

ASSOCIAZIONE D'AMBITO TORINESE PER IL GOVERNO DEI RIFIUTI

Verifica della fattibilità di un impianto di trattamento termico dei rifiuti a tecnologia innovativa nella Provincia di Torino

Novembre 2009



Via Pio VII, 9

10135 Torino

www.atorifiutitorinese.it

Il coordinamento e la supervisione scientifica dello Studio sono stati del ***Prof. Giuseppe Genon del Politecnico di Torino - DITAG****.*

Ne hanno curato la redazione:

*l'****ing. Vita Tedesco*** *(area tecnica ATO-R)*
*l'****ing. Palma Urso*** *(area tecnica ATO-R)*

*Ha collaborato all'indagine sulle tecnologie l'i****ng. Carlotta del Taglia****.*

*Si ringraziano l'****arch. Paolo Foietta****, presidente di ATO-R e i componenti del Consiglio di Amministrazione, il* ***dott. Riccardo Civera****, direttore tecnico di ATO-R e il personale tutto.*

Premessa

La missione a cui lavora L'Associazione d'Ambito ATO-R dalla sua costituzione, è la realizzazione di un sistema impiantistico sicuro, consolidato, che superi finalmente lo smaltimento in discarica.

Tale impiantistica è stata individuata nella Programmazione Provinciale (PPGR 2006) nella termovalorizzazione[1]*, ma lo stesso PPGR considera fondamentali, per l'attuazione del programma la "promozione, sviluppo e divulgazione di tecnologie alternative"* [2]*.*

In data 15 luglio 2008 il Consiglio Provinciale di Torino ha approvato una mozione nella quale "invita ATO-R a verificare la fattibilità (localizzativa ed industriale) di impiantistica basata su tecnologia innovativa (in primis la Pirolisi ed altre tecnologie certificate) e proceda al più presto all'avvio di sperimentazioni significative (…); la scelta relativa all'utilizzo a regime di tale tecnologia è naturalmente subordinata alla verifica dei risultati tecnico ambientali ed economici della sperimentazione effettuata".

A questa domanda corrisponde tuttavia un'offerta incerta e tutta da verificare; ciclicamente sono proposte sui media nuove soluzioni impiantistiche al tema dello smaltimento dei rifiuti; a volte sono presentate dai sostenitori come soluzioni "salvifiche" che consentono di superare gli impatti ambientali dei sistemi tradizionali. Spesso, altrettanto velocemente, tali impianti "spariscono" dai giornali e da internet, senza lasciare tracce e soprattutto non lasciando impianti realizzati e funzionanti.

In risposta alla domanda espressa dalla Provincia di Torino, e per fare chiarezza sulle effettiva efficacia ed efficienza di nuove tecnologie di smaltimento con recupero energetico, l'Associazione d'Ambito Torinese ha deciso di effettuare questo studio.

Obiettivo è verificare sulla base di esperienze significative di operatori presenti sul mercato:

- *la possibilità di realizzare uno o più impianti di trattamento termico per rifiuti urbani indifferenziati a cosiddetta "tecnologia innovativa" ovvero alternativa all'incenerimento;*
- *come tali tecnologie possano parzialmente rispondere alle esigenze di smaltimento dell'ambito tenendo conto delle caratteristiche territoriali, di programmazione e di produzione dei rifiuti della Provincia di Torino.*

[1] L'impianto del Gerbido è in corso di realizzazione; la realizzazione del secondo impianto, localizzato dall' ATO-R a Settimo Torinese, è ora sospesa in attesa delle indicazioni del nuovo Programma provinciale di gestione dei rifiuti.
[2] PPGR 2006 - cap. 4.2.1

Lo studio, coordinato dal Prof. G. Genon del Politecnico di Torino, e realizzato dalle Ing. P. Urso e V. Tedesco dell'ATO-R, rappresenta una risposta esaustiva a questioni particolarmente discusse e controverse.

Lo studio consente di verificare:

- *l'affidabilità valutata sulla base del numero di impianti attualmente operativi su scala commerciale che trattino principalmente rifiuti urbani indifferenziati con una garanzia di esercizio di almeno 300 giorni/anno;*
- *gli aspetti ambientali: emissioni in atmosfera, in termini di concentrazione dei contaminati e volume di fumi rilasciati; quantità e qualità dei residui solidi prodotti;*
- *gli aspetti economici: entità del capitale da investire, costi di gestione, livello orientativo della tariffa di trattamento applicabile;*
- *il recupero energetico: quantità di energia elettrica e termica prodotta e ceduta all'esterno al netto dell'autoconsumo dell'impianto, rendimenti energetici;*
- *le caratteristiche localizzative dell'impianto (sarà successivamente verificata la disponibilità del territorio-amministrazioni locali ad ospitare un tale impianto).*

Pertanto lo studio, che costituisce una risposta, approfondita e motivata e, come si evince dalla lettura e dalle conclusioni, sostanzialmente positiva, è oggi consegnato alla Programmazione Provinciale.

Il 15 settembre 2009 la Giunta provinciale di Torino[3] ha approvato gli indirizzi per la revisione del Programma provinciale di gestione dei rifiuti, dando l'avvio alle attività operative per la redazione del nuovo Programma.

E' proprio in questa sede, che dovrà essere assunta la scelta di dare corso all'utilizzo di nuove tecnologie di smaltimento con recupero energetico per un'eventuale necessità residua all'impiantistica di Termovalorizzazione.

Paolo Foietta

Presidente ATO-R

[3] Delibera di Giunta Provinciale n. 176-33791 del 15 settembre 2009.

INDICE

1 OBIETTIVI E METODO DELLO STUDIO 8

1.1 obiettivi dello studio 8

1.2 Il metodo seguito per l'acquisizione delle informazioni 9

1.2.1 La ricerca di letteratura 9

1.2.2 L'indagine esplorativa 10

2 CONTESTO DI RIFERIMENTO 12

2.1 Il Programma Provinciale di Gestione dei Rifiuti vigente 12

2.1.1 Il termovalorizzatore del Gerbido 12

2.1.2 Il termovalorizzatore della Zona Nord 13

2.2 la revisione del programma provinciale di gestione dei rifiuti 13

2.3 il ruolo dell'ato-r: il piano d'ambito di prima attivazione 14

3 IL QUADRO NORMATIVO 16

3.1 D.Lgs. n. 133/2005 - la normativa in tema di incenerimento dei rifiuti 16

3.2 D.Lgs. 59/2005 - la normativa in materia di prevenzione e riduzione integrate dell'inquinamento (AIA-IPPC) 20

4 TECNOLOGIE INNOVATIVE DI TRATTAMENTO TERMICO DEI RIFIUTI 22

4.1 Gassificazione 25

4.2 Pirolisi 27

4.3 I processi combinati 29

4.4 Gassificazione al plasma 30

4.5 Gli impianti a tecnologia innovativa esistenti 31

5 LE TECNOLOGIE PRESE IN ESAME 36

5.1 Impianti di Gassificazione 39

5.1.1 Nippon Steel 39

5.1.2 Ebara 42

5.1.3 Ecologia Informatica 43

5.1.4 Energos 45

5.1.5 Enerwaste 47

5.1.6 Entech-IET Energy 49

5.1.7 Hitachi Zosen 50

5.1.8 Kawasaki Heavy Industries 52

5.1.9 Kobelco Eco-Solutions 52
5.1.10 Lurgi- Envirotherm 55
5.2 Pirolisi 57
5.2.1 Thide Environnement 57
5.2.2 TechTrade- ICOM GEIE 59
5.3 Processi combinati 61
5.3.1 Compact Power 61
5.3.2 Mitsui-Babcock 62
5.3.3 Plasco Energy 64
5.3.4 TPF- Basse Sambre 65
5.3.5 PKA 66
5.3.6 Pyromex 67
5.3.7 Thermoselect 68
5.4 Torcia al plasma 71
5.4.1 AlterNRG- Hitachi Metals 71
5.4.2 StarTech 73
5.5 Altri processi 74
5.5.1 Inter Engineering 74
5.5.2 Tecnogranda 75
5.5.3 Vuzeta 76
6 ESITO DELLO STUDIO 77
6.1 I rifiuti alimentati 77
6.2 I dati tecnici 78
6.3 Recupero energetico 79
6.3.1 Motori a combustione interna 81
6.3.2 Cicli combinati gas vapore 82
6.3.3 Celle a combustibile 84
6.3.4 Recupero energetico: confronto tra incenerimento e tecnologie innovative 84
6.3.5 Efficienza energetica degli impianti presi in esame 86
6.4 Aspetti ambientali 87
6.4.1 Emissioni in atmosfera 88
6.4.2 Residui solidi 92
6.5 Aspetti economici 94
6.5.1 Costi di investimento 94
6.5.2 Costi di gestione 99
6.6 Prospettive di sviluppo delle tecnologie innovative 101
7 CONCLUSIONI 104

1 OBIETTIVI E METODO DELLO STUDIO

1.1 OBIETTIVI DELLO STUDIO

Il Programma di Gestione dei Rifiuti della Provincia di Torino (PPGR 2006), a cui ATO-R è chiamata a dare attuazione, prescrive non solo il superamento dello smaltimento in discarica, ma anche l'obiettivo di un sistema impiantistico sicuro, consolidato e orientato all'innovazione tecnologica; in particolare il PPGR al cap. 4.2.1 considera fondamentali per l'attuazione del programma la "promozione, sviluppo e divulgazione di tecnologie alternative".
In data 15-7-2008 il Consiglio Provinciale di Torino ha approvato una mozione nella quale:
"1) Invita la Giunta Provinciale a fornire chiare indicazioni ad ATO-R affinché verifichi la fattibilità (localizzativa ed industriale) di impiantistica basata su tecnologia innovativa (in primis la Pirolisi ed altre tecnologie certificate) e proceda al più presto all'avvio di sperimentazioni significative (per una dimensione di circa 60.000 t/a); la scelta relativa all'utilizzo a regime di tale tecnologia è naturalmente subordinata alla verifica dei risultati tecnico ambientali ed economici della sperimentazione effettuata.
2) invita l'ATO-R:
a. ad assumere tempestivamente le determinazioni di propria competenza per rendere intanto pienamente operativo il PPGR al fine di superare definitivamente il sistema dello smaltimento in discarica e uscire dalla fase di pre-emergenza.
b. a tenere conto delle risultanze della sperimentazione e della localizzazione effettuata sulle tecnologie innovative anche per quanto riguarda il dimensionamento degli impianti dedicati alla valorizzazione energetica del rifiuto."
In risposta alle esigenze di dare attuazione alla programmazione provinciale e allo specifico invito del Consiglio Provinciale, ATO-R, con Deliberazione di Assemblea n. 26 del 25-11-2008, ha avviato un'indagine esplorativa, condotta in collaborazione con il Politecnico di Torino nella persona del prof. Giuseppe Genon, finalizzata alla redazione di uno studio per verificare la sostenibilità tecnica, ambientale ed economica di impianti per la valorizzazione energetica di rifiuti urbani a tecnologia innovativa, ovvero diversa dalla tradizionale combustione del rifiuto tal quale o del CDR.
Tale esplorazione sarà preliminare e funzionale all'eventuale costruzione e gestione di impianti di tal genere nel territorio della Provincia di Torino, in seguito all'espletamento di procedure ad evidenza pubblica (forme di gestione che prevedano il finanziamento dell'intervento a carico del soggetto costruttore e gestore ad esempio concessione, project financing, ecc.).

Lo studio ha l'obiettivo di riassumere i dati raccolti autonomamente e quelli trasmessi dai gestori e/o detentori di tecnologie innovative di trattamento termico dei rifiuti e pervenire ad un panorama approfondito in merito agli aspetti tecnici, economici ed ambientali.
In particolare lo scopo è quello di:

- verificare se tali tecnologie possano rispondere alle esigenze di smaltimento di una parte del rifiuto urbano prodotto dall'Ambito tenendo conto delle caratteristiche territoriali, di programmazione e di produzione dei rifiuti della Provincia di Torino;
- verificare l'efficienza, l'economicità e la sostenibilità ambientale di tale tecnologia, valutando le esperienze significative di operatori presenti sul mercato che abbiano già realizzato e/o gestiscano impianti di tal genere che trattino rifiuti urbani, con emissioni inferiori rispetto alla termovalorizzazione e con un corrispettivo di smaltimento non superiore a quello di un termovalorizzatore.

Le risultanze del presente studio potranno essere utilizzate nell'ambito della revisione del vigente Programma Provinciale di Gestione dei Rifiuti, la cui procedura è stata recentemente avviata dalla Giunta provinciale; tale revisione, sulla base degli ultimi dati di produzione dei rifiuti rilevati dall'Osservatorio Provinciale dovrà definire potenzialità e tipologia degli impianti per lo smaltimento finale dei rifiuti.

1.2 IL METODO SEGUITO PER L'ACQUISIZIONE DELLE INFORMAZIONI

Per acquisire informazioni sulle tecnologie alternative all'incenerimento per il trattamento dei rifiuti urbani residui alla raccolta differenziata si è fatto ricorso a:

- ricerca bibliografica (atti di convegni, riviste specializzate, studi analoghi svolti o commissionati da Enti pubblici, ricerche di enti privati, materiale informativo di aziende che detengono i brevetti di nuove tecnologie, ecc.);
- documentazione inviata da Aziende che hanno risposto al comunicato pubblicato da ATO-R sul proprio sito e su due riviste scientifiche di settore (Rifiuti Solidi- Marzo-aprile 2009; Waste Management World- Maggio-giugno 2009).

1.2.1 La ricerca di letteratura

Sono numerosi gli studi, svolti o commissionati da enti pubblici che prendono in esame tecnologie alternative all'incenerimento dei rifiuti: la pirolisi, la gassificazione, l'arco al plasma, il cracking catalitico, etc.
In diverse parti degli Stati Uniti, autorità locali, contee e agenzie statali stanno esaminando attualmente proposte per una cosiddetta "conversione tecnologica".
Parecchie amministrazioni della California stanno valutando "tecnologie di conversione" alternative alle discariche: la città e la contea di Los Angeles, la città e la contea di Santa Barbara, l'Autorità dei rifiuti solidi di Salinas Valley, la Contea di Orange e le città di Tulare, di Sacramento, di San Jose, di San Diego e di Santa Cruz.
Il Dipartimento dei Lavori Pubblici della contea di Los Angeles sta lavorando fin dal 2004 con l'unità operativa competente per la gestione dei rifiuti della Contea e il sottocomitato consultivo per le tecnologie alternative (Alternative Technology Advisory Subcommittee); ha effettuato uno studio che ha preso in esame oltre 70 fornitori di tecnologie differenti e ha condotto una valutazione preliminare su circa 30 di esse. Al termine di questo lavoro, documentato in un Report datato ottobre 2007 [27], la Contea ha identificato 5 fornitori i cui impianti hanno dimostrato di poter trattare rifiuti urbani: Arrow Ecology and Engineering (digestione anaerobica), Changing World Technologies (depolimerizzazione termica), International Environmental Solutions (pirolisi), Interstate Waste Technologies (pirolisi/gassificazione ad alta temperatura), NTech Environmental (massificazione a bassa temperatura). Si attendono gli esiti di questa ultima fase dell'indagine [.

Di recente, in NordAmerica sono state svolte analoghe ricerche e ulteriori sono in corso di svolgimento, da parte delle Autorità dei rifiuti solidi di Connecticut e Delaware, New York City, Taughton, Massachusetts, Toronto, Ontario, Canada ed altri. Il Waste Board sta studiando le tecnologie alternative dal 2001 organizzando workshop e forum (CIWMB, 2001; CIWMB, 2001b; Williams, Jenkins et al., 2003; Hackett, Williams et al., 2004; Williams, 2007; Rapport, Zhang et al., 2008) [29].
Molti di questi studi sono stati commissionati a società di consulenza nei settori dell'ingegneria, delll'ambiente e della finanza, quale ad esempio l'ARI (Alternative Resources, Inc) che ha condotto gli studi su Los Angeles, Santa Barbara e New York.

Il DEFRA (Department for Environment Food and Rural Affairs, UK) ha prodotto il documento "Advanced Thermal Treatment of Municipal Solid Waste" [12] nell'ambito del progetto NTDP- New Technologies Demonstrator Programme (NTDP) volto a verificare la validità delle tecnologie innovative di trattamento termico quali alternativa allo smaltimento dei rifiuti in discarica; di tale documento si riportano nel presente studio alcuni interessanti risultati.

Un altro documento dal titolo "Costs of incineration and non-incineration – Energy from waste technologies" [13], utilizzato per la redazione del presente studio, è stato pubblicato nel gennaio 2008 dal Greater London Authority, l'ente che amministra la Grande Londra (i 32 borghi e la City of London): lo studio confronta i costi della produzione di energia dai rifiuti attraverso tecnologie di incenerimento e non a differenti scale e configurazioni. Lo studio considera in particolare tecnologie nuove ed emergenti, identificando i principali fattori che influenzano i costi di investimento e quelli operativi.

Nell'ambito del presente Studio, l principale documento di riferimento per l'individuazione delle Aziende che propongono tecnologie alternative all'incenerimento per il trattamento dei rifiuti urbani è stato il report "Gasification Processes for Generating Syngas" di Juniper [6], accreditata società inglese che offre consulenza a clienti privati e pubbliche amministrazioni in settori quali rifiuti, ambiente, energia rinnovabile, etc.
Lo studio, pubblicato in settembre 2007 e aggiornato al 01/09/2008, riporta un elenco e una breve descrizione delle aziende che propongono tecnologie che portano alla formazione di syngas: gassificazione convenzionale, gassificazione al plasma, pirolisi con formazione di syngas, nonché sistemi che utilizzano una combinazione dei differenti processi.
Le 137 Aziende prese in esame nel Report Juniper propongono 53 processi che vengono classificati come:

- Fully proven: tecnologia matura, applicazione commerciale
- Proven: tecnologia provata, anche a scala industriale ma che presenta dei limiti (es. taglia, tipologia di rifiuti in ingresso, etc)
- Demonstrated: tecnologia provata su scala pilota
- Conceptual: tecnologia per cui sono disponibili dati molto limitati
- Not rated: tecnologia per cui non sono disponibili informazioni sufficienti per esprimere un giudizio

Il report distingue le seguenti scale di impianti:

- Piccola: 20.000 -75.000 t/anno
- Media: 75.000 – 250.000 t/anno
- Grande: >250.000 t/anno

Nel presente studio si è scelto di considerare tutte quelle tecnologie di trattamento di RSU che Juniper ha definito come "proven" e "fully proven" e per le quali è stato possibile reperire sufficienti informazioni tecniche, economiche e ambientali. Per ciascuna tecnologia si è fatto riferimento, laddove individuata, all'Azienda che ha sviluppato il processo, indicando eventuali partners rivenditori della tecnologia in specifiche aree geografiche.

1.2.2 L'indagine esplorativa

Per dare adeguata pubblicità all'iniziativa ATO-R ha provveduto a predisporre un comunicato e fare un'inserzione su due riviste tecniche del settore rifiuti (Rifiuti Solidi- Numero di marzo-aprile 2009 - e Waste Management World - Numero di maggio-giugno 2009).

Destinatari del comunicato sono stati gli operatori che svolgano attività di progettazione, costruzione e/o gestione di impianti che sfruttino il principio della conversione del rifiuto indifferenziato in combustibile gassoso o altre forme con successiva valorizzazione energetica del prodotto ottenuto (tecnologie innovative di trattamento termico).
Agli operatori interessati, che abbiano costruito e gestito almeno un impianto per il trattamento di rifiuti urbani indifferenziati ad oggi regolarmente funzionante per una taglia minima di 20.000-30.000 t/anno, è stato richiesto di presentare una relazione contenente le seguenti informazioni:
Descrizione generale dell'impianto: ragione sociale del costruttore e gestore, ubicazione e occupazione di superficie, cronistoria (tempi di cantiere, anno di costruzione, anno di inizio attività, eventuali fermi impianto);

- Caratteristiche tecniche dell'impianto: schema di flusso e descrizione delle componenti impiantistiche;
- Rifiuti in ingresso: quantitativi annui smaltiti, tipologia (CER- Codice Europeo Rifiuti-autorizzati), caratteristiche merceologiche e chimico- fisiche (pezzatura, potere calorifico inferiore), eventuale necessità di pretrattamento del rifiuto (descrizione delle operazioni);
- Descrizione dettagliata del processo: parametri di processo e bilanci di materia (flussi in ingresso e in uscita dall'impianto);
- Prestazioni dell'impianto: in riferimento agli ultimi anni di funzionamento si richiede di indicare il numero di ore di funzionamento, ore di manutenzione ordinaria e straordinaria, eventuali fermi impianto (durata e cause), consumi di energia e materia (acqua, combustibile ausiliario, etc);
- Recupero energetico: produzione di energia elettrica e termica (distinguendo tra la quota parte utilizzata per autoconsumo e quella ceduta all'esterno) e rendimenti energetici;
- Prestazioni ambientali: emissioni in atmosfera (portata di fumi e concentrazioni di tutti gli inquinanti monitorati), quantità, qualità e modalità di smaltimento dei residui solidi e reflui liquidi prodotti;
- prestazioni economiche: valutabili essenzialmente in termini di entità del capitale da investire, di costi di gestione e manutenzione, di livello orientativo della tariffa di trattamento applicabile.

La Tabella che segue riporta l'elenco degli operatori che hanno risposto al comunicato.

	SOCIETA'	TECNOLOGIA	MODALITA' INVIO	PROTOCOLLO ATO-R
1	TPF - BASSE SAMBRE	pirolisi+gassificazione	Relazione inviata tramite mail	N. 1867 del 16/6/2009.
2	TECHTRADE – ICOM GEIE	Pirolisi in tamburo rotante	Relazione consegnata a mano/integrazione tramite mail	Relazione consegnata a mano prot. ATO-R 1856 dell'11 giugno 2009/integrazione del 18/6/2009 prot. ATO-R 1929 del 6/7/2009
3	ENERGOS	Gassificazione su griglia	Materiale trasmesso tramite e-mail	N° 1761 del 6/5/2009
4	PAUL WURTH	Gassificazione con fusione diretta delle scorie	Materiale consegnato a mano nella riunione del 12/06/2009	N° 2096 del 28/10/2009
5	VUZETA	Ristrutturazione molecolare catalitica	Materiale consegnato a mano nella riunione del 12/05/2009	N° 2003 del 7/9/2009
6	INTER ENGINEERING	dissoluzione in soluzione salina e gassificazione	Trasmesso materiale tramite mail del 23/7/2009	N° 1965 del 24/7/2009
7	TECNOGRANDA	Triturazione, Pirolisi+gassificazione	Materiale informativo trasmesso via posta	N° 1866 del 16/06/2009

2 CONTESTO DI RIFERIMENTO

2.1 IL PROGRAMMA PROVINCIALE DI GESTIONE DEI RIFIUTI VIGENTE

Il Programma Provinciale di Gestione dei Rifiuti, approvato in data 28 novembre 2006 fornisce indicazioni in merito alla realizzazione dell'impiantistica di smaltimento finale e al dimensionamento di massima degli impianti. In particolare prevede nella situazione a regime:

- un impianto di termovalorizzazione della zona SUD da attivare nel 2011 (impianto già localizzato al Gerbido e attualmente in fase di realizzazione);
- un ulteriore impianto da localizzare nell'area geografica Nord;
- una discarica per i residui.

Costituisce, inoltre, parte integrante del PPGR 2006 la relazione della Commissione altamente specializzata per la scelta delle migliori tecnologie per la realizzazione dell'impianto di trattamento termico a servizio della Zona Nord che individua nel termovalorizzatore con forno a griglia mobile la tecnologia più adatta per la tipologia e i quantitativi di rifiuti da indirizzare sull'impianto della Zona Nord della Provincia di Torino.
Il PPGR 2006 fornisce inoltre le stime dei flussi di rifiuto residuo alla raccolta differenziata per il periodo 2006-2011 e il dimensionamento di massima degli impianti di trattamento termico, individuando quale priorità per il periodo transitorio (ossia fino all'entrata in esercizio dei due impianti di trattamento termico) l'individuazione di nuove volumetrie di discarica per almeno 2.534.000 m^3.

2.1.1 Il termovalorizzatore del Gerbido

L'impianto di termovalorizzazione dei rifiuti urbani a servizio della zona sud della Provincia verrà realizzato nell'area del Gerbido (Comune di Torino).
A maggio 2005, la Provincia di Torino, assunti il governo della gestione dei rifiuti ai sensi dell'articolo 19, comma 5, della L.R. 24/02 ed i poteri sostitutivi dell'Associazione d'Ambito, ha affidato con deliberazione del Consiglio Provinciale n. 279129/2005 a TRM, società interamente pubblica partecipata da Consorzi di bacino e Comuni della Provincia, la progettazione, realizzazione e gestione dell'impianto di termovalorizzazione della zona sud della Provincia di Torino e degli impianti strumentali e connessi; in data 22 luglio 2005 Provincia e società TRM hanno stipulato la Convezione di Affidamento (Rep. N. 9589).
Successivamente il Consorzio Associazione d'Ambito Torinese per il Governo dei Rifiuti (ATO-R), costituitasi in data 5 ottobre 2005, ha confermato l'affidamento ed è subentrata nella relativa Convenzione.
In sintesi i dati salienti dell'impianto:

Ubicazione impianto	Loc. Gerbido – TORINO
Affidamento per la progettazione, la realizzazione e la gestione	Alla società T.R.M. S.p.A . con DCP prot. 279129/2005 del 24/05/2005 (contratto: Rep. n. 9589 del 22/07/2005).
Tipologia impianto	Termovalorizzatore a griglia mobile, raffreddata ad aria, con recupero di energia termica ed elettrica
Tipologia rifiuti	RSU , RSA
Potenzialità prevista	421.000 t/ anno
Previsione inizio esercizio	2013

A seguito dei procedimenti di valutazione d'impatto ambientale (VIA) ai sensi dell'art. 12 della L.R. n. 40/1998 e di autorizzazione integrata ambientale (AIA) ai sensi art. 5 D. lgs. n. 59/2005 l'impianto è stato autorizzato in data 21 dicembre 2006.
Nel marzo 2008 a seguito di procedura di gara è stato individuato da TRM spa il soggetto costruttore del termovalorizzatore. Nel novembre 2008 è stato aperto il cantiere per la costruzione. I lavori sono stati interrotti nel marzo 2009 a seguito di una Sentenza del Consiglio di Stato con la quale è stato accolto l'appello del raggruppamento secondo classificato nella gara per la costruzione, annullando il provvedimento di aggiudicazione e stabilendo il subentro del secondo classificato.
Il cantiere è in procinto di ripartire e l'entrata in esercizio provvisorio dell'impianto è prevista per il 2013.

2.1.2 Il termovalorizzatore della Zona Nord

Il PPGR06 conferma e precisa le previsioni già contenute nel PPGR 2005 in merito alla realizzazione dell'impianto di termovalorizzazione per la zona nord della Provincia di Torino.
Il bacino di riferimento per l'impianto di trattamento termico della Zona Nord è costituito dai Consorzi di Bacino n.16, Bacino n.17/A – CISA; Bacino n.17/B-C-D – CCA.
In attuazione delle indicazioni normative vigenti e del PPGR 2006, nel 2007/2008 ATO-R ha proceduto, avvalendosi degli uffici della Provincia di Torino, alla redazione dello "Studio di localizzazione del termovalorizzatore nella zona nord della Provincia di Torino", approvato in via definitiva con Deliberazione del Consiglio di Amministrazione dell'ATO-R n. 76 del 18 luglio 2008.
Allo scopo di identificare la migliore ipotesi di localizzazione, nello studio è stata effettuata un'analisi comparativa sulla rosa ristretta di siti risultante dalla ricognizione preliminare e costituita da: Ivrea (bacino 17), Rivarolo Canavese (bacino 17), Settimo Torinese (bacino 16). I tre siti sono stati analizzati e confrontati sotto molteplici aspetti: coerenza con gli strumenti di programmazione, valutazioni relative all'aggravio del traffico locale indotto dall'impianto, analisi degli scenari di emissione, verifica di situazioni di contaminazione del suolo eventualmente presenti, analisi dello stato quantitativo delle risorse idriche sotterranee, valutazione previsionale di impatto acustico, inventario delle possibili fonti di inquinamento elettromagnetico, analisi dell'impatto paesaggistico e degli aspetti storico-culturali di rilievo delle aree in esame, valutazione della possibilità di alterazione del valore economico di beni immobiliari, stato della fauna e della flora, salute pubblica.
Dallo studio è emerso quale migliore soluzione localizzativa il sito nel Comune di **Settimo Torinese**.

2.2 LA REVISIONE DEL PROGRAMMA PROVINCIALE DI GESTIONE DEI RIFIUTI

Con DGP n. 176-33791 del 15 settembre 2009 la Giunta provinciale di Torino ha approvato gli indirizzi per la revisione del Programma provinciale di gestione dei rifiuti, dando l'avvio alle attività operative per la redazione del nuovo PPGR.
Tra gli indirizzi relativi al tema dell'impiantistica al servizio del sistema integrato di gestione dei rifiuti si indica:

- Verifica, sulla base dei dati di produzione e raccolta, della necessità del secondo impianto di termovalorizzazione (già localizzato a Settimo To.se) e la possibilità di dare corso, per un'eventuale necessità residua, all'utilizzo di nuove tecnologie di smaltimento con recupero energetico;

- Verifica della possibilità di gestire e smaltire all'esterno del ciclo dei rifiuti, e all'interno del ciclo dell'acqua, i fanghi di depurazione (ATO3, SMAT).

Il presente studio oggi assume pertanto un significato ulteriore rispetto alle indicazioni contenute nella mozione approvata dal Consiglio Provinciale di Torino, che ha originato l'avvio dell'indagine.
In particolare, l'andamento della produzione dei rifiuti urbani rilevata negli ultimi anni, e quella che si sta rilevando nel corso del 2009, confermano gli obiettivi, pur ambiziosi, di riduzione dello smaltimento finale del PPGR2006; peraltro la possibilità di "alleggerire" il sistema impiantistico di smaltimento finale dei rifiuti dalla quota da destinare allo smaltimento dei fanghi di depurazione consente di ampliare la gamma delle opzioni impiantistiche da valutare, considerando anche quelle che, per taglia di impianto, parevano in prima battuta non essere funzionali ad una razionale costruzione del sistema impiantistico a regime.

2.3 IL RUOLO DELL'ATO-R: IL PIANO D'AMBITO DI PRIMA ATTIVAZIONE

L'Associazione d'Ambito Torinese per il Governo dei Rifiuti (ATO-R) ha quale obiettivo quello di organizzare il servizio di smaltimento e provvedere al fabbisogno impiantistico dell'Ambito, recependo le prescrizioni normative vigenti e dando attuazione alle prescrizioni della programmazione provinciale.
ATO-R ha iniziato ad operare nel suo ruolo di pianificazione operativa del sistema impiantistico dell'ambito e dei relativi servizi di smaltimento/trattamento, adottando nel dicembre 2008, ai sensi dell'articolo 203 comma 3 del D.lgs. n. 152/06, il "Piano d'Ambito di prima attivazione 2008-2014" che definisce le scelte del futuro assetto gestionale del sistema impiantistico dell'ambito.
Il Piano d'Ambito governa, programma e regola il processo di gestione degli impianti di smaltimento (RSU, fanghi e sovvalli della raccolta differenziata) e di trattamento dell'organico fino al 2014.
Con Deliberazione CDA n.130 del 3/11/2009 è stato approvato il Primo Aggiornamento del Piano d'Ambito. Al fine di valutare i fabbisogni impiantistici per lo smaltimento finale nel periodo programmatico 2009-2014**, l'Aggiornamento** ha rivisto le stime di rifiuto residuo alla raccolta differenziata nel periodo di riferimento del Piano sulla base dei dati di produzione di rifiuto indifferenziato e di raccolta differenziata relativi al 2008 e al primo semestre 2009.

Tab. 2.1 – Stime di rifiuto residuo dalla raccolta differenziata per gli anni 2009-2014

	2007 [t]	2008 [t]	?% 2008-2007	Stime Piano d'Ambito [tonnellate]					
				2009	2010	2011	2012	2013	2014
Totale Provincia di Torino	620.194	575.152	-7,3%	556.300	548.200	543.800	539.900	536.600	534.300

Il Primo Aggiornamento del Piano d'Ambito ha ridefinito, per il periodo 2009-2014, il **Programma complessivo di realizzazione degli impianti di smaltimento** (Tab. 2.2). In attesa della revisione del Programma Provinciale, ma sulla base degli indirizzi approvati dalla Giunta Provinciale con DGP 176-33791 del 15/9/2009, è possibile formulare relativamente all'anno 2014 due ipotesi di scenario:

- Scenario 1: la revisione del PPGR conferma la necessità di un secondo inceneritore a griglia mobile della potenzialità complessiva di 290.000 t/anno;

- Scenario 2: la revisione del PPGR ritiene non necessario un secondo inceneritore, optando per la realizzazione di due impianti a tecnologia innovativa di piccola taglia della potenzialità complessiva di 100.000 -120.000 t/anno.

Tab. 2.2 – Programma complessivo di realizzazione degli impianti di smaltimento per gli anni 2009-2014

Programma del breve periodo (2009-2012)			
Anno avvio attività	**Impianto**	**Volume [m³]**	**Forma di gestione prevista**
2009	Discarica ACEA- Pinerolo; sopraelevazione T2	95.000	In house
	Discarica AMIAT- Torino; rimodellamento lotto sommitale	500.000	In house
	Discarica CIDIU – Pianezza; ampliamento	1.018.000	In house
2010	Discarica CCS- Cambiano; sopraelevazione	80.000	In house
	Discarica ACEA- Pinerolo; ampliamento	190.000	In house
	Discarica SIA- Grosso C.se; ampliamento	380.000	In house
	Discarica SETA- Chivasso; ampliamento	432.700	In house
	Discarica ASA- Castellamonte; ampliamento	250.000	In house
2011	-		
2012	-		
Programma del transitorio (2013-2014)			
Anno avvio attività	**Impianto**	**Capacità annua di trattamento [t/a]**	**Forma di gestione prevista**
2013	Termovalorizzatore del Gerbido	421.000	In house
2014	Scenario 1: Termovalorizzatore Zona Nord	291.568	Procedura ad evidenza pubblica
	Scenario 2: Due impianti di trattamento termico a tecnologia innovativa ciascuno della potenzialità di 50.000-60.000 t/anno	100.000 – 120.000	Procedura ad evidenza pubblica

3 IL QUADRO NORMATIVO

Di seguito si riporta un quadro sintetico delle principali norme che forniscono indicazioni in merito alle caratteristiche degli impianti di incenerimento sia alle modalità con le quali tali impianti devono essere gestiti.

3.1 D.LGS. N. 133/2005 - LA NORMATIVA IN TEMA DI INCENERIMENTO DEI RIFIUTI

In Italia la principale norma in materia è rappresentata dal D.lgs. 133 dell'11 maggio 2005 "Attuazione integrale della direttiva 2000/76/CE in materia di incenerimento di rifiuti".
L'art. 2, c. 1 lett d) definisce come **impianti di incenerimento** "qualsiasi unità e attrezzatura tecnica, fissa o mobile, destinata al trattamento termico di rifiuti ai fini dello smaltimento, con o senza recupero del calore prodotto dalla combustione. Sono compresi in questa definizione l'incenerimento mediante ossidazione dei rifiuti, nonché altri processi di trattamento termico, quali ad esempio la pirolisi, la gassificazione ed il processo al plasma, a condizione che le sostanze risultanti dal trattamento siano successivamente incenerite […]".
Il D.Lgs. n.133/2005 regolamenta in un unico atto tutte le operazioni di incenerimento e co-incenerimento, indipendentemente dalla tipologia di rifiuti trattati, e fornisce criteri e norme tecniche riguardanti le caratteristiche costruttive e funzionali, nonché le condizioni di esercizio degli impianti.
Il decreto attuativo della direttiva 2000/76/CE disciplina ex novo tutte le fasi dell'incenerimento dei rifiuti, dalla ricezione nell'impianto alla gestione e smaltimento delle sostanze residue dal processo di incenerimento. In particolare, sono state previste rigorose condizioni di esercizio e prescrizioni tecniche per gli impianti con riferimento:

- ai valori limite di emissione;
- ai metodi di campionamento, di analisi e di valutazione degli inquinanti derivanti dagli impianti di incenerimento e di co-incenerimento dei rifiuti;
- ai criteri e le norme tecniche riguardanti le caratteristiche costruttive, funzionali e gestionali degli impianti di incenerimento e di co-incenerimento, con particolare riferimento alle esigenze di assicurare una protezione integrata dell'ambiente contro le emissioni causate da detti impianti;
- alle modalità per la concessione dell'autorizzazione alla costruzione e all'esercizio e per l'adeguamento degli impianti esistenti alle nuove disposizioni.

In particolare, in sede di presentazione delle istanze di autorizzazione, particolare attenzione viene prestata alle misure previste per garantire che:

- l'impianto sia progettato e gestito in maniera conforme alle prescrizioni del decreto (Allegato 1 e 2);
- il calore generato durante il processo di incenerimento e di co-incenerimento sia, per quanto possibile, recuperato attraverso, ad esempio, la produzione combinata di calore ed energia, la produzione di vapore industriale o il teleriscaldamento;
- i residui derivanti dal trattamento termico siano ridotti al minimo in quantità e nocività, ove possibile, riciclati o recuperati, o smaltiti in conformità alle disposizioni del D.Lgs. 22/97 (ora D. Lgs. 152/2006 - Testo Unico in materia ambientale);
- le tecniche di misurazione per le emissioni negli effluenti gassosi e nelle acque di scarico siano conformi ai requisiti fissati dagli Allegati al decreto.

Il D.Lgs 133/2005 prescrive, inoltre, che l'atto autorizzativo rilasciato dall'autorità competente contenga:

- le categorie di rifiuti che possono essere trattati con l'indicazione dei relativi codici dell'elenco europeo dei rifiuti (CER),
- la capacità nominale e il carico termico dell'impianto e le quantità autorizzate per le singole categorie dei rifiuti;
- i valori limite di emissione per ogni singolo inquinante,
- le procedure di campionamento e misurazione utilizzate per ottemperare agli obblighi di controllo periodico e sorveglianza, nonché la localizzazione dei punti di campionamento e misurazione.
- le modalità e la frequenza dei controlli programmati per accertare il rispetto delle condizioni e delle prescrizioni contenute nell'autorizzazione, da effettuarsi da parte delle agenzie regionali e provinciali per la protezione dell'ambiente, con oneri a carico del gestore.

La normativa prevede, inoltre, l'installazione obbligatoria di sistemi di misura (SME) che permettono di tenere sotto controllo i parametri e i limiti di emissione pertinenti.
Il decreto legislativo 133/2005 prevede che siano applicati sistemi di monitoraggio in continuo (SME) per i seguenti inquinanti: NO_X, CO, polveri totali, TOC, HCl, SO_2, HF.
Per diossine, furani e metalli sono invece previste misurazioni almeno quadrimestrali, tranne nei primi 12 mesi di esercizio dell'impianto nei quali si richiede di effettuare misurazioni con cadenza trimestrale; qualora dalle misurazioni effettuate nei primi 12 mesi, risulti un valore delle emissioni inferiore al 50% dei limiti, le frequenze di misurazione si riducono fino ad una volta all'anno per diossine e furani e ad una ogni due anni per i metalli pesanti.
Per le diossine non è in commercio, al momento, un sistema per il loro monitoraggio in continuo. Ma sono già stati proposti e testati, sia in Italia che all'estero, sistemi per il rilevamento in continuo di campioni da analizzare in laboratorio.
Nella Tabella che segue si riportano i valori limite di emissione in atmosfera ai sensi del D. Lgs 133/05 ed i valori di emissione associati all'uso delle BAT (Best Available Techniques), normalmente adottate nei moderni impianti di incenerimento.
Configurandosi gli impianti a tecnologia innovativa come impianti di incenerimento (ai sensi dell'art. 2, c. 1, lett.d, del D. Lgs 133/05), essi sono soggetti al rispetto dei medesimi limiti di emissione degli inceneritori convenzionali.

Tab. 3.1 - Valori limite di emissione da normative e da BAT [5]

Inquinante	Unità di misura	Valore limite D. Lgs 133/05	BATAEL- BAT Associated Emission Levels	Modalità di campionamento
Polveri totali	[mg/Nm^3]	10	1-5	Valore medio giornaliero
Acido cloridrico (HCl)	[mg/Nm^3]	10	1-8	Valore medio giornaliero
Acido Fluoridrico (HF)	[mg/Nm^3]	1	<1	Valore medio giornaliero
Ossidi di zolfo (come SO_2)	[mg/Nm^3]	50	1-40	Valore medio giornaliero
Ossidi di azoto (come NC_2)	[mg/Nm^3]	200	40-100	Valore medio giornaliero
Sostanze organiche sotto forma di gas o vapori (come TOC)	[mg/Nm^3]	10	1-10	Valore medio giornaliero
Monossido di carbonio (CO)	[mg/Nm^3]	50	5-30	Valore medio giornaliero
Idrocarburi policiclici aromatici (IPA)	[mg/Nm^3]	0.01		Valore medio (periodo di campionamento: 8 ore)
Diossine e furani (PCCD/ PCDF)	[ngTEQ/Nm^3]	0.1	0.01-0.1	Valore medio (periodo di campionamento: 8 ore)
Cadmio e Tallio (Cd+Tl)	[mg/Nm^3]	0.05	0.005-0.5	Valore medio (periodo di campionamento: 1 ora)
Mercurio (Hg)	[mg/Nm^3]	0.05	<0.05	Valore medio (periodo di campionamento: 1 ora)
Metalli pesanti (Sb+As+Pb+Cr+Co+Mn+Ni+V+Sn)	[mg/Nm^3]	0.5	0.005-0.5	Valore medio (periodo di campionamento: 1 ora)

Per quanto riguarda i residui solidi l'art. 8 comma 2 del D. Lgs 133/2005 stabilisce quanto segue: "Gli impianti di incenerimento devono essere gestiti in modo da ottenere il più completo livello di incenerimento possibile, adottando, se necessario, adeguate tecniche di pretrattamento dei rifiuti. Le scorie e le ceneri pesanti prodotte dal processo di incenerimento non possono presentare un tenore di incombusti totali, misurato come carbonio organico totale, (TOC) superiore al 3 per cento in peso, o una perdita per ignizione superiore al 5 per cento in peso sul secco".

Al fine di consentire un confronto tra le caratteristiche delle scorie generate da un impianto a tecnologie innovativa e quelle prodotte dagli inceneritori di ultima generazione, si riportano nella tabella che segue le analisi effettuate sulle scorie prodotte da due termovalorizzatori attualmente in esercizio nel Nord Italia.

Tab. 3.2 - Caratteristiche qualitative delle scorie da inceneritore, analisi effettuate su 2 impianti italiani

		TMV 1			TMV 2	Limiti accettabilità in discarica (D.M. 03/08/2005)
		ARPA	Analisi gestore	Analisi gestore	ARPA	Rifiuti Non pericolosi
Analisi del campione tal quale	Contenuto d'acqua (%)	15,9			13,5	
	pH	10,4			10,2	
	Cd (mg/kg)	< 10	1,9	3	< 10	100
	Co (mg/kg)	21,0		18	21	
	Cr (mg/kg)	210,0	79,0	44	230	
	Cr VI (mg/kg)	< 5	< 0,5	< 5	< 5	100
	Mo (mg/kg)	< 42		4	< 41	
	Ni (mg/kg)	100,0	79,0	28	170	
	Pb (mg/kg)	2300,0	700,0	174	1160	5.000
	Cu (mg/kg)	2600,0	1260,0	1452	2200	
	Zn (mg/kg)	3100,0	880,0	1611	2000	
	Al (mg/kg)	-	16000,0	11790	-	
	Sb (mg/kg)	-	76,0	22	-	50.000
	As (mg/kg)	-	2,5	3	-	100
	Mg (mg/kg)	-	7600,0	4370	-	
	Hg (mg/kg)	-	< 0,1	< 1	-	100
	Se (mg/kg)	-	< 0,5	< 1	-	100
	Sn (mg/kg)	-	46,0	112	-	
	Tl (mg/kg)	-	< 0,5	< 1	-	100
	Te (mg/kg)	-	< 0,5	< 1	-	100
	Be (mg/kg)	-	-	< 1	-	
	2,3,7,8 -tetracdd (?g/kg)	-	< 0,1	< 1	-	1
	1,2,3,7,8-pentacdd (? g/kg)	-	< 0,1	< 1	-	1
	1,2,3,4,7,8 -esacdd (?g/kg)	-	< 0,1	< 1	-	
	1,2,3,6,7,8 -esacdd (?g/kg)	-	< 0,1	< 1	-	1
	1,2,3,7,8,9 -esacdd (?g/kg)	-	< 0,1	< 1	-	1
	1,2,3,4,6,7,8-eptacdd (? g/kg)	-	< 0,1	< 1	-	
	octacdd (? g/kg)	-	< 0,1	< 1	-	
	2,3,7,8 -tetracdf (? g/kg)	-	< 0,1	< 1	-	1
	1,2,3,7,8-pentacdf(? g/kg)	-	< 0,1	< 1	-	
	2,3,4,7,8-pentacdf(? g/kg)	-	< 0,1	< 1	-	
	1,2,3,4,7,8 -esacdf (?g/kg)	-	< 0,1	< 1	-	
	1,2,3,6,7,8 -esacdf (?g/kg)	-	< 0,1	< 1	-	
	2,3,4,6,7,8 -esacdf (?g/kg)	-	< 0,1	< 1	-	
	1,2,3,7,8,9 -esacdf (?g/kg)	-	< 0,1	< 1	-	
	1,2,3,4,6,7,8-eptacdf (?g/kg)	-	< 0,1	< 1	-	
	1,2,3,4,7,8,9-eptacdf (?g/kg)	-	< 0,1	< 1	-	
	octacdf (?g/kg)	-	< 0,1	< 1	-	
Prova di eluizione	Cl - (mg/l)	275,0	260,0	161	210	1.500
	F - (mg/l)	< 0,2	1,0	0,6	< 0,2	15
	SO_4^{2-} (mg/l)	175,0	110,0	31,7	260	2.000
	CN- (mg/l)	< 0,001	< 0,01	< 0,02	0,001	0,5
	Sb (mg/l)	0,1	< 0,0005	< 0,001	0,11	0,07
	As (mg/l)	< 0,05	< 0,0005	< 0,01	< 0,05	0,2
	Ba (mg/l)	0,6	0,6	0,66	< 0,04	10
	Cd (mg/l)	< 0,01	< 0,0005	< 0,001	< 0,01	0,02
	Cr (mg/l)	< 0,1	0,0	< 0,01	< 0,1	1
	Hg (mg/l)	< 0,0005	0,0	< 0,0002	< 0,0005	0,005
	Mo (mg/l)	< 0,1	0,0	0,03	0,13	1
	Ni (mg/l)	< 0,040	0,0	0,002	< 0,04	1
	Pb (mg/l)	0,1	0,0	0,17	< 0,04	1
	Cu (mg/l)	0,3	0,2	< 0,09	0,78	5
	Se (mg/l)	< 0,02	0,0	0,009	< 0,02	0,05
	Zn (mg/l)	< 0,10	0,1	0,14	< 0,1	5
	DOC	-	26,0	15,6	-	80
	solidi disciolti totali	-	4700,0	2710	-	6.000

3.2 D.LGS. 59/2005 - LA NORMATIVA IN MATERIA DI PREVENZIONE E RIDUZIONE INTEGRATE DELL'INQUINAMENTO (AIA-IPPC)

Gli impianti di incenerimento di rifiuti urbani con una capacità superiore a 3 tonnellate sono assoggettati all'Autorizzazione Integrata Ambientale (indicata anche con l'acronimo AIA), di cui al D. Lgs. 59/2005 sulla prevenzione e la riduzione integrate dell'inquinamento (AIA/IPPC). L'applicazione di tali norme è importante, da un punto di vista della scelta delle caratteristiche tecniche degli impianti, in quanto presuppongono, per la concessione dell'autorizzazione integrata ambientale (AIA), che gli impianti adottino le "*migliori tecniche disponibili*" (Best Available Techniques-BAT).
L'Autorizzazione Integrata Ambientale si applica agli impianti elencati all'Allegato I al decreto: si tratta complessivamente di 33 attività che sono sostanzialmente riconducibili a 6 macrosettori:

- attività energetiche;
- produzione e trasformazione dei metalli;
- industria dei prodotti minerali;
- industria chimica;
- gestione dei rifiuti;
- altre attività, tra cui ad esempio alcune attività dell'industria, della carta e cartoni, del tessile, della concia, dell'alimentare, del trattamento di superfici, nonché degli allevamenti.

Entrando nello specifico degli impianti di incenerimento restano soggetti ad AIA "gli impianti di incenerimento dei rifiuti urbani […] con una capacità superiore a 3 tonnellate all'ora".

Il decreto disciplina il rilascio dell'AIA, mediante un procedimento unico (legge 241/1990 e s.m.i.), prevedendo una chiara ripartizione di competenze fra Stato e Regioni (o Province autonome); "*autorità competente*" è:

- il Ministero dell'ambiente per tutti gli impianti esistenti e nuovi indicati in un apposito allegato (allegato V – Categorie di impianti soggetti ad AIA statale);
- "l'autorità individuata (…) dalla Regione o dalla Provincia autonoma" per gli impianti non indicati in tale allegato V.

L'articolo 5, comma 14 del Decreto stabilisce che l'AIA sostituisce "ogni altra autorizzazione, visto, nulla osta o parere in materia ambientale previsti dalle disposizioni di legge e dalle relative norme di attuazione" con le sole eccezioni delle normative "Seveso" ed "Emission trading". In più c'è un apposito allegato – Allegato II – che elenca chiaramente quali sono le specifiche autorizzazioni sostituite: emissioni, acque, rifiuti, smaltimento Pcb, oli usati, comunicazioni ex articolo 33 del decreto legislativo 22/ 1997 (cd. "Decreto Ronchi").
Come riportato sopra, tra le autorizzazioni non sostituite dall'AIA c'è quella rilasciata ai sensi del D.Lgs. 334/99 ("Attuazione della direttiva 96/82/CE relativa al controllo dei pericoli di incidenti rilevanti connessi con determinate sostanze pericolose") e s.m.i. ; l'art. 7 comma 8 specifica che per gli impianti assoggettati al Decreto Legislativo del 17 agosto 1999, n. 334, l'autorità competente ai sensi di tale decreto trasmette all'autorità competente per il rilascio dell'autorizzazione integrata ambientale i provvedimenti adottati, le cui prescrizioni ai fini della sicurezza e della prevenzione dei rischi di incidenti rilevanti sono riportate nella autorizzazione. In caso di decorrenza del termine per il rilascio dell'AIA (articolo 5, comma 12), senza che le suddette prescrizioni siano pervenute, l'autorità competente rilascia l'autorizzazione integrata ambientale e provvede al suo successivo aggiornamento, una volta concluso il procedimento ai sensi del decreto legislativo del 17 agosto 1999, n. 334.

La direttiva IPPC (96/61/CE) e il D. Lgs. 59/2005 (art.4) presuppongono, per la concessione dell'autorizzazione integrata ambientale (AIA), che gli impianti adottino le "*migliori tecniche disponibili*" (Best Available Techniques-BAT). A tale scopo occorre tenere presente le seguenti definizioni:

- "tecniche", si intende sia le tecniche impiegate, sia le modalità di progettazione, costruzione, manutenzione, esercizio e chiusura dell'impianto;
- "migliori", qualifica le tecniche più efficaci per ottenere un elevato livello di protezione dell'ambiente nel suo complesso;
- "disponibili", qualifica le tecniche sviluppate su una scala che ne consenta l'applicazione in condizioni economicamente e tecnicamente valide nell'ambito del pertinente comparto industriale, prendendo in considerazione i costi e i vantaggi, indipendentemente dal fatto che siano o meno applicate o prodotte in ambito nazionale, purché il gestore possa avervi accesso a condizioni ragionevoli.

Ai sensi dell'art.16 della direttiva 96/61/CE (AIA-IPPC), la Commissione organizza lo scambio di informazioni tra gli Stati membri e le industrie interessate sulle migliori tecniche disponibili, sulle relative prescrizioni in materia di controllo e i relativi sviluppi; a questo scopo, la Commissione ha istituito, presso il Centro Comunitario di Ricerche di Siviglia, un Ufficio (IPPC Bureau) cui spetta il compito mediante una serie di gruppi tecnici (Technical Working Group - TWG) di redigere dei documenti di riferimento per ciascuna delle categorie industriali interessate dall'Autorizzazione Integrata Ambientale, i cosiddetti BREFs (Best available techniques REFerence documents).
Gli obiettivi che si intendono raggiungere attraverso la pubblicazione e l'utilizzo di questi documenti sono :

- uniformare il livello tecnologico dei Paesi membri della CE;
- diffondere la conoscenza dei valori limite e delle tecnologie più efficaci nell'ottenere un alto livello di protezione dell'ambiente;
- assistere gli Stati membri nell'applicazione della Direttiva e le Autorità competenti nel processo di "decision making";
- permettere ai gestori degli impianti di porre a confronto le proprie performance ambientali con i livelli di emissione e/o di consumo conseguibili attraverso l'adozione delle migliori tecnologie disponibili.

Riguardo al settore dei rifiuti due sono i BREFs di riferimento elaborati dai gruppi tecnici e adottati dalla Commissione europea (agosto 2006): "Waste Incineration" e "Waste Treatments" ; documenti che indicano le migliori tecniche per gli impianti di gestione dei rifiuti.
L'Italia, mediante l'istituzione di una Commissione di esperti, ha progressivamente provveduto a recepire, adattandoli alla realtà nazionale, i suddetti documenti predisponendo delle Linee Guida relative alle migliori tecniche disponibili (MTD), emanate con decreto del Ministro dell'ambiente. Con Decreto del 29 gennaio 2007 (Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare), sono state pubblicate le Linee guida per l'individuazione e l'utilizzazione delle migliori tecniche disponibili in materia di gestione dei rifiuti, per le attività elencate nell'allegato I del Decreto Legislativo 18 febbraio 2005, n. 59 (S.o. n. 133 alla Gazzetta ufficiale 7 giugno 2007 n. 130). In particolare l'allegato II al Decreto contiene le linee guida per gli impianti di incenerimento.

4 TECNOLOGIE INNOVATIVE DI TRATTAMENTO TERMICO DEI RIFIUTI

I trattamenti termici sono rappresentati da processi chimici ad alta temperatura, nei quali molte sostanze vengono demolite per originarne altre aventi composizioni chimiche più semplici.
L'obiettivo primario di un qualsiasi trattamento termico è la trasformazione del rifiuto, con produzione di sostanze meno dannose per l'ambiente e per l'uomo, e conseguente riduzione delle quantità di sostanze da mandare allo smaltimento finale; in secondo luogo si intende ottenere un recupero energetico, per quanto possibile e compatibilmente con processo seguito.

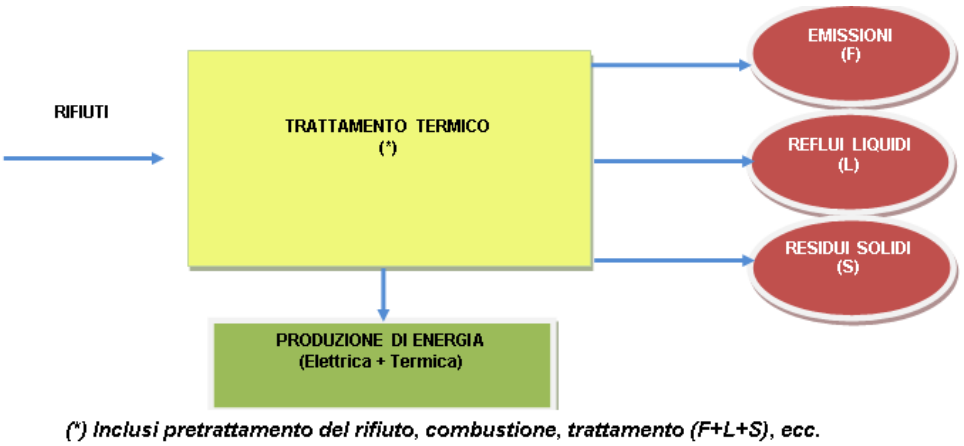


Fig. 4.1 – Schema semplificativo relativo ai trattamenti termici [9]

Appartengono ai trattamenti termici:

- l'incenerimento
- la gassificazione
- la pirolisi
- la gassificazione al plasma.

Fra queste, l'incenerimento è l'operazione che è stata finora maggiormente applicata ai rifiuti solidi, e l'esperienza su scala industriale è oramai vasta; gli altri trattamenti sono stati sviluppati (o ripresi da altre applicazioni) come tecnologie alternative all'incenerimento.
Un processo di incenerimento si basa sulla combustione diretta dei rifiuti con utilizzo del calore sensibile dei fumi per produrre vapore e da questo ottenere energia elettrica (gli usi diretti sono meno diffusi, anche in conseguenza dei meccanismi di incentivazione economica dell'energia).
Le tecnologie alternative invece essenzialmente comportano la produzione di un gas (oppure di gas e una frazione liquida) combustibile, che può venire a sua volta bruciato in loco per produrre energia oppure essere utilizzato come materia prima per la produzione di combustibili potenzialmente commerciabili (idrogeno compresso) e/o materie prime ("chemicals") per l'industria chimica.
Se definiamo R il rapporto tra la quantità effettiva di agente ossidante (aria e/o ossigeno) e quella teorica ("stechiometrica"), i principali processi termici possono essere schematicamente rappresentati nella figura che segue.

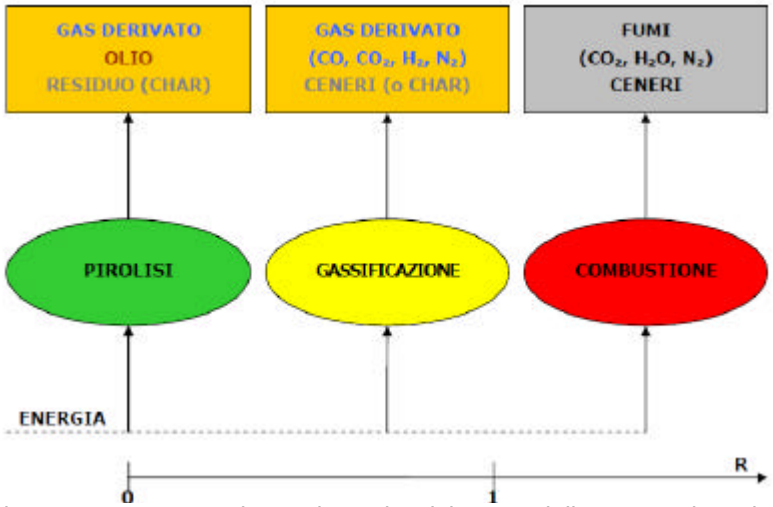


Fig. 4.2 - Rappresentazione schematica dei processi di trattamenti termico [7]

L'**incenerimento dei rifiuti urbani** è un processo di ossidazione del rifiuto, nel quale gli elementi fondamentali costituenti le sostanze organiche contenute nel rifiuto vengono ossidati, dando origine a molecole semplici e sostanzialmente allo stato gassoso in condizioni ambiente (fumi); il carbonio organico, variamente legato nelle molecole costituenti il rifiuto, viene ossidato ad anidride carbonica (CO_2), l'idrogeno ad acqua (H_2O), lo zolfo a biossido di zolfo (SO_2), etc.; la parte inorganica del rifiuto in genere non subisce reazioni ed esce dal processo come residuo solido da smaltire e/o recuperare (cenere o scoria). Poiché il processo è di tipo ossidativo, è necessaria la presenza di ossigeno per le reazioni: normalmente viene inviata aria, in eccesso rispetto allo stechiometrico per facilitare le reazioni chimiche, in quanto il sistema è di tipo solido-gas, pertanto fortemente eterogeneo.

La **gassificazione** è un processo di trattamento termico, in cui un combustibile solido viene trasformato in un combustibile gassoso in condizioni di parziale ossidazione in atmosfera reagente controllata, adoperando come agente gassificante aria, anidride carbonica, vapore o un altro gas reattivo. I principali componenti del flusso gassoso sono idrogeno, monossido di carbonio, biossido di carbonio e metano, in composizione variabile a seconda delle condizioni di processo. In particolare, la presenza del vapore ha l'effetto di promuovere fortemente la formazione di un gas ricco di idrogeno.

Il processo di **pirolisi** consiste invece nella degradazione termica di un materiale, in assenza di aria, tramite l'azione di energia fornita dall'esterno, di norma attraverso la combustione di parte dei prodotti ottenuti. L'azione del calore comporta la rottura delle molecole complesse con produzione di un gas, di una frazione liquida a temperatura ambiente (olio) e di un residuo solido ancora combustibile (char), le cui caratteristiche e relative quantità dipendono, oltre che dal tipo di materiale trattato, dalle condizioni operative alle quali viene condotto il processo.

Gli impianti di pirolisi e gassificazione possono presentare i seguenti potenziali vantaggi:

- aumento della resa di produzione di energia elettrica, mediante uso di motori a gas;
- possibile riduzione della quantità di fumi rispetto agli inceneritori tradizionali se il syngas viene utilizzato in dispositivi di recupero energetico ad alta efficienza;
- possibile recupero di materia in termini di sostanze organiche;

Per contro tali impianti:

- richiedono che il materiale alimentato subisca quanto meno un processo di triturazione;
- sono tanto più svantaggiosi, in termini energetici e conseguentemente economici, quanto più il materiale da trattare è umido e/o ha un contenuto elevato di sostanze non combustibili.

Va ancora segnato, per quanto riguarda la gassificazione, che nel caso di processi ad alta temperatura (oltre 1.000°C) potrebbero formarsi notevoli quantità di ossidi di azoto che devono successivamente essere eliminate con un incremento dei costi di trattamento dei fumi. Per ciò che concerne la pirolisi, il residuo solido prodotto normalmente contiene ancora un discreto quantitativo di carbonio, che potrebbe presentare caratteristiche non conformi a quanto previsto dall'articolo 8, comma 2 del D.Lgs.133/2005 (carbonio organico totale (TOC) al massimo pari al 3 % in peso, o una perdita per ignizione inferiore al 5% in peso sul secco); inoltre il processo tende a concentrare nel residuo solido i metalli pesanti per cui, nel caso di successivo trattamento del residuo, è necessario un severa depurazione dei fumi per l'abbattimento di tali sostanze.

Si riporta di seguito una tabella che sintetizza le differenze tra combustione, gassificazione e pirolisi relativamente a: scopo del processo, condizioni di esercizio (ambiente di reazione, temperatura, pressione, reagenti), prodotti in uscita, necessità di trattamento del gas.

	Combustione	Gassificazione	Pirolisi
Scopo del processo			
	Massimizzare la conversione del rifiuto a CO_2 e H_2O (produrre gas effluenti ad alta temperatura)	Massimizzare la conversione del rifiuto a CO e H_2 (produrre gas combustibile ad alto potere calorifico)	Massimizzare la degradazione termica del rifiuto a gas e fasi condensate
Condizioni di esercizio			
Ambiente di reazione	Ambiente fortemente ossidante (elevati eccessi d'aria)	Ambiente riducente (quantità di ossigeno inferiore a quella stechiometrica)	Assenza di ossigeno
Temperatura	Tra 850°C e 1200°C	Generalmente superiore agli 800°C	Tra 500°C e 800°C
Pressione	Generalmente atmosferica	Generalmente atmosferica ma può essere anche elevata	Leggera sovrapressione
Gas reagente	Aria	Aria, ossigeno, anidride carbonica, vapor d'acqua	Nessuno (si usa azoto o parte del gas prodotto)
Output del processo			
Gas prodotti	CO_2, H_2O	CO, H_2, CO_2, H_2O, CH_4	CO, H_2, CH_4 e in genere C_nH_m
Inquinanti	SO_2, NO_x, HCl	H_2S, HCl, COS, NH_3, HCN, tar	H_2S, HCl, NH_3, HCN, tar
Ceneri	Generalmente secche (materiale minerale convertito a ceneri di fondo e ceneri volanti) Trattate e smaltite come rifiuti speciali	Ceneri di fondo, se vetrose, adatte per utilizzo nei materiali di costruzione Ceneri volanti trattate e smaltite come rifiuti speciali	Spesso con contenuto di carbonio non trascurabile Trattate e smaltite come rifiuti speciali
Trattamento del gas			
	Gas effluenti trattati e poi emessi in atmosfera	Gas di sintesi trattati e poi usati per produzione di chemicals o di energia (con successiva emissione in atmosfera)	Gas trattati e poi usati per produzione di chemicals o di energia (con successiva emissione in atmosfera)

Segue una descrizione dei processi di trattamento termico alternativi all'incenerimento dei rifiuti urbani.

4.1 GASSIFICAZIONE

Il processo di **gassificazione** è noto e utilizzato (soprattutto per il carbone) da quasi 200 anni e consiste nella conversione di un materiale solido o liquido in un gas combustibile, ottenuta tramite un'ossidazione parziale condotta sotto l'azione del calore.
Al contrario della combustione, nella quale l'ossidazione viene condotta con un eccesso di comburente rispetto al valore stechiometrico, la gassificazione viene condotta con quantitativi di agente ossidante (aria, aria arricchita con ossigeno o ossigeno puro) inferiore a quello stechiometrico.

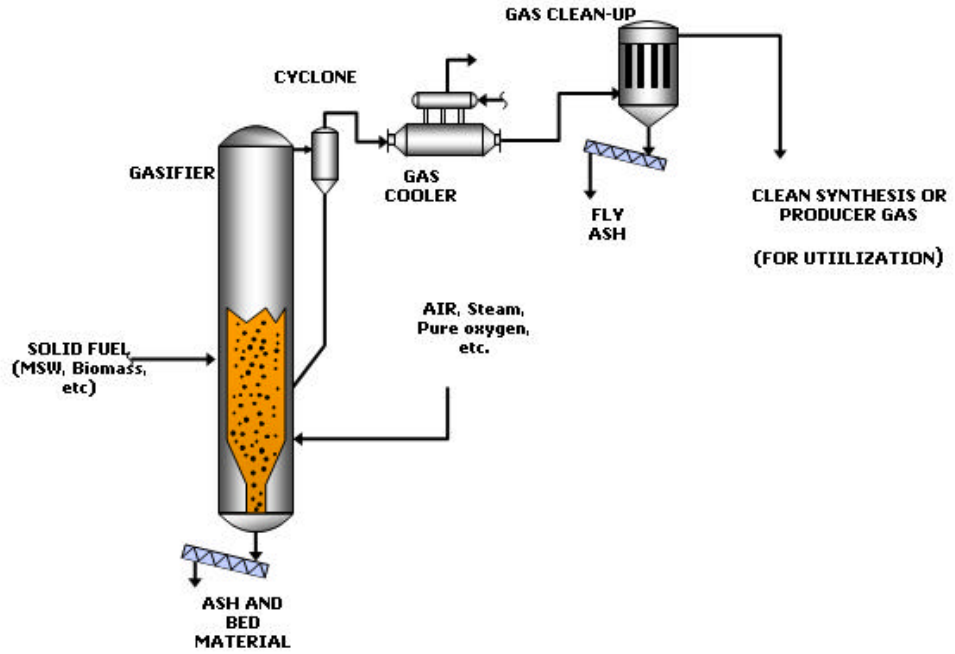


Fig. 4.3 - Schema di un impianto di gassificazione

I prodotti derivati della gassificazione dei rifiuti sono costituiti essenzialmente da:

- una corrente gassosa (gas derivato o syngas), costituente il prodotto principale, che può contenere frazione condensabili ("TAR") a temperatura ambiente;
- un residuo solido costituito dagli inerti e dalla frazione organica non convertita (char).

Nel processo di gassificazione il calore necessario al processo viene fornito, in toto o parzialmente, dalle reazioni di ossidazione parziale che riducono le esigenze di apporti di calore dall'esterno. La temperatura e la sua distribuzione all'interno del reattore influenzano le caratteristiche del gas ottenuto e la ripartizione percentuale fra i vari prodotti ottenibili.
Anche se il processo può essere condotto in un ampio campo di temperature, di norma la formazione del gas ha luogo a temperature dell'ordine dei 750 °C o superiori. La temperatura operativa risulta di norma compresa fra 800-1100 °C nella gassificazione con aria e tra 1000-1400 °C in caso di impiego di ossigeno.

Ci sono tre modi principali per condurre un processo di gassificazione [23]:

- in ossidazione parziale con aria;
- in ossidazione parziale con ossigeno;
- in gassificazione con vapore.

L'ossidazione parziale con aria produce un gas che è diluito dall'azoto atmosferico (fino a valori del 60%) ed ha un potere calorifico che varia nell'intervallo 4-8MJ/Nm3.

L'ossidazione parziale con ossigeno produce un syngas libero da azoto e quindi con un più alto potere calorifico (tra 8 e 14 MJ/Nm^3). Se da un lato l'impiego di ossigeno puro ha come conseguenza portate inferiori di gas, con migliori poteri calorifici, minore tenore di tar e produzione di ceneri vetrose, di agevole e sicuro smaltimento, dall'altro lato necessita di costi aggiuntivi per il suo approvvigionamento e può dare luogo a problematiche di gestione supplementari, legate a questioni di sicurezza dell'impianto.

La gassificazione con vapore produce un gas libero da azoto che ha tipicamente un potere calorifico che varia nell'intervallo 14-20MJ/Nm^3. Il processo in questo caso non prevede reazioni di ossidazione esotermiche e necessita pertanto di una sorgente esterna che fornisca il calore necessario alle reazioni endotermiche di gassificazione.
Nella maggior parte dei casi il gas prodotto dalla gassificazione di rifiuti contiene composti condensabili e particelle solide, che debbono essere rimosse prima del suo successivo impiego come vettore energetico. Il contenuto di tali composti dipende, oltre che dal rifiuto, soprattutto dalle condizioni operative di gassificazione.
La gassificazione è una tecnologia già consolidata e molto diffusa per il recupero di materia ed energia da carbone e biomasse. Sono disponibili per questi combustibili criteri di progettazione affidabili per i diversi tipi di gassificatori ed un rilevante ammontare di dati sulle loro prestazioni.
L'applicazione della tecnologia della gassificazione al trattamento termico dei rifiuti divenne di interesse sul finire degli anni settanta quando studi scientifici rivelarono i potenziali impatti sulla salute e sull'ambiente degli inceneritori di vecchia generazione.
La convinzione che essa consentisse minori emissioni rispetto all'incenerimento tradizionale, diede impulso alla ricerca. Oggi è noto che sia la gassificazione sia la combustione diretta in inceneritori di nuova generazione, con l'ausilio di appropriati sistemi di pulizia degli effluenti, sono in grado di rispettare le stringenti norme esistenti sulle emissioni.
Quindi lattenzione verso la gassificazione è oggi piuttosto dovuta ad una serie di vantaggi, sostanzialmente legati alla possibilità di combinare il tipo di rifiuto combustibile, l'agente gassificante, le condizioni di esercizio e le caratteristiche dello specifico reattore, per ottenere un gas che può essere impiegato in differenti applicazioni finali.
Attualmente i migliori risultati nell'applicazione del processo di gassificazione sono stati ottenuti su rifiuti aventi caratteristiche piuttosto omogenee. Per questo nel caso di RU si preferisce applicarla ad un combustibile derivato (CDR) ovvero ad un rifiuto che ha subito un processo di pretrattamento.
Per l'applicazione industriale dei processi di gassificazione e pirolisi dei rifiuti sono state proposte varie configurazioni impiantistiche, che differiscono per la tipologia dell'apparecchiatura di conversione e per le condizioni operative adottate nel ciclo completo di produzione ed utilizzo del gas derivato.
Rispetto alle tipologie di apparecchiature adottate è possibile, in linea generale, raggruppare le apparecchiature impiegate nelle seguenti tipologie, riferibili sia alla gassificazione sia alla pirolisi:

- reattori a letto fisso;
- reattori a letto fluido;
- reattori a letto mobile;
- reattori di tipo particolare.

In generale la differenza tra le varie configurazioni impiantistiche risiede nei differenti tempi di permanenza (dell'ordine delle ore nei gassificatori statici, dei minuti in quelli a letto fluido ed anche inferiore in particolari tipologie di apparecchiature) e nella velocità di riscaldamento, variabile da alcuni °C/s (letto fisso) a 102-103 °C/s (letti fluidi ed altre specifiche tipologie di reattori).

Tab. 4.1 -Tipologie di reattori di gassificazione [fonte: ENEA]

Tipo di Reattore		Modalità di Contatto
Letto Fisso:	**"Downdraft"**	Il solido ed il gas si muovono verso il basso, in equicorrente.
	"Updraft"	Il solido si muove verso il basso e il gas si muove verso l'alto, in controcorrente.
	Equicorrente	Il solido e il gas si muovono nella stessa direzione, ad es. come nel caso "downdraft" oppure entrambi verso l'alto.
	Contro corrente	Il solido e il gas si muovono in direzioni opposte (ad es. come nel caso "updraft" ma i flussi delle correnti possono anche essere invertiti).
	Correnti incrociate	Il solido si muove verso il basso, il gas si muove perpendicolarmente, cioè con moto orizzontale.
	Varianti	Letto mescolato, gassificazione in due stadi.
Letto fluido	**Bollente**	Velocità gas relativamente bassa, il solido inerte resta all'interno del reattore.
	Circolante	Il solido inerte viene trascinato con la corrente gassosa, separato e ricircolato.
	Trascinato	Presenta elevate velocità della fase gassosa più leggera, può essere realizzato in un reattore di tipo ciclonico.
	Reattori accoppiati	La pirolisi (e/o la gassificazione con vapore) avviene nel 1° reattore, il char prodotto viene trasferito nel 2° reattore, dove è combusto per riscaldare l'elemento fluidificante la ricircolazione. Come combustore viene di norma impiegato un letto bollente.
Letto mobile	**Varianti**	Il solido è trasportato meccanicamente di norma orizzontalmente. Esso è tipicamente usato per processi a bassa temperatura quali la pirolisi. Piani multipli, letto mobile orizzontale, piani inclinati, cilindro con coclea.
Altro	**Tamburo rotante**	Garantisce un buon contatto gas-solido, tramite la rotazione.
	Vortex	Sfruttano i fenomeni di attrito e abrasione derivanti dall'alta velocità delle particelle per conseguire elevate velocità di reazione.

4.2 PIROLISI

Il processo di **pirolisi** consiste nella degradazione termica di un materiale, condotta **in totale** assenza di agente ossidante. L'eliminazione completa dell'ossigeno risulta alquanto difficoltosa da ottenere (molti rifiuti in effetti contengono quantità rilevanti di ossigeno), per cui durante la pirolisi si assiste anche all'ossidazione di alcuni composti. Il processo è complessivamente endotermico e richiede pertanto apporto di calore dall'esterno, in genere ottenuto attraverso la combustione di parte dei prodotti ottenuti, con particolare riguardo alla frazione gassosa.
Il processo di pirolisi viene, di norma, condotto in un campo di temperature comprese tra 400 e 800°C. L'azione del calore su di un rifiuto si esplica attraverso la rottura delle molecole complesse con formazione di composti più leggeri; il risultato del trattamento è quindi la produzione di:

- un gas (gas di pirolisi),
- una frazione liquida a temperatura ambiente (olio)
- un residuo solido ancora combustibile (char).

In linea generale i prodotti gassosi rappresentano dal 15% al 30% in peso del prodotto iniziale, con un'incidenza percentuale crescente con la temperatura del processo, e sono costituiti essenzialmente da idrogeno, monossido di carbonio, anidride carbonica, idrocarburi leggeri (metano, etano, etilene ed acetilene) ed altri costituenti minori.
Il residuo liquido ottenibile dalla condensazione della fase vapore rappresenta, mediamente, il 50-60% in peso del materiale di partenza; esso contiene notevoli tenori di umidità (sino al 60- 80%) ed è costituito da sostanze organiche complesse quali alcoli, chetoni ed idrocarburi condensabili di varia natura.
I residui solidi rappresentano circa il 20-30% in peso del materiale iniziale, ed hanno un potere calorifico mediamente compreso tra 5000 e 6000 kcal/kg: essi sono costituiti da sostanze a base carboniosa, simili ai carboni bituminosi alle basse temperature di pirolisi (400-500°C) ed a quelli di tipo antracitico a temperature più elevate (800-900°C).

I prodotti di pirolisi possono avere diversi impieghi, in funzione del tipo di materiale trattato, anche se per il trattamento di rifiuti l'utilizzo più frequente è **l'impiego come combustibile per la produzione di energia**. Le caratteristiche dei materiali ottenuti e le loro quantità relative dipendono, oltre che dal tipo di materiale trattato, dalle condizioni operative con le quali viene condotta la pirolisi, in particolare la temperatura ed il tempo di esposizione del materiale a tale trattamento.
Tempi lunghi di esposizione a temperature moderate favoriscono la produzione di char, mentre un'esposizione limitata a temperature medio-alte massimizza la produzione delle frazioni liquide. Ad esempio con tempi di esposizione molto brevi (inferiori a 1 secondo) a temperature dell'ordine dei 500°C è possibile ottenere una resa in liquidi fino all'80% della carica; per fare ciò è necessario "congelare" le reazioni e favorire la condensazione delle frazioni gassose formatesi attraverso un brusco raffreddamento (quenching) che consente di evitare la formazione di composti più leggeri che resterebbero allo stato gassoso a temperatura ambiente.
Se lo scopo principale invece è la formazione di un gas, è possibile ottenere un combustibile di buon potere calorifico (di norma compreso fra 3.500 e 5.000 kcal/Nm^3).
Le diverse condizioni operative attraverso le quali viene condotto il processo di pirolisi vengono principalmente individuate mediante il tempo di permanenza del materiale nelle condizioni caratteristiche del trattamento. Ciò consente di classificare tale processo secondo le seguenti categorie:

- slow pyrolysis o carbonizzazione, caratterizzata da basse velocità di reazione e temperature limitate (300-500 °C), in modo da massimizzare la resa in prodotti solidi (char);
- pirolisi convenzionale, in grado di fornire prodotti gassosi, solidi e liquidi, in quantità variabili in funzione soprattutto della temperatura operativa;
- pirolisi fast o flash, finalizzata a massimizzare la produzione di composti leggeri (gassosi o liquidi), suscettibili di ulteriori successivi trattamenti per l'impiego come combustibili o materia prima per l'industria chimica.

Per quanto riguarda le apparecchiature di pirolisi, esse sono più o meno le stesse impiegate per la gassificazione (letto fisso, letto mobile, letto fluido tamburo rotante); le esperienze più significative hanno riguardato tuttavia l'impiego del tamburo rotante con riscaldamento indiretto.

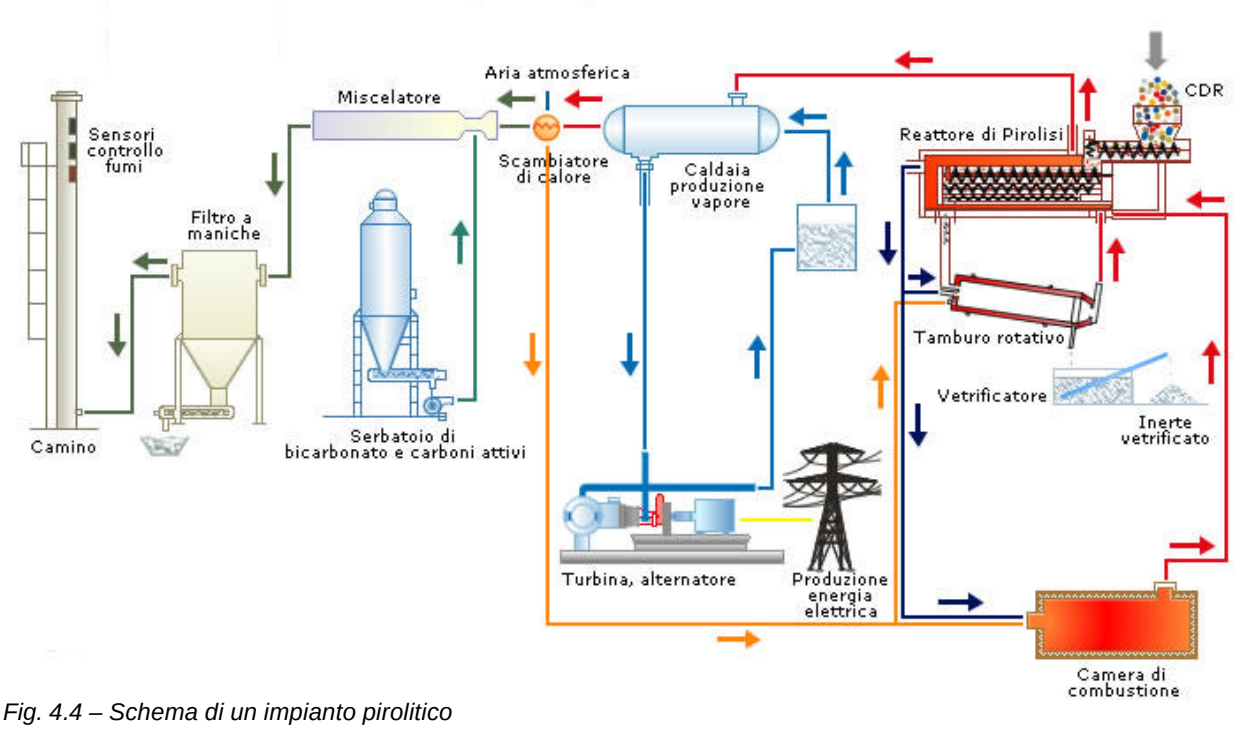


Fig. 4.4 – Schema di un impianto pirolitico

Un impianto pirolitico è in genere costituito dalle seguenti sezioni:

- alimentazione: il materiale viene prelevato e convogliato all'entrata dell'alimentazione attraverso sistemi che impediscano all'aria esterna di entrare nel reattore di pirolisi.
- reattore di pirolisi: la temperatura del processo è di 500-600 °C;
- camera di combustione gas di pirolisi-vetrificazione: è la sede in cui vengono combusti parte dei gas di pirolisi;
- caldaia a recupero per produzione di vapore;
- unità di trattamento fumi;
- sistema di controllo, impianto elettrico, quadro comandi;
- produzione di energia elettrica.

4.3 I PROCESSI COMBINATI

I trattamenti termici di rifiuti basati su un singolo stadio di gassificazione o pirolisi ben si adattano al trattamento di rifiuti piuttosto omogenei, quali quelli costituiti da rifiuti agricoli e forestali, che presentano limitate variazioni delle loro caratteristiche chimico-fisiche. In questo caso essi riescono a garantire, oltre alla compatibilità ambientale, anche interessanti risvolti economici in termini di costi di investimento e di esercizio.
Sono state tuttavia sviluppate alcune tecnologie più complesse, che impiegano la combinazione di due o più processi di trattamento termico, in grado di trattare rifiuti (e anche miscele di rifiuti) aventi caratteristiche meno omogenee e variabili nel tempo, quali, ad esempio i rifiuti urbani ed alcune tipologie di rifiuti industriali.

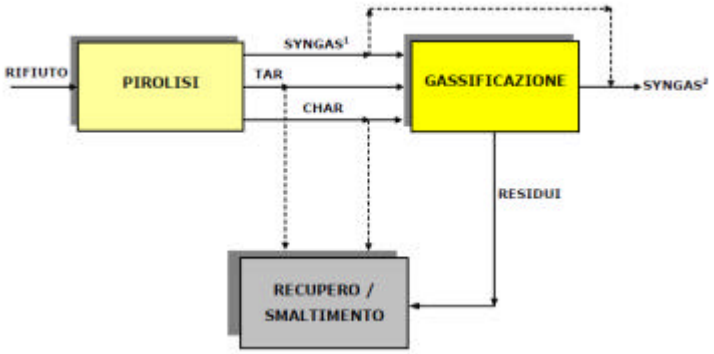


Fig. 4.5 – Processi combinati di pirolisi/gassificazione

L'adozione di processi combinati può scaturire dall'esigenza di conseguire particolari obiettivi di trattamento, molto spesso legati alla volontà del proponente di accedere a specifici segmenti di mercato ovvero alla necessità di fare fronte a precisi vincoli o prescrizioni, soprattutto di carattere ambientale.
La combinazione di diversi processi, oltre che da un'esigenza commerciale di "personalizzare" la propria tecnologia, deriva principalmente da differenti obiettivi che si vogliono conseguire, in funzione anche della situazione locale nella quale l'impianto sarà installato. Così, ad esempio trattamenti che prevedono solo uno stadio secondario di combustione sono finalizzati alla massimizzazione del recupero, evitando la necessità di trattare preventivamente il gas prima del suo impiego finale. Processi invece che abbinano la pirolisi e la gassificazione tendono a massimizzare il recupero del gas derivato, che tuttavia necessita di trattamenti di depurazione preventiva prima del suo impiego come combustibile in installazioni di recupero energetico non convenzionali (turbogas, motori alternativi, cicli combinati ad alta efficienza) ovvero come materia prima secondaria per l'industria chimica.

Trattamenti infine che prevedono uno stadio di vetrificazione dei residui solidi mirano ad ottenere un prodotto stabile, creando le condizioni di un suo potenziale riutilizzo, a scapito della quantità netta di energia elettrica e/o termica potenzialmente recuperabile.
Nella tabella che segue sono sinteticamente riportate le possibili combinazioni di processi attualmente proposte.

Tecnologie basate sui processi combinati
pirolisi + gassificazione
pirolisi + combustione
gassificazione + combustione
pirolisi + gassificazione+ combustione
gassificazione + vetrificazione
pirolisi + vetrificazione
gassificazione + combustione + vetrificazione

4.4 GASSIFICAZIONE AL PLASMA

I processi all'arco plasma possono essere considerati a tutti gli effetti dei processi di gassificazione, nei quali l'energia termica viene fornita tramite una torcia al plasma. Quest'ultima è un dispositivo attraverso il quale è possibile generare una corrente gassosa, detta plasma, ad elevatissima temperatura (fino a valori dell'ordine dei 10.000 °C) mediante una scarica che viene fornita attraverso un arco elettrico. Il plasma è quindi un gas ionizzato che si forma quando la scarica elettrica investe gli atomi di ossigeno e azoto, innescando una reazione a cascata e generando una corrente di elettroni e ioni globalmente neutra. Quando le molecole o gli atomi abbandonano lo stato energetico eccitato ritornando a livelli di contenuto energetico inferiore, viene emessa energia radiante che è assorbita dal materiale all'interno del reattore; si verifica un innalzamento della temperatura, con conseguente innesco di reazioni di pirolisi e gassificazione che portano alla distruzione del rifiuto, ivi inclusi i composti altamente pericolosi in esso contenuti.
La torcia la plasma ha trovato da decenni applicazioni in vari campi industriali quali ad esempio, il recupero di metalli nel settore metallurgico dalle scorie di trattamento. Vi sono inoltre alcune applicazioni per lo smaltimento di rifiuti speciali pericolosi (di natura organica ed inorganica).
Di recente si sta proponendo la sua applicazione al recupero energetico di rifiuti, in considerazione del fatto che, in presenza di rifiuti organici, il gas derivato dal trattamento dei rifiuti può presentare caratteristiche interessanti come combustibile alternativo.
Dal punto di vista di principio l'applicazione della torcia plasma può avvenire secondo due diverse modalità:

- applicazione della torcia direttamente al rifiuto da trattare (in pezzatura adeguata), in linea generale quando è prevalente la funzione di termodistruzione del rifiuto;
- applicazione della torcia al gas prodotto da un processo di gassificazione posto a monte, quando lo scopo principale è quello di massimizzare la produzione di un gas combustibile ad alto contenuto di componenti leggeri.

Un impianto con torcia al plasma sembrerebbe avere i seguenti vantaggi [18]:

- produzione di scorie non lisciviabili e potenzialmente recuperabili, in luogo delle ceneri prodotte nei normali inceneritori da smaltire in discarica
- produzione di un syngas che, previa depurazione, può essere inviato ad un ciclo combinato con elevati rendimenti elettrici
- minore produzione di emissioni in atmosfera

4.5 GLI IMPIANTI A TECNOLOGIA INNOVATIVA ESISTENTI

L'applicazione ai rifiuti urbani di tecnologie alternative all'incenerimento tradizionale non ha trovato, fino ad oggi, a livello mondiale, una grande diffusione; fa eccezione il Giappone, dove è concentrata la quasi totalità degli impianti a tecnologia innovativa, per lo più basati sul processo di gassificazione e, in misura molto ridotta, sulla pirolisi.
In altri paesi (in particolare USA, Regno Unito e Italia) solo di recente si sta considerando la possibilità di fare ricorso a tecnologie di trattamento termico alternative all'incenerimento per lo smaltimento dei rifiuti urbani, avviando studi che ne verifichino l'applicabilità alle specifiche realtà locali ([11], [12], [13], [14], [18], [21], [24], [27], [28], [29], [32], [33], [34], [35], [37], [51], [78]).
La Tabella che segue riporta un elenco recente degli impianti a tecnologia alternativa che trattano rifiuti urbani [24].

Location	Company (Technology)	Began Operation	Feedstock	Gasification/ Pyrolysis	Capacity	Syngas / Waste Heat Utilization
Kita-kyushu City (Shin-Moji), Jap	Nippon Steel	2007	MSW, Sludge	G	720 t/d	23.5 MW Power
Stuttgart, Arkansas, USA	Primenergy/Riceland	1996	Rice Hulls	G	600 t/d	Steam, Power
Kurashiki, Okayama Pref., Japan	Thermoselect/JFE	2005	MSW+Industrial	G	550 t/d	Fuel, Mizushima Works
Tokyo Rinki Recycle Power, Japan	Ebara	2006	Industrial Waste	G	550 t/d	23 MW Power
Narumi Clean System, Nagoya, Ja	Nippon Steel	2009	MSW	G	530 t/d	9 MW Power
Ibaraki City #1, Osaka Pref., Japa	Nippon Steel	1980	MSW/CFC Gas	G	450 t/d	5 MW Power
RER Aomori RE Recycling, Japan	Ebara	2001	Industrial Waste, ASR	G	450 t/d	17.8 MW Power
Yorii, Saitama Prefecture, Japan	Thermoselect/JFE	2006	MSW+Industrial	G	450 t/d	SNG for Steam Turbine
Kawaguchi City, Japan	Ebara	2002	MSW	G	420 t/d	12 MW Power
Toyohashi City, Japan	Mitsui R-21	2002	MSW	P	400 t/d	8.7 MW Power
Akita City, Akita Prefecture, Japa	Nippon Steel	2002	MSW, Sludge	G	400 t/d	8.5 MW Power
Oita City, Oita Pref., Japan	Nippon Steel	2003	MSW, Sludge	G	387 t/d	9.5 MW Power
Hamm, Germany	Techtrade	2002	MSW, Sewage Sludge	P	353 t/d	power generation
Chiba, Chiba Prefecture, Japan	Thermoselect/JFE	1999	Industrial Waste	G	330 t/d	Power for Steel Works
Kita-kyushu Eco Energy, Japan	Nippon Steel	2005	Industrial Waste, ASR	G	320 t/d	14 MW Power
Ibaraki #2, Osaka Pref., Japan	Nippon Steel	1996	MSW	G	300 t/d	3.3 MW Power
Ishhaya, Nagasaki Pref., Japan	Thermoselect/JFE	2005	MSW	G	300 t/d	SNG for Steam Turbine
Goyang City, Republic of Korea	Nippon Steel/Posco E&	2009	MSW	G	300 t/d	6 MW Power
Kagawa, Japan	Hitachi-Zosen	2004	MSW	G	300 t/d	Power Generation
Eco Valley, Utashinai City, Japan	Hitachi Metals	2004	MSW or ASW	Plasma	274 t/d	7.9 MW Steam Turbine
Koga Seibu, Japan	Mitsui R-21	2003	MSW	P	260 t/d	4.5 MW Power
Kazusa Clean System #2, Japan	Nippon Steel	2006	MSW, Sludge	G	250 t/d	5 MW Power
Ansbach, Germany	Thermoselect	2004	MSW	G	240 t/d	Power Generation
Yame Seibu, Japan	Mitsui R-21	2000	MSW	P	220 t/d	2.0 MW Power
Nishiiburi, Japan	Mitsui R-21	2003	MSW	P	210 t/d	2.0 MW Power
Nagareyama, Japan	Ebara	2004	MSW	G	207 t/d	3 MW Power
Izumo, Japan	Thide Environment	2003	MSW, Industiral & Sludge	P	70,000 t/y	Power Generation
Narashino City, Chiba Pref., Japar	Nippon Steel	2002	MSW, Sludge	G	201 t/d	2.4 MW Power
Itoshima Area, Fukuoka Pref., Jap	Nippon Steel	2000	MSW, Sludge, CFC gas	G	200 t/d	3 MW Power
Kazusa Clean System #1, Japan	Nippon Steel	2002	MSW, Sludge	G	200 t/d	3 MW Power
Yangsan City, Republic of Korea	Nippon Steel	2007	MSW	G	200 t/d	Hot Water Recovery
Ube City, Japan	Ebara	2002	MSW	G	198 t/d	4.1 MW Power
Sakata Area Clean Union, Japan	Ebara	2002	MSW	G	196 t/d	2 MW Power
Shiga Area Clean Union, Japan	Ebara	2007	MSW	G	180 t/d	3 MW Power
Lizuka City, Fukuoka Pref., Japan	Nippon Steel	1998	MSW, Sludge	G	180 t/d	1.2 MW Power
Tajimi City, Gifu Pref., Japan	Nippon Steel	2003	MSW, Sludge	G	170 t/d	2.0 MW Power
St. Joseph, Missouri, USA	Primenergy, Lifeline Fo	2006	Corn Fiber	G	168 t/d	Steam
Jonesboro, Arkansas, USA	Primenergy, Riceland	1997	Rice Hulls	G	168 t/d	Steam, Process Heat
Chuno Union, Japan	Ebara	2003	MSW	G	168 t/d	2 MW Power
Ishikawa, Japan	Hitachi-Zosen	2003	MSW	G	160 t/d	Power Generation
Genkai Environmental Union, Japa	Nippon Steel	2003	MSW, Sludge		160 t/d	2.4 MW Power
Kyoboku Regional, Japan	Mitsui R-21	2003	MSW	P	160 t/d	1.5 MW Power
Burgau, Germany	Technip/Waste Gen	1988	MSW, Sewage Sludge	P	154 t/d	power generation
Ibaraki #3, Osaka Pref., Japan	Nippon Steel	1999	MSW	G	150 t/d	1.7 MW Power
Nara, Japan	Hitachi-Zosen	2001	MSW	G	150 t/d	Power Generation
Shimada City, Shizuoka Pref., Jap	Nippon Steel	2006	MSW, Sludge	G	148 t/d	2.0 MW Power
Mutsu, Aomori Prefecture, Japan	Thermoselect/Mitsubisl Materials/JFE Sub-License	2003	MSW	G	140 t/d	SNG for Steam Turbine
Hata Regional Municipalities, Japa	Nippon Steel	2002	MSW, Sludge	G	140 t/d	1.8 MW Power
Ebetsu City, Japan	Mitsui R-21	2002	MSW	P	140 t/d	2.0 MW Power
Fukuroi City, Shizuoka Pref., Japa	Nippon Steel	2008	MSW	G	132 t/d	1.7 MW Power
Toyokawa Hoi Health Union, Japa	Nippon Steel	2003	MSW, Sludge	G	130 t/d	1.85 MW Power
Kagawa Prefecture #1, Japan	Nippon Steel	1997	MSW	G	130 t/d	1.6 MW Power
Trenton, Ontario, Canada	TRI/Norampac	2006	Black Liquor Solids	G	127 t/d	Steam
Arras, France	Thide Environment	2004	Household Wastes	P	40,000 t/y	Industrial Steam

Location	Company (Technology)	Began Operation	Feedstock	Gasification/ Pyrolysis	Capacity	Syngas / Waste Heat Utilization
Iryu Health Facilities Adm., Japan	Nippon Steel	1997	MSW	G	120 t/d	1.1 MW Power
Niigata City, Niigata Pref., Japan	Nippon Steel	2002	SW, Sludge, Landfill Wast	G	120 t/d	1.5 MW Power
Tokushima, Tokushia Pref., Japan	Thermoselect/JFE	2005	MSW	G	120 t/d	SNG for Steam Turbine
Nippon Steel, Nogoya Works, Jap	Nippon Steel	2006	Industrial Waste, ASR	G	120 t/d	Internal Steam Supply
Kamaishi City, Iwate Pref., Japan	Nippon Steel	1979	MSW/CFC Gas	G	100 t/d	Hot Water Recovery
Takizawa Village, Iwate Pref., Jap	Nippon Steel	2002	MSW	G	100 t/d	1.2 MW Power
Ottawa, Ontario, Canada	Plasco Energy	2008	MSW	Plasma	100 t/d	Power Generation
Izumi, Osaka Pref., Japan	Thermoselect/Kyokoto	2005	Industrial Waste	G	95 t/d	SNG for Steam Turbine
Minami-Shinshu, Japan	Ebara	2003	MSW	G	93 t/d	.8 MW Power
Seino Environmental, Japan	Nippon Steel	2004	MSW	G	90 t/d	Hot Water Recovery
Kameyama City, Mie Pref., Japan	Nippon Steel	2000	MSW, Landfill Waste	G	80 t/d	1.25 MW Power
Dalton, Georgia, USA	Primenergy, Shaw Carp	2006	Carpet Residues	G	80 t/d	Steam
Singapore	Entech Renewable Ene	1997	Food Processing Wastes	P	72 t/d	4.0 MWt (as Steam)
Kagawa Prefecture #2, Japan	Nippon Steel	2002	MSW	G	65 t/d	1.1 MW Power
Honshu, Yamagata Pref., Japan	Thermoselect/JFE	2007	wood chips	G	65 t/d	Power Generation
Korea	Entech Renewable Ene	2006	MSW	P	60 t/d	Power Generation
Hong Kong	Entech Renewable Ene	1990	MSW	P	58 t/d	Power Generation
Nagasaki, Japan	Hitachi-Zosen	2003	MSW	G	58 t/d	Power Generation
Heffley Creek, British Columbia	Nexterra	2006	Hog Fuel (Wood Residues)	G	27,600 t/y	Synthetic Natural Gas
Aalen, Germany	PKA	2001	MSW	P/G	27,000 t/y	SNG as energy source
Genting/Sri Layang, Malaysia	Entech Renewable Ene	1998	MSW (WDF)	P	60 t/d	6.9 MWt
Westbury, Canada	Enerkem	2008	creosoted urban wood	G	40 t/d	Ethanol
P.N.G.	Entech Renewable Ene	2003	MSW	P	40 t/d	Power Generation
Romoland, California, USA	IES	2007	MSW	P	40 t/d	SNG as energy source
Gifu, Japan	Hitachi-Zosen	1998	MSW	G	33 t/d	Power Generation
Geochang, South Korea	OE Gasification	2007	Curbside MSW	G	30 t/d	Steam or Hot Water
Chung Gung Municipality, Taiwan	Entech Renewable Ene	1991	MSW	P	30 t/d	2.3 MWt (Steam)
Korea	Entech Renewable Ene	2003	MSW	P	30 t/d	Power Generation
Bristol, United Kingdom	Compact Power	2002	Clinical & Special Waste	P/G	9,000 t/y	Heat for Autoclave
Richland, Washington, USA	InEnTech, LLC	2005	MSW	Plasma	25 t/d	SNG for biofuels, etc.
Bosung II, South Korea	OE Gasification	2006	Curbside MSW	G	25 t/d	Steam or Hot Water
Heanam, South Korea	OE Gasification	2003	Curbside MSW	G	25 t/d	Steam or Hot Water
Gangjin, South Korea	OE Gasification	2006	Curbside MSW	G	25 t/d	Steam or Hot Water
Mihama-Mikata, Japan	Hitachi Metals	2002	MSW and sewage sludge	Plasma	25 t/d	Hot Water for Heating
Global Plasma, Inc., Taiwan	InEnTech, LLC	2005	Medical & Industrial Waste	Plasma	25 t/d	Power Generation
Bosung I, South Korea	OE Gasification	2001	Curbside MSW	G	20 t/d	Steam or Hot Water
Pyungshan, South Korea	OE Gasification	2007	Curbside MSW	G	20 t/d	Steam or Hot Water
Hapchon, South Korea	OE Gasification	2007	Curbside MSW	G	20 t/d	Steam or Hot Water
Wiggins, Mississippi, USA	Intrinergy	2007	Chipped Wood Residues	G		Steam
Vancouver, British Columbia	Nexterra	2009	Urban Wood Residues	G	3,000 t/y	Heat & Hot Water
Australia	Entech Renewable Ene	1996	MSW (WDF)	P	15 t/d	Power Generation
Indonesia	Entech Renewable Ene	1998	MSW (WDF)	P	15 t/d	Power Generation
Chung Gung Municipality, Taiwan	Entech Renewable Ene	1992	MSW (WDF)	P	15 t/d	2.3 MWt (Steam)
Broomfield, Colorado	Range Fuels	2006	Timber & Forest Residues	G	5 t/d	Ethanol
Sherbrooke, Quebec, Canada	Enerkem	2003	MSW pellets	G	5 t/d	Ethanol
Scinopharm Corporation, Taiwan	Entech Renewable Ene	2002	harmaceutical Prod. Wast	P	15 t/d	3.5 MWt
Fayetteville, Arkansas, USA	INEOS Bio Pilot Plant	2003	MSW, wood waste, etc.	G	1.5 t/d	Ethanol
Poland	Entech Renewable Ene	2004	liohazardous Waste (WDF	P	3.5 t/d	5.6 MWt
Broomfield, Colorado	Range Fuels	2006	Timber & Forest Residues	G	5 t/d	Ethanol
Sherbrooke, Quebec, Canada	Enerkem	2003	MSW pellets	G	5 t/d	Ethanol
Scinopharm Corporation, Taiwan	Entech Renewable Ene	2002	harmaceutical Prod. Wast	P	15 t/d	3.5 MWt
Fayetteville, Arkansas, USA	INEOS Bio Pilot Plant	2003	MSW, wood waste, etc.	G	1.5 t/d	Ethanol
Poland	Entech Renewable Ene	2004	liohazardous Waste (WDF	P	3.5 t/d	5.6 MWt

Il Giappone è stato il primo paese a realizzare impianti di gassificazione su scala industriale alimentati con rifiuti solidi urbani o con particolari categorie di rifiuti speciali, come i residui della rottamazione delle auto (car fluff). Nel 2007 risultavano operativi in Giappone 85 impianti di gassificazione (oltre 4.000.000 tonnellate/anno), con una potenzialità media di circa 200 t/giorno e con punte fino a 720 t/giorno [42].
La Nippon Steel ha realizzato, a partire dal 1979, 28 impianti di gassificazione ad alta temperatura (fino a 1.800°C) e vetrificazione delle scorie di potenzialità comprese tra 25.000 e 200.000 t/anno.
Gli impianti in esercizio hanno dimostrato una buona affidabilità tecnologica ed ambientale, soprattutto per le dimensioni medie (alle quali si adattano con maggiore difficoltà i termovalorizzatori per combustione diretta) e per specifici bacini di utenza, come aree con peculiari attività industriali.

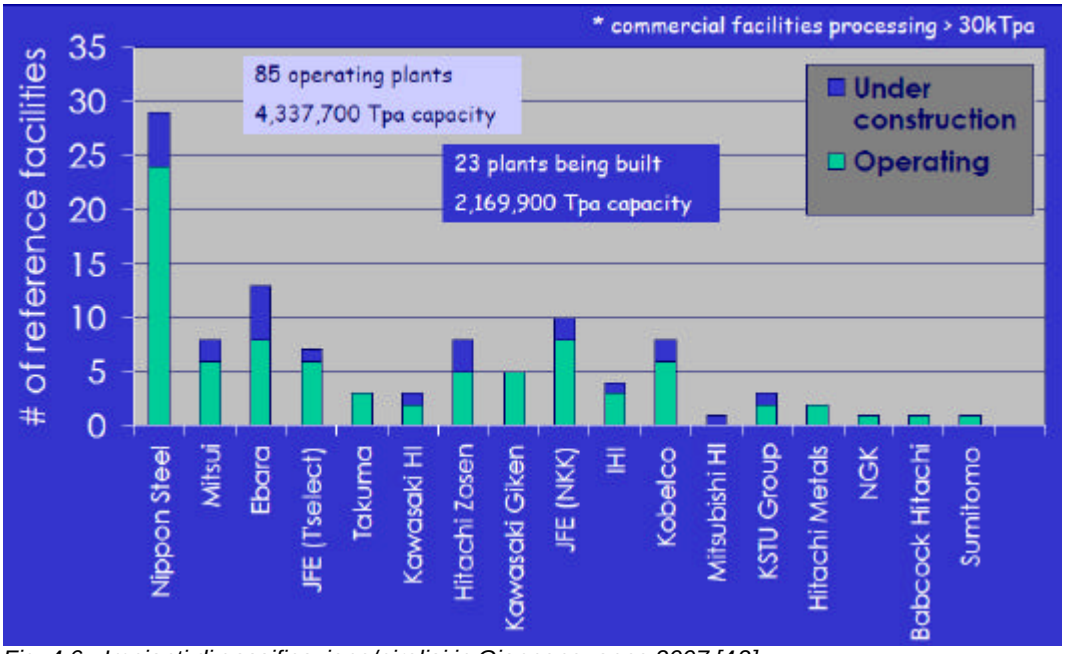


Fig. 4.6 - Impianti di gassificazione/pirolisi in Giappone, anno 2007 [42].

Le configurazioni impiantistiche diffuse in Giappone si distinguono sostanzialmente in:

- processo di gassificazione con fornace verticale e vetrificazione delle scorie (Nippon Steel, JFE NKK, Kawasaki HI, Sumitomo);
- processo di gassificazione con reattore a letto fluido (Ebara, Kobelco Eco Solutions, Hitachi Zosen, Kawasaki HI);
- processo pirolitico con forno rotante (Mitsui, Takuma, Babcock Hitachi, Mitsubishi HI, IHI);
- processo di pirolisi e gassificazione ad alta temperatura (Thermoselect, JFE);
- gassificazione tramite torcia al plasma (Hitachi Metals).

In Giappone si trovano due dei tre impianti esistenti al mondo che smaltiscono rifiuti urbani attraverso il processo della torcia al plasma:

- l'impianto di Utashinai (Giappone), costruito dalla Hitachi Metals, attivo dal 2002, tratta circa 300 t/giorno di rifiuti urbani e car fluff (alimentati in rapporto 1:1) con una produzione di energia elettrica complessiva di 7.9 MWh, di cui 4.3 MWh ceduti alla rete elettrica nazionale;
- l'impianto di Mihama-Mikata (Giappone), anch'esso realizzato dalla Hitachi Metals e attivo dal 2002, tratta 24 t/giorno di rifiuti urbani e 4 t/giorno di fanghi di depurazione di acque reflue, non produce, date le dimensioni, energia elettrica da syngas, ma vapore e acqua calda.

Il terzo impianto è quello dimostrativo di Ottawa (Canada) della Plasco Energy Group, entrato in funzione nel luglio 2007. Tale impianto al momento presenta problemi di affidabilità come facilmente verificabile dal sito www.zerowasteottawa.com ove sono reperibili i report mensili sul funzionamento dell'impianto. Tali problemi sono da attribuirsi al tentativo di trattare i rifiuti urbani tal quali, come richiesto dalla municipalità di Ottawa, garantendo la regolarità dell'alimentazione. Il problema potrebbe essere superato, secondo il parere dei tecnici, alimentando CDR con un PCI prossimo a 12 MJ/kg [18]. Nel 2008 l'impianto ha trattato complessivamente circa 1.400 t di rifiuti [43] e nei primi 8 mesi del 2009 ha trattato mediamente 41.5 t/giorno di rifiuti urbani a fronte delle 75 t/giorno previste (si vedano report mensili 2009 disponibili all'indirizzo http://www.zerowasteottawa.com/en/Trail-Road/).

La Tabella seguente, che riporta i 10 più grandi impianti di gassificazione/pirolisi di rifiuti urbani al mondo, dimostra che la presenza di impianti di taglia medio-grande è concentrata quasi esclusivamente in Giappone.

Tab. 4.2 - I 10 maggiori impianti di gassificazione/pirolisi al mondo (fonte: Juniper – modificata)

Luogo	potenzialità (t/anno)	processo	Data di avviamento	tecnologia
SVZ, Germania	250.000	Envirotherm BGL	2001	Gassificazione + fusione scorie
Shin Moji, Kitakyushu City, Giappone	220.000	Nippon Steel	2007	Gassificazione + fusione scorie
Ibaraki, Giappone	135.000	Nippon Steel	1980	Gassificazione +fusione scorie
Aomori, Giappone	135.000	Ebara	2001	Gassificazione+combutione + fusione
Kawaguchi, Giappone	125.000	Ebara	2002	Gassificazione+combutione + fusione
Toyohashi, Giappone	108.000	Mitsui	2002	Pirolisi+combutione + fusione
Akita, Giappone	120.000	Nippon Steel	2002	Gassificazione + fusione scorie
Oita, Giappone	115.000	Nippon Steel	2003	Gassificazione + fusione scorie
Chiba, Giappone	100.000	Thermoselect	2002	Gassificazione + fusione
Hamm, Germania	100.000	Techtrade	2002	Pirolisi + combustione

Nel panorama europeo esistono alcune significative applicazioni industriali di tecnologie innovative.
In particolare per quanto riguarda la tecnologia della gassificazione vanno segnalati:

- i 7 impianti di gassificazione di rifiuti urbani di Energos (5 dei quali in Norvegia): si tratta di impianti di taglia medio-piccola (10.000 – 75.000 t/anno) basati sulla tecnologia della gassificazione su griglia; il primo di tali impianti è entrato in funzione nel 1997;
- l'impianto di gassificazione della Lurgi-Envirotherm di SVZ a Schwarze Pumpe in Germania che tratta una miscela combustibile di particolari caratteristiche (dimensioni di circa 20x80 mm) ad alto potere calorifico, costituita mediamente dal 20-25% di carbone, 45% di CDR in pellets, 10% di plastica, 10% di legno, 10% di catrame e fanghi in pellets con efficienze di produzione dell'energia elettrica dichiarate del 46,6% [41].

Sul fronte della pirolisi, al momento risultano in esercizio i seguenti impianti:

- l'impianto di Arras, Francia, della Thide Environment, entrato in esercizio nella primavera 2004; con una capacità teorica di 50.000 t/anno l'impianto non è riuscito di fatto a trattare più di 15.000 t/anno e ha cessato definitivamente l'attività nel gennaio 2009.
- gli impianti della Techtrade in Germania: quello di Hamm-Uentrop attivo dal 2002 che tratta 100.000 t/anno di rifiuti ad alto potere calorifico (18MJ/kg) provenienti da raccolta differenziata del circuito domestico e da attività commerciali ed industriali ed è asservito alla locale elettrica a carbone, e quello di Burgau che tratta rifiuti solidi urbani, con una potenzialità di 40.000 t/anno, attivo dal 1987.

Per quanto riguarda il panorama italiano, fatta eccezione per il gassificatore di Roma Malagrotta, non esistono al momento impianti di smaltimento di rifiuti urbani basati su tecnologie innovative. Le applicazioni di tali tecnologie si basano essenzialmente su impianti di piccola taglia sviluppati e ingegnerizzati per trattare specifiche tipologie di rifiuti, quali ad esempio scarti di cartiera, pneumatici, plastiche, biomasse (scarti vegetali, legno, sansa di olive ecc).
Di seguito si riporta un elenco, probabilmente non esaustivo, di questi impianti risalente al 2001.

Tab. 4.3 - Impianti di gassificazione e pirolisi presenti in Italia nel 2001 (elaborazione da [9])

Località	Stato	Sviluppo	Tecnologia	Rifiuti trattati	Potenzialità [t/y]
Villa Santina (UD)	Inattivo	Pilota	Gassificatore statico	CDR, RPM	n.d.
Sedegliano (UD)	In progettazione	Dimostrativo	Pirolisi+gassificazione	RI	25.000
Montebelluna (TV)	In progettazione	Commerciale	Torcia al plasma	Fraz. secca, CDR	115.000
Dueville (VI)	In progettazione	Commerciale	Torcia al plasma	CDR, RS	92.000
Vicenza	n.d.	Dimostrativo	Gassificatore statico	Carbone, CDR	n.d.
Fornovo S.G (BG)	Operativo	Pilota	Gassificazione	PFU, CDR, RS	0,4 t/h
Cascina (PI)	In costruzione	Commerciale	Gass. a letto fluido	Biomasse	50.000
Terni	Operativo	Commerciale	Pirolisi	Biomassa	28.500
Roma	In fase di avvio	Commerciale	Gassificazione	CDR	190.000
Brindisi	In progettazione	Commerciale	Torcia al plasma	RU trattati	125.000
Rossano Calabro (CS)	In costruzione	Commerciale	Gassificazione	Sanse esauste	35.000
Torregrande (OR)	Operativo	Commerciale	Pirolisi	ROS, RS	15.000
Siniscola (NU)	In progettazione	Commerciale	Torcia al plasma	RS/RI	50.000

RU = rifiuti urbani; CDR = combustibili da rifiuti; PFU = pneumatici fuori uso; RS = rifiuti speciali; ROS = rifiuti di origine sanitaria; RI = rifiuti industriali; RPM = rifiuti di plastiche miste

Al 31/12/2008 gli inceneritori di rifiuti urbani risultavano 53, di cui 51 operativi e 2 in avviamento nel corso del 2009. La capacità complessiva di trattamento è pari a circa 6,7 milioni di tonnellate/anno, con una capacità media di circa 125.000 t/a. Tali impianti sono concentrati soprattutto nel Nord del Paese (29 su 53) con una capacità di trattamento pari al 66% del totale. Le tipologie di forno impiegate negli impianti di combustione dei rifiuti urbani operativi (2008) sono riconducibili a: forni a griglia, letti fluidi, reattori a tamburo rotante. In termini di capacità di trattamento, l'apparecchiatura a griglia risulta essere quella di gran lunga la più diffusa con un'incidenza dell'80,7% (14.687 t/giorno), seguita dal letto fluido con il 17,6% (3.199 t/giorno) e dal tamburo rotante con l'1,8% (319 t/giorno).

Nell'agosto 2008 è stata avviata la prima delle tre linee del gassificatore di Roma-Malagrotta, basato su tecnologia Thermoselect, con una potenzialità di 500 tonnellate/giorno di CDR.
Nel processo di gassificazione in funzione a Malagrotta il CDR viene inserito in un reattore dotato di bruciatori e lance ad ossigeno, che consentono di raggiungere temperature superiori a 1.600°C, nella zona inferiore, e a 1.200°C nella parte superiore [39]. Per effetto dell'elevata temperatura e l'addizione controllato di ossigeno, il CDR viene trasformato in syngas, avente PCI medio-basso (9 MJ/Nm^3), e in un residuo solido vetrificato. Segue quindi un complesso trattamento depurativo del syngas, prima del suo recupero energetico in sistemi ad alto rendimento, con una serie di potenziali vantaggi, così riassumibili:

- riduzione delle problematiche gestionali (corrosione, sporcamento, erosione nel generatore di vapore);
- rimozione, prima del processo di combustione, di sostanze inquinanti (HCl, polveri fini, SO2)
- ridimensionamento dei sistemi di depurazione dei fumi.

Dall'avvio del gassificatore (4 agosto 2008) è passato più di un anno. Il COLARI (Consorzio Laziale Rifiuti), gestore dell'impianto, ha scelto di non fornire risultati, analisi o dati inerenti il periodo di esercizio provvisorio, nonostante le attese siano tante e coinvolgano molti interlocutori, anche istituzionali.

5 LE TECNOLOGIE PRESE IN ESAME

Nel presente studio sono state prese in esame 24 Aziende che propongono altrettante tecnologie di trattamento termico dei rifiuti urbani alternative all'incenerimento; in particolare:

- 14 Aziende propongono una tecnologia definita nel report di Juniper "proven" o "fully proven" (cfr 1.2.1); di queste tre (Nippon Steel, Energos e TechTrade-Icom) hanno risposto al comunicato di cui al par. 1.2.2;
- 5 Aziende (TPF-Basse Sambre, Vuzeta, Inter Engineering, Tecnogranda, ICOM-GEIE) hanno presentato la loro proposta rispondendo al comunicato (in giallo nella tabella che segue);
- 5 Aziende (Compact Power, Plasco Energy, Pyromex, Startech Environmental, Thermoselect), pur proponendo una tecnologia giudicata "dimostrativa" da Juniper, sono state inserite nell'indagine in quanto note agli autori per partecipazione a convegni e/o pubblicazioni scientifiche (in celeste nella tabella che segue).

La Tab. 5.1 riporta l'elenco delle 24 Aziende che propongono tecnologie di trattamento termico dei rifiuti basate su processi di pirolisi, gassificazione, torcia al plasma e che sono state prese in esame per la redazione del presente Rapporto; per ciascuna Azienda (o raggruppamento di aziende, perché spesso sono diverse le aziende che detengono il brevetto di una medesima tecnologia) viene indicato:

- processo su cui basa la tecnologia;
- range di potenzialità degli impianti esistenti: potenzialità del più piccolo e potenzialità del più grande impianto in esercizio;
- tipologia di rifiuto trattata negli impianti in esercizio;
- numero di impianti in attività al momento della redazione del rapporto;
- anno di entrata in esercizio del primo e dell'ultimo impianto realizzato
- giudizio sulla tecnologia espresso nel report Juniper (se ricompresa in tale elenco).

Nei paragrafi che seguono vengono passate in rassegna in maniera sintetica le 24 tecnologie prese in esame, suddivise in gruppi a seconda del principio di processo utilizzato per trattare termicamente i rifiuti:

- gassificazione
- pirolisi
- processi combinati di pirolisi/gassificazione, pirolisi/combustione, gassificazione/combustione
- gassificazione con torcia al plasma
- altri processi non inquadrabili in una delle voci precedenti: si tratta nella sostanza di proposte tecnologiche di Soggetti che hanno risposto all'indagine esplorativa di ATO-R.

Tab. 5.1 – Elenco delle tecnologie considerate nel presente studio.

	Azienda	Processo	Range di potenzialità impianti esistenti [t/anno]	Tipologia rifiuto (1)	Numero di impianti in esercizio	Anno di entrata in esercizio (primo-ultimo)	Giudizio Juniper (2)
1	AlterNRG(Canada), Westinghouse Plasma Corporation, Hitachi Metals (Giappone)	plasma	8.000-90.000	RU, CDR, fluff, PFU	2 in Giappone: in fase di realizzazione un impianto in USA della potenzialità di 1.000 t/giorno	2002-2002	proven
2	Compact Power (UK)	Pirolisi e gassificazione	8.000	ROS	1 in Gran Bretagna per rifiuti ospedalieri; previsto ampliamento per ulteriori 24.000 t/anno di rifiuti urbani	2002	demonstrated
3	Ebara TIFG (Giappone)	Gassificazione	34.000-180.000	RU, RI	8	2002-2007	fully proven
4	Ecologia Informatica T.W.R. (Italia)	Gassificazione		Rifiuti chimici farmaceutici	4		proven
5	Energos (Norvegia)	Gassificazione	10.000-75.000	RU	7	1997-2009	fully proven
6	Enerwaste International Corporation EWOX (USA), Planet Advantage (UK)	Gassificazione	500-40.000	RU	8	2005-2008	proven
7	Entech (Australia), IET Energy (UK)	Gassificazione	5.000-20.000	RU	8	1991-2006	fully proven
8	Hitachi Zosen (Giappone)	Gassificazione	10.000-100.000	RU	8	1998-2004	fully proven
9	Inter Engineering (Germania)	dissoluzione in soluzione salina e gassificazione		Biomassa, scarti legnosi	In fase di realizzazione impianto pilota da 50 t/giorno in Germania		
10	Kawasaki Heavy Industries (Giappone)	Gassificazione		RU	2		proven
11	Kobelco (Giappone)	Gassificazione	20.000-80.000	RU	8	2000-2008	fully proven
12	Lurgi (Germania), Envirotherm (Germania)	Gassificazione	380.000	CDR, RI, legno, carbone	1		fully proven
13	Mitsui (Giappone), Takuma (Giappone)	Pirolisi e combustione	50.000-108.000	RU, fluff	6	2000-2008	fully proven
14	Nippon Steel (Giappone), Paul Wurth (Italia)	gassificazione	30.000-230.000	RU, RI	28 in esercizio, 8 in fase di realizzazione	1979-2008	fully proven
15	PKA (Germania)	Pirolisi e gassificazione	12.000-27.000	RU, RI	2	1999-2000	proven
16	Plasco Energy (Canada)	Gassificazione+plasma	28.000	RU	1	2007	demonstrated
17	Pyromex (Svizzera)	gassificazione		RU, fanghi	In fase di realizzazione un impianto da 25 t/giorno		demonstrated
18	Startech Environmental (USA)	plasma		RU			demonstrated
19	TechTrade (Germania), Wastegen (UK), Icom (Italia)	pirolisi	40.000-110.000	RU, fanghi	2	1987-2002	proven

	Azienda	Processo	Range di potenzialità impianti esistenti [t/anno]	Tipologia rifiuto (1)	Numero di impianti in esercizio	Anno di entrata in esercizio (primo-ultimo)	Giudizio Juniper (2)
20	Tecnogranda SpA (Italia)	Pirolisi e gassificazione		Biomassa, RU			
21	Thermoselect (Svizzera), IWT (USA), JFE (Giappone), 7 Hills (Svizzera)	Pirolisi e gassificazione	30.000- 200.000	RU, RI	7	2002-2006	demonstrated
22	Thide Environnement (Francia)	pirolisi	10.000-70.000	RU, RI	3	2002-2004	proven
23	Tpf Basse Sambre	Pirolisi e gassificazione	12.000	RU/CDR	1	2003	
24	Vuzeta (Italia)	"ristrutturazione molecolare" con l'utilizzo di un catalizzatore		biomassa			

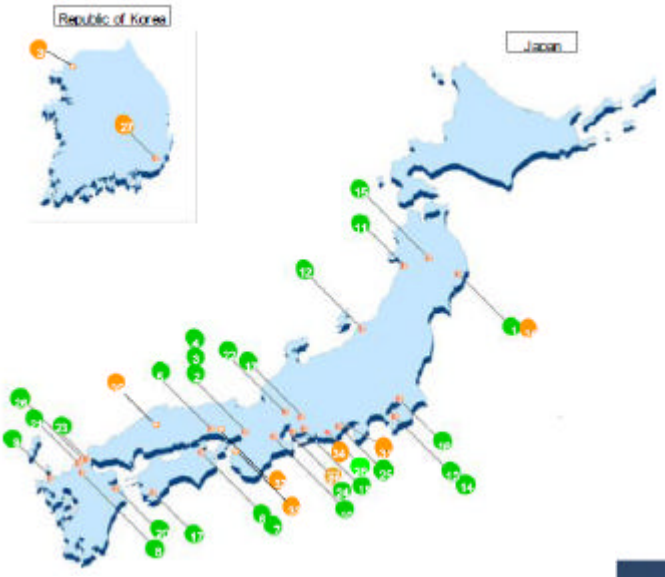
RU = rifiuti urbani; CDR = combustibili da rifiuti; PFU = pneumatici fuori uso; RS = rifiuti speciali; ROS = rifiuti di origine sanitaria; RI = rifiuti industriali; RPM = rifiuti di plastiche miste

Fully proven: tecnologia matura, applicazione commerciale
Proven: tecnologia provata, anche a scala industriale ma che presenta dei limiti (es. taglia, tipologia di rifiuti in ingresso, etc)
Demonstrated: tecnologia provata su scala pilota
Conceptual: tecnologia per cui sono disponibili dati molto limitati
Not rated: tecnologia per cui non sono disponibili informazioni sufficienti per esprimere un giudizio

5.1 IMPIANTI DI GASSIFICAZIONE

5.1.1 Nippon Steel

La Società Giapponese Nippon Steel, terzo produttore mondiale dell'acciaio, è il Soggetto che tratta la maggior quantitativo di rifiuti urbani attraverso un processo termochimico ad alta temperatura detto DMS (Direct Melting System, Sistema a Fusione Diretta); si tratta di gassificazione di RSU e fusione delle scorie tramite forno a tino.
La Paul Wurth Italia di Genova ha recentemente stipulato un accordo esclusivo con la Nippon Steel Engineering per la commercializzazione in Italia del processo DMS.
La Nippon Steel ha realizzato 28 impianti industriali con tecnologia DMS attualmente operativi, di cui 27 in Giappone e uno in Corea; 8 impianti industriali sono in fase di costruzione o avviamento, di cui 7 in Giappone e uno in Corea.
I primi due impianti DMS, ad oggi ancora in attività, vennero consegnati circa 25 anni fa alle città di Kamaishi e Ibaraki. La città di Ibaraki ha costruito nel 1996 un nuovo impianto per incrementare la capacità di trattamento.



Impianto di Shin-Moji nella città di Kitakyushu



Yangsan, Corea



Akita Total Environment Center



Tab. 5.2 – Impianti Nippon Steel in esercizio

No.	Client	Type of Waste to be treated	Capacity	Start-up	Waste Heat Utilization
1	Kamaishi City, Iwate Pref.	Municipal Solid Waste (including Incombustibles) CFC gas	100t/d (50t/d x 2sets)	Sep. 1979	Hot water recovery
2			450t/d (150t/d x 3sets)	Aug. 1980	
3	Ibaraki City, Osaka Pref.	Municipal Solid Waste (including Incombustibles) CFC gas	300t/d (150t/d x 2sets)	Apr. 1996	Waste heat boiler/ power generation (capacity : 10,000kW)
4			150t/d (Renewed)	Apr. 1999	
5	Iryu Health Facilities Administration Union, Hyogo Pref.	Municipal Solid Waste (including Incombustibles)	120t/d (60t/d x 2sets)	Apr. 1997	Waste heat boiler/ power generation (capacity : 1,100kW)
6	East Incineration Facilities Union, Kagawa Pref.	Municipal Solid Waste (including Incombustibles) Incineration Residues	130t/d (65t/d x 2sets)	Apr. 1997	Waste heat boiler/ power generation (capacity : 1,600kW+1,100kW)
7			65t/d (Additional)	Apr. 2002	
8	Iizuka City, Fukuoka Pref.	Municipal Solid Waste (including Incombustibles) Sludge	180t/d (90t/d x 2sets)	Apr. 1998	Waste heat boiler/ power generation (capacity : 1,200kW)
9	Itoshima Area Fire Fighting & Facilities Union, Fukuoka Pref.	Municipal Solid Waste (including Incombustibles) Sludge, Sludge-incineration Residues, CFC gas	200t/d (100t/d x 2sets)	Apr. 2000	Waste heat boiler/ power generation (capacity : 3,000kW)
10	Kameyama City, Mie Pref.	Municipal Solid Waste (including Incombustibles) Landfill Waste	80t/d (40t/d x 2sets)	Apr. 2000	Waste heat boiler/ power generation (capacity : 1,250kW)
11	Akita City, Akita Pref.	Municipal Solid Waste (including Incombustibles), Sludge, Incineration Residues	400t/d (200t/d x 2sets)	Apr. 2002	Waste heat boiler/ power generation (capacity : 8,500kW)
12	Niigata City [Yoroigata Clean Center], Niigata Pref.	Municipal Solid Waste (including Incombustibles) Sludge, Landfill Waste, CFC gas	120t/d (60t/d x 2sets)	Apr. 2002	Waste heat boiler/ power generation (capacity : 1,500kW)
13	Kazusa Clean System Co., Ltd. Chiba Pref.	Municipal Solid Waste (including Incombustibles) Sludge, Incineration Residues	200t/d (100t/d x 2sets)	Apr. 2002	Waste heat boiler/ power generation (capacity : 3,000kW)
14			250t/d (125t/d x 2sets)	Mar.2006	Waste heat boiler/ power generation (capacity : 5,000kW)
15	Tekizawa Village, Iwate Pref.	Municipal Solid Waste (including Incombustibles)	100t/d (50t/d x 2sets)	Oct. 2002	Waste heat boiler/ power generation (capacity : 1,200kW)
16	Narashino City, Chiba Pref.	Municipal Solid Waste (including Incombustibles) Sludge	201t/d (67t/d x 3sets)	Nov. 2002	Waste heat boiler/ power generation (capacity : 2,400kW)
17	Hata Regional Municipality Administrative Union, Kochi Pref.	Municipal Solid Waste (including Incombustibles) Sludge	140t/d (70t/d x 2sets)	Dec. 2002	Waste heat boiler/ power generation (capacity : 1,800kW)
18	Tajimi City, Gifu Pref.	Municipal Solid Waste (including Incombustibles) Sludge	170t/d (85t/d x 2sets)	Apr. 2003	Waste heat boiler/ power generation (capacity : 1,900kW)
19	Toyokawa Hoi Health Union, Aichi Pref.	Municipal Solid Waste (incl. Incombustibles), Incineration Residues, Sludge, Sludge-incineration Residues	130t/d (65t/d x 2sets)	Apr. 2003	Waste heat boiler/ power generation (capacity : 1,850kW)
20	Oita City, Oita Pref.	Municipal Solid Waste (including Incombustibles) Sludge	387t/d (129t/d x 3sets)	Apr. 2003	Waste heat boiler/ power generation (capacity : 9,500kW)
21	Genkai Environmental Union [Munakata Plant], Fukuoka Pref.	Municipal Solid Waste (including Incombustibles) Sludge	160t/d (80t/d x 2sets)	Jun. 2003	Waste heat boiler/ power generation (capacity : 2,400kW)
22	Seinoh Environmental Maintenance Union, Gifu Pref.	Municipal Solid Waste (including Incombustibles) Incineration Residues	90t/d (90t/d x 1set)	Apr. 2004	Hot water recovery
23	Kita-kyushu Eco Energy Co., Ltd. Fukuoka Pref.	Industrial Waste (Including Automobile Shredding Residues)	320t/d (160t/d x 2sets)	Apr. 2005	Waste heat boiler/ power generation (capacity : 14,000kW)
24	Nippon Steel Corporation Nagoya Works, Aichi Pref.	Industrial Waste (Automobile Shredding Residues)	120t/d (120t/d x 1set)	Feb.2006	Internal steam supply
25	Shimada City ,Shizuoka Pref.	Municipal Solid Waste (including Incombustibles) Sludge	148t/d (74t/d x 2sets)	Apr.2006	Waste heat boiler/ power generation (capacity : 1,990kW)
26	Kita-kyushu city [Shin-Moji Plant], Fukuoka Pref.	Municipal Solid Waste (including Incombustibles) Sludge	720t/d (240t/d x 3sets)	Apr.2007	Waste heat boiler/ power generation (capacity : 23,500kW)
27	Yangsan city, Republic of Korea	Municipal Solid Waste (including Incombustibles)	200t/d (100t/d x 2sets)	Nov.2007	Hot water recovery *Supplied by POSCO E&C Co.,Ltd.
28	Fukuroi city and Mori town regional administration union, Shizuoka Pref.	Municipal Solid Waste (including Incombustibles) Incineration Residues	132t/d (66t/d x 2sets)	Apr.2008	Waste heat boiler/ power generation (capacity : 1,700kW)

La gassificazione si realizza in un forno a tino, dove vengono introdotti i rifiuti unitamente a coke in misura di circa il 4-5% in peso dei rifiuti in ingresso e calcare (5% in peso); il forno è caratterizzato da quattro zone: la zona di essiccamento e preriscaldo (mantenuta attorno ai 400°C), la zona di decomposizione termica e gassificazione (da 400°C a 1.000°C), la zona di combustione (da 1.000 a 1.700°C) e la zona di fusione (da 1.700 a 1.800°C).
I gas prodotti sono emessi dalla sommità del forno e completamente bruciati nella successiva camera di combustione. I fumi in uscita sono quindi inviati alla caldaia di recupero per generare vapore utilizzato per la produzione di elettricità e per il funzionamento di altri servizi.
Le ceneri e il materiale inorganico che residuano dalla decomposizione termica passano con il coke nella zona di combustione e fusione. Il coke reagisce in presenza dell'aria soffiata nel forno dalle tubiere, producendo un'atmosfera riducente ad alta temperatura con la quale le ceneri e le sostanze inorganiche vengono completamente fuse. La scoria prodotta in questo modo, dopo la regolazione della sua basicità con il CaO contenuto nel calcare introdotto, viene scaricata dal sistema tramite il foro di colaggio e passata allo stadio di granulazione. Qui viene rapidamente raffreddata e solidificata sotto forma di una mistura granulare di loppa e metallo, che in Giappone viene utilizzata come materiale per l'edilizia.
I materiali in uscita dal processo sono costituiti da una scoria granulare (90-100 kg/ t di input), metalli (circa 10 kg/t input) e ceneri volanti derivanti dal sistema di filtrazione dei fumi (~30kg/ t input), che necessitano di trattamento per essere smaltite in discarica.

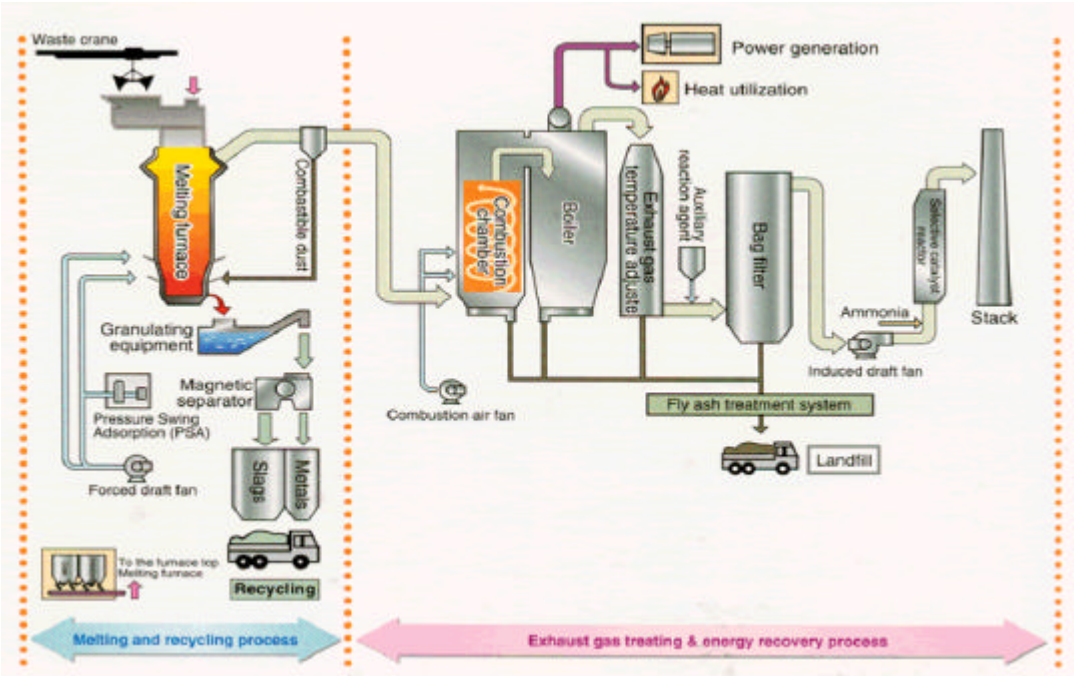


Fig. 5.1 – Tecnologia Nippon Steel – schema di processo

La tecnologia DMS è da considerarsi una tecnologia industrialmente matura, essendo supportata da un buon numero di referenze di impianti operativi, anche se pressoché tutte riferite alla situazione giapponese, per la quale le condizioni di mercato e le caratteristiche dei rifiuti potrebbero differire significativamente rispetto al contesto europeo e nazionale.
La scelta di utilizzare temperature molto elevate, per ottenere la vetrificazione delle scorie, è frutto dell'esigenza fortemente sentita in Giappone di minimizzare l'uso della discarica e di massimizzare il recupero/riciclo dei residui di trattamento.
Un motivo di perplessità risiede nei costi associati alla realizzazione e all'esercizio di questo tipo di impianti, costi che non sono noti nel dettaglio.
È da valutare anche l'entità del recupero energetico conseguibile, alla luce del fatto che, contrariamente a quanto avviene in Italia, tale aspetto non è di particolare interesse in Giappone.

5.1.2 Ebara

La società EBARA, con sede a Tokio, ha una lunga esperienza nel campo dei sistemi di combustione a letto fluidizzato per i materiali di scarto; la società ha modificato il reattore a letto fluido bollente per consentirne il funzionamento come gassificatore, aggiungendo una camera di combustione secondaria, in cui il gas prodotto è bruciato con l'aggiunta di aria (**Processo TwinRec**). Il primo impianto pilota con questa tecnologia risale al 1995.
Esistono attualmente sei impianti operativi in Giappone, per un totale di 16 linee, le cui caratteristiche principali si riportano nella tabella che segue.

Tab. 5.3 – Impianti Ebara in esercizio

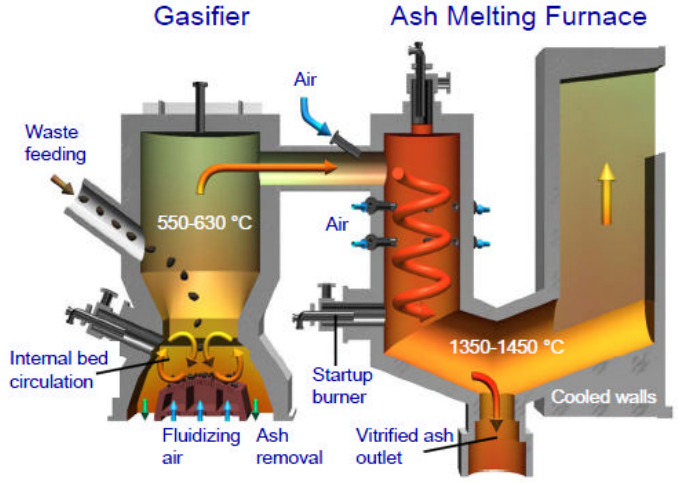
Località	Data inizio attività	Tipologia rifiuto	Potenzialità [t/ anno]	PCI [MJ/kg]	Capacità termica [MW]	Elettricità prodotta [MWe]
Minami Shinshu	Marzo 2003	RSU	34.000	8,4	2·4,5	
Chuno Union	Marzo 2003	RSU	61.000	11,3	3·7,3	
Sakata Area	Marzo 2002	RSU	72.000	10,9	2·12,3	2
Ube City	Novembre 2002	RSU	72.000	12,5	3·9,5	
Nagareyama City	Febbraio 2004	RSU	75.000	11,7	3·9,3	
Kawaguchi	Novembre 2002	RSU	153.000	13	3·21	12



Fig. 5.2 - Impianto TwinRec a Aomori, Kawaguchi, Kurobe, Sakata, Joetsu

Il rifiuto triturato (pezzatura inferiore a 300 mm) viene alimentato ad un gassificatore costituito da un letto fluido circolante che utilizza aria come fonte di ossigeno; non è necessario combustibile ausiliario, se non nella fase di avvio. La gassificazione avviene a pressione atmosferica e a temperature relativamente basse (550-630°C).

La funzione principale del gassificatore è la separazione dei fini e della parte combustibile dagli inerti e dalla frazione metallica contenuta nei rifiuti. Gli inerti di maggiori dimensioni, insieme a vetro e metallo, lasciano la base del reattore come scorie di fondo, da cui i metalli sono successivamente separati, per essere avviati a recupero. Gli inerti di dimensioni più ridotte vengono ricircolati al gassificatore, per costituirne il letto.
Il syngas e le ceneri volanti (particelle carboniose e ceneri inorganiche) prodotte nel gassificatore sono bruciati insieme nella sezione di fusione delle ceneri (Ash Melting Furnace), dove l'immissione di aria secondaria provoca una reazione dei composti carboniosi e un innalzamento della temperatura fino a 1.350-1.400°C. Le particelle fini sono raccolte sulle pareti e lentamente vetrificate. Lo spegnimento delle ceneri vetrificate in acqua produce granelli con caratteristiche di bassa lisciviabilità.
È possibile frantumare le scorie ed introdurle nel combustore di fusione (con maggior dispendio energetico) per vetrificare tutto il materiale inorganico presente nel rifiuto di partenza.
L'impianto a tecnologia Twin-Rec proposto da EBARA necessita di gas naturale ed elettricità nella fase di avviamento; è in grado di produrre energia elettrica pari a circa 550 kWh/t di rifiuto trattato; di questa il 30% viene utilizzata per il fabbisogno interno.
I residui di processo che necessitano di smaltimento in discarica sono il 6,1%, le scorie vetrificate riutilizzabili il 6,7% [30]; circa la metà del residuo che finisce in discarica è costituito da inerti e vetro rimossi dal gassificatore a valle del recupero di metalli e della separazione della sabbia, che può essere ricircolata al reattore.



La tecnologia Twin-Rec è da considerarsi industrialmente matura contando 8 referenze in Giappone.
La produzione di energia elettrica appare più bassa di quella di un impianto di incenerimento tradizionale, probabilmente per il fatto che, contrariamente a quanto avviene in Italia, tale aspetto non è particolarmente incentivato in Giappone.
Rimangono inoltre alcune perplessità sui costi di investimento: i dati a disposizione, derivanti per lo più dalla proposta impiantistica per la città di New York [30,33] fanno ritenere l'investimento, per la realizzazione di un impianto di questo tipo, più alto di quello associabile agli impianti di incenerimento.

5.1.3 Ecologia Informatica

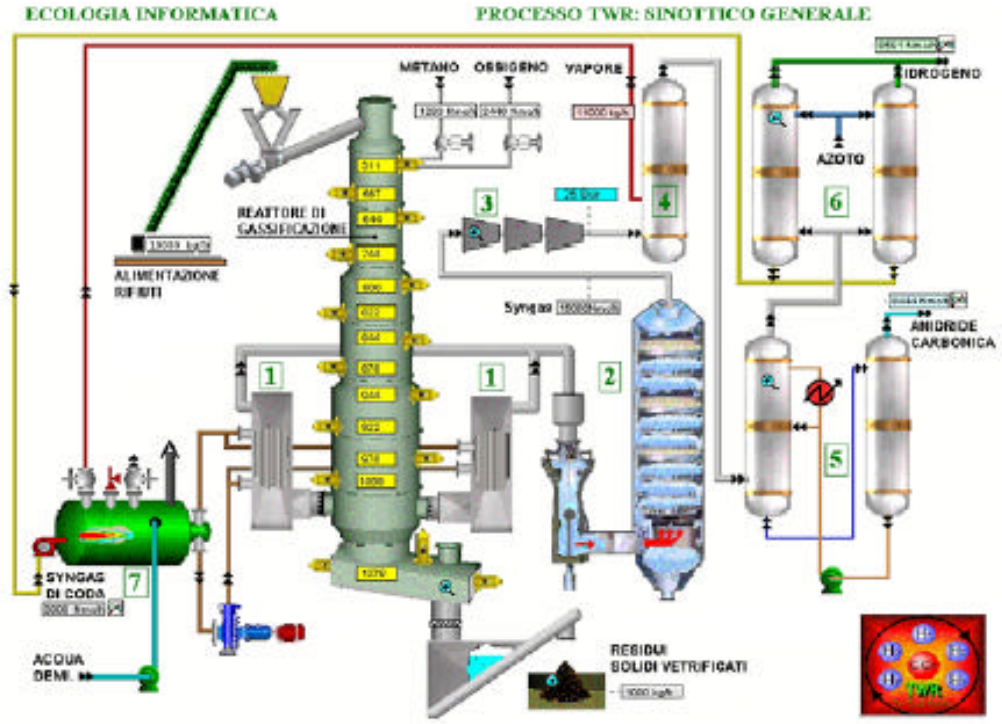
La società Ecologia Informatica, che opera nel settore chimico e petrolchimico, è proprietaria del marchio T.W.R.® (The Waste Remedy) per la costruzione di impianti di gassificazione di rifiuti urbani ed industriali.
Il processo ha trovato applicazione in alcuni impianti destinati allo smaltimento di rifiuti chimici pericolosi.



Impianto LEK D.D. Lendava (SLO)


Impianto CLARIANT LSM Origgio (VA)

Il rifiuto, previo pretrattamento, è introdotto nel reattore di gassificazione veloce suddiviso in tre sezioni: la prima sezione è rappresentata dal sistema di alimentazione delle materie prime, la seconda sezione è la zona di gassificazione veloce a profilo termico variabile, la terza sezione è costituita dal sistema di estrazione dei residui solidi di gassificazione. Il reattore si compone di una serie di tronchi cilindrici sovrapposti di diametro diverso su ognuno dei quali viene posizionata almeno una coppia di torce alimentate con ossigeno e metano dosati in rapporto stechiometrico, che consentono il mantenimento del profilo termico idoneo al trattamento del rifiuto alimentato.
Il range di temperatura nella sezione di gassificazione va da un minimo di 350°C, fino ad un massimo di 1200°C.
Dal processo di gassificazione si genera un syngas con concentrazioni di Idrogeno del 38-45% e di CO del 35-40%. Il syngas fuoriesce attraverso i due appositi tronchetti collegati ciascuno a due scambiatori di calore con l'obiettivo di raffreddare il syngas da 1200°C a 250°C, recuperando il calore per la produzione del vapore. Lo scambio di calore avviene tra il syngas, che passa all'esterno dei tubi, e l'olio diatermico, che passa internamente ad essi. L'olio diatermico viene fatto circolare in un circuito chiuso, collegato ad un generatore di vapore, dove viene recuperata l'entalpia contenuta nel syngas.
La sezione di estrazione dei residui solidi di gassificazione, ricavata nella parte inferiore del reattore, viene prevista con due modalità di funzionamento e conseguentemente con due soluzioni realizzative diverse: la prima soluzione prevede l'evacuazione dei residui in forma solida polverosa ed è praticata nei casi in cui l'omogeneità delle materie prime alimentate al reattore di gassificazione consente il riutilizzo dei residui come materia prima in altri processi; la temperatura di esercizio in questo caso è di circa 800°C. La seconda soluzione prevede la vetrificazione dei residui solidi con temperatura di esercizio di 1500°C.



IMPIANTO PER LA PRODUZIONE DI IDROGENO E CO2 DA RIFIUTI

Apparecchiature a completamento del reattore di gassificazione:
1. Recuperatore di calore;
2. Neutralizzazione e purificazione syngas;
3. Unità di compressione syngas;
4. Reattore di conversione CO+H2O in H2+CO2;
5. Separazione e recupero CO2;
6. Separazione e recupero H2;
7. Caldaia produzione vapore.

5.1.4 Energos

La società norvegese ENERGOS, specializzata nella tecnologia di gassificazione, è stata acquisita nel 2005 dal Gruppo inglese ENERG. L'Azienda ha realizzato, a partire dal 1997, 7 impianti di cui 5 in Norvegia, uno in Germania e uno nell'isola di Wight, della potenzialità di 30.000 t/anno, entrato in funzione nel 2009. Si tratta di impianti costruiti in moduli con una o più linee di trattamento in parallelo: il più grande ha due linee e una capacità di trattamento di 75.000 t/anno.

Tab. 5.4 – Impianti Energos in esercizio

Località	Inizio attività	Tipologia rifiuto	Capacità	Produzione di energia
Ranheim, Norvegia	1997	Rifiuto speciale, scarto di un'azienda che produce carta riciclata	10.000 t/anno	e. termica: 25 GWh/anno
Averoy, Norvegia	2000	Rifiuti urbani e speciali	34.000 t/anno	65 GWh (termici)/anno
Hurum, Norvegia	2001	Rifiuti urbani, rifiuti speciali (aeroporto di Oslo), scarti della lavorazione della carta	36.000 t/anno	90 GWh (termici)/anno
Minden ,Germania	2001	Rifiuti urbani (50%), RDF (50%	37.000 t/anno	100 GWh (termici)/anno
Forus, Norvegia	2002	Rifiuti urbani e speciali	38.000 t/anno	100 GWh (termici)/anno
Sarpsborg, Norvegia	2003	Rifiuti urbani e speciali	75.000 t/anno	190 GWh (termici)/anno
Isola di Wight , UK	2009		30.000 t/anno	Produzione di energia elettrica: 13.5 GWh/anno



Impianto Energos di Forus Stavanger



Impianto Energos di Averøy Nordmøre

Le fasi fondamentali del processo sono:

- triturazione e omogeneizzazione del rifiuto;
- gassificazione su griglia statica con camera di combustione posizionata direttamente sopra la griglia;
- generazione di vapore in caldaia e successivo utilizzo per produrre elettricità in turbina;
- depurazione dei fumi di combustione.

La conversione termica avviene in due stadi. L'essiccamento e la gassificazione del combustibile avvengono nell'unità di gassificazione equipaggiata con una griglia orizzontale raffreddata ad olio, divisa in numerosi settori separati, ciascuno con un sistema indipendente di alimentazione di aria. Il gas di sintesi proveniente dall'unità di gassificazione passa nella camera di ossidazione ad alta temperatura, dove l'iniezione di aria e di gas ricircolati, attraverso ugelli opportunamente distribuiti nella camera, assicura il controllo della temperatura (circa 850°C) e l'ossidazione completa del gas di sintesi proveniente dall'unità di gassificazione.
Le scorie di gassificazione sono scaricate e raffreddate in una vasca; i gas esausti passano dalla camera di ossidazione ad alta temperatura al sistema di recupero del calore, quindi al sistema di depurazione a secco basato sulla iniezione di adsorbente (calce e carboni attivi) nel flusso di gas, per rimuovere le componenti acide, adsorbire i metalli pesanti, il mercurio, il carbonio organico e le diossine. Le ceneri volanti e l'adsorbente sono separati dai gas in un filtro a maniche.

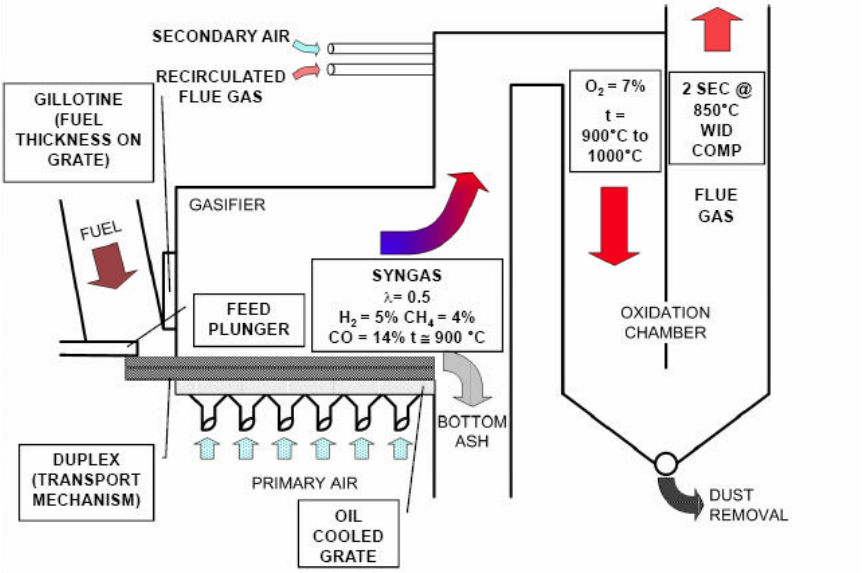


Fig. 5.3 – Tecnologia Energos – schema di processo

È possibile adattare la taglia alle specifiche esigenze mediante l'adozione di soluzioni modulari.

Tutti gli impianti hanno fatto registrare una disponibilità negli anni 2006-2008 superiore a 7.400 ore/anno; l'energia elettrica prodotta, a fronte di un PCI pari a 12 MJ/kg è di circa 750 kWh/t, di cui circa il 17% viene utilizzata per il fabbisogno dell'impianto con un'efficienza energetica netta del 18,5%.

Le scorie di fondo variano dal 7% al 20% del rifiuto in ingresso, in funzione della qualità del rifiuto alimentato e sono caratterizzate da TOC sempre inferiori al 2,4% e in genere dell'ordine di 0,1 – 0,6% [55].

Una particolarità consiste nelle concentrazioni piuttosto basse di ossidi di azoto nei fumi senza ricorrere all'installazione di sistemi deNO_x: è sempre garantito il rispetto di livelli inferiori a 100 mg/Nm^3: nel maggio 2007 i valori di concentrazione di NO_x registrati presso l'impianto di Averøy risultavano pari a 42 mg/Nm^3.

La tecnologia Energos è da considerarsi una tecnologia industrialmente matura, essendo supportata da 7 referenze nel suo campo di applicazione, che è, ad oggi, limitato ad impianti di capacità di trattamento inferiore a 75.000 t/a. I dati economici a disposizione fanno ritenere la tecnologia proposta competitiva nei confronti degli inceneritori tradizionali, in ragione del fatto che gli inceneritori per taglie così piccole non risultano economicamente sostenibili.

5.1.5 Enerwaste

EnerWaste, Inc. è una società americana specializzata in processi termici innovativi per il trattamento dei rifiuti. EnerGo progetta, produce e installa in esclusiva in Italia e nei paesi del bacino del mediterraneo la tecnologia EnerWaste. Il distributore per l'Inghilterra e l'Irlanda è Planet Advantage Limited. La tecnologia proposta per la gassificazione dei rifiuti urbani è il Batch Oxidation System (BOS) di capacità compresa tra 60 a 480 tonnellate al giorno. Il Batch Oxidation System è un reattore a caricamento con due sezioni separate di gassificazione e combustione del syngas prodotto, che non richiede pretrattamento dei rifiuti in ingresso.

La tabella che segue riporta gli impianti BOS realizzati dalla Società che trattano prevalentemente rifiuti urbani. L'impianto di Husavik, in Islanda, è realizzato da moduli ciascuno di capacità pari a 12 t/giorno. Il gas di sintesi è bruciato sul posto per produrre vapore caldo, inviato poi a un vicino impianto geotermoelettrico dove partecipa insieme ai vapori caldi geotermici alla produzione di energia elettrica.

Tab. 5.5 – Impianti Enerwaste in esercizio

Località	Inizio attività	Tipologia rifiuto	Potenzialità [t/ giorno]	Recupero energetico
Kwajalein Atoll, Marshal Islands	2008	Rifiuti base militare	38 t/d	
Husavik City, Islanda	2006	Rifiuti urbani, industriali, animali, pneumatici	22 t/d	Recupero di calore
Amec/Barrick, Alaska	2006	Rifiuti dell'industria estrattiva	1,3 t/d	
Grand Cayman Islands, British West Indies	2005-2008	Rifiuti urbani e ospedalieri	65 t/d	
North Slope, Alaska	2007	Rifiuti urbani e industriali	1,5 t/d	
City of Egegik, Alaska	2005	Rifiuti urbani	3,5 t/d	
Turks and Caicos	2008	Rifiuti urbani	4 t/d	
Scotgen	2008	Rifiuti misti	120 t/d	Produzione di e. elettrica (5 MW)



Fig. 5.4 – Impianto BOS™ di media taglia

I rifiuti da trattare vengono caricati con una pala meccanica nella prima camera; terminata l'operazione di carico la camera viene chiusa e il processo innescato tramite bruciatori di avviamento, che portano la massa a circa 550 °C; quindi la combustione parziale dei rifiuti si autosostiene in condizioni di carenza di ossigeno. La durata del processo varia dalle 10 alle 15 ore, in funzione delle caratteristiche dei rifiuti alimentati. I composti volatili e l'umidità che si liberano nella parte alta della camera passano nella sezione di post-combustione, nella quale vengono bruciati con aria ad alta temperatura, mentre il carbonio fisso rimane nella prima camera e brucia lentamente grazie ai lunghi tempi di permanenza previsti. Alla fine del ciclo di trattamento le scorie vengono scaricate dalla camera primaria, sempre in modo discontinuo, dopo opportuno raffreddamento. Prima di essere emessi in atmosfera i fumi in uscita dalla camera di post-combustione vengono trattati secondo le configurazioni tipiche di un qualsiasi impianto di incenerimento. Il recupero energetico può essere o meno effettuato in funzione della taglia dell'impianto che ne condiziona fortemente la sua fattibilità tecnico-economica. Il processo di gassificazione ha una durata di 10-13 ore con un tempo di ulteriori 10 ore per il completamento della combustione. L'intero ciclo BOS ha una durata totale di circa 24 ore. Le scorie prodotte sono circa il 5% in volume o 10% in peso.

EnerGo propone una specifica variante che si basa sulla possibilità di utilizzare il syngas che si libera dalla prima sezione per un suo successivo impiego in apparecchiature di conversione in energia elettrica ad alta efficienza (motori endotermici, turbine a gas, cicli combinati). In questo caso il syngas viene preventivamente depurato attraverso il lavaggio in un ciclone e il rapido raffreddamento per ottenere l'effetto di precipitazione del TAR, l'abbattimento dell'HCl, e la riduzione dell'umidità; successivamente il syngas viene inviato in un precipitatore elettrostatico per l'abbattimento delle polveri sottili e del TAR residuo.

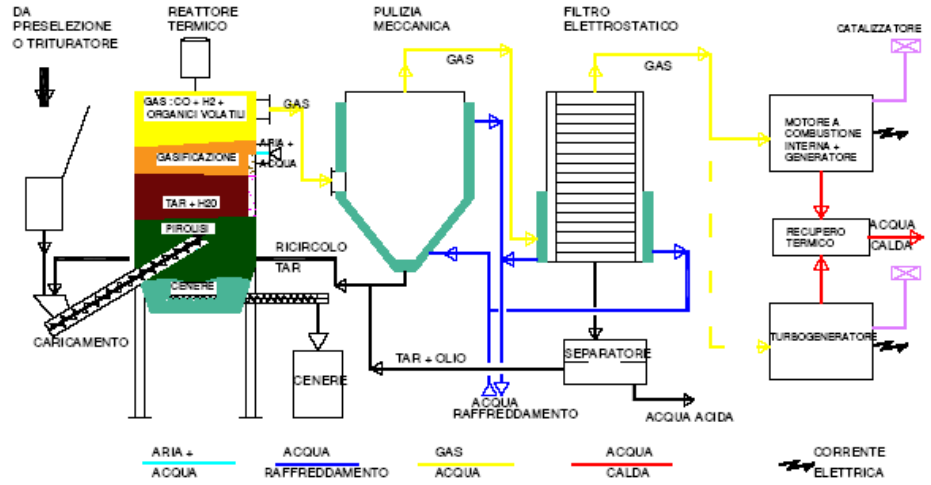


Fig. 5.5 – Tecnologia Energo – schema di processo

Questa tecnologia presenta numerose applicazioni in impianti di taglia ridotta su differenti tipologie di rifiuti. Per la variante proposta dalla Energo (depurazione del syngas e utilizzo in motori endotermici, turbine a gas, cicli combinati) non esistono ad oggi esperienze a livello dimostrativo. Un impianto pilota della capacità di 5 t/giorno è attualmente in fase di avviamento presso la discarica di Peccioli (PI); sono previste delle campagne sperimentali per verificare la praticabilità tecnico-economica di questa soluzione alternativa.
Per quanto riguarda la depurazione preventiva del syngas prodotto sussistono problematiche di tipo tecnico, che verranno approfondite nel seguito del documento e che di fatto, al momento, ne hanno impedito l'utilizzo in sistemi di recupero energetico maggiormente performanti.

5.1.6 Entech-IET Energy

La società ENTECH - Renewable Energy Technologies, produce un sistema di gassificazione a bassa temperatura di biomasse e rifiuti di capacità comprese tra 0,25 a 125 tonnellate al giorno, fino a unità multiple di capacità superiore alle 500 tonnellate al giorno. La IET Energy sviluppa la tecnologia Entech nel mercato inglese. La NTech Environmental rappresenta la Entech in Spagna, Irlanda, Grecia, Canada e Stati Uniti.

Tab. 5.6 – Impianti Entech in esercizio

Località	Inizio attività	Tipologia rifiuto	Capacità	Produzione di energia
Korea	2006	RSU	60 t/d	Energia Elettrica
Hong Kong	1990	RSU	58 t/d	Energia Elettrica
Genting/Malaysia	1998	RSU	60 t/d	6,9 MWt
P. Nuova Guinea	2003	RSU	40 t/d	Energia Elettrica
Chung Gung, Taiwan	1991	RSU	30 t/d	2,3 MWt (vapore)
Korea	2003	RSU	30 t/d	Energia Elettrica
Australia	1996	RSU	15 t/d	Energia Elettrica
Indonesia	1998	RSU	15 t/d	Energia Elettrica

Il processo consiste nei seguenti passaggi:

- alimentazione in continuo del gassificatore a letto mobile, che lavora a basse temperature (550°C) in condizioni di ossigeno substechiometriche;
- combustione di syngas in un reattore termico a 1200 °C, con ricircolo del gas di combustione e riduzione di NO_x tramite SNCR;
- produzione di energia per mezzo della caldaia e della turbina a vapore;
- sistema di pulizia del gas di combustione, tramite iniezione del reagente per abbattere i composti organici volatili, filtro a maniche e sistema di abbattimento dei gas acidi;
- recupero dei metalli ferrosi e non ferrosi e del vetro dai residui del gassificatore.

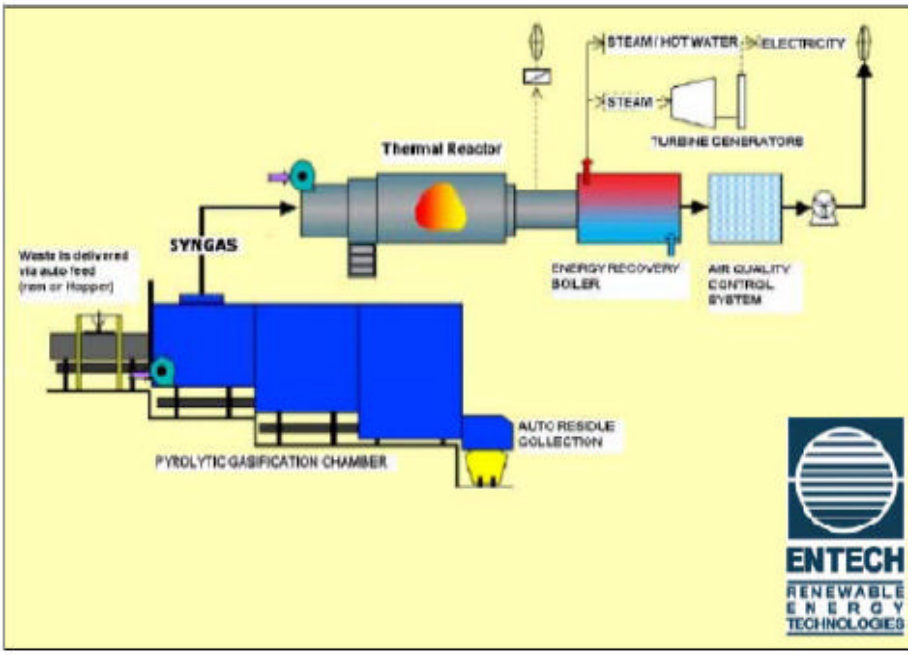


Fig. 5.6 – Tecnologia Entech – schema di processo

La tecnologia vanta un buon numero di applicazioni impiantistiche in diverse parti del mondo, ma non è stato possibile acquisire informazioni di dettaglio in relazione agli aspetti ambientali, di recupero energetico ed economici; pertanto non si è in grado formulare un giudizio in merito.

5.1.7 Hitachi Zosen

La Hitachi Zosen è un'azienda giapponese attiva in diversi settori: sistemi ambientali, impianti industriali, macchine, industria di processo, sistemi di sicurezza. Nel settore ambientale vanta una notevole esperienza in campo di trattamento acque e reflui, effluenti inquinanti e impianti waste to energy ad elevata efficienza (impianti di incenerimento, ma anche impianti di gassificazione e fusione).
Nel 1965 Hitachi Zosen ha realizzato il primo impianto di incenerimento rifiuti giapponese con recupero energetico; oggi, per lo smaltimento dei rifiuti propone, oltre agli inceneritori convenzionali con forno basato su tecnologia Von Roll, il gassificatore con forno di fusione a letto fluidizzato: la sperimentazione su tali impianti è iniziata nel 1996 ed è andata avanti per 3 anni e mezzo. A marzo 2009 la Società contava 8 impianti di gassificazione di capacità compresa tra 15.000 e 122.000 t/anno [50].

Tab. 5.7 – Impianti Hitachi Zosen in esercizio

Luogo	Inizio attività	alimentazione	portata	Syngas/utilizzo calore
Kagawa, Japan	2004	RSU	300 t/d	elettricità
Ishikawa, Japan	2003	RSU	160 t/d	elettricità
Nara, Japan	2001	RSU	150 t/d	elettricità
Nagasaki, Japan	2003	RSU	58 t/d	elettricità
Gifu, Japan	1998	RSU	33 t/d	elettricità
Toyota City, Japan				
Sano City, Japan				
Takamatsu, Japan				

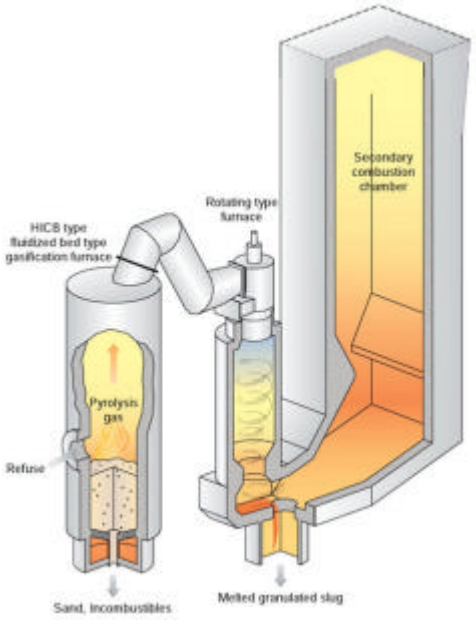


Togari Clean Center, Toyota City



Mikamo Clean Center, Sano City

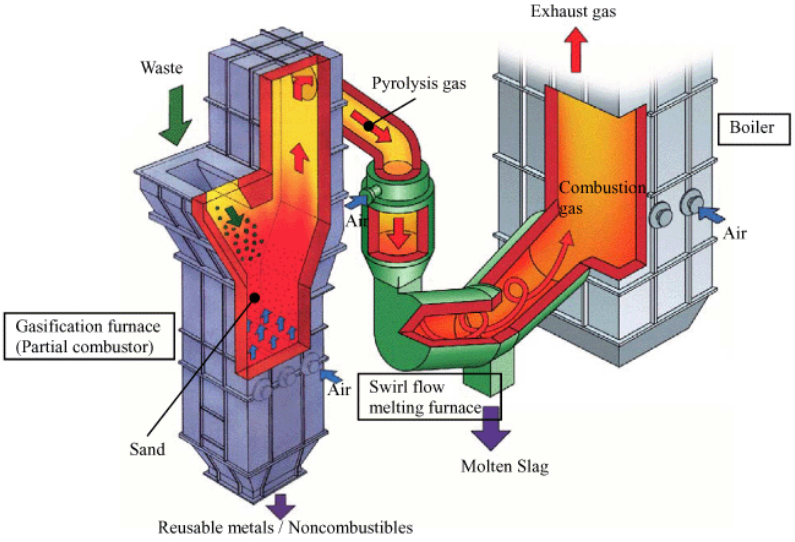
Dopo essere stati triturati i rifiuti sono introdotti nel gassificatore a letto fluido (fluidized-bed gasification melting furnaces), dove avviene la decomposizione termica ad una temperatura di 500-600°C; il gas generato insieme ai residui della gassificazione è introdotto alla fornace di fusione ed è bruciato a temperatura elevata (circa di 1.300°C) con recupero di calore dai fumi prodotti. Le scorie prodotte dal processo possono essere utilizzate come sottofondo stradale; il ferro e l'alluminio estratti dal forno di gassificazione possono essere riciclati.



La tecnologia proposta dalla Hitachi Zosen risulta dal punto di vista impiantistico pienamente provata; d'altra parte non è stato possibile acquisire sufficienti informazioni in particolare sugli aspetti ambientali, di recupero energetico, e sui costi di investimento e di esercizio e, quindi, non si è in grado di formulare un giudizio in merito.

5.1.8 Kawasaki Heavy Industries

Kawasaki Heavy Industries è una società di ingegneria giapponese attiva nel settore dl trattamento termico dei rifiuti. Commercializza un sistema di gassificazione del rifiuto costituito da un reattore a letto fluido seguito da un forno di fusione delle scorie: la tecnologia ha trovato applicazione in due impianti commerciali in Giappone [6].
L'impianto di gassificazione a letto fluido con fusione delle scorie (KAWASAKI fluidized bed gasification and melting system) è costituito da un reattore a letto fluido, in cui il rifiuto viene parzialmente gassificato a bassa temperatura (circa 600°C) e da un forno di fusione in cui vengono inviati le sostanze incombuste e i gas per essere bruciati a circa 1.300°C, temperatura a cui si verifica la fusione delle scorie riutilizzabili come materiale di edilizia. L'energia dei gas esausti è utilizzata in un boiler per la produzione di elettricità.



La tecnologia trova applicazione in due impianti su scala commerciale in Giappone; d'altra parte non è stato possibile acquisire sufficienti informazioni su aspetti ambientali, di recupero energetico, e sui costi di investimento e di esercizio e, quindi, non si è in grado di esprimere un giudizio.

5.1.9 Kobelco Eco-Solutions

Kobelco Eco-Solutions è una società giapponese attiva nel settore ambientale (impianti di trattamento dei rifiuti solidi urbani, impianti di trattamento acque, impianti di trattamento PCB e diossine, reattori e componenti industriali).
In particolare Kobelco Eco-Solutions propone impianti di gassificazione a letto fluido con vetrificazione delle scorie (gasification+melting) e conta 12 impianti per rifiuti urbani di cui 4 in costruzione.

Tab. 5.8 – Impianti Kobelco Eco-Solutions in esercizio

Nome impianto	portata	Inizio attività	Potenza elettrica
Chubu-Kamikita Clean Center	60 t/day (30 t/d x 2 linee)	Ottobre 2000	
Aki Clean Center	130 t/day (65 t/d x 2 linee)	Novembre 2002	1300 kW
Environmental Sanitation Center, Waste Treatment Facility, Kazuno City	60 t/day (30 t/d x 2 linee)	Novembre 2002	
Ishinomaki Area Clean Center	230 t/d (115 t/d x 2 linee)	Marzo 2003	2600 kW
Nakatsugawa Municipal Environmental Center	98 t/day (49 t/d x 2 linee)	Marzo 2004	900 kW
Ono-Katsuyama Plant	84 t/day (42 t/d x 2 linee)	Giugno 2006	
Nemuro-Hokubu Area MSW Treatment Facility	62 t/day (31 t/d x 2 linee)	Febbraio 2007	
Sashima Clean Center	206 t/day (103 t/d x 2 linee)	Marzo 2008	3000 kW



Chubu-Kamikita Clean Center



Aki Clean Center



Environmental Sanitation Center, Waste Treatment Facility, Kazuno City



Ishinomaki Area Clean Center



Nakatsugawa Municipal Environmental Center



Ono-Katsuyama Plant

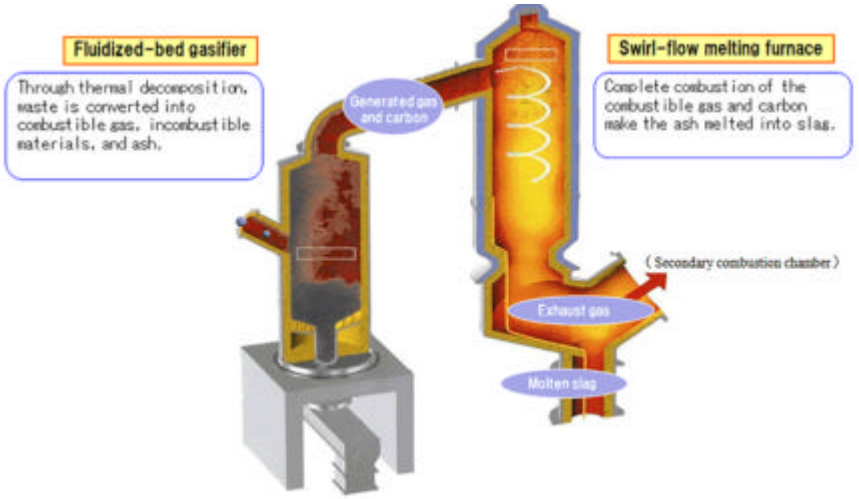


Nemuro-Hokubu Area MSW Treatment Facility



Sashima Clean Center

Fig. 5.7– Impianti esistenti basati su tecnologia Kobelco Eco – Solutions.



I rifiuti, previa triturazione, sono inseriti nel reattore di gassificazione a letto fluido attraverso un alimentatore chiuso ermeticamente; nel reattore il rifiuto viene convertito in gas, materiale incombusto e cenere. Nel forno di fusione il gas combustibile viene bruciato raggiungendo temperature di oltre 1200 °C. La cenere trasportata dal flusso gassoso si fonde; le scorie fuse sono scaricate continuamente in un bagno d'acqua e granulate. Il calore dei gas di scarico è recuperato nella caldaia per la produzione di energia. I fumi passano attraverso una torre di raffreddamento, un filtro a maniche e un sistema catalitico per la rimozione degli NOx.

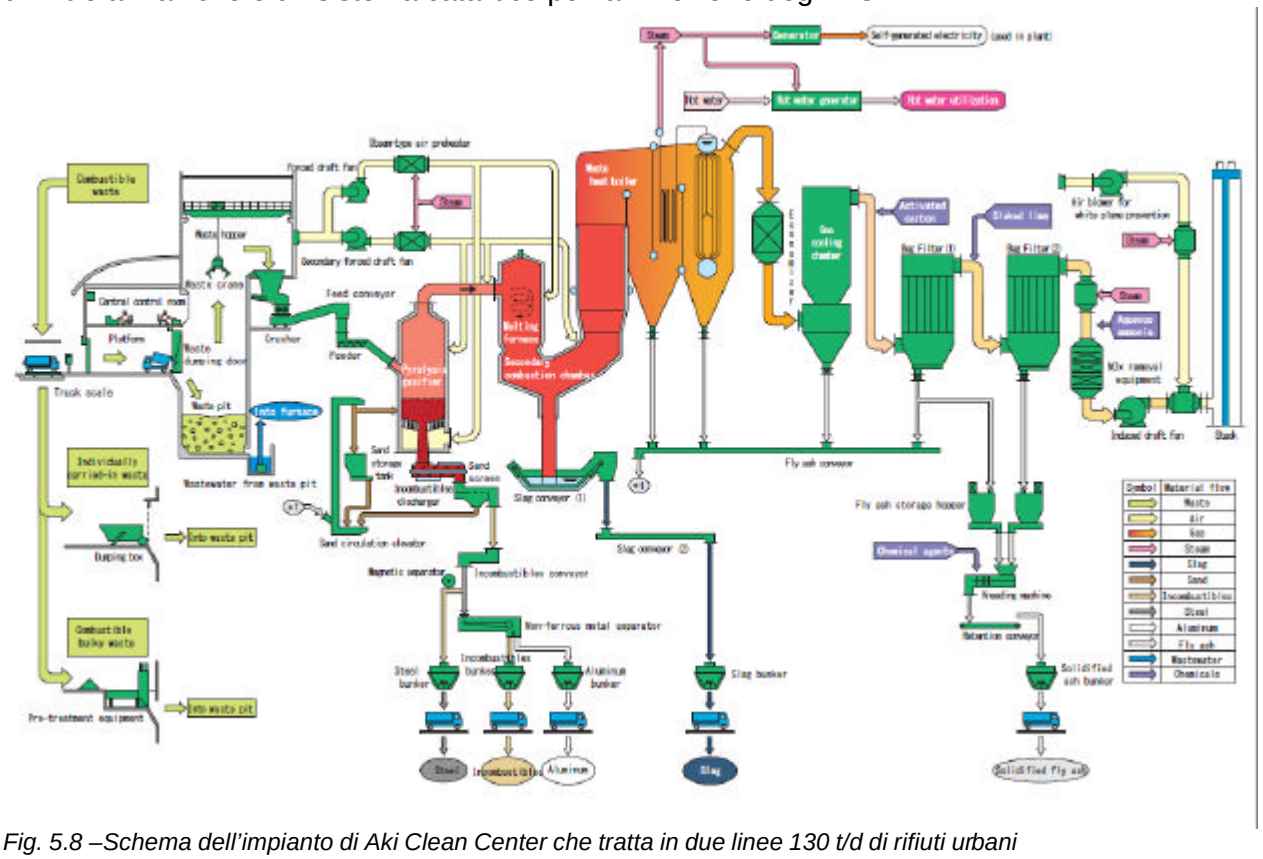


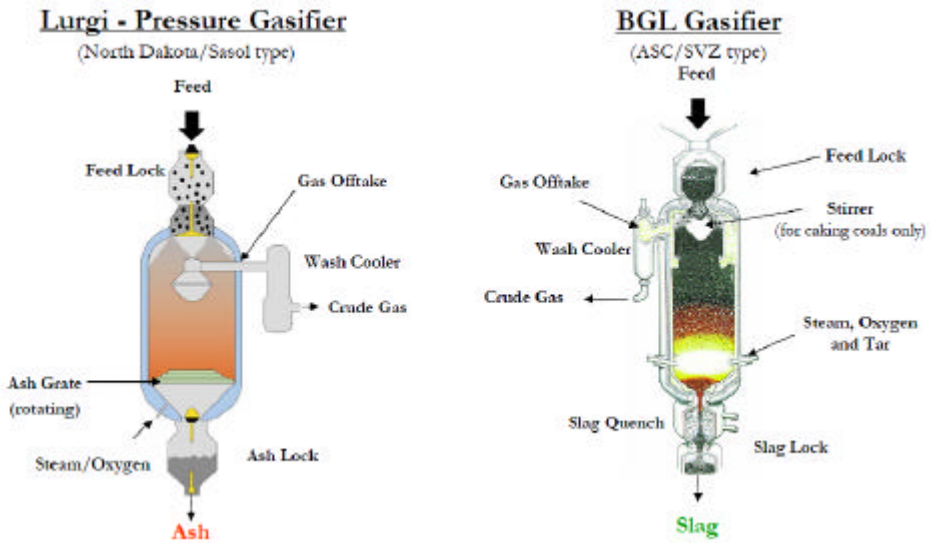
Fig. 5.8 –Schema dell'impianto di Aki Clean Center che tratta in due linee 130 t/d di rifiuti urbani

La tecnologia proposta dalla Kobelco Eco-Solutions, che trova applicazione in 8 impianti industriali che ricevono rifiuti urbani indifferenziati, si può ritenere pienamente provata. D'altra parte il livello di informazioni di cui si dispone, non consente di esprimere un giudizio relativamente ad aspetti ambientali, di recupero energetico, e sui costi di investimento e di esercizio.

5.1.10 Lurgi- Envirotherm

Envirotherm è una compagnia tedesca che fa parte del Gruppo Allied, attiva nel settore ambientale (gassificazione e recupero energetico dai rifiuti, incenerimento di fanghi, trattamento di rifiuti tossici). Ha acquistato una serie di tecnologie dalla Lurgi; in particolare la tecnologia di gassificazione Lurgi è stata utilizzata per il più grande impianto al mondo di gassificazione di carbone e rifiuti, a Schwarze Pumpe in Germania (SVZ plant).
L'impianto di Schwarze Pumpe è stato avviato nel 1964 e contava 24 reattori a letto fisso in pressione per la gassificazione del carbone, sette dei quali sono stati adattati nel 1992 per ricevere anche rifiuti; nel 2000 è stato aggiunto un reattore BGL, reattore a letto fisso che lavora a 25 bar e viene alimentato con rifiuti e carbone, usando come agenti gassificanti aria e vapore.
L'impianto può trattare annualmente 450.000 tonnellate di residui solidi (residui plastici, rifiuti urbani, fanghi di depurazione acque reflue, rifiuti triturati) e 55.000 tonnellate di fluidi (olii, tar, solventi); in particolare la potenzialità di trattamento di rifiuti domestici è pari a 120.000 tonnellate l'anno [62]; i rifiuti urbani vengono trattati per produrre CDR che viene alimentato al gassificatore insieme al carbone. Il gas di sintesi prodotto veniva utilizzato, fino al 2007, per la produzione, oltre che di energia, anche di metanolo, produzione poi bloccata per motivi commerciali.
L'impianto di gassificazione SVZ è costituito da:

- 5 gassificatori a letto fisso (solid bed pressure) per rifiuti solidi (ognuno della capacità di 15 t/h);
- 1 gassificatore British Gas/Lurgi BGL (slag bed) per rifiuti solidi della capacità di 35 t/h;
- 2 gassificatori "fly stream" per liquidi o paste della capacità di 16 t/h.

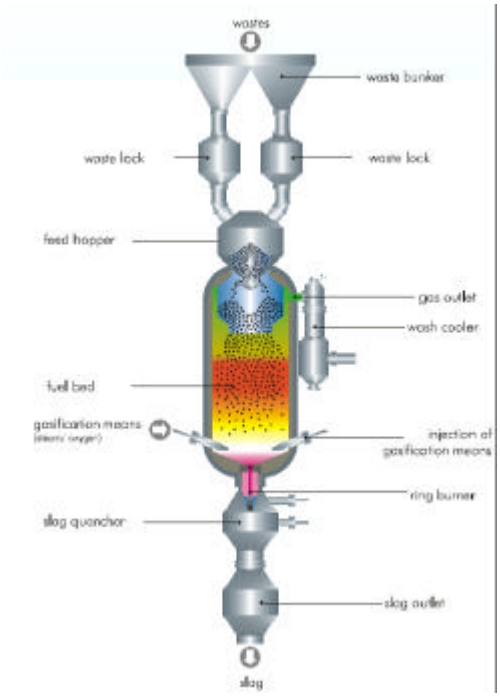


Tab. 5.9 – Caratteristiche dei reattori di gassificazione dell'impianto SVZ.

Gasifier	Solid-bed pressure	Fly-stream	Slag-bed
quantity at SVZ	5	2	1
flow-rate t / h	12 - 15	15	35
temperature	1.200 - 1.300 °C	1.600 - 1.800 °C	1.450 °C
operating pressure	25 bar	25 bar	25 bar
gasification agent	steam, O_2	steam, O_2	steam, O_2
solid residues	sintered slag	molten slag	molten slag



Fig. 5.9 – Il reattore British Gas / Lurgi BGL di Schwarze Pumpe



SVZ

•British Gas - Lurgi Gasification (BGL)

–System datas
- **•Diameter 3.6 m**
- **•Pressure 25 bar**
- **•Double jacket water cooled**
- **•Inlet of gasification mean by jets**
- **•Fluid slag outlet with quenching system**

–Operation datas

•Throughput	**35 t/h**
•Series of input	**6 - 9 /h**
•Gas quantity	**35,000 Nm³/hr**
•Temperature	**1,600 °C**
•Oxygen	**6,000 Nm³/hr**
•Steam	**6-9 t/hr**
•Slag	**≤ 7.5 t/hr**
•Gas outlet	**500-700 °C**
•temperature after scrubbing < 200 °C	

L'impianto produce scorie (sinterizzate nel caso del reattore a letto fisso in pressione, vetrificate nel caso del reattore BGL) che, sottoposte a test di lisciviazione, hanno evidenziato un livello di TOC inferiore a 1 mg/l [65].

Va sottolineato che il rifiuto alimentato ai gassificatori non è costituito esclusivamente da rifiuto urbano indifferenziato, ma da una miscela combustibile di particolari caratteristiche (dimensioni di circa 20x80 mm) ad alto potere calorifico, costituita mediamente dal 20-25% di carbone, 45% di CDR in pellets, 10% di plastica, 10% di legno, 10% di catrame e fanghi in pellets.
L'impianto di Schwarze Pumpe è l'unico impianto al mondo che riceve rifiuti urbani e utilizza un ciclo IGCC (ciclo combinato turbina a gas/vapore) per la produzione di energia elettrica a valle della gassificazione del rifiuto; l'impianto, a fronte di un PCI del rifiuto in ingresso di 18 MJ/kg, presenta efficienze dichiarate del 46,6%. Non è stato tuttavia possibile accertare, nell'ambito del presente lavoro di ricerca, che il suddetto impianto sia ad oggi ancora funzionante.

5.2 PIROLISI

5.2.1 Thide Environnement

La Società Thide Environnement ha sviluppato un processo di pirolisi o termolisi, in forno rotante, per la conversione dei rifiuti solidi urbani e dei rifiuti speciali non pericolosi in un combustibile solido chiamato Carbor (Processo Eddith).
In Francia a Saint Laurent Blangy, vicino Arras è stato avviato nel maggio 2004 un impianto da 50.000 tonnellate, commissionato dal Syndicat Mixte Artois valorisation (SMAV). Fonti recenti parlano della chiusura definitiva dell'impianto in gennaio 2009, a seguito di una serie di problemi tecnici, che di fatto non hanno mai consentito all'impianto di lavorare a pieno regime facendo lievitare la tariffa di smaltimento da 130 €/t, inizialmente previsti, fino a 300 €/t [40].
Thide ha venduto la licenza del processo alla società Hitachi la quale ha realizzato in Giappone tre impianti: a Itoigawa (25.000 t/anno) in funzione dal maggio 2002; a Izumo (70.000 t/anno) in attività dal maggio 2003 e un impianto dimostrativo da 10.000 tonnellate a Nakaminato.

Tab. 5.10 – Impianti Thide Environnement in esercizio

Località	Data inizio attività	Tipologia rifiuto	Potenzialità [t/anno]	Energia prodotta
Arras, Francia	Maggio 2004	RSU, RSA e fanghi (10.000 t/y)	50.000	Vapore industriale utilizzato in una vicina industria
Itoigawa, Giappone	Maggio 2002	RSU	25.000	Acqua calda per teleriscaldamento
Izumo, Giappone	Maggio 2003	RSU	70.000	Produzione di elettricità
Nakaminato, Giappone		RSU con PCI di 8,3 MJ/kg	10.000	



Fig. 5.10- Impianto Arthelyse di Arras, Thide Environnement

Nel processo il rifiuto, dopo essere stato essiccato, passa nel tamburo rotante, dove avviene la pirolisi a pressione atmosferica ed in assenza di ossigeno e a temperature di 450-700°C con un tempo di permanenza di circa 45-60 minuti.
Il processo produce:

- combustibile solido (carbor) che può essere utilizzato in luogo del carbon fossile
- gas di sintesi con PCI di 23 MJ/kg composto da H_2, CH_4, CO, CO_2 e idrocarburi leggeri.
- materiali riciclabili: metalli ferrosi, metalli non ferrosi e inerti.

Il gas di sintesi è bruciato a 1100°C in camera di combustione ed i fumi prodotti forniscono il calore necessario a scaldare il pirolizzatore e ad essiccare i rifiuti; la fase solida, simile ad un coke, è estratta dal reattore tramite una corrente d'aria e successivamente inviata ad un contenitore miscelato riempito d'acqua per separare la maggior parte dei composti clorurati; la fase di raffreddamento separa anche gli inerti (ghiaia, vetro) e i metalli non ferrosi, successivamente inviati a recupero. Il coke viene successivamente filtrato ed essiccato per produrre un combustibile con un tenore di umidità del 20%, noto col nome commerciale di carbor pari a circa il 25% in peso del rifiuto alimentato. Il carbor può sostituire i combustibili fossili nelle cementerie, nella produzione di calce, nelle fornaci per mattoni, negli altoforni, ecc. Tuttavia l'obiettivo primario di THIDE Environnement è quello di promuovere il processo EDDITh in zone poco urbanizzate, dove questo tipo di industrie è poco presente puntando ad un uso localizzato del carbor in piccole caldaie, dove il prodotto viene completamente vetrificato e reso inerte; può essere in tal modo utilizzato per la costruzione di strade e sottratto allo smaltimento in discarica.

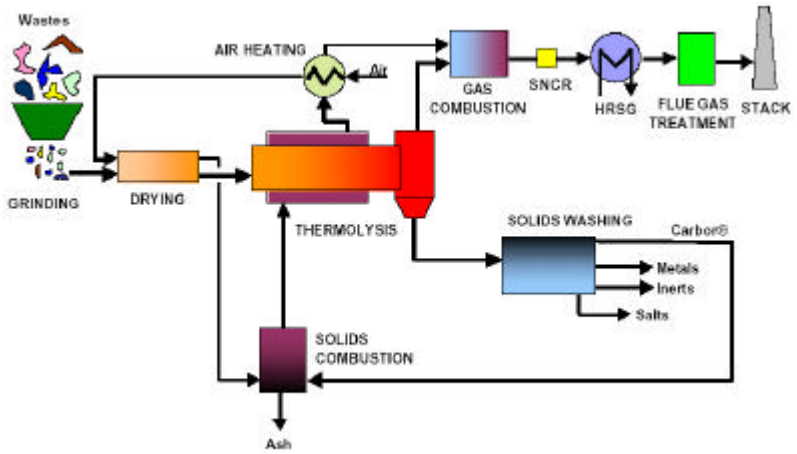


Fig. 5.11 – Schema del processo Thide Environnement

Il processo EDDITh vanta tre referenze in Giappone; il mancato reperimento di dati di esercizio relativi a tali impianti e il risultato non positivo dell'impianto di Arras in Francia inducono a qualche perplessità sulla reale affidabilità della tecnologia.
Un ulteriore motivo di perplessità deriva dal problema della gestione del residuo carbonioso.

5.2.2 TechTrade- ICOM GEIE

TechTrade GmbH, fondata nel 1999, è il successore dell'Azienda Pleq plant & Engineering e offre a tutt'oggi forni e reattori rotanti. Nel 1982 Pleq ha fornito la propria tecnologia ed i reattori per l'impianto pubblico di smaltimento rifiuti urbani di Burgau (Distretto di Gunzburg-Germania) della potenzialità di 35.000 t/anno. La Pleq nel 1996 è stata rilevata da Mannesmann Demag, che ha fornito un impianto di pirolisi lenta a bassa temperatura di rifiuti urbani e commerciali da 110.000 t/a, in funzione presso RWE Hamm in Germania "pirolisi integrata in Centrale Elettrica". Basato sulla stessa tecnologia della pirolisi lenta è l'impianto di valorizzazione energetica di biomasse di Terni, della capacità di 28.500 t/anno.

Tab. 5.11 – Impianti TechTrade in esercizio

Località	Data inizio attività	Tipologia rifiuto	Potenzialità [t/ anno]	Elettricità prodotta [MWe]
Burgau, Germania	1987	RSU,RSA, fanghi	40.000 (2 linee da 3 t/h)	2,2
Hamm, Germania	2002	RSU, fanghi	110.000 (2 linee da 7,3 t/h)	
Terni, Italia		Biomasse		

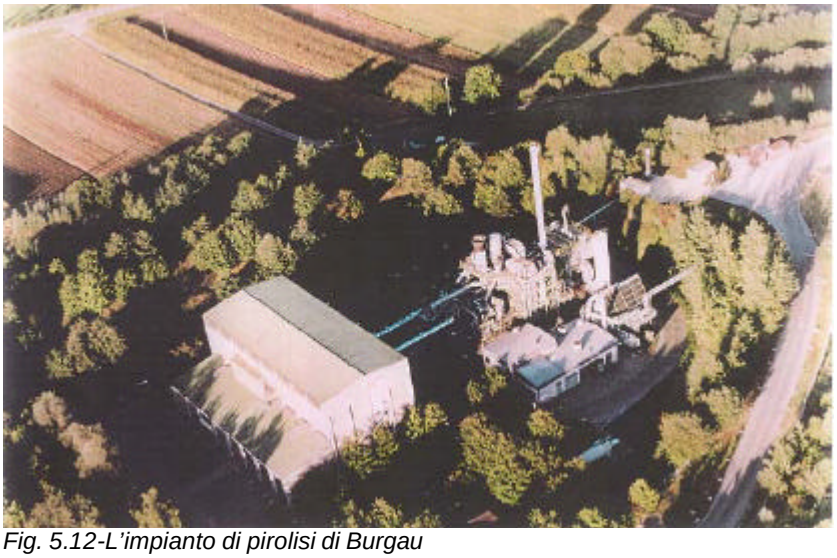


Fig. 5.12-L'impianto di pirolisi di Burgau

L'impianto è basato su un processo di pirolisi lenta a bassa temperatura in tamburo rotante. La temperatura all'interno del reattore è di 500-600 °C e i tempi di permanenza variabili tra 30 minuti e 2 ore, sebbene un'ora sia in genere sufficiente per far avvenire la reazione.
Dal processo si ottiene:

- syngas, prodotto gassoso affine a quello ottenuto dalla gassificazione del carbone costituito da CO, H_2, CO_2, H_2O.
- char: composto solido che è essenzialmente un carbone tipo coke, detto anche pirocoke.

Il rifiuto, ridotto alla pezzatura di 30 cm, viene introdotto nel reattore di pirolisi, con l'aggiunta di calce nella misura di 12-15 kg per tonnellata di miscela. Il materiale, caricato in testa, attraversa il cilindro e viene scaricato in coda come residuo carbonioso (char).
Il gas prodotto (pirogas o singas), previa depolverazione, viene bruciato in camera di combustione ad una temperatura superiore ai 1250°C. Una parte dei fumi prodotti nella camera di combustione viene riciclata per il riscaldamento dei forni rotativi, mentre la parte restante viene convogliata a una caldaia di recupero, dove si produce vapore a 26 bar e 360°C che, espanso in turbina, produce energia elettrica.

I gas esausti, raffreddati a 250°C, vengono sottoposti a trattamento di depurazione di tipo tradizionale (iniezione di carboni attivi e bicarbonato di sodio e successiva depolverazione tramite filtri a maniche) e ad un processo DENOX, per abbattere gli ossidi di azoto.

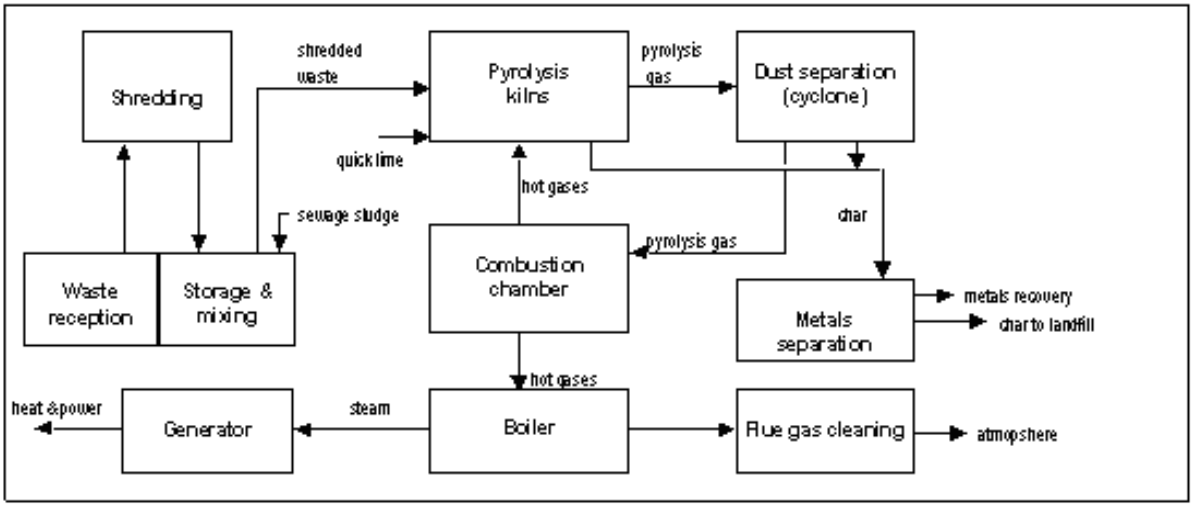


Fig. 5.13- Impianto di pirolisi di Burgau – schema di processo

Nel 2005, anno per cui sono disponibili i dati di funzionamento, l'impianto ha lavorato per 7.657 ore.
L'energia elettrica prodotta, a fronte di un PCI pari a 8,5 MJ/kg è di circa 214 kWh/t, di cui circa il 72% viene utilizzata per il fabbisogno dell'impianto con un'efficienza energetica netta del 2,9%.
Il basso rendimento energetico è dovuto secondo la Società ICOM-GEIE non a carenze tecnologiche o impiantistiche ma a scelte strategiche motivate dal fatto che:

- l'obiettivo primario dell'impianto è quello di garantire lo smaltimento continuo di tutti i rifiuti prodotti nel distretto che presentano un mix di scarso contenuto energetico: questo motivo ha originato la scelta di realizzare un ciclo termodinamico a resa più bassa (vapore con caratteristiche povere di temperatura e pressione) ancorché più sicuro e affidabile;
- la vendita dell'energia elettrica alla rete in Germania è poco remunerativa (0.015 €/kWh) per cui il Gestore dell'impianto preferisce limitare al massimo la produzione e le problematiche tecniche potenzialmente connesse;
- infine il circuito termico dell'impianto è molto datato e non ha mai usufruito di modifiche integrative a differenza della stazione di smaltimento che ha visto nel tempo migliorie e implementazioni.

Per un impianto da 50.000 t/anno con PCI 14,6 MJ/kg la Società stima un rendimento elettrico lordo del 24,6% attraverso un ciclo a vapore.
Il residuo solido del processo, caratterizzato da un contenuto di carbonio del 26% e da un PCI di 8,6 MJ/kg, è risultato pari al 53% del materiale in ingresso (dato 2005); ad oggi il residuo solido dell'impianto di Burgau è smaltito in discarica.
Il lungo periodo di esercizio dell'impianto di Burgau (oltre 20 anni) e la continuità di funzionamento (7.657 ore nel 2005) dimostrano l'affidabilità del processo; per altro verso va rilevato che un limite della tecnologia è rappresentato dalla necessità di individuare una destinazione per il residuo carbonioso.

5.3 PROCESSI COMBINATI

5.3.1 Compact Power

Compact Power è un'azienda del Regno Unito costituitasi nel 1992. Fornisce impianti per la distruzione termica dei rifiuti urbani e rifiuti pericolosi con potenzialità comprese tra 6.000 e 30.000 t/anno. È stata acquisita nel 2008 da Ethos Recycling, compagnia londinese che si occupa di gestione rifiuti.
Compact Power ha realizzato un piccolo impianto dimostrativo di pirolisi e gassificazione operante su scala commerciale a Avonmouth, in Bristol (Regno Unito), cui è stata concessa l'autorizzazione integrata ambientale nel 2001; l'impianto riceve rifiuti ospedalieri per un quantitativo di circa 8.000 t/anno, per ragioni esclusivamente economiche (tariffa applicata di 400 €/t). Si prevede un ampliamento per consentire lo smaltimento di 24.000 t/anno di rifiuto urbano indifferenziato.



Fig. 5.14 - L'impianto di Avonmouth, Bristol

Il calore generato, originariamente utilizzato per produrre energia elettrica, è inviato ad un impianto di sterilizzazione che tratta i rifiuti ospedalieri.
Il processo si compone delle seguenti fasi:

- essiccamento e pirolisi a 800°C in assenza di ossigeno in due tubi pirolitici riscaldati esternamente;
- gassificazione dei residui solidi della pirolisi con aria e vapore;
- ossidazione completa (combustione) del syngas a 1250°C.

L'energia termica è recuperata attraverso una caldaia e usata in parte per riscaldare i forni di pirolisi. L'abbattimento degli inquinanti avviene attraverso filtri a manica, con iniezione di bicarbonato di sodio e sistema catalitico (SCR) con ammoniaca per la riduzione degli NO_x.
Una caratteristica della tecnologia Compact Power è la modularità. Un impianto Compact Power è costituito da multipli di un modulo standard denominato MT2. Ogni modulo MT2 è progettato per trattare 8.000 t/anno di rifiuti solidi urbani; pertanto per trattare ad esempio 32.000 t/anno di rifiuti sono necessari 4 moduli MT2 – 8 tubi pirolitici, 4 camere di gassificazione ma un'unica camera di ossidazione e un unico boiler.
La tecnologia Compact Power non sembra ad oggi industrialmente matura dal momento che esiste un unico impianto industriale che tratta rifiuti in quantitativi ridotti (inferiori a 10.000 t/anno).

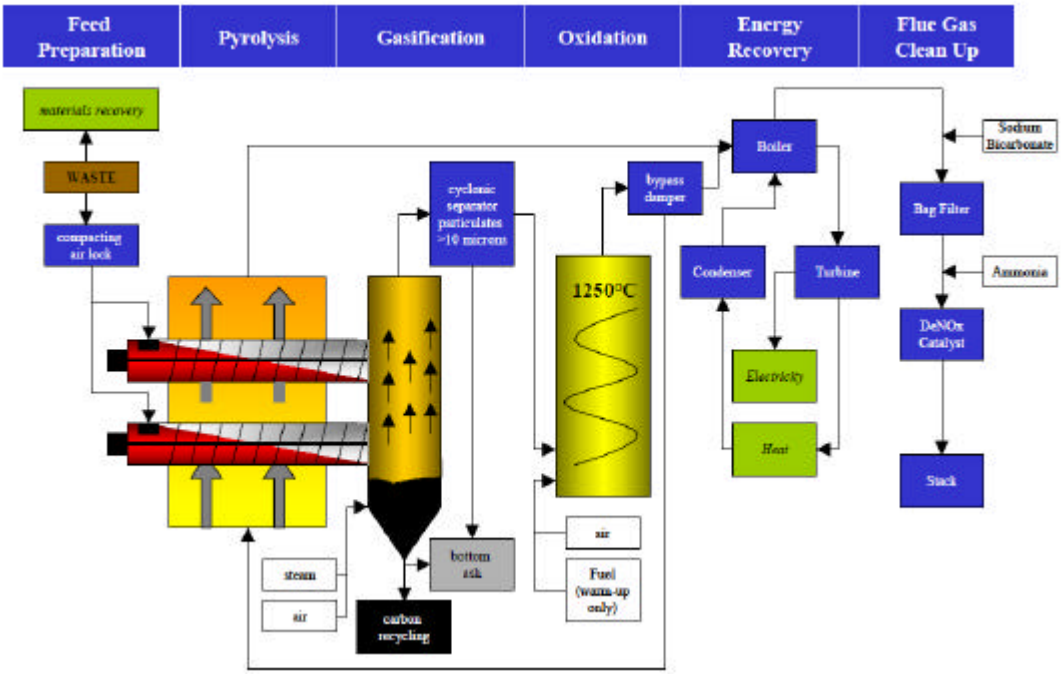


Fig. 5.15 – Diagramma di processo della tecnologia Com pact Power.

5.3.2 Mitsui-Babcock

Mitsui Engineering and Shipbuilding Ltd (MES) ha sviluppato e applicato in Giappone il processo TWR, originario della Siemens.
Il sistema proposto dalla Mitsui Babcock Energy Ltd (MBEL) viene denominato R21 (Recycling 21 Century) ed è un processo di tipo pirolitico realizzato mediante un tamburo rotante riscaldato esternamente, cui segue la combustione del syngas e del char in una camera di combustione ad alta temperatura. Il primo impianto commerciale, Yame Seibu Clean Center, è stato completato nel marzo 2000.
Esistono al momento sei impianti operativi in Giappone.

Tab. 5.12 – Impianti Mitsui R21 in esercizio

Località	Data inizio attività	Tipologia rifiuto	Potenzialità [t/ giorno]
Yame Seibu	Marzo 2000	RSU	220
Toyohashi city	Marzo 2002	RSU	400
Ebetsu City	Novembre 2002	RSU	140
Koga City	Marzo 2003	RSU	260
Nishi Iburi	Marzo 2003	RSU	210
Kyohoku	Marzo 2003	RSU	160

I rifiuti triturati sono immessi in un pirolizzatore per un tempo di permanenza di circa 1 ora alla temperatura di 450°C e trasformati in gas, char e residui di metalli e inerti. Il gas di pirolisi e il char, dopo separazione dei metalli, sono bruciati a temperature di circa 1300ºC con bassi eccessi di aria (3,5% O_2); le ceneri fuse subiscono una fase di quench in acqua, per la realizzazione di un inerte vetrificato.
I residui solidi, che possono essere riciclati o avviati in discarica, sono prodotti in una percentuale di circa il 4% della massa di rifiuto in ingresso [66].

I gas combusti vengono trattati in una opportuna sezione a valle del combustore mediante iniezione di urea e, successivamente, mediante adsorbimento a secco con bicarbonato e carboni attivi, prima della filtrazione fine.
Le sei applicazioni su scala industriale in Giappone fanno ritenere la tecnologia provata; d'altra parte il livello delle informazioni di cui si dispone non consente di formulare giudizi in merito agli aspetti di recupero energetico e costi di investimento e di esercizio.



Fig. 5.16 – Gli impianti Mitsui R21

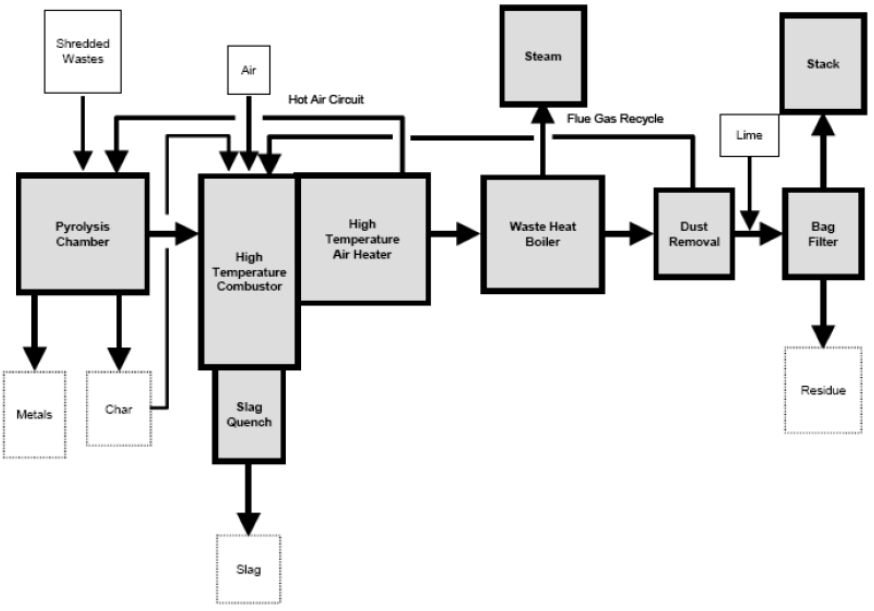


Fig. 5.17 –Mitsui R21- Schema di processo

5.3.3 Plasco Energy

La compagnia canadese Plasco Energy Group ha sviluppato il Sistema di Conversione Plasco, un processo brevettato che utilizza la tecnologia della gassificazione con arco al plasma.
Plasco ha costituito una società con la città di Ottawa (Canada) nell'aprile 2006 per la costruzione di un impianto dimostrativo su scala commerciale per lo smaltimento di rifiuti solidi con tecnologia al plasma. L'impianto è autorizzato a trattare 75 tonnellate di rifiuti solidi al giorno e 10 t/giorno di matrici ad alto contenuto di carbonio (CCF- Consistent Carbon Feed, es. pneumatici), per migliorare la qualità degli syngas. La potenzialità annuale è pari a circa 28.000 t/anno.
È entrato in funzione nel luglio 2007 e occupa una superficie ridotta (circa 3 acri) di una vecchia discarica.
L'impianto presenta al momento qualche problema di affidabilità, dovuto al tentativo di trattare i rifiuti urbani tal quali, piuttosto che CDR, con difficoltà nella regolarità dell'alimentazione [18].
Nel 2008 l'impianto ha trattato complessivamente circa 1.400 t di rifiuti [43] e nei primi 8 mesi del 2009 ha trattato mediamente 41.5 t/giorno di rifiuti urbani, a fronte delle 75 t/giorno previste (report mensili 2009, [107]).


Fig. 5.18 – Impianto Plasco ad Ottawa

Lo schema di processo appare piuttosto complesso e prevede sostanzialmente una gassificazione del rifiuto, un passaggio del syngas in una torcia al plasma e un successivo trattamento dei residui di gassificazione in una seconda torcia al plasma.
Dopo un pretrattamento consistente nel recupero dei metalli e nella triturazione, il rifiuto è alimentato ad una camera di gassificazione e trasformato in syngas grezzo; questo è successivamente inviato in una camera di raffinazione dove la tecnologia al plasma è utilizzata per raffinare il gas e produrre un combustibile detto PlascoSyngas. Il residuo solido della camera di gassificazione è immesso in una camera ad elevata temperatura (Carbon Recovery Vessel) dotato di una torcia a plasma, dove la parte carboniosa del solido è ulteriormente convertita in syngas, mentre la parte non combustibile viene vetrificata e ridotta in forma granulare.
Lo schema di impianto prevede la depurazione del syngas da metalli pesanti, polveri e gas acidi e la combustione in motori endotermici per la produzione di elettricità. I cascami di calore dai motori e dal raffreddamento del PlascoSyngas dovrebbero finire in un generatore di vapore (HRSG) e produrre ulteriore elettricità, per mezzo di una turbina.
Di fatto, nel primo anno di esercizio (2008), i motori non hanno funzionato e il biogas è stato bruciato in fiaccola.

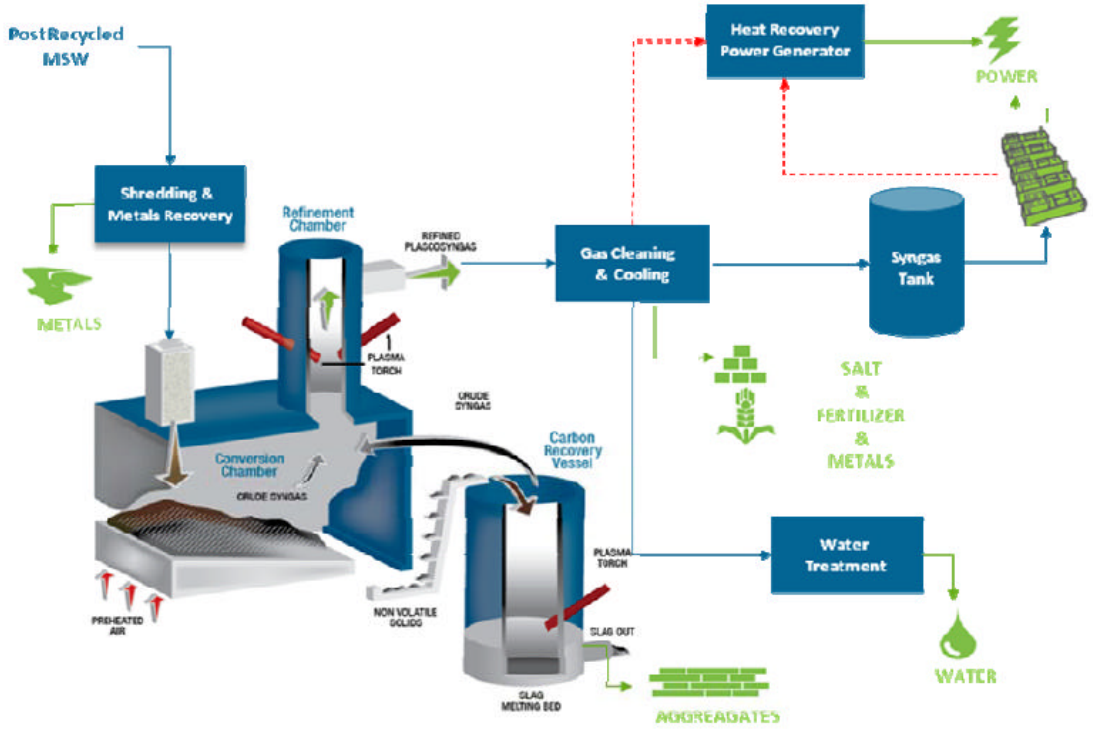


Fig. 5.19 – Impianto Plasco ad Ottawa – schema di processo

5.3.4 TPF- Basse Sambre

La Società TPF - Basse Sambre detiene il brevetto della tecnologia PIT-Pyroflam basata sul processo combinato di pirolisi e gassificazione in tamburo rotante. Testata a Budapest dal 1996 al 2003 su un impianto da 26 t/d, la tecnologia ha trovato applicazione su scala industriale nell'impianto di Keflavik (Islanda) entrato in esercizio nel dicembre 2003. L'impianto ha una potenzialità di 12.000 t/anno (1,7 t/h) e tratta rifiuti urbani, industriali, ospedalieri e rifiuti liquidi (oli, solventi e vernici). L'impianto riesce a garantire una continuità di funzionamento di oltre 340 giorni l'anno (8.209 ore nel 2008).



Fig. 5.20 – Particolare del forno PIT-Pyroflam

I rifiuti, che non hanno necessità di essere triturati, se le dimensioni non superano i 500 mm, vengono trasferiti alla tramoggia di alimentazione. Il sistema di alimentazione introduce automaticamente i rifiuti nel pirolizzatore ad un ritmo regolabile. Il forno rotativo si compone di due parti:

- una parte cilindrica nella quale avviene la pirolisi in assenza di ossigeno e a temperature di 600-700°C; i rifiuti subiscono dapprima un'essiccazione e poi vengono trasformati chimicamente in un gas e in un residuo solido contenente carbone; il tempo di permanenza in questa sezione è di circa 50 minuti
- una parte conica (temperature di 700-800°C) dove il carbone prodotto viene gassificato grazie all'aggiunta di aria in quantità sub-stechiometriche, per ottenere syngas; il tempo necessario alla gassificazione è di 35 minuti.

I gas combustibili sono estratti dal forno e bruciati in camera di combustione a temperatura minima di 850°C -1.100°C per 2 secondi come previsto dalla normativa. Dal calore dei fumi si produce del vapore saturo, che alimenta un turbo alternatore per la produzione di elettricità.
L'unità di trattamento dei fumi è del tipo a secco e utilizza del bicarbonato di sodio e del carbone attivo. I residui dalla depurazione dei fumi sono raccolti al livello del filtro a maniche in big bags e inviati a discarica.
Il residuo solido del processo (pari a circa i 13% in peso del rifiuto alimentato) ha caratteristiche simili alle scorie di un inceneritore convenzionale, che le rendono compatibili con lo smaltimento in discarica per rifiuti non pericolosi.

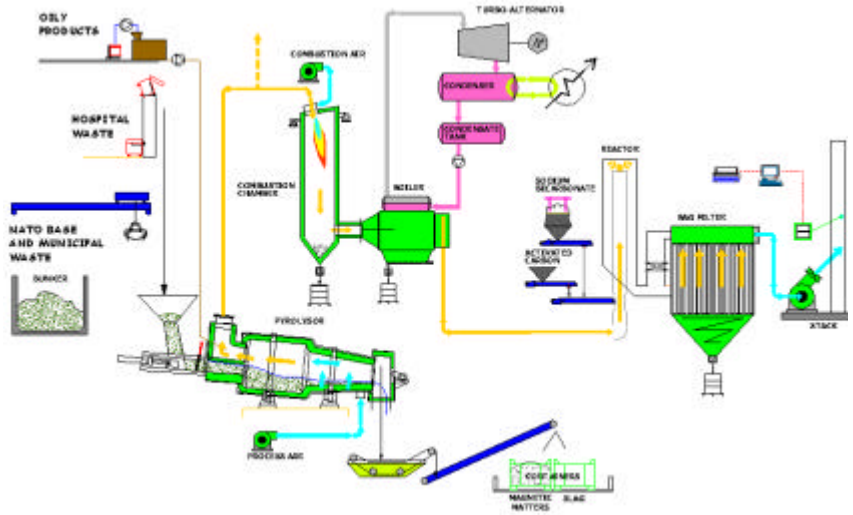


Fig. 5.21 – Impianto PIT-Pyroflam – schema di processo

Pur contando una sola applicazione su scala industriale, il fatto che l'impianto lavori continuativamente da quasi 4 anni, garantendo un esercizio di oltre 8.000 ore l'anno, fa pensare che la tecnologia abbia raggiunto un buon grado di affidabilità.
La gassificazione del residuo carbonioso, realizzata a valle della pirolisi nel medesimo dispositivo, risolve il problema della gestione di tale residuo.

5.3.5 PKA

La tecnologia PKA, proposta in Giappone dalla Toshiba, consiste in una combinazione di pirolisi in tamburo rotante e gassificazione. Nei Paesi Bassi la tecnologia è commercializzata con il nome di Product en Energie Centrale (PEC) da Gibros PEC B.V.
Un impianto che tratta 27.000 t/anno è operativo a Aalen-Goldshofen (Germania) dal 1999; il gas di sintesi è inviato a motori endotermici per la produzione di energia elettrica.
Un impianto PKA è attivo dal 2000 a Freiberg; l'impianto tratta 30.000 t/anno di rifiuti industriali ad alto contenuto di alluminio che viene sottoposto a pirolisi per recuperare il metallo.

Tab. 5.13 – Impianti PKA in esercizio

Località	Data inizio attività	Tipologia rifiuto	Potenzialità [t/ giorno]	Recupero energetico
Aalen-Goldshofen (Germania)	1999	RSU	27.000	Energia elettrica con motori endotermici
Freiberg (Germania)	2000	Rifiuti industriali	30.000	

Il processo è basato sui seguenti step:

- eliminazione di vetro e ferrosi;
- triturazione del materiale; è consigliabile la riduzione dell'umidità del rifiuto a valori inferiori al 15%, ma non è un'operazione necessaria;
- pirolisi in forno rotante esternamente riscaldato a temperatura di 500-600°C con tempi di permanenza di 45-60 min.
- cracking in camera secondaria a 1000°C di gas e vapori prodotti dalla pirolisi; i gas sono trasferiti ad un sistema di depurazione che rimuove i cloruri e lo zolfo, consentendo un utilizzo del combustibile gassoso in motori endotermici;
- trattamento del char (eventuale separazione dei metalli ferrosi e non ferrosi, riduzione granulometrica, riduzione dell'umidità) per essere utilizzato come carbone attivo o come combustibile o inviato ad un dispositivo secondario di gassificazione (1.400-1.500°C), per produrre ulteriore syngas da miscelare con quello derivante dalla pirolisi. Si ottiene una scoria vetrificata che può essere utilizzata per la produzione di cemento o come materiale per l'edilizia.

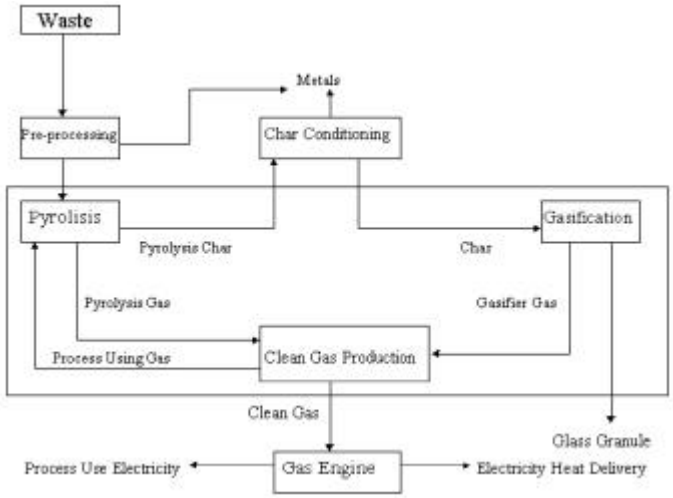


Fig. 5.22 – Tecnologia PKA – schema di processo

La tecnologia sembrerebbe industrialmente provata in quanto trova applicazione in due impianti su scala commerciale, entrambi in Germania, in attività da quasi 10 anni; di questi solo uno tratta rifiuti urbani. Tuttavia non si è in grado di esprimere un giudizio sulle prestazioni dell'impianto, non essendo riusciti ad acquisire sufficienti informazioni su aspetti ambientali, di recupero energetico, e sui costi di investimento e di esercizio.

5.3.6 Pyromex

La PYROMEX ITALIA, nata nel 2007, è licenziataria per la costruzione e la commercializzazione dell'impianto di conversione di combustibili solidi in gas mediante un sistema di pirolisi a temperatura ultra–elevata. Il reattore, scaldato mediante un sistema elettrico a induzione, raggiunge temperature tra i 1.100 e i 1.400° C, operando in assenza di aria o di ossigeno.

All'inizio del 1999 un impianto pilota fu consegnato all'Azienda Comunale di Trattamento delle Acque di Scarico di Emmerich, Germania, con il compito di trattare le acque altamente inquinate. Tale impianto è rimasto in funzione fino alla metà del 2002.
Un impianto di trattamento da 25 t/giorno è in fase di costruzione ad Eitting (vicino al Munich Airport) [6]. La società di gestione, Pyromex GmbH & Co. KG, con sede in Germania ha ottenuto l'autorizzazione per la realizzazione e gestione dell'impianto che tratterà 21 differenti tipologie di rifiuti. La società, proprietaria dell'impianto al 100%, ha un contratto di smaltimento con la locale azienda di gestione dei rifiuti.



Fig. 5.23 – Pyromex Energy Ltd, Kompostwerk Eitting

L'impianto consta di tre sezioni:

- sezione di pre-trattamento;
- sezione di piro-gassificazione;
- sezione termoelettrica.

I rifiuti triturati, privati delle parti in vetro ed eventualmente essiccati se l'umidità è superiore al 30%, vengono trasferiti al "carbonizzatore", che lavorando a temperature di 120°C produce un carbone inodore ad elevato potere calorifico.
Successivamente, rimossi i metalli non ferrosi, il materiale sterilizzato e preriscaldato viene trasferito all'unità secondaria del processo (gassificatore), che opera ad una temperatura di circa 400°C. A questo punto inizia una produzione iniziale di Syngas e la sua liquefazione. Il rimanente materiale carbonizzato ed inodore viene trasferito nell'unità di gassificazione a temperatura ultra elevata in assenza di ossigeno.
La parte inorganica del materiale di alimentazione viene rilasciata sotto forma di residuo inerte, non permeabile, che può essere riutilizzato, per esempio, per la costruzione di strade, laterizi etc. Il syngas prodotto nel reattore viene inviato ad un impianto di depurazione e successivamente ad un impianto di stoccaggio per il successivo utilizzo energetico.
La tecnologia non si può ritenere industrialmente matura, dal momento che non esistono ad oggi impianti funzionanti su rifiuti solidi urbani.

5.3.7 Thermoselect

Thermoselect è la Società svizzera che detiene la licenza del processo di trattamento termico dei rifiuti costituito da pirolisi lenta seguita da gassificazione in letto fisso e vetrificazione delle scorie. La licenza Thermoselect in Giappone è detenuta dalla JFE Holdings. La tecnologia Thermoselect è fornita su licenza anche alla Interstate Waste Technologies per gli Stati Uniti, il Messico e i Caraibi, alla JFE in Giappone, e alla Daewoo della Corea del Sud.

Lo sviluppo iniziale della tecnologia è avvenuto in Europa con un impianto da 110 t/giorno costruito in Italia a Fondotoce e attivo dal 1994 al 1999. Un impianto è stato poi costruito in Germania, a Karlsruhe nel 1999, ha funzionato per un periodo d prova dal 1999 al 2002, e poi con diversi problemi a pieno regime dal 2002 fino alla chiusura, nel novembre 2004.
Thermoselect conta alcuni impianti in vari stadi di sviluppo in Europa (Polonia, Spagna, Italia, Irlanda); un impianto da 2.890 t/d (1.1 milioni di tonnellate l'anno) entrerà in funzione a Caguas (Puerto Rico) nel 2010.

Tab. 5.14 – Impianti Thermoselect in esercizio

Località	Data inizio attività	Tipologia rifiuto	Potenzialità [t/d]
Chiba, Giappone	1999	Rifiuti urbani e industriali	330 t/giorno
Mutsu, Giappone	2003	Rifiuti urbani	140 t/giorno
Kurashiki, Giappone	2005	Rifiuti urbani e industriali	600 t/giorno
Nagasaki, Giappone	2005	Rifiuti urbani	330 t/giorno
Yorii, Giappone	2005	Rifiuti industriali	450 t/giorno
Tokushima, Giappone	2005	Rifiuti urbani	120 t/giorno
Izumi, Giappone	2006	Rifiuti industriali	95 t/giorno



Chiba



Mutsu



Kurashiki

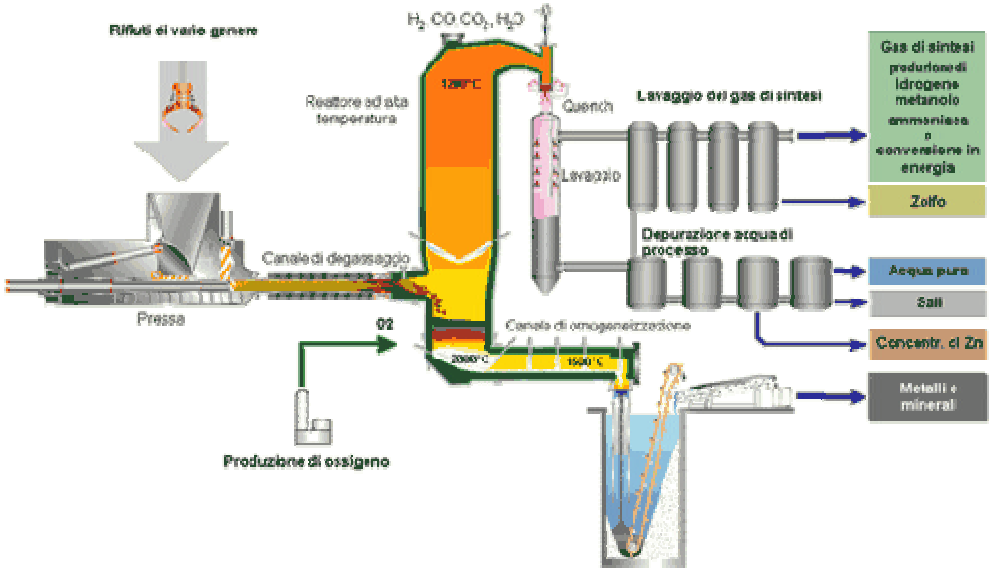


Izumi

Fig. 5.24 – Alcuni impianti Thermoselect

Il rifiuto è compresso da una pressa idraulica ad un quinto del volume originale ed è trasportato attraverso un canale di degasaggio riscaldato, dove avviene la pirolisi (300°C) in un reattore ad alta temperatura (circa 800°C).

Per effetto dell'aumento di temperatura all'interno del canale di degassaggio, i rifiuti vengono essiccati, i composti organici subiscono un processo di degassificazione e, dopo un periodo di permanenza minima di circa un'ora, convogliati in continuo in un reattore ad alta temperatura. Il carbonio ed i composti organici ottenuti durante il processo di degassaggio vengono gassificati in un ambiente a 2000 °C e con l' immissione dosata di ossigeno.
I composti inorganici fondono e il materiale fuso viene omogeneizzato in un apposito canale collegato al reattore ad alta temperatura (circa 1600°C). Il materiale fuso viene quindi sottoposto ad un raffreddamento rapido con acqua fino a 40 °C, formando un granulato minerale e un granulato metallico, successivamente separato attraverso un processo magnetico. Il granulato metallico contiene ferro per più dell'80%, nichel, rame e altri metalli pesanti in tracce.
Il gas di sintesi generato dal processo viene inizialmente sottoposto ad un raffreddamento rapido da 1200 °C a meno di 90 °C, per inibire la riformazione di molecole organiche (ad es. PCDD/F). La depurazione del gas di sintesi avviene attraverso una serie di scrubbers: nel primo scrubber viene utilizzata acqua per rimuovere gas acidi quali HCl e HF, nel secondo NaOH in soluzione per rimuovere HCl , HF e SO_2. Dopo la depurazione e la deumidificazione, il gas di sintesi può essere utilizzato per produrre energia elettrica.
I fumi in uscita dalla turbina a gas passano attraverso il sistema di abbattimento degli inquinanti; per la rimozione di NO_x e CO si utilizzano sistemi catalitici.



La tecnologia Thermoselect sembrerebbe una tecnologia industrialmente matura, essendo supportata da numerose referenze di impianti operativi da diversi anni in Giappone. D'altra parte la vicenda dell'impianto Thermoselect di Karlsruhe in Germania, non entrato continuativamente in esercizio per una serie di problemi tecnici, induce a qualche perplessità sulla reale affidabilità della tecnologia.
Per avere riscontri oggettivi occorrerà attendere i risultati del primo anno di attività del gassificatore di Roma Malagrotta, entrato in esercizio provvisorio in agosto 2008; al momento i dati di funzionamento non sono ancora stati divulgati dal Soggetto Gestore (COLARI).

5.4 TORCIA AL PLASMA

5.4.1 AlterNRG- Hitachi Metals

AlterNRG è una società canadese che ha acquisito la Westinghouse Plasma Corporation nell'aprile 2007 ed è proprietaria della tecnologia di gassificazione al plasma della Westinghouse.
La tecnologia è stata sperimentata in un impianto pilota da 5 tonnellate al giorno a Yoshii, in Giappone, dal 1999 al 2000. Un altro impianto dimostrativo, da 1t/h, si trova a Madison, Pennsylvania.
La tecnologia di gassificazione al plasma Westinghouse è operativa in due impianti in Giappone, realizzati dalla Hitachi Metals.

Tab. 5.15 – Impianti AlterNRG-Hitachi Metals in esercizio

Località	Data inizio attività	Tipologia di rifiuto	Potenzialità [t/d]
Utashinai, Japan	2002	MSW, Car fluff	280
Mihama-Mikata, Japan	2002	20 t/d MSW 4 t/d fanghi di depurazione	24

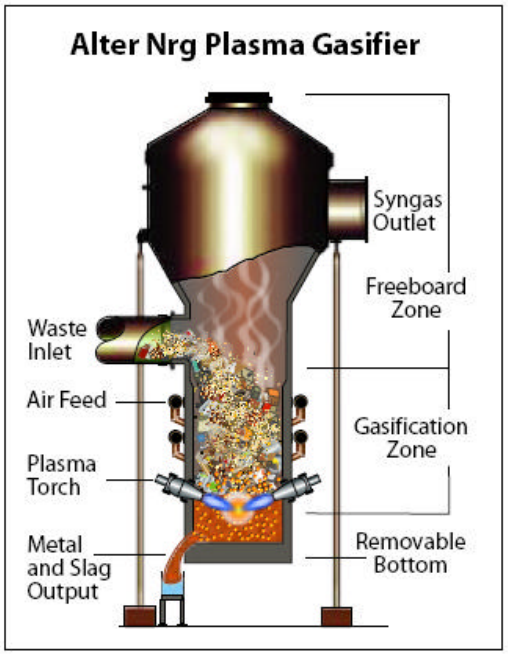


Mihama-Mikata



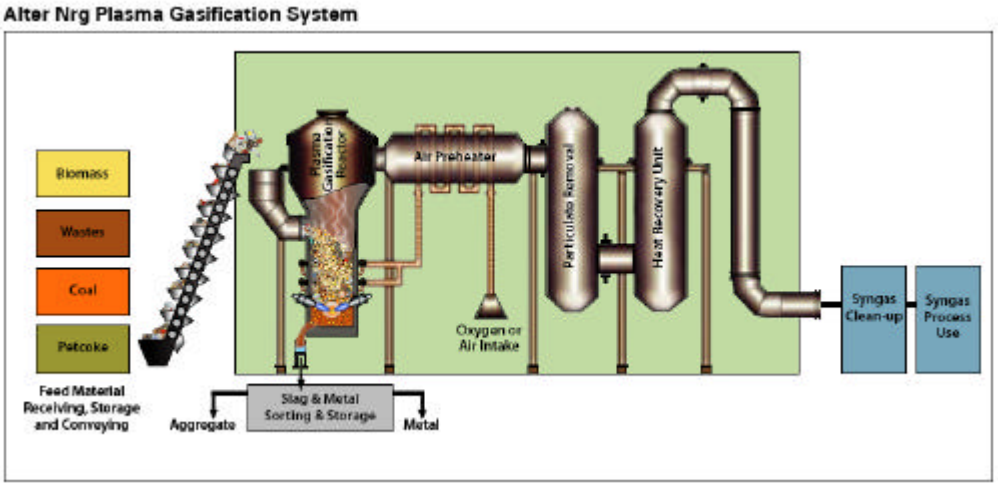
Utashinai

Fig. 5.25 – Impianti a tecnologia Westinghouse



Un nuovo impianto è in fase di realizzazione in St. Lucie County, Florida. L'impianto, sviluppato da Geoplasma, Inc., sarà operativo a partire dall'anno 2010. L'impianto, tra i più grandi nel mondo, sarà realizzato per smaltire rifiuti urbani con una capacità di 3.000 tonnellate/giorno e la produzione di 120 MW di elettricità; sarà composto da sei moduli da 500 t/giorno e il vapore prodotto sarà utilizzato per la conversione in elettricità. I residui solidi serviranno per la produzione di materiale da utilizzare nelle costruzioni stradali.
Sono previste anche delle nuove istallazioni in India (Pune e Nagpur) che saranno realizzate dalla SMS Infrastructures Limited con tecnologia Westinghouse. I due impianti avranno una capacità di circa 72 t/g e tratteranno rifiuti pericolosi per produrre elettricità. Ogni impianto produrrà più di 5 MW di elettricità.

Il Westinghouse Plasma Gasifier è un gassificatore in controcorrente che opera a pressione atmosferica. Il processo avviene in difetto di ossigeno rispetto allo stechiometrico (circa il 40%); i tempi di permanenza dell'ordine di 0,5-1 minuto.
I gas raggiungono temperature di 1250°C, mentre la torcia al plasma raggiunge temperature di 2500°C. L'energia termica utilizzata per raggiungere tali temperature è fornita dalle torce al plasma Westinghouse. Il rifiuto viene alimentato in miscela con coke metallurgico e roccia calcarea in quantità, rispettivamente di circa il 4% e il 3% in peso rispetto al rifiuto. Le torce non operano, infatti, direttamente sul rifiuto, essendo immerse in un letto di coke che viene progressivamente consumato per il sostegno e la stabilizzazione del regime di produzione del syngas.



Le scorie residue del trattamento di gassificazione risultano pari a circa al 5-6 % in peso rispetto al rifiuto in ingresso e vengono poi trattate con agenti chelanti, aventi la funzione di fissare in gruppi stabili e non lisciviabili i metalli pesanti.
In entrambi gli impianti di Utashinai e Mihama Mikata, unici impianti al mondo su scala commerciale che trattano rifiuto urbano indifferenziato [38], il syngas prodotto è immediatamente bruciato per ottenere fumi caldi, che vengono inviati in un boyler per la produzione di vapore, che viene quindi fatto espandere in turbina: l'emissione in atmosfera dell'impianto di trattamento è rappresentata, pertanto, dal camino asservito alla combustione del syngas. Il fabbisogno energetico degli impianti al plasma di questa tipologia, in relazione alla sezione di gassificazione, si attesta mediamente intorno ai 200÷250 kWhe/t di RU alimentato.

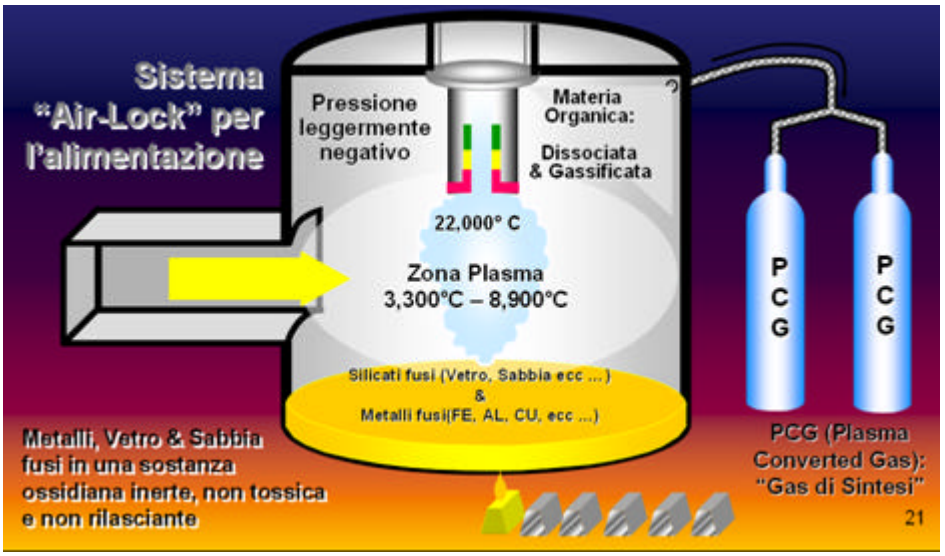
Misurazioni effettuate presso l'impianto di Mihama – Mikata in Giappone hanno evidenziato che mentre NO_x e CO, misurati in continuo, rimangono rispettivamente al di sotto di 100 e 30 ppm, coerentemente con gli standard raggiunti applicando le migliori tecnologie disponibili, la principale criticità è rappresentata dal tenore di acido cloridrico, per via dell'ambiente di reazione piuttosto riducente. Da rilevare che la normativa giapponese per le emissioni in atmosfera prescrive una concentrazione massima di HCl pari a 100 ppm (contro i 10 ppm previsti dal D. Lgs 133/2005); tuttavia le tecnologie per l'abbattimento di acidi forti da flussi gassosi sono ormai consolidate e note da tempo (lavaggio ed assorbimento in soluzioni alcaline con precipitazione di sali).

Il Comune di Campi Bisenzio ha istituito una commissione tecnica con compito di verificare la funzionalità di tecnologie alternative all'incenerimento. Nell'ambito di tale attività la commissione, in aprile 2009, ha visitato l'impianto con torce al plasma di Utashinai [52].
L'impianto, in esercizio dal 2003 e dimensionato per 280 t/giorno, in occasione della visita, trattava circa 82,5 t/giorno su una delle linee di gassificazioni presenti nell'impianto. La riduzione della portata è stata giustificata dai gestori in relazione alla diminuzione della popolazione nella zona.

Si precisa che l'impianto era stata progettato in origine per trattare principalmente pneumatici triturati ed è poi stato impiegato per il cotrattamento di pneumatici e di rifiuti urbani, che vengono alimentati in rapporto 1:1 in peso, ma, in occasione della visita, l'impianto lavorava su una sola linea di trattamento ed esclusivamente rifiuto urbano.
A tal proposito Juniper, accreditata società di consulenza inglese, pur riconoscendo in Westinghouse Plasma Corporation uno dei leader mondiali nella tecnologia della torcia al plasma e definendo l'impianto di Utashinai un'importante referenza, essendo stato il primo impianto e rimanendo ad oggi il più grande, in cui vengono trattati rifiuti urbani, sia pure insieme a car fluff, non giunge a definire il processo Alter NRG pienamente provato, in quanto l'Azienda non ha ancora realizzato un progetto specifico su rifiuti solidi urbani [38].

5.4.2 StarTech

Startech Environmental produce e vende un impianto al plasma per lo smaltimento dei rifiuti conosciuto come Plasma Converter System (PCS). La società americana è rappresentata in Italia dalla COGIM S.p.A., che si occupa della distribuzione della tecnologia Startech sul territorio nazionale.
Nel gennaio del 2001 la Startech ha avviato un impianto dimostrativo a Bristol, Connecticut che tratta circa 4,5 t/giorno di rifiuti pericolosi.
È recente la notizia che la società anglo-gallese Plasma Processing Technologies ha commissionato alla Startech un impianto da 10 ton/giorno, che dovrebbe trattare rifiuti industriali e sanitari; si tratta, quindi, del primo impianto Startech in Europa.
Il plasma, gas ionizzato a temperature di 15.000-20.000°C, produce temperature all'interno del reattore di 3.300-8.900 °C, provocando la dissociazione molecolare delle componenti organiche dei rifiuti e la fusione delle componenti inorganiche. La tecnologia produce un gas di sintesi, di composizione variabile secondo la tipologia del rifiuto, ma in media composto da circa il 50% di idrogeno, 35% di ossido di carbonio, 10% di azoto, e piccole quantità di idrocarburi leggeri e composti acidi (provenienti dal cloro presente nei rifiuti).
I reattori al plasma sono realizzati in formati standard da 5 t/g, 10 t/g, 20 t/g, 50 t/g, e 100 t/g.



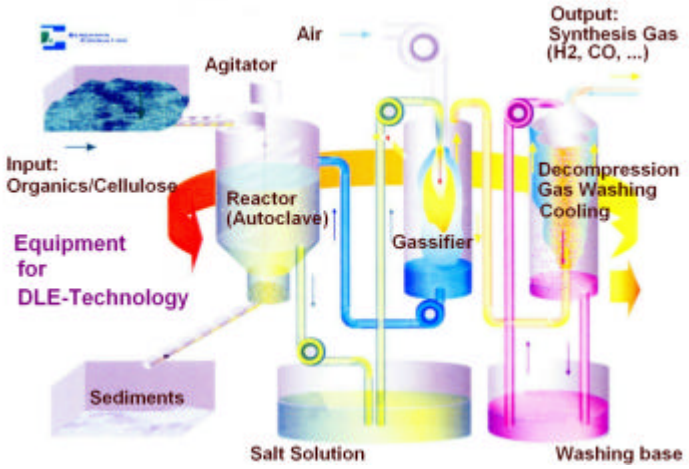
5.5 ALTRI PROCESSI

Di seguito vengono passate in rassegna le proposte di alcune Aziende che hanno risposto al comunicato di ATO-R; è utile evidenziare che si tratta di proposte che non possono al momento essere assunte come riferimento tecnologico, trattandosi di ipotesi progettuali sviluppate a livello di laboratorio o di impianti pilota.

5.5.1 Inter Engineering

La Società Inter Engineering (Villingen, Germania) ha presentato nel giugno scorso, al Gruppo di lavoro impegnato nella redazione del rapporto sulle tecnologie innovative, la tecnologia DLE-Dendro Liquid Energy. La tecnologia DLE si basa sulla dissoluzione del rifiuto in un bagno di sali organici e successiva gassificazione dello stesso.
La Società Inter Engineering ha successivamente trasmesso una relazione di dettaglio con la quale ha ufficialmente risposto al comunicato con cui ATO-R avviava l'indagine esplorativa finalizzata ad accertare la fattibilità di un impianto di trattamento termico a tecnologia innovativa nella Provincia di Torino.
Si tratta di un tecnologia a livello sperimentale al momento testata in laboratorio su scarti legnosi di varie tipologie (tronchi, rami, segatura, traversine ferroviarie, mobilia ecc.). È di prossima realizzazione in Germania un impianto pilota da 50 t/d.
Il rifiuto è prelevato dall'area di stoccaggio e inserito in una trinciatrice, che ne riduce le dimensioni a circa 20 millimetri. Il materiale può contenere fino a 50% di umidità e non è richiesto alcun essiccamento.
Il processo di conversione avviene in tre fasi:

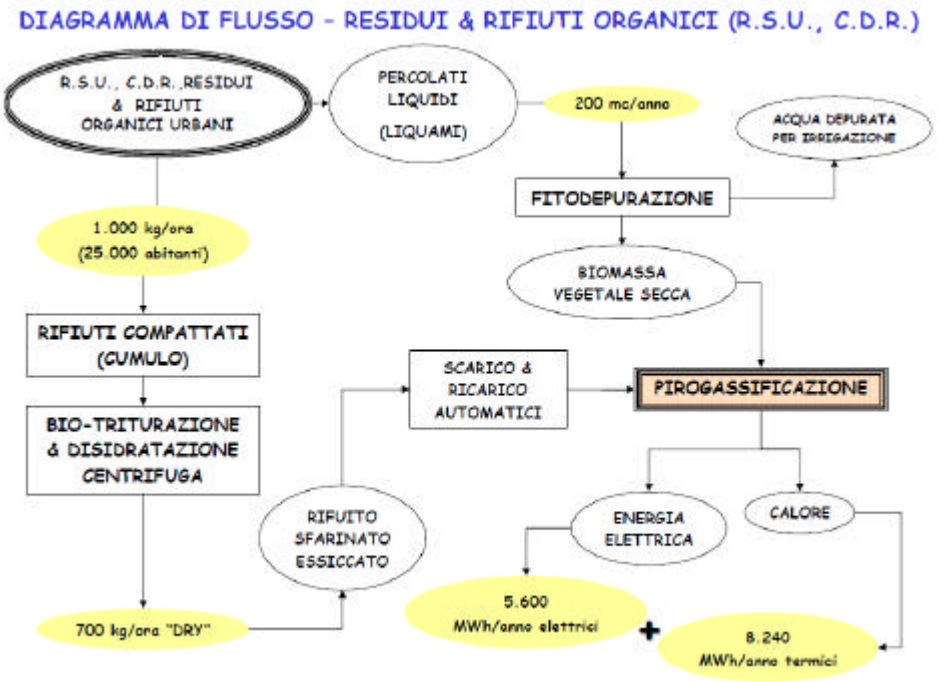
1. Liquefazione: i materiali triturati sono alimentati ad un contenitore in pressione e miscelati con una soluzione salina satura a pH basici. Una reazione chimica a 200 °C e 6 bar rompe i legami molecolari della ligno-cellulosa, causando la dissoluzione della biomassa in vari sali solubili nella forma di residui oleosi. Le particelle minerali sedimentano nella parte inferiore del contenitore in pressione, da cui vengono estratte. Se necessario possono essere aggiunti additivi speciali che legano elementi tossici quali cloro, bromo, metalli pesanti ecc. nei residui insolubili. La soluzione restante consiste di sali organici puri, che passano poi allo step di gassificazione.
2. Gassificazione: La soluzione liquida è pompata ad un gassificatore, da cui si forma un gas di sintesi puro (H2 + CO) e privo di catrame. I sali alcalini della soluzione precipitano lungo le pareti del gassificatore, da dove saranno recuperati per essere riutilizzati nel reattore.
3. Conversione in energia: Il gas di sintesi decompresso, raffreddato e lavato viene alimentato ad un motore endotermico. Il calore eccedente è disponibile per il processo ma anche per essere ceduto all'esterno.



5.5.2 Tecnogranda

La Società Tecnogranda SpA con nota del 15 giugno 2009 ha risposto ufficialmente al comunicato con cui ATO-R avviava l'indagine esplorativa.
La Soc. Tecnogrnda con la nota suddetta ha trasmesso un documento nel quale vengono esposte "le linee generali di un progetto realizzabile sulla base di esperienze già in buona misura presenti in alcune realtà particolarmente innovative in Europa e nel mondo".
Il progetto prevede l'applicazione di tecnologie innovative tra loro integrate di biotriturazione e piro-gassificazione di biomasse di origine naturale, RSU, CDR, residui, rifiuti organici con produzione di energia elettrica e termica.
Viene descritto quindi uno schema di processo dimensionato su una comunità di 25.000 abitanti con una produzione di 1000 kg/h di RSU (circa 8.000 t/y). Lo schema è comunque applicabile per dimensionamenti modulari.
Lo schema di processo proposto prevede i seguenti stadi:

- 1°stadio: pre-trattamento biomasse, residui, rifiuti (triturazione, disidratazione e inertizzazione)
- 2° stadio: pirogassificazione con produzione di syngas
- 3° stadio: co-generazione (produzione energia elettrica e termica)
- 4° stadio: fito-depurazione acque di risulta, liquami, acque luride.



5.5.3 Vuzeta

La Società Vuzeta ha presentato nel maggio scorso al Gruppo di lavoro impegnato nella redazione del rapporto sulle tecnologie innovative la propria tecnologia di "ristrutturazione molecolare".
I materiali di alimentazione vengono tritati finemente in particelle di meno di mezzo millimetro per aumentare al massimo la superficie del materiale, che poi passa in una sorta di centrifuga nella quale viene aggiunto un catalizzatore industriale, che varia a seconda del rifiuto trattato. Portato il materiale a 350 °C di temperatura, vari gas contenenti carbonio, idrogeno, ossigeno, azoto e altri elementi cominciano a separarsi ed a riorganizzarsi in uno schema tipico degli idrocarburi. Infine, attraverso una sorta di 'colonna di rettifica' vengono selezionati i vari tipi di oli combustibili sintetici con potere calorifico fino a 10.500 kcal.
La Società Vuzeta dispone di un impianto sperimentale a Brescia. In provincia di Pavia è funzionante una variante ad hoc della tecnologia, che opera a valle di un ciclo di depurazione delle acque reflue e tratta digestato e reflui zootecnici.



Fig. 5.26 – Impianto sperimentale Vuzeta, Brescia

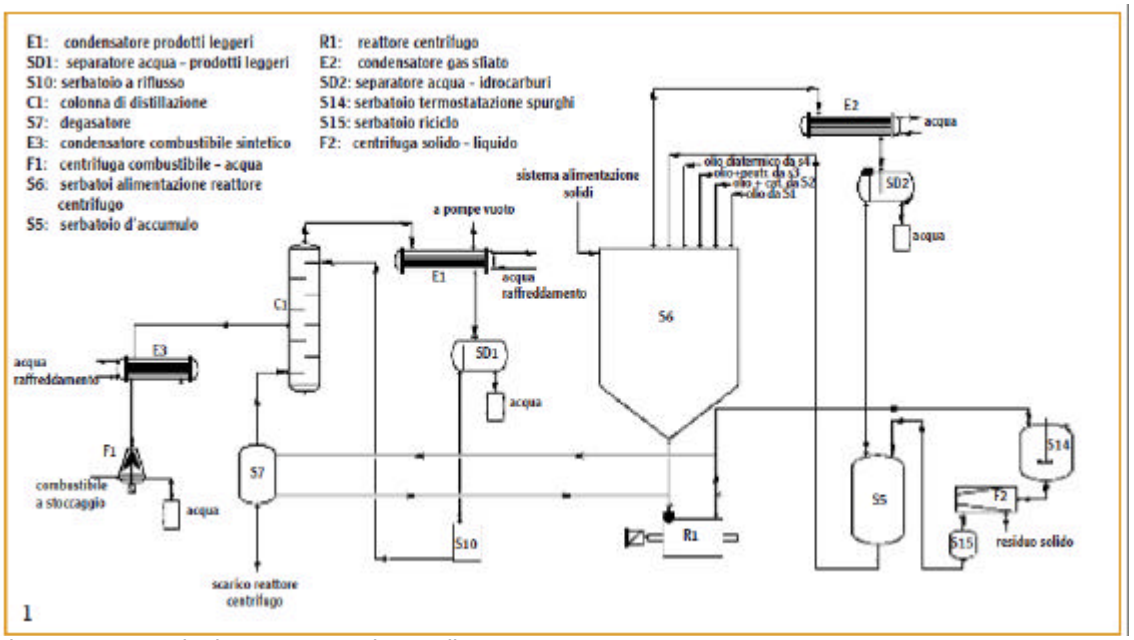


Fig. 5.27 – Tecnologia Vuzeta – schema di processo

6 ESITO DELLO STUDIO

Attraverso l'analisi dei dati raccolti autonomamente e di quelli trasmessi dai costruttori di impianti è stato possibile valutare vari aspetti inerenti le prestazioni delle tecnologie innovative. Sono state approfondite le seguenti tematiche:

- rifiuto alimentato: tipologia di rifiuto (rifiuto solido urbano – RSU, rifiuti speciali assimilati – RSA, fanghi, altro), caratteristiche del rifiuto (PCI), eventuali pretrattamenti necessari.
- dati tecnici: occupazione di superficie, ore di esercizio in un anno, agente gassificante, combustibile ausiliario, altri reagenti, utilizzo del syngas;
- recupero energetico: quantità di energia elettrica e termica prodotta detratti gli autoconsumi dell'impianto, rendimenti energetici;
- aspetti ambientali: emissioni in atmosfera, in termini di concentrazione dei contaminati e volume di fumi rilasciati; quantità e qualità dei residui solidi prodotti;
- aspetti economici: entità del capitale da investire, costi di gestione, livello orientativo della tariffa di trattamento applicabile.

6.1 I RIFIUTI ALIMENTATI

I rifiuti (rifiuti solidi urbani con percentuali differenti di speciali, ingombranti, in rari casi piccoli quantitativi di fanghi) subiscono in generale un processo di triturazione prima di essere immessi nel reattore di pirolisi/gassificazione; in alcuni casi (Enerwaste, Entech, Nippon Steel, Thermoselect, TPF Basse Sambre) non è necessario alcun tipo di trattamento.

Costruttore		Impianto	Potenzialità [t/anno]	Tipologia rifiuto	PCI [Mj/kg]	Pretrattamento
AlterNRG (Canada)	PL	Utashinai, Giappone	80.000	RU, PFU	13.2 (8.4-20.1)	Triturazione, separazione magnetica + miscelazione con pneumatici triturati
Ebara (Giappone)	G	Kawaguchi, Giappone	153.000	RU	13	Triturazione per ottenere pezzatura di 300 mm
Energos (Norvegia)	G	Forus, Norvegia	30.000	RU, RS	10.8	Triturazione
Enerwaste (USA)	G	Husavik, Islanda	16.000	RU, RS e scarti agroindustriali		no
Entech (Australia)	G	Genting, Malaysia	22.250	RU		no
Mitsui (Giappone)	P+C	Toyohashi	108.000	RU	9.63	triturazione
Nippon Steel (Giappone)	G	Yangsan, Corea del Sud	66.000	RU, ingombranti, sovvalli da riciclaggio	11,7 – 12,6	no
Plasco Energy (Canada)	PL	Ottawa, Canada	28.000	RU e matrici al alto contenuto di carbonio (rapporto 1:0,13)		Triturazione, separazione metalli
TechTrade (Germania)	P	Burgau, Germania	40.000	RU:83% RS:15% Ingombranti: 2%	Minimo: 5 Medio: 8,5 Max: 10	Triturazione fino a 300 mm
Thermoselect (Svizzera)	P+G	Chiba, Giappone	105.000	RU, RI		Non necessario pretrattamento del rifiuto, ma quantitativi di vetro superiori al 10% possono causare problemi
Thide Environnement (Francia)	P	Arras, Francia	50.000	RU (80%), RS (16%), fanghi (4%)	7,5-9,4	Triturazione fino a 150-200 mm, separazione metalli, essiccazione
Tpf Basse Sambre (Belgio)	P+G	Keflavik, Islanda	12.000	RU (73%) Rifiuti aeroporto (27%)	12,5	Non necessario pretrattamento del rifiuto se dimensioni <500 mm
C = combustione; G = gassificazione; PL = plasma; P = pirolisi						
RU = rifiuti urbani; CDR = combustibili da rifiuti; PFU = pneumatici fuori uso; RS = rifiuti speciali; ROS = rifiuti di origine sanitaria; RI = rifiuti industriali; RPM = rifiuti di plastiche miste						

6.2 I DATI TECNICI

Dall'analisi dei dati tecnici emerge che le tecnologie in esame necessitano di spazi relativamente ridotti; garantiscono una continuità di funzionamento in genere superiore a 300 giorni/anno (7.200 ore), con punte di 320-330 giorni/anno (7.700-8.000 ore/anno). Richiedono in generale combustibile ausiliario soltanto nella fase di avviamento; in alcuni casi tuttavia il processo prevede l'alimentazione di coke insieme al rifiuto da trattare.
L'agente gassificante, nel caso di gassificazione, è in generale aria; l'utilizzo di ossigeno puro costituisce un'ulteriore complicazione impiantistica, con un aggravio dei costi di esercizio.
Il syngas prodotto dal processo, salvo rare eccezioni, è utilizzato per il recupero energetico, attraverso la combustione in caldaia e l'espansione del vapore prodotto in turbina (Ciclo Rankine).

Costruttore		Occupazione superficie [m²]	N°ore/anno	combustibile ausiliario	altri reagenti	Agente gassificante	Utilizzo del syngas
AlterNRG (Canada)	PL	~ 10.000 (Utashinai-80.000t/y)	6.480–6.600	Coke metallurgico 40kg/t rifiuto	Calce 30kg/t rifiuto	Aria/vapore/ ossigeno	Elettricità attraverso combustione del syngas e ciclo a vapore
Ebara (Giappone)	G	146.000 per un impianto da 1.080.000 t/anno(New York)	6.750	Gas naturale nella fase di avviamento		aria	Elettricità attraverso combustione del syngas e ciclo a vapore
Energos (Norvegia)	G	7.000 per un impianto da 30.000 t/anno	7.800–8.000	Non richiesto	Reagenti depurazione fumi: 9 kg/t	aria (4.8 t /t rifiuto)	Calore e/o Elettricità attraverso combustione del syngas e ciclo a vapore
Enerwaste (USA)	G	2.500 per potenzialità di 60 t/giorno		Gas naturale			Calore e/o Elettricità attraverso combustione del syngas e ciclo a vapore
Entech (Australia)	G	14.160 per un impianto da 89.100 t/anno (Los Angeles)	8.000 (dichiarato)				Calore e/o Elettricità attraverso combustione del syngas e ciclo a vapore
Mitsui (Giappone)	P+C	3.800 per un impianto da 100.000 t/anno		Necessario solo per start up e se PCI <6.7 MJ/kg			Calore e/o Elettricità attraverso combustione del syngas e ciclo a vapore
Nippon Steel (Giappone)	G		7.248-7.752	Carbone 40-50 kg/t rifiuto	Per il processo termico: Coke: 40-50 kg/t Calce: 50 kg/t	Ossigeno puro	Calore e/o Elettricità attraverso combustione del syngas e ciclo a vapore
Plasco Energy (Canada)	G+PL	~ 12.000 (Ottawa-28.000 t/anno)				Aria	Produzione di elettricità attraverso motori a combustione interna
TechTrade (Germania)	P	~ 12.000 (Burgau-40.000 t/anno)	7.657	Olio combustibile: 2,9 kg/t rifiuto	Depurazione fumi: Calce: 9,09 kg/t Bic. sodio:11,2 kg/t Carb. attivo:0,3kg/t Carbammina: 5,3 kg/t	Nessuno	Calore e/o Elettricità attrav erso combustione del syngas e ciclo a vapore
Thermoselect (Svizzera)	P+G	32.000 per una potenzialità di 220.000 t/anno [28]	7.650	Gas naturale: 30 kg/t rifiuto	Depurazione syngas: NaOH: 62 kg/t HCl: 17 kg/t	Ossigeno puro: 56 kg/t	Calore e/o Elettricità attraverso motori a combustione interna
Thide Environnement (Francia)	P					Nessuno	Produzione di calore
Tpf Basse Sambre (Belgio)	P+G		8.209 (nel 2008)	Olio combustibile: 2l/t	Depurazione fumi: Ammoniaca: 5 kg/t Bic. sodio: 25 kg/t Carb. attivo: 1 kg/t	Aria	Produzione di energia elettrica attraverso combustione del syngas e ciclo a vapore

6.3 RECUPERO ENERGETICO

Da un punto di vista energetico i processi di pirolisi/gassificazione presentano, rispetto alla combustione convenzionale, alcuni potenziali vantaggi: il gas prodotto può avere diversi impieghi in funzione del livello di purezza raggiunto. Le alternative sono l'impiego come vettore energetico (con efficienze diverse in base al dispositivo utilizzato) o l'impiego nella sintesi di diversi prodotti chimici (da idrogeno a metanolo, ammoniaca, combustibili liquidi, ecc.) [23, 47] . Delle due opzioni la prima è quella comunemente praticata.

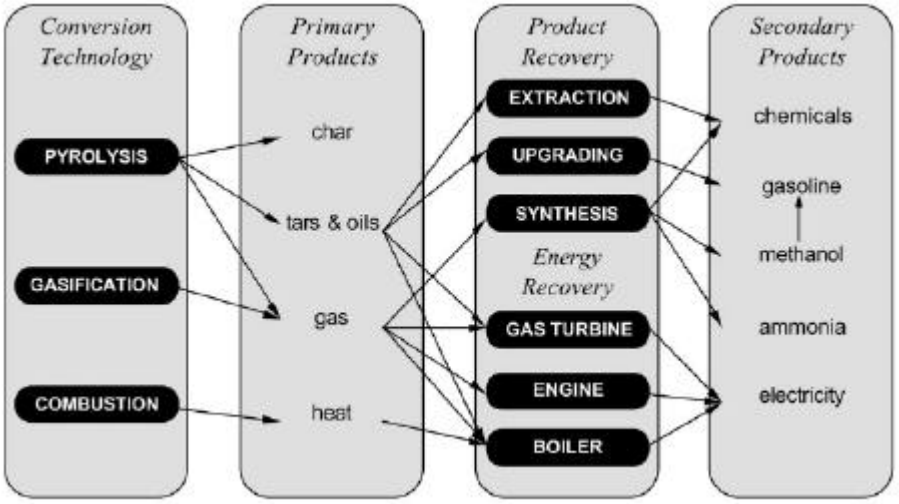


Fig. 6.1 – Processi di conversione termica e prodotti (Bridgwater, 1994)

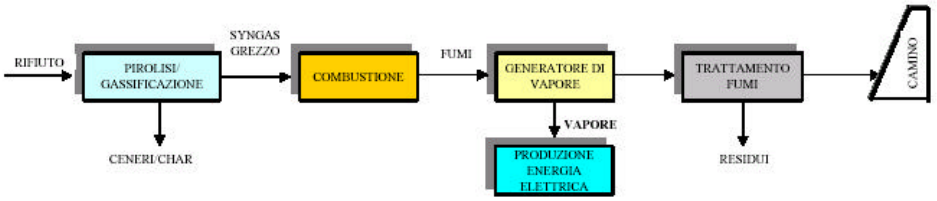
Al fine di ottimizzare il recupero energetico, semplificando l'impianto e riducendo sensibilmente i costi, l'impianto di trattamento termico dei rifiuti può essere convenientemente localizzato in adiacenza di centrali elettriche esistenti. Si citano due esempi:

- l'impianto di incenerimento di Takahama (Giappone) della Hitachi Zosen; il Takahama Clean Center, entrato in funzione nel 1996, tratta 120.000 t/anno di rifiuti e fornisce vapore a 255°C alla vicina centrale a ciclo combinato (con turbina a gas alimentata a gas naturale) da 25 MW; il rendimento di produzione dell'energia elettrica è del 34%;
- l'impianto di pirolisi di Hamm da 110.000 t/anno; il syngas è inviato in caldaia per generare vapore (conversione di tipo termico). Anche il residuo carbonioso (pirocoke) viene bruciato ed il flusso termico netto (pirogas+pirocoke) viene recuperato per la produzione di energia elettrica nella vicina centrale di Hamm-Uentrop, che produce 150 MW di energia da combustibile convenzionale (carbone).

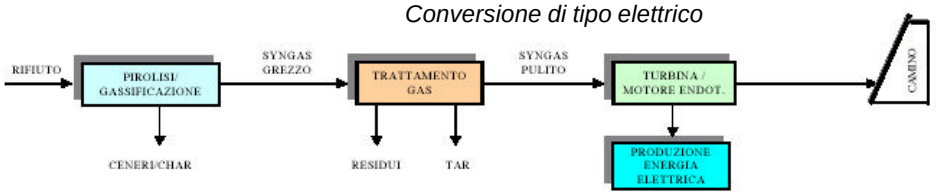
In generale lo sfruttamento energetico del gas prodotto può essere effettuato secondo due alternative:

- la combustione diretta del gas così come prodotto, oppure dopo trattamenti non particolarmente spinti, in sistemi convenzionali di combustione (es. caldaia) posti a valle del gassificatore (**conversione di tipo "termico"**);
- l'utilizzo del gas di sintesi in sistemi quali motori alternativi e turbine a gas, previa depurazione spinta (**conversione di tipo "elettrico"**).

Conversione di tipo termico



Conversione di tipo elettrico



La prima soluzione, quella in assoluto più praticata, non differisce sostanzialmente dalla combustione convenzionale dei rifiuti. La differenziazione diviene pressoché formale in alcuni casi, nei quali non è possibile separare fisicamente la fase di pirolisi/gassificazione da quella di combustione finale del gas derivato, per cui il trattamento viene a configurarsi come un incenerimento in due stadi e come tale, giustamente, sottoposto a tutte le prescrizioni e le normative ad esso applicabili.
Nella gassificazione di tipo "elettrico", invece, risultano ben distinte le due fasi della "produzione del gas derivato" e del suo impiego in una turbina o in motore endotermico per la produzione di energia elettrica, previo trattamento di depurazione spinta.
La conversione di tipo elettrico prevede per il syngas i seguenti utilizzi:

- combustione in motori a combustione interna previa depurazione spinta con un'efficienza nettamente superiore rispetto al sistema con turbina a vapore (37-41%).
- utilizzo, previa depurazione spinta, in un ciclo combinato turbo-gas turbo-vapore (IGCC, Integrated Gasification Combined Cycle) con efficienze di recupero del 40-50%
- produzione di idrogeno ed alimentazione di celle a combustibile con rese energetiche potenziali superiori al 60%.

La tabella che segue [49] riporta i rendimenti lordi di produzione di energia elettrica potenzialmente ottenibili da impianti di gassificazione/pirolisi, in funzione del sistema utilizzato (turbina a vapore, motori endotermici, sistemi combinati turbina a gas/turbina a vapore, celle a combustibile) ed evidenzia come, all'aumentare dell'efficienza energetica raggiungibile, aumenti la complessità impiantistica e diminuisca per contro l'affidabilità del sistema.

Prime 'mover'	Power recovery efficiency, %	Trends
Steam Turbine	18-27	Most proven technology. Higher efficiencies require more exacting boiler operating conditions which is less proven. Gasification + close-coupled combustion perceived as surrogate incineration.
Gas Engine	37-41	Proven in Japan on multiple plants. Standalone gas engines would achieve 37% for the higher efficiency integration with an Organic Rankine Cycle (ORC) is required which is currently unproven.
Gas Turbine (IGCC)	42-50	Gas turbines and IGCC are proven at large scale on coal gasification plants (clean coal). Some companies have announced intention to incorporate a gas turbine in their processes. Higher GT efficiency balanced by energy debit to compress syngas.
Fuel Cell	40–80	Ultimate goal – but still 5 – 10 years away. Lots of R&D effort and government funding in this area.

Consolidato Limitata esperienza Non provato

Il principale ostacolo tecnologico all'utilizzo del syngas prodotto attraverso processi di pirolisi/gassificazione in sistemi ad alto rendimento, quale un ciclo combinato o un motore endotermico, è la **pulizia del syngas** dai contaminanti in esso contenuti.
Per l'impiego del syngas si richiede una pulizia di grado crescente, passando da uno minimo, per impiego in caldaie combinate con turbine a vapore, ad uno sempre maggiore per impiego diretto in motori endotermici e in turbine a gas e in futuro anche in celle a combustibile (si veda tabella seguente).

Parametro	Valore ammissibile		
	Applicazione		
	Caldaia	Motore C.I.	Turbina a gas
PCI, MJ/m^3_N	Non limitato	≥ 4[a]	≥ 4[a]
Tar, mg/m^3_N	Non limitato	100[b]	10[b]
Particolato, mg/m^3_N	Non limitato	50*[c]	2.4*[c]
Metalli alcalini (Na, K), ppmw	Non limitato	0.025 ÷ 0.1**[c]	0.025 ÷ 0.1**[c]
Metalli pesanti‡ (Pb, Hg, V), ppmw	Non limitato	0.1[c]	0.1[c]
H_2S, ppmv	Non limitato‡	20[d]	20[d]

* Massimo una frazione dell'1% del valore ammesso può superare i 10 µm di diametro equivalente.
** Variabile con il rapporto Na/K. Limite superiore Na/K=28; limite inferiore Na/K=1.
‡ Valore cumulativo. I limiti legislativi per il rilascio in ambiente normalmente ne impongono il contenimento attraverso metodi di pulizia al camino. Si considerano in questa tabella solo i valori compatibili con l'esercizio delle apparecchiature.
[a] Da *Specification for Fuel Gases for Combustion in Heavy-Duty Gas Turbines*. General Electric Reference Document GEI-41040j (2007) e Oakey et al., 2004 (op. cit.).
[b] Da Milne et al., 1998 (op. cit.).
[c] Da General Electric Reference Document GEI-41040j, 2007(op. cit.).
[d] Da Wright et al., 2000. *An Analysis of the Potential for Deposition, Erosion or Corrosion in Gas Turbines Fueled by the Products of Biomass Gasification or Combustion*. ASME paper No. 2000-GT-19; Hasegawa et al., 2007. *Gas Turbine Combustion Technology Reducing Both Fuel-NOx and Thermal-NOx Emissions for Oxygen-Blown IGCC With Hot/Dry Synthetic Gas Cleanup*. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 129/2:358.

La depurazione del syngas, oltre a costituire una complicazione di carattere operativo-gestionale, determina un impoverimento del contenuto energetico del gas, sia in termini di calore sensibile (raffreddamento), che di potere calorifico (rimozione del TAR).
Tra i principali contaminanti presenti nel syngas, particolare importanza rivestono le particelle solide trascinate, i gas acidi (HCl, H_2S, acidi organici) ed alcalini (NH_3) ed il TAR, costituito da un complesso di idrocarburi pesanti condensabili. Quest'ultimo, in particolare, può formare depositi viscosi di sostanze oleose e polveri, a seguito del raffreddamento del gas già a temperature intorno ai 250-300°C, con conseguenti problemi di sporcamento e di intasamento delle superfici e degli organi meccanici.
Le tecnologie per la rimozione dei tar dal syngas sono essenzialmente di tipo chimico (cracking termico o catalitico) o fisico (cicloni, scrubber, filtri ceramici, filtri a maniche o elettrostatici, e metodi ad adsorbimento). Sono tutti processi già in grado di offrire buone prestazioni, ma presentano due grossi svantaggi: costi di investimento e di esercizio elevati e perdita dell'energia chimica dei tar eliminati (ad alto tenore di carbonio ed idrogeno).

6.3.1 Motori a combustione interna

L'impiego dei motori endotermici ad accensione comandata, in alternativa alle turbine a gas che offrono un maggiore rendimento, è motivato dai minori costi di installazione e dalla maggiore flessibilità di esercizio. Le unità sono pensate principalmente per l'utilizzo di gas naturale e il loro esercizio con combustibili gassosi diversi costituisce un impiego fuori specifica che necessita di alcune modifiche e misure precauzionali, quali l'intensificazione degli interventi di manutenzione e controllo e l'impiego di lubrificanti speciali.

La presenza nel combustibile di contaminanti salini e di specie alcaline particolarmente corrosive può portare rapidamente al danneggiamento per corrosione delle valvole e delle fasce elastiche e alla formazione di sali nel lubrificante, con conseguente rottura delle pompe di circolazione dell'olio: il rimedio normalmente adottato per consentire il prolungamento della vita utile del motore è la cromatura delle parti esposte a corrosione a caldo, quali le valvole di scarico.
La presenza di particolato nel combustibile può invece incrostare le fasce elastiche o depositarsi sugli elettrodi delle candele, imponendone la sostituzione anticipata; può inoltre incrostare le sedi delle valvole di scarico, con conseguente perdita di rendimento del motore e inquinamento dei gas di scarico.
I tar possono condensare nei condotti di immissione o reagire solo parzialmente e quindi dare luogo a fenomeni di incrostazione dei condotti e delle valvole, nonché delle candele di accensione. Il loro lento scioglimento nel lubrificante può inoltre richiedere l'intensificazione degli intervalli di manutenzione, con aggravio del costo di esercizio.
L'utilizzo di motori endotermici risulta particolarmente conveniente per piccole scale (1-2 MW, corrispondenti a circa 8.000 t/a); a tali scale le turbine a vapore presentano efficienze piuttosto basse (5%-15%).
L'applicazione di motori endotermici al syngas derivante da rifiuti indifferenziato è estremamente limitato per via delle problematiche, non ancora del tutto risolte, di depurazione del gas. Si segnala l'utilizzo di motori endotermici a valle della gassificazione in cinque impianti Thermoselect giapponesi (Chiba, Mutsu, Kurashiki, Tokushima, Isahaia).

Tab. 6.1 – Impianti Thermoselect in Giappone (fonte: Miyashi and Yam ada, 2006) [25]

City (Prefecture)	Start-up year	Design capacity	Feedstock	Constructor	Owner	Syngas use	Power generated
Chiba (Chiba)	1999	2 x 165	MSW + industrial waste	JFE	Japan Recycling Corporation (JFE)	Gas engine at steelworks	NAa
Mutsu (Aomori)	2003	2 x 70	MSW	Mitsubishi Materials Technological Corporation	Sumokita Local Authority Office Association	Gas engines	2 x 1.2 MW
Kurashiki (Okayama)	2005	3 x 185	MSW+ industrial waste	JFE	Mizushima Eco Works	Gas engines at steelworks	NA
Isahaya (Nagasaki)	2005	3 x 100	MSW	JFE	Kenou-Kennan KKK	Gas engines	Jenbacher engines 5 x 1.6 MW
Tokushima (Tokushia)	2005	2 x 60	MSW	Mitsubishi Materials Technological Corporation	Chuo Local Authority Office Association	Gas engines	0.9 x 2 MW
Izumi (Osaka)	2005	1 x 95	Industrial waste	Kyokoto Kaihatsu	Green Stage Corporation	Boiler/steam turbine	1.7 MW
Yorii (Saitama)	2006	3 x 150	MSW + industrial waste	JFE	Orix Resource Recycling Services	Boiler/steam turbine	10.5 MW

6.3.2 Cicli combinati gas vapore

Il **ciclo combinato gas vapore (ICGC)** per la produzione di energia elettrica è la soluzione che, allo stato attuale, presenta maggiori potenzialità di sviluppo, anche sulla base di quanto già sperimentato con il carbone ed alcune biomasse. Il syngas è bruciato nel combustore di una turbina a gas; dai fumi di scarico della turbina è possibile produrre vapore da destinare alla produzione di energia elettrica, tramite espansione in una turbina secondaria (Fig. 6.2), incrementando notevolmente il rendimento di conversione in energia elettrica, con contestuale aumento della complessità architettonica e del costo d'impianto.

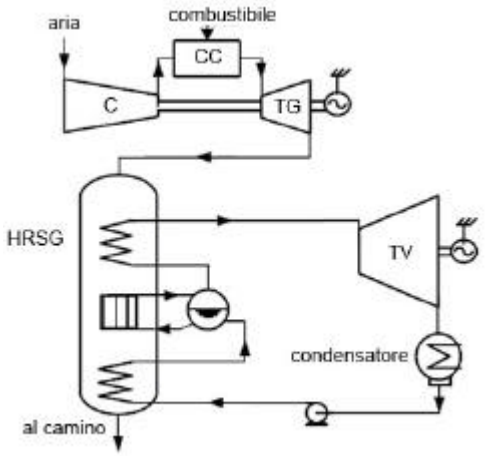


Fig. 6.2 – Schema di un ciclo combinato gas-vapore (HRSG sta per "Heat Recovery Steam Generator", ossia "generatore di vapore per il recupero termico")

L'impiego delle turbine a gas con syngas derivato da rifiuti presenta soprattutto il problema della deposizione di impurità sugli elementi della turbina e quello della loro corrosione accelerata. Tutte le turbine in grado di essere alimentate a syngas sono, ad oggi, adattate da turbine a gas naturale, che è essenzialmente puro. La presenza nel combustibile di metalli alcalini, quali sodio e potassio, può determinare fenomeni di corrosione a caldo e deve quindi essere controllata. La presenza di tar e di particolato può causare la deposizione di materiale nei condotti di immissione del combustibile o sulle pale rotoriche.
Per queste ragioni il recupero energetico del syngas attraverso tali dispositivi non ha trovato ad oggi applicazione su scala industriale: l'unico esempio di ciclo IGCC su syngas depurato derivante dalla gassificazione di RSU risulta essere l'impianto SVZ a Schwarze Pumpe in Germania [10], con efficienze di produzione dell'energia elettrica dichiarate pari al 46,6% (CDR da rifiuti urbani con PCI di 18 MJ/kg) [41]. Le informazioni su tale impianto sono tuttavia molto limitate.

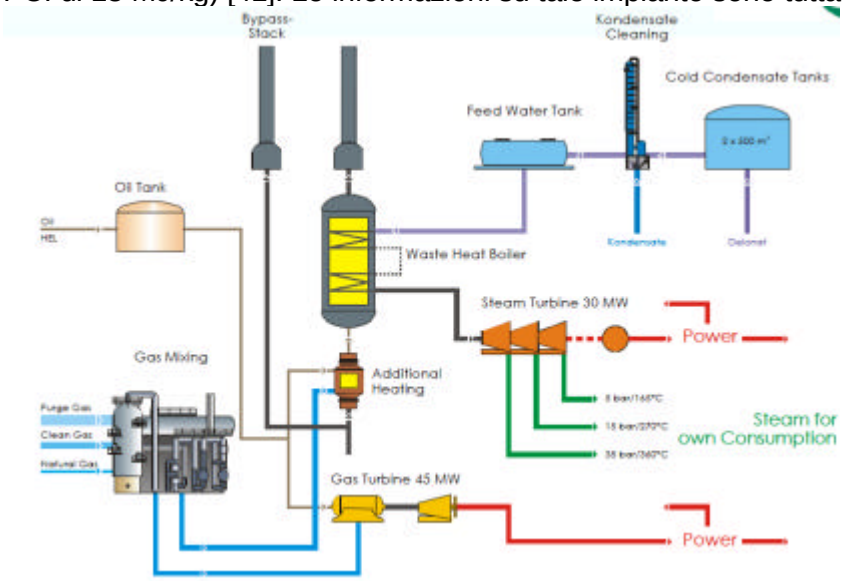
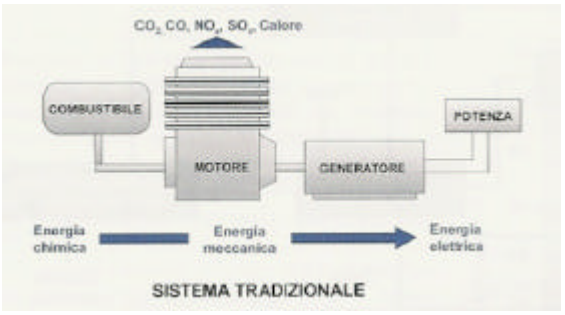
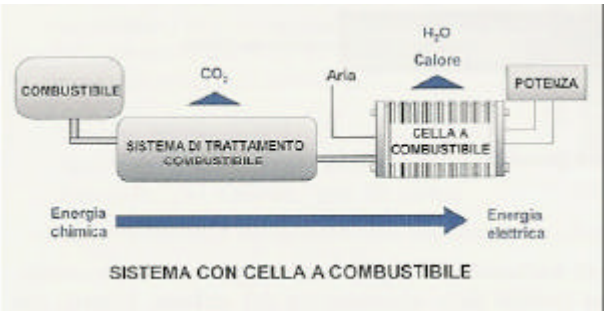


Fig. 6.3 – Schema di flusso del modulo di produzione energia presso l'impianto SVZ.

6.3.3 Celle a combustibile

Le celle a combustibile (fuel cells) consentono di convertire direttamente, ed in modo efficiente, l'energia chimica del combustibile (H_2) in energia elettrica, senza il passaggio attraverso la conversione calore-lavoro-energia elettrica caratteristico degli usuali cicli termodinamici di potenza.





L'interesse del mondo scientifico verso le fuel cells è rilevante per gli enormi vantaggi che esse potrebbero offrire:

- elevati rendimenti di conversione (40-80%);
- generazione di calore utilizzabile per cogenerazione o in cicli termodinamici per la produzione di ulteriore energia elettrica;
- emissioni zero, se la cella è alimentata direttamente da H_2; emissioni di sola CO_2, sequestrabile, se alimentata "indirettamente" mediante reforming di idrocarburi;
- produzione nulla di NO_x per assenza di combustione nella cella;
- funzionamento statico e non soggetto a rumore e vibrazioni.


Fuel cell / Chiba

D'altra parte tali impianti sono ad oggi sostanzialmente **apparati sperimentali**; non sono pertanto neppure possibili delle stime di costo che permettano di confrontare le prestazioni economiche del sistema con quelle di tecnologie consolidate.
Presso l'impianto Themoselect giapponese di Chiba (attivo dal 1999) si sta conducendo, in collaborazione con Toshiba, una sperimentazione su una cella a combustibile da 200 kW.

6.3.4 Recupero energetico: confronto tra incenerimento e tecnologie innovative

L'utilizzo del syngas in un ciclo a vapore (conversione di tipo termico) consente di ottenere efficienze nette di generazione elettrica variabili tra il 10% e il 20%. La produzione di calore, in aggiunta alla generazione dell'elettricità, migliora significativamente il rendimento energetico generale del sistema. Utilizzando il syngas, previa depurazione, come combustibile in un motore a gas dedicato o in una turbina a gas si assiste ad un significativo incremento dei rendimenti energetici (fino a raggiungere valori del 30%); tuttavia **tali soluzioni non trovano al momento applicazione su scala commerciale nell'ambito del trattamento termico del rifiuto indifferenziato**. Nella Tabella che segue si riportano i rendimenti netti di generazione elettrica potenzialmente ottenibili con i vari sistemi di recupero energetico per le tecnologie innovative e gli inceneritori di nuova generazione [12].

Tab. 6.2- Potenziali efficienze nette di generazione elettrica- Confronto tra tecnologie alternative e incenerimento [12]

Sistema	Efficienza netta di generazione elettrica(1)	
	Pirolisi/gassificazione	inceneritore
Caldaia + turbina a vapore	10% - 20%	14% - 27%
Motori a combustione interna	13% - 28%	-
Ciclo combinato turbina a gas (CCGT)	30%	-
Utilizzo del syngas in centrali elettriche esistenti	>27%	-

(1) L'efficienza netta del processo è data dall'efficienza lorda (rapporto tra energia prodotta dal rifiuto come elettricità o calore e il contenuto di energia dello stesso, dipendente dal suo PCI), depurata dell'autoconsumo, che per incenerimento e le tecnologie innovative sono dell'ordine di 12-20% dell'energia totale prodotta.

La tabella che segue [13] riporta le efficienze di conversione dei rifiuti in energia elettrica, come segnalate in letteratura. Mentre i dati relativi all'incenerimento sono oramai consolidati e sostanzialmente allineati tra di loro, in ragione del gran numero di impianti funzionanti da molti anni, non altrettanto si può dire delle tecnologie innovative, per le quali i valori di efficienza presentano una grande variabilità dovuta ai diversi fattori che influenzano la base di calcolo: differenze nel PCI del materiale trattato, efficienza netta (ossia depurata del termine di autoconsumo) o lorda, taglia della turbina a vapore o a gas, etc.
Le efficienze di conversione delle tecnologie pirolisi/gassificazione non si discostano da quelle dei tradizionali impianti di incenerimento; risultano leggermente più elevate per il processo Thermoselect (26-28%), quando il syngas prodotto viene inviato a motori endotermici per la produzione di energia elettrica.
Alcuni autori, pur segnalando il vantaggio delle tecnologie innovative nell'utilizzo del syngas in motori o turbine a gas, evidenziano la necessità un preventivo raffreddamento e una depurazione del syngas, con perdita di energia che può essere dell'ordine del 20% del contenuto di energia totale del rifiuto; questo spiega perché l'efficienza elettrica di un ciclo a vapore per le tecnologie innovative è in genere più bassa rispetto all'incenerimento [12].

Tab. 6.3 - Efficienze di generazione elettrica degli impianti di trattamento termico dei rifiuti [13]

Reference	Feedstock	Waste CV (MJ/kg)	Incineration (steam turbine)		ATT Technology and Conversion Process					
					Steam cycle		Gas Engine		CCGT[a]	
			Efficiency %	kWh$_e$/te	Efficiency %	kWh$_e$/te[g]	Efficiency %	kWh$_e$/te	Efficiency %	kWh$_e$/te
CTech[12]	Residual MSW	ns[f]	25	ns		ns		ns		ns
CIWM[13]	Residual/unsorted MSW	ns	22-25	550 net		ns		ns		ns
C-Tech	Unsorted MSW	ns	20-25	ns		ns		ns	40	ns
Mitsui Babcock[14]	Residual MSW	9	22-24	550-600[d]		ns		ns		ns
	Residual MSW	9	20-22	500-550[b]		ns		ns		ns
	Residual MSW (Compact Power)	9		ns	22	550		ns		ns
	Residual MSW (Pyropleq)	9		ns	18-20	450-500		ns		ns
	Residual MSW (Mitsui R21)	9		ns	12-16	300-450		ns		ns
	Residual MSW (Thermoselect)	9		ns		ns	26-28	650-700		ns
Enviros/DEFRA[15]		ns	19-24	ns	10-20	ns	13-28	ns	30	ns
Fichtner[16]	Residual MSW	ns	19-27[b]	ns		ns		ns		ns
		ns		ns	14-20[c]	ns		ns		ns
		ns		ns	9-20[b]	ns		ns		ns
		ns		ns		ns	13-24[b/c]	ns		ns
		ns		ns		ns		ns	34[c]	ns
		ns		ns		ns		ns	23-26[b]	ns
Eunomia/GLA[17]	Residual MSW	ns	25	ns	17	ns	25	ns		ns

[a] combined cycle gas turbine (CCGT); [b] realistic efficiency; [c] claimed efficiency value; [d] plant capacity >300kte/yr; [e] plant capacity 100-300kte/yr; [f] not stated; [g] kWh of electricity per tonne of waste

[12] Thermal Methods of Municipal Waste Treatment, C-Tech Innovation, 2003, Biffaward
[13] Energy from Waste: A good practice guide, CIWM, Nov 2003. NOTE: power value is assumed to be net.
[14] Technology and Economic Assessment of Energy Conversion Technologies for MSW, W Livingston, Mitsui Babcock, Report B/WM/0553/REP, DTI PUB URN no. 02/1347(2002). NOTE: the power value is assumed to be net and with a low parasitic load.
[15] Advanced Thermal Treatment of Municipal Solid Waste, DEFRA, New Technologies Supporter Programme, 2007
[16] The Viability of Advanced Thermal Treatment of MSW in the UK, Fichtner Consulting Engineers Ltd., for ESTET, 2004
[17] Enviro-Centre and Eunomia report for the GLA, "The greenhouse gas balance of waste management scenarios", published Jan 2008

6.3.5 Efficienza energetica degli impianti presi in esame

Si riporta di seguito una tabella con i dati di recupero energetico (energia elettrica prodotta, ceduta alla rete elettrica, energia termica prodotta e ceduta, rendimento elettrico netto e rendimento totale netto dell'impianto) relativi ad alcuni impianti a tecnologia innovativa considerati nel presente studio.
L'energia prodotta dagli impianti a tecnologia innovativa è in generale confrontabile con quella degli inceneritori tradizionali: dati del 2001 relativi ad inceneritori europei mostrano efficienze di produzione al lordo dell'autoconsumo comprese tra 415 –644 kWh/tonnellata di rifiuto trattato; gli autoconsumi sono dell'ordine di 60-190 kWh/t, in funzione del PCI del rifiuto in ingresso; l'elettricità ceduta alla rete ammonta a 279 –458 kWh/tonnellata [5].
Ottimizzando il sistema è possibile raggiungere produzioni lorde di energia elettrica di 600 – 900 kWh/tonnellata, considerando un rifiuto non trattato con PCI di 10,4 MJ/kg; il pretrattamento del rifiuto può portare ad incrementi dell'efficienza energetica, cui corrispondono tuttavia maggiori autoconsumi.
Gli impianti di gassificazione/pirolisi consentono una produzione lorda di energia elettrica confrontabile con quella di un inceneritore tradizionale: la soluzione più praticata è infatti la combustione diretta del syngas e la produzione di energia elettrica tramite un ciclo termico a vapore, come avviene in un tradizionale impianto di combustione diretta dei rifiuti. La pulizia spinta del syngas finalizzata all'utilizzo dello stesso in sistemi ad elevata efficienza, quali ad esempio i motori a combustione interna, potrebbe permettere di raggiungere rendimenti lordi di produzione di energia elettrica più elevati (si veda Thermoselect).
Va tuttavia evidenziato che gli impianti a tecnologia alternativa presentano in generale autoconsumi più elevati rispetto ad un inceneritore per il fatto che necessitano di un sistema di pretrattamento più o meno complesso del rifiuto in ingresso; l'autoconsumo cresce sensibilmente per gli impianti ad alta temperatura con fusione delle scorie e/o utilizzo di ossigeno puro come agente gassificante raggiungendo il 30–40% della produzione (AlterNRG, Ebara, Nippon Steel); lo stesso processo di depurazione del syngas (rimozione di particolato, mercurio, tars, specie acide) contribuisce in maniera significativa all'incremento dell'autoconsumo energetico dell'impianto (Thermoselect).
Si può pertanto affermare che l'efficienza elettrica netta per gli impianti di gassificazione/pirolisi (in genere inferiore al 20%, come risulta evidente dalla Tabella che segue) è più bassa di quella di un moderno inceneritore che è stimabile tra il 19% e il 27% [9].

Tab. 6.4 – Dati di recupero energetico relativi ad alcune tecnologie considerate nello Studio.

Costruttore		Impianto/ (rifiuto trattato nell'anno di riferimento)	E. elettrica prodotta [MWh/t]	E. elettrica ceduta [MWh/t]	E. termica prodotta [MWh/t]	E. termica ceduta [MWh/t]	? el netto(1) [%]
AlterNRG (Canada)	PL	Utashinai, Giappone	0,934	0,508			18,6%
Ebara (Giappone)	G	Progetto New York [30]	0,547	0,383			13% -15%
Energos (Norvegia)	G	Dati di progetto impianto 30.000 t/anno con pci = 12 MJ/kg	0,750	0,625			18,5%
Enerwaste (USA)	G	Dati di progetto	0,55				
Entech (Australia)	G	Dati di progetto	0,573				17%
Nippon Steel (Giappone)	G	Shin Moji, Giappone (194.000 t/y- PCI:11 MJ/kg)	0,784	0,536			15,7%
TechTrade(2) (Germania)	P	Burgau, Germania (26.807 t/y - PCI: 8,5 MJ/kg)	0,214	0,059		0,056	2,9%
		Ipotesi di progetto: 50.000 t/y- PCI : 14,6 MJ/kg)	Ciclo a vapore: rendimento al lordo dell'autoconsumo=24,6% Ciclo combinato turbogas/turbo vapore (occorre verificare fattibilità con prove sperimentali): rendimento al lordo dell'autoconsumo= 33,6% Motore a combustione interna (occorre verificare fattibilità con prove sperimentali): rendimento al lordo dell'autoconsumo= 38,3%				
Thermoselect (Svizzera)	P+G	Valore teorico con rifiuti aventi PCI di 12 MJ/kg	1,03	0,705	1,39		19%
Tpf Basse Sambre (3) (Belgio)	P+G	Keflavik, Islanda (12.000 t/y – PCI: 12,5 MJ/kg)	0,200	0,140	-	-	4%
		Ipotesi di progetto: 30.000 t/y - PCI : 12,5 MJ/kg)	0,700	0,620	-	-	18%

(1) rapporto tra energia elettrica prodotta detratti gli autoconsumi e carico termico del rifiuto in ingresso
(2) il basso rendimento energetico dell'impianto di Burgau è motivato dal fatto che l'obiettivo primario dell'impianto era quello di garantire lo smaltimento continuo di tutti i rifiuti; per questo si è deciso di realizzare un ciclo termodinamico a resa più bassa (vapore con caratteristiche povere di temperatura e pressione) ancorché più sicuro e affidabile. Per un impianto da 50.000 t/anno con PCI 14,6 MJ/kg la Società stima un rendimento elettrico lordo del 24.6% attraverso un ciclo a vapore.
(3) L'impianto di Keflavik era stato progettato per produrre acqua calda e successivamente è stato modificato per consentire la produzione di elettricità; tuttavia il ciclo termico di partenza non è stato adattato a questa nuova esigenza, per cui le sue caratteristiche non consentono di ottenere degli alti rendimenti. Una progettazione ad hoc, per un impianto da 30.000 t /anno con PCI= 12,5 MJ/kg, permetterebbe di produrre 0,7 MW/h/t e di esportare 0,62 MWh/t con un autoconsumo di 0,08 MWh/t

6.4 ASPETTI AMBIENTALI

Un impianto di trattamento termico dà origine a emissioni di tipo:

- gassoso: la composizione dei fumi dipende dalla composizione del rifiuto trattato, dal tipo di processo (combustione convenzionale, pirolisi, gassificazione), dalla linea di trattamento dei fumi stessi;
- liquido: sono presenti quando il sistema di trattamento dei fumi è ad umido, seppure esistano altre fonti di minore importanza, sia in termini quantitativi che di livello di inquinamento (percolati della fossa rifiuti, raffreddamento delle scorie); si trascurerà nel seguito tale flusso, dal momento che i sistemi di abbattimento degli inquinanti dai fumi maggiormente utilizzati sono quelli a secco e le tecnologie di trattamento acque sono estremamente consolidate;
- solido: sono rappresentate da:
  - ceneri o scorie provenienti dalla camera di combustione o dal reattore di pirolisi/gassificazione: sono una miscela di metalli, materiali ceramici, vetro e minerali; a seconda del processo che le ha generate possono avere un contenuto di sostanza

carboniosa residua significativo o assolutamente trascurabile, come nel caso di processi che prevedono la fusione/vetrificazione dei residui solidi;

- ceneri di caldaia: raccolte sul fondo della sezione di recupero energetico;
- ceneri volanti: derivano dal trattamento dei fumi.

6.4.1 Emissioni in atmosfera

Le emissioni atmosferiche sono, di norma, quelle che presentano le implicazioni ambientali più significative del processo.
Le sostanze inquinanti presenti nei fumi da incenerimento di rifiuti urbani sono le medesime rintracciabili nei fumi che originano dalla combustione del syngas, sia pur in tenori differenti nelle varie applicazioni tecnologiche, in ragione del particolare processo termochimico che porta alla produzione del syngas (pirolisi, gassificazione, torcia al plasma), dei parametri del processo (temperatura, eccesso d'aria, tempi di permanenza), delle caratteristiche costruttive dei forni, nonché della qualità del rifiuto trattato.
Prima del loro rilascio in atmosfera i fumi sono sottoposti ad un trattamento che ha l'obiettivo di ridurre in modo drastico le concentrazioni delle sostanze inquinanti.
La sezione di trattamento fumi che viene messa in coda ad un impianto a tecnologia innovativa è analoga a quella adottata in un moderno impianto di incenerimento; essa risulta molto articolata e complessa, in conseguenza dei limiti sempre più rigorosi imposti dalla normativa e di un concreto progresso tecnologico, che ha condotto negli ultimi anni allo sviluppo di sistemi sofisticati, in grado di consentire il raggiungimento di valori di emissione al limite della misurabilità.

I contaminanti presenti nei fumi sono raggruppabili in:

- macroinquinanti: sostanze presenti nei fumi in concentrazioni dell'ordine dei mg/Nm3, quali le polveri, gli ossidi di zolfo (principalmente anidride solforosa, SO_2) e di azoto (NO_X), il monossido di carbonio (CO) e gli acidi alogenidrici (essenzialmente HCl e HF).
- microinquinanti: sostanze, presenti nelle emissioni in concentrazioni di molto inferiori, che includono sia specie inorganiche, come i metalli pesanti (Cd, Cr, Hg, Pb, Ni, ecc.), che organiche come PCDD, PCDF, IPA e composti organici volatili (VOC). I valori limite per le emissioni dei composti microinquinanti si collocano nell'ordine dei µg/Nm^3, o addirittura dei ng/Nm^3 per alcuni composti (tipicamente le diossine) di particolare pericolosità per la salute dell'uomo.

I dispositivi di abbattimento del *particolato* (ceneri volanti) più impiegati sono i filtri a maniche e i filtri elettrostatici (o elettrofiltri). I filtri a maniche sono costituiti da un tessuto tubolare sostenuto da un cestello di acciaio; il flusso di fumi è inviato sotto pressione nelle maniche le quali bloccano le polveri. I filtri elettrostatici presentano notevoli e oggettivi vantaggi, quali altissimi rendimenti di captazione delle polveri (fino al 99.5%), possibilità di operare ad elevata temperatura (fino a 300°C), notevole elasticità di esercizio e affidabilità. Il loro funzionamento si basa sulla capacità di caricare elettricamente il particolato presente all'interno dei fumi e catturarlo tramite una serie di elettrodi, che hanno carica opposta.
L'abbattimento dei *gas a comportamento acido*, in particolare cloruro di idrogeno (HCl), anidride solforosa (SO_2), e fluoruro di idrogeno (HF) può essere ottenuto con modalità diverse (metodo ad umido, a secco o a semisecco). Il metodo più diffuso fino a poco tempo fa era quello ad umido, ma, successivamente, ha preso il sopravvento il metodo a secco, che comporta il vantaggio di una maggiore facilità di gestione e minori costi di investimento. Il metodo a secco prevede di porre i fumi a contatto con sostanze alcaline allo stato solido (bicarbonato di sodio), in modo che i gas acidi siano neutralizzati per reazione superficiale, dando luogo alla formazione di sali. La reazione di neutralizzazione è seguita da una filtrazione mediante filtro a maniche, nel quale vengono separati i prodotti di reazione (PSR) che possono essere inertizzati e conferiti a discarica oppure recuperati e utilizzati come materia prima nell'industria chimica.

Le emissioni di *ossidi di azoto* vengono controllate mediante due diversi sistemi: il primo comprende accorgimenti che ne riducono la formazione durante il processo, in modo che la sua concentrazione risulti inferiore al limite di legge; il secondo prevede la rimozione degli NOx mediante una reazione chimica con ammoniaca gassosa (NH_3), che lo trasforma in azoto elementare. La rimozione può essere effettuata con due modalità diverse: a bassa temperatura (300-400°C) in presenza di catalizzatori (SCR, selective catalytic reduction) oppure ad elevata temperatura (950-1000 °C) in assenza di catalizzatori (SNCR, selective non catalytic reduction). Il sistema più utilizzato è il sistema catalitico SCR, che consente efficienze di rimozione del 70-95%.
A proposito dei *microinquinanti* (metalli pesanti e diossine) va detto che, per quanto riguarda i metalli pesanti, la maggior parte di essi condensa, concentrandosi nelle polveri fini, per cui il loro abbattimento dipende principalmente dall'efficienza del sistema di rimozione del particolato. Tuttavia viene comunemente praticata l'iniezione di carbone attivo, che risulta efficace sia per l'abbattimento dei metalli pesanti, che delle diossine.

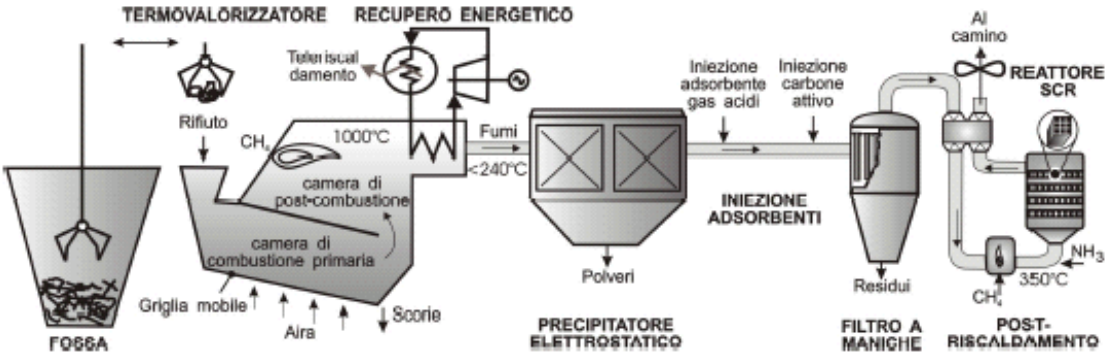


Fig. 6.4 – Schema della sezione di trattamento dei fumi

La tabella che segue, tratta dal documento del 2006 "Integrated Pollution Prevention and Control - Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration" (BREF incenerimento), riporta dati di concentrazione di inquinanti nei fumi raccolti da un sondaggio effettuato a livello europeo. Essi risultano abbastanza rappresentativi dei livelli attuali di emissione degli impianti che trattano rifiuti urbani. A riguardo, tuttavia, occorre tenere presente che la definizione di RU non risulta uniforme a livello internazionale e, in molti casi, include anche rifiuti speciali di origine commerciale e/o industriale (es.: imballaggi, scarti di lavorazione), nonché frazioni combustibili derivate da rifiuti urbani, tramite pretrattamento.

Tab. 6.5 - Valori tipici di emissioni da impianti di incenerimento RU [5]

Parameter	Type of Measurement	Daily averages (where continuous measurement used) in mg/m³		Half hour averages (where continuous measurement used) in mg/m³		Annual averages mg/m³)
	C: continuous N: non-cont.	Limits in 2000/76/ EC	Range of values	Limits in 2000/76/ EC	Range of values	Range of values
Dust	C	10	0.1 – 10	20	<0.05 – 15	0.1 – 4
HCl	C	10	0.1 – 10	60	<0.1 – 80	0.1 – 6
HF	C/N	1	0.1 – 1	4	<0.02 – 1	0.01 – 0.1
SO_2	C	50	0.5 – 50	200	0.1 – 250	0.2 – 20
NO_X	C	200	30 – 200	400	20 – 450	20 – 180
NH_3	C	n/a	<0.1 - 3		0.55 – 3.55	
N_2O		n/a				
VOC (as TOC)	C	10	0.1 – 10	20	0.1 – 25	0.1 – 5
CO	C	50	1 – 100	100	1 – 150	2 – 45
Hg	C/N	0.05	0.0005 – 0.05	n/a	0.0014 – 0.036	0.0002 – 0.05
Cd	N	n/a	0.0003 – 0.003	n/a		
As	N	n/a	<0.0001 – 0.001	n/a		
Pb	N	n/a	<0.002 – 0.044	n/a		
Cr	N	n/a	0.0004 – 0.002	n/a		
Co	N	n/a	<0.002	n/a		
Ni	N	n/a	0.0003 – 0.002	n/a		
Cd and Tl	N	0.05		n/a		0.0002 – 0.03
Σ other metals 1	N	0.5		n/a		0.0002 – 0.05
Σ other metals 2	N	n/a	0.01 – 0.1	n/a		
Benz(a)pyrene	N	n/a		n/a		<0.001
Σ PCB	N	n/a		n/a		<0.005
Σ PAH	N	n/a		n/a		<0.01
PCDD/F (ng TEQ/m³)	N	0.1 (ng TEQ/m³)		n/a		0.0002 – 0.08 (ng TEQ/m³)

[1]. In some cases there are no emission limit values in force for NO_X. For such installations a typical range of values is
250 - 550 mg/Nm³ (discontinuous measurement).
2. Other metals 1 = Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V
3. Other metals 2 = Sb, Pb, Cr, Cu, Mn, V, Co, Ni, Se and Te
4. Where non-continuous measurements are indicated (N) the averaging period does not apply. Sampling periods are generally in the order of 4 – 8 hours for such measurements.
5. Data is standardised at 11 % Oxygen, dry gas, 273K and 101.3kPa.

La Tab. 6.6 riporta i principali parametri emissivi di alcune tecnologie considerate nello Studio.

In relazione al volume dei fumi (strettamente correlato al PCI del rifiuto, quindi al contenuto di carbonio iniziale) va detto che i processi di "gassificazione" (intesa in senso lato ovvero come trattamento termico innovativo di materiali di scarto, finalizzato alla produzione di un gas derivato, syngas, da utilizzare per scopi energetici) producono volumi di gas certamente più contenuti rispetto ad un inceneritore convenzionale (fumi di combustione) per le caratteristiche intrinseche del processo. Infatti, mentre per far avvenire la combustione in un inceneritore, si necessita di eccessi d'aria consistenti, i processi termochimici operano in totale assenza di aria o in presenza di quantitativi contenuti di agente ossidante. Tuttavia, in ragione del fatto che il principale destino del syngas rimane la combustione in caldaia con produzione di vapore, è necessaria l'aggiunta di aria a valle della produzione del syngas, per cui, di fatto, il trattamento viene a configurarsi come un incenerimento in due stadi. Quindi, nel complesso, il quantitativo di fumi da trattare a valle del recupero energetico è confrontabile (come risulta evidente dalla tabella sopra) con quello di un impianto di combustione tradizionale, in termini di volume prodotto per tonnellata di rifiuto trattato (6.000-7.000 Nm^3/t).
Per quel che riguarda le concentrazioni nell'effluente gassoso, dall'indagine emerge per gli impianti a tecnologia innovativa un tenore emissivo ben al di sotto dei limiti normativi, ma sostanzialmente in linea con i moderni inceneritori, che adottino le migliori tecniche disponibili, come definite nei documenti di riferimento. L'adozione di efficaci sistemi di depurazione dei fumi negli impianti di incenerimento consente di raggiungere valori di emissione notevolmente inferiori ai limiti di legge per tutti i contaminanti, comprese le diossine, per le quali si registrano concentrazioni inferiori di uno-due ordini di grandezza rispetto al limite normativo di 0,1ngTEQ/Nm^3.

Tab. 6.6 – Dati emissivi relativi ad alcune tecnologie considerate nello Studio.

Costruttore		**Portata fumi Nm3/t**	**mg/Nm³**								**PCDD/PCDF µg/Nm³**
			polveri	**HCl**	**HF**	**SO_2**	**NO_2**	**CO**	**Hg**	**Cd +Tl**	
AlterNRG (Canada)	PL	1.400-2.400	<3	22-39		<1-2	62-82	<27-29			0,00059-0,00067
Compact Power	P+G		1,4	0,96	0,12	0,74	21	3,9		0,006	<0,003
Ebara (Giappone)	G	2.952	<1	2		<2,8	29,3		<0,005		0,000051
Energos (Norvegia)	G	7.894 Nm3/t per un rifiuto con pci=10.8MJ/kg	0,24	3,6	0,020	19,8	42 (senza deNOx)	2	0,00327	0,00002	0,001
Enerwaste (USA)	G			0-6,5		16,6-25,4	58,7-199,2 (senza deNOx)	30,9-40,5			
Mitsui/ Takuma (Giappone)	P+C		<1	9		8	150	5	0,01	<0,001	0,016
Nippon Steel (Giappone)	G	5.760 (PCI: 8,4 MJ/kg)	6	3		0,5	16	5,2			0,023
TechTrade (Germania)	P	6.495 (PCI: 8,5 MJ/kg)	0,316-1,8	5,5-6,38		5,42	179,5	5,65	0,0066-0,0117	0,0006	0,0013
Thermoselect (Svizzera)	P+G		0,2	<5			14				0,0072
Tpf Basse Sambre (Belgio)	P+G	5.600 (PCI: 12,5 MJ/kg)	2,8	9,3	0,12	11,1	327 (oggi 200 senza DeNOx)	7,4	0,00013	0,0011	0,06
D lgs 133/2005			10	10	1	50	200	50	0,05	0.05	0,1
BAT [5]			1-5	1-8	<1	1-40	40-100	5-30	<0,05	0.005-0.5	0,01-0,1
Valori riferiti a effluente gassoso secco a O°C, 1 atm e tenore di ossigeno dell'11%											

6.4.2 Residui solidi

Dal processo di trattamento termico dei rifiuti hanno origine due tipologie di residui solidi:

- le scorie, o residuo solido di fondo (bottom ashes), di cui le caratteristiche e i quantitativi sono strettamente correlate al processo di trattamento e alla tipologia del rifiuto in ingresso. Gli impianti di incenerimento dei RU presenti in Europa producono tipicamente 200-350 kg di ceneri pesanti per tonnellata di rifiuti trattato, inclusivi anche del materiale fine sottogriglia, che, solo di recente, in alcuni Paesi, si è iniziato a mantenere separato dalle scorie.
- le ceneri volanti rimosse attraverso il sistema di trattamento dei fumi, di norma smaltite in discariche per rifiuti pericolosi.

Vi sono poi i sali da trattamento chimico-fisico dei fumi (PSR), caratterizzati da un elevato contenuto in metalli pesanti e i sali insolubili, anch'essi smaltiti in discarica per rifiuti pericolosi, i sali derivanti da evaporazione in linea o separata delle acque di lavaggio, riutilizzabili o smaltiti in discarica.

La possibilità di riutilizzo o di riciclaggio dei residui solidi è determinata fondamentalmente dalle loro caratteristiche in termini di contenuto di sostanze organiche e di lisciviabilità di metalli e sali.
Per ottenere residui solidi con caratteristiche migliori sono innanzitutto applicate tecniche di controllo diretto sul processo, al fine di agevolare un completo burn-out delle sostanze organiche ed ottenere quindi un bassissimo contenuto di incombusti nelle scorie e nelle ceneri. Il livello di incombusti è comunque funzione delle caratteristiche dei rifiuti e risulta minore per i rifiuti pre-trattati o omogenei.
Nei moderni impianti di incenerimento di RU il tenore di carbonio organico totale (TOC) nelle scorie è, in genere, dell'ordine dell'1% (inferiore al valore prescritto dalla Direttiva 2000/76/CE sull'incenerimento dei rifiuti che fissa un valore massimo pari al 3%).
Per quanto riguarda i residui solidi prodotti dagli impianti a tecnologia innovativa il discorso va affrontato in termini di natura e quantitativi dei residui: la composizione delle ceneri pesanti dipende oltre che dalla composizione dei RU trattati anche dal tipo di apparecchiatura e dalle condizioni di processo.
È necessario in tal senso fare una distinzione tra i processi di gassificazione (e tra questi includiamo anche la gassificazione con torcia al plasma) ed i processi di pirolisi.
I processi di gassificazione a medie temperature (700-800°C) danno origine a delle scorie (bottom ash) sostanzialmente simili, come aspetto e composizione, a quelle di un inceneritore; i quantitativi sono in genere inferiori rispetto a quelle di un inceneritore convenzionale e orientativamente quantificabili nel 13-20% del rifiuto alimentato all'impianto. Il destino delle scorie è in genere la collocazione in discarica.
I sistemi di gassificazione a fusione diretta delle scorie hanno invece la peculiarità di generare delle scorie vetrificate, con evidenti miglioramenti delle loro caratteristiche e una maggiore facilità di riutilizzo; le scorie sono costituite da metalli (circa 10 kg per tonnellata di materiale in ingresso) e da una loppa granulare (90-100 kg/t), costituita da ossidi di metalli che in Giappone viene comunemente utilizzata come materiale per l'edilizia, mentre in Italia è da verificare a livello normativo il suo possibile riutilizzo o il suo abbancamento in discariche per inerti. Analogamente ai gassificatori, la torcia al plasma produce delle scorie non lisciviabili di consistenza lavica, potenzialmente riutilizzabili.
Il processo di pirolisi produce invece come residuo solido un carbone tipo coke (pyrocoke) di colore nero, inodore e di discreto PCI (circa 9 MJ/kg), avendo ancora un discreto contenuto di carbonio (30%). Quantitativamente il carbone in uscita ammonta al 30-40% del rifiuto in ingresso (a volte anche il 50%, a seconda dei processi e della qualità del rifiuto in ingresso) e rappresenta un prodotto per il quale occorre trovare una giusta collocazione; le opzioni possono essere:

- l'inertizzazione attraverso un successivo step di combustione/gassificazione, con ulteriore complicazione impiantistica;
- l'utilizzo come combustibile in alternativa al carbone (ad esempio nelle cementerie, nelle fornaci per mattoni, negli altoforni), ma occorrerebbe verificare le condizioni di mercato per tale prodotto.

Si riportano di seguito i dati relativi ai residui solidi per alcuni dei processi considerati.
Si fa notare che i sistemi di trattamento termico che prevedono la vetrificazione delle scorie producono un residuo solido che è sostanzialmente un materiale inerte (Tab. 6.8) e come tale smaltibile in discariche per rifiuti inerti ai sensi del DM 3/8/2005 - Definizione dei criteri di ammissibilità dei rifiuti in discarica (Art. 5 - Tabella 2: Limiti di concentrazione nell'eluato per l'accettabilità in discariche per rifiuti inerti).

Tab. 6.7 – Quantitativi dei residui solidi prodotti da alcune tecnologie considerate nello Studio.

Costruttore		Residuo solido di fondo			Produzione ceneri volanti [% sul rifiuto in ingresso]
		Tipologia	Quantitativo [% su rifiuto in ingresso]	TOC %	
AlterNRG(Canada)	PL	Scorie vetrificate	5 – 6%	-	
Ebara (Giappone)	G	Scorie vetrificate (riciclabili)+ inerti (a discarica)	6,7 (riciclabili) + 6,1 (a discarica)	-	2.3%
Energos (Norvegia)	G	Scorie	7-20%	1%	4.3%
Mitsui/ Takuma (Giappone)	P+C	Scorie vetrificate (?)	7	-	4%
Nippon Steel (Giappone)	G	Scorie vetrificate	9-10%	-	3-4,2%
Plasco Energy (Canada)	G+PL	Scorie vetrificate	9-15%		
TechTrade (Germania))	P	Pyrocoke	53%	26%	1,6%
Thermoselect (Svizzera)	P+G	Scorie vetrificate	7-13%	-	3,6%
Thide Environnement (Francia)	P	Pyrocoke	24% (dato da progetto)	50%	
Tpf Basse Sambre (Belgio)	P+G	Scorie essiccate	13%	<3%	Max 5,9%

Tab. 6.8 – Composizione delle scorie prodotte da alcune tecnologie considerate nello Studio.

Costruttore		Caratteristiche qualitative residuo solido di fondo: composizione							
		SiO_2	CaO	Al_2O_3	MgO	Na_2O	FeO	Carbonio	Altro
Nippon Steel (Giappone)	G	37-42%	33-45%	12-18%	1,2-1,8%	3,5-6,3%	0,1-0,8%	-	-
TechTrade (Germania)	P	39%	7%	11%	-	-	5%	26%	Solfati e carbonati:10%
Thermoselect (Svizzera)	P+G	45%	14%	12%	2,4%	5,7%	17%	-	
Tpf Basse Sambre (Belgio)	P+G								Ceneri: 95,3% sul secco S: 0,08% sul secco N: 0,035% sul secco Cl: 2650 mg/kg Pb: 1940 mg/kg Mg: 1% sul secco Cu: 4200 mg/kg Zn: 2500 mg/kg Al: 4,2% sul secco

Tab. 6.9 – Test di lisciviazione delle scorie prodotte da alcune tecnologie considerate nello Studio e confronto con i limiti di accettabilità in discariche per rifiuti inerti.

Componente [mg/l] con L/S=10 1/kg (DM 3/8/2005)		**AlterNRG (Canada)**	**Ebara TIFG (Giappone)**	**Nippon Steel (Giappone)**	**Plasco Energy (Canada)**
		Plasma	Gassificazione	Gassificazione	Gassificazione+plasma
As	0.05	0,0023	-	< 0,005	0,05
Cd	0.004	<0,0005	< 0,001	< 0,001	0,01
Cr totale	0.05	0,0289 (Cr6+)	< 0,005	< 0,01	0,08-4,69
Hg	0.001	<0,00001	<0,0005	< 0,0005	0,005
Pb	0.05	0,001	0,013	< 0,005	0,05-0,39
Se	0.01	<0,01		< 0,002	0,05

6.5 ASPETTI ECONOMICI

Acquisire informazioni sugli aspetti economici relativi alle diverse tecnologie innovative di trattamento termico dei rifiuti risulta abbastanza complesso.
È possibile disporre di informazioni attendibili e precise sui costi di investimento e di esercizio, solo quando un impianto è già stato costruito ed è pienamente operativo, ma i fornitori della tecnologia e i gestori degli impianti per ragioni commerciali sono poco disponibili a divulgare i dati economici. Quand'anche si riescano ad ottenere informazioni esse restano caratterizzate da un certo livello di incertezza, dovuta al fatto che i dati disponibili spesso non riportano in modo chiaro le componenti tecniche incluse nei costi e possono presentare un'aggregazione delle varie voci che può portare ad interpretazioni non corrette. Esempi tipici di voci di costo non sempre considerate sono i costi di acquisizione del terreno, le spese di progettazione, le indagini geognostiche preliminari, gli oneri fiscali.
Inoltre i dati sono spesso riferiti a taglie di impianto notevolmente differenti e, com'è noto, il fattore scala riveste una notevole importanza per gli impianti di processi caratterizzati da una certa complessità.

6.5.1 Costi di investimento

L'incremento dei costi di investimento negli impianti di trattamento termico può non aumentare linearmente con la capacità dell'impianto e varia in modo differente, a seconda che l'aumento della capacità di trattamento comporti l'aggiunta di ulteriori moduli o semplicemente un incremento di potenzialità di un particolare dispositivo.
In generale, un impianto di trattamento da 100.000 t/y basato su quattro unità modulari da 25.000 t/y, costerà di più rispetto ad un impianto basato su una singola unità di processo da 100.000 t/y.
Un metodo comunemente usato nella valutazione dei costi di investimento per lo scale-up di impianti di processo chimici e meccanici è il seguente [13]:

$C \sim t^n$
Dove:
C - è il costo di investimento
t - è la potenzialità di trattamento,
n - è una costante solitamente compresa tra 0,6-0,7.

Quindi un raddoppio della capacità dell'impianto aumenterà i costi di investimento di circa il 50%. Questa tendenza emerge in modo chiaro per gli impianti di incenerimento convenzionali [13].
Vi è una serie di ragioni che fa si che i costi di investimento possano non aumentare linearmente, con l'aumento della capacità dell'impianto:

- i costi di viabilità di servizio, sistemi di pesa dei rifiuti, progettazione e indagini preliminari rimangono simili indipendentemente dalla potenzialità di trattamento dell'impianto;
- la potenzialità di componenti quali fossa rifiuti, caldaie e serbatoi è determinata dal volume, ma il costo dipende dalla quantità di materiale impiegato nella loro costruzione, che è funzione della superficie;
- il raddoppio della capacità di trattamento delle apparecchiatura meccaniche non comporta il raddoppio dei costi delle opere civili.

I costi di investimento includono le seguenti componenti tecniche: sezione di ricezione/pretrattamento del rifiuto, dispositivo di trattamento termico (inceneritore/gassificatore/pirolizzatore) e caldaia, sezione di generazione elettricità, depurazione fumi, camino, estrazione cenere di fondo, sistema elettrico, sistema di controllo, servizi ausiliari, acquisizione del sito, opere civili.

L'applicazione di una regola empirica agli impianti di incenerimento fornisce la seguente ripartizione dei costi di investimento tra le principali voci tecniche:

Pretrattamento rifiuto, forno, caldaia	52%
Produzione di energia	16%
Trattamento fumi	17%
Opere civili	15%

Uno studio pubblicato dal Greater London Authority in gennaio 2008 [13] ha condotto un'analisi sui costi di investimento degli impianti di trattamento termico dei rifiuti realizzati a partire dagli anni '90, distinguendo tra inceneritori convenzionali (Fig. 6.5) e impianti a tecnologia innovativa (Fig. 6.6). Nel caso dell'incenerimento la base dati si è rivelata sufficientemente ampia e mostra in modo chiaro l'influenza dell'effetto scala sui costi: i costi di investimento espressi come £/t/y di potenzialità si riducono secondo la linea di tendenza rappresentata, con l'aumentare della potenzialità da 100.000 t/y a 200.000 t/y a 400.000 t/y.
Lo scostamento tra costi riferiti alla stessa taglia impiantistica è da ascrivere al fatto che, in alcuni casi, si tratta di "costi totali di progetto" (cioè comprensivi di spese di progettazione, acquisizione del terreno, costi del capitale e oneri finanziari), mentre, in altri casi, i costi includono soltanto il costo delle apparecchiature e delle opere civili.
La maggiore economicità del sistema si ottiene per impianti con potenzialità superiore a 150.000 t/y.
La Tabella che segue sintetizza i costi di investimento da sostenere e l'energia elettrica netta ottenibile, a fronte delle diverse taglie impiantistiche per inceneritori con ciclo cogenerativo con turbina a vapore.

Tab. 6.10 – Costi di investimento ed energia elettrica netta ottenibile per diverse taglie di inceneritori [13]

Taglia [t/y]	Energia elettrica netta [MWe]	Costo medio di investimento [M€]
100.000 -115.000	6-7	40-50
150.000	9	55-80
170.000-200.000	11-13	65-100

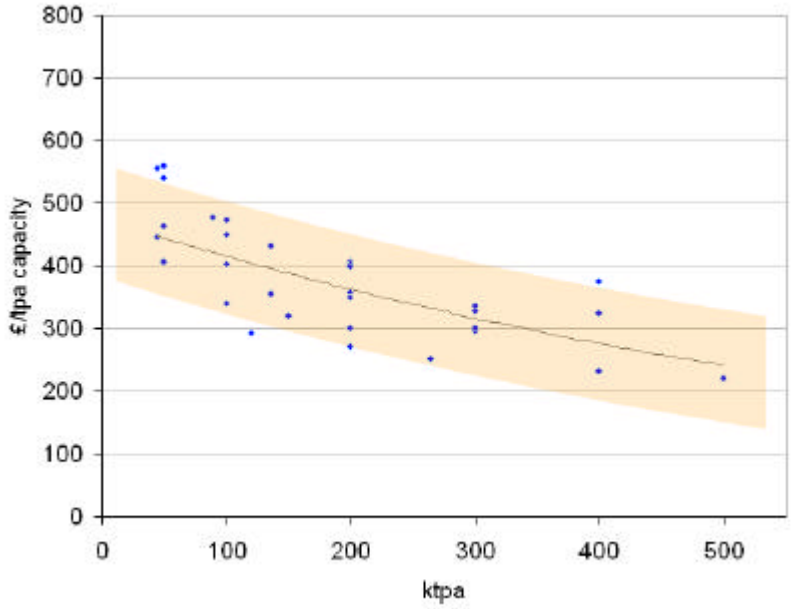


Fig. 6.5 - Costi di investimento di impianti di incenerimento convenzionali [13]

Relativamente agli impianti a tecnologie innovative, lo studio citato [13] non è stato in grado di fornire informazioni altrettanto certe.
I dati di costo estratti dalle varie fonti sono riportati nella figura che segue.
In questo caso la grande variabilità di costo di investimento, a fronte della medesima taglia dell'impianto, è da attribuire al pretrattamento del rifiuto, generalmente richiesto negli impianti di trattamento termico a tecnologia innovativa, almeno per ridurre la pezzatura del rifiuto e, a volte, l'umidità; in alcuni casi il pretrattamento è effettuato presso altri impianti e quindi i costi non sono inclusi tra le spese di investimento.
Al crescere della taglia impiantistica (al di sopra di 100.000- 150.000 t/y) il costo unitario per gli impianti a tecnologia innovativa è soggetto a riduzioni più contenute rispetto agli inceneritori convenzionali.
Ciò è in gran parte dovuto al fatto che, in genere, per realizzare la capacità totale dell'impianto si ricorre all'utilizzo di unità modulari, a differenza degli impianti di incenerimento, dove invece è possibile realizzare un aumento di potenzialità della griglia con costi certamente più ridotti. Nel caso delle tecnologie innovative le unità modulari potrebbero richiedere ciascuna un camino separato con il relativo sistema di controllo delle emissioni in continuo (apparecchiatura che costa circa 110.000 €).
I dati della Tab. 6.11 riportano, per varie taglie di impianti a tecnologia innovativa che realizzano recupero energetico tramite ciclo cogenerativo con turbina a vapore, i costi di investimento medi e i quantitativi previsti di elettricità netta. Un impianto a tecnologia innovativa potrebbe risultare competitivo per potenzialità inferiori a 100.000 t/y, in ragione del fatto che, per taglie così piccole, gli inceneritori non risultano economicamente sostenibili e infatti, raramente, si trovano impianti di bassa potenzialità.

Tab. 6.11 – Costi di investimento ed energia elettrica netta ottenibile per diverse taglie di impianti a tecnologia innovativa [13]

Taglia [t/y]	Energia elettrica netta [MWe]	Costo medio di investimento [M€]
50.000		27-38
100.000-115.000	5	40-65
150.000	7	50-95
170.000-200.000	8-10	65-110

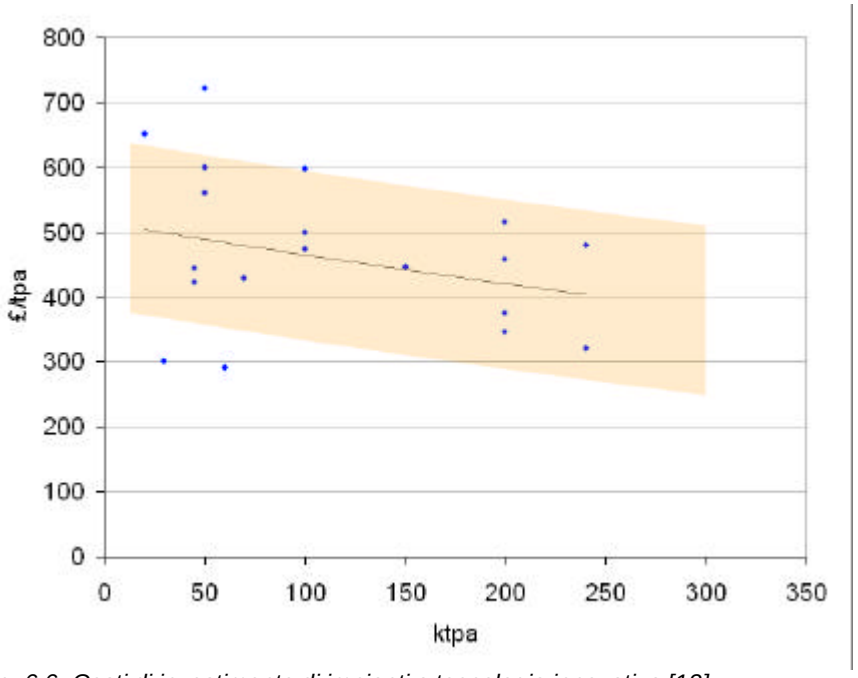


Fig. 6.6- Costi di investimento di impianti a tecnologia innovativa [13]

In esito alla ricerca bibliografica condotta dal Gruppo di lavoro autore del presente studio e sulla base delle informazioni fornite da alcune aziende costruttrici nell'ambito dell'indagine esplorativa, è stato possibile produrre la tabella che segue, che riporta i costi di investimento di vari processi innovativi di trattamento termico.
Va sottolineato che si tratta di costi indicativi e tra loro non direttamente confrontabili, perché riferiti all'anno di realizzazione dell'impianto o ad ipotesi di progetto; inoltre le voci di costo considerate, ove note, sono differenti per i diversi impianti.

Tab. 6.12 – Costi di investimento per le varie tecnologie analizzate

Tecnologia	Impianto	Anno di realizzazione	Potenzialità [t/anno]	Costo investimento [ML €]	Costo investimento [€/t/anno]	Nota
COMPACT POWER	Ipotesi di progetto 2004 [22]		30.000	9,6	320	Il costo di investimento tiene conto di: apparecchiature di processo, opere civili e progettazione
EBARA - gassificazione	Ipotesi di progetto 2005 [35]		4.500	6,8	1.511	Le voci di costo considerate non sono note
	Ipotesi di progetto 2005 [33]		13.000	11-16	833-1212	Le voci di costo considerate non sono note
	Ipotesi di progetto 2005 [30]		105.611	70,6	668	Il costo di investimento tiene conto di: costi di progettazione, apparecchiatura di processo (compreso il pretrattamento), apparecchiature di produzione d'elettricità, sistemi di stoccaggio, sistemi di controllo ambientale, sistemi ausiliari.
			1.080.108	512	474	
ENTECH - gassificazione	Ipotesi di progetto 2005 [32]		33.000	13	394	Le voci di costo considerate non sono note
	Ipotesi di progetto 2004 [22]		45.000	22,1	489	Il costo di investimento tiene conto di: apparecchiature di processo, opere civili e progettazione
	Ipotesi di progetto 2007 [27]		137.790	38	276	Il costo di investimento tiene conto di: apparecchiature di processo, opere civili e progettazione
ENERGOS - gassificazione [Fonte: Energos]	Averoy (Norvegia)	1998	34.000	19	559	I valori dell'investimento includono solo le principali apparecchiature di processo (sono esclusi sistemi ausiliari, opere civili e viabilità, eventuali connessioni elettriche e tubazioni vapore per fornitura calore di processo, spese generali ed utili, oneri di project financing, ecc.)
	Hurum (Norvegia)	2000	36.000	14	389	
	Minden (Germania)	2001	37.000	18	486	
	Sarpsborg (Norvegia)	2001	75.000	27	360	
	Forus (Norvegia)	2002	38.000	18	474	
	Ipotesi di progetto 2004 [22]		75.000	35	467	Il costo di investimento tiene conto delle principali apparecchiature di processo, costi della turbina, movimento terra, ecc.
ENERWASTE - gassificazione	Ipotesi di progetto 2008 [37]		136.757	74	541	Il costo di investimento tiene conto di: apparecchiature di processo, opere civili e progettazione
NIPPON STEEL [45]	Akita (Giappone)	2002	160.600	118	734	Le voci di costo considerate non sono note
PIT PYROFLAM - pirolisi e gassificazione	Ipotesi di progetto 2009 [Fonte: TPF-Basse Sambre]		30.000	26	867	Il costo esclude le opere civili.
THERMOSELECT - pirolisi e gassificazione [27]	Ipotesi di progetto 2007		97.350	51	524	Il costo di investimento tiene conto di: apparecchiature di processo, opere civili e progettazione
	Ipotesi di progetto 2007		194.700	87	447	
	Ipotesi di progetto 2007		292.050	117	401	
THIDE ENVIRONMENT - pirolisi [40]	Progetto Arras-2002		50.000	25	500	Costo complessivo di realizzazione
WESTINGHOUSE - plasma	Utashinai [36]	2002	100.000	45	450	Le voci di costo considerate non sono note
	St. Lucie County, Florida[36]	Inizio attività previsto per il 2010	900.000	293	325	Le voci di costo considerate non sono note
	Ipotesi di progetto 2005 [32]		33.000	31	939	Le voci di costo considerate non sono note

6.5.2 Costi di gestione

Per quanto riguarda i costi di gestione di impianti a tecnologia innovativa va rilevato che i dati disponibili sono scarsi e difficilmente confrontabili, perché calcolati su basi differenti (ad esempio il numero di anni di ammortamento può essere diverso a seconda dell'impianto, in alcuni casi non vengono conteggiate le spese del personale, ecc.).
Inoltre i dati sono relativi esclusivamente a realtà estere, dove alcune componenti di costo, che concorrono alla definizione del costo totale per tonnellata di rifiuto trattato, sono significativamente differenti rispetto alla realtà italiana: si pensi ad esempio ai costi di smaltimento dei residui, all'entità dei ricavi dovuti al recupero di energia, ai costi di trattamento dei reflui, al peso economico dei programmi di monitoraggio e controllo, di accesso al pubblico delle informazioni, ecc.
Il già citato studio [13] fornisce una ripartizione tra le varie voci del costo di gestione di un impianto a tecnologia innovativa, che è analoga a quella degli impianti di incenerimento e potrebbe essere la seguente:

Ammortamento	30-40%
Costo del personale	15-23%
Manutenzione	15-25%
Consumo di materiali, analisi, monitoraggi, ecc.	10-12%
Smaltimento residui	11-15%

Il medesimo studio fornisce, per le tecnologie innovative, dei range di costi di gestione (Tab. 6.13). Si tratta di costi che includono: quota di ammortamento, costo del personale, manutenzione, consumo di materiali, smaltimento dei residui, ma non tengono conto del costo di finanziamento del progetto, dell'utile di impresa e dei ricavi dalla vendita dell'energia.

Tab. 6.13 – Costi di gestione per diverse taglie di impianti a tecnologia innovativa [13]

Taglia [t/y]	**Costo di gestione [€/t]**
45.000	55-75
150.000	50-65
170.000-200.000	43-60

Sulla base dei dati di letteratura e delle informazioni fornite da alcune aziende costruttrici è stato possibile produrre la tabella che segue, che riporta i costi operativi di vari processi innovativi di trattamento termico.
Va sottolineato che, anche in questo caso, si tratta di costi indicativi e tra loro non direttamente confrontabili, perché le voci di costo ricomprese nel calcolo non sempre sono le stesse per i vari processi.

Tab. 6.14- Costi operativi e tariffa di conferimento per le varie tecnologie analizzate

Tecnologia	Impianto	Anno di realizzazione	Potenzialità [t/anno]	Costo operativo [ML€/anno]	Costo operativo [€/t]	Nota
COMPACT POWER	Ipotesi di progetto 2004 [22]		30.000	1,4	46,7	Il costo operativo comprende: personale, smaltimento residui,consumo di materiali, utilities, manutenzione, altri costi generali.
EBARA- gassificazione	Ipotesi di progetto 2005 [35]		4.500			
	Ipotesi di progetto 2005 [33]		13.000			
	Ipotesi di progetto 2005 [30]		105.611	4,1	38,8	I costi operativi comprendono esclusivamente i costi per l'attività ordinaria e la manutenzione (non comprendono i costi di capitale e le entrate).
	Ipotesi di progetto 2005 [30]		1.080.108	21,1	19,5	Sono esclusi i costi di trasporto, smaltimento residui e i costi di trasporto dei prodotti riciclabili.
ENTECH- gassificazione	Ipotesi di progetto 2005 [32]		33.000			
	Ipotesi di progetto 2004 [22]		45.000	2,2	48,9	Il costo operativo comprende: personale, smaltimento residui,consumo di materiali, utilities, manutenzione
	Ipotesi di progetto 2007 [27]		137.790	4,6	33,4	Il costo operativo si riferisce al 1° anno di esercizio e comprende: personale, smaltimento residui,consumo di materiali, utilities, manutenzione, spese varie.
ENERGOS- gassificazione [Fonte: Energos]	Averoy	1998	34.000	3,8	110	I costi operativi si riferiscono solo ai primi anni, soggetti alla supervisione operativa del costruttore, e comprendono: personale, reagenti e utilities,smaltimenti scorie e prodotti della depurazione, manutenzione ordinaria e straordinaria, spese generali ed amministrative.
	Hurum	2000	36.000	3,2	90	
	Minden	2001	37.000	3,6	100	
	Sarpsborg	2001	75.000	6,0	80	
	Forus	2002	38.000	3,5	90	
	Ipotesi di progetto 2004 [22]		75.000	3,1	41,3	Il costo operativo si riferisce al 1° anno di esercizio e non tiene conto dello smaltimento delle scorie.
ENERWASTE- gassificazione	Ipotesi di progetto 2008 [37]		136.757	12,7	92,9	Il costo operativo comprende: ammortamento in 10 anni per le opere elettromeccaniche, personale, consumi di energia e materiali, manutenzioni, trasporto e smaltimento scorie, indennità di disagio ambientale (7,5 €/t), spese generali ed utili gestionali.
NIPPON STEEL - gassificazione	Akita (Giappone)	2002	160.600	8	49,8	i costi operativi comprendono il personale e i materiali in ingresso.
PIT PYROFLAM- pirolisi e gassificazione [Fonte: TPF-Basse Sambre]	Ipotesi di progetto 2009		30.000	1,2	40	Il costo operativo, stimato sulla base dei dati forniti dal costruttore, comprende: personale, smaltimento residui,consumo di materiali, utilities, manutenzione. La stima non tiene conto delle spese generali ed altri costi di gestione (controlli, monitoraggi, analisi ecc.).
THERMOSELECT- pirolisi e gassificazione [27]	Ipotesi di progetto 2007		97.350	7,5	77	Il costo operativo si riferisce al primo anno di esercizio e comprende: personale, smaltimento residui,consumo di materiali, utilities, manutenzione, spese varie.
	Ipotesi di progetto 2007		194.700	11,6	59,6	
	Ipotesi di progetto 2007		292.050	16,8	57,5	

La tabella che segue riporta i campi di variazione dei costi di investimento e di esercizio di impianti di combustione tradizionali (griglia, letto fluido) e di pirolisi e gassificazione. I costi, tratti da uno studio dell'ENEA pubblicato a gennaio 2004 [19], così come esposti non appaiono tener conto delle caratteristiche dei rifiuti trattati, della taglia dell'impianto, delle diverse condizioni operative ed, in particolare, delle diverse modalità di recupero di energia e di materia.
In ogni caso i range di variabilità per le tecnologie di pirolisi/gassificazione appaiono sensibilmente più ampi di quelli degli impianti di combustione convenzionali.

Tab. 6.15- Costi indicativi di investimento ed esercizio

Parametro	Combustione	Pirolisi/gassificazione
Costi di investimento (1)	320 - 600 €/t/anno	180 - 900 €/t/anno
Costi di esercizio (2)	30-150 €/t	60- 240 €/t

(1) Costo unitario per capacità annua di trattamento dell'impianto
(2) Costo unitario per tonnellata di rifiuto trattato

Quanto detto porta a concludere che i dati esposti hanno un puro valore indicativo e vengono forniti con il solo scopo di completare il quadro delle informazioni sui sistemi di trattamento termico a tecnologia innovativa.
Una stima puntuale degli investimenti necessari per la realizzazione di questi impianti e dei relativi costi di gestione si potrà fare solo a valle di un approfondita analisi, nella quale dovranno essere valutate nel dettaglio tutte le variabili (taglia, localizzazione, tipologia di trattamento, presidi ambientali, tecnologie adottate, recuperi energetici, mercato dell'energia elettrica, condizioni locali).

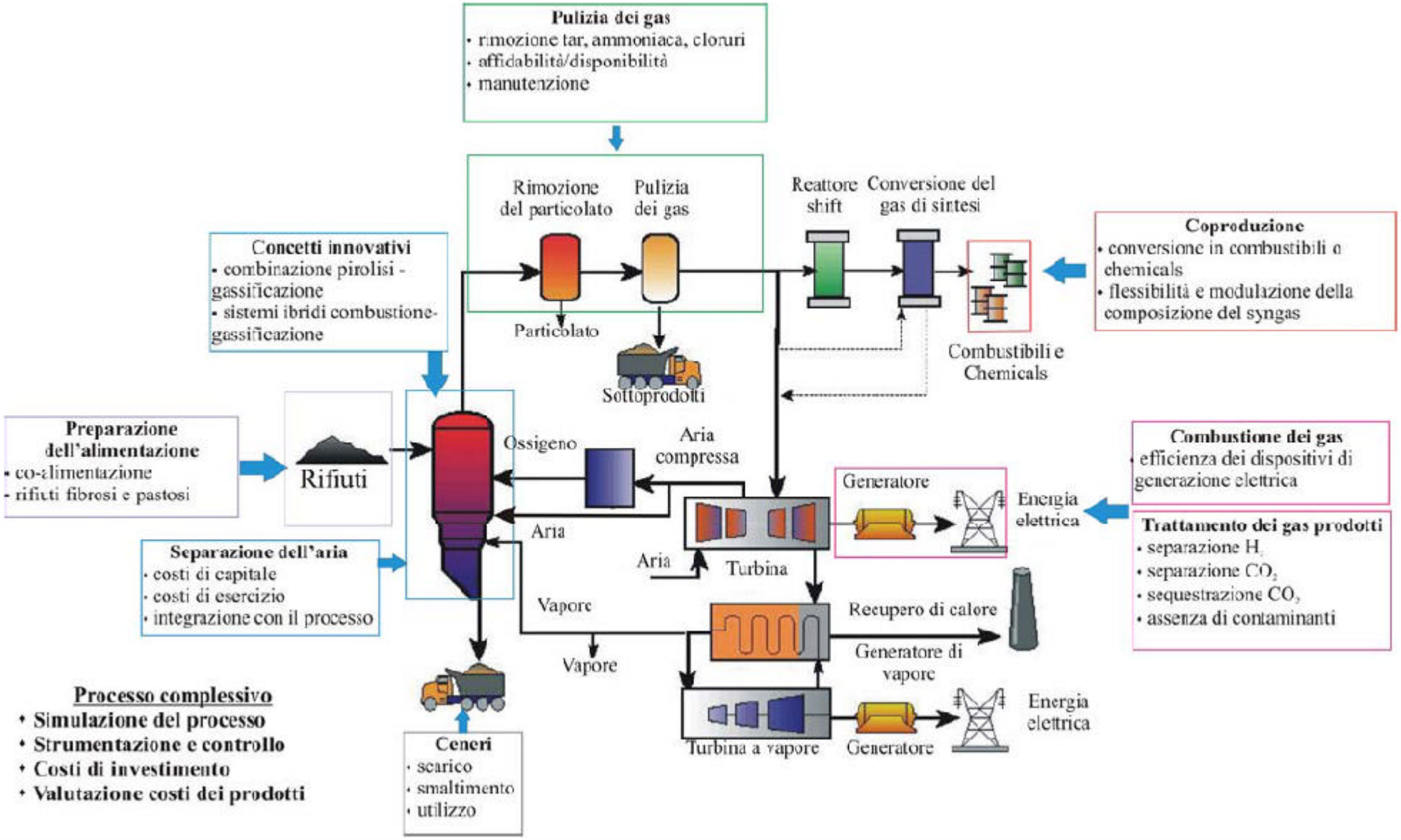
6.6 PROSPETTIVE DI SVILUPPO DELLE TECNOLOGIE INNOVATIVE

I processi alternativi di trattamento termico presentano rispetto alla combustione convenzionale del rifiuto dei potenziali vantaggi che possono essere così sintetizzati:

- La flessibilità della taglia, grazie all'adozione di sistemi modulari implementabili sulla base delle necessità, e soprattutto la possibilità di realizzare impianti di taglia ridotta economicamente sostenibili e più adattabili quindi a situazioni territoriali, dove il fabbisogno di smaltimento è contenuto.
- la versatilità sul combustibile in ingresso: tutti i materiali contenenti carbonio (carbone, biomasse, rifiuti urbani e speciali, combustibili derivati da rifiuti, gas naturale) possono essere gassificati, dopo un pretrattamento più o meno accurato. Sono quindi realizzabili anche processi che prevedono un'alimentazione mista di rifiuti e altre matrici allargando così il campo delle possibili applicazioni della tecnologia.
- le diverse alternative di impiego dei prodotti gassosi in uscita: il syngas prodotto può avere diverse alternative di utilizzo; la strada comunemente praticata ne prevede l'impiego come vettore energetico ma è anche possibile un utilizzo come materia per la sintesi di diversi prodotti chimici (da idrogeno a metanolo, ammoniaca, combustibili liquidi, ecc.).
- la possibilità di raggiungere elevate efficienze di generazione di energia elettrica attraverso l'utilizzo del syngas depurato in dispositivi altamente performanti (motori a combustione interna o sistemi combinati turbina a gas-turbina a vapore); tuttavia al momento esiste un limite tecnologico per la purificazione del gas che non consente di conseguire gli standard qualitativi richiesti per l'alimentazione di questi apparati.
- Per quanto riguarda la gassificazione (inclusa la gassificazione al plasma) la facilità di smaltimento e le opportunità di riutilizzo dei prodotti solidi in uscita: è possibile ottenere ceneri vetrose, o comunque inerti, impiegabili come materiale da costruzione (sottofondi stradali).

D'altra parte, mentre le tecnologie di combustione vantano decenni di esercizio su un numero considerevole di impianti di taglia diversa, le tecnologie innovative di trattamento termico applicate ai rifiuti necessitano, per divenire più competitive nei confronti della combustione convenzionale, di ulteriori approfondimenti e sviluppi. I principali temi di ulteriore ricerca riguardano:

- i sistemi di alimentazione del rifiuto e quelli di scarico delle ceneri di fondo;
- il monitoraggio ed il controllo in tempo reale dei parametri di esercizio critici del forno;
- la minimizzazione della formazione di tar nel syngas;
- l'ottimizzazione della rimozione di particolato, alcali, ammoniaca, cloruri e solfuri dal syngas;
- l'ottimizzazione del recupero di energia dal syngas;
- la definizione di criteri tecnico-economici affidabili per le condizioni di esercizio degli impianti.



Principali aree di ricerca e sviluppo per le tecnologie di gassificazione (rielaborata da Stiegel & Maxwell, 2001, op. cit.).

7 CONCLUSIONI

Nella Provincia di Torino è in fase di realizzazione un inceneritore a griglia mobile della potenzialità di 421.000 t/anno che dovrebbe entrare in esercizio entro il 2013. È stata effettuata la localizzazione del secondo inceneritore con una potenzialità complessiva di circa 290.000 t/anno; di tale impianto non sono ancora state avviate le procedure di affidamento per la costruzione e gestione.
Con mozione del 15 luglio 2008 il Consiglio Provinciale di Torino ha dato mandato ad ATO-R di verificare la fattibilità (localizzativa ed industriale) di impianti basati su tecnologia innovativa, effettuare eventuali significative sperimentazioni e tenere conto delle risultanze della sperimentazione ai fini del dimensionamento dell'impiantistica di termovalorizzazione dei rifiuti.
Con DGP n. 176-33791 del 15 settembre 2009 la Giunta provinciale di Torino ha approvato gli indirizzi per la revisione del Programma provinciale di gestione dei rifiuti, dando l'avvio alle attività operative per la redazione del nuovo PPGR. Tra gli indirizzi relativi al tema dell'impiantistica al servizio del sistema integrato di gestione dei rifiuti si indica tra l'altro la verifica della necessità del secondo impianto di termovalorizzazione e la possibilità di dare corso, per un'eventuale necessità residua, all'utilizzo di nuove tecnologie di smaltimento con recupero energetico.
Pertanto le risultanze di questo studio sono funzionali ad avviare, eventualmente, una sperimentazione significativa su impianti a tecnologia innovativa.

Il gruppo di lavoro coordinato dal prof. Genon del Politecnico di Torino è stato costituito allo scopo di verificare l'applicabilità alla realtà della Provincia di Torino di impianti di trattamento termico per rifiuti urbani indifferenziati a cosiddetta "tecnologia innovativa" ovvero alternativa all'incenerimento.
Occorre rilevare che il termine incenerimento viene di norma identificato con la combustione diretta dei rifiuti, anche se, coerentemente con quanto enunciato all'art. 2 del D.Lgs. 133/05, nell'accezione di incenerimento sono inclusi anche "…altri procedimenti di trattamento termico, quali ad esempio la pirolisi, la gassificazione ed il processo al plasma, a condizione che le sostanze risultanti dal trattamento siano successivamente incenerite".
In altre parole, anche gli impianti basati su processi termici operanti in condizioni parzialmente ossidative (gassificazione) o in atmosfera inerte (pirolisi), dal punto di vista normativo sono equiparati alla combustione diretta dei rifiuti.
In realtà, sotto l'aspetto tecnico, la pirolisi e la gassificazione possono differire sostanzialmente dall'incenerimento, sia per quanto riguarda il differente grado di maturità commerciale delle tecnologie, sia per quanto riguarda le condizioni operative e le modalità di recupero energetico sui prodotti intermedi da essi derivabili. Infatti la pirolisi e la gassificazione comportano la conversione del rifiuto in combustibile gassoso (o di gas e di una frazione liquida) con successiva valorizzazione energetica del prodotto ottenuto.
La definizione "tecnologia innovativa" è in realtà impropria, in quanto si tratta di tecniche che operano con principi noti fin dal diciottesimo secolo: i primi gassificatori per carbone furono costruiti in Germania dalla Bischof (1839) e dalla Siemens (1861), principalmente per alimentare i forni dell'industria pesante. A partire dai primi del 1900 la tecnologia della gassificazione si era sviluppata a tal punto da essere in grado di trattare ogni tipologia di residuo a matrice cellulosica (noccioli di oliva, paglia, gusci di noci), per produrre combustibile da utilizzare nei motori a combustione interna per la molitura e altri utilizzi legati all'attività agricola. Il vero impulso per la tecnologia della gassificazione fu dato dalle carenze di carburante durante la seconda guerra mondiale, quando gassogeni a legna furono utilizzati in Europa per fornire energia ai veicoli a motore.

Dunque l'aspetto "innovativo" delle suddette tecnologie non è tanto nel processo, quanto nella sua applicazione a una matrice inevitabilmente variabile e fortemente disomogenea, come quella di un rifiuto indifferenziato. Nell'intento di ricercare una valida alternativa alla combustione convenzionale e allo scopo di migliorare le performance impiantistiche relative agli aspetti energetici ed ambientali, queste tecnologie sono da tempo oggetto di indagine e approfondimento da parte degli addetti ai lavori. La scommessa rimane tuttora quella di rendere affidabilmente eseguibile nel quotidiano il trattamento del rifiuto, aspetto non banale da un punto di vista chimico e termochimico.
Nel gruppo delle tecnologie innovative di trattamento termico alternative all'incenerimento rientrano: gassificazione convenzionale, gassificazione al plasma, pirolisi e sistemi che utilizzano una combinazione delle tecnologie citate.
La gassificazione è un processo di trattamento termico, in cui un combustibile solido viene trasformato in un combustibile gassoso (syngas) in condizioni di parziale ossidazione, attraverso l'utilizzo di un agente gassificante (aria, ossigeno puro, vapore). I principali componenti del syngas sono idrogeno, monossido di carbonio, biossido di carbonio e metano, in composizione variabile a seconda delle condizioni di processo.
La gassificazione al plasma si realizza attraverso un dispositivo (la torcia al plasma), nel quale è possibile generare correnti gassose ad elevatissima temperatura. Il plasma è un gas ionizzato, che si forma quando una scarica elettrica investe gli atomi di ossigeno e azoto, innescando una reazione a catena e generando una corrente di elettroni e ioni globalmente neutra. Il plasma, a temperature comprese tra i 7.000 e i 13.000°C, opportunamente diretto sulla massa di rifiuti, produce temperature all'interno del convertitore al plasma di 3.000-4.000°C, provocando la dissociazione molecolare delle componenti organiche dei rifiuti e la fusione delle componenti inorganiche, per trasformarle in una roccia vetrosa.
Il processo di pirolisi consiste invece nella degradazione termica di un materiale, in assenza di aria, tramite l'azione di energia fornita dall'esterno, di norma attraverso la combustione di parte dei prodotti ottenuti. L'azione del calore comporta la rottura delle molecole complesse con produzione di un gas, di una frazione liquida a temperatura ambiente (olio) e di un residuo solido ancora combustibile (char o pyrocoke), le cui caratteristiche e quantità dipendono, oltre che dal tipo di materiale trattato, dalle condizioni operative alle quali viene condotto il processo.

Stato dell'arte in Italia e in Europa

Il numero di tecnologie innovative per il trattamento termico dei rifiuti urbani che vengono diffusamente proposte è piuttosto elevato, dell'ordine delle decine. Se si ragiona tuttavia in termini di maturità commerciale e numero di impianti in esercizio, la situazione si presenta assai diversa.
Buona parte delle tecnologie attualmente proposte in Italia, come alternative all'incenerimento con recupero energetico, si basa su impianti di piccola taglia, sviluppati e ingegnerizzati per trattare specifiche tipologie di rifiuti, quali ad esempio scarti di cartiera, pneumatici, plastiche, biomasse (scarti vegetali, legno, sansa di olive ecc).
Per quanto riguarda l'applicazione di questi sistemi a rifiuti o a combustibile derivato da rifiuto, non esistono al momento impianti funzionanti su scala commerciale, se si esclude l'impianto di gassificazione di CDR di Malagrotta (Roma), caratterizzato da una potenzialità di 500 t/d ed avviato in esercizio nell'agosto 2008; si tratta di un gassificatore basato su tecnologia derivata da quella Thermoselect, ma priva del primo stadio di pirolisi, scelta resa possibile dall'alimentazione con CDR, anziché con rifiuti urbani non trattati.
Alcuni impianti sono stati operativi per periodi più o meno brevi, e poi dismessi per motivi differenti. Ad esempio l'impianto di Greve Chianti risulta attualmente fuori esercizio, mentre quello realizzato nell'Isola d'Elba è stato definitivamente dismesso nel 2002 e in seguito demolito.

Tra le esperienze europee sul fronte della gassificazione dei rifiuti urbani indifferenziati con impianti in funzione vanno citati quelli realizzati da ENERGOS, che conta 7 impianti di gassificazione su griglia mobile di rifiuto urbano indifferenziato (cinque in Norvegia, uno in Germania e uno in Inghilterra), realizzati tra il 1997 e il 2008 con potenzialità variabili tra 10.000 t/y e 75.000 t/y. Non altrettanto positiva, in termini di prestazioni ed affidabilità, è la vicenda dell'impianto Thermoselect di Karlsruhe in Germania, mai entrato in esercizio commerciale in quanto non in grado di raggiungere le prestazioni di progetto.
Per quanto riguarda la pirolisi sono da segnalare i due impianti TechTrade a tamburo rotante operativi in Germania: l'impianto di Burgau da 40.000 t/y di rifiuti solidi urbani, operativo continuativamente dal 1987, e l'impianto di Hamm-Uentrop da 110.000 t/y di rifiuti selezionati ad alto potere calorifico (18 MJ/kg), asservito alla locale centrale termoelettrica a carbone.
A queste esperienze si contrappone quella dell'impianto di pirolisi della Thide Environment ad Arras (Francia), entrato in esercizio nella primavera 2004, con una capacità teorica di 50.000 t/anno, di fatto non è mai riuscito a trattare più di 15.000 t/anno e ha chiuso definitivamente nel gennaio 2009.
Sul fronte dei processi combinati va menzionata la tecnologia PIT-Pyroflam basata su un processo di pirolisi del rifiuto e gassificazione del pyrocoke in tamburo rotante: un impianto di 12.000 t/anno è in funzione a Keflavik (Islanda) dal dicembre 2003.

Riguardo alla situazione nei Paesi extraeuropei, possono vantare un'applicazione industriale su ampia scala sui rifiuti urbani i processi di gassificazione realizzati in Giappone. Una recente analisi condotta dal Politecnico di Milano (Centola e Ghezzi, 2007) ha rilevato la presenza di oltre 100 impianti di gassificazione, la maggioranza dei quali alimentati con rifiuto residuo non pretrattato. La Nippon Steel ha realizzato, a partire dal 1979, 28 impianti di gassificazione ad alta temperatura con vetrificazione delle scorie, di potenzialità comprese tra 25.000 e 200.000 t/y.

Risultati dell'indagine

Attraverso l'analisi dei dati raccolti autonomamente e di quelli trasmessi dai costruttori di impianti è stato possibile valutare vari aspetti inerenti le prestazioni delle tecnologie innovative con un livello di approfondimento dettato dal differente grado di informazione disponibile. E' stata presa in esame una rosa di 24 processi (riportati nella tabella che segue) per i quali sono state approfondite le seguenti tematiche:

- Affidabilità: valutata sulla base del numero di impianti attualmente operativi su scala commerciale che trattino principalmente rifiuti urbani indifferenziati con una garanzia di esercizio di almeno 300 giorni/anno.
- Aspetti ambientali: emissioni in atmosfera, in termini di concentrazione dei contaminati e volume di fumi rilasciati; quantità e qualità dei residui solidi prodotti.
- Aspetti economici: entità del capitale da investire, costi di gestione, livello orientativo della tariffa di trattamento applicabile.
- Recupero energetico: quantità di energia elettrica e termica prodotta e ceduta all'esterno al netto dell'autoconsumo dell'impianto, rendimenti energetici.

Le tecnologie prese in esame sono riportate nella tabella che segue dalla quale emerge con chiarezza che la grande maggioranza delle tecnologie innovative proposte in alternativa alla combustione diretta si basa sul principio della gassificazione.

Tab. 7.1- Elenco delle tecnologie considerate nel presente studio.

	Azienda	Processo	Scala	Tipologia rifiuto	Numero di impianti in esercizio
1	AlterNRG(Canada) , Westinghouse Plasma Corporation, Hitachi Metals (Giappone)	Plasma	Piccola/media/grande	RSU, RDF, fluff, pneumatici	2 in Giappone; 1 in fase di realizzazione in USA della potenzialità di 1.000 t/giorno
2	Compact Power (UK)	Pirolisi e gassificazione	Piccola/media	Rifiuti ospedalieri	1 in Gran Bretagna; previsto ampliamento per ulteriori 24.000 t/anno di rifiuti urbani
3	Ebara TIFG (Giappone)	Gassificazione	Piccola/media/grande	RSU, rifiuti industriali	8
4	Ecologia Informatica T.W.R. (Italia)	Gassificazione	Piccola	Rifiuti chimici farmaceutici	4
5	Energos (Norvegia)	Gassificazione	Piccola/media	RSU	7
6	Enerwaste International Corporation EWOX (USA), Planet Advantage (UK)	Gassificazione	Piccola/media	RSU	8
7	Entech (Australia), IET Energy (UK)	Gassificazione	Piccola/media	RSU	8
8	Hitachi Zosen (Giappone)	Gassificazione	Media	RSU	8
9	Inter Engineering (Germania)	dissoluzione in soluzione salina e gassificazione		Biomassa, scarti legnosi	In fase di realizzazione pilota da 50 t/giorno in Germania
10	Kawasaki Heavy Industries (Giappone)	Gassificazione	Media	RSU	2
11	Kobelco (Giappone)	Gassificazione	Media	RSU	8
12	Lurgi (Germania), Envirotherm	Gassificazione	Media/grande	RDF, rifiuti industriali, legno, carbone	uno solo tratta anche RSU per 120.000 t/anno
13	Mitsui (Giappone), Takuma (Giappone)	Pirolisi e combustione	Media	RSU, fluff	6
14	Nippon Steel (Giappone), Paul Wurth (Italia)	Gassificazione	Media/grande	RSU, rifiuti industriali	28 in esercizio, 8 in fase di realizzazione
15	PKA (Germania)	Pirolisi e gassificazione	Media	RSU, rifiuti industriali	2
16	Plasco Energy (Canada)	Gassificazione+plasma	Piccola/grande	RSU	1
17	Pyromex (Svizzera)	Gassificazione	Piccola/media	RSU, fanghi	Uno in fase di realizzazione da 25 t/giorno
18	Startech Environmental (USA)	Plasma	Piccola/media	RSU	
19	TechTrade (Germania), Wastegen (UK), Icom (Italia)	Pirolisi	Piccola/media	RSU, fanghi	2
20	Tecnogranda SpA (Italia)	Pirolisi e gassificazione		Biomassa, RSU	
21	Thermoselect (Svizzera), IWT (USA), JFE (Giappone), 7 Hills (Svizzera)	Pirolisi e gassificazione	Media/grande	RSU, rifiuti industriali	7
22	Thide Environnement (Francia)	Pirolisi	Piccola/media	RSU, rifiuti industriali	3
23	Tpf Basse Sambre	Pirolisi e gassificazione	Piccola/media	RSU/RDF	1
24	Vuzeta (Italia)	"ristrutturazione molecolare" con l'utilizzo di un catalizzatore		biomassa	

L'interesse nei confronti delle tecnologie innovative di trattamento termico è determinato essenzialmente dalle potenzialità che esse offrono in termini di **incremento del recupero energetico** dai rifiuti.
I processi di gassificazione e pirolisi consentono di produrre il syngas, che può essere utilizzato per la produzione di energia elettrica secondo vari schemi:

- combustione diretta in una camera di ossidazione secondaria; il calore dei fumi è utilizzato per generare vapore in pressione che, espandendosi in turbina, genera energia elettrica (con rendimenti energetici lordi del 18-27%);
- combustione in motori a combustione interna, previa depurazione spinta con un'efficienza nettamente superiore rispetto al sistema con turbina a vapore (37-41%);
- utilizzo, previa depurazione spinta, in un ciclo combinato turbo-gas turbo-vapore (IGCC, Integrated Gasification Combined Cycle), con efficienze di recupero del 45-50%;
- produzione di idrogeno ed alimentazione di celle a combustibile, con rese energetiche potenziali superiori al 60%.

Va rilevato che le configurazioni impiantistiche che potrebbero consentire elevati rendimenti energetici (motori endotermici, IGCC e celle a combustibile) non trovano ad oggi applicazione, anche in ragione del fatto che risulta tecnologicamente difficile ottenere con continuità del syngas depurato: in Giappone, paese che, come si è già avuto modo di dire, è all'avanguardia nella gassificazione dei rifiuti, meno del 10% degli impianti prevede la depurazione del syngas e il suo successivo utilizzo in apparati ad elevato rendimento.
L'unico esempio al mondo che applica ciclo IGCC su syngas depurato è l'impianto di gassificazione della Lurgi-Envirotherm di SVZ a Schwarze Pumpe in Germania, che tratta una miscela combustibile di particolari caratteristiche (dimensioni di circa 20x80 mm) ad alto potere calorifico, costituita mediamente dal 20-25% di carbone, 45% di CDR in pellets, 10% di plastica, 10% di legno, 10% di catrame e fanghi in pellets con efficienze di produzione dell'energia elettrica dichiarate del 46,6% [41]. Tuttavia, nonostante i tentativi operati dagli autori del presente studio, non si è potuto stabilire se il suddetto impianto, che rappresenterebbe un punto di riferimento, data la particolarità del recupero energetico effettuato, sia ad oggi ancora funzionante, in che misura e su quali flussi di rifiuto.
È utile sottolineare che il calcolo del parametro di efficienza energetica è influenzato da diversi fattori, quali il PCI del rifiuto, la taglia della turbina, gli autoconsumi, per cui risulta di difficile realizzazione un confronto oggettivo tra le varie tecnologie prese in esame.
Tuttavia l'indagine condotta dal Gruppo di lavoro fornisce delle interessanti indicazioni di carattere generale, dalle quali emerge sostanzialmente che, al momento, la soluzione più praticata è la combustione diretta del syngas e questo rende, di fatto, tali impianti poco differenti dai tradizionali impianti di combustione, essendo sottoposti come tali a tutte le prescrizioni e le normative ad essi applicabili.
Il syngas viene combusto immediatamente senza interventi di depurazione preventiva; quest'ultima viene poi effettuata, analogamente agli impianti tradizionali, sui prodotti finali di combustione del syngas; **si tratta pertanto prevalentemente di processi che non consentono di ottenere ad oggi alcun miglioramento dell'efficienza di produzione di energia elettrica rispetto ai tradizionali impianti di incenerimento**.

Ulteriori motivi di interesse nei confronti di queste tecnologie sono determinati essenzialmente dai **potenziali vantaggi ambientali,** in termini di riduzione dei contaminanti nelle emissioni in atmosfera e delle portate di effluenti gassosi da sottoporre a trattamenti depurativi, nonchè di miglioramento della qualità dei residui solidi.
Per quanto riguarda le concentrazione dei contaminanti nei fumi prodotti, configurandosi gli impianti a tecnologia innovativa come impianti di "incenerimento" ai sensi dell'art. 2, c.1 lett. d del D.Lgs 133/05, sono soggetti ai medesimi adempimenti e obblighi di un impianto di combustione convenzionale, ivi compreso il rispetto dei limiti di emissione.

Il decreto legislativo 133/2005, emanato in recepimento della direttiva europea 2000/76/CEE, prevede che siano applicati sistemi di monitoraggio in continuo (SME) per: NO_X, CO, polveri totali, TOC, HCI, SO_2, HF. Per diossine, furani e metalli sono invece previste misurazioni almeno quadrimestrali, salvo che per i primi 12 mesi di esercizio dell'impianto, nei quali si richiede di effettuare misurazioni con cadenza trimestrale; qualora dalle misurazioni effettuate nei primi 12 mesi, risulti che il valore delle emissioni sia inferiore al 50% dei limiti, le frequenze di misurazione si riducono fino ad una volta all'anno per diossine e furani e ad una ogni due anni per i metalli pesanti.
In termini di concentrazioni nell'effluente gassoso dall'indagine emerge per gli impianti a tecnologia innovativa un tenore emissivo ben al di sotto dei limiti normativi, ma sostanzialmente in linea con i moderni inceneritori che adottino le migliori tecniche disponibili, come definite nei documenti di riferimento. L'adozione di efficaci sistemi di depurazione dei fumi negli impianti di incenerimento consente di raggiungere valori di emissione notevolmente inferiori ai limiti di legge per tutti i contaminanti comprese le diossine, per le quali si registrano concentrazioni inferiori di uno-due ordini di grandezza rispetto al limite normativo di 0,1ngTEQ/Nm^3.
In relazione al volume dei fumi va detto che i processi di "gassificazione" (intesa in senso lato, ovvero come trattamento termico innovativo di materiali di scarto, finalizzato alla produzione di un gas derivato, syngas, da utilizzare per scopi energetici) producono volumi di gas certamente più contenuti rispetto ad un inceneritore convenzionale (fumi di combustione), per le caratteristiche intrinseche del processo; infatti, mentre per far avvenire la combustione in un inceneritore si necessita di eccessi d'aria consistenti, i processi termochimici operano in totale assenza di aria o in presenza di quantitativi contenuti di agente ossidante.
Tuttavia, in ragione del fatto che il principale destino del syngas rimane la combustione in caldaia con produzione di vapore, l'aggiunta di aria a valle della produzione del syngas è necessaria, per cui, di fatto, il trattamento viene a configurarsi come un incenerimento in due stadi. Quindi, nel complesso, il quantitativo di fumi da trattare a valle del recupero energetico è confrontabile con quello di un impianto di combustione tradizionale, in termini di volume prodotto per tonnellata di rifiuto trattato (6.000-7.000 Nm^3/t).
I fumi sono successivamente sottoposti a trattamento di depurazione, secondo configurazioni impiantistiche tipiche degli impianti di combustione convenzionale.
Probabilmente, sulla base delle conoscenze attuali, una progettazione mirata e particolarmente attenta a questo aspetto porterebbe ad una riduzione della produzione specifica di fumi per unità di rifiuto trattato da impianti di pirolisi/gassificazione. Certo è che, l'emissione da impianti di gassificazione/pirolisi, potrebbe essere di volume più contenuto e di qualità migliore, se si depurasse il syngas prima della sua combustione; si avrebbero in questo modo, certamente, minori concentrazioni di cloro e zolfo e probabilmente di TOC.
La preventiva depurazione del syngas potrebbe anche migliorare il tenore degli ossidi di azoto, che si formano sia per via termica dall'aria, sia dall'azoto del combustibile, mentre la rimozione a valle della combustione del gas grezzo non sembrerebbe apportare sostanziali vantaggi rispetto all'incenerimento convenzionale.
Circa le diossine invece, risulta veramente molto difficile fare delle valutazioni affidabili, relativamente ai livelli di concentrazione a monte dei dispositivi di abbattimento; è possibile che in genere tutti i sistemi di pirolisi o gassificazione, bruciando in fase gas, formino meno diossine nei gas grezzi, rispetto a quelle che si formano nella combustione del solido; tuttavia, rispetto a questo stadio dei gas grezzi, c'è poi l'intervento di depurazione del carbone attivo, comunemente usato tanto negli impianti di incenerimento, quanto negli impianti di pirolisi/gassificazione, che fa sì che le emissioni al camino non siano significativamente diverse nelle due tipologie di impianti.
In definitiva, sia dal punto di vista energetico, sia dal punto di vista di impatto qualitativo e quantitativo, è certamente migliorativo e promettente il sistema gassificazione- depurazione del syngas- combustione- trattamento finale (essenzialmente per CO e NOx), ma oggi esso non appare una soluzione industriale consolidata.

Per quanto riguarda i residui solidi prodotti dagli impianti a tecnologia innovativa il discorso va affrontato in termini di natura e quantitativi dei residui. È necessario in tal senso fare una distinzione tra i processi di gassificazione (e tra questi includiamo anche la gassificazione con torcia al plasma) ed i processi di pirolisi.
I processi di gassificazione a medie temperature (700-800°C) danno origine a delle scorie (bottom ash), sostanzialmente simili come aspetto e composizione a quelle di un inceneritore; i quantitativi sono in genere inferiori rispetto a quelle di un inceneritore convenzionale e orientativamente quantificabili nel 13-20% del rifiuto alimentato all'impianto. Il destino delle scorie è in genere la collocazione in discarica.
I sistemi di gassificazione a fusione diretta delle scorie hanno invece la peculiarità di generare delle scorie vetrificate, con evidenti miglioramenti delle loro caratteristiche e una maggiore facilità di riutilizzo; le scorie sono costituite da metalli (circa 10 kg per tonnellata di materiale in ingresso) e da una loppa granulare (90-100 kg/t), costituita da ossidi di metalli, che in Giappone viene comunemente utilizzata come materiale per l'edilizia, mentre in Italia è da verificare, a livello normativo, il suo possibile riutilizzo o il suo abbancamento in discariche per inerti. Analogamente ai gassificatori, la torcia al plasma produce delle scorie non lisciviabili potenzialmente riutilizzabili di consistenza lavica.
Il processo di pirolisi produce invece, come residuo solido, un carbone tipo coke (pyrocoke) di colore nero, inodore e di discreto PCI (circa 9 MJ/kg), avendo ancora un discreto contenuto di carbonio (30%). Quantitativamente il carbone in uscita ammonta al 30-40% del rifiuto in ingresso (a volte anche il 50%, a seconda dei processi e della qualità del rifiuto in ingresso) e rappresenta un prodotto per il quale occorre trovare una giusta collocazione; le opzioni possono essere o l'inertizzazione attraverso un successivo step di combustione/gassificazione con ulteriore complicazione impiantistica oppure l'utilizzo come combustibile in alternativa al carbone (ad esempio nelle cementerie, nelle fornaci per mattoni, negli altoforni), ma occorrerebbe verificare se esiste un mercato per tale prodotto.

Necessitano di ulteriore approfondimento gli **aspetti economici** legati alle tecnologie innovative; il Gruppo di lavoro non ha potuto conseguire risultati soddisfacenti in merito a questo fattore, che è sicuramente di fondamentale importanza, in una logica di gestione dei rifiuti secondo criteri di efficacia, efficienza ed economicità.
Acquisire informazioni sugli aspetti economici relativi alle diverse tecnologie innovative di trattamento termico dei rifiuti risulta abbastanza complesso. È possibile disporre di informazioni attendibili e precise sui costi di investimento e di esercizio solo quando un impianto è già stato costruito ed è pienamente operativo, ma i fornitori della tecnologia e i gestori degli impianti, per ragioni commerciali, sono poco disponibili a divulgare i dati economici.
Quand'anche si riesca ad ottenere l'informazione essa resta caratterizzata da un certo grado di incertezza, dovuta al fatto che i dati disponibili spesso non descrivono in modo chiaro le componenti tecniche incluse nei costi e possono presentare un'aggregazione delle varie voci che può portare ad interpretazioni non corrette. Inoltre i dati sono spesso riferiti a taglie di impianto notevolmente differenti e, com'è noto, il fattore scala riveste una notevole importanza per gli impianti di processo caratterizzati da una certa complessità.
Ad esempio lo scale-up dell'impianto ha effetto sul rendimento energetico complessivo: potenzialità più elevate comportano maggiori efficienze per caldaie, turbine, pompe e ventilatori. La dispersione del calore attraverso le superfici calde è funzione del rapporto superficie/volume che diminuisce all'aumentare del volume e quindi della potenzialità dell'impianto. Le perdite per attrito e quelle dovute al percorso del fluido sono più significative nelle macchine piccole che nelle grandi. Quindi gli impianti più grandi, potendo produrre maggiori quantitativi di energia elettrica, possono conseguire maggiori profitti o praticare tariffe di conferimento più basse.

I dati sui costi di investimento, estratti dalle varie fonti, mostrano una grande variabilità, anche a fronte della medesima taglia impiantistica; questo è da attribuire, oltre che alle differenti modalità di calcolo, anche al pretrattamento del rifiuto, generalmente richiesto negli impianti di trattamento termico a tecnologia innovativa e realizzato in maniera più o meno spinta a seconda del processo. Probabilmente un impianto a tecnologia innovativa potrebbe risultare competitivo con un inceneritore per potenzialità inferiori a 100.000 t/anno, in ragione del fatto che, per taglie così piccole, gli inceneritori non risultano economicamente sostenibili e infatti, raramente, si trovano impianti di bassa potenzialità.
I dati disponibili sui costi di gestione sono molto pochi e scarsamente confrontabili, perché calcolati con criteri differenti (ad esempio il numero di anni di ammortamento può essere diverso a seconda dell'impianto, in alcuni casi non vengono conteggiate le spese del personale, ecc.). Inoltre i dati sono relativi esclusivamente a realtà estere, dove alcune componenti di costo, che concorrono alla definizione del costo totale per tonnellata di rifiuto trattato, sono significativamente differenti rispetto alla realtà italiana: si pensi ad esempio ai costi di smaltimento dei residui, all'entità dei ricavi dovuti al recupero di energia, ai costi di trattamento dei reflui, al peso economico dei programmi di monitoraggio e controllo e per l'accesso al pubblico delle informazioni, ecc.
La tabella che segue riporta i campi di variazione dei costi di investimento e di esercizio di impianti di combustione tradizionali (griglia, letto fluido) e di pirolisi e gassificazione. I dati, tratti da uno studio dell'ENEA pubblicato a gennaio 2004 [15], non esprimono le differenze in termini di caratteristiche dei rifiuti trattati, della taglia dell'impianto, delle diverse condizioni operative ed, in particolare, delle diverse modalità di recupero di energia e di materia. I range appaiono ampi per le tecnologie di pirolisi/gassificazione e per quanto riguarda i costi di investimento mostrano un certo allineamento con i dati rilevati nell'indagine condotta nel presente rapporto.
Queste considerazioni evidenziano che i dati esposti hanno un puro valore indicativo e vengono forniti con il solo scopo di completare il quadro delle informazioni sui sistemi di trattamento termico a tecnologia innovativa.

Tab. 7.2 - Costi indicativi di investimento ed esercizio

Parametro	Combustione	Pirolisi/gassificazione
Costi di investimento (1)	320 - 600 €/t/anno	180 - 900 €/t/anno
Costi di esercizio (2)	30-150 €/t	60- 240 €/t

(1) Costo unitario per capacità annua di trattamento dell'impianto
(2) Costo unitario per tonnellata di rifiuto trattato

Si può in definitiva concludere che le tecnologie di trattamento termico dei rifiuti alternative alla combustione diretta si presentano certamente come promettenti e pertanto meritevoli di applicazione sperimentale nella realtà della Provincia di Torino, su una taglia impiantistica che è ad oggi molto più limitata di quella di un inceneritore ed è individuabile in una potenzialità di trattamento annua pari a 30.000-60.000 tonnellate/anno.
Alla luce delle motivazioni sopraesposte si può ritenere che l'effettivo reale vantaggio delle tecnologie in esame risiede nella versatilità impiantistica, che si concretizza in un'ampia disponibilità di tipologie di impianti e di potenzialità di trattamento, queste ultime, in genere, molto più contenute rispetto ad un impianto di incenerimento convenzionale.
La flessibilità della taglia impiantistica permette di ricercare la convenienza economica anche per dimensioni di impianto notevolmente più ridotte rispetto a quelle di un inceneritore e questo rende le tecnologie innovative più adattabili a situazioni territoriali, dove il fabbisogno di smaltimento è contenuto: in altri termini si possono costruire gli impianti direttamente laddove servono e possono essere dimensionati sulla base delle effettive necessità locali di smaltimento. Tale aspetto porta con sé alcuni vantaggi, quali una potenziale minore problematicità nell'accettazione da parte delle comunità locali in fase di localizzazione dell'impianto e la riduzione dei costi e dell'impatto ambientale dovuti al trasporto dei rifiuti verso gli impianti di smaltimento finale.

Da altri punti di vista (recupero energetico e maggiore compatibilità ambientale) non risultano al momento provati reali e significativi vantaggi rispetto all'incenerimento ma tali impianti sono sicuramente in grado di garantire prestazioni quantomeno analoghe. Restano da approfondire e verificare gli aspetti economici delle tecnologie. Una stima puntuale degli investimenti e dei costi di esercizio legati a questo tipo di impianti si potrà fare solo a valle di un approfondita analisi, nella quale dovranno essere valutate nel dettaglio tutte le variabili (taglia, localizzazione, tipologia di trattamento, presidi ambientali, tecnologie adottate, recuperi energetici, mercato dell'energia elettrica, condizioni locali).

Scendendo nello specifico delle varie alternative tecnologiche analizzate (gassificazione, pirolisi, gassificazione al plasma, processi combinati), dai dati raccolti emerge che:

- la gassificazione costituisce l'alternativa tecnologica più completa e competitiva rispetto all'incenerimento, per la valorizzazione energetica del rifiuto urbano indifferenziato.
- la pirolisi, pur essendo oltre lo stato dimostrativo con particolari applicazioni finalizzate al recupero di rifiuti speciali, non costituisce attualmente una completa alternativa all'incenerimento dei rifiuti solidi urbani, considerato anche il ridotto numero di impianti in esercizio nel settore a livello internazionale; il problema principale rimane la notevole produzione di residuo solido ad elevato contenuto di carbonio, che necessita di un ulteriore stadio di trattamento. Risultano a tale scopo più efficaci i sistemi combinati di pirolisi e gassificazione: si ritiene cioè importante che alla fase di pirolisi faccia seguito, in modo controllato ed affidabile, la gassificazione del char, a prescindere dalla soluzione impiantistica adottata per questa seconda operazione.
- La tecnologia della torcia al plasma non risulta al momento sufficientemente sperimentata sui rifiuti urbani: a livello commerciale risultano operativi nel panorama mondiale solo due impianti di taglia ridotta in Giappone (tecnologia Hitachi Metals), oltre ad alcune esperienze a livello semi-commerciale/dimostrativo/pilota; quest'ultima si configura, tuttavia, come tecnologia industrialmente matura per la termodistruzione di particolari tipologie di rifiuti altamente pericolosi e rifiuti radioattivi, nonché per la vetrificazione di scorie/ceneri da incenerimento.
- Per quanto il tenore dei contaminanti nel syngas grezzo possa risultare inferiore rispetto a quello dei fumi grezzi di un inceneritore, questo aspetto di per se non prefigura direttamente un vantaggio ambientale; infatti il recupero energetico del syngas comunemente realizzato, che ne prevede la combustione senza preventiva depurazione, e la presenza di una linea di trattamento dei fumi analoga a quella di un impianto di incenerimento convenzionale, fanno si che gli impianti a tecnologia innovativa presentino analoghe prestazioni di un inceneritore convenzionale in termini di concentrazioni dei contaminanti nei fumi in uscita e di portata degli stessi. Tuttavia, in caso di cattivo funzionamento di quest'ultima parte di impianto, e anche di eccessiva onerosità della stessa (ad esempio in termini di dosaggio di carbone attivo), il fatto che, a livello iniziale, i gas di gassificazione siano meno inquinati dei gas di incenerimento, costituisce un aspetto positivo.
- Ad oggi i livelli di recupero energetico sono analoghi, in alcuni casi inferiori, a quelli di un inceneritore, in ragione del fatto che i processi di recupero energetico normalmente adottati a valle del trattamento termico dei rifiuti sono di tipo convenzionale (ciclo a vapore) e non consentono di ottenere alcun miglioramento dell'efficienza di produzione di energia elettrica, rispetto ai tradizionali impianti di incenerimento. Lo stato dell'arte delle tecnologie per la purificazione del gas non consente di conseguire gli standard qualitativi richiesti per l'alimentazione di apparati altamente performanti, in termini di resa di produzione in elettricità (ad esempio turbogas, motori ciclo Otto) e sussistono, tuttora, fenomeni di usura e sporcamento, non compatibili con l'esercizio industriale dell'impianto.

Nel valutare e individuare la tecnologia di trattamento termico dei rifiuti che possa soddisfare le esigenze di smaltimento della Provincia di Torino, occorre fare riferimento alle **migliori tecniche disponibili** per il contenimento delle emissioni di diversa natura, oltre che ad una serie di specifici requisiti ovvero la tecnologia dovrà essere:

- provata, consolidata, referenziata
- flessibile, di agevole gestione e controllo
- di elevata affidabilità e ridotta richiesta di manutenzione
- a costi accettabili, ma soprattutto certi
- a ridotto impatto sull'ambiente (emissioni, reflui liquidi, residui solidi)
- energeticamente efficiente ed efficace (massimo recupero e minimi autoconsumi, costanti nel tempo)
- a rischio minimo in termini di sicurezza e di salute.

Alla luce di quanto sopra e dagli approfondimenti effettuati si può concludere che la fattibilità di un impianto di trattamento termico a tecnologia innovativa nella Provincia di Torino dovrebbe essere condizionata al rispetto di una serie di requisiti minimi che orientativamente si indicano nella tabella seguente.

Tab. 7.3 – Requisiti minimi orientativi per l'impianto a tecnologia innovativa

Parametro		**Unità di misura**	**Valore di riferimento**
N° ore di funzionamento l'anno		Ore/anno	= 7.200
Rendimento elettrico (energia elettrica netta detratti gli autoconsumi)		Energia elettrica ceduta alla rete esterna/energia termica dei rifiuti in ingresso (%)	= 20%
Volume di fumi prodotto per tonnellata di rifiuto trattato		Nm^3/t	4.500 – 6.000 (BAT)
Emissioni in atmosfera	Polveri totali	[mg/Nm^3]	<5
	Acido cloridrico (HCl)	[mg/Nm^3]	<8
	Acido Fluoridrico (HF)	[mg/Nm^3]	<1
	Ossidi di zolfo (come SO_2)	[mg/Nm^3]	<40
	Ossidi di azoto (come NO_2)	[mg/Nm^3]	<100
	Sostanze organiche sotto forma di gas o vapori (come TOC)	[mg/Nm^3]	<10
	Monossido di carbonio (CO)	[mg/Nm^3]	<30
	Idrocarburi policiclici aromatici (IPA)	[mg/Nm^3]	<0,01
	Diossine e furani (PCCD e PCDF)	[ngTEQ/Nm^3]	<0,01
	Cadmio e Tallio (Cd+Tl)	[mg/Nm^3]	<0.05
	Mercurio (Hg)	[mg/Nm^3]	<0.05
	Metalli pesanti (Sb+As+Pb+Cr+Co+Mn+Ni+V+Sn)	[mg/Nm^3]	<0.05
Produzione di residui solidi		% rispetto al rifiuto in ingresso	<20%
Contenuto di carbonio nel residuo solido		%	<2,5%
Tariffa di conferimento (al netto di ecotasse)		Non superiore a quella del termovalorizzatore del Gerbido (ad oggi € 97,5)	

BIBLIOGRAFIA

1. Rapporto sullo stato del sistema di gestione dei rifiuti, *Osservatorio Rifiuti Provincia Torino luglio 2008*
2. Programma Provinciale Gestione Rifiuti, *Provincia di Torino novembre 2006*
3. Piano d'Ambito 2008-2014- Prima attivazione, *ATO Rifiuti Torinese, dicembre 2008*
4. Il termovalorizzatore della Zona Nord della Provincia di Torino, *ATO Rifiuti Torinese, novembre 2006*
5. Integrated Pollution Prevention and Control - Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration, *August 2006*
6. Gasification Processes for Generating Syngas, *Juniper 1 settembre 2008*
7. ENEA e le tecnologie per la gestione sostenibile dei rifiuti, *Workshop 18 giugno 2008 Roma*
8. Le tecnologie per il recupero di energia dai rifiuti a confronto, *Giornata di Studio 18/06/2008 Politecnico di Milano, sede di Piacenza*
9. Sviluppi tecnologici dei trattamenti termici dei rifiuti, *Pasquale De Stefanis, Convegno "Per una gestione sostenibile dei rifiuti: tecnologie a confronto", Bologna, 9 luglio 2007*
10. Il ruolo del recupero energetico nel ciclo integrato di gestione dei rifiuti urbani, *Pasquale De Stefanis, Convegno "La gestione integrata dei rifiuti: ricerche,tecnologie e aspetti gestionali" Latina, 28 maggio 2009*
11. Rapporto conclusivo della commissione per le migliori tecnologie di gestione e smaltimento dei rifiuti, *aprile 2007*
12. Advanced Thermal Treatment of Municipal Solid Waste, *DEFRA, Deparment for Envronment Food and Rural Affairs, 2007*
13. Costs of incineration and non-incineration – Energy from waste technologies, *Greater London Authorithy, gennaio 2008*
14. The viability of advanced thermal treatment of MSW in the UK, *Fichtner Consulting Engineers limited, marzo 2004*
15. Ingegneria Ambientale, Quaderno n. 45 "Il recupero di energia dai rifiuti: la pratica, le implicazioni ambientali e l'impatto sanitario*", U. Veronesi, M. Giugliano, M. Grosso, V. Foà*
16. Novel and innovative pyrolysis and gasification technologies for energy efficient and environmentally sound MSW disposal, *T. Malkow, Waste Management 24 (2004)*
17. Linee guida per l'individuazione e l'utilizzazione delle migliori tecniche disponibili per gli impianti di incenerimento dei rifiuti- *Commissione ex art. 3 , comma 2 D . Lgs 372/99*
18. Relazione conclusiva dei lavori della Commissione per il supporto tecnico scientifico nelle valutazioni connesse alla realizzazione di un impianto per il trattamento dei rifiuti organici e di un impianto per il trattamento della frazione finale residua post raccolta differenziata dei rifiuti (DGC di Genova n°288/2008)- *A. Tornavacca, P. Fontanella, O. Paladino, O. Risso, M. Solari, C. Sacco, giugno 2009.*
19. Analisi e comparazione delle tecnologie più idonee per il secondo impianto di trattamento area nord dei rifiuti urbani, assimilati e fanghi della Provincia di Torino, *R. Laraia, F. Chiampo, J. Krüger*

20. Analisi delle tecnologie di smaltimento dei rifiuti urbani esistenti e loro possibile diffusione nel territorio del Friuli Venezia Giulia, *M.Salvagno et al.*

21. Analisi e comparazione delle tecnologie più idonee per il secondo impianto di trattamento Area Nord dei rifiuti urbani, assimilati e fanghi della Provincia di Torino, *Laraia, Chiampo, Kruger, Giugno 2006*

22. Review of small scale waste to energy conversion systems, *IEA Bioenergy agreement - task 36 work topic 4, Wes Stein e Lasse Tobiasen - CSIRO Energy Technology Australia, Marzo 2004*

23. Gassificazione a letto fluido di CDR e imballaggi post-consumo Un biennio di sperimentazione del progetto di ricerca Amra-Conai, *Umberto Arena Maria Laura Mastellone- AMRA S.c.ar.l., 2009*

24. *Evaluation of Emissions from Thermal Conversion Technologies Processing Municipal Solid Waste and Biomass, University of California, Riverside, Giugno 2009*

25. *Thermal treatment review, Waste Management World July, 2007 Author(s): Nickolas Themelis*

26. *Technology Evaluation and Economic Analysis of Waste Tire Pyrolysis, Gasification, and Liquefaction, University of California Riverside, Marzo 2006*

27. *Los Angeles County Conversion Technology Evaluation Report, Alternative Resources Inc, ottobre 2007*

28. *Evaluation of municipal solid waste conversion technologies, Alternative Resources Inc, Aprile 2008*

29. *Conversion Technologies Status Update Survey, California Integrated Waste Management Board, aprile 2009*

30. Focused Verification and Validation of Advanced Solid Waste Management Conversion Technologies, *Alternative Resources Inc, Marzo 2006*

31. Industrial combustion of waste in the energy challenge – innovate or stagnate, An overview of waste processing in the context of resource recovery, *Kevin Whiting Technical Director, Juniper, gennaio 2007*

32. Convertion technology evaluation report, *URS 18 Agosto 2005*

33. Evaluation of new and emerging solid waste management technologies - *New York City Economic Development Corporation and New York City Department of Sanitation, 16 Settembre 2004*

34. Evaluation of Conversion Technology Processes and Products, *September 2004, College of Engineering-Center for Environmental Research and Technology University of California Dept. of Biological and Agricultural Engineering University of California*

35. New Technologies Demonstrator Programme - Catalogue of Applications- DEFRA, UK 2005

36. Production of synthesis gas by biomass gasification, *James T. Cobb, Jr., P.E., Associate Professor Emeritus, University of Pittsburgh, Aprile 2007*

37. Comune di Campi Bisenzio "Analisi delle esperienze più virtuose di raccolta differenziata, recupero e riduzione di rifiuti in Italia – Individuazione e verifica funzionale di tecnologie alternative alla termovalorizzazione" *(A cura di Giovanni Lippo e Simone Bonari) - Ottobre 2008*

38. Juniper's review of the AlterNRG Weatinghouse plasma gasification process, *Schwager e Whiting, novembre 2008*

39. La gassificazione del CDR come parte del ciclo integrato di trattamento dei rifiuti solidi urbani, *R. C. Noto La Diega , Ingegneria Sanitaria Ambientale, Settembre 2009*

40. L'usine Arthélyse est définitivement fermée: un énorme gâchis écologique, *Emmanuel Crépelle, 4 febbraio 2009*

41. Development Status of BGL-Gasification- *F. Kamka, A. Jochmann SVZ Schwarze Pumpe, Germany International Freiberg Conference on IGCC & XtL Technologies 16-18 Giugno , 2005*

42. An overview of waste processing in the context of resource recovery, *Kevin Whiting Technical Director Juniper, British Flame Workshop, 16 gennaio 2007*

43. 2008 Annual Progress Report*, Plasco Energy Group, 30 marzo 2009*

44. Sistema non combustivo per l'energia, *Vuzeta 2009*

45. Workshop in Applied Earth System Policy Analysis Final Workshop Report, *COLUMBIA UNIVERSITY's, primavera 2005*

46. New and Emerging Conversion Technologies Report to the Legislature, *California Integrated Waste Management Board, giugno 2007*

47. Energy from gasification of solid wastes*, V. Belgiorno et al. , Waste Management 23 (2003) 1–15*

48. Gestione e innovazione della termovalorizzazione dei rifiuti, *A. Benassi, Ravenna, 2 ottobre 2009*

49. Gasification as an Advanced Conversion Technology (ACT)*, Whiting, 2008*

50. Planned infrastructure for implementing the island's Waste Strategy & Consideration of possible alternative approaches, Juniper Consultancy Services Limited, 2008

51. Comune di Campi Bisenzio "Relazione tecnica per la verifica delle buone pratiche di prevenzione e gestione dei rifiuti e delle alternative all'inceneritore della piana fiorentina " (A cura di Giuseppe Banchi e Rossano Ercolini) -ottobre 2008

52. Comune di Campi Bisenzio "Impianto di gassificazione al plasma di Utashinai (Giappone), Report Tecnico" (A cura di Giovanni Lippo e Simone Bonari) –maggio 2009

53. The Plasma Gasification Process, *Alter NRG and Westinghouse Plasma Corp., Calgary Regional Partnership Waste Summit, April 9, 2008*

54. Energy from Waste by Pyrolysis and Gasification the Experience and Performance of an Operational Plant, *R. Hogg Proceedings of the International Conference on Sustainable Solid Waste Management, 5 - 7 Settembre 2007, Chennai, India. pp.385-392*

55. Relazione esplicativa, tecnologia di gassificazione Energos- Energos 2009

56. Impianto di produzione di energia da materiale organico, Euroclima

57. Il ciclo integrato dei rifiuti in Campania: prospettive e possibilità reali di applicazione, *Consiglio Nazionale delle Ricerche, Dipartimento Energia e Trasporti, 2008.*

58. Impianti innovativi per lo smaltimento localizzato a ridotto impatto ambientale di rifiuti urbani ed industriali- *P. Capaldi, CNR- Dipartimento di Energia e Trasporti, 22 Aprile 2009 – Cagliari*

59. Relazione TechTrade-ICOM GEIE, *Giugno 2009*

60. Relazione Inter Engineering*, Luglio 2009*

61. Thermal treatment methods for waste recycling in Germany, *R. Berghoff, J. G. Kim, International Symposium Resource Recycling R&D Center /Chemistry Engineering Association in Korea - 21 April 2006*
62. Development Status of BGL- Gasification Report, *F. Kamka, A Jochmann SVZ Schwarze Pumpe, Germany International Freiberg Conference on IGCC & XtL Technologies June 16-18, 2005*
63. British Gas/Lurgi Gasifier IGCC Base Cases, NETL *September 1998, Latest Revision June 2000*
64. Lurgi's MPG and BGL Gasifiers at SVZ Schwarze Pumpe status and experiences in IGCC application, *C. Erdm, W. Liebner, 17-20 ottobre 1999, San Francisco, California*
65. Operating Results of the BGL Gasifier at Schwarze Pumpe, *H.J.Sander, G. Daradimos, H. Hirschfelder, 12-15 ottobre 2003 San Francisco, California*
66. Mitsui Babcock Energy Limited- Submission to Greater London Authority City Solutions Stakeholders on Municipal Waste Management
67. Reclamation Waste Treatment Using a Gasification and Melting System Ken Takamiya, *M. Osada, H. Shibaike, H. Kajiyama Nippon Steel Engineering, 15 ottobre 2007, Cagliari Italy*
68. Direct Melting System, *Nippon Steel Engineering CO.,Ltd, Paul Wurth Italia S.p.A*
69. Relazione TPF-Basse Sambre, *maggio 2009*
70. Atti del Convegno "Tecnologie per la valorizzazione energetica dei rifiuti urbani ed assimilabili", Politecnico di Torino, *30 giugno 2008*
71. Relazione Tecnogranda, *12 giugno 2009*
72. THERMOSELECT – An Advanced Field Proven High Temperature Recycling Process, *ottobre 2003*
73. An overview of the history and capabilities of the thermoselect technology, *F. Campbell, Novembre, 2008*
74. Nuove esperienze industriali di valorizzazione energetic dei rifiuti urbani. Il caso della gassificazione, *F.Martino, M. Zagaroli, C.Riva*
75. Thermal treatment review, *N. J. Themelis, Waste Management World, luglio 2007*
76. Case study Production of Fuels from Waste & Biomass by the EDDITh Thermolysis Process-Recent Industrial Developments, *E. Marty 30/09/2002*
77. The eddith thermolysis process a ground-breaking solution for clean treatment of wastes, *G. H. Martin, É. Marty and P. Flament, febbraio 1998*
78. States of Jersey solid waste strategy technology- Review 2008, *B. Fichtner*
79. Web Links to Conversion Technology Information and Studies County of Los Angeles, California and New York City, *ARI Alternative Resources, Inc. January 2009*

Siti internet

80. http://www.alternrg.ca
81. http://www.ethosrecycling.co.uk/
82. http://www.ebara.co.jp
83. http://science.howstuffworks.com/plasma-converter4.htm

84. www.defra.gov.uk
85. www.ecologiainformatica.com
86. http://www.energ.co.uk/
87. http://www.enerwaste.com
88. http://www.hitachizosen.co.jp/english/index-e.html
89. http://www.ecquologia.it
90. http://www.terranavita.com
91. http://www.planetgroup.co.uk
92. http://www.pupia.tv/aversa/notizie/0001315.html
93. www.entech.net.au
94. www.ietenergy.com
95. http://www.wastegen.com
96. http://www.hitachizosen.co.jp/english/index-e.html
97. http://www.khi.co.jp/index_e.html
98. http://www.gec.jp/WASTE/data/waste_C-1.html
99. http://www.kobelco-eco.co.jp/english/index.html
100. http://www.gec.jp/JSIM_DATA/WASTE/WASTE_3/html/Doc_436.html
101. http://www.plascoenergygroup.com
102. www.startech.net
103. www.hitechambiente.com
104. http://www.pyromex.it/
105. http://www.thide.com/
106. http://www.vuzeta.com/