,5% idrogeno, 38,5% ossigeno, 1,3% azoto, 0,2% zolfo).

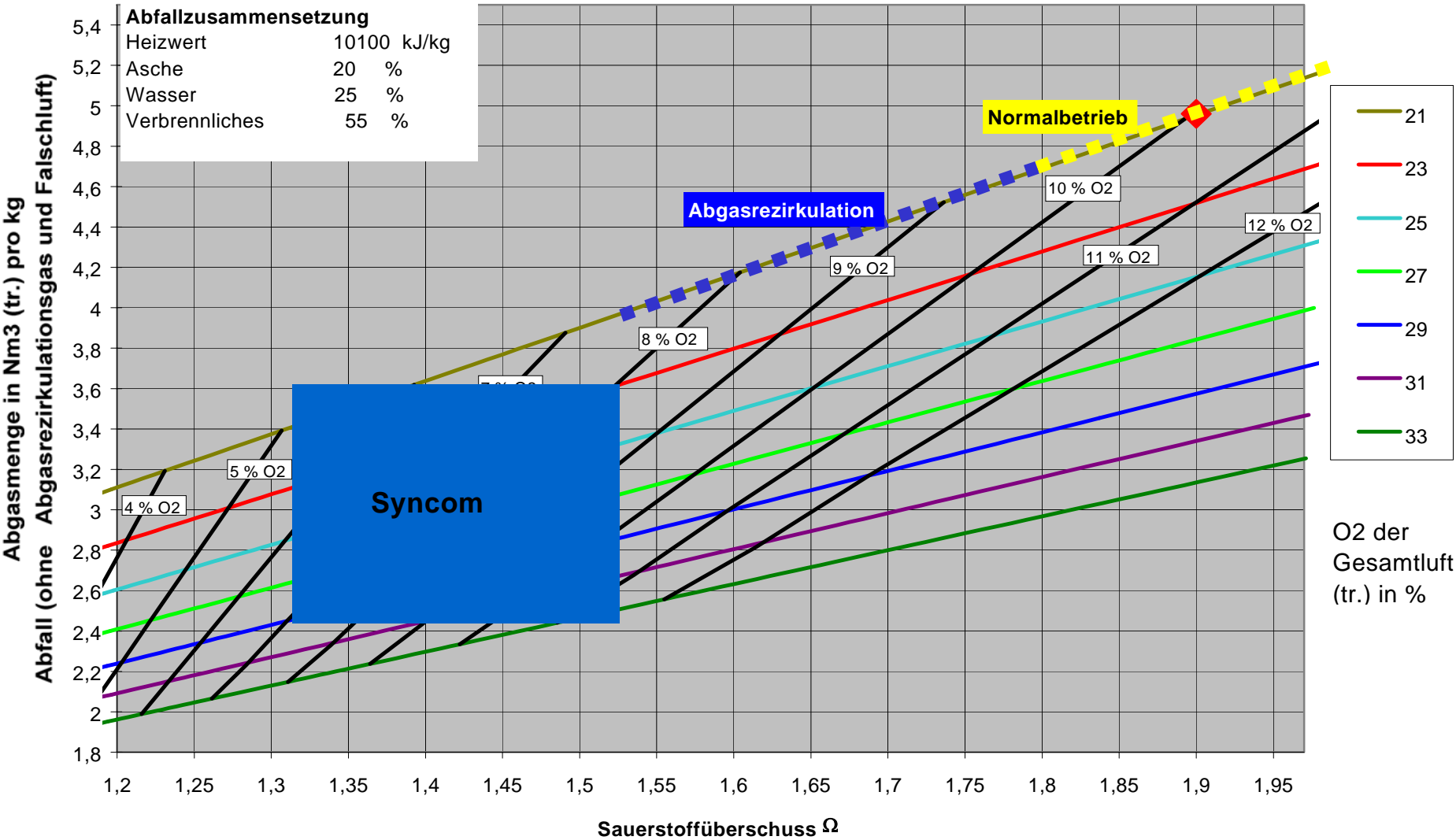
Le curve sono ottenute ipotizzando l'ossidazione completa di tutto il materiale combustibile a CO_2 , H_2O e SO_2 . La perfetta adiabaticità ipotizzata per le curve tratteggiate è irrealistica, in pratica il 4-6 % del PCI dei rifiuti è indisponibile a causa delle perdite termiche e per incombusti nelle scorie .



Temperatura massima raggiungibile dai gas combustibili in funzione del PCI e del tenore di O_2 nei fumi secchi

Processi di trattamento termico

Effetto della diluizione con aria (eventualmente arricchita di ossigeno) sulla portata fumi



Il processo avviene in assenza di ossigeno, tutte le frazioni prodotte sono combustibili (gassoso, liquido e solido).

La pirolisi consiste in un riscaldamento indiretto in atmosfera priva di O_2 che conduce alla scissione delle sostanze organiche dando luogo, per reazioni di cracking termico e di condensazione, a frazioni gassose, liquide e solide.

Le tre correnti in uscita sono costituite da:

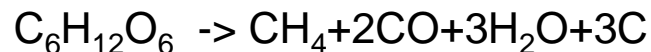
- a) gas combustibile (syngas) avente un medio potere calorifico ($13-21\text{MJ/Nm}^3$), costituito principalmente da CO , CO_2 (se è presente ossigeno nel materiale base), H_2 , e idrocarburi leggeri sia saturi che insaturi in funzione delle caratteristiche iniziali della frazione organica da trattare e delle condizioni operative applicate;
- b) un prodotto liquido a temperatura ambiente (TAR, assimilabile ad un olio combustibile) costituita da catrami, acqua e composti organici;
- c) un prodotto solido (CHAR), costituito essenzialmente da residuo carbonioso, inerti e ceneri.

Processi di trattamento termico

In genere i **prodotti gassosi** rappresentano il 20-30% in peso del materiale iniziale con un'incidenza crescente all'aumentare della temperatura. Il residuo liquido **TAR** ottenuto dalla fase di condensazione vapori rappresenta il 50-60% in peso e contiene notevoli quantità di umidità (60-80%). I residui solidi **CHAR** rappresentano il 20-30% ed hanno un potere calorifico di circa 5000-6000 kcal/kg e possono contenere sostanze simili ai carboni bituminosi alle basse temperature di pirolisi (400-500°C) e sostanze simili ai carboni di tipo antracitico alle temperature più elevate (circa 900°C).

L'apporto termico necessario per fare avvenire il processo viene di norma coperto con l'utilizzo di una parte della portata del gas prodotto.

Un esempio qualitativo è costituito dalla reazione di pirolisi della cellulosa che, per azione del calore, si decompone producendo metano, monossido di carbonio, vapor d'acqua e un residuo a base di carbone:



La reazione è puramente ideale dato che i prodotti di reazione dipendono sia dalle condizioni operative del processo (temperatura, pressione, tempi di residenza) che dalle caratteristiche del materiale di partenza. Processo complesso con materiali eterogenei.

I combustibili necessitano di onerosi processi di purificazione e la tecnologia risulta piuttosto complessa e di difficile gestione. Il processo presenta un certo interesse come fase di pre-trattamento integrata in un impianto di gassificazione.

Il processo di gassificazione consiste nella combustione parziale di un materiale in difetto di ossigeno che dà luogo ad un gas combustibile ricco in ossido di carbonio e idrogeno. Per la sua applicazione richiede l'utilizzo di un materiale abbastanza omogeneo per cui viene spesso ipotizzata come applicabile sul CDR nelle forme di aggregazione dipendenti dalla tecnologia impiegata (nel caso di letti fluidi pellettizzato).

Le reazioni di ossidazione parziale riducono, rispetto alla pirolisi, l'incidenza relativa dei solidi e dei liquidi condensabili rispetto ai gas, determinando per quest'ultimo una leggera riduzione del suo PCI. Nella gassificazione il calore necessario al processo viene fornito dalle reazioni di ossidazione parziale che riducono le esigenze di apporti termici dall'esterno.

Le caratteristiche qualitative e quantitative dei prodotti dipendono soprattutto dalla quantità di aria (ossigeno) utilizzata. Risultato della gassificazione è un gas povero contenente azoto, CO, CO₂ idrogeno e una minor quantità di metano e ossigeno ed ha PCI pari a circa 1000-1500 kcal/Nm³.

Processo che si accoppia preferibilmente ad impiego del gas povero come co-combustibile (cementifici)

Processi di trattamento termico

Le possibilità di utilizzo energetico dei gas prodotti da processi di pirolisi e gassificazione sono strettamente legate alla presenza di componenti minori che possono rendere problematico l'impiego.

Tra queste rivestono molta importanza il particolato, i gas acidi ed alcalini ed il **TAR** costituito dal complesso degli idrocarburi pesanti condensabili. Questi ultimi in particolare possono formare depositi viscosi di sostanze oleose e polveri a seguito del raffreddamento del gas già a temperature di 250-300°C con conseguenti problemi di intasamento e sporcamento.

L'impiego dei prodotti di risulta da pirolisi e gassificazione è comunque complesso. Nel caso dei combustibili gassosi di risulta (syngas) il suo utilizzo in cicli di produzione di energia elettrica ad elevato rendimento (motori alternativi, turbine a gas) richiede così trattamenti di depurazione anche complessi ed onerosi (lavaggi multistadio, depolverazione).

Le soluzioni, ancora principalmente a livello sperimentale, sono generalmente orientate alla produzione di un combustibile in fase gassosa sia tramite gassificazione diretta che attraverso una prima fase di pirolisi seguita da una fase di combustione dei residui prodotti.

Processi di trattamento termico

Le tecnologie adottate comprendono sistemi a letto fisso o a letto fluido, bollente o ricircolato; per la gassificazione sono altresì sperimentati sistemi con aria e con ossigeno, a pressione atmosferica ed in pressione.

In pratica i sistemi proposti provvedono in gran parte dei casi all'adozione di tecnologie a pressione atmosferica.

Lo sfruttamento del gas avviene secondo due alternative principali:

→ Combustione diretta del tale e quale (o dopo trattamenti non particolarmente spinti) in sistemi convenzionali inseriti a valle dei gassificatori

→ Depurazione completa dei gas per il loro utilizzo in installazioni non convenzionali (motori alternativi, turbine a gas).

In tutti e due i casi i trattamenti di depurazione, pur se applicati a portate di gas più ridotte, non risultano significativamente diversi da quelli adottati nei forni convenzionali (griglia, letto fluido).

Processi di recupero di Energia

Il recupero del calore avviene attraverso scambiatori di calore in cui i fumi caldi trasmettono calore all'acqua a causa della differenza di temperatura esistente tra loro.

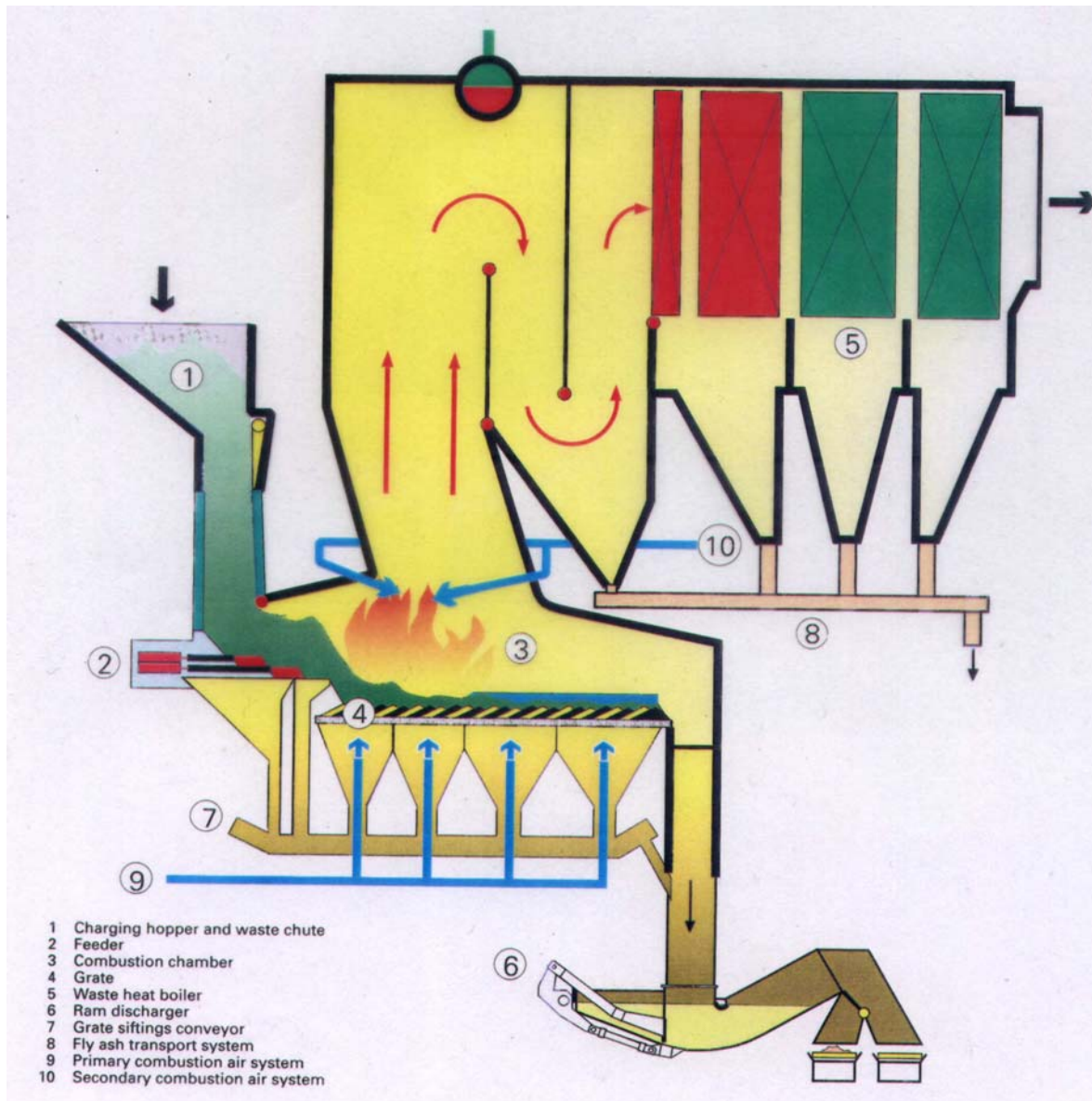
Il sistema si compone di **surriscaldatori** alimentati con il vapore saturo generato in caldaia, di **vaporizzatori** che permettono la vaporizzazione del fluido termovettore e di **economizzatori** che provvedono a preriscaldare l'acqua di alimento fino alla temperatura in ingresso al vaporizzatore.

I tubi vaporizzatori possono avere parte della superficie evaporativa direttamente posta nella camera di combustione (***Integrated Boiler***), in questo caso è necessario rivestire i tubi di materiale refrattario (es. carburo di silicio), che li protegga dalla fiamma.

Alte temperature di ingresso al generatore, raggiungibili grazie alla presenza di superfici di scambio interne alla sezione di combustione, consentono di operare con *ridotti eccessi d'aria* e quindi con portate di fumi contenute. Questo si traduce in una limitata perdita per calore sensibile dei fumi all'uscita dal generatore e conseguentemente in elevati rendimenti termici. Permette altresì di limitare il volume dei fumi da trattare con conseguenti risparmi della sezione trattamento fumi.

Complessivamente allo stato attuale, lo schema costruttivo di un termovalorizzatore, rende la sezione di recupero di energia come una configurazione non più separata dal forno, che bensì ne diventa parte integrante finalizzata alla sua regolazione e alla sua conduzione.

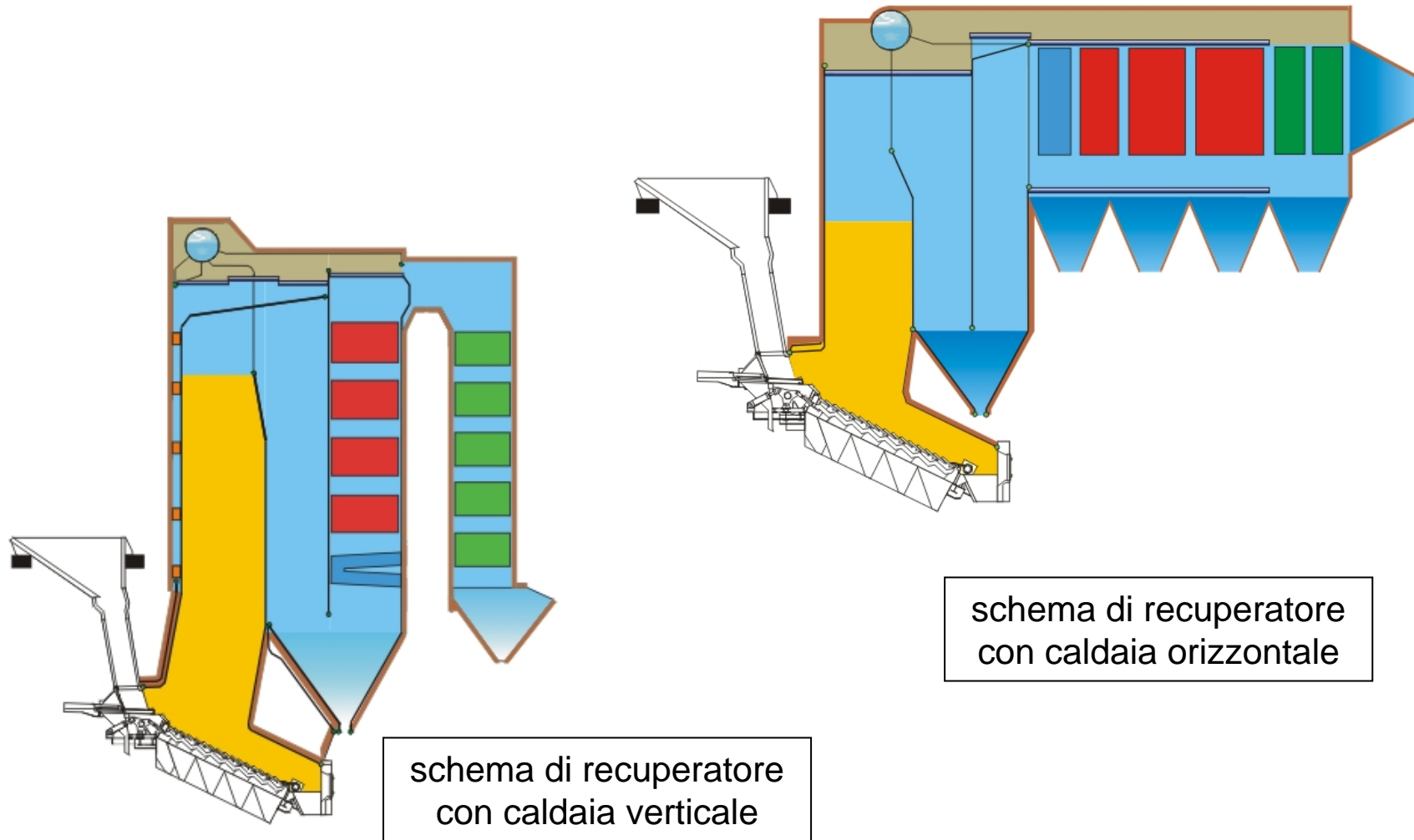
Processi di recupero di Energia



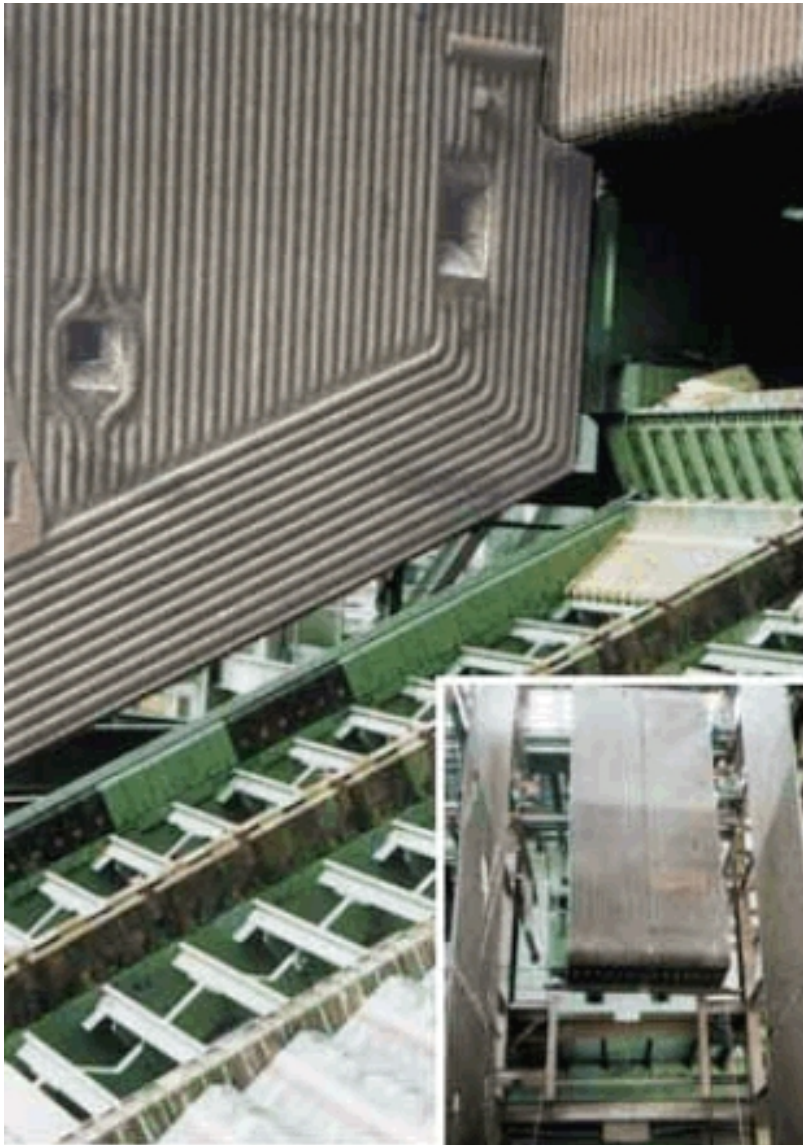
Esempio di ciclo di combustione (forno) con recupero di energia (caldaia a vapore).

Processi di recupero di Energia

Esempio di due diverse tipologie di sistemi di recupero di energia diretta, con diversi livelli di scambio termico (estensione della sezione di forno adiabatica).



Processi di recupero di Energia



Esempio di sistema di recupero di energia diretta (configurazione in fase di montaggio) con **caldaia integrata** (integrated boiler) costituita da scambiatori presenti in tutta la superficie del forno di combustione.

La configurazione di **caldaia integrata** permette di ottenere il minimo eccesso d'aria (minore apporto di aria di raffreddamento) e quindi permette di avere:

- minima portata fumi;
- minime perdite al camino per calore sensibile.

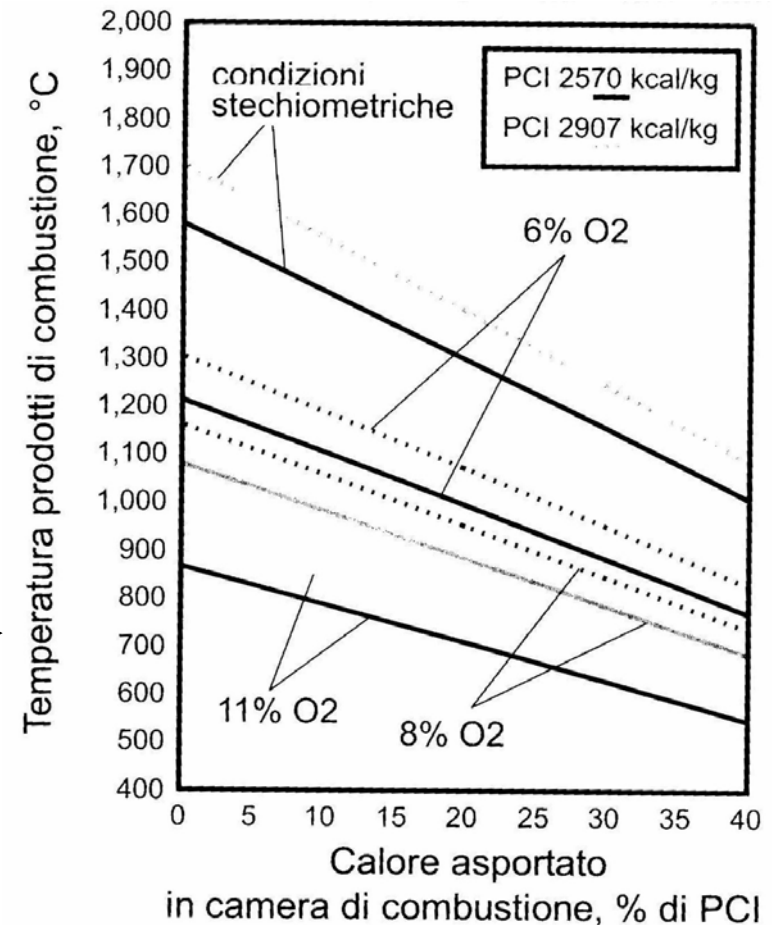
Processi di recupero di Energia

Con il sistema a caldaia integrata è possibile controllare la temperatura nel forno riducendo l'apporto di aria di diluizione mantenendo la temperatura nella camera di post combustione (CPC) comunque compresa nell'intervallo 900 -1100 °C.

Le temperature dei fumi in uscita dalla sezione di caldaia sono normalmente poste nell'intervallo 250°-160°C, 170°C nei moderni impianti.

Complessivamente si può ritenere che il rendimento di recupero in un generatore tradizionale è mediamente dell'ordine di 0,75 mentre può superare 0,8 quando si spinge lo scambio termico alle basse temperature.

Temperatura dei prodotti di combustione in funzione del calore asportato in camera di combustione per diversi valori del tenore di O₂ nei fumi.



Processi di recupero di Energia

La quantità di energia recuperabile può variare in modo significativo con i seguenti fattori:

- carico nominale dell'impianto;
- caratteristiche del rifiuto in ingresso (tenore di umidità e ceneri, potere calorifico etc.);
- tecnologia di combustione;
- configurazione e caratteristiche della caldaia a recupero (adiabatica, integrata);
- configurazione e caratteristiche del ciclo termodinamico (pressione di evaporazione e condensazione, temperatura del vapore surriscaldato etc.)

Per convertire il vapore e quindi l'energia termica in energia elettrica si utilizza una turbina a vapore in cui l'energia termica si trasforma in energia meccanica e un generatore in cui l'energia meccanica si trasforma in energia elettrica.

Per utilizzare il vapore sia sotto forma di energia termica che elettrica si può ricorrere agli impianti di **cogenerazione** in cui si prevede l'estrazione del vapore dagli stadi di bassa pressione della turbina per un suo uso diretto (ciclo a vapore a condensazione e spillamento).

E' possibile inoltre utilizzare per la cogenerazione un ciclo a vapore a contropressione che ha lo svantaggio di vincolare rigidamente la produzione di elettricità a quella del calore che sono entrambe determinate dalla portata di vapore.

Bilancio energetico di un Processo WTE

Bilancio energetico

Ad oggi le applicazioni energetiche più significative, sia in termini numerici, che di risultanze rispetto a potenza specifica sviluppata e rendimento di conversione, sono quelle di recupero diretto di energia, basate su cicli a vapore surriscaldato (o anche saturo) con generazione di energia elettrica e/o termica, secondo diverse tipologie impiantistiche.

Modellazione di un impianto WTE :

- 1) Determinazione della composizione elementare del rifiuto
- 2) Calcolo del potere calorifico inferiore del rifiuto sulla base della composizione elementare
- 3) Impostazione di un modello di combustione composto dalle seguenti fasi:
 - bilancio energetico della camera di combustione
 - calcolo dell'eccesso d'aria per controllo temperatura CPC
 - verifica del tenore di ossigeno (>6% volume)
- 4) Definizione dei parametri di recupero del ciclo a vapore
- 5) Impostazione di un bilancio nella caldaia per la determinazione della portata di vapore prodotto
- 6) Potenza prodotta dall'espansione del vapore in turbina e rendimento dell'impianto

Bilancio energetico di un Processo WTE

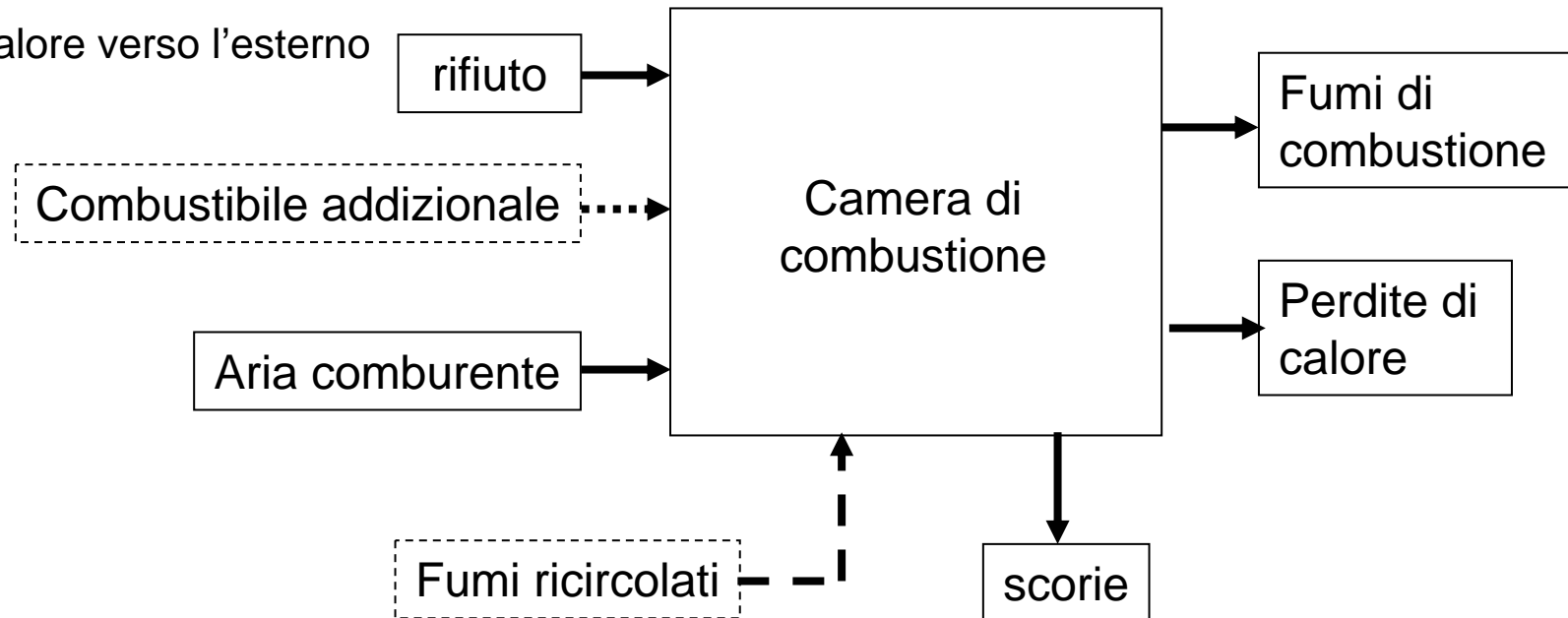
Il **modello di combustione** è basato su un bilancio di massa ed energia intorno alla camera di combustione.

Flussi entranti :

- Aria di combustione (solitamente a temperatura ambiente)
- Rifiuti in ingresso
- Eventuale combustibile addizionale
- Eventuali fumi di ricircolo provenienti dall'uscita della caldaia

Flussi uscenti:

- Fumi di combustione ad una determinata temperatura
- Scorie
- Perdite di calore verso l'esterno



Bilancio energetico di un Processo WTE

La stima della temperatura dei fumi in camera di combustione può essere effettuata sulla base del bilancio entalpico di camera di combustione, riferito ad una massa unitaria di rifiuto alimentato al reattore di combustione.

La valutazione del bilancio termodinamico in camera di combustione permette di valutare il quantitativo di calore che è necessario sottrarre per il mantenimento delle temperature più idonee, al variare del potere calorifico.

Equazioni di bilancio di massa e di energia attorno al forno

Bilancio di massa:

$$Q_r + Q_a + Q_{\text{comb}} + Q_{\text{ric}} = Q_f + Q_s$$

Dove Q_r , Q_a , Q_{comb} , Q_{ric} , Q_f , Q_s sono le portate (kg/h) di rifiuto, aria, combustibile addizionale, fumi di ricircolo, fumi, scorie

Bilancio di energia: indica il carico entalpico in ingresso al forno associato alle portate di rifiuto e all'aria di combustione sommato al calore generato dalla combustione, determina il carico entalpico dei flussi in uscita associato alle portate di fumi e di scorie.

Le perdite sono costituite dalle perdite per incombusti nelle scorie (non tutto il carbonio presente nel rifiuto si ossida in CO_2) e dalle perdite di calore delle pareti esterne del forno (stimabile intorno al 3% del calore generato dai rifiuti)

Bilancio energetico di un Processo WTE

L'equazione del bilancio entalpico può essere espresso come segue:

$$H_{in} = H_{out}$$

essendo:

$$H_{in} = PCI + m_a \cdot [c_p^a]_{T_0}^{T_a} \cdot (T_a - T_0) + m_R \cdot [c_p^R]_{T_0}^{T_R} \cdot (T_R - T_0) + m_c \cdot [c_p^C]_{T_0}^{T_c} \cdot (T_c - T_0)$$

$$H_{out} = m_f \cdot [c_p^f]_{T_0}^{T_f} \cdot (T_f - T_0) + m_S \cdot c_s \cdot (T_S - T_0) + Q_P + Q_{WG} + Q_B$$

Da cui è possibile ricavare l'espressione della temperatura dei fumi:

$$T_f = T_0 + \frac{PCI + m_a \cdot [c_p^a]_{T_0}^{T_a} \cdot (T_a - T_0) + m_R \cdot [c_p^R]_{T_0}^{T_R} \cdot (T_R - T_0) - (Q_s + Q_P + Q_{WG} + Q_B)}{m_f \cdot [c_p^f]_{T_0}^{T_f}}$$

Bilancio energetico di un Processo WTE

Le due equazioni di bilancio di massa e di energia permettono di calcolare la portata di aria tale da ottenere una temperatura prefissata dei fumi o, in alternativa, di calcolare la temperatura dei fumi fissato un certo eccesso d'aria.

L'aria comburente è suddivisa in aria primaria e aria secondaria, la prima equivale grossomodo al volume di aria stechiometrica (solitamente si usa apporti leggermente sovra stechiometrici) richiesto dall'ossidazione del rifiuto, la seconda favorisce il completamento del processo di ossidazione creando condizioni di turbolenza in camera di combustione.

L'aria primaria viene estratta dalla fossa in modo da produrre una pressione negativa ed evitare quindi le fuoriuscite maleodoranti dei rifiuti, viene inviata al forno da sotto la griglia e fornisce la maggior parte dell'ossigeno necessario alla combustione. L'aria primaria ha anche il ruolo di raffreddare gli organi della griglia (nel caso di combustione a griglia mobile)

L'aria secondaria viene inviata al forno per mezzo di ugelli situati nella volta del forno ed all'entrata della caldaia; l'aria secondaria, oltre a fornire l'ossigeno necessario per una combustione efficace dei gas prodotti, ha il compito di mantenere controllata la temperatura dei fumi.

Bilancio energetico di un Processo WTE

Normalmente vengono adottati eccessi d'aria molto elevati in maniera tale da favorire la completa combustione dei rifiuti; l'aria in eccesso non partecipa alla combustione e passa di conseguenza inalterata fra i prodotti.

La normativa italiana prescrive che l'eccesso di aria sia tale da mantenere nei fumi una percentuale di ossigeno superiore al 6% in volume; imponendo una percentuale di ossigeno nei fumi è stato possibile ottenere il valore dell'eccesso di d'aria.

Un parametro di notevole importanza per il calcolo delle condizioni di regolazione necessarie all'interno della camera di combustione e a valle di essa è la temperatura massima di fiamma, che in alcuni casi può essere calcolata come temperatura adiabatica di fiamma.

Tale parametro assume particolare importanza sia per le limitazioni inferiori imposte dalla normativa (fumi a $T > 850^{\circ}\text{C}$ per un tempo superiore ai 2 secondi a valle della camera di combustione, DPCM 503/97) che superiori, rese necessarie dalla salvaguardia dei materiali e per limitare la formazione di incrostazioni che solidificandosi sulle parti fredde dell'impianto danno luogo a formazioni di difficile rimozione.

Bilancio energetico di un Processo WTE

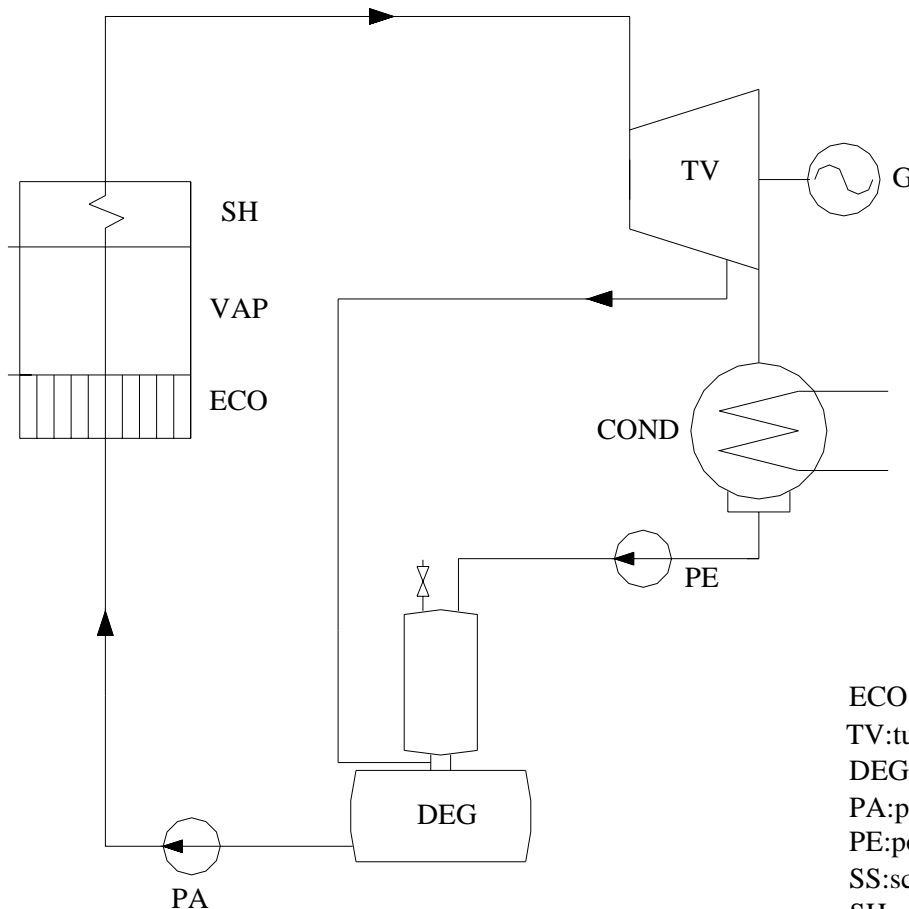
Il processo di **recupero di energia** è basato su di un convenzionale ciclo di Hirn (in alcuni casi viene applicato un ciclo di Rankine a vapore saturo).

Il ciclo di recupero energetico è costituito da un impianto a vapore con parametri caratteristici

rappresentati dalla pressione e dalla temperatura del vapore surriscaldato.

La portata di vapore in uscita dalla caldaia espande in turbina fino alla pressione di ingresso al condensatore.

L'acqua all'interno del condensatore viene inviata tramite la pompa di estrazione al degasatore mentre la pompa di alimento estrae l'acqua dal degasatore e la invia al fascio economizzatore alla pressione di funzionamento della caldaia.



ECO: economizzatore
TV:turbina a vapore
DEG:degasatore
PA:pompa di alimento
PE:pompa di estrazione
SS:scambiatore a superficie
SH:surriscaldatore
VAP:vaporizzatore
G:generatore
COND:condensatore

Bilancio energetico di un Processo WTE

Il bilancio di impianto può essere calcolato con l'espressione del rendimento di primo principio, che per cicli a vapore d'acqua alimentati a rifiuti può essere espresso come:

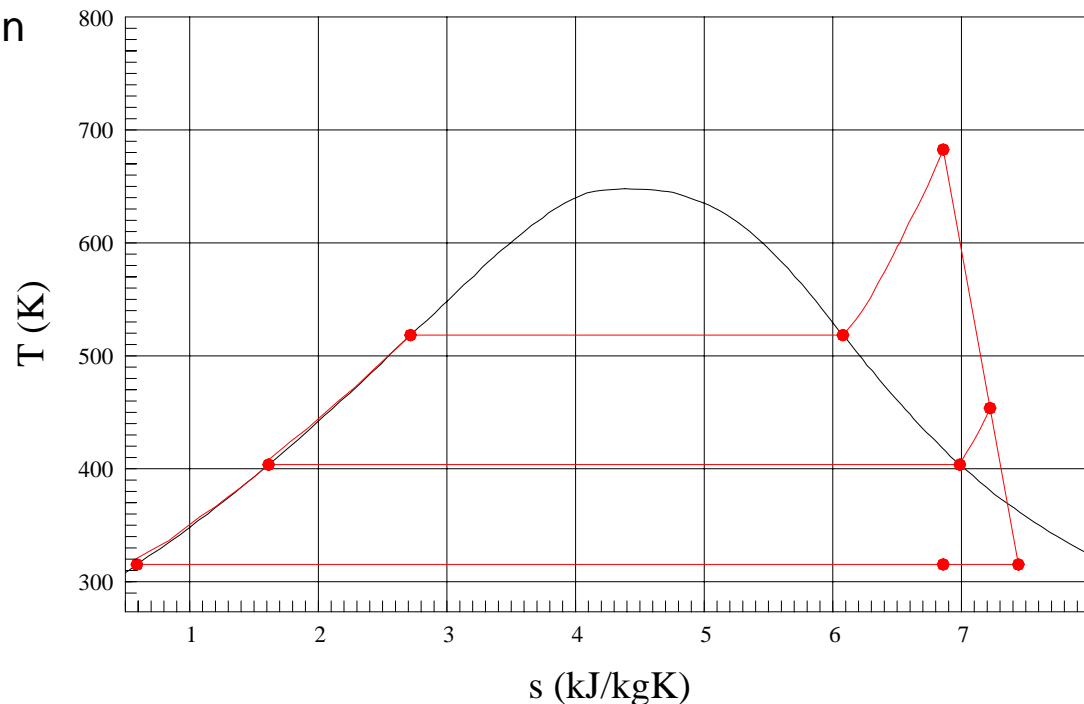
$$\eta = \frac{W_{el}}{Q_{RU} \cdot PCI_{RU}}$$

$$\eta = \frac{W_{el} + W_{th}}{Q_{RU} \cdot PCI_{RU}}$$

Con produzione di energia elettrica + termica

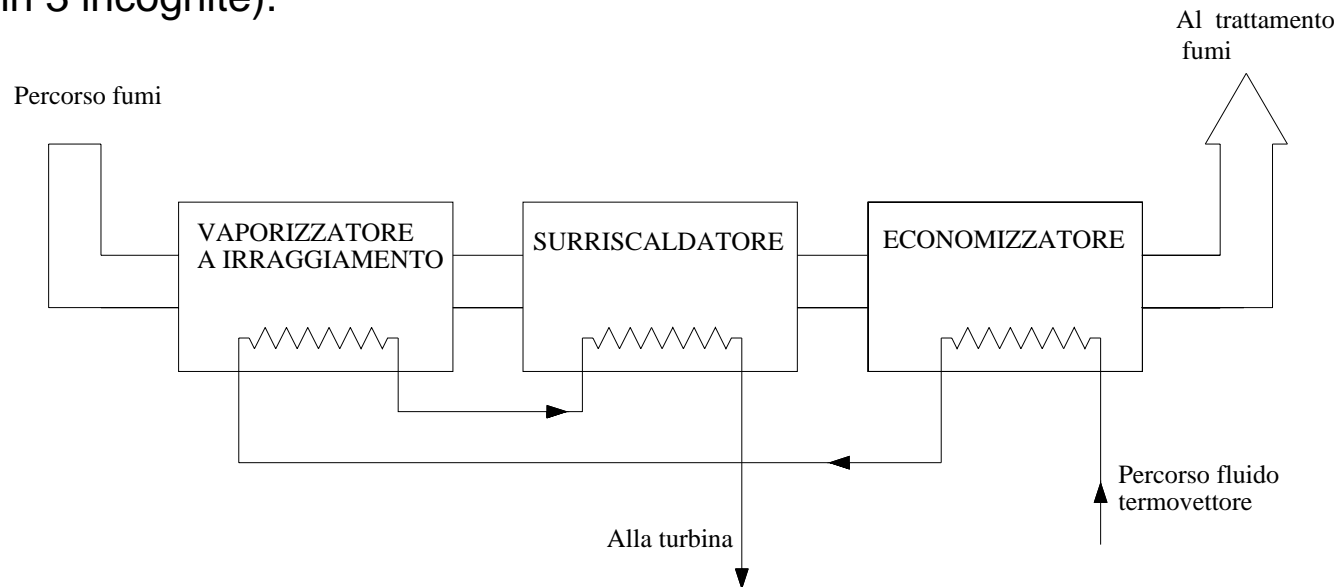
Potenza generata
$$P = \frac{Q_v \cdot \Delta H_s \cdot \eta_t}{860}$$

essendo P l'espressione di potenza in kW, Qv la portata di vapore in kg/h, ΔH_s il salto entalpico isoentropico in espansione di turbina (in kcal/kg) e η_t il rendimento isoentropico della turbina a vapore.



Bilancio energetico di un Processo WTE

La portata di vapore prodotto (Q_v) si ottiene impostando un bilancio nella caldaia a recupero. Supponendo una tipologia di caldaia costituita, nel senso del raffreddamento dei fumi, da vaporizzatore-surriscaldatore-economizzatore e note la temperature in ingresso e in uscita dei fumi è possibile valutare, con un bilancio per ogni corpo, la portata di vapore, la temperatura in ingresso al surriscaldatore e la temperatura in ingresso all'economizzatore (sistema di 3 equazioni in 3 incognite).



Variabilità dei diversi parametri caratteristici del ciclo di recupero termico:

- Pressione SH : 35-60 bar
- Temperatura SH : 300-450 °C
- Pressione condensatore: 0,06-0,2 bar
- Temperatura in uscita dei fumi : 150-250 °C
- Temperatura in ingresso al SH : max 650°C

Bilancio energetico di un Processo WTE

Tenendo presente un salto entalpico isoentropico variabile entro i 228,1 kcal/kg (condensatore ad aria a 0,2 bar e vapore di SH a 38 bar e 380°C) ed i 290,5 kcal/kg (condensatore ad umido a 0,07 bar e vapore di SH a 60 bar e 450°C), è possibile stimare una:

→ produzione specifica di **4,38 – 3,44 kg di vapore per kWh** prodotto, considerando un rendimento isoentropico di TV pari a 0,86.

→ produzione specifica di **4,49 kg di vapore per kWh** prodotto (valore massimo di vapore necessario), considerando un rendimento isoentropico di TV pari a 0,84

→ produzione specifica di **3,29 kg di vapore per kWh** prodotto (valore minimo di vapore necessario), considerando un rendimento isoentropico di TV pari a 0,90

Tali valori possono essere confrontati con quanto ottenuto nel caso di cicli a vapore d'acqua alimentati a combustibile convenzionale, per i quali il salto entalpico isoentropico è dell'ordine dei 300 kcal/kg, per cui si ottiene un fabbisogno di vapore pari a **3 – 3,5 kg per kWh** prodotto.

Bilancio energetico di un Processo WTE

Principali parametri operativi con cui intervenire per aumentare le prestazioni del ciclo a vapore:

→ **pressione al condensatore**: la possibilità di intervenire sulla pressione del condensatore, in particolare adottando condensatori ad acqua (dove possibile) invece di condensazione ad aria, permette un notevole incremento del rendimento del ciclo

→ **temperatura del vapore surriscaldato**: la possibilità di incrementare le temperature del vapore surriscaldato è limitata tecnicamente dalle corrosioni di alta temperatura (note anche nel caso di impianti a vapore d'acqua con combustibili convenzionali).

→ **pressione al generatore di vapore**: possibilità piuttosto limitata se non accoppiata da un incremento contemporaneo della temperatura al SH. Le conseguenze infatti del solo incremento di pressione, al mantenimento come invariante della temperatura massima del vapore, provoca come effetti l'incremento del titolo del vapore alla fine dell'espansione in turbina, oltre livelli non accettabili per il corretto funzionamento del ciclo.

Misure di miglioramento notevoli delle rese energetiche sono rappresentate dalla riduzione delle temperature di uscita dei fumi di combustione dalla caldaia a recupero.

La limitazione del raffreddamento dei fumi in caldaia a recupero è un problema tipico di tutte le applicazioni con combustibili convenzionali, per cui si rende necessario limitare le corrosioni di bassa temperatura determinate dalla condensazione parziale dell'acqua di combustione in presenza di specie gassose acide. Tale condizione è particolarmente gravosa nel caso del recupero di energia da rifiuti, per la notevole presenza non solo di ossidi di zolfo, ma anche di acidi forti (HCl, HF, HBr) in dipendenza della composizione merceologica del rifiuto trattato in combustione.

Bilancio energetico di un Processo WTE

Altre forme di regolazioni generalmente adottate su cicli a vapore d'acqua possono essere:

- **risurriscaldamento** del vapore di fine espansione dalla turbina di alta pressione;
- **rigenerazione** sul fluido di ritorno in caldaia.

Il risurriscaldamento non è applicato nel caso di impianti waste to energy per non avere l'incremento delle problematiche tipiche delle sezioni di scambio con fluido termovettore ad alta temperatura, già presenti sul surriscaldatore.

Tale procedimento, tra l'altro comporta un incremento del costo di turbina, che non trova giustificazioni per le piccole taglie di potenza nominale prodotta in cicli WTE convenzionali (dell'ordine dei 2-20 MW).

La rigenerazione è tipicamente impiegata nei cicli a vapore d'acqua convenzionali, per ridurre le irreversibilità dovute a differenza di temperatura nello scambio di economizzatore, non sono applicate per non incrementare il costo di investimento di processi già ad alto costo specifico e comunque sono applicabili in macchine turbovapore pluristadio.

Si deve considerare che, rispetto a cicli convenzionali, le temperature dei fumi sono sempre mantenute a livelli inferiori, per evitare problemi di aggressione e di incrostazioni.

Bilancio energetico di un Processo WTE

Consumi dell'impianto e rendimento netto

I consumi elettrici possono dividersi in tre voci:

- ciclo termico e turbina;
- combustione (ventilatori dell'aria primaria e secondaria, ventilatore a valle della linea di depurazione fumi, ventilatore di ricircolo gas combusti);
- sistema di trattamento rifiuti (ricevimento e stoccaggio), ceneri, scorie e movimentazioni varie.

Il rendimento elettrico è essenzialmente determinato dalle caratteristiche del ciclo termodinamico. Il rendimento del ciclo dipende sia dalla configurazione (ad esempio presenza di spillamenti rigenerativi, etc.) che dalle caratteristiche termodinamiche del ciclo stesso (temperatura e pressione max, pressione di scarico, etc.).

La parte di energia elettrica che viene ceduta all'esterno può essere determinata tenendo conto degli autoconsumi dell'impianto, in generale compresi tra 100 e 150 kWh per tonnellata di rifiuto trattato.

Bilancio energetico di un Processo WTE

Il massimo rendimento energetico dei rifiuti si ha nei casi in cui può venire sfruttato direttamente il calore, in tal caso il rendimento è determinato dal generatore di vapore e può quindi raggiungere valori superiori al 70%.

Il caso cogenerativo presenta rendimenti complessivi dell'ordine del 40-60% poiché parte del calore viene utilizzato per produrre energia elettrica.

La produzione di sola energia elettrica infine risulta la più svantaggiosa dal punto di vista del rendimento energetico con valori medi compresi tra 15-25%.

L'utilizzo del calore è però in molti casi problematico per cui la soluzione impiantistica che comporta la sola produzione di energia elettrica è in pratica la più attualmente diffusa sul territorio nazionale.

I rendimenti di produzione elettrica della combustione diretta per cicli a condensazione risultano molto bassi a causa di:

- Ciclo a combustione esterna
- Problemi di corrosione che non consentono di utilizzare parametri di recupero termico spinti (condizioni di ammissione in turbina limitate a 40-45 bar, 370-400°C, parametri più elevati sono giustificabili solo in impianti di grossa taglia)
- Temperatura dei fumi in uscita dalla caldaia mantenuta piuttosto alta per evitare fenomeni di condensa acida nella sezione di trattamento
- Impianti piccoli con molte diseconomie di scala

Bilancio energetico di un Processo WTE

I range di prestazioni tecnologiche attuali di rendimento di conversione energetica, nel caso di impianti a combustione diretta sono:

- Rendimento lordo inferiore al 30%
- Rendimento netto inferiore al 25%

Il rendimento di produzione elettrica con la conversione in un combustibile intermedio (syngas) risulta più alto rispetto alla combustione diretta per maggiore efficienza dei motori a combustione interna, dove i combustibili derivati (gassosi) possono essere impiegati.

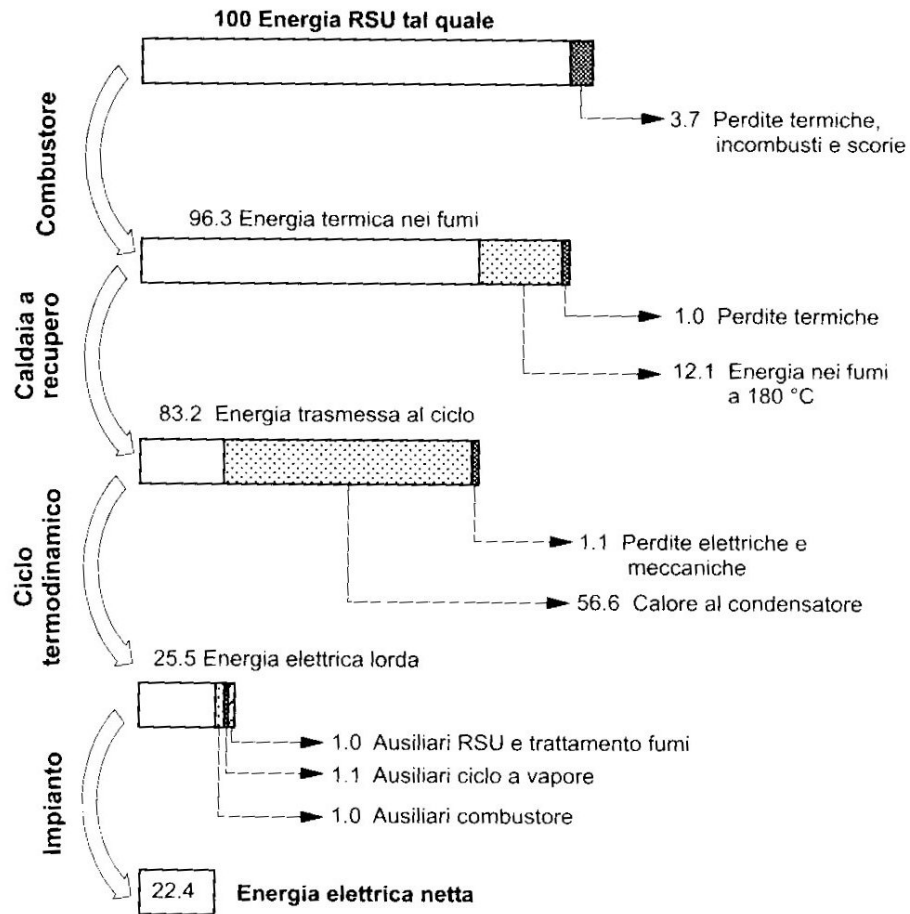
Oneri energetici aggiuntivi dovuti a:

- Necessità di pretrattare i rifiuti
- Perdita del contenuto energetico di una frazione dei rifiuti

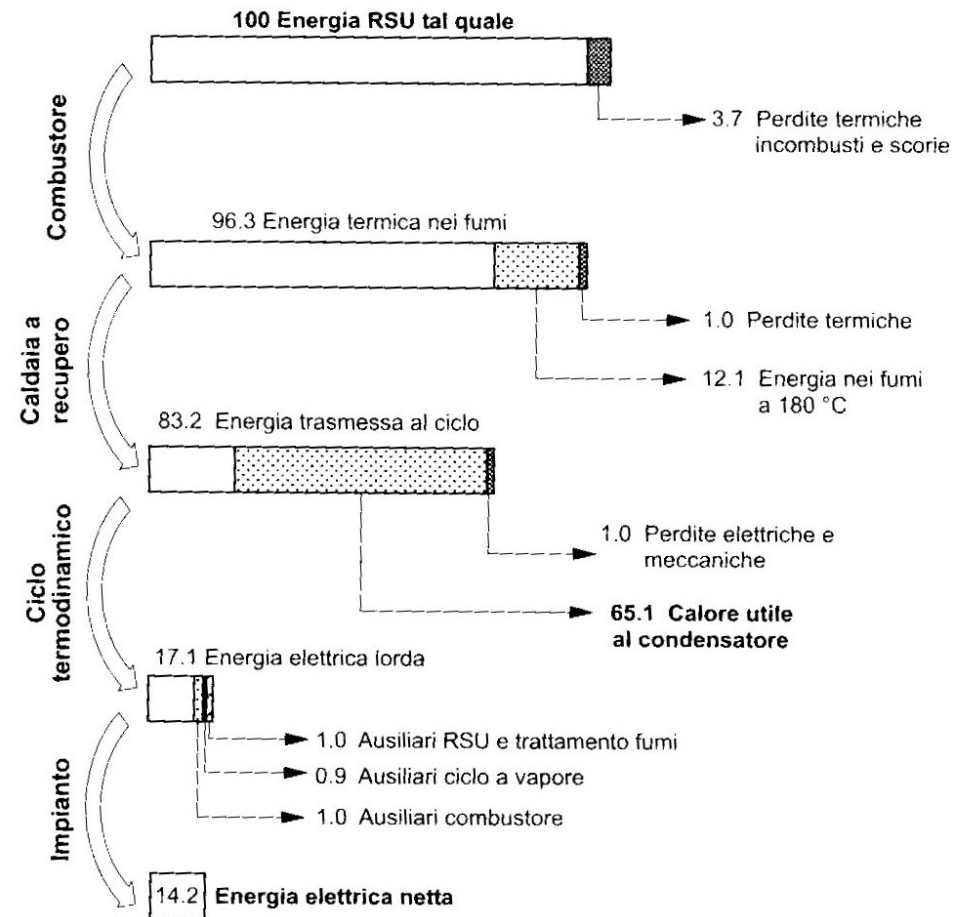
Fattore	Aspetti da prendere in considerazione	Bilancio energetico di un Processo WTE
Caratteristiche dei rifiuti	Quantità e qualità Disponibilità, distribuzione e variazioni stagionali Possibilità di variazioni quali-quantitative dei rifiuti	
Potenzialità di cessione dell'energia	Energia termica Teleriscaldamento Ad usi industriali Ad usi interni (processo/riscaldamento) Presenza di vincoli geografici Durata della domanda e del contratto di fornitura Obblighi contrattuali di fornitura Condizioni operative di fornitura (vapore, acqua calda, ecc.) Analisi delle variazioni stagionali Presenza di eventuali incentivi Partecipazione di clienti Terzi al finanziamento dell'impianto Energia elettrica Disponibilità rete nazionale ed autoconsumi impianto Prezzo di cessione Presenza di incentivi e tasse Caratteristiche richieste per l'energia ceduta	Fattori che influenzano configurazione ed entità del recupero energetico
Condizioni locali	Mezzo di raffreddamento: aria o acqua Condizioni meteorologiche Accettabilità o meno di pennacchio visibile Quantità e caratteristiche acqua in/out	
Cogenerazione	Variazioni stagionali della ripartizione Variazioni della ripartizione a medio-lungo termine	
Altro	Ottimizzazione dei parametri progettuali/operativi (max produzione di energia, minimo costo di investimento, complessità impiantistica, ecc.) Livelli di rumorosità accettabili (condensatori ad aria) Area disponibile Eventuali vincoli architettonici Sistemi di trattamento dei fumi	

Bilancio energetico di un Processo WTE

COMBUSTIONE DIRETTA + CICLO A VAPORE



COMBUSTIONE DIRETTA + COGENERAZIONE



Esempio di flussi di energia per la produzione di elettricità da RSU per uno specifico impianto di combustione diretta con ciclo a condensazione

Bilancio economico

Il bilancio economico relativo agli impianti di incenerimento dei RSU è connesso ad una molteplicità di parametri ed in particolare:

- potenzialità e dimensioni dell'impianto: i costi unitari di investimento e di esercizio tendono ad essere più bassi negli impianti di grande potenzialità per le diseconomie di scala;
- modalità di finanziamento dell'impianto ed interesse sul capitale investito;
- accettazione di eventuali altri rifiuti quali fanghi e rifiuti ospedalieri;
- costo di smaltimento delle scorie e degli altri prodotti residuati dall'incenerimento.

Costi d'investimento

La conoscenza del costo di primo impianto permette di valutare l'entità dei capitali che devono essere disponibili per l'esecuzione dell'opera e di valutare l'incidenza della componente capitale sui costi fissi di esercizio (piano di ammortamento).

Costi di gestione

Tali costi sottostanno alla variazione di molteplici parametri come per esempio i quantitativi di rifiuti, i ricavi per la produzione d'energia, i tassi d'ammortamento, l'entità degli interessi sul capitale, per limitarsi a quelli più importanti.

I costi d'esercizio si suddividono nelle seguenti principali categorie:

- oneri per il personale;
- oneri per l'esercizio e la manutenzione;
- oneri per lo smaltimento dei residui (scorie di combustione, trasporto, deposito in discarica);
- oneri per il capitale (ammortamento e interessi).

Bilancio economico di un Processo WTE

La determinazione del bilancio economico di un impianto di termovalorizzazione di rifiuti permette di stabilire la tariffa dello smaltimento del combustibile.

Per la definizione del bilancio complessivo è necessaria la definizione dei seguenti parametri:

- costo di **investimento** (opere civili ed elettromeccaniche, costi di progettazione, collaudo etc.), *capital cost*;
- costo annuo di **ammortamento**, determinato sulla base del tempo di vita “finanziario” dell’impianto (solitamente pari a 15-20 anni) e sul tasso di interesse (attualmente pari a 6,5%);
- costo annuo di **gestione e manutenzione** (*operating & maintenance*);
- costo annuo per **smaltimento sovralli** solidi e liquidi fortemente dipendente dalla tipologia e dalla disponibilità di siti di smaltimento finale. Nel caso di sovralli solidi può essere indicativo un costo di smaltimento specifico pari a 62 euro/t per bottom ash e 140 euro/t per fly ash;
- costo annuo per **acquisto reagenti e prodotti** fortemente dipendente dalla tipologia dei prodotti e dei reagenti impiegati, specialmente per quanto riguarda la linea di trattamento dei fumi di combustione;
- costo annuo di **acquisto di energia elettrica** al quale si può considerare un prezzo specifico pari a 0,084 euro/kWh, per l’intera energia acquistata;
- ricavo di **vendita di energia elettrica** prodotta, per la quale, considerando la tariffa specifica di vendita per certificati verdi si può stimare un range di prezzo variabile entro i 0,103-0,134 euro/kWh, per l’intera energia prodotta e ceduta in rete.

Per la definizione della tariffa di smaltimento del rifiuto si tiene conto del ricavo complessivo dallo smaltimento che rende nullo il bilancio annuale dell’impianto, al netto dei ricavi per uso del capitale.

Tecnologie di trattamento termico

Forni per la combustione diretta

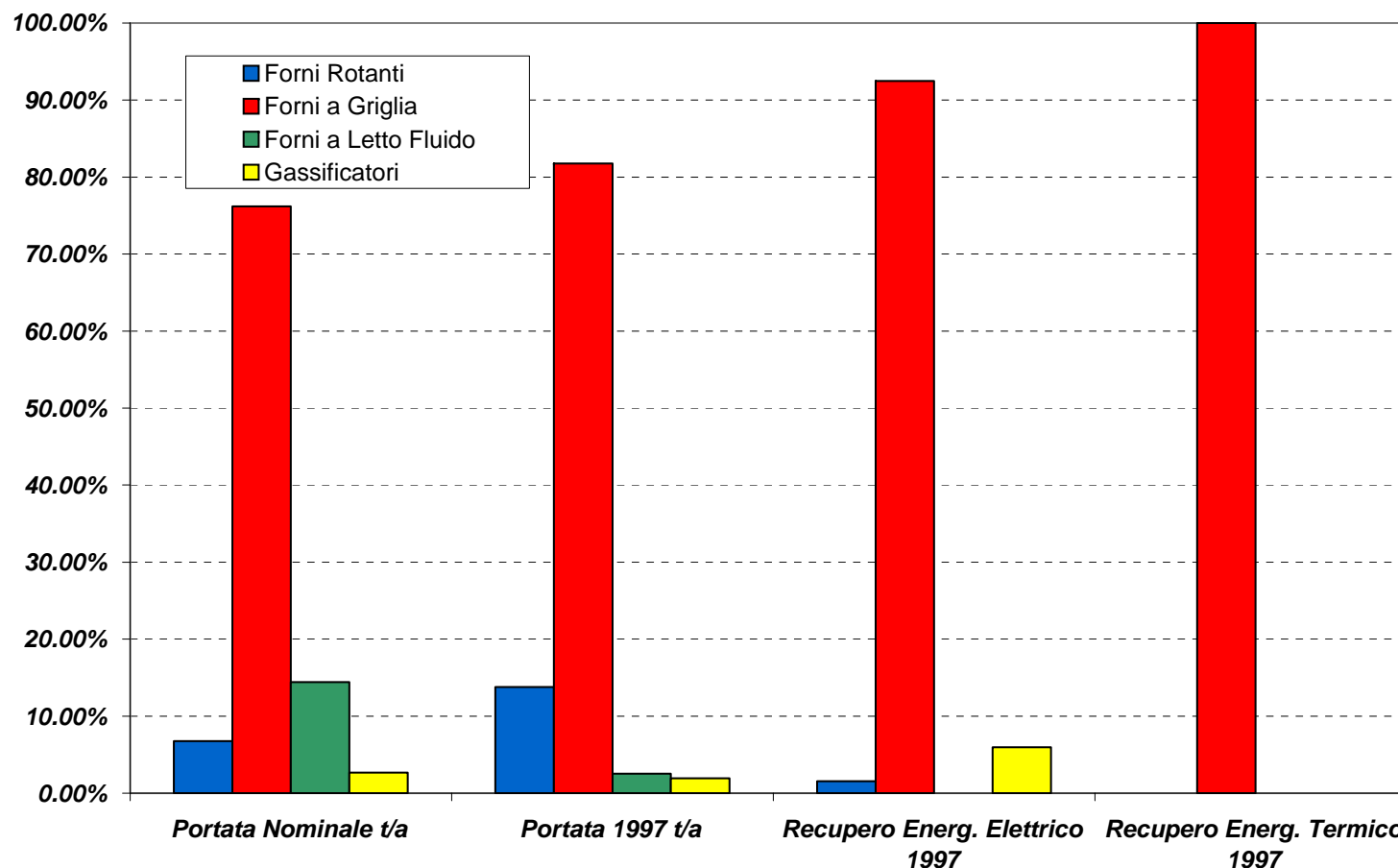
- Griglia fissa
- Griglia mobile
- A letto fluido (bollente o circolante)
- Tamburo rotante

Forni per gassificazione e pirolisi

- letto fisso
- letto fluido
- atmosferica
- pressurizzata

Tipologia di tecnologia del forno in Italia (dati 1997)

Tecnologie di trattamento termico



	Portata Nominale t/a	Portata 1997 t/a	Recupero Energ. Elettrico 1997	Recupero Energ. Termico 1997
Forni Rotanti	304,570	236,940	4,564	0
Forni a Griglia	3,441,795	1,406,124	271,035	152,818
Forni a Letto Fluido	651,920	43,500	0	0
Gassificatori	120,000	33,150	17,472	14
Totale	4518285	1719714	293071	152832

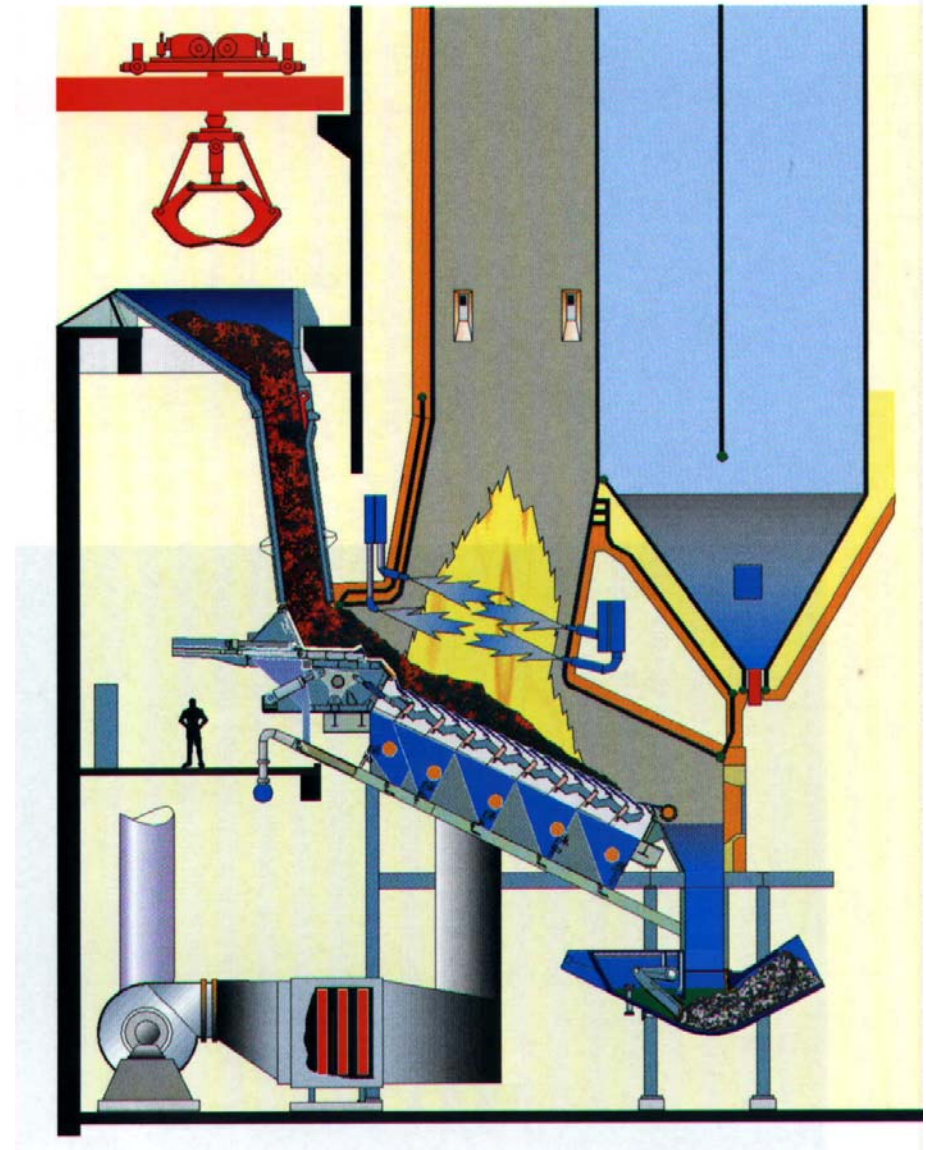
Forni a griglia mobile

E' la tecnologia di forno di gran lunga più consolidata specie per i rifiuti urbani.
La griglia può essere fissa o mobile e costituita da barrotti o rulli raffreddati ad aria o ad acqua.

Griglia mobile:

- ⇒ Alimentazione dalla tramoggia
- ⇒ La combustione avviene su una griglia mobile inclinata
- ⇒ L'Aria Primaria viene dosata al di sotto della griglia, con un lieve eccesso rispetto al valore stechiometrico (10-20%)
- ⇒ L'Aria Secondaria viene dosata al di sopra del griglia (inizio condotto) in modo da raggiungere le condizioni richieste (contenuto di ossigeno da normativa oppure temperatura richiesta a fine combustione)
- ⇒ Le scorie vengono raccolte al fondo della griglia

Tecnologie di trattamento termico



Tecnologie di trattamento termico

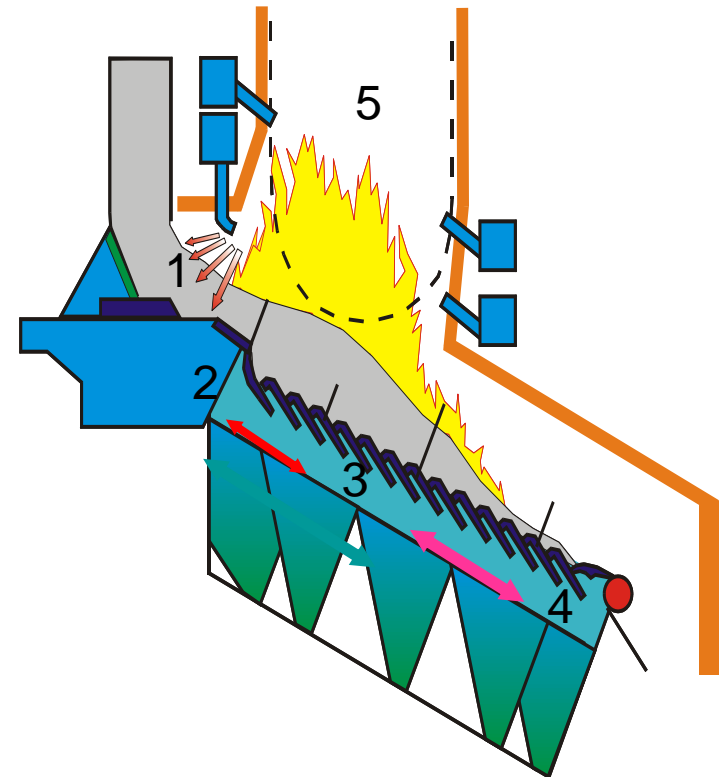
All'interno del forno è possibile distinguere diverse zone a seconda dello stato in cui si trovano le frazioni dei rifiuti:

→ *zona di essiccazione* in cui i rifiuti vengono a perdere per evaporazione la gran parte del contenuto di umidità senza combustione; tale sezione è caratterizzata da temperature ridotte;

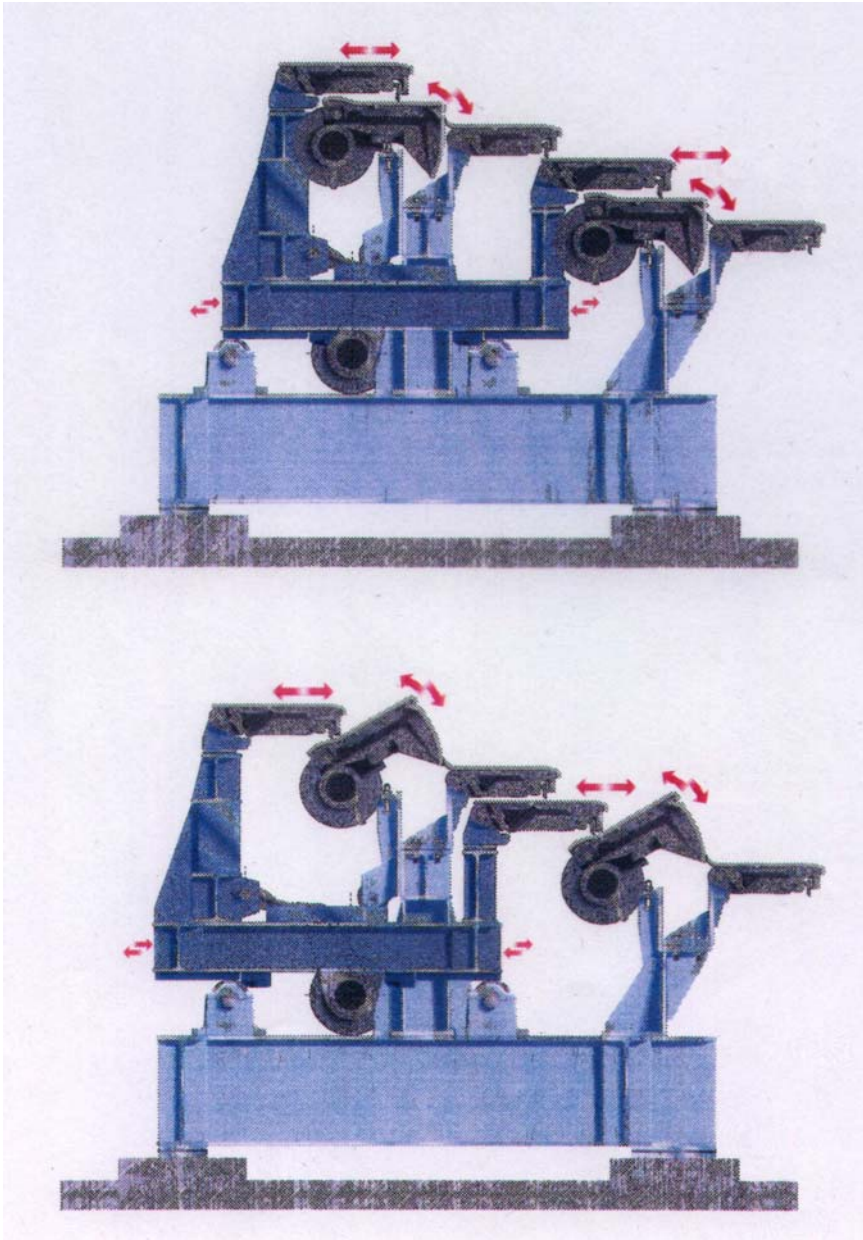
→ *zona di combustione primaria*, in cui si realizzano le reazioni di combustione e formazione di composti volatili che abbandonano il letto. In questa sezione è più visibile l'effetto delle reazioni di combustione con fiamme più alte e maggiori temperature;

→ *zona di fine combustione* dove proseguono le reazioni di combustione delle frazioni a maggiore dimensione e quindi caratterizzate da cinetiche più prolungate. Qui le temperature tendono a ridursi gradualmente;

→ *zona di combustione secondaria* delle frazioni volatili prodotte nella sezione di combustione (letto di combustione); tale sezione è posta sopra alla zona di combustione primaria e grazie alle temperature in gioco (fino a 1100-1200°C) si realizzano processi di ossidazione dei composti gassosi liberati dalla combustione primaria, mediante l'iniezione di ulteriori quantitativi di aria comburente (aria secondaria).



Tecnologie di trattamento termico



Esistono diverse tipologie di griglie mobili per trattamento dei rifiuti:

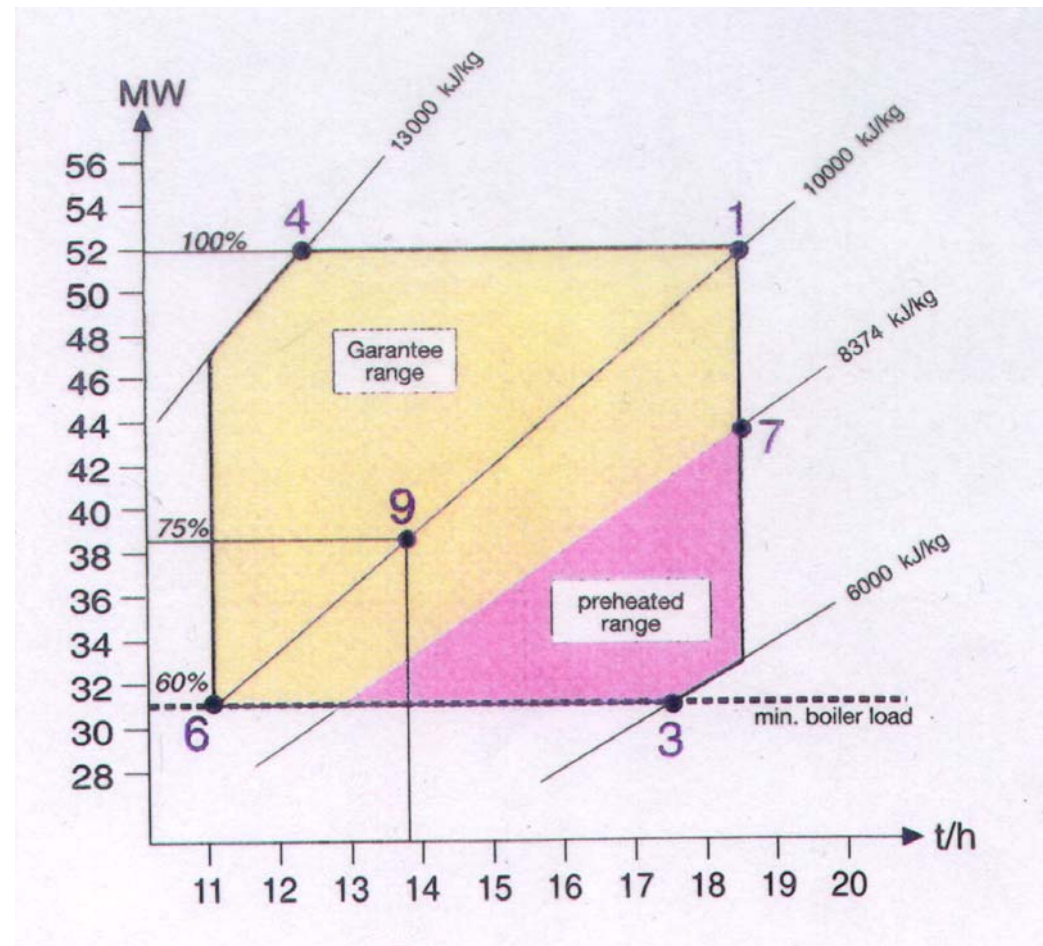
- griglie orizzontali ed oblique;
- griglie raffreddate ad aria o ad acqua;
- griglie a movimentazione inversa;
- griglie a rulli;
- griglie orizzontali multipiani;

Diagramma di griglia del combustore

Tecnologie di trattamento termico

Il campo di funzionamento di un forno può essere rappresentato da un diagramma in cui sono riportate sulle ascisse la portata di rifiuto in t/h e sulle ordinate la potenzialità termica o carico termico in Gcal/h; noto il PCI del rifiuto se ne può determinare il quantitativo da trattare ogni ora nelle normali condizioni operative evitando così di ricorrere all'impiego di combustibili ausiliari o di sovraccaricare il forno.

La delimitazione del campo di funzionamento tiene conto infatti delle portate di aria comburente e delle più idonee temperature di esercizio, per quanto concerne il carico termico, e di una adeguata portata di rifiuto che assicuri la copertura della griglia ma che al contempo non superi valori per i quali non viene assicurata una completa combustione.



Tecnologie di trattamento termico

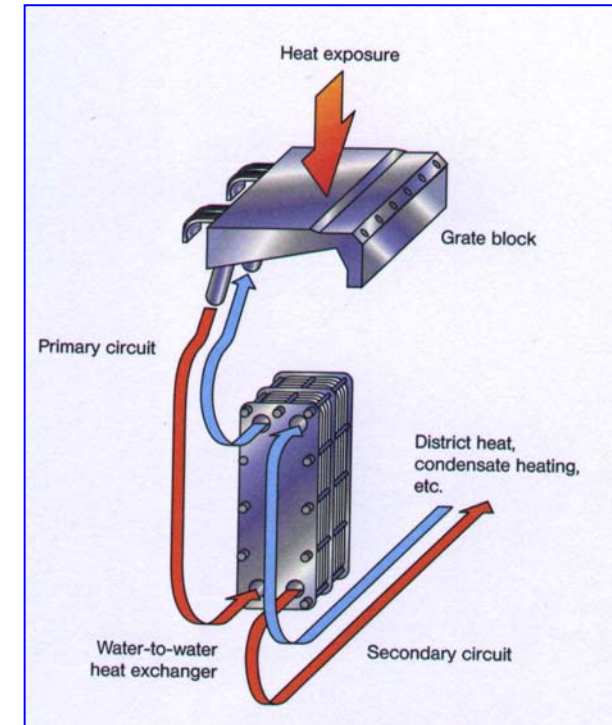
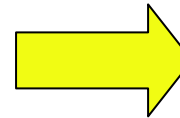
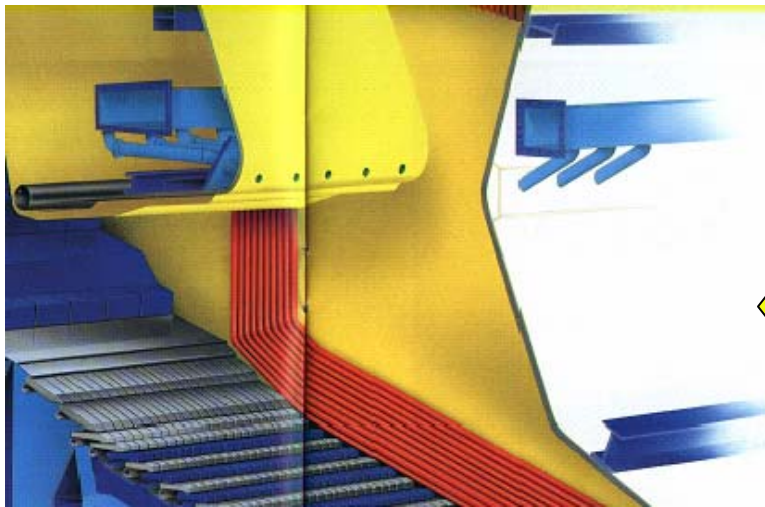
I singoli elementi della griglia possono essere danneggiati a causa delle condizioni operative critiche:

- temperatura
- abrasione da particelle solide
- presenza di adesioni di solidi per fusione e solidificazione di materiali basso fondenti

I gradini mobili sono raffreddati con aria primaria o ad acqua in circuito idraulico chiuso.

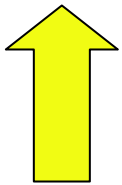
Il calore recuperato può essere utilizzato per:

- Pre-riscaldamento dell'aria primaria di combustione;
- Recupero energetico se il circuito è integrato con il principale recupero



E' possibile inoltre effettuare il raffreddamento della parti ad alta temperatura intorno alla griglia (WATER JACKET)

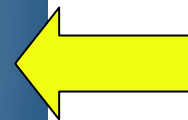
Tecnologie di trattamento termico



Barrotti ad acqua



Barrotti ad aria



Tecnologie di trattamento termico



Manutenzioni sul forno per sostituzione barrotti e rimozione incrostazioni e deposizioni vetrose formatisi

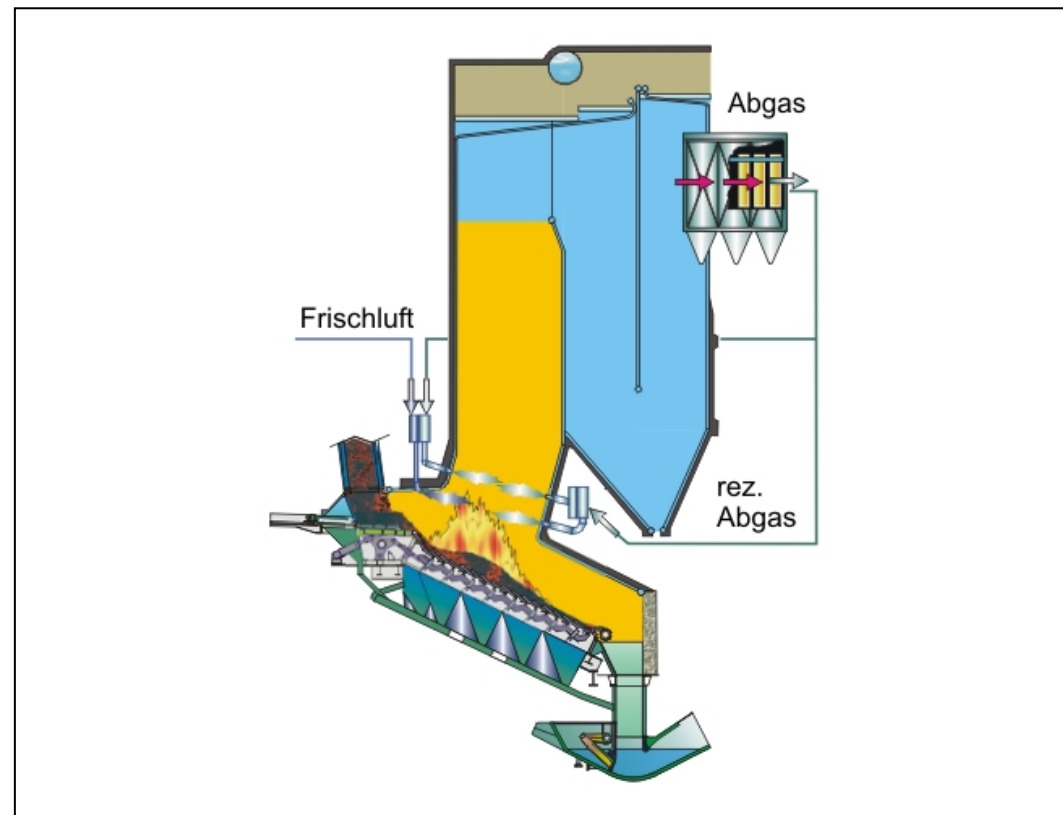
Manutenzioni sui barrotti per perdita di materiale a causa di fusioni, stress termici e abrasioni



Tecnologie di trattamento termico

Applicazione della tecnologia del ricircolo dei fumi combusti per ottenere una serie di obiettivi:

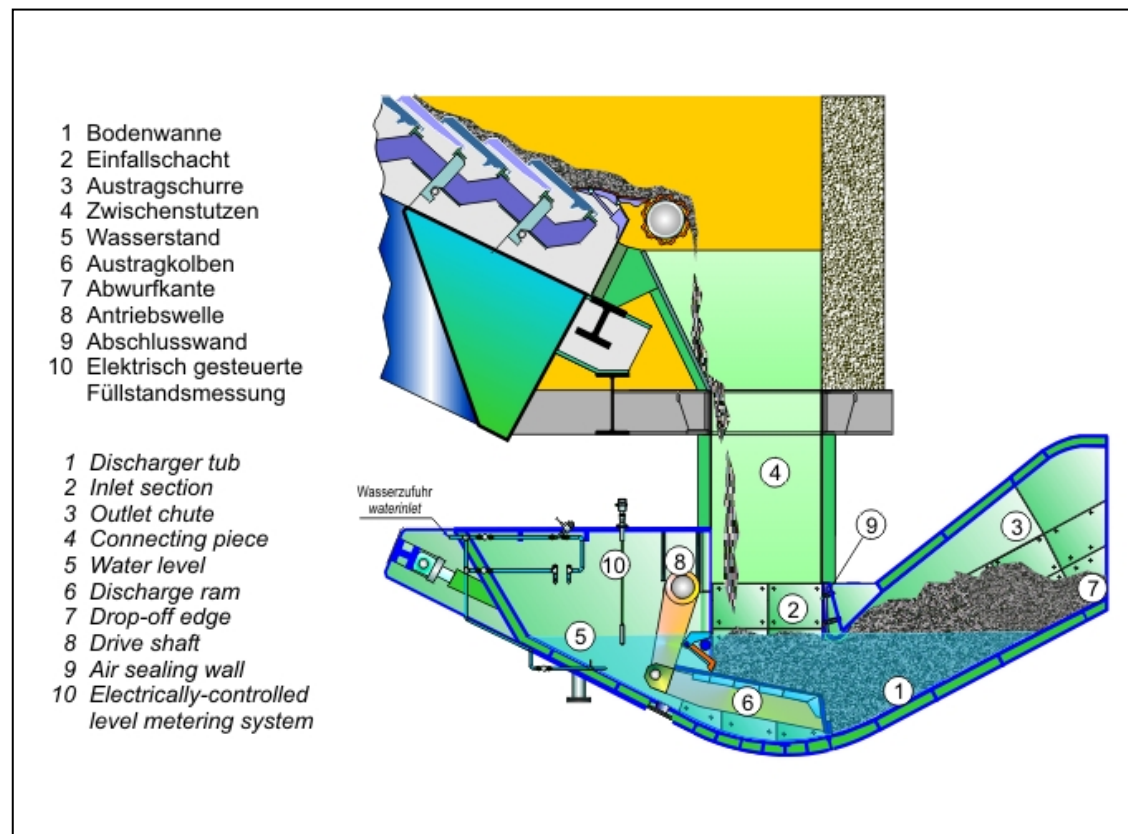
- contenimento della formazione di ossidi di azoto in camera di combustione (alterazione cinetiche di formazione);
- minor apporto di aria comburente fresca;
- riduzione della portata fumi da trattare dai sistemi di abbattimento inquinanti;
- riduzione perdite per calore sensibile al camino;
- minori consumi elettrici ausiliari.



Tecnologie di trattamento termico

→ Il sistema di scarico delle scorie e di raffreddamento delle stesse ha funzione di rendere le temperature delle scorie tali da essere manipolabili.

→ Il sistema di spegnimento delle scorie in acqua con canale di scarico immerso ha funzione di guardia idraulica che permette di mantenere l'intero forno di combustione in leggera depressione per evitare fuoriuscite di fumi inquinati all'interno dell'area di lavoro.



Tecnologie di trattamento termico

Parametri operativi dei forni a griglia

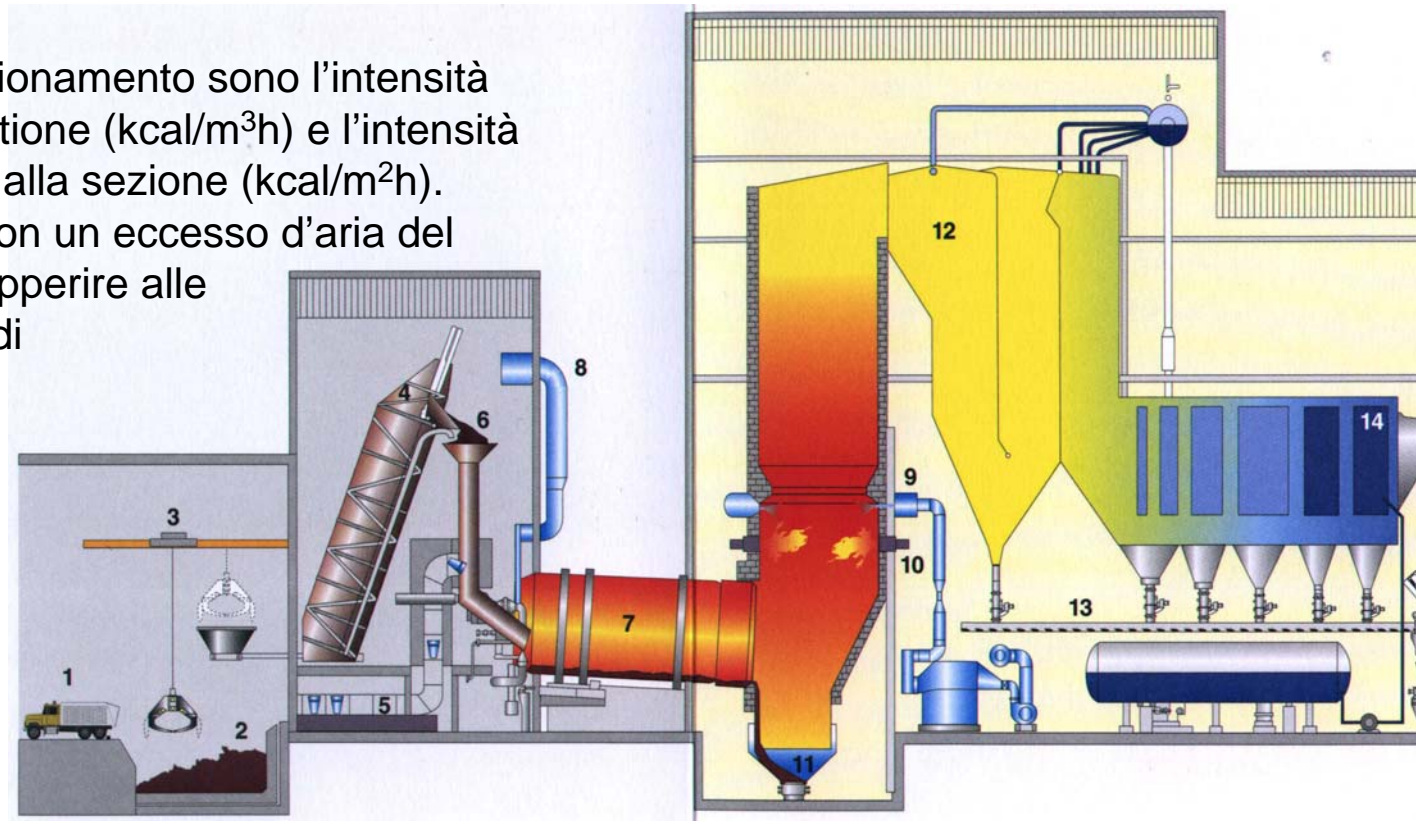
Parametro	u.m.	Dati
Flessibilità (su capacità carico di progetto)	%	60-100
Carico termico specifico volumetrico	kW/m ³	70-300
Carico termico superficiale	kW/m ²	350-1000
Carico di massa specifico sulla griglia	kg/m ² h	200-400
Temperatura operativa	°C	850-1250
Tempo di residenza fumi	s	>2
Eccesso d' aria	%	50-100
Tenore di O ₂	%	6-9
Portata fumi	Nm ³ /(h t _{rif.})	5-8
Temperatura fumi uscita generatore	°C	180-220
Tempo di permanenza dei solidi	min	30-60

Forno a tamburo rotante

Tecnologie di trattamento termico

Costituiti da un tamburo rotante leggermente inclinato in modo da favorire il movimento del materiale. La combustione avviene a contatto con la parete mentre il caricamento avviene in corrispondenza di una estremità. In genere i tempi di residenza nel forno non sono sufficienti per la completa combustione per cui a valle è spesso prevista una camera di post combustione. Possono operare in equi-corrente e in contro-corrente rispetto ai gas. In questi forni le perdite di calore verso l'esterno sono notevoli per cui occorre limitare il diametro del tamburo ad un massimo di 1,5- 2 metri.

I parametri del dimensionamento sono l'intensità volumetrica di combustione ($\text{kcal/m}^3\text{h}$) e l'intensità di combustione riferita alla sezione ($\text{kcal/m}^2\text{h}$). Questi forni operano con un eccesso d'aria del 100-150% al fine di sopperire alle scarse caratteristiche di mescolamento. Sono sistemi semplici ed affidabili dotati di ampia elasticità.



- Può essere usato in particolare se devono essere smaltiti grossi quantitativi di fanghi, di frazioni fini o di frazioni liquide.
- Vasto utilizzo di forni rotanti per il trattamento di rifiuti sanitari pericolosi e non.
- Efficienza di combustione inferiore a forni a griglia (che però non possono usare rifiuti liquidi ed elevate percentuali di fanghi).
- Elevato eccesso d'aria (maggiori perdite energetiche).
- Il cilindro che costituisce la camera di combustione può raggiungere una lunghezza che varia tra i 10 e i 15 metri e un diametro di 3-5 metri.
- La parte cilindrica può essere dotata di pareti a tubi d'acqua, oppure, più frequentemente, rivestite in materiale refrattario. In questo caso la temperatura del mantello all'esterno raggiunge i 300°C con notevoli dispersioni di calore che è opportuno limitare adottando diametri minimi non inferiori a 1,5-2 metri.
- La temperatura di esercizio del tamburo rotante varia tra gli 850 e i 1400°C a seconda della pericolosità del rifiuto e del suo potere calorifico.
- La sezione di fondo del forno permette di estrarre le bottom ash per il raffreddamento ad acqua (in questo caso localizzato in un canale sotterraneo)
In una sezione del forno è collocato il bruciatore
- L'uso del bruciatore è necessario nelle fasi di avviamento e fermata e nei casi di temperature troppo basse della camera di combustione.

Tecnologie di trattamento termico

Parametri operativi dei forni a tamburo rotante

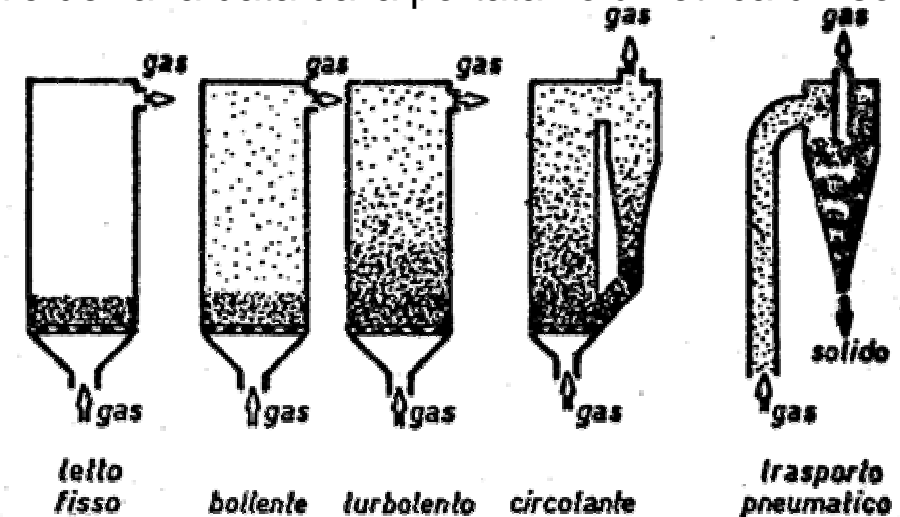
Parametro	u.m.	Dati
Flessibilità (su capacità carico di progetto)	%	60-100
Carico termico specifico volumetrico	kW/m ³	100-200
Carico termico superficiale	kW/m ²	1000-1500 (sez.)
Carico di massa specifico	kg/m ² h	200-400
Temperatura operativa	°C	850-1400
Tempo di residenza fumi	s	>2
Eccesso d' aria	%	80-150
Tenore di O ₂	%	8-14
Portata fumi	Nm ³ /h/t rif.	7-10
Temperatura fumi uscita generatore	°C	250-300
Diametro	m	1,5-5,0
Rapporto lunghezza/diametro del tamburo	-	1-3
Tempo di permanenza solidi	min	>60
Inclinazione del tamburo	%	1-3
Velocità di rotazione del tamburo	giri/min	0,2-1,2

Forni a letto fluido

Tecnologie di trattamento termico

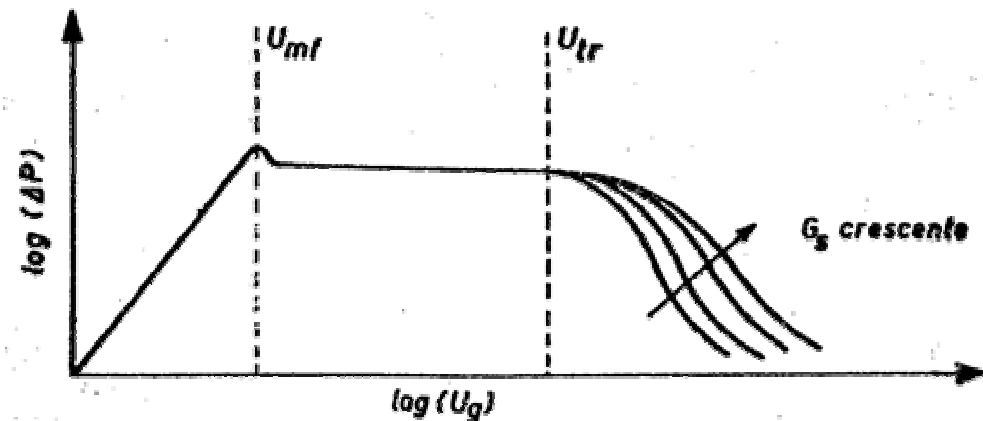
E' costituito da un cilindro verticale in cui il rifiuto viene tenuto in sospensione da una corrente di aria inviata attraverso una griglia posta alla base del cilindro stesso. In molti casi il cilindro contiene un inerte (sabbia) che si mescola al materiale in modo da favorire i processi di scambio termico. Un parametro caratteristico è la velocità superficiale dell'aria data dalla portata volumetrica diviso la sezione del letto.

Il sistema si basa sull'utilizzo dell'aria primaria per realizzare un regime aerodinamico di sospensione del letto. La combustione ha luogo nel letto (usando aria primaria) o nella camera di combustione (usando aria secondaria)



Velocità diverse dell'aria primaria generano l'instaurarsi di diversi condizioni di processo:

- ⇒ letto fisso
- ⇒ letto bollente
- ⇒ letto turbolento
- ⇒ letto circolante
- ⇒ letto trasportato pneumaticamente



Tecnologie di trattamento termico

Nei letti fluidi convenzionali la velocità di fluidificazione è dell'ordine dei 1-3 m/s, nei letti fluidi ricircolati invece si possono raggiungere velocità di 8-10 m/s è quindi necessario un sistema di separazione del particolato solido (ciclone) , che viene riavviato nel letto principale, prima dell'espulsione dei gas.

Vantaggi e svantaggi del forno a letto fluido

Vantaggi:

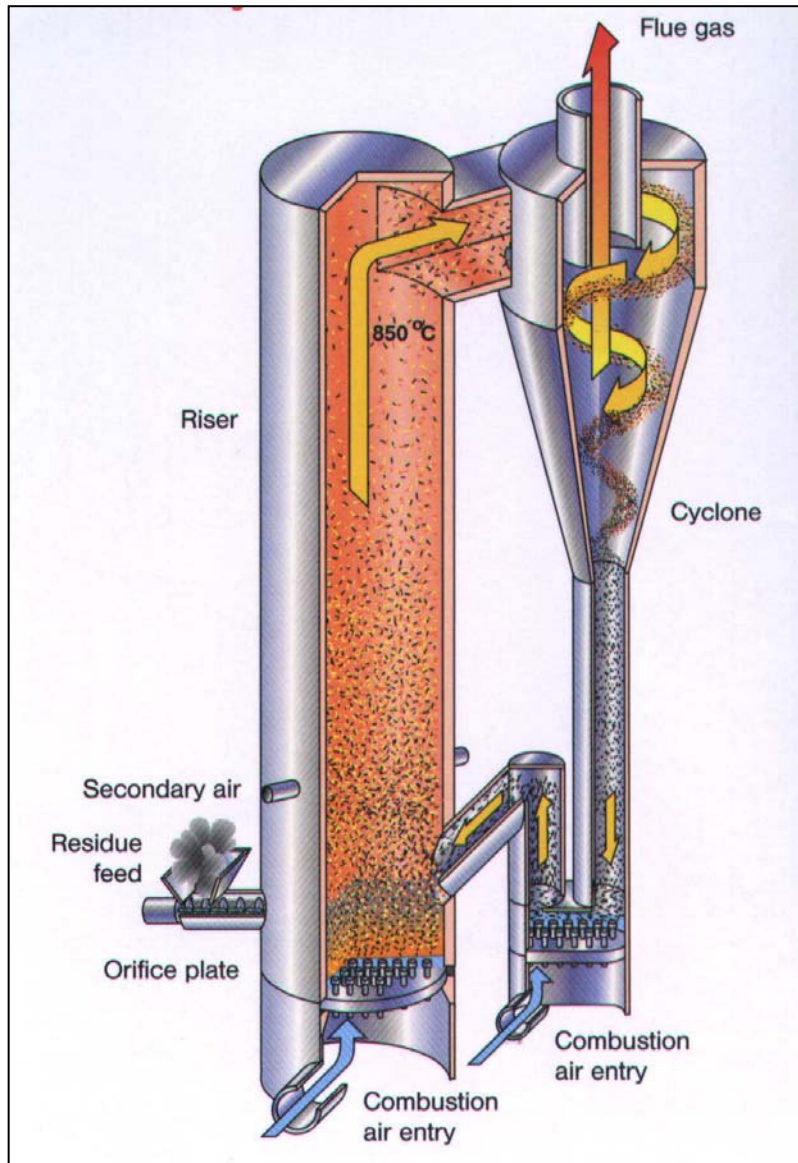
- miglior controllo degli inquinanti in fase di combustione sia tramite iniezione di additivi (HCl, SO₂) che tramite un'opportuna conduzione della combustione
- unità più compatte in ragione dei maggiori carichi specifici ammissibili
- buona flessibilità rispetto al carico ottenuta tramite controllo dell'aria di combustione
- possibilità al lavoro discontinuo dati i bassi tempi di accensione e spegnimento
- ridotto numero di parti meccaniche in movimento
- possibilità di operare con bassi eccessi d'aria con conseguente minore volume dei fumi
- elevata efficienza di combustione dovuta ad elevata turbolenza e elevati tempi di residenza
- basso contenuto organico delle scorie

Svantaggi:

- pericolo di defluidificazione dovuto alla presenza di ceneri basso fondenti che portano a fenomeni di agglomerazione
- esperienza non molto ampia

Letto fluido circolante

Tecnologie di trattamento termico



⇒ Aria primaria fluidizza il letto (CDR e inerti)

⇒ Applicazione per combustibili con caratteristiche termodinamiche e di densità omogenee (CDR o frazioni specifiche come biomasse)

⇒ alta velocità di fluidizzazione: le frazioni solide vengono trasportate lungo il primo condotto verticale

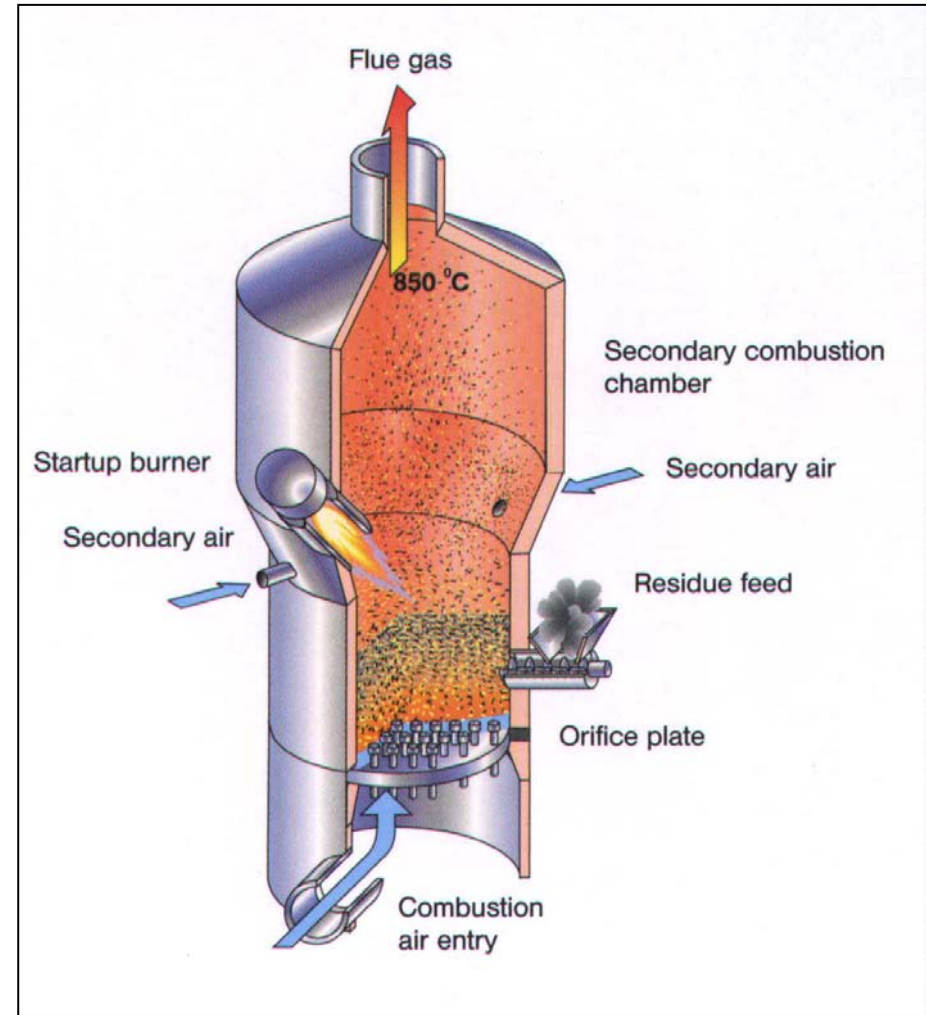
⇒ recupero delle frazioni solide in una sezione di recupero (ciclone) per la ricircolazione

⇒ Alta efficienza di combustione, riduzione delle bottom ashes

⇒ Elevato trasporto di fly ashes

Letto fluido bollente

- ⇒ aria Primaria per fluidizzare il letto (CDR e inerti)
- ⇒ applicazioni a combustibili con caratteristiche meno omogenee rispetto al letto circolante (possibilità di miscelamento di diversi combustibili)
- ⇒ bassa velocità di fluidizzazione: solo le particelle più fini vengono trasportate dai gas
- ⇒ alta efficienza di combustione, riduzione bottom ashes
- ⇒ basso trasporto di fly ashes
- ⇒ processi in pressione atmosferica e >atmosferica (Brayton cycle integrated gasification)



Tecnologie di trattamento termico

Parametri operativi dei forni a letto fluido

Parametro	u.m.	Dati
Flessibilità (su capacità carico di progetto)	%	60-100
Carico termico specifico volumetrico	kW/m ³	150-300
Carico termico superficiale	kW/m ²	1200-1800
Carico di massa specifico sul letto	kg/m ² h	200-400
Temperatura operativa	°C	850-950
Tempo di residenza fumi	s	>2
Eccesso d' aria	%	40-70
Tenore di O ₂	%	5-8
Portata fumi	Nm ³ /h/t rif.	4-7
Temperatura fumi uscita generatore	°C	180-220

	Forno a griglia	Letto fluido
Ceneri volanti	10-20 %	90-80 %
Scorie	90-80 %	10-20 %

Tecnologie di trattamento termico

Confronto fra i parametri operativi delle diverse tipologie di forno

Parametro	u.m.	Dati		
		GM	TR	LF
Apparecchiatura di combustione				
Rifiuti trattabili (primari) (secondari)		RU, CDR Fanghi, sanitari	RS,RSS,RP,RI RU,fan,CDR	CDR,RS FAN,RI
Flessibilità (su capacità carico di prog.)	%	60-100	60-100	60-100
Carico termico specifico volumetrico	kW/m ³	70-300	100-200	150-300
Carico termico superficiale	kW/m ²	350-1000	1000-1500	1200-1800
Carico di massa specifico	Kg/m ² h	200-400	200-400	200-400
Temperatura operativa	°C	850-1250	850-1400	850-950
Tempo di residenza fumi	s	>2	>2	>2
Eccesso d' aria	%	50-100	80-150	40-70
Tenore di O ₂	%	6-9	8-14	5-8
Portata fumi	Nm ³ /h/t rif.	5-8	7-10	4-7
Temperatura fumi uscita generatore	°C	180-220	250-300	180-220
Camera di post combustione separata		No	Si	No
Ricircolo fumi	%	0-20	n.a.	0-20
Tenore di incombusti nelle scorie	% s.s.	1-3	1-3	0,5-1,5
Rendimento termico combustore/caldaia	%	75-85	65-75	75-85
Capacità termica max per linea	MW	120	30	90

Tecnologie di trattamento termico

Confronto fra i parametri operativi delle diverse tipologie di forno

Ciclo termico	u.m.	Griglia (RU/CDR)	Tamburo rot (RS/RP)	Letto fluido (CDR/RS)
Tipo generatore di vapore		Integrata, passi radianti+passo convettivo orizz./vert.	Integrata, passi radianti+passo convettivo orizz.	Integrata, passi radianti+passo convettivo vert.
Capacità termica	MW	15-300	40-80	12-240
Pressione operativa	bar	40-80	10-40	35-60
Temperatura operativa	°C	360-500	200-385	320-450
Produzione specifica vapore	t/t.rif	3,5-4	4-5	4-5
Rendimento termico generatore di vapore	%	80-90	70-80	80-90
Rendimento elettrico lordo ¹ .	%	18-32	14-20	20-28
Rendimento elettrico netto ¹ .	%	14-27	10-16	16-24
Autoconsumi elettrici sulla potenza prodotta ² .	%	12-20	20-28	14-18 ³

1. Impianti di nuova generazione in funzione della taglia.

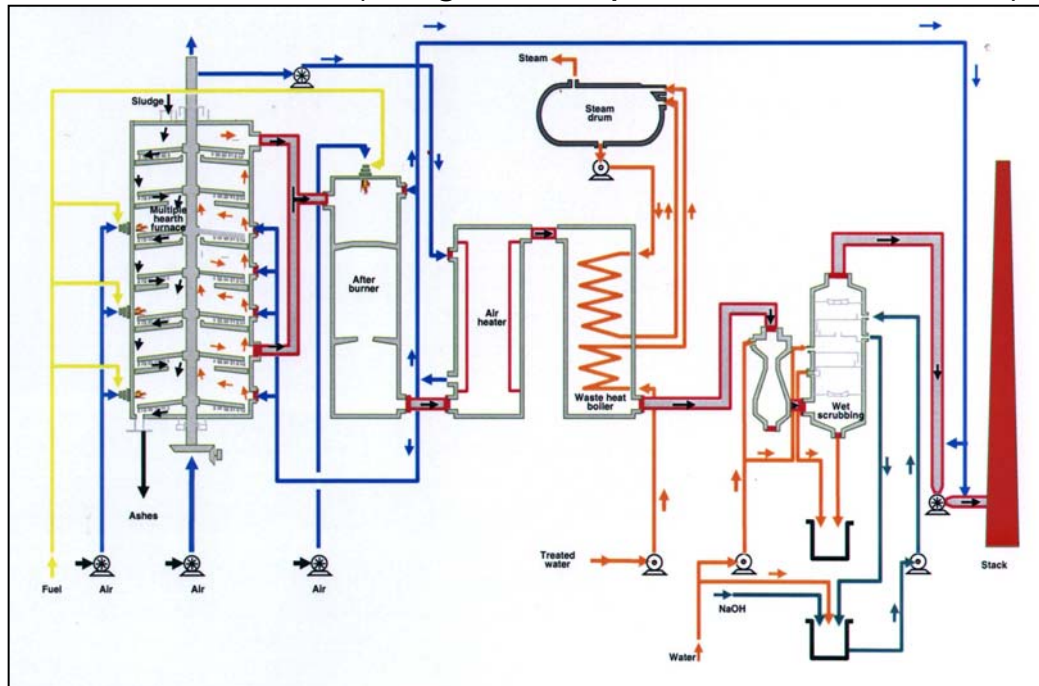
2. In funzione della configurazione e della taglia dell' impianto.

3. Esclusi i pretrattamenti dei rifiuti.

Forno a piatti (Nichols - Herrshoff)

Tecnologie di trattamento termico

- ⇒ applicazione per combustione completa o per pirolisi (frazione organica)
- ⇒ applicazione processi industriali
- ⇒ diversi livelli di combustione (piatti)
- ⇒ trattamento di fanghi anche con elevato contenuto di acqua (wastewater sludge)
- ⇒ possibilità di trattare nello stesso tempo gas esausti da processi di combustione
- ⇒ nel caso della pirolisi il combustibile può essere alimentato solo su alcune sezioni (integrazione pirolisi - combustione)



Tecnologie - caldaie

Le configurazioni impiantistiche che possono essere realizzate sono molteplici in relazione alle caratteristiche del recupero che si vuole realizzare:

- Solo recupero del calore con produzione di vapore
- Produzione di vapore per invio in ciclo termico ai fini di produrre energia elettrica (ciclo a condensazione)
- Produzione di vapore per produzione di energia elettrica e spillamento intermedio in turbina per utilizzo di vapore (ciclo a condensazione e spillamento)
- Produzione di vapore per energia elettrica e recupero del calore scaricato dalla turbina (ciclo a contropressione)

Il generatore di vapore, nel caso in cui il vapore prodotto sia da inviare ad un ciclo termico per la produzione di energia elettrica, presenta specifici problemi costruttivi dato che le pressioni e le temperature del surriscaldato sono elevate.

Questo porta alcune parti del generatore e in particolare il surriscaldatore ad operare in condizioni abbastanza critiche specie nei riguardi dei fenomeni di corrosione. Al fine di limitare tali problematiche i surriscaldatori sono posizionati in zone a temperatura compresa tra 500°C e 650°C e in qualche caso protetti da rivestimenti e costruiti in materiali in grado di offrire elevate prestazioni.

Normalmente si adottano pressioni di esercizio intorno alle 30-45 bar anche se ultimamente sono state utilizzate pressioni superiori (l'impianto di Milano lavora ad esempio ad una pressione di 52 bar e quello di Brescia ad una pressione di 60 bar) con particolari accorgimenti atti ad evitare un danneggiamento in tempi brevi del surriscaldatore.

Tecnologie di trattamento termico

La caldaia è costituita da uno o più canali verticali vuoti seguiti da un canale a convezione contenente banchi evaporatori, il surriscaldatore e l'economizzatore.

Nella configurazione a caldaia integrata (Integrated Boiler) i tubi vaporizzatori hanno parte della superficie evaporativa direttamente posta nella camera di combustione, separata dal flusso dei fumi tramite un rivestimento refrattario. In questo caso è possibile operare con ridotti eccessi d'aria e quindi con portate di fumi contenute ottenendo elevati rendimenti rispetto alla configurazione a caldaia adiabatica.

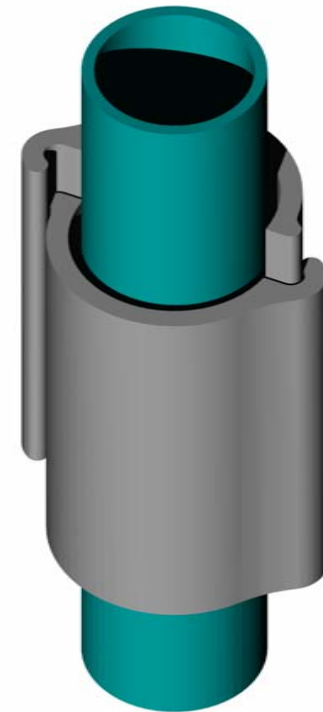
Lo schema costruttivo di un termovalorizzatore allo stato attuale rende la sezione di recupero di energia come una configurazione non più separata dal forno, che bensì ne diventa parte integrante finalizzata alla sua regolazione e alla sua conduzione.

Con il sistema a caldaia integrata la temperatura in ingresso risulta più elevata e si mantiene normalmente compresa nell'intervallo 950-1200 °C (contro ai 900-950°C della caldaia adiabatica). Le temperature dei fumi in uscita sono normalmente poste nell'intervallo 250°-160°C, 170°C nei moderni impianti.

Tecnologie di trattamento termico

I tubi vaporizzatori costituenti le pareti della camera di combustione, nel caso di caldaia integrata, sono protetti da un rivestimento refrattario ad elevata resistenza termomeccanica e chimica. In funzione della pressione del vapore e della composizione dei fumi nella zona a tubi nudi viene previsto spesso un cladding protettivo in materiale alto legato (es. Inconel). In relazione al tenore di inquinanti ed alla temperatura del vapore e dei fumi per i principali banchi convettivi possono essere utilizzati tubi compositi costituiti da uno strato interno in acciaio al carbonio ed uno strato esterno in superlega resistente alla corrosione.

Scudi in CN550 CD per la protezione alla corrosione e all'erosione dei tubi nudi



Tecnologie di trattamento termico

La caldaia a convezione può essere, in analogia con altre tipologie di cicli a vapore d'acqua del tipo **verticale** od **orizzontale**.

La scelta della tipologia di caldaia è dovuta sostanzialmente alla disponibilità di spazio e alla convenienza costruttiva: caldaie verticali rendono minimi gli ingombri di suolo a discapito delle maggiori complicazioni strutturali, di fondazioni, di accessibilità e di montaggio.

La configurazione *integrata ed orizzontale* risulta essere la condizione più utilizzata per i seguenti aspetti:

- Temperature in ingresso al generatore elevate (circa 1200°C) che permettono di operare con ridotti eccessi d'aria e quindi portate di fumi contenute; ciò si traduce in limitate perdite per calore sensibile e conseguentemente in elevati rendimenti termici;
- Nelle zone di combustione e post combustione le pareti a tubi d'acqua, protette da un rivestimento refrattario ad alta conducibilità, mantengono la temperatura della faccia calda al di sotto del punto di fusione delle ceneri evitando la formazione di incrostazioni dure;
- Le ampie sezioni di passaggio, con conseguenti basse velocità dei fumi, riducono i rischi di erosione e slagging delle ceneri sulle pareti;
- I fenomeni di fouling dei banchi convettivi sono limitati in quanto non vengono offerti alle polveri trasportate dai fumi appoggi orizzontali sui quali depositarsi;
- La flessibilità dei fasci verticali appesi consente una pulizia ottimale degli stessi tramite sistemi a percussione;
- Le operazioni di manutenzione risultano agevolate grazie alla facile estraibilità dei banchi.

Tecnologie di trattamento termico

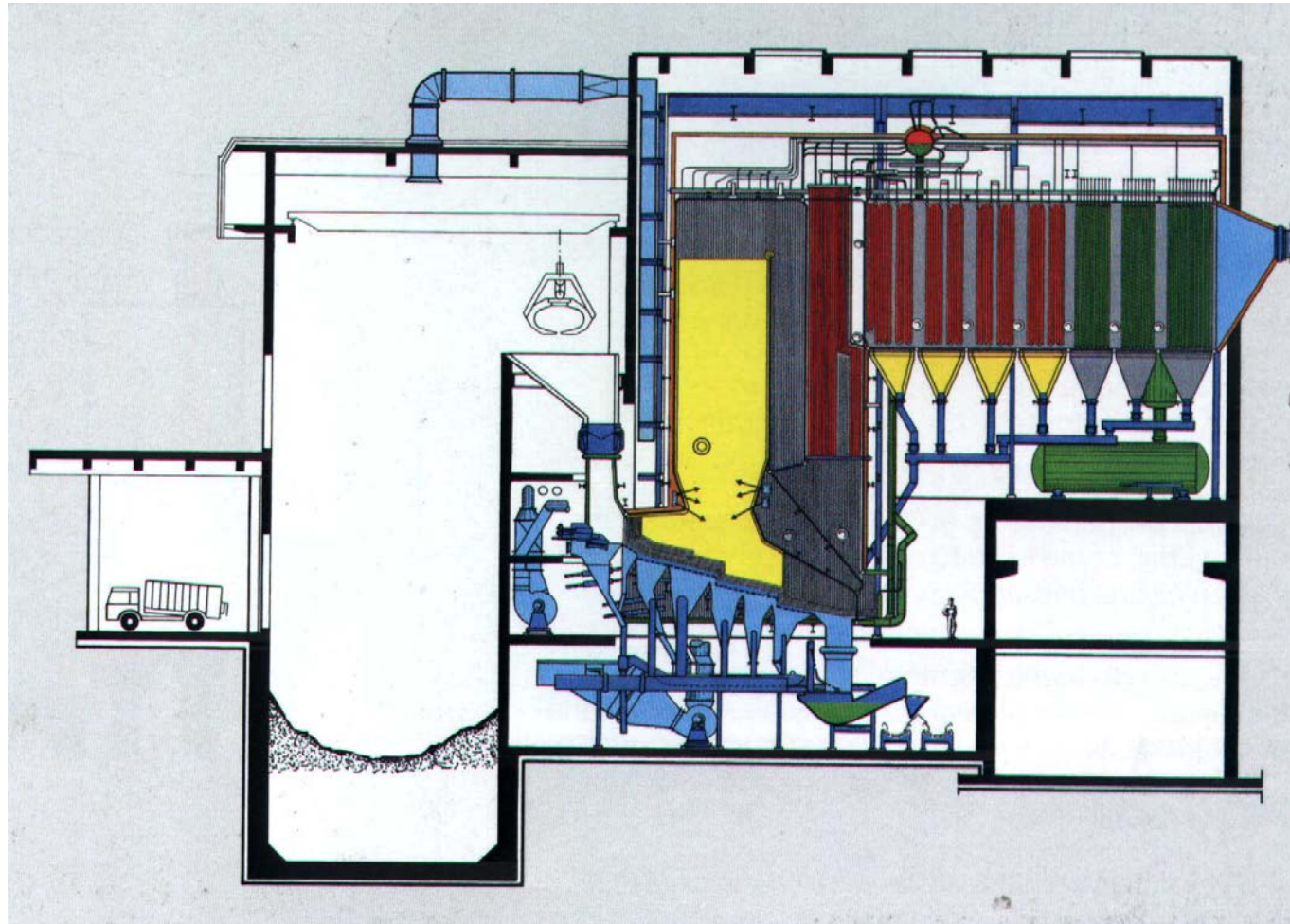
Fasci tubieri surriscaldatori a convezione



Tecnologie di trattamento termico

Forno a griglia mobile con caldaia adiabatica:

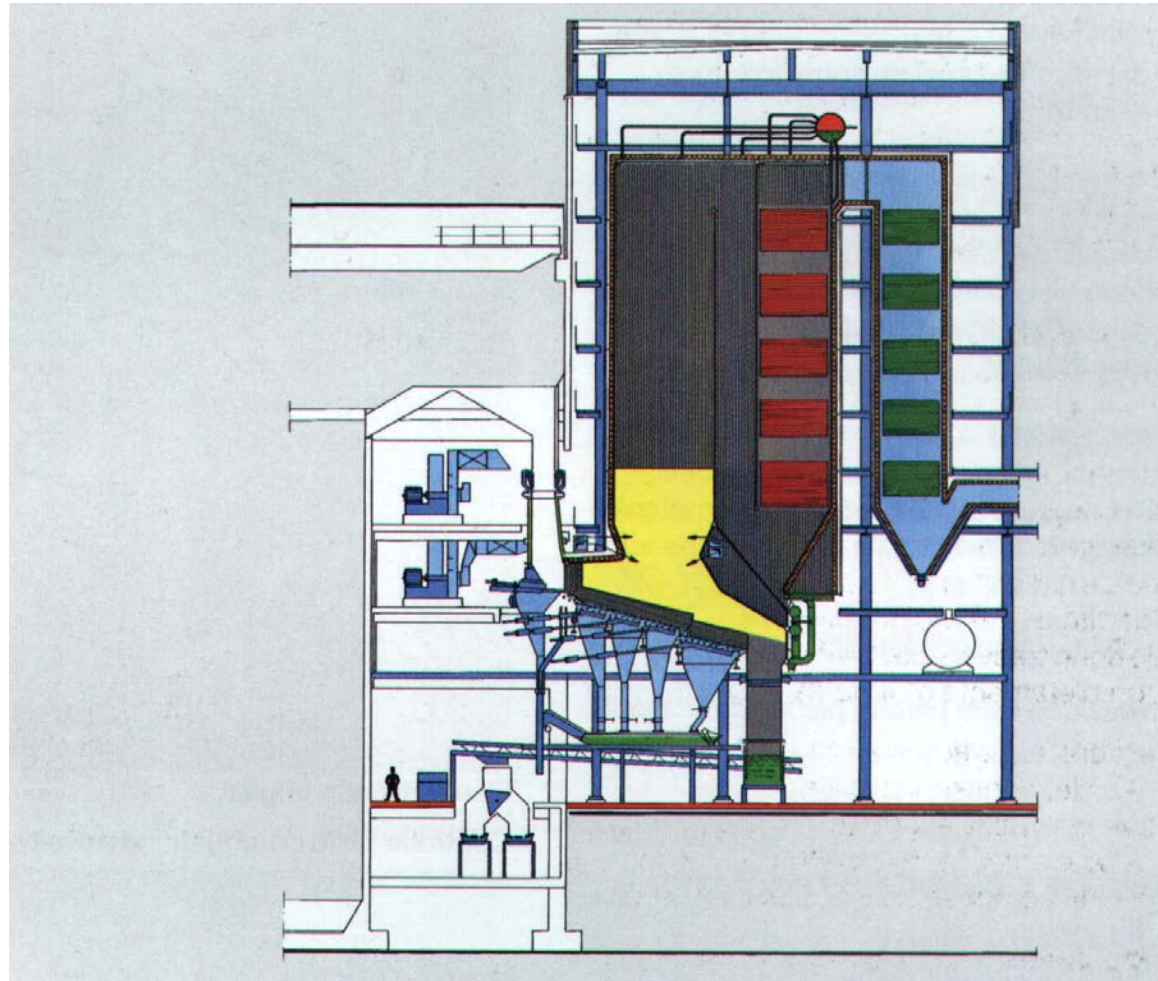
basso recupero energetico dai fumi, bassa efficienza di conversione, grandi volumi di gas.
HRSG a convezione con sviluppo orizzontale.



Tecnologie di trattamento termico

Forno a griglia mobile con caldaia integrata:

alto recupero energetico dai fumi, alta efficienza di conversione, bassi volumi di gas.
HRSG a convezione a sviluppo verticale.



Sistemi di trattamento di fanghi:

L'applicazione dei fanghi in spargimento in agricoltura è una pratica che trova largo impiego in Italia ma che tende ad essere fortemente limitata nel complesso del panorama europeo.

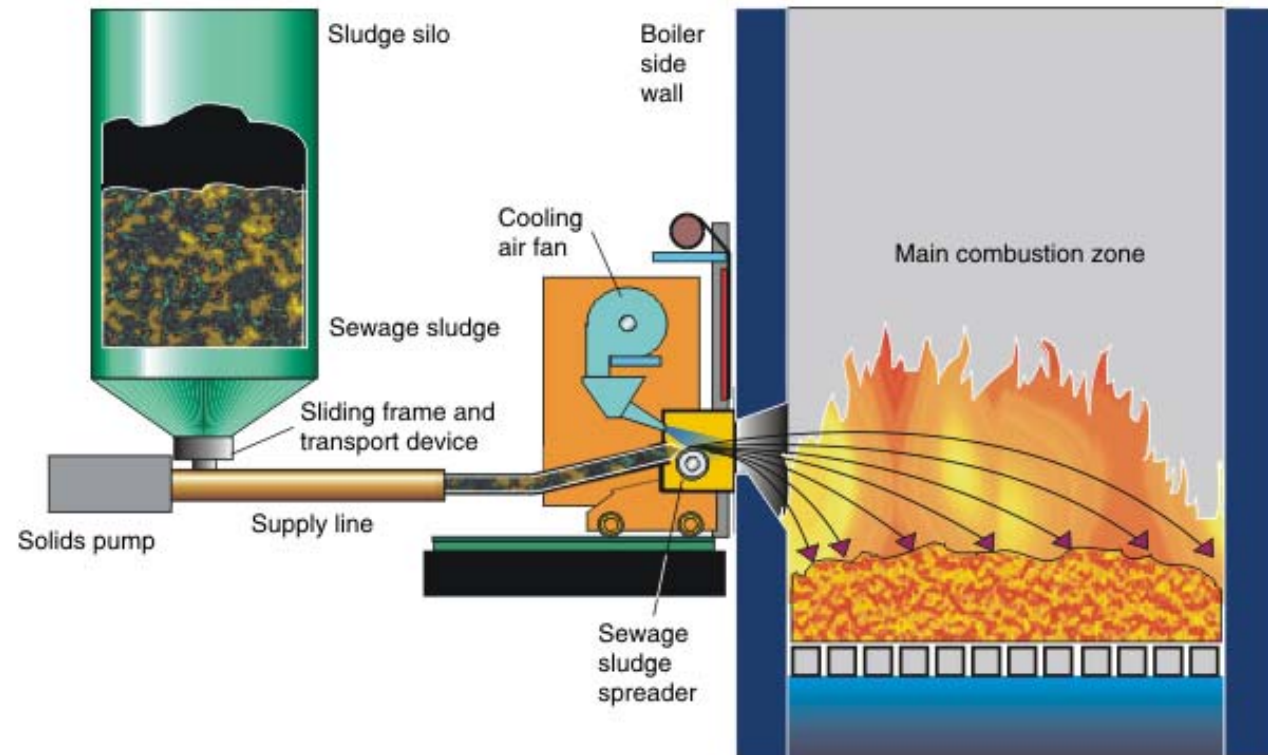
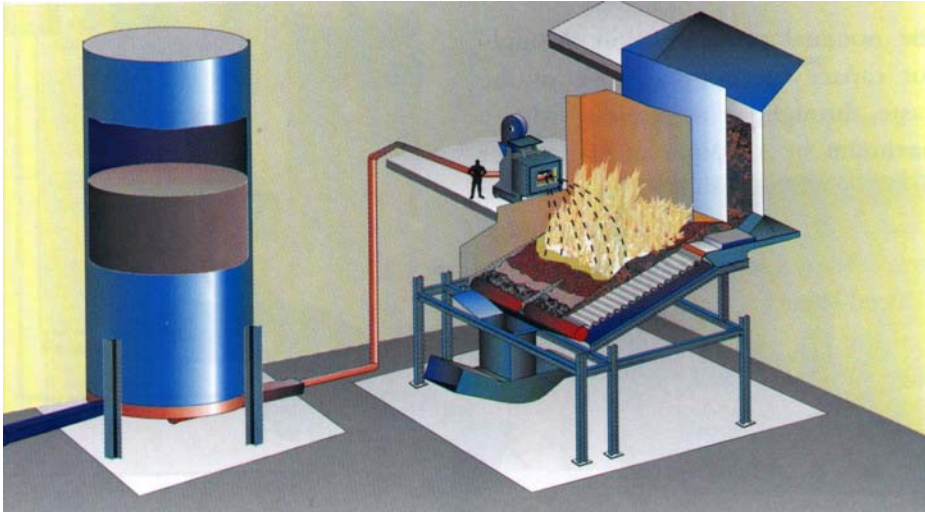
Per questo motivo si stanno sempre più diffondendo tecnologie che permettono la combustione (con eventuale recupero energetico) dai fanghi, sia allo stato di tal quale che di matrice essiccata.

Le tecnologie impiegate possono essere le seguenti:

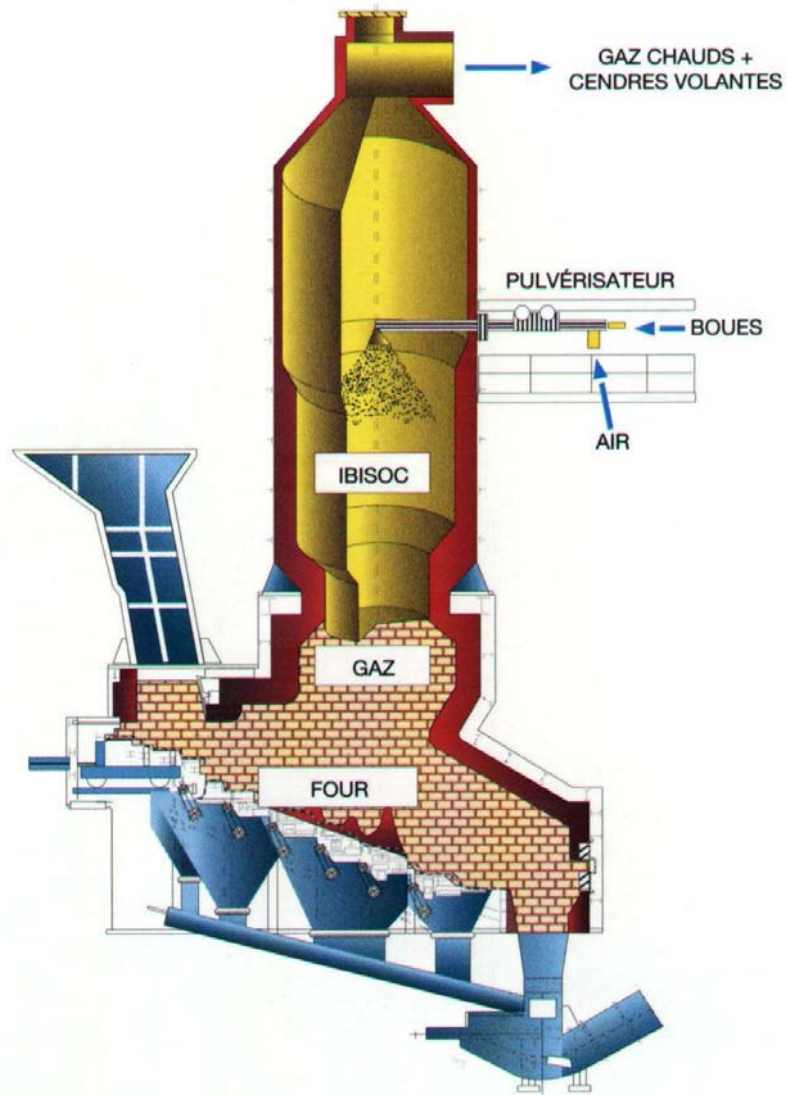
- combustione in torri a piatti
- combustione in forni a tamburo rotante
- combustione in griglia mobile.

Le tecnologie di combustione in griglia mobile necessitano il conferimento al forno mediante alimentazione separata.

Tecnologie di trattamento termico



Tecnologie di trattamento termico



Tecnologie – linee di trattamento effluenti gassosi

Il sistema di depurazione fumi risulta determinante dal punto di vista dell'impatto ambientale e del recupero energetico.

Per quanto riguarda le emissioni atmosferiche si possono distinguere in macroinquinanti e microinquinanti.

I macroinquinanti sono presenti in concentrazioni rilevanti (p.p.m.), originati dalla trasformazione chimica di talune macrocomponenti del rifiuto (ceneri, Cl, S, N e P), da reazioni secondarie non desiderate e dall'ossidazione incompleta del carbonio organico.

Tra questi troviamo:

- ossidi di zolfo (SO_x);
- acidi alogenidrici (HCl, HBr, HF);
- ossidi di azoto (NO_x : NO, NO_2 , N_2O etc.);
- monossido di carbonio (CO);
- sostanze organiche volatili (COV, SOV);
- materiale particolato (PTS)
- materiale particellare fine (PM-10, PM-2,5, PM-1)

Tecnologie – linee di trattamento effluenti gassosi

I microinquinanti sono invece presenti in concentrazioni molto basse (p.p.b.) e possono essere di tipo inorganico, costituiti essenzialmente da metalli pesanti:

→ Pb, Cd, Hg, Cu, Zn, Mn, Ni, Tl, Cr etc.

oppure possono essere anche di tipo organico, costituiti da una vasta gamma di specie chimiche quali:

→ idrocarburi aromatici (benzene, toluene, xilene);

→ composti policiclici aromatici (*IPA*);

→ organo-clorurati come poli-cloro-dibenzo-diossine (*PCDD*) e poli-cloro-dibenzo-furani (*PCDF*) o anche poli-bromo-dibenzo-diossine (*PBrDD*) e poli-bromo-dibenzo-furani (*PBrDF*)

→ organo-clorurati ad attività simile alle diossine (dioxin-like) come policlorobifenili (PCB)

La rimozione mediante apposite tecnologie di abbattimento che si differenziano per:

→ tipologia di inquinanti trattati;

→ carico di inquinante da trattare;

→ limiti di emissione imposti;

→ particolare processo di applicazione e condizioni operative.

Tecnologie di depurazione fumi

		(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)
EMISSIONI	Unità	D.M. 12.7.90	D.M.503/97	Direttiva Europea 2000/76/CE	Valori di Progetto Brescia	Valori Progetto Napoli imposti dalla Struttura Commissariale	Valori attesi Progetto Napoli
CO	mg/m ³	100	50	50	50	50	25
Polveri	"	30	10	10	5	3	1
TOC	"	20	10	10	-	5	3
HCl	"	50	20	10	20	7	5
HF	"	2	1	1	1	0,3	0,1
SO ₂	"	300	100	50	100	25	15
NO _x	"	500	200	200	<100	85	75
NH ₃	"	250	250	250	-	5	3
Cd+Tl	"	0,2	0,05	0,05	0,05	0,02	0,01
Hg	"		0,05	0,05	0,05	0,01	0,01
As+Cr+Co+Ni	"	1	-	-	-	-	
Metalli pesanti	"	5	0,5	0,5	0,5	0,2	0,1
IPA	"	0,1	0,01	0,01	-	0,01	0,005
PCDD+PCDF	ng/Nmc	4000	0,1	0,1	0,1	0,025	0,01

(A) Limiti previsti per impianti industriali

(B) Limiti previsti per impianti di termovalorizzazione del tal quale

(C) Limiti previsti per i nuovi impianti di termovalorizz. dalla Direttiva Europea 2000/76/CE in corso di recepimento

(D) Valori di progetto dell'impianto di Brescia che tratta rifiuto tal quale

(E) Valori limiti imposti dalla Struttura Commissariale per l'impianto di Acerra e da garantire da parte dell'Affidataria

(F) Valori attesi per l'impianto di Acerra

Tecnologie di depurazione fumi

Polveri	3000 a 6000 mg/Nm ³
Acido cloridrico (HCl)	300 a 1500 mg/Nm ³
Acido fluoridrico (HF)	1 a 20 mg/Nm ³
Ossido di zolfo (SO _x)	150 a 350 mg/Nm ³
Ossido d'azoto (NO _x)	180 a 450 mg/Nm ³
Totale metalli pesanti	50 a 200 mg/Nm ³
Mercurio (Hg)	1 a 4 mg/Nm ³
Diossine	0,1 a 10 ng TE/Nm ³

Abbattimento Sostanze gassose incombuste (alcali, aldeidi, chetoni, ammine, monossido di carbonio):

In particolare il monossido di carbonio è frequentemente assunto come indice del cattivo andamento del processo di combustione in quanto la sua presenza è dovuta ad un insufficiente livello di temperatura di esercizio, ad un sovraccarico nel forno, ad insufficienti alimentazioni dell'aria.

Per limitare la formazione di CO si può ricorrere ad un eccesso di aria comburente ma in modo oculato in quanto tale soluzione favorisce la formazione di ossidi di azoto e condiziona la temperatura del forno.

Abbattimento Particolato:

Il particolato si presenta nella corrente aeriforme con concentrazioni molto variabili che dipendono dal contenuto di ceneri del rifiuto, dal tipo di camera di combustione e dalle condizioni di esercizio dell'impianto.

Nel particolato emesso dai processi di termodistruzione si rileva la presenza di elementi microinquinanti in quantità maggiori che non in altri residui solidi del processo quali scorie e ceneri.

Questo fenomeno è detto *arricchimento del particolato* ed è dovuto alla volatilizzazione degli elementi in camera di combustione e alla loro successiva condensazione sulle polveri durante il raffreddamento dei fumi prima dell'emissione al camino.

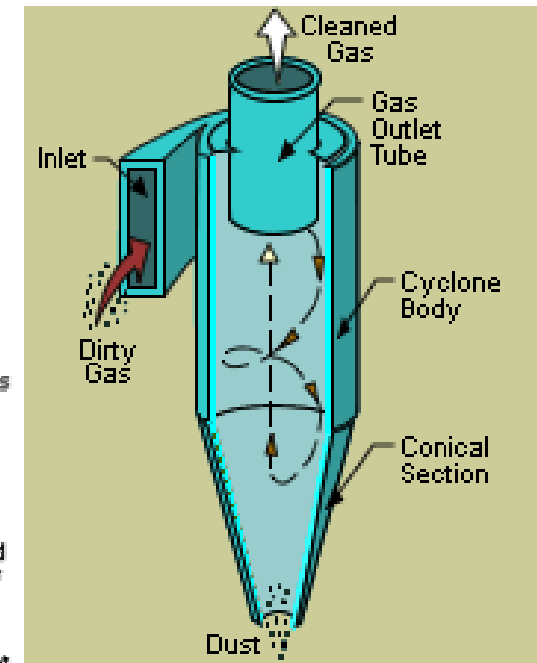
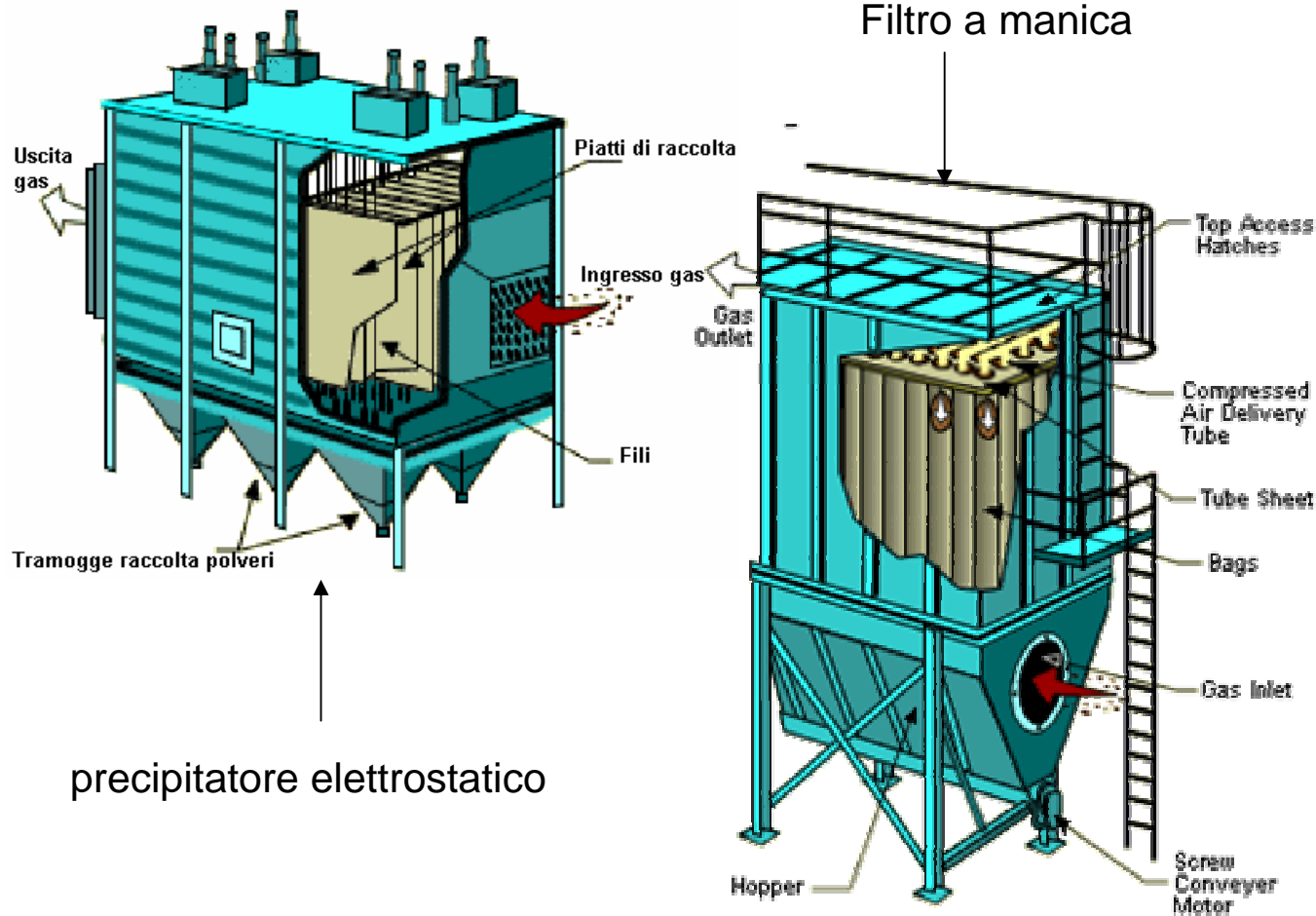
Per questo è necessaria una riduzione del particolato presente nei fumi che può essere effettuata ricorrendo a due sistemi di trattamento

- ➔ Trattamenti a secco
- ➔ Trattamenti ad umido
- ➔ (Trattamenti a semi-secco)

Tecnologie di depurazione fumi

Trattamenti a secco:

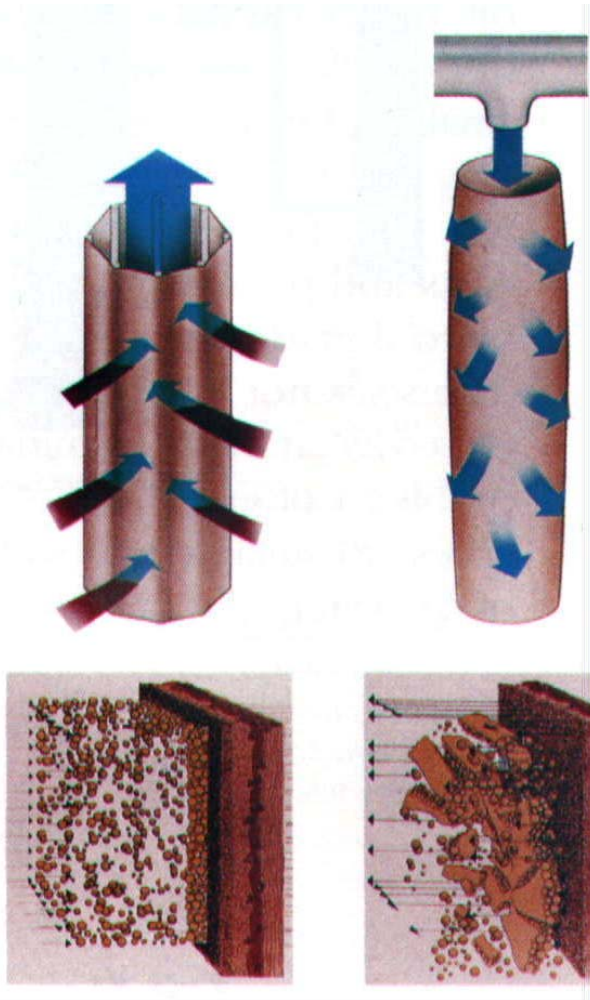
- cicloni (e multicicloni)
- filtri a maniche;
- precipitatori elettrostatici.



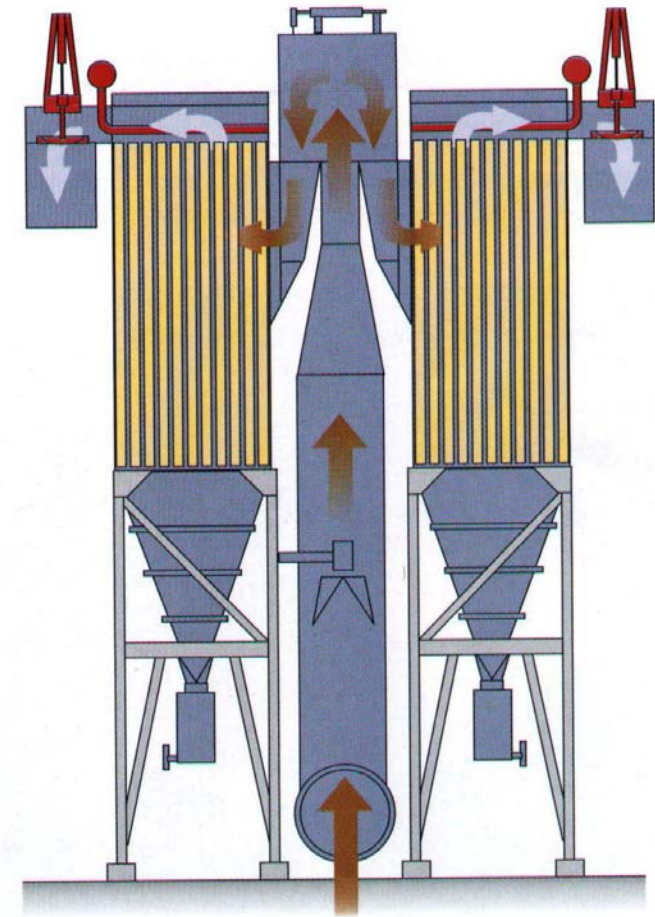
ciclone

Tecnologie di depurazione fumi

Particolare di sistema di rimozione delle polveri (filter cake) dalle maniche mediante sistema (pulse-jet) ad alta pressione



Accoppiati con sistemi di iniezione di carboni attivi permettono l'abbattimento di microinquinanti (sia organici che inorganici).



Tecnologie di depurazione fumi

POLVERI

Sistemi	Concentrazioni ottenute	Vantaggi	Svantaggi
Cycloni e Multicycloni	Cycloni 200-300 mg/m ³ Multicycloni 100-150 mg/m ³	-basso costo di investimento -basso costo di esercizio -semplicità strutturale, resistente all'usura e ad un ampio range di temperature	-bassa efficienza di depurazione -problemi di intasamento -captazione inferiore rispetto ai filtri a maniche -utilizzo in fase di pre-depolverazione
Precipitatori elettrostatici	<25 mg/m ³	-ridotti costi di gestione -costi di investimento ragionevoli (per grandi installazioni)	-costi di investimento non convenienti per piccole installazioni
Filtri a maniche	<5 mg/m ³	-prestazioni elevate, grazie anche allo strato di polvere sulle maniche che aumenta l'efficienza di filtrazione -compatibile con l'iniezione di sistemi a secco -depurazione da gas acidi, PCDD/PCDF e mercurio tramite l'aggiunta di reagenti alcalini e carboni attivi	-materiale filtrante delicato e costoso: costi di gestione elevati -problemi di intasamento in condizioni di umidità

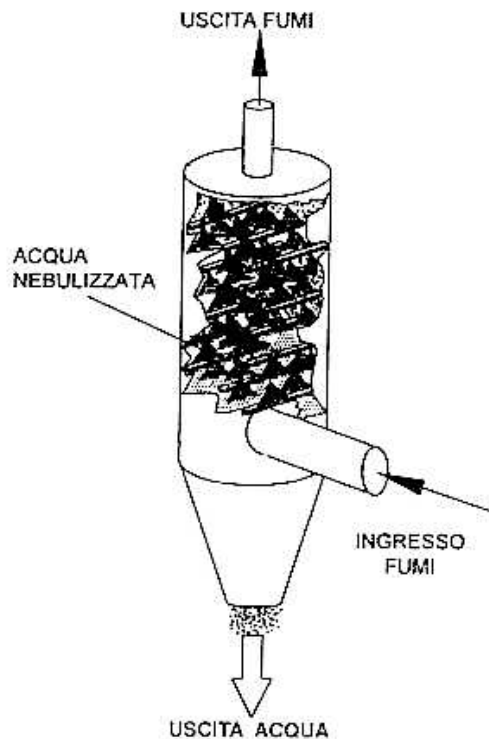
Confronto dei diversi sistemi di rimozione del particolato a secco

Tecnologie di depurazione fumi

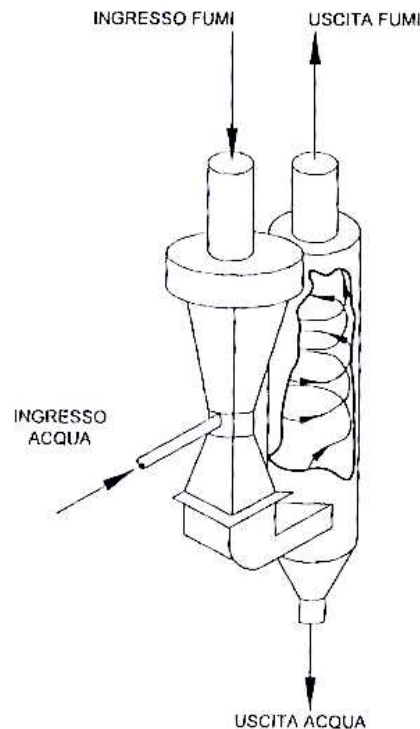
Fanno parte dei trattamenti ad umido:

- gli scrubber nelle diverse forme (a riempimenti, a piatti, venturi, a ciclone etc.);
- i precipitatori elettrostatici ad umido (WESP).

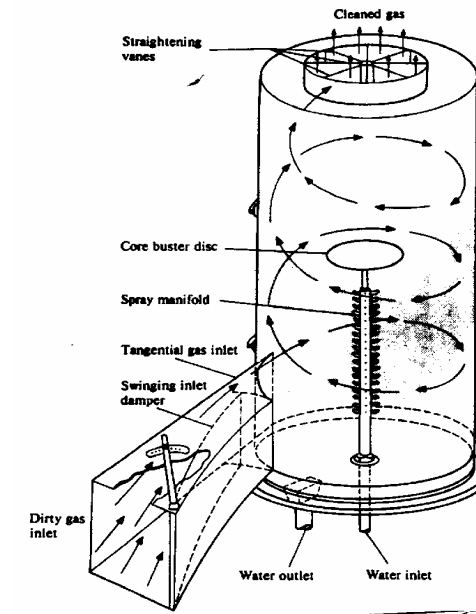
Nei sistemi ad umido il particolato viene separato dai gas attraverso un lavaggio in acqua che, unendosi alle particelle solide igroscopiche, le rende più pesanti e più facilmente allontanabili.



Torre di lavaggio

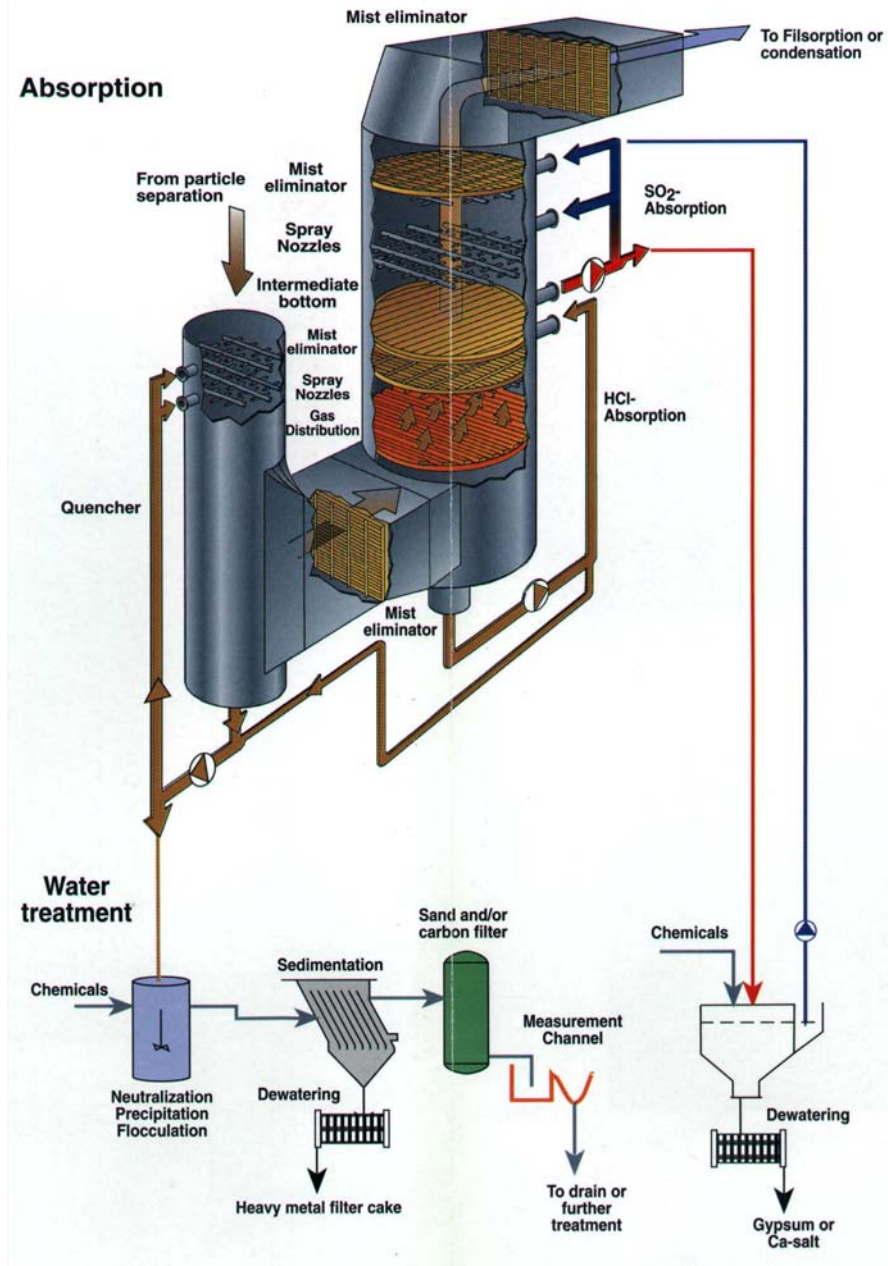


Scrubber-Venturi



Scrubber-ciclone

Tecnologie di depurazione fumi



Sistema di scrubber a triplo stadio:
•quencher di raffreddamento;
•sezione acida (HCl-scrubber);
•sezione basica (SO_x-scrubber);
completo di separatore gocce.

Gas acidi:

I principali gas acidi sono l'anidride solforosa (SO_2), l'acido cloridrico (HCl) e l'acido fluoridrico (HF) che derivano dalla trasformazione di sostanze a base di zolfo, cloro e fluoro.

Per la rimozione dei gas acidi vengono impiegati tre diversi processi:

- assorbimento ad umido;
- assorbimento a secco;
- assorbimento a semisecco.

I trattamenti dei gas acidi sono di norma preceduti da una depolverazione primaria per limitare il carico di polveri in arrivo e per separare le polveri di combustione da quelle derivanti dai processi di abbattimento dei gas acidi, provvedendone una diversa destinazione.

Tecnologie di depurazione fumi

Nei processi ad **umido** l'assorbimento dei gas acidi è realizzato mediante un lavaggio con soluzioni alcaline degli effluenti gassosi.

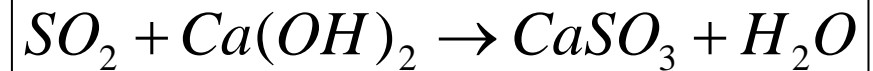
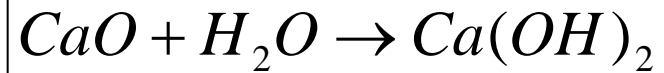
I processi a **secco** sono basati sull'assorbimento chimico-fisico dei gas acidi da parte di calce idratata (o bicarbonato di sodio) in polvere fine, iniettata pneumaticamente nei fumi. Il processo necessita di una sezione di depolverazione finale (filtro a maniche) dove vengono abbattute le polveri contenenti i prodotti di reazione e i reagenti non esauriti.

Nei processi a **semisecco** i fumi vengono inviati in un reattore al cui interno è iniettato un reagente adsorbente costituito di norma da una sospensione di latte di calce. Il calore dei fumi provoca l'evaporazione di tutta l'acqua contenuta nella sospensione cosicché il reagente in forma cristallina finemente dispersa reagisce allo stato solido con i gas acidi formando i corrispondenti sali. I processi a semisecco hanno il vantaggio di non dare luogo ad un residuo liquido in quanto l'acqua, impiegata come veicolo, viene completamente evaporata. I prodotti delle reazioni di neutralizzazione vengono separati allo stato secco nel depolveratore finale.

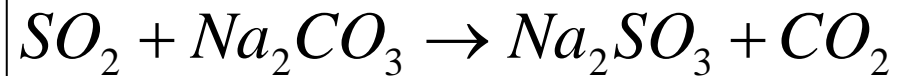
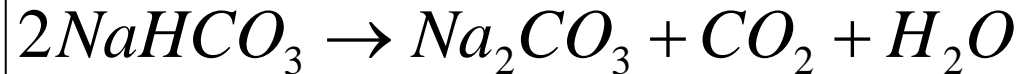
Tecnologie di depurazione fumi

I processi di abbattimento dei gas acidi possono fare uso di reagenti alcalini, sia in fase liquida, che in fase solida che in fase di latte di trattamento in reattori semisecco.

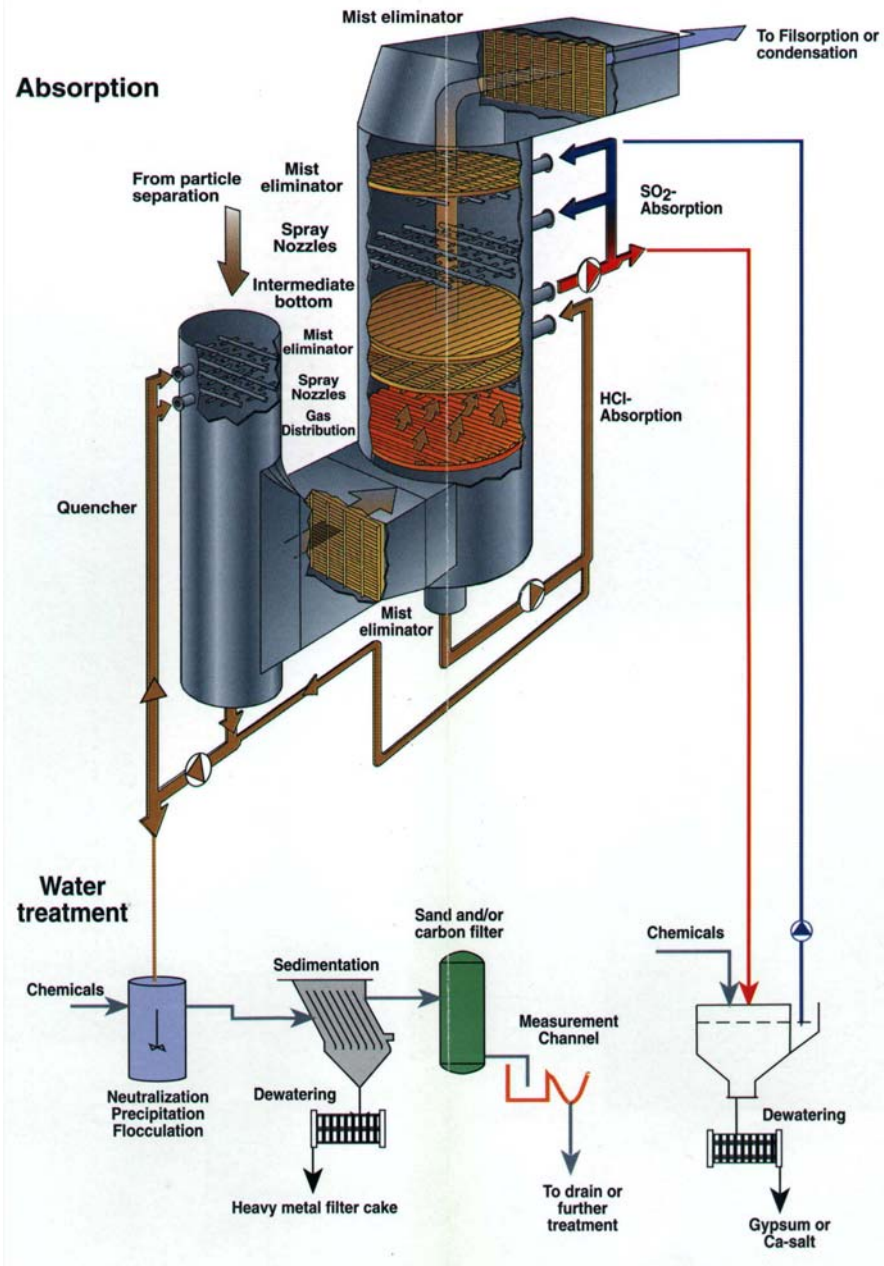
Le reazioni che hanno nel caso di **calce idrata** sono le seguenti:



Le reazioni che hanno nel caso di **Bicarbonato di sodio** (processo Neutrec®) sono le seguenti:



Tecnologie di depurazione fumi

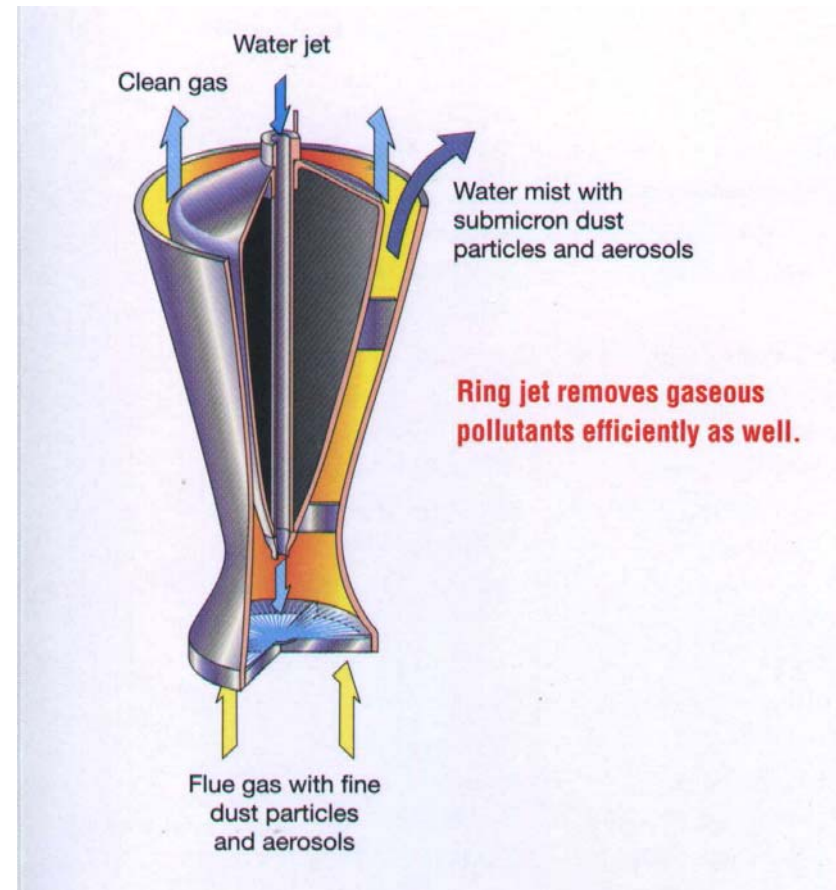
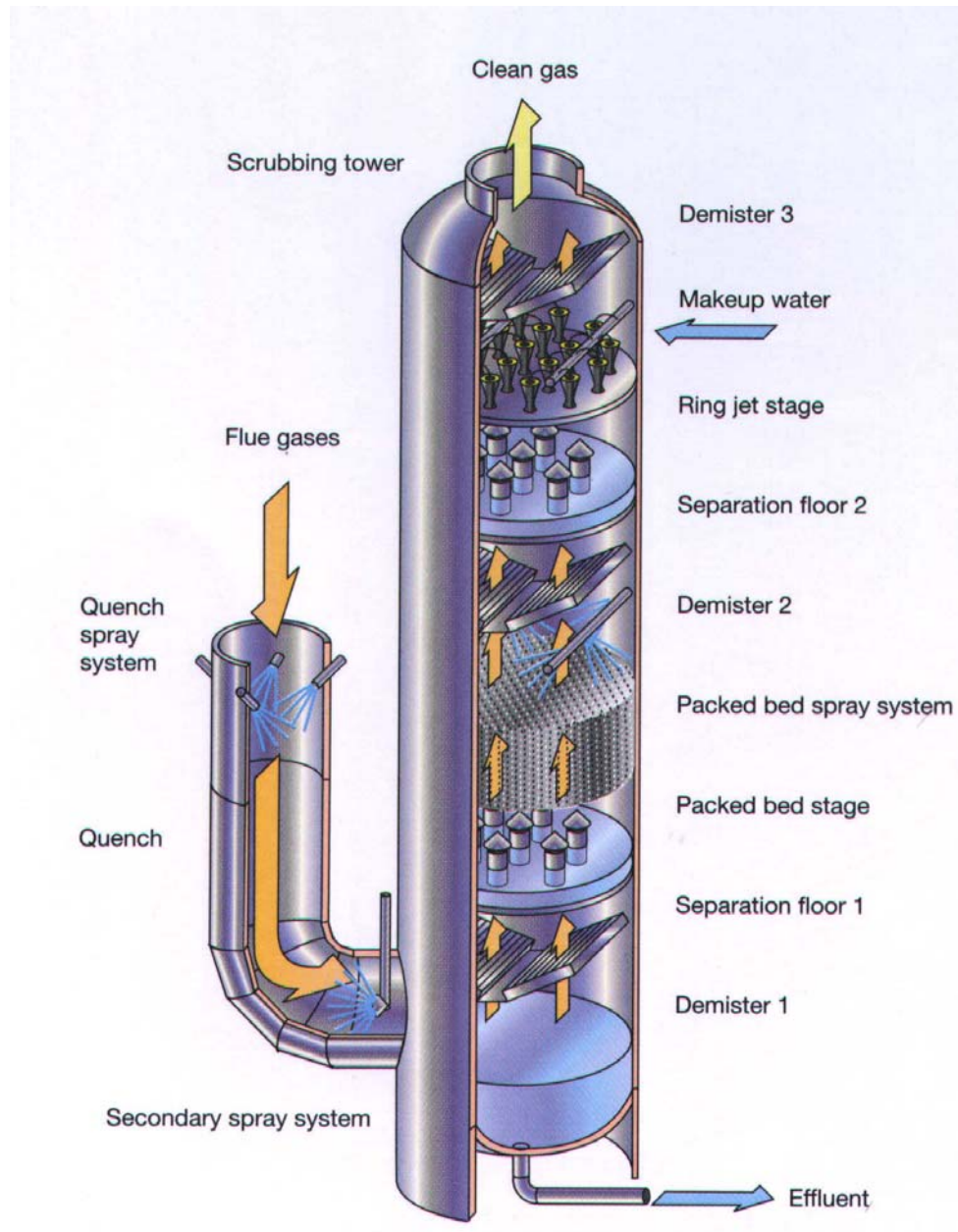


Sistema di **scrubber a triplo stadio**:

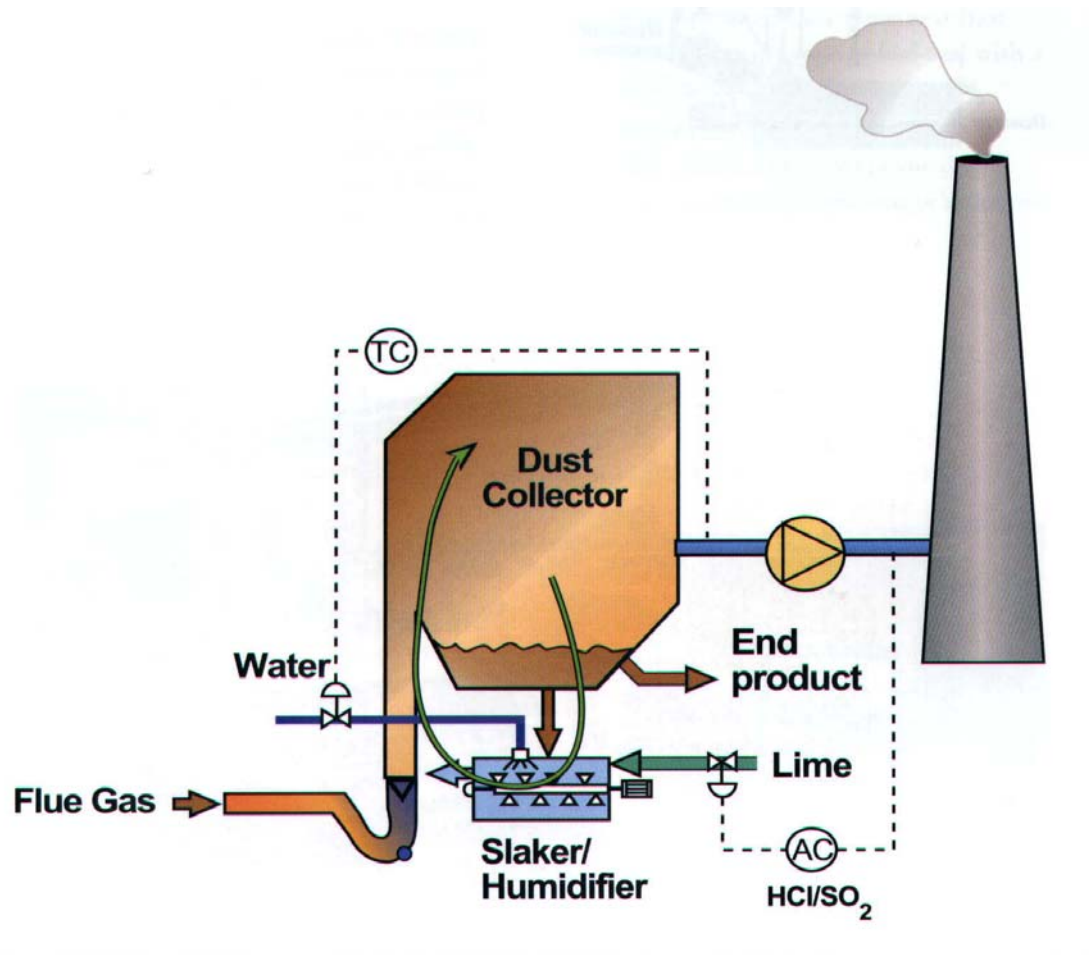
- quencher di raffreddamento;
- sezione acida (HCl-scrubber);
- sezione basica (SO_x-scrubber);

completo di separatore gocce.

Tecnologie di depurazione fumi

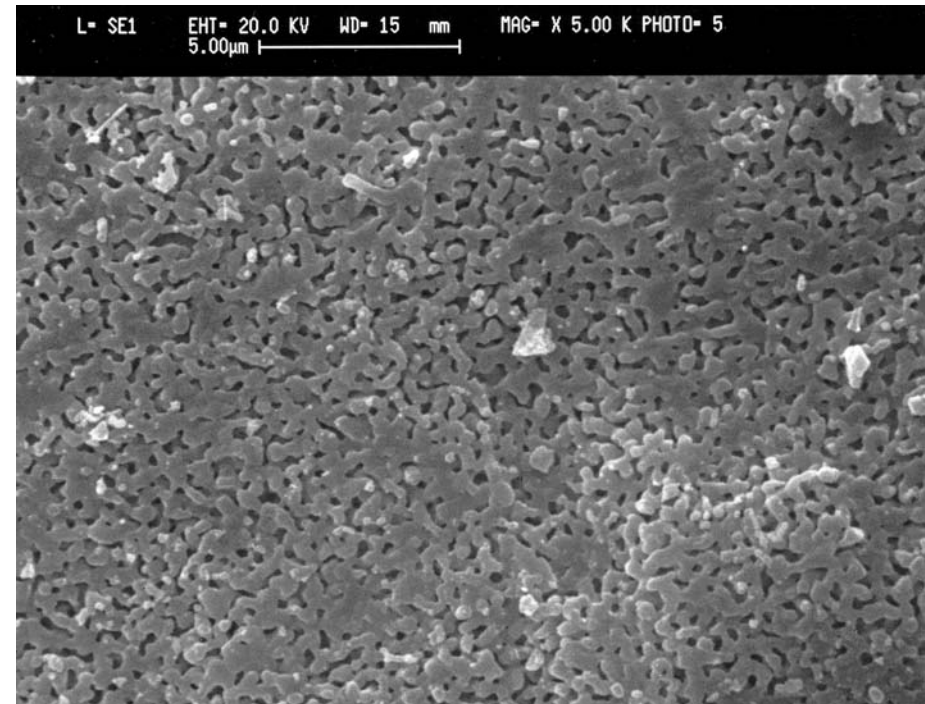
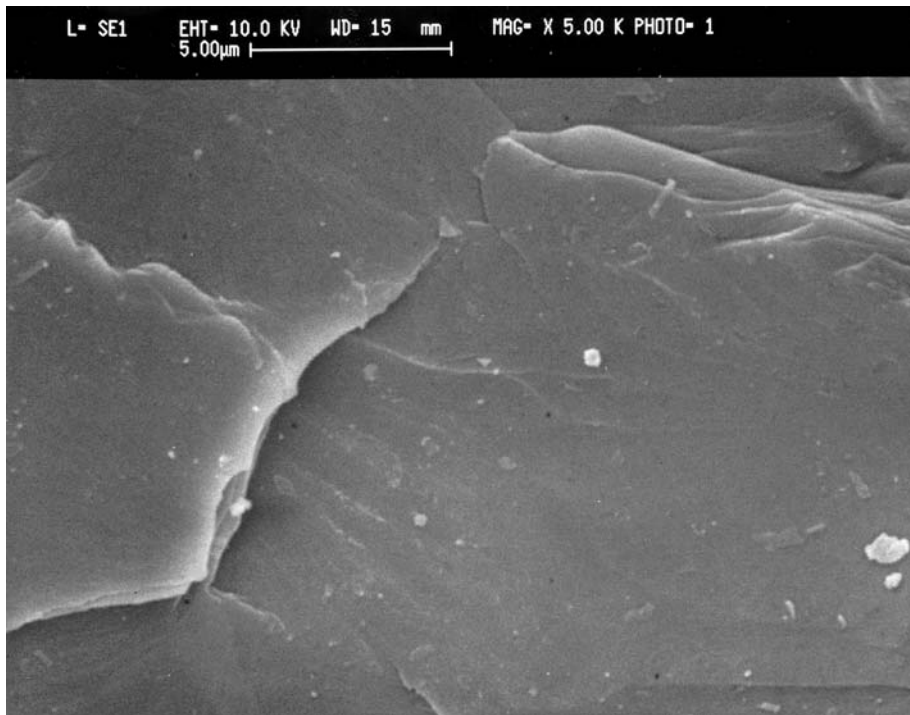


Tecnologie di depurazione fumi

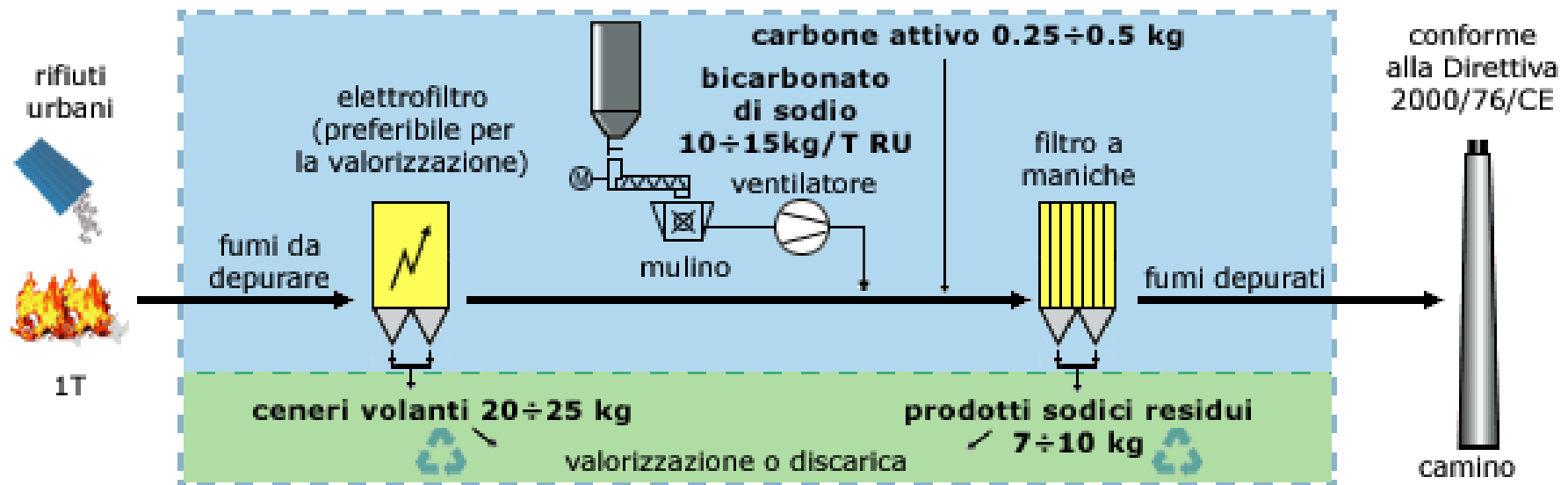


Sistema a semisecco NID

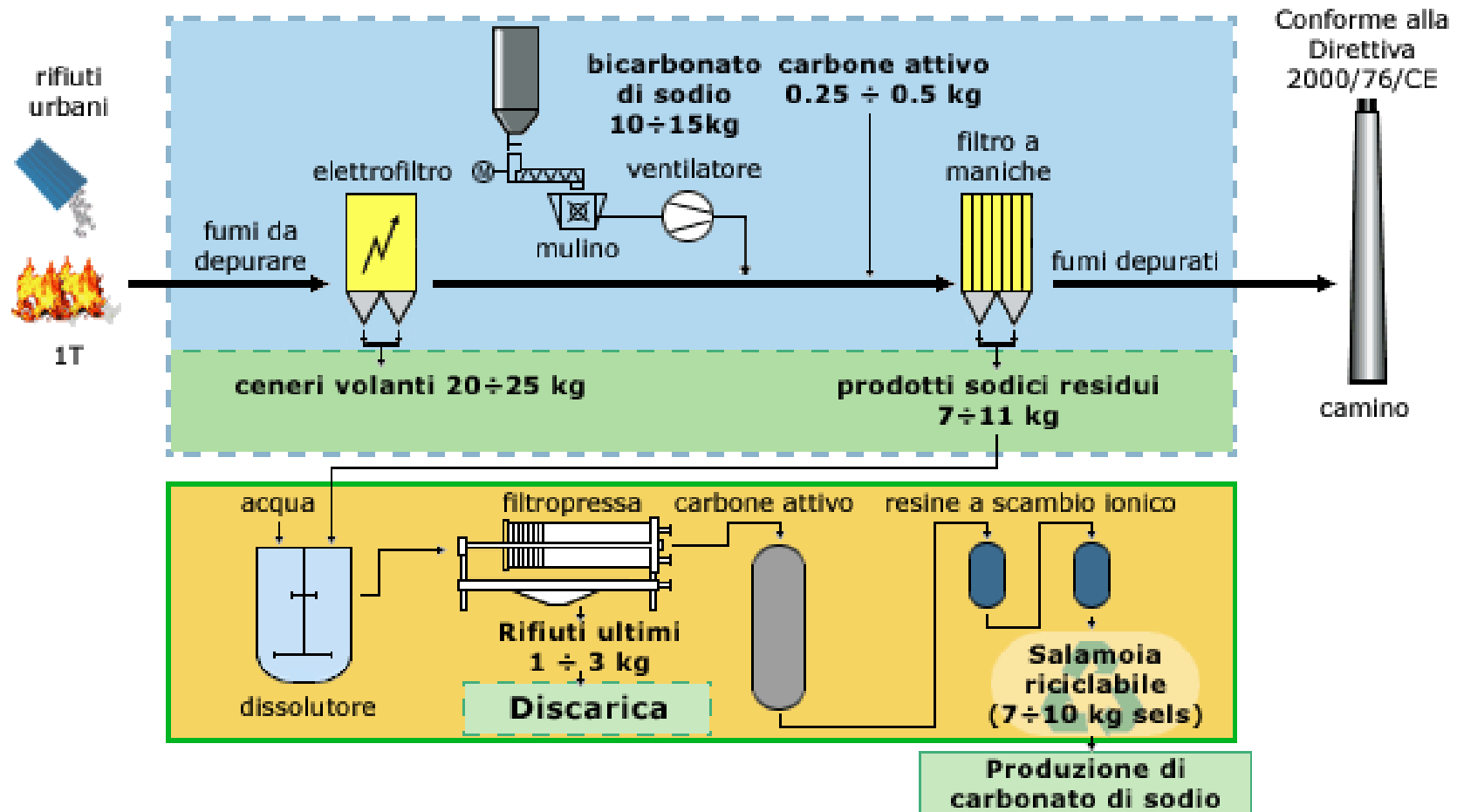
Tecnologie di depurazione fumi



Tecnologie di depurazione fumi

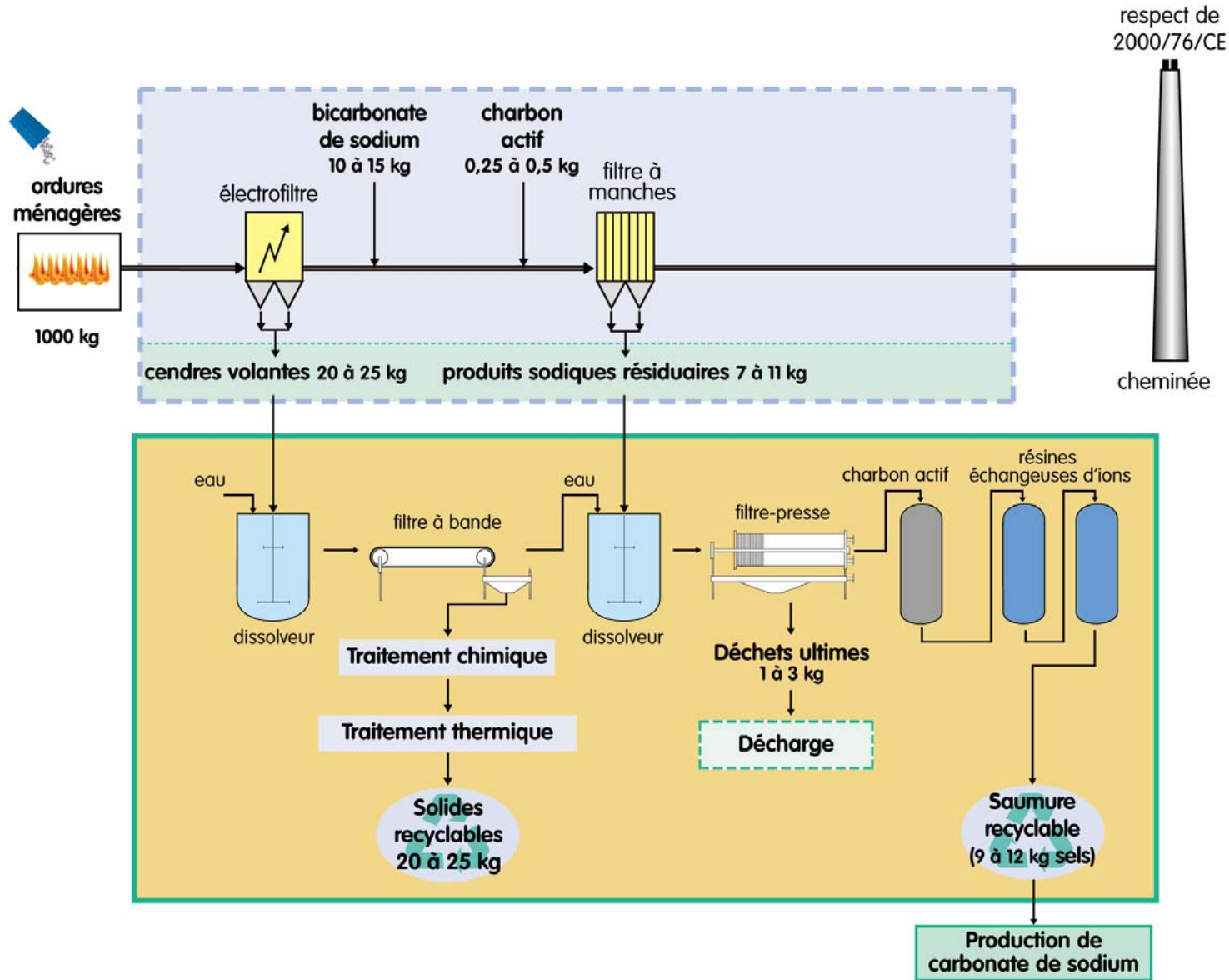


Processo di recupero Solval



Tecnologie di depurazione fumi

Processo di recupero Revasol



Tecnologie di depurazione fumi

		VANTAGGI	SVANTAGGI
SECCO	CALCE	Realizzazione impiantistica semplice	Gestione poco flessibile: operazione di iniezione calce delicata; regolazione difficile; basso margine di variazione della T°
		Basso costo di investimento	Alto eccesso stechiometrico (nell'ordine di 3)
		Assenza di effluenti liquidi	Bassa reattività per singolo passaggio: necessità di effettuare ricircoli
		Manodopera ridotta	In caso di regolamentazioni più severe, non offre margini di evoluzione
		Facilità di inertizzazione dei P.C.R.	Importante produzione di residui solidi da conferire in discarica (previa inertizzazione)
	BICARBONATO DI SODIO	Realizzazione impiantistica e gestione dell'impianto semplici	Apprezzabile consumo massico del reattivo (anche se si utilizza un debole eccesso in confronto allo stechiometrico: $K=1,2$)
		Costi di investimento e di gestione ridotti	Costo del reattivo elevato (anche se l'insieme delle voci del costo di gestione risulta ridotto)
		Manodopera ridotta	
		Assenza di effluenti liquidi	Residuo solido (P.S.R.) più solubile: in assenza di valorizzazione, la stabilizzazione diventa più difficile (se si usano leganti idraulici tradizionali)
		Possibilità di riciclare i prodotti sodici residui nell'industria chimica (riduzione della quantità di rifiuti da conferire in discarica)	
SEMI-UMIDO	Costi di investimento limitati (intermedi tra il processo a secco e quello ad umido)	Consumo di acqua	
	Assenza di effluenti liquidi	Produzione importante di residui (anche se inferiore ai processi a secco)	
		Consumo importante di reattivo (anche se inferiore ai processi a secco) possibilità di ricircolo	
UMIDO	Basso consumo di reattivi (soda)	Necessità di un trattamento acque	
	Bassa produzione di residui solidi e residui separati (ceneri volanti – torta, ecc.)	Grande produzione di effluenti liquidi	
		Costi di investimento elevati (legati al trattamento delle acque)	
	Lisciviazione dei metalli pesanti contenuti nella torta minimizzata	Importante consumo di acqua e di elettricità	
	Grande flessibilità di funzionamento	Manodopera supplementare in rapporto agli altri processi (sorveglianza e mantenimento della catena di condizionamento degli effluenti)	

Confronto dei sistemi di rimozione dei gas acidi

Ossidi di azoto:

Alcune tecniche sviluppate per ridurre la formazione degli ossidi di azoto nei processi di combustione dei RSU 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 però un accurato controllo del processo, per evitare la formazione di prodotti incombusti.

Le emissioni di ossidi di azoto possono essere limitate anche attraverso il ricircolo di una certa quantità dei gas di scarico (in genere circa il 30%) nella zona di combustione creando quindi un ambiente con più bassi tenori di ossigeno che ne limita la formazione.

Per ridurre le emissioni di ossidi di azoto al camino al di sotto dei limiti di legge sono utilizzabili i processi di:

-riduzione selettiva non catalitica (SNCR)

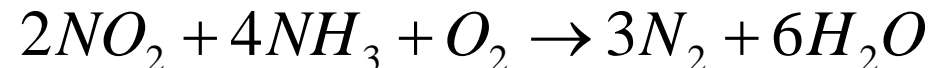
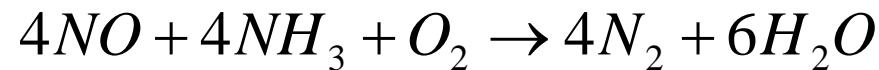
-riduzione selettiva catalitica (SCR)

Come agenti riducenti vengono utilizzati l'ammoniaca in soluzione acquosa o additivi di processo contenenti urea.

Tecnologie di depurazione fumi

Come agenti riducenti vengono utilizzati l'ammoniaca in soluzione acquosa o additivi di processo contenenti urea.

Le reazioni di riduzione su cui si basano i due processi sono:



Nel caso di processo catalitico, le reazioni avvengono su catalizzatori ad alta superficie specifica (tipicamente strutture a nido d'ape, honeycomb) a matrice ceramica, per temperature variabili entro finestre tra i 270 ed i 380°C, con addizione di ammoniaca (NH₃). A seconda dei cicli termodinamici a cui sono applicati, i processi catalitici possono essere applicati in diverse posizioni dell'impianto, sulla base delle temperature di processo più idonee:

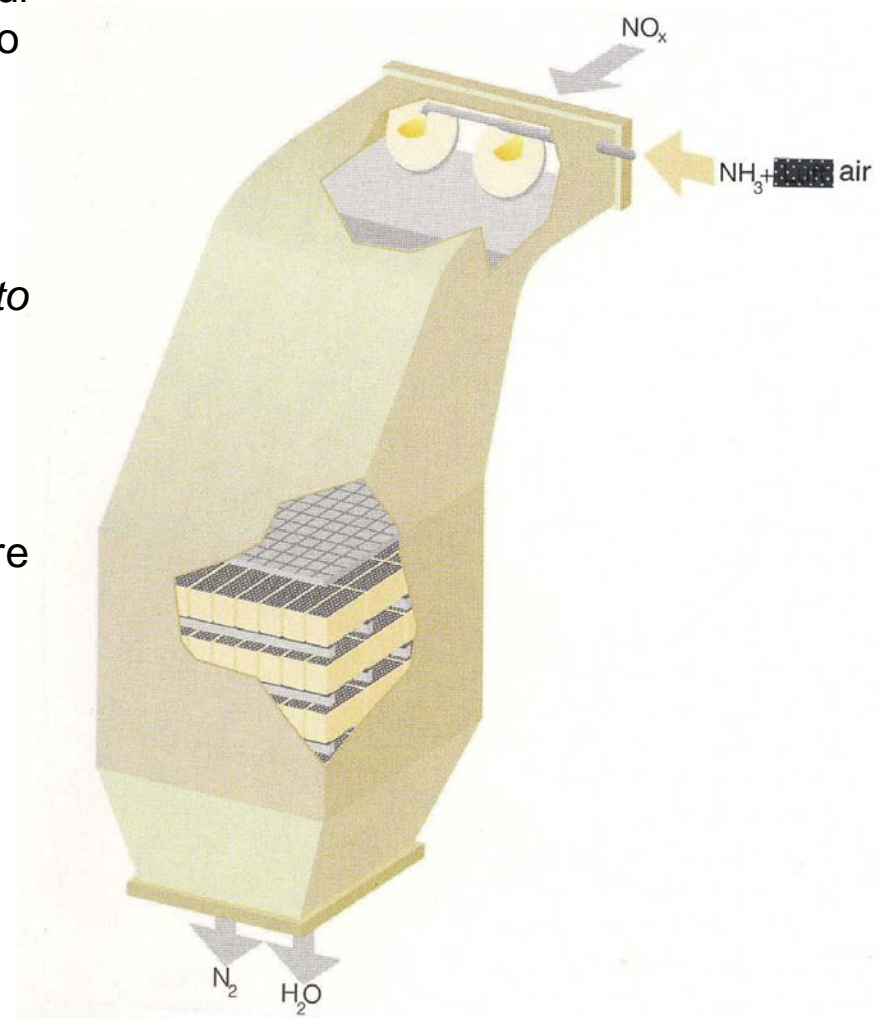
- a valle di eventuali altri sistemi di depurazione (tail-end SCR);
- a monte di tutti gli eventuali sistemi di rimozione di inquinanti (high-dust SCR);
- a valle dello scambio termico o prima della conclusione dello scambio termico, per sfruttare il contenuto entalpico, senza necessità di combustibili addizionali.

Tecnologie di depurazione fumi

Con la riduzione selettiva catalitica degli ossidi di azoto il monossido e il biossido d'azoto vengono convertiti tramite ammoniaca in azoto e vapor d'acqua a temperature tra 270°C e 380°C in presenza di un catalizzatore

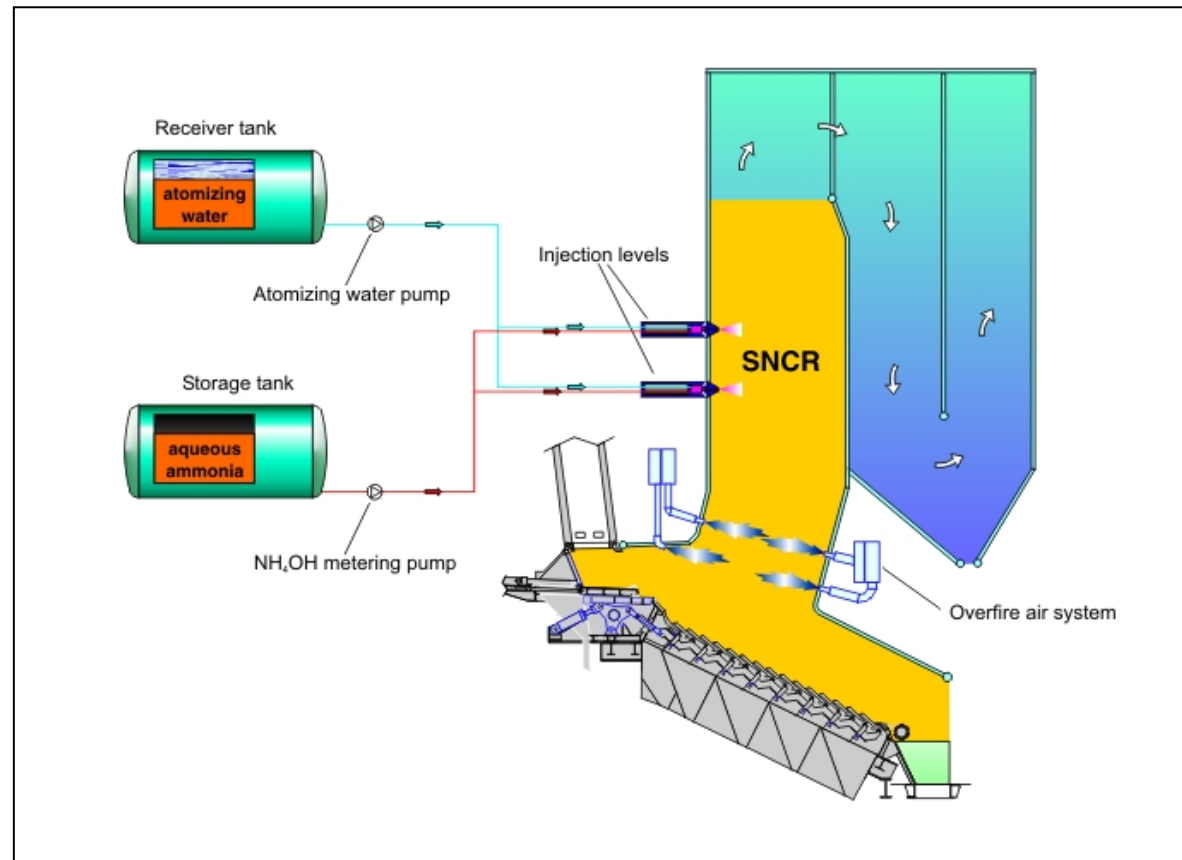
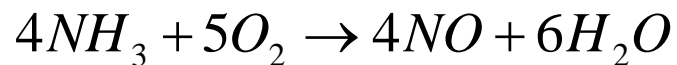
Un problema molto frequente è l'*avvelenamento* del catalizzatore, dovuto principalmente alla presenza nei fumi di concentrazioni non trascurabili di ossidi di zolfo (SO_3) con formazione di solfato di ammonio (NH_4SO_4) in condensazione e di metalli pesanti (in particolare composti a base di zinco, vanadio e arsenico).

Per questo la sezione di abbattimento degli ossidi di azoto viene posta solitamente a valle dei diversi sistemi di depurazione dei fumi dove è più bassa la concentrazione degli agenti avvelenanti per il catalizzatore.



Tecnologie di depurazione fumi

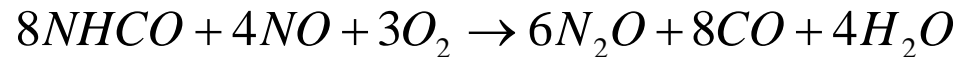
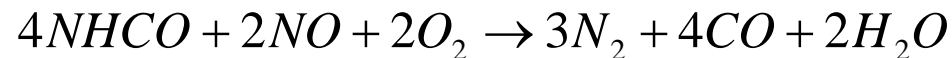
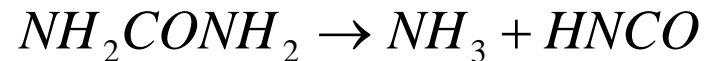
Nella riduzione selettiva non catalitica dell'ossido di azoto i radicali amminici (ottenuti dalla reazione dell'ammoniaca con i radicali OH) reagiscono con il monossido di azoto a temperature comprese tra 850°C e 1050°C a formare azoto e vapor d'acqua. L'equilibrio della reazione selettiva non catalitica è fortemente dipendente dalla temperatura e dalla concentrazione di partenza dei reagenti. A temperature più elevate rispetto all'intervallo sopra citato si potrebbe favorire l'ossidazione dell'ammoniaca con conseguente incremento di ossidi di azoto; viceversa, a temperature più basse, l'ammoniaca potrebbe non reagire nella camera di combustione (*ammonia slip*) dando luogo successivamente ad incrostazioni per la formazione di sali (solfato e cloruro di ammonio).



Tecnologie di depurazione fumi

Condizioni di elevate rese di riduzione di NO_x con processi SNCR si ottengono con dosaggi elevati di ammoniaca o di urea (1,5 – 2 moli per mole di NO_x).

L'impiego di urea, pur essendo di più semplice gestione, rispetto ad NH_3 , presenta un tipico problema di produzione di protossido di azoto (N_2O), superiore rispetto alle reazioni in camera di combustione



Composti organoclorurati:

I composti organoclorurati sono sostanze organiche in forma alogenata quali clorobenzene, clorofenoli, policlorobenzodiossine (PCDD), policlodibenzofurani (PCDF), tutte caratterizzate da elevata tossicità.

La formazione dei microinquinanti organoclorurati può essere già contenuta nella camera di combustione conducendo il processo ad alte temperature (900-950°C) con rilevanti tenori di ossigeno ed elevata turbolenza.

La frazione dei composti presente in fase solida può essere ridotta con i meccanismi di rimozione del particolato, può essere inoltre previsto l'utilizzo di carbone attivo.

Tecnologie di depurazione fumi

NO_x

Metalli:

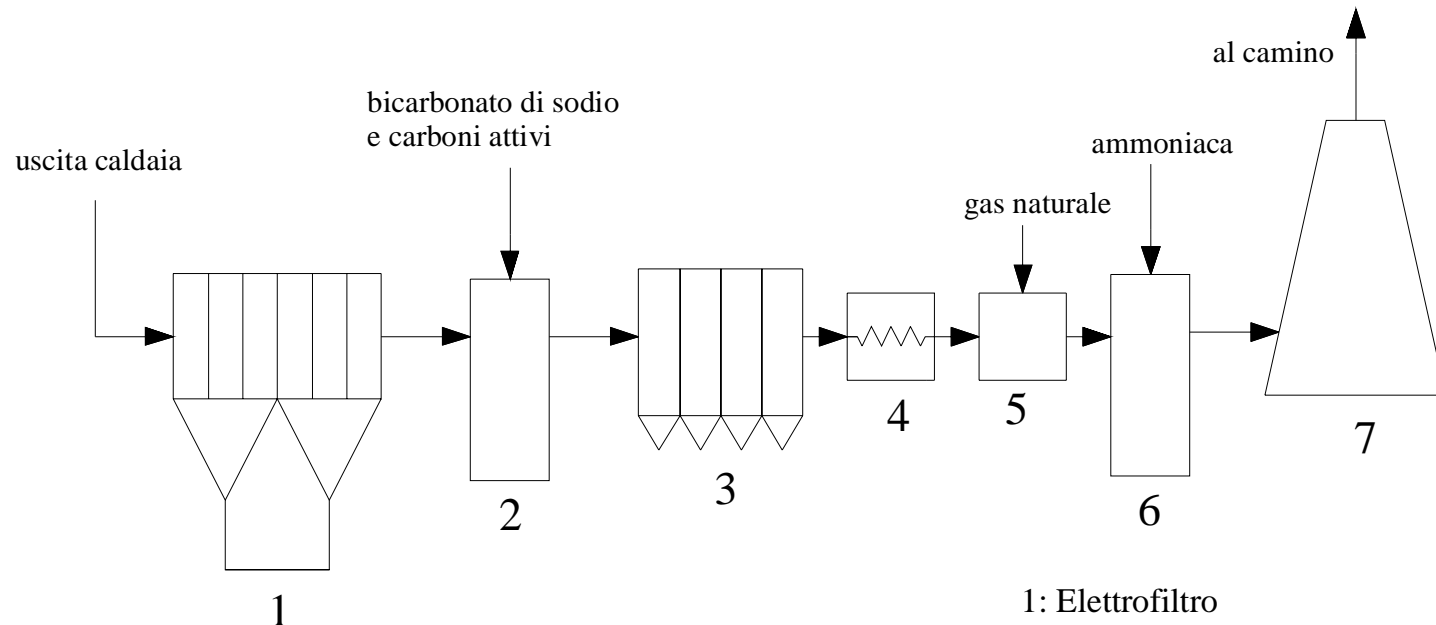
la rimozione di gran parte dei metalli viene di norma condotta unitamente a quella del particolato. Durante la combustione infatti i metalli possono passare allo stato gassoso per poi ricondensare depositandosi sulle particelle solide contenute nella corrente gassosa, soprattutto su quelle di più piccola dimensione. Altri metalli, come ad esempio il mercurio, possono essere più facilmente eliminati mediante lavaggi ad umido o mediante adsorbimento con carbone attivo.

Sistemi	Vantaggi	Svantaggi
SNCR	-semplicità impiantistica -bassi costi di investimento e di gestione	-efficienza di abbattimento =50% -possibilità di fughe di ammoniacca
SCR	-alta efficienza (~ 80%) -rischio minimo di fughe di ammoniacca	-elevati costi di investimento e di gestione -pericolo di avvelenamento del catalizzatore -complessità impiantistica

Metalli pesanti

Sistemi	Vantaggi	Svantaggi
Carboni attivi	-bassi costi di investimento e di gestione -eliminazione contemporanea anche di PCDD/PCDF -bassi consumi di reagente	-richiede un filtro a maniche successivo -limite superiore di temperatura di utilizzo -necessità di stabilizzazione delle polveri residue
Lavaggio acido	multifunzionale	-necessità di una torre di lavaggio -necessità di un trattamento acque

Tecnologie di depurazione fumi



- 1: Elettrofiltro
- 2: Reattore a secco
- 3: Filtro a maniche
- 4: Scambiatore fumi/fumi
- 5: Bruciatore a gas naturale
- 6: Reattore catalitico
- 7: Camino

Un esempio di linea di trattamento fumi con reattore a secco e SCR è composta dai seguenti elementi:

- elettrofiltro per l'eliminazione delle ceneri di combustione;
- reattore a secco per l'abbattimento dei gas acidi con iniezione di e carbone attivo per l'adsorbimento di microinquinanti;
- filtro a maniche per l'eliminazione di ceneri fini e dei sovralli di reazione acida;
- scambiatore fumi/fumi e unità di riscaldamento a gas naturale per il raggiungimento delle temperature di processo SCR richieste;
- reattore catalitico SCR per l'abbattimento degli ossidi di azoto con l'iniezione di ammoniacca in soluzione acquosa al 25%.

Tecnologie di depurazione fumi

Di seguito una serie di dati sui consumi specifici secondo un'indagine effettuata su impianti di incenerimento in esercizio:

Abbattimento di NO_x (sistema SNCR):

Ammoniaca: 0,3-1,2 kg/t RSU

Abbattimento gas acidi a secco o semisecco:

Ca(OH)₂ : 7-20 kg/t RSU

NaHCO₃ (alternativa): 14-22 kg/t RSU

Abbattimento gas acidi ad umido:

NaOH: 0.7-5 kg/t RSU

Depurazione acque da abbattimento gas acidi ad umido:

Ca(OH)₂ : 3,5-4 kg/t RSU

FeCl₃: 0,1-0,3 kg/t RSU

Polielettrolita: 0,01-0,03 kg/t RSU

Demineralizzazione:

NaOH: 0,7-5 kg/t RSU

HCl: 0,05-0,9 kg/t RSU

Abbattimento fine di diossine e metalli pesanti:

Carbone attivo in polvere: 0,09-0,5 kg/t RSU

Additivi per caldaia: 0,003-0,090 kg/t RSU

Processo NEUTREC

Il processo NEUTREC (NEUTralizzazione e RECupero) è un processo SOLVAY-BICAR di depurazione fumi al bicarbonato di sodio con recupero dei sali sodici residui. Il processo avviene integralmente a secco iniettando pneumaticamente il reagente macinato nei gas di combustione e raccogliendo i prodotti di reazione in un depolveratore finale.

Condizioni operative:

- Temperatura dei gas $>140^{\circ}\text{C}$
- Tempi di contatto gas reattivo > 2 secondi
- Filtro a maniche adeguato
- Prodotto a granulometria adattata

Il riciclaggio dei prodotti sodici residui può avvenire solo in impianti dotati di doppia filtrazione (elettrofiltro più filtro a maniche) dato che in questo modo si riescono a separare le ceneri volanti dai sali sodici residui. I sali sodici residui vengono trasformati con un processo di purificazione in una salamoia satura di sali sodici misti e quindi riutilizzati nell'industria chimica.

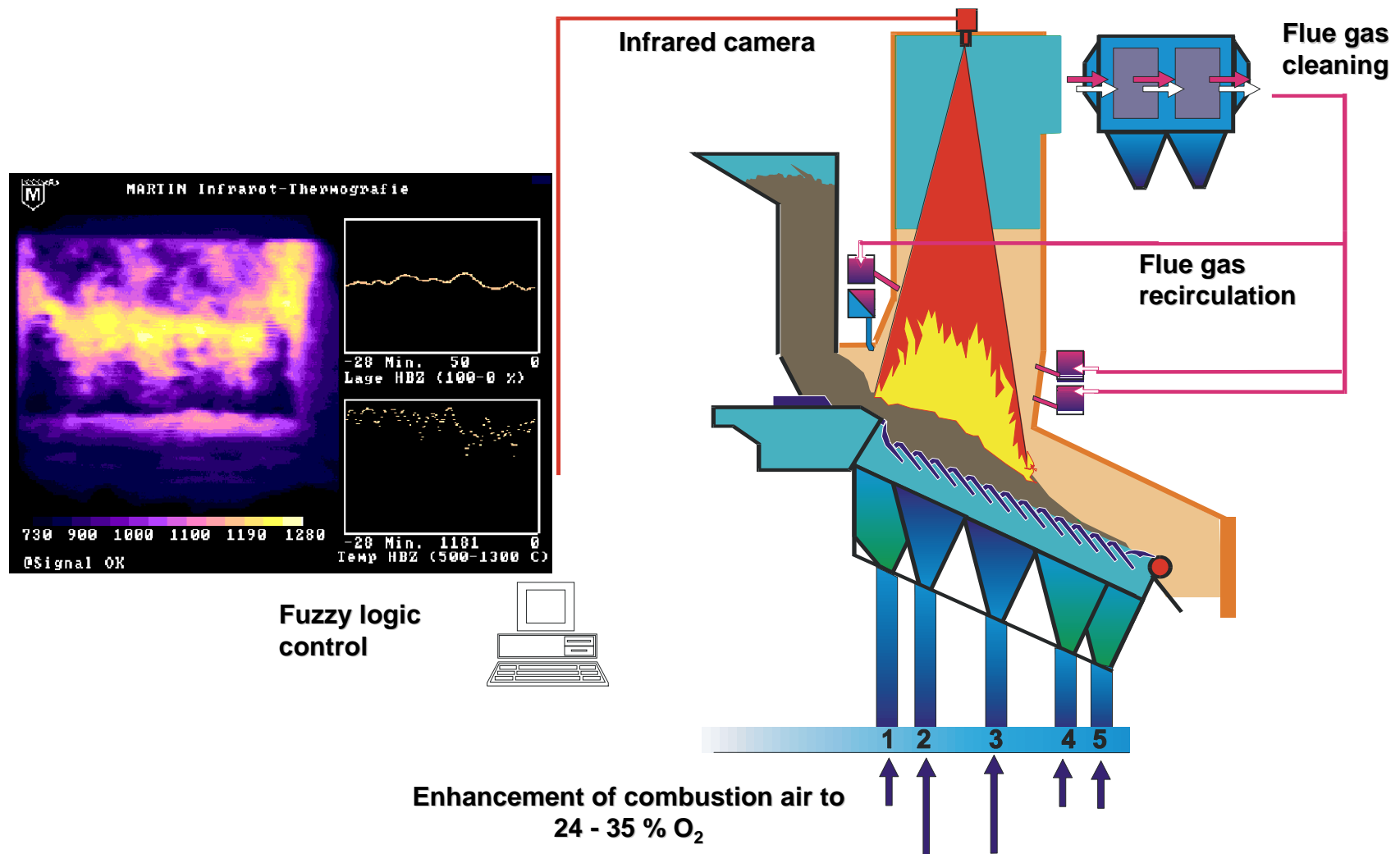
Tra i processi innovativi sono da annoverare tutti quelle modificazioni ai processi convenzionali o tutte quelle tecnologie che ad oggi presentano ancora una condizione di “non consolidato” e che risultano quindi essere presenti sul mercato allo stato di sviluppo o sperimentale, o di impianti pilota o ancora di impianti in scala industriale non supportati da sufficienti dati di funzionamento:

- processi di pirolisi;
- processi di gassificazione;
- processi di pirogassificazione;
- processo Thermoselect™;
- processi a base di arco di plasma;
- processi di ossicombustione o di combustione in arricchimento di ossigeno (Syncom™)

Syncom™:

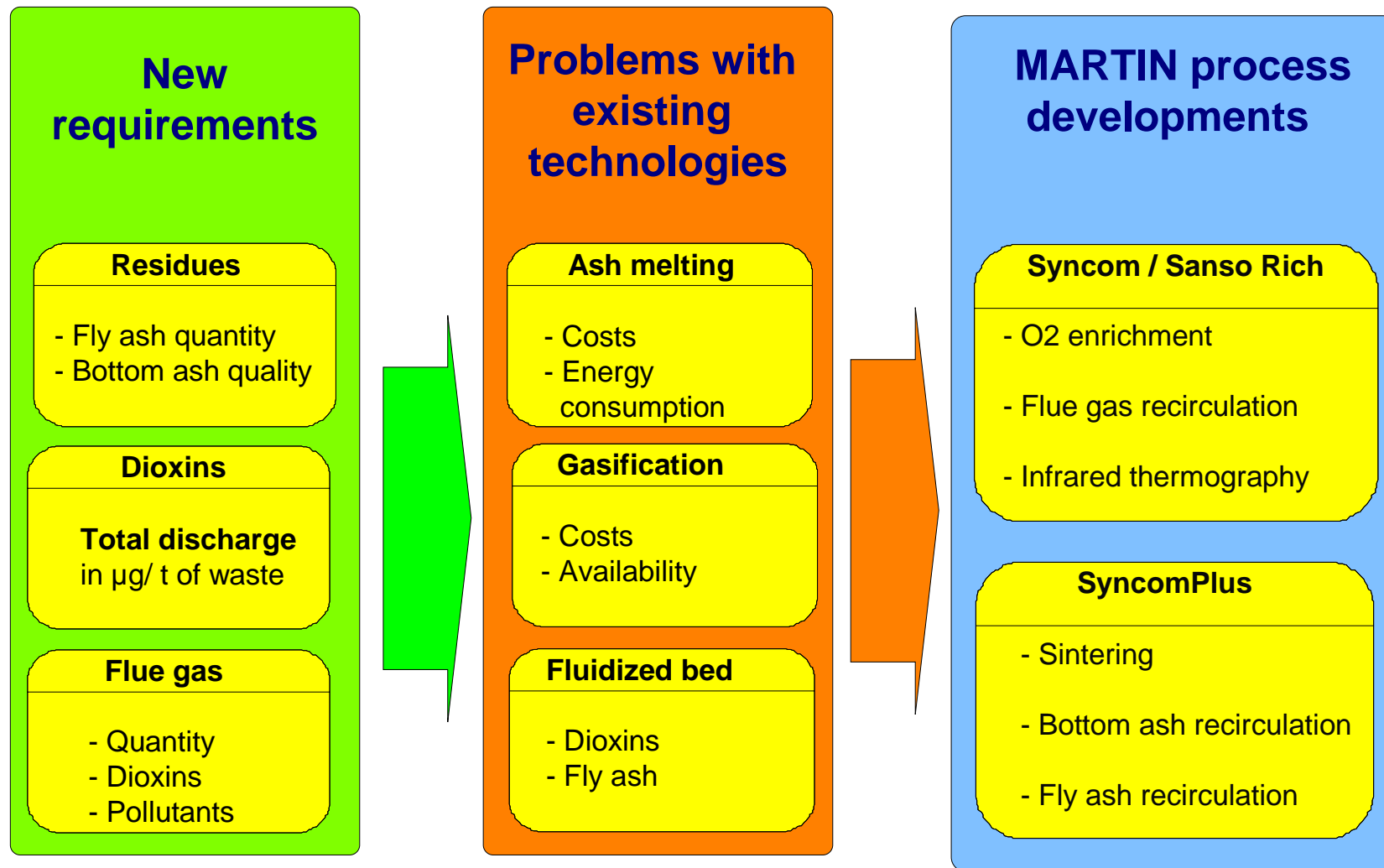
Ricircolo dei fumi nel forno (come aria secondaria)
accoppiato con arricchimento parzializzabile di
ossigeno

Processi innovativi

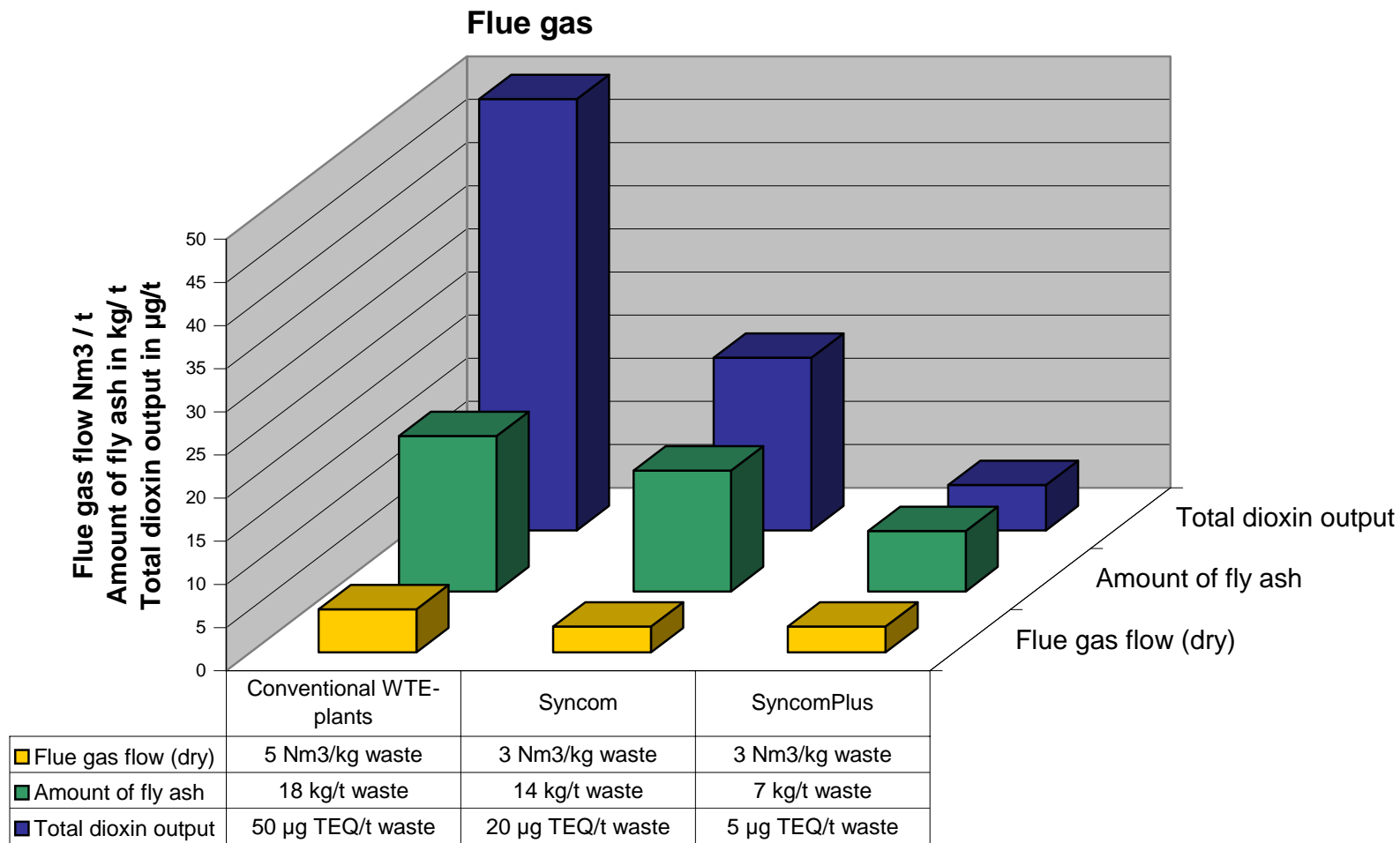


Syncom™:

Applicabilità alle esigenze del mercato Giapponese

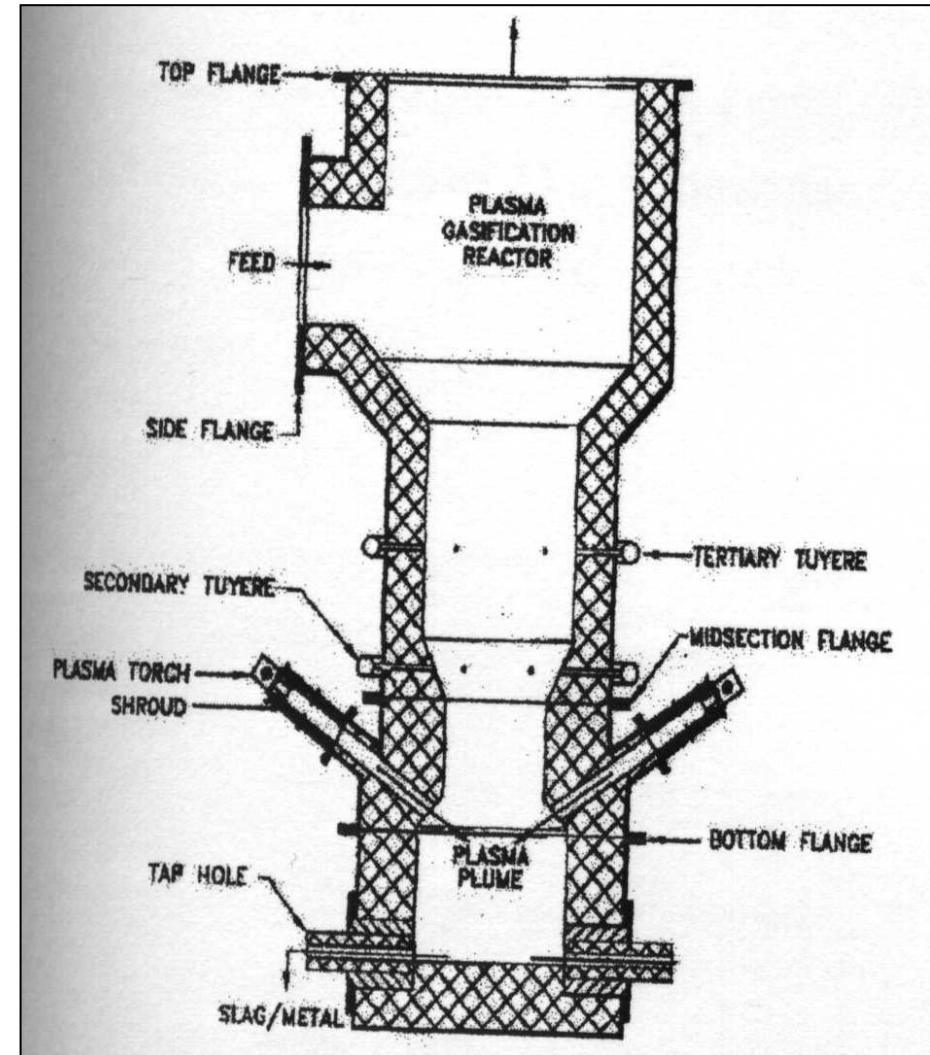
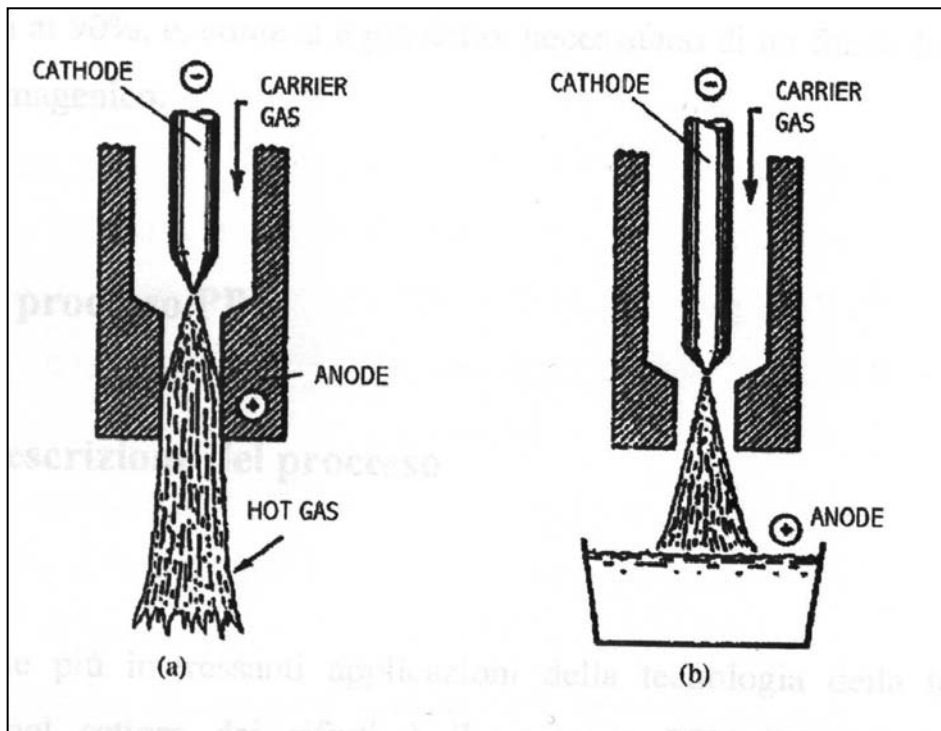


Syncom™:
Effetti sugli output di matrici inquinanti



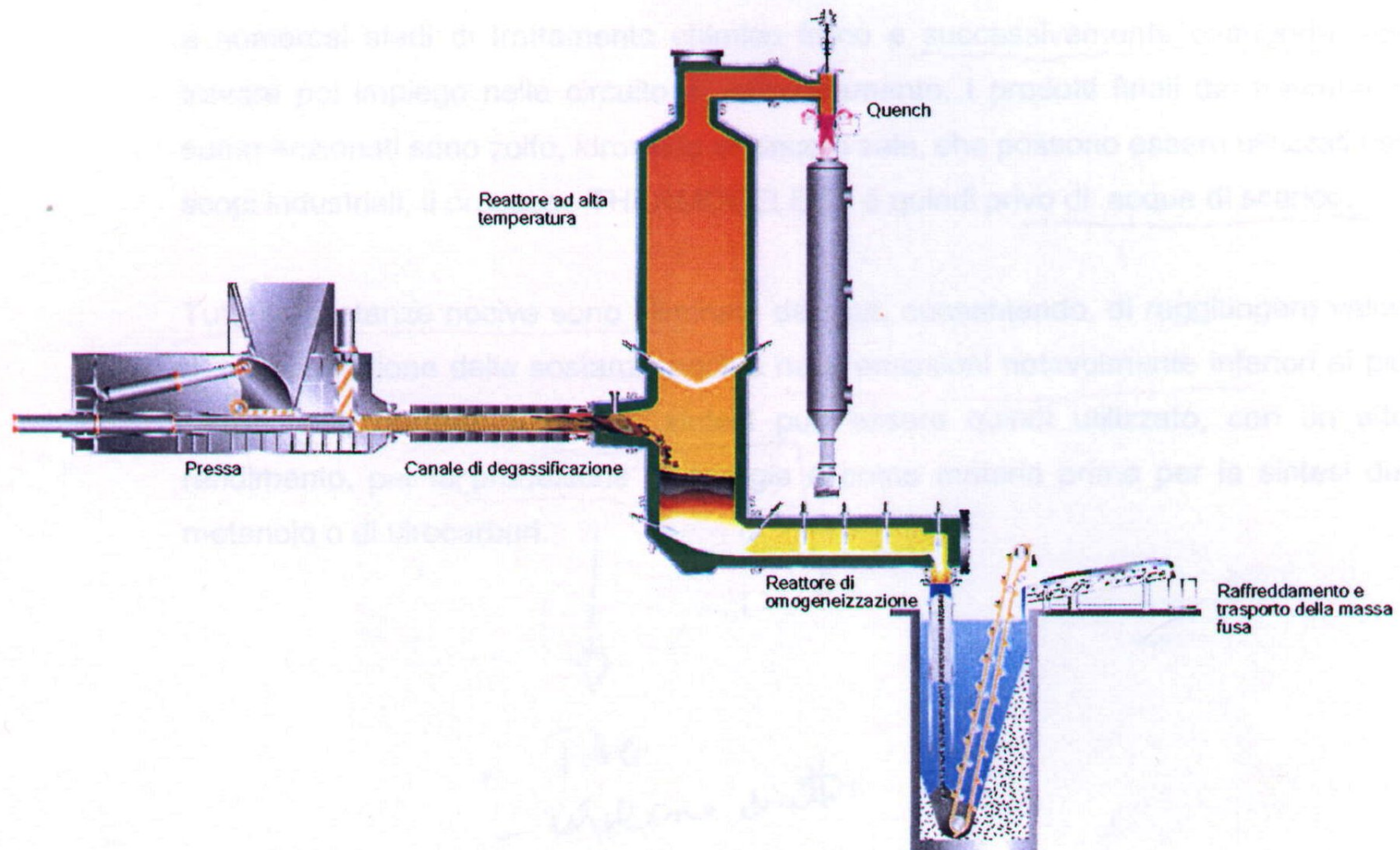
Processi al plasma.

- Alte temperature generate per effetto dell'arco elettrico.
- Applicazioni di arco trasferito e arco non trasferito.
- Elevata efficienza di degradazione.
- Scorie allo stato vetroso.
- Produzione di gas ad alto potere calorifico per impieghi di recupero indiretto.
- Elevati costi di smaltimento.
- Bassa resa energetica complessiva.
- Problemi tecnologici sui refrattari.



Thermoselect™:

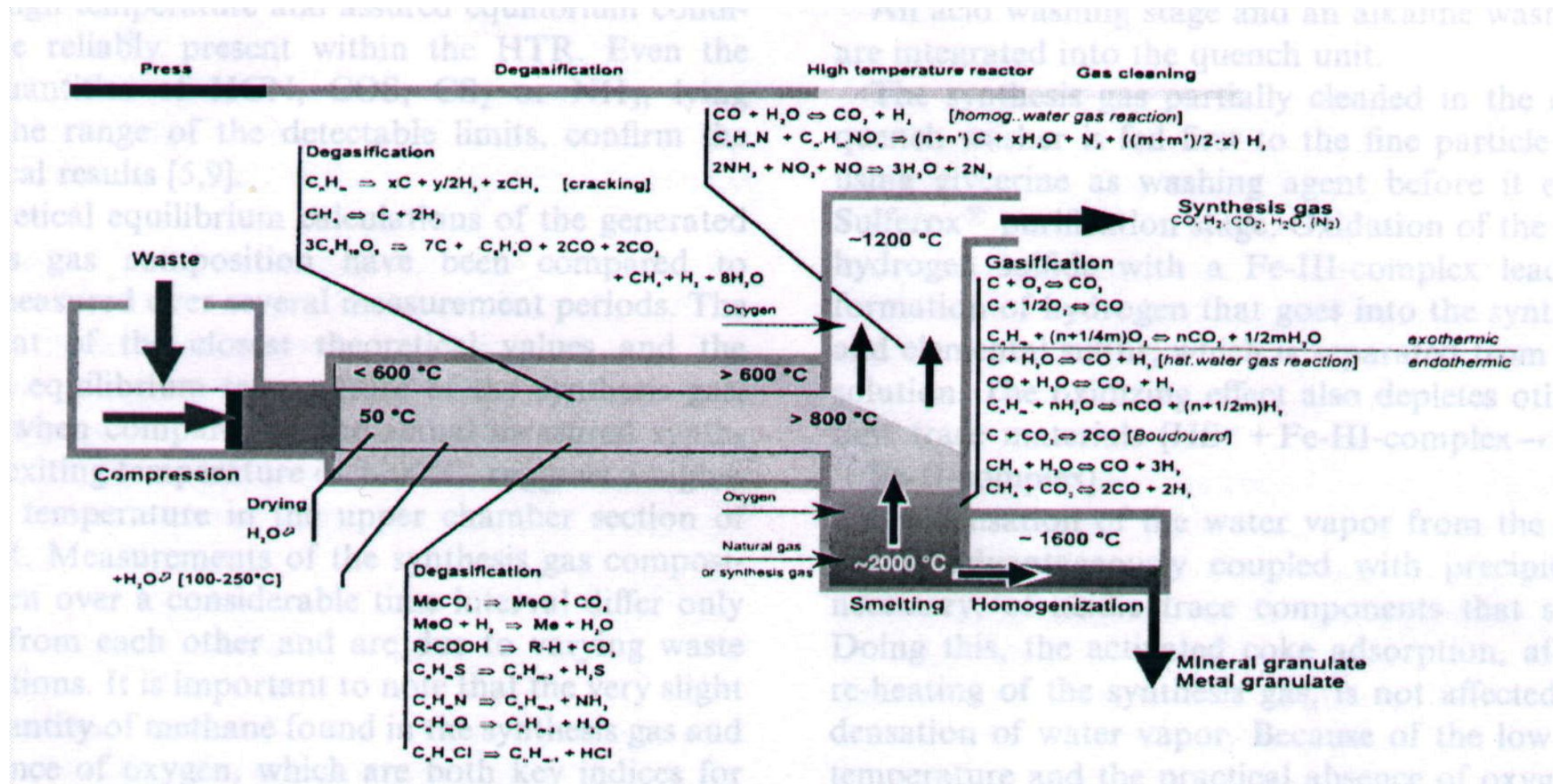
Processo di gassificazione integrato con ciclo di vetrificazione scorie, con trattamento dei gas di risulta con semplice quench



Thermoselect™:

Processo che presenta problemi di produzione di IPA invece di diossine, per effetto delle reazioni che avvengono nel reattore di quenching.

Processi innovativi



Trattamenti prodotti solidi di risulta

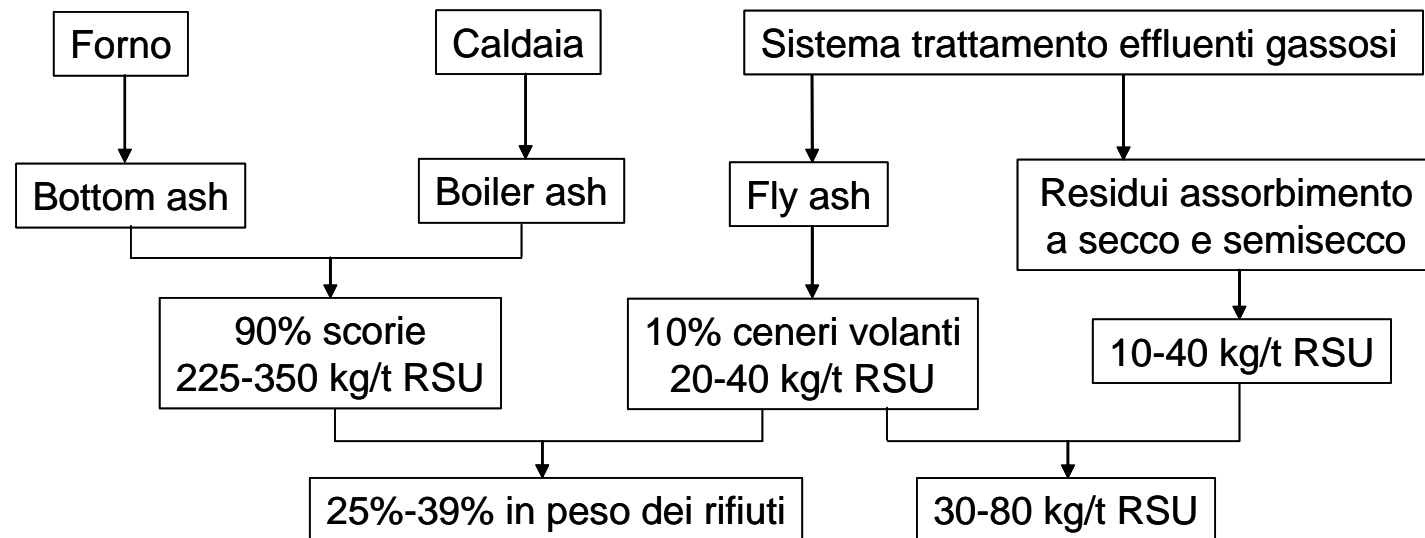
Effluenti solidi

I residui solidi di un impianto di incenerimento sono pari a circa il 20-30% in peso ed il 10-15% in volume del rifiuto solido grezzo in ingresso con un peso specifico dell'ordine dei 2,2-2,7 t/m³.

Le tipologie di residui solidi sono essenzialmente:

- 1) ceneri e le scorie raccolte nel forno e nella caldaia a recupero
- 2) ceneri volanti provenienti dai trattamenti di depurazione dei fumi della combustione
- 3) prodotti di reazione ed eccesso di reagenti provenienti dal sistema di trattamento dei fumi

Le caratteristiche qualitative e quantitative dei residui prodotti sono estremamente legate alla natura del combustibile, alla modalità di combustione ed alla tipologia del sistema di controllo delle emissioni.



Trattamenti prodotti solidi di risulta

1) Bottom e Boiler ash

→ RIFIUTI SPECIALI NON PERICOLOSI

Costituite da frazione inerte (composti inorganici) con piccoli quantitativi di materiale incombusto (di solito al di sotto del limite imposto del 3% - DM 503/97 Direttiva CE/2000/76).

La bassa presenza di incombusti è un indice del buon andamento del processo di combustione.

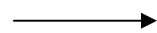
Sono classificate come rifiuti speciali non pericolosi e possono essere avviate alla valorizzazione nei cementifici e nel settore delle costruzioni stradali e infrastrutturali o messe in discarica.

I materiali ferrosi possono essere riciclati dopo separazione magnetica

Le scorie prodotte nel forno vengono raccolte in una vasca di spegnimento e contengono normalmente un contenuto di umidità pari a circa il 25%, l'umidità residua impedisce la dispersione area delle frazioni più fini.

Trattamenti prodotti solidi di risulta

2) Fly ash



RIFIUTI SPECIALI PERICOLOSI

Costituite dalle polveri di combustione trasportate dai fumi, di granulometria notevolmente più ridotta ed uniforme rispetto a quella delle scorie.

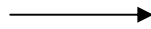
Contengono metalli pesanti (soprattutto piombo, cadmio, zinco) e composti organici adsorbiti sulla superficie. I metalli tossici infatti tendono a volatilizzare durante la combustione per poi ricondensare lungo la linea fumi concentrandosi sulle frazioni più fini del particolato.

Sono classificate come rifiuti speciali pericolosi.

Devono essere collocate in discarica per rifiuti pericolosi o inertizzate e poste in discarica per rifiuti non pericolosi.

Trattamenti prodotti solidi di risulta

**3) Prodotti di reazione e
eccesso di reagenti**



RIFIUTI SPECIALI PERICOLOSI

Tali residui dipendono principalmente dalla tipologia di trattamento prevista. Nei sistemi di assorbimento a secco o semisecco i quantitativi dipendono dall'eccesso di reagente alcalinizzante dosato, quantitativi maggiori per impianti a secco in cui l'assenza della fase liquida determina la necessità di utilizzare eccessi più elevati di reagente.

Metodo di trattamento molto simile a quello previsto per le fly ash.

L'inertizzazione, normalmente attuata mediante cementazione, risulta in questo caso più difficoltosa per la presenza di sali (cloruri e solfati) che contrastano la reazione del cemento per cui spesso si ricorre allo smaltimento in discarica.

Nel caso di impianti utilizzanti il bicarbonato di sodio come reagente è possibile il recupero dei prodotti di reazione, il cui contenuto è prevalentemente cloruro e solfato di sodio, riutilizzabili in impieghi industriali, destinando allo smaltimento solo una quota residua inferiore al 10 % in peso.

Trattamenti prodotti solidi di risulta

Al fine di individuare la forma di gestione più corretta dal punto di vista ambientale, le scorie vanno caratterizzate analiticamente (caratteristiche fisiche e chimiche) riguardo, in particolare, al contenuto di sostanze pericolose e successivamente individuato il sistema di gestione appropriato in accordo alla normativa vigente.

La tecnica più largamente impiegata risulta essere l'inertizzazione, più propriamente detta stabilizzazione e solidificazione, che permette lo smaltimento dei residui in discariche per rifiuti non pericolosi rendendo lo smaltimento economicamente più vantaggioso.

Processi di stabilizzazione e solidificazione (Inertizzazione)

Hanno lo scopo di ridurre sensibilmente il rilascio delle sostanze inquinanti presenti nel residuo solido migliorandone anche le caratteristiche fisiche e la manipolabilità. Sono suddivisi principalmente in processi a base di reagenti inorganici (cemento, calce, argilla), a base di reagenti organici (sostanze termoplastiche, polimeri organici, composti macroincapsulanti) e processi di vetrificazione.

Trattamenti prodotti solidi di risulta

Processi a base di cemento: sfruttano il normale fenomeno di presa e indurimento del legante idraulico per intrappolare il rifiuto nella matrice cementizia.

Vantaggi:

- Compatibilità nei confronti dei materiali umidi
- Mantenimento delle capacità leganti anche in presenza di quantità elevate di aggregati minerali
- Reazione alcalina in seguito al contatto con acqua con conseguente immediata riduzione della solubilità di molte specie chimiche inorganiche e rallentamento della velocità di reazione delle specie organiche
- Formazione di Sali insolubili con molti cationi e anioni potenzialmente tossici grazie alla disponibilità di Ca, Al, Si nei leganti cementizi
- Continua evoluzione nel tempo della struttura interna con potenziale incremento delle capacità di immobilizzo
- Controllo delle proprietà meccaniche
- Possibilità di applicazioni pratiche in alcuni casi
- Basso costo e ampia disponibilità di materie prime

Trattamenti prodotti solidi di risulta

I trattamenti a base di cemento consistono nel miscelare i residui con cemento, acqua e altri additivi sfruttando le complesse reazioni che avvengono tra i vari componenti dell'impasto. I meccanismi di fissazione dei metalli sono sia di tipo chimico che fisico e si possono classificare in:

- **Precipitazione** – precipitazione chimica sotto forma di specie a bassa solubilità. I metalli sono principalmente precipitati come idrossidi, silicati o solfuri e meno frequentemente come carbonati, fosfati o vari complessi. I prodotti che si ottengono sono per lo più complessi inorganici poco solubili.
- **Adsorbimento** – sfrutta il fenomeno dell'incremento della superficie specifica prodotto dall'idratazione dei leganti cementizi. Questo permette la fissazione di certe molecole organiche e rende possibile il verificarsi di reazioni di adsorbimento che portano alla formazione di composti a bassa solubilità
- **Scambio ionico** – coinvolge tutti i meccanismi di fissazione dei metalli. Nella maggior parte dei casi è un processo reversibile e il metallo può essere di nuovo liberato. Un meccanismo di questo tipo è quello che lega i metalli pesanti alla matrice silicea della struttura cementizia
- **Incapsulamento** – meccanismo di tipo fisico perché non modifica la struttura chimica del rifiuto realizzando ugualmente una forma meno mobile. Il grado di protezione ambientale dipende dalla matrice e dalla sua capacità di isolare il rifiuto, funzione soprattutto della permeabilità della matrice stessa

Trattamenti prodotti solidi di risulta

Processi a base di reagenti organici:

A base di sostanze termoplastiche. Sostanze capaci di indurire o rammollire reversibilmente con la variazione della temperatura. I materiali più utilizzati sono asfalto e bitume. Il trattamento avviene mescolando ad alta temperatura (130-230°C) le scorie preventivamente essiccate con gli additivi termoplastici. La miscela viene poi lasciata raffreddare. Questa tecnica è molto resistente all'attacco da parte di soluzioni acquose liscivianti e alla degradazione microbica.

Svantaggi:

- Non applicabile in presenza di sostanze chimiche organiche, che fungono da solventi nei confronti dei leganti, e di forti ossidanti, che reagiscono con la matrice organica causando deterioramenti e possibili reazioni di combustione o esplosione in presenza di solfuri o idrocarburi solidi alle elevate temperature
- Compatibilità solo con contaminanti che non volatilizzano a basse temperature
- Necessità di essiccare le scorie

Trattamenti prodotti solidi di risulta

A base di polimeri organici. Questi processi consistono nel miscelare alle scorie un monomero (urea formaldeide, poliestere, resine fenoliche...) che, in presenza di un catalizzatore, polimerizza incapsulando nella struttura le sostanze contenute. Si ottiene un prodotto non infiammabile, necessita di una piccola quantità di additivi riducendo il volume del materiale prodotto rispetto ai trattamenti a base di cemento. Può essere applicato per un vasto range di PH.

Svantaggi:

- Viscosità del materiale che rende difficile la miscelazione
- Generazione di fumi potenzialmente tossici
- Facilmente biodegradabile se esposto all'ambiente
- Possibile formazione di percolato qualora non tutta l'acqua venga intrappolata

A base di composti macroincapsulanti. Formazione di un prodotto finale costituito da una struttura composta di resine organiche. Le particelle inquinanti vengono agglomerate da resine termoindurenti e incapsulate in resine termoplastiche. Vengono usate ad esempio resine polibutadieniche fuse che formano con il rifiuto una miscela che dopo raffreddamento viene ricoperta con polietilene ad alta densità fuso in modo da creare un involucro esterno di notevole resistenza.

Trattamenti prodotti solidi di risulta

Vetrificazione: processo adatto a rifiuti altamente pericolosi, vengono miscelati con silice e fatti fondere a temperature superiori ai 1200°C. La fusione e successiva solidificazione della massa del materiale comportano la formazione di un materiale vetroso altamente incozzato. Questa tecnologia permette inoltre la separazione dei metalli per volatilizzazione.

Processi ad arco plasma: il processo realizza una pirolisi senza combustione a temperature elevatissime (10000-20000°C) utilizzando come fonte di energia l'arco elettrico. Tale processo porta alla formazione di un materiale praticamente inerte che presenta un ottimo comportamento secondo il test di eluizione.

Trattamenti prodotti liquidi di risulta

Effluenti liquidi

In un impianto d'incenerimento con recupero termico, gli effluenti liquidi sono i seguenti:

- effluenti provenienti dallo spegnimento delle scorie
- effluenti provenienti dal trattamento ad umido dei fumi
- effluenti che si accumulano sul fondo della fossa
- effluenti provenienti dalle rigenerazioni e dai lavaggi delle resine negli impianti di trattamento dell'acqua di alimento delle caldaie
- effluenti provenienti dallo scarico continuo delle caldaie e delle eventuali torri di raffreddamento
- effluenti provenienti dai servizi generali, igienici e sociali

Nelle acque provenienti dallo spegnimento delle scorie si ritrovano solidi sospesi inerti, composti organici incombusti e sali solubili quali cloruri e solfati. Sono sottoposte a specifico trattamento chimico fisico.

Trattamenti prodotti liquidi di risulta

Nei sistemi di assorbimento ad umido il residuo prodotto è il fango risultante dalla depurazione del liquido di lavaggio. Le soluzioni più comunemente adottate prevedono un lavaggio con acqua o con soluzioni di soda ed un successivo trattamento di neutralizzazione e precipitazione chimica dello spurgo.

Le acque che si accumulano sul fondo della fossa sono costituite prevalentemente da sostanze organiche e sono da destinare al trattamento biologico da effettuarsi in idoneo impianto

Lo smaltimento delle acque è sottoposto alla normativa vigente relativa agli scarichi reflui industriali in corpi idrici o in fognatura.

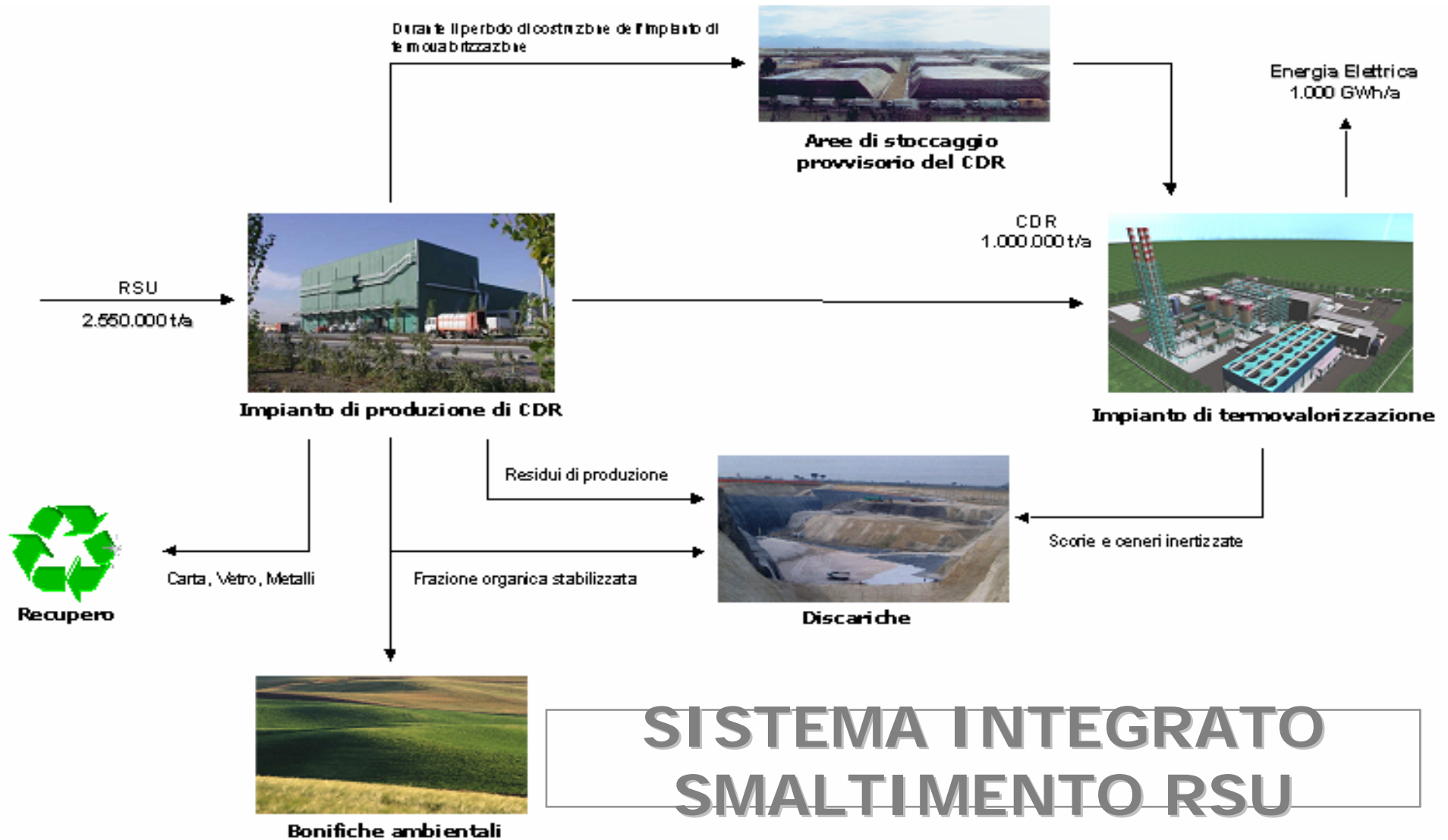
Consumi totali di acqua, stime produzioni specifiche:

-Impianto dotato di torri di lavaggio ad umido adibite all'abbattimento di gas acidi 2,2-3,5 m³/t rsu

-Impianto dotato di lavaggio ad umido di semplice rifinitura (a valle di lavaggio gas acidi con sistema a secco o semisecco): 0.38-0.7 m³/t rsu

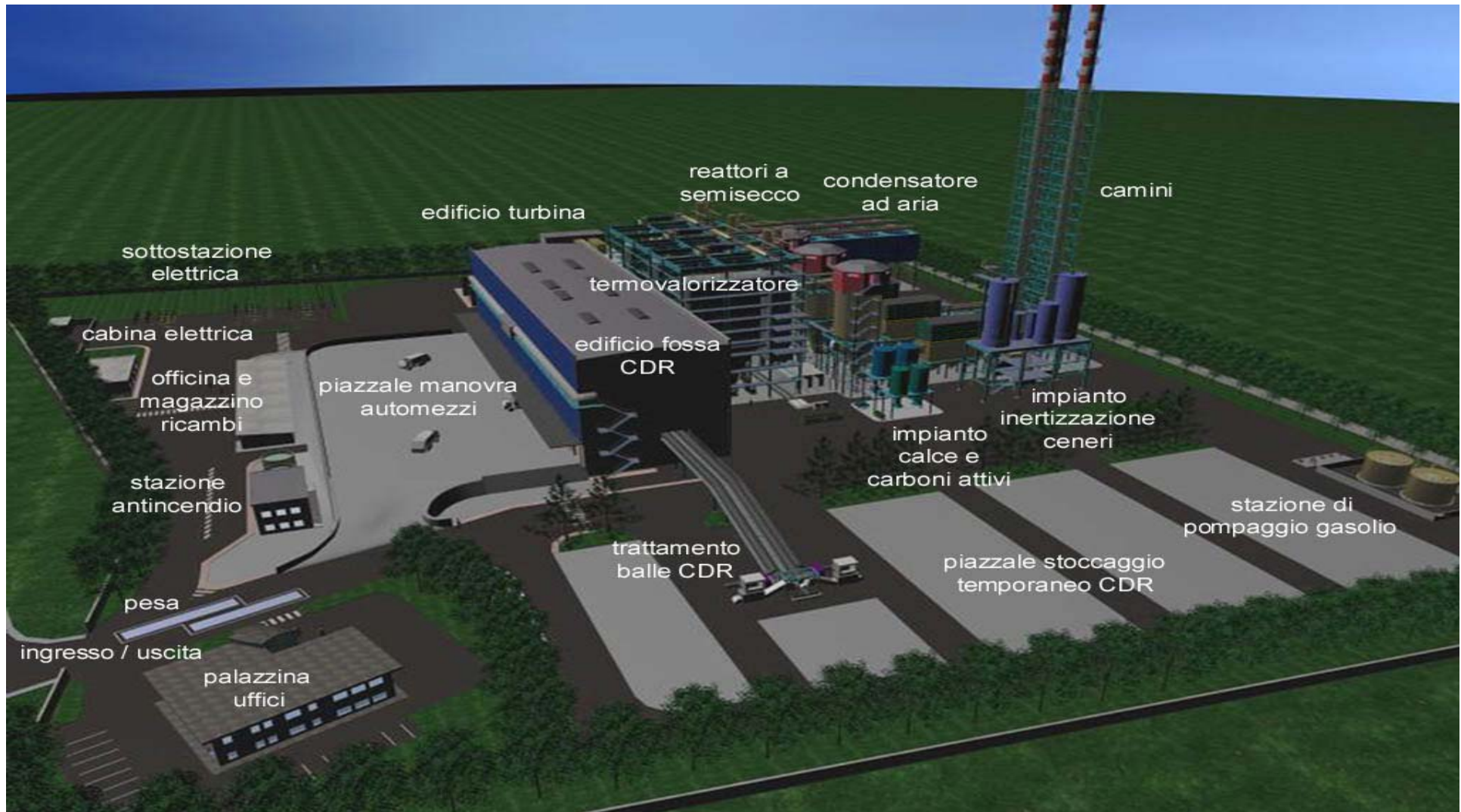
-Impianto privo di lavaggio ad umido: 0.3-0.5 m³/t rsu

Esempi di Impianti



SISTEMA INTEGRATO SMALTIMENTO RSU

Esempi di Impianti



Esempi di Impianti

