

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in
Ingegneria per l'Ambiente e il
Territorio

Tesi di Laurea Magistrale

*Analisi delle tecnologie di incenerimento e gassificazione
dei rifiuti:*

sviluppo di un modello di stima

*Analysis of waste incineration and gasification
technologies:*

development of an estimation model



Relatore

Prof.ssa Mariachiara Zanetti

Correlatore

Prof.ssa Deborah Panepinto

Candidata

Beatrice Pasquini

Anno Accademico 2020/2021

INDICE

1. INTRODUZIONE	9
2. PROCESSI DI TRATTAMENTO TERMICO DEI RIFIUTI.....	13
2.1 Stato dell'arte	13
2.2 Generalità	16
2.3 Incenerimento	21
2.4 Gassificazione	23
2.5 Pirolisi	37
2.6 Processi combinati.....	39
2.7 Normativa.....	40
3. RECUPERO ENERGETICO.....	45
4. EMISSIONI GASSOSE	50
4.1 Particolato	51
4.2 Sostanze acide.....	52
4.3 Ossidi di azoto	54
4.4 Sistemi FGT	56
5. RESIDUI SOLIDI	60
5.1 Bottom ashes.....	63
5.2 Flying ashes.....	70
5.3 Residui solidi dal trattamento fumi o propri dei processi	72
6. IL MODELLO MATEMATICO	74
6.1 Struttura	75
6.2 Composizione del rifiuto.....	75
6.3 Input	76
6.4 Combustione	78
6.5 Trattamento delle polveri.....	83
6.6 Trattamento sostanze acide	84
6.7 Trattamento degli ossidi di azoto	85
6.8 Reagenti.....	85
6.9 Residui solidi.....	87
6.10 Energia	87
6.11 Gassificazione	89

INDICE

6.12 Limiti all'emissione in atmosfera	91
6.13 Criticità	92
7. CONCLUSIONI.....	94
BIBLIOGRAFIA.....	96

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1- Rifiuti urbani pro capite posti in discarica dal 2009 al 2018	10
Figura 2- Finevita dei rifiuti in EU	12
Figura 3- Rifiuti urbani inceneriti in Italia e UE (2007-2016).....	13
Figura 4- Rifiuti urbani inceneriti in Europa nel 2016	14
Figura 5- Principali impianti di gassificazione e pirolisi (IPPC, 2006).....	15
Figura 6- Schema di processo termico	16
Figura 7- Struttura impiantistica dei processi di trattamento termico.....	19
Figura 8- Forno a griglia	22
Figura 9-Forno a letto fluido [8]	23
Figura 10-Schematizzazione delle possibili configurazioni di gassificazione	24
Figura 11- Rapporto tra ER, temperatura e efficienza di conversione	30
Figura 12-Reattore updraft [11]	33
Figura 13-Reattore downdraft [11]	34
Figura 14- Rappresentazione schematica dei reattori BFB e CFB	36
Figura 15- NOx prodotto, NOx ridotto e ammoniac slip in dipendenza dalla temperatura [12]	55
Figura 16-Configurazioni per il sistema FGT.....	57
Figura 17- Codici CER per incenerimento o pirolisi di rifiuti.....	67
Figura 18- NOx in funzione della temperatura	81
Figura 19- NOx in funzione dell'eccesso d'aria	81

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1-Condizioni operative dei trattamenti termici	18
Tabella 2- Prodotti dei trattamenti termici	18
Tabella 3-Prodotti teorici gassificazione	26
Tabella 4- Prodotti percentuali tipici	38
Tabella 5- Processi combinati	40
Tabella 6- Limiti di emissione atmosferica dei macroinquinanti	43
Tabella 7- Limiti di emissione atmosferica dei microinquinanti	43
Tabella 8- Efficienza netta delle tecnologie di produzione energetica	45
Tabella 9- Fattori che influenzano la produzione di energia	46
Tabella 10- Fattori di conversione dell'energia [18]	47
Tabella 11- Produzione ed esportazione di elettricità per tonnellata di MSW	48
Tabella 12- Produzione ed esportazione di calore per tonnellata di MSW	48
Tabella 13- Percentuale di efficienza media si sistemi CHP	48
Tabella 14- Tecnologie FGT in Europa (2000/2001) [12]	56
Tabella 15- Valori limite di emissione gassosa secondo normativa e BAT - IPPC,2006	58
Tabella 16- Range tipici di produzione di residui solidi	61
Tabella 17- Limiti per l'utilizzo e smaltimento delle ceneri pesanti da incenerimento in Italia [16]	65
Tabella 18-Quantitativo di ceneri rispetto al rifiuto entrante [17]	66
Tabella 19- Composizione del residuo solido di fondo [17]	66
Tabella 20- Caratteristiche di accettabilità in discarica per inerti	67
Tabella 21- Composizione elementale delle classi merceologiche	75
Tabella 22- Classi merceologiche	77
Tabella 23-Composizione elementare	77
Tabella 24- NOx termici	82
Tabella 25-Efficienze di abbattimento polveri	83
Tabella 26- Quantità di reagenti e residui dell'abbattimento acido	86
Tabella 27- Quantità di reagenti dell'abbattimento di NOx	87
Tabella 28-Limiti di legge e delle BAT	91

Estratto

Il presente lavoro si pone l'obiettivo di sviluppare un modello matematico il cui fine consiste nel confrontare due diversi processi termici applicati ai rifiuti solidi urbani: nello specifico l'incenerimento e la gassificazione. Il metodo si basa quindi sul confronto svolto dal punto di vista dell'energia prodotta ed esportata, stimata in dipendenza dalle tecnologie utilizzate e caratteristiche di processo. Il modello fornisce inoltre gli strumenti per un confronto diretto tra le diverse configurazioni e condizioni operative per quello che riguarda i processi di gassificazione.

I risultati non prescindono dalla valutazione dei limiti di emissione imposti dalla normativa italiana. Per questo è possibile verificare quale modalità di trattamento del flusso gassoso risulta essere meno impattante.

Il modello esposto è stato formalizzato attraverso risultati che sono stati evinti da uno studio approfondito delle diverse tecnologie, attraverso una ricerca in letteratura dello stato dell'arte ed una raccolta di nozioni ed informazioni scientifiche, che hanno permesso di chiarire i residui corrispondenti ai diversi processi e le rispettive caratteristiche e opportunità.

Attualmente il panorama mondiale è ancora caratterizzato da una ridotta valorizzazione termica dei rifiuti, a vantaggio dello smaltimento in discarica e dell'utilizzo di combustibili fossili. Parallelamente la letteratura non offre studi approfonditi capaci di fornire una risposta pratica per quanto concerne la valorizzazione di un residuo.

L'elaborato svolto auspica quindi la redazione di un modello che possa diventare uno strumento utile all'analisi del trattamento termico di rifiuti derivanti da raccolta indifferenziata. Una risorsa pratica volta ad incentivare il recupero dell'energia laddove il riciclo non sia possibile o vantaggioso.

Data la natura del modello è stato inevitabile apporre semplificazioni ed approssimazioni, può essere comunque un ottimo strumento per una stima, che permetta una sensibilizzazione su quelli che sono i vantaggi e le caratteristiche operative mostrando i risultati previsti in dipendenza dalle specifiche condizioni locali.

Partendo dai calcoli ottenuti, l'utenza avrà uno strumento pratico per la valutazione della soluzione che massimizzi l'efficienza e minimizzi gli scarti, in linea con il concetto di circular economy.

Abstract

The present paper provides a mathematical model whose aim is to compare two thermal processes applied to municipal solid waste: incineration and gasification. The method is based on the estimation of the produced and exported energy, depending on the technologies and process conditions. In addition, the model provides the tools for a direct comparison between the possible configurations and operating conditions of a gasification process.

The respect of the emission limits in atmosphere imposed by directives is verified. As a result, the best treatment methodology of the gas flow can be easily detected.

The model was developed starting from an in-depth study of the different technologies, from research of the state of art in literature and a collection of scientific information and notions. These data also explain and describe the processes' residues in characteristics and opportunities.

So far, thermal valorisation of waste has a reduced application in global scale, in favour of the disposal in landfills and the consumption of fossil fuels. At the same time, literature doesn't offer detailed studies capable of providing a practical answer concerning the valorisation of a residue.

Therefore, there paper provides a model that could become a helpful tool for the analysis of the thermal treatment of undifferentiated waste. It is also a practical resource to increase the energy recovery where recycling is not possible or beneficial.

Simplifications and approximations have been inevitable due to the structure of the model. Anyway, it can be a good tool for an estimate and the consequent awareness on the advantages and the operational characteristics, depending on the local conditions.

Starting from the results, users are able to define the best solution to optimise the efficiency and minimise the residues, consistent with the concept of circular economy.

1. INTRODUZIONE

Al giorno d'oggi "rifiuti" e "climate change" Sono tematiche sempre più discusse, divenute ormai centrali per quelle che sono le politiche attuate sia a livello nazionale che internazionale.

La crescente consapevolezza che non esista un pianeta B ha messo in luce tutte le criticità e le problematiche presenti nel rapporto uomo-ambiente. Per questo motivo è sorta la necessità di definire ed affinare strategie per raggiungere uno sviluppo sostenibile: ovvero garantire una qualità della vita adeguata ma riducendo contemporaneamente al minimo gli impatti sull'ambiente, così da non compromettere le generazioni future.

Inoltre, a fronte di un sempre più importante incremento della popolazione mondiale e di uno sviluppo tecnologico e sociale rafforzati da una politica fortemente consumistica, si è avuto un preoccupante aumento della produzione di rifiuti con un parallelo cambiamento di quelle che sono la composizione merceologica, caratteristiche chimiche, fisiche ed energetiche. Ciò ha implicato, inevitabilmente, l'insorgere di nuove problematiche dal punto di vista del loro smaltimento e fine vita.

Con il Protocollo di Kyoto, nel 1997, si è introdotto in Italia il concetto di "trattamento" del rifiuto, ovvero la possibilità di valorizzare il rifiuto in base a quelle che sono le specifiche caratteristiche del residuo prodotto. Tale opzione fino ad allora era stata del tutto esclusa, comportando lo smaltimento in discarica di qualsiasi tipologia di rifiuto, tal quale. Di seguito si riporta un grafico, fonte "ISPRA", in cui si mostra e sottolinea la riduzione dei rifiuti urbani posti in discarica nel corso degli anni in Italia ed Unione Europea [1].

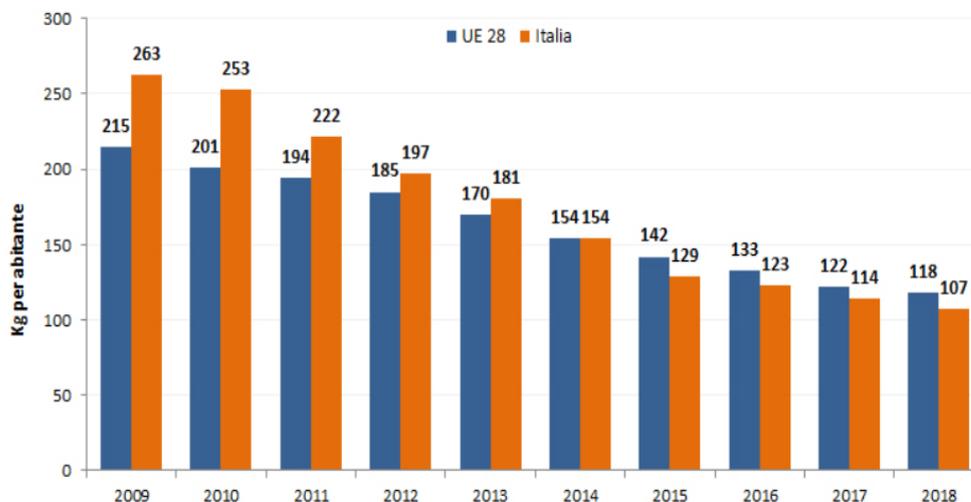


Figura 1- Rifiuti urbani pro capite posti in discarica dal 2009 al 2018

La crescente sensibilità in tema “rifiuti” è dovuta anche alle molteplici Direttive europee, nazionali e mondiali, le quali tendono ad imporre e consigliare sempre più una politica chiara, articolata e rigorosa, al fine di impostare una gerarchia di azioni chiave nella lotta contro l’accumulo incontrollato di rifiuti.

Gli obiettivi imposti dalle nuove Direttive hanno bisogno, per essere raggiunti, dello sviluppo di tecnologie innovative capaci di far fronte alle problematiche attuali. Ciò comporta una riduzione al minimo degli sprechi ed un incremento dello sfruttamento delle migliori proprietà dei rifiuti, disincentivando così il deposito in discarica.

A tale proposito sono stati sviluppati i sistemi Waste to Energy, ovvero tecnologie basate sul recupero di energia in dipendenza dal valore energetico del rifiuto. Tale modalità di trattamento è l’ultima nella gerarchia delle soluzioni [2], prima dello smaltimento in discarica:

1. Prevenzione,
2. Preparazione per il riuso,
3. Riciclo,
4. Altri recuperi (ex. recupero energetico),
5. Discarica.

I vantaggi relativi all'utilizzo del potere calorifico intrinseco dei rifiuti sono inoltre legati alla riduzione dello sfruttamento di carburanti fossili per la produzione di energia e la conseguente riduzione di emissioni di CO₂, come stabilito dagli obiettivi a livello globale. Ciò che viene smaltito in discarica a valle del trattamento termico risulta di conseguenza in volume molto ridotto e con una minima o nulla componente ancora putrescibile.

Tali trattamenti termici si distinguono in tradizionali, con ossidazione completa ed eccesso di ossigeno, ed innovativi con ossigeno sotto stechiometrico.

Questi ultimi si basano sulla trasformazione del rifiuto in ingresso in gas combustibile da cui poi ottenere energia, ciò comporta una riduzione dei volumi di gas emessi e quindi minore generazione di inquinanti e maggiore recupero energetico tramite l'utilizzo di motori a gas e turbine a ciclo combinato.

A tal proposito lo studio svolto mira alla creazione di un modello di calcolo che, al variare degli input del rifiuto in ingresso e delle condizioni operative, ci permetta una visione globale dei principali output che si avranno. Questo lavoro dà quindi la possibilità di considerare le diverse tecnologie utilizzate e le efficienze tipiche allo stato dell'arte, potendo così confrontare due tecnologie, combustione e gassificazione, ed i rispettivi prodotti. Ciò permette all'utente di analizzare e comprendere gli aspetti più significativi per ogni tecnologia valutandone inoltre i punti deboli.

Si è deciso di sviluppare tale studio dato il ridotto numero di impianti di incenerimento ancora presenti nel territorio nazionale, come riportato nel grafico seguente, da "ISPRA, rapporto 2020" [1], ed incentivare così l'utenza a valutare i possibili vantaggi legati alle tecnologie termiche emergenti.

INTRODUZIONE

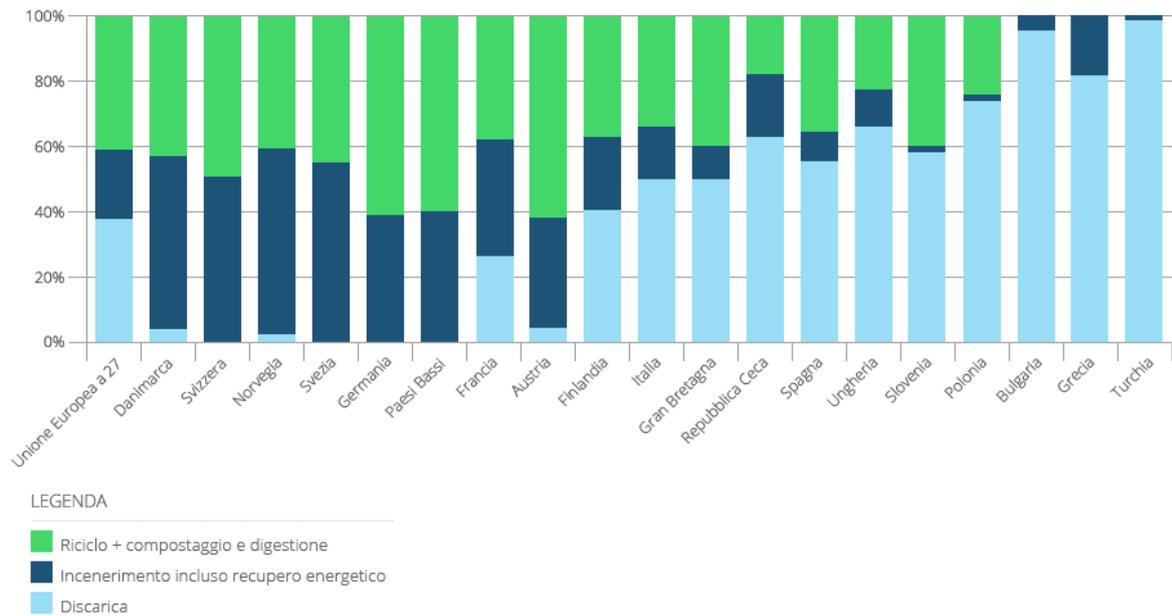


Figura 2- Finevita dei rifiuti in EU

Lo studio tramite il modello dà gli strumenti per:

- Quantificare i volumi in uscita nelle differenti fasi e di conseguenza le quantità di prodotti di scarto da porre in discarica o recuperare;
- Caratterizzare i fumi in uscita in termini di inquinanti principali in dipendenza dalle tecnologie di abbattimento fumi utilizzate e quindi confrontarne le concentrazioni con i limiti di legge;
- Avere un'indicazione del quantitativo di energia prodotta in dipendenza della tecnologia utilizzata ed i metodi di utilizzo del calore.

2. PROCESSI DI TRATTAMENTO TERMICO DEI RIFIUTI

2.1 Stato dell'arte

Negli anni il trattamento dei rifiuti ha avuto sempre più importanza, non fermandosi ad una generale distinzione tra le diverse matrici merceologiche, ma implementando sempre più sistemi complessi di raccolta differenziata e sensibilizzazione della popolazione.

A causa di questa trasformazione e crescente consapevolezza si è in continua ricerca di nuove tecnologie e modalità di trattamento che rendano minimo lo scarto e la sua pericolosità nel rispetto dell'ambiente. Un ruolo fondamentale in questa gestione integrata e sostenibile spetta ai trattamenti termici: incenerimento, gassificazione e pirolisi.

Partendo dagli inceneritori, i più diffusi in Europa sono con tecnologia "a griglia", descritti successivamente, ammonta a 408 il numero di impianti di incenerimento dei rifiuti attivi nel 2012 e presenti in 23 nazioni. In alcune realtà, impianti di questo genere sono stati inseriti in contesti urbani, ad esempio la stessa Torino o Parigi. Alcuni paesi come Svezia, Svizzera e Danimarca utilizzano largamente tale tecnologia indirizzandoci anche fino alla metà del totale di rifiuti prodotti [3].

Nonostante ciò sono anche presenti paesi che ricorrono a tale trattamento per una bassissima percentuale di rifiuti o per nulla.

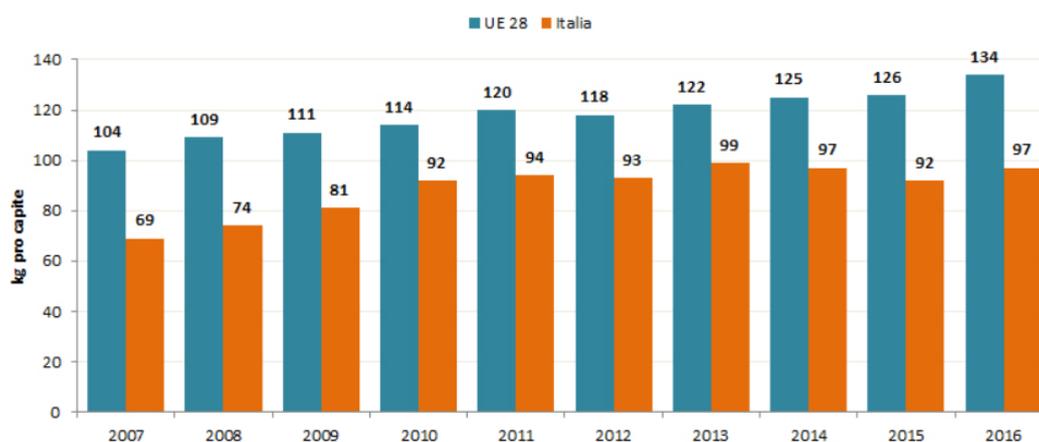


Figura 3- Rifiuti urbani inceneriti in Italia e UE (2007-2016)

Il grafico mostra i rifiuti urbani pro capite inceneriti in Italia e in UE dal 2007 al 2016, fonte “ISPRA” [1]. Si può notare come in un decennio si è assistito ad un sempre maggiore incremento di tale quantità e quindi utilizzo della metodologia applicata agli rsu.

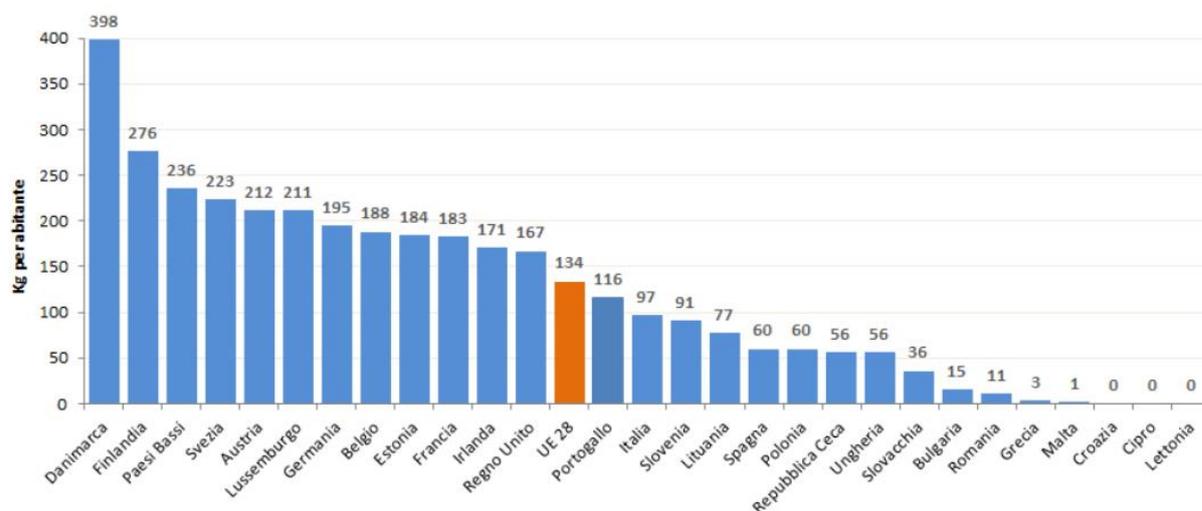


Figura 4- Rifiuti urbani inceneriti in Europa nel 2016

Nel grafico riportato sopra invece si ha la quantità di rifiuti urbani inceneriti pro capite in Europa nell’anno 2016, fonte “ISPRA” [1]. Da sottolineare come sia in linea con ciò che è stato precedentemente detto e quanta variabilità si abbia tra i vari Stati e quindi le differenti politiche adottate dai diversi Paesi.

Per quanto riguarda la gassificazione e la pirolisi sono due tecnologie molto meno utilizzate, soprattutto nel trattamento termico dei rifiuti solidi. La loro adozione è sempre più in crescita a fronte delle richieste, da parte della commissione europea, di avere un minor impatto possibile sull’ambiente e ridurre le emissioni di CO₂ (tali tecnologie producono meno fumi rispetto all’incenerimento).

A tutto ciò fa eccezione il Giappone, dove si trovano concentrate quasi la totalità degli impianti a tecnologia innovativa, di cui la maggior parte sono gassificatori o processi combinati ed una minima parte restante pirolisi.

In altri paesi (in particolare USA, Regno Unito e Italia) solo di recente si sta considerando la possibilità di applicare tecnologie di trattamento termico alternative all’incenerimento per lo smaltimento dei rifiuti urbani.

PROCESSI DI TRATTAMENTO TERMICO DEI RIFIUTI

Di seguito si riportano i principali impianti esistenti (IPPC, 2006) [4] di trattamento termico alternativo dei rifiuti solidi urbani, importante è appunto notarne la localizzazione geografica a scala mondiale.

Location	Company (Technology)	Began Operation	Feedstock	Gasification/Pyrolysis	Capacity	Syngas / Waste Heat Utilization
Kita-Iyushu City (Shin-Moji), Japan	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, Japan	Nippon Steel	2009	MSW	G	530 t/d	9 MW Power
Ibaraki City #1, Osaka Pref., Japan	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, Japan	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
Ishihaya, Nagasaki Pref., Japan	Thermoselect/JFE	2005	MSW	G	300 t/d	SNG for Steam Turbine
Goyang City, Republic of Korea	Nippon Steel/Posco E&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
Nishiuburi, 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, Industrial & Sludge	P	70,000 t/y	Power Generation
Narashino City, Chiba Pref., Japan	Nippon Steel	2002	MSW, Sludge	G	201 t/d	2.4 MW Power

Location	Company (Technology)	Began Operation	Feedstock	Gasification/Pyrolysis	Capacity	Syngas / Waste Heat Utilization
Itoshima Area, Fukuoka Pref., Japan	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 For	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, Japan	Nippon Steel	2003	MSW, Sludge	G	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., Japan	Nippon Steel	2006	MSW, Sludge	G	148 t/d	2.0 MW Power
Mutsu, Aomori Prefecture, Japan	Thermoselect/Mitsubishi Materials/JFE Sub-License	2003	MSW	G	140 t/d	SNG for Steam Turbine
Hata Regional Municipalities, Japan	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., Japan	Nippon Steel	2008	MSW	G	132 t/d	1.7 MW Power
Toyokawa Hoi Health Union, Japan	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

Figura 5- Principali impianti di gassificazione e pirolisi (IPPC, 2006)

2.2 Generalità

I trattamenti termici consistono in processi chimici a cui sono soggetti i rifiuti ad alta temperatura e condizioni al contorno specifiche. Il rifiuto verrà dunque scomposto in sostanze con composizione chimica più semplice riducendone la pericolosità per l'uomo e l'ecosistema e riducendo al minimo anche la massa che sarà destinata alla discarica, sotto forma di ceneri. Questo utilizzo di alte temperature e le reazioni chimiche prodotte comportano la possibilità a volte di recuperare l'energia derivante dal rifiuto. Tramite l'utilizzo di appositi motori e turbine si avrà la possibilità di produrre energia elettrica e termica da sfruttare sia internamente, per compensare i consumi, sia esternamente, vendendola sulla rete nazionale ricavandone profitto.

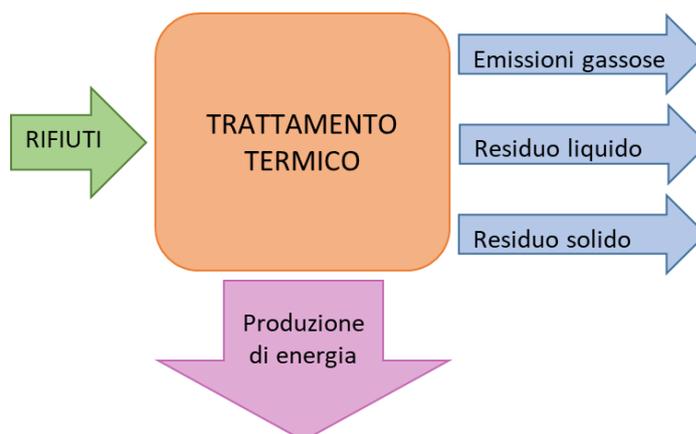


Figura 6- Schema di processo termico

Nello schema è esemplificato il processo in termini di input e output: l'input è il rifiuto (ed in caso l'agente ossidante), mentre gli output saranno nelle diverse fasi solida, liquida e gassosa in volumi e caratteristiche differenti in dipendenza dalla tecnologia di riferimento, ed inoltre si avrà la produzione di energia come specificato pocanzi.

Gli impianti di trattamento termico si distinguono per la loro capacità di sfruttare e convertire il valore energetico del rifiuto in: combustione diretta, gassificazione e pirolisi. Ciò che maggiormente contraddistingue queste tre tipologie di trattamenti è la quantità di agente ossidante aggiunto rispetto al quantitativo di rifiuto e all'ossigeno necessario per la sua completa ossidazione.

La combustione diretta (o incenerimento) è caratterizzata da un eccesso di aria oltre al necessario stechiometrico, dovuto dalla necessità di avere una turbolenza tale da garantire l'ossidazione completa del rifiuto. Ciò comporta una rapida ossidazione di tutte le sostanze organiche presenti e la relativa trasformazione in forma gassosa, generando come output principalmente gas, dati dalla grande quantità di agente ossidante immesso, e scorie e ceneri, ovvero la componente solida risultante. In tale processo l'agente ossidante è l'aria e la temperatura varia tra gli 800 e i 1400°C [5].

L'incenerimento è il processo più largamente applicato e conosciuto da più tempo, rendendo il suo utilizzo e funzionamento chiaro e sicuro.

Al contrario la gassificazione e pirolisi sono due tecnologie innovative, che si stanno maggiormente sviluppando negli ultimi anni, sono entrambe sotto stechiometriche rendendo molto complessa la valutazione dell'equilibrio tra le varie reazioni e quindi i prodotti risultanti da tale parziale combustione.

La gassificazione è caratterizzata da un'aggiunta di agente ossidante sotto-stechiometrico (aria, vapore o ossigeno), comportando perciò una parziale reazione e quindi minori volumi dei fumi in uscita. Il gas prodotto nella gassificazione è detto "syngas", reattivo e con un alto potere calorifico, poi inviato al recupero energetico. Le temperature variano tra gli 800 e i 1600°C, ad alte temperature si può inoltre assistere alla vetrificazione delle scorie, ovvero la loro inertizzazione, facilmente utilizzabili ad esempio nel campo delle costruzioni. Infine la pirolisi è una tecnologia che non si basa sull'insufflaggio di un agente ossidante, ma soltanto sulla quantità di ossigeno presente internamente al rifiuto, ad una temperatura minore delle altre (250-700°C). Ciò comporta che come prodotti sono presenti i gas, le ceneri, scorie e char (ceneri con del carbonio incombusto), ma anche un prodotto in fase liquida chiamato Tar [6] [7].

Il tutto è sintetizzato nelle tabelle riepilogative seguenti:

Tabella 1-Condizioni operative dei trattamenti termici

Condizioni operative				
		Combustione diretta	Gassificazione	Pirolisi
Temperatura	°C	800-1400	800-1600	250-700
Pressione	bar	1	1	1
Atmosfera		Aria	Aria, O ₂ , Vapore	inerte
Rapporto stechiometrico		>1	<1	0

Tabella 2- Prodotti dei trattamenti termici

Prodotti			
	Combustione diretta	Gassificazione	Pirolisi
Gassosi	CO ₂ , H ₂ O, O ₂ , N ₂	H ₂ , CO, CH ₄ , (N ₂)	H ₂ , CO, idrocarburi, (N ₂)
Liquidi	-	-	Tar
Solidi	Scorie e ceneri	Scorie e ceneri + vetrificato	Scorie e ceneri, Char

Importante sottolineare anche come la combustione diretta e la gassificazione sono due processi esotermici, perciò producono calore durante le reazioni autoalimentando il sistema. Al contrario la pirolisi, date le sue condizioni operative, risulta endotermica, poiché le reazioni che avvengono non liberano abbastanza calore presente nel rifiuto e dunque avrà bisogno di apporto di calore per supportare e mantenere le condizioni di esercizio.

I principali vantaggi relativi a tali tecnologie di trattamento termico sono:

- Ingente riduzione delle volumetrie di rifiuti;
- Riduzione della pericolosità tramite la concentrazione o immobilizzazione degli inquinanti inorganici, agevolandone lo smaltimento;
- Riduzione, e in certi casi eliminazione, della componente di inquinanti organici;
- Produzione di energia elettrica e termica quando l'impianto è dimensionato per la cogenerazione;
- Riduzione dell'emissione di CO₂ dovuta alla produzione di energia interna e non da combustibili fossili;

- Riduzione delle emissioni di metano che si avrebbero con la decomposizione anaerobica del rifiuto;
- Possibile utilizzo di materiali nelle ceneri, come i metalli o le ceneri vetrificate.

È possibile semplificare la struttura impiantistica di tali processi di trattamento termico e scomporla in blocchi successivi in cui avvengono fasi ben specifiche. Lo schema è riportato nell'immagine seguente.

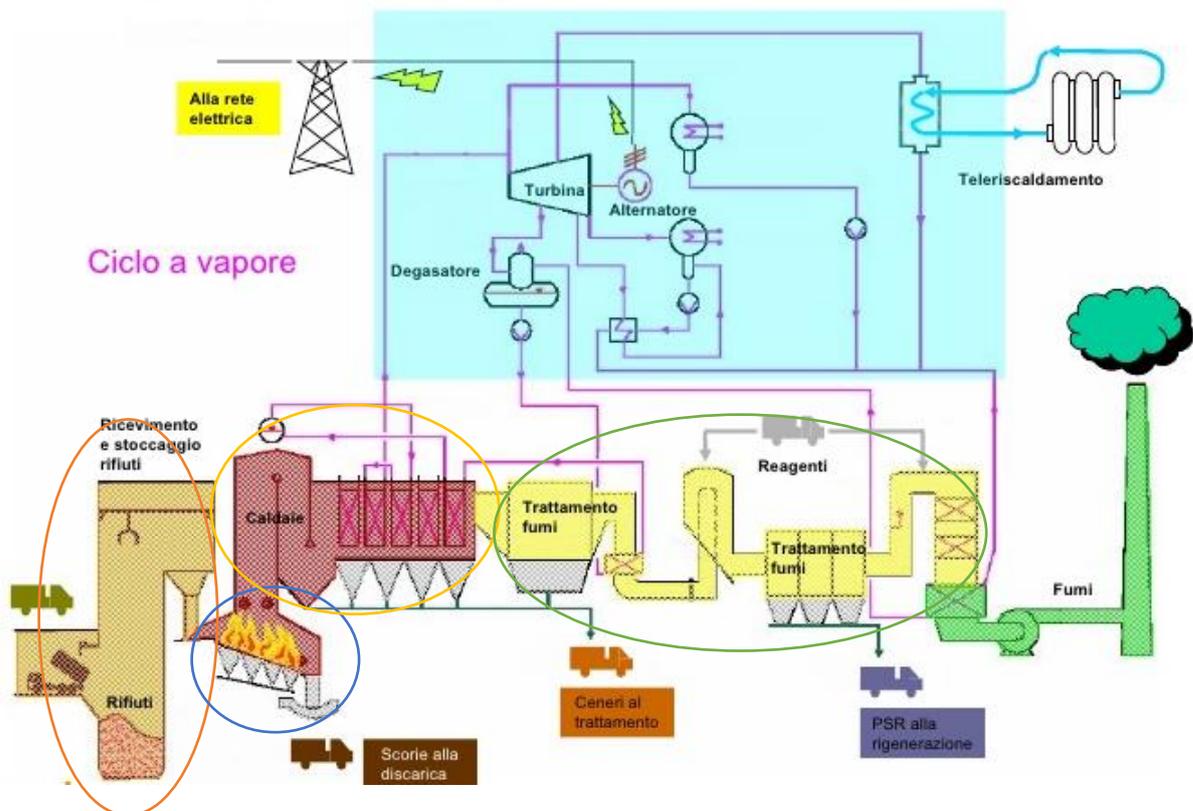


Figura 7- Struttura impiantistica dei processi di trattamento termico

Si ha come primo step una fossa di accumulo del rifiuto in cui, tramite delle operazioni degli operatori, i rifiuti vengono mescolati al fine di avere un input il più possibile omogeneo nel tempo. Tramite la miscelazione ci si assicura un potere calorifico inferiore del rifiuto in ingresso piuttosto costante, poiché un basso PCI in un carico potrebbe essere un problema per il funzionamento dell'intero impianto.

Da qui il materiale viene caricato nella camera di combustione e si ha il secondo step, ovvero il processo termico, dove avviene il vero trattamento del rifiuto ed i composti organici vengono decomposti. Questo è il fulcro di tutto il processo e le condizioni al

contorno presenti in questa fase saranno ciò che maggiormente influenzerà l'output e le rispettive diverse fasi.

Il terzo step consiste in una caldaia e sistema di recupero energetico, infatti i fumi prodotti nella fase precedente generano vapore (ad alta temperatura e pressione) nella caldaia scambiando calore con l'acqua. Il vapore generato alimenta una turbina a vapore, un motore endotermico o un ciclo combinato gas-vapore, che produce elettricità trasformando l'energia termica del vapore in meccanica.

A questo punto i fumi sono soggetti ad una serie di trattamenti poiché la loro composizione è tale da non permettere un'emissione in atmosfera tal quale. In dipendenza dalla tipologia di rifiuti, i fumi potrebbero essere carichi di sostanze indesiderate quali gas acidi, NOx, polveri e microinquinanti come i PCDD, perciò il trattamento prima dell'emissione è inevitabile per poter rientrare entro i limiti imposti dalla normativa vigente.

I principali vantaggi da sottolineare delle tecnologie alternative (gassificazione e pirolisi) rispetto all'incenerimento sono:

- Maggiore resa di produzione di energia elettrica tramite l'utilizzo di motori a gas;
- Minore quantità di fumi prodotti e quindi da trattare ed emessi;
- Possibilità di recuperare della materia in termini di sostanze organiche;
- La gassificazione può produrre ceneri vetrificate se condotta a alte temperature, impiegate nell'industria delle costruzioni;
- Minori problemi di polveri fini (ceneri volanti) e diossine.

Come aspetti negativi invece:

- Richiedono un materiale in ingresso il più possibile omogeneo e quindi un processo di triturazione a monte;
- Dipendono fortemente dalle caratteristiche del materiale in ingresso, maggiore è l'umidità o le sostanze incombustibili e minore sarà in vantaggio energetico.
- Nella gassificazione se si utilizza l'ossigeno come agente ossidante può dare problemi di sicurezza.

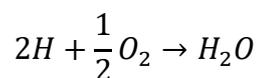
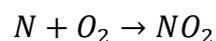
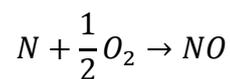
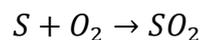
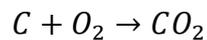
Di seguito si procede con una descrizione più dettagliata dei tre processi esaminati con particolare attenzione alla gassificazione e combustione poiché sono l'argomento centrale dello studio sviluppato.

2.3 Incenerimento

Come precedentemente detto, il trattamento termico dei rifiuti più comunemente utilizzato e sviluppato è l'incenerimento, utilizzato in un ampio spettro di tipologie di scarti: rifiuti solidi urbani, rifiuti risultanti dalla raccolta differenziata, combustibili da rifiuto, rifiuti pericolosi ed industriali.

Consiste in un'ossidazione completa dei componenti organici del rifiuto ottenuta tramite l'insufflaggio di aria con ossigeno in quantità sopra-stechiometrica per garantire la completa reazione. A partire da molecole più complesse si originano perciò molecole più semplici allo stato gassoso che vanno a produrre un grande volume di fumi da sottoporre a trattamento prima dell'emissione in atmosfera.

Di seguito si riportano le principali reazioni di ossidazione della combustione diretta:



Importante è sottolineare che data la configurazione del processo tutti i reagenti sopra mostrati si ossidano portando alla trasformazione di tutta la componente organica in fase gassosa. Inoltre, altri componenti del rifiuto reagiscono producendo ceneri ed inquinanti gassosi.

Per quanto riguarda la componente inorganica invece non si hanno essenziali alterazioni; non andando a reagire, arriva a fine processo in fase solida sotto forma di ceneri o scorie, successivamente da smaltire o recuperare.

Le tecnologie di forno nella combustione diretta maggiormente utilizzate sono il forno a griglia ed il forno a letto fluido, mentre altre meno diffuse sono il forno a tamburo rotante

ed il forno a piani multipli (non RSU) in cui sono trattati solitamente fanghi e dunque non vado a descrivere.

- **Forno a griglia**

Nella BREF relativa agli incenerimenti è la tecnologia consigliata (BAT) per l'incenerimento dei rifiuti solidi urbani, ed infatti è la metodologia più largamente utilizzata data la sua flessibilità alle variazioni di caratterizzazione merceologica in ingresso.

Consiste in una griglia inclinata, su cui si posizionano i rifiuti, al di sotto della quale si ha l'insufflaggio dell'aria primaria, ovvero l'aria necessaria all'ossidazione in quantità stechiometrica rispetto alla componente organica presente nel rifiuto. La restante quantità di aria (eccesso) verrà aggiunta nella cappa del forno, così che al procedere dei fumi questi vadano incontro a tale aria che, in caso che qualche componente non sia ossidato, assicura la completa reazione e riuscita del processo. Tale aria secondaria è utile anche a controllare la temperatura in modo tale che la fiamma si mantenga sempre viva.

La griglia può essere principalmente di due tipi, mobile o fissa: la prima produrrà specifici movimenti per far avanzare il rifiuto, ne esistono di diversi tipi e funzionamenti.

Il tempo di permanenza del rifiuto nel forno è necessario per la completa ossidazione ed in generale compreso tra 30 e 60 minuti. Le scorie (bottom ashes) vengono a valle del forno scaricate in vasche di accumulo a bagno d'acqua, in modo da garantirne anche il raffreddamento.

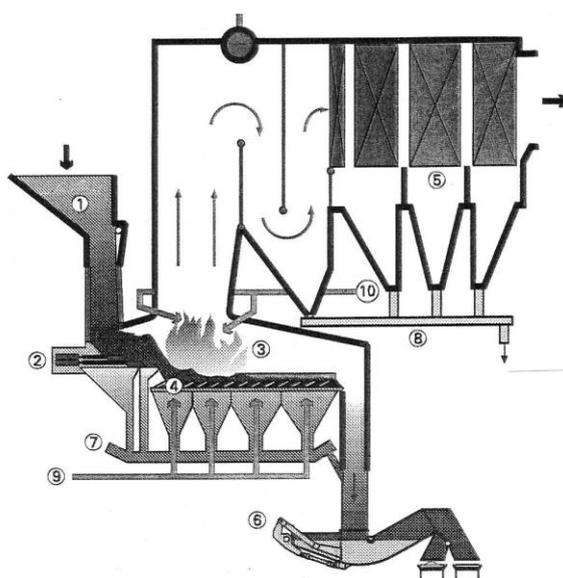


Figura 8- Forno a griglia

- **Forno a letto fluido**

Costituito da una camera di combustione all'interno della quale viene mantenuto del materiale inerte in certe specifiche quantità, solitamente composto di sabbia carbonatica capace di reagire con l'ossigeno e il biossido di zolfo, e formare solfati di calcio che vengono eliminati unitamente alle ceneri del letto consentendo in tal modo di ridurre le emissioni inquinanti di SO₂. Tale letto è tenuto in sospensione da una corrente ascendente di aria (agente ossidante) immessa da sotto una griglia di distribuzione posta sul fondo. Il movimento generato del letto di sabbia garantisce un buon contatto comburente-combustibile, e quindi omogeneità di distribuzione di aria e reazione completa, oltre a una uniformità di temperatura.

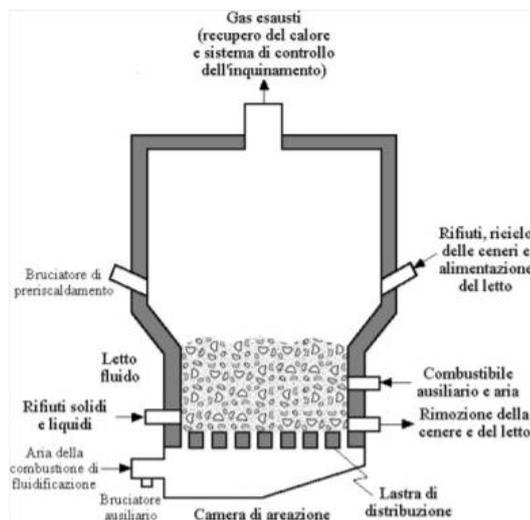


Figura 9-Forno a letto fluido [8]

2.4 Gassificazione

La gassificazione è una delle due principali tecnologie alternative alla combustione diretta. Tali tecnologie si basano sulla produzione di un gas (e in caso di pirolisi anche fase liquida) combustibile, conseguentemente bruciato con eccesso di ossigeno al fine di produrre energia oppure sfruttato come materia prima nella produzione di combustibili oppure chemicals nell'industria chimica.

Lo scostamento dall'incenerimento è riscontrabile anche nella diffusione e conoscenza di queste specifiche tecnologie, come introdotto precedentemente nella descrizione dello stato dell'arte.

Nonostante la ridotta diffusione, le tecnologie in esame sono in continua evoluzione, presentando vantaggi quali: la maggiore produzione di energia grazie all'utilizzo di motori a gas o turbine ad elevata efficienza e la riduzione della quantità di fumi da trattare e in generale da emettere, a causa delle minori quantità di agente ossidante introdotto. Gli aspetti al contrario negativi possono essere una triturazione necessaria a monte, a causa della necessità di un input più possibile omogeneo, oppure la stretta dipendenza dal tipo di materiale in ingresso e sue caratteristiche.

Si hanno due possibili schemi: gassificazione termica e di potenza, di seguito riportati, (Rielaborato da Arena et al., 2011) [9].

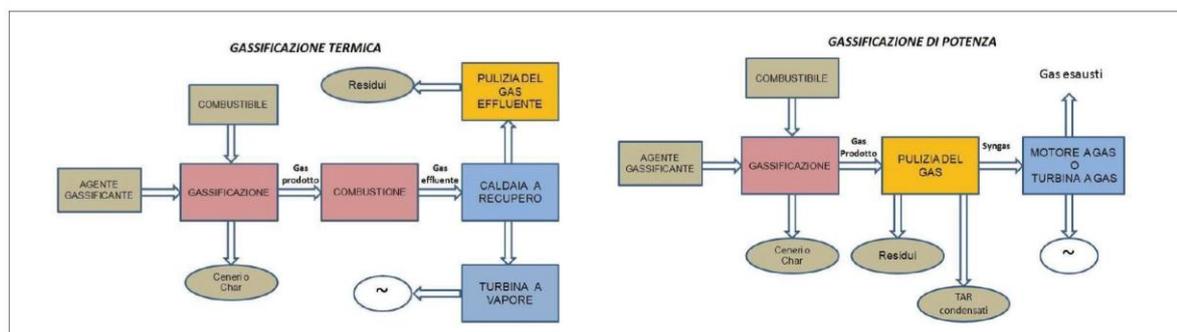


Figura 10-Schematizzazione delle possibili configurazioni di gassificazione

Preferibile risulta quella di potenza che a valle della camera di gassificazione presenta la camera di combustione, in cui il gas prodotto, con il relativo HV viene fatto bruciare in presenza di aria, e soltanto in seguito trattato e prodotto energia.

Ciò è preferibile perché si ottiene una combustione più pulita ed efficiente grazie a:

- Un'ottima miscelazione di una piccola quantità d'aria con il gas di sintesi,
- La possibilità di rimuovere alcune impurità dal gas,
- La continuità di processo ed un facile controllo.

La gassificazione è una tecnologia ancora non molto sviluppata per quanto concerne il trattamento termico dei rifiuti, ma è largamente impiegata e consolidata nel recupero di

energia e materia derivanti da biomassa e carbone. La sua applicazione nel campo dei rifiuti è essenzialmente dovuta alla crescente consapevolezza, a fine anni '70, dei potenziali effetti negativi sulla salute umana e sull'ecosistema degli inceneritori a quel tempo presenti in commercio.

Attualmente è noto come entrambe le tecnologie rispettino i limiti imposti dalla normativa, mediante l'ausilio di adeguate tecnologie di trattamento dei fumi.

La gassificazione è un processo chimico estremamente complesso, composto da un elevato numero di reazioni chimiche interconnesse ed a una temperatura generalmente superiore a 800°C che dipende principalmente dalla tipologia di reattore utilizzato e il rifiuto in ingresso. Come precedentemente anticipato, è un processo endotermico che avviene in presenza di una quantità di ossigeno sotto lo stechiometrico, rispetto alla quantità effettivamente necessaria per la completa ossidazione dei componenti del rifiuto.

Con queste specifiche condizioni operative il combustibile solido (rifiuto) viene trasformato in un combustibile gassoso con elevato potere calorifico, detto syngas.

Il gas ad elevate temperature è composto da grandi quantità di prodotti come monossido di carbonio, biossido di carbonio, metano e idrogeno in proporzioni variabili in dipendenza da determinate condizioni di processo. In quantità minime si ha la produzione di ammoniaca, acido solforico e acido cloridrico data la natura riducente dell'atmosfera all'interno del reattore.

La frazione solida prodotta da tale processo è chiamata char, ovvero un residuo solido composto da inerti e la frazione organica non convertita. La quantità dipende da diversi fattori, primo tra tutti il materiale in ingresso, oltre che l'umidità, la tipologia di agente gassificante, tempo di residenza, configurazione del reattore e condizioni operative.

Una grande differenza tra inceneritore e gassificatore è data dalla tipologia di agente gassificante utilizzabile. Infatti, mentre nella combustione diretta l'agente utilizzato è esclusivamente l'aria, nella gassificazione sono presenti diverse possibilità in cui condurre il processo:

1. Ossidazione parziale con aria

Il gas prodotto è ricco di azoto atmosferico (N₂) e caratterizzato da un potere calorifico in un intervallo tra 4 e 8 MJ/Nm³, il più basso tra le tre configurazioni di processo di gassificazione. Dato il suo valore ridotto in passato non era possibile utilizzarlo in turbine a gas, mentre ora si hanno a disposizione nuove tecnologie capaci di sfruttare e bruciare anche syngas con PCS come questi.

2. Ossidazione parziale con ossigeno

Il syngas prodotto ha livelli di azoto minimi e dunque un maggiore PCS, compreso tra 8 e 14MJ/Nm³. L'utilizzo dell'ossigeno puro come agente ossidante, quindi, comporta portate inferiori di gas e maggiori poteri calorifici dell'aria, minore quantità di tar e la produzione maggiore di ceneri vetrose, ovvero ceneri più facilmente smaltibili e meno pericolose. Di contro si hanno maggiori costi di reperimento e può portare a situazioni problematiche dal punto di vista della sicurezza dell'impianto e quindi della gestione.

3. Ossidazione parziale con vapore

Questa soluzione genera un gas a basso contenuto di azoto con potere calorifico generalmente tra 14 e 20 MJ/Nm³. Data la natura dell'agente il processo ha bisogno di una sorgente esterna che fornisca il calore per le reazioni di gassificazione, poiché non sono previste reazioni di ossidazione esotermiche.

Tali modalità operative ed i rispettivi range di composizione sono sintetizzate nella tabella di seguito riportata.

Tabella 3-Prodotti teorici gassificazione

	Aria	O ₂	Vapore
CO (%)	12-15	30-37	32-41
CO ₂ (%)	14-17	25-29	17-19
H ₂ (%)	9-10	30-34	24-26
N ₂ (%)	56-59	2-5	2.5
CH ₄ (%)	2-4	4-6	12.4
Potere calorifico superiore (MJ/Nm ³)	4-8	8-14	14-20
		<Tar ceneri vetrose	Necessaria fonte esterna di calore

Da sommare a queste tre soluzioni è da ricordare la gassificazione al plasma, in cui la fonte di calore è rappresentata dalle torce al plasma che producono un gas ionizzato grazie alla creazione di un arco elettrico, raggiungendo temperature di 15000°C.

Come precedentemente accennato, la gassificazione è un processo molto complesso caratterizzato da diverse reazioni concatenate tra loro. Il processo però può essere schematizzato come una successione di fasi endotermiche e esotermiche in cui soltanto alla fine si sviluppano tali numerose reazioni. Una prima fase di riscaldamento ed essiccamento avviene a una temperatura di circa 160°C. La seconda di pirolisi a temperature fino a 700°C è caratterizzata dal rilascio di gas non condensabili (CH₄ e CO₂), gas condensabili (idrocarburi e tar) e la componente non volatilizzata denominata char. Solo a questo punto avvengono le reazioni chimiche accennate, in ambiente riducente. Naturalmente la suddivisione in fasi è una semplificazione, nella realtà avviene tutto contemporaneamente nello stesso reattore e senza una suddivisione chiara e netta nel passaggio da una all'altra fase.

Le numerose reazioni chimiche sono riportate di seguito [6]:

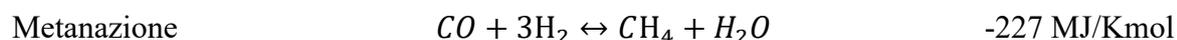
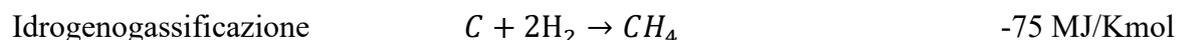
- Reazioni di ossidazione:

Ossidazione parziale del Carbonio	$C + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO$	111MJ/Kmol
Ossidazione Monossido di Carbonio	$CO + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO_2$	-283 MJ/Kmol
Ossidazione Carbonio	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	-384 MJ/Kmol
Ossidazione Idrogeno	$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$	-242 MJ/Kmol
Ossidazione parziale	$C_nH_m + \frac{n}{2}O_2 \rightarrow nCO + \frac{m}{2}H_2$	Esotermica

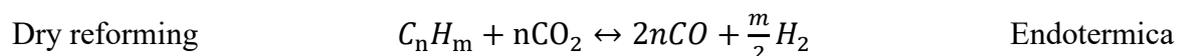
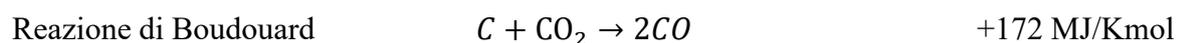
- Reazioni di gassificazione con vapore:

Reazione acqua-gas	$C + H_2O \rightarrow CO + H_2$	+131 MJ/Kmol
Reazione di shift	$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$	-41 MJ/Kmol
Steam methane reforming	$CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2$	+206 MJ/Kmol
Steam reforming	$C_nH_m + nH_2O \leftrightarrow nCO + \left(n + \frac{m}{2}\right)H_2$	Endotermica

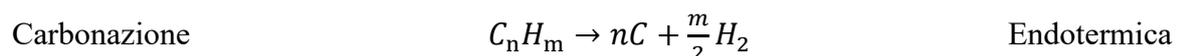
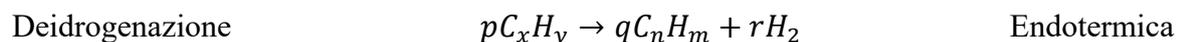
- Reazioni di gassificazione con Idrogeno:



- Reazioni di Gassificazione con biossido di Carbonio:



- Decomposizione del tar e di idrocarburi:



Dove C_xH_y sta ad indicare il tar ed in generale i frammenti di combustibile più pesanti e C_nH_m sono gli idrocarburi con il minor numero di atomi di carbonio e/o maggiore grado di insaturazione rispetto a C_xH_y .

È possibile notare come quasi tutte le reazioni sono di equilibrio, eccetto quelle di ossidazione, aspetto che rende la determinazione dei prodotti molto complessa ed articolata. Infatti la composizione finale dipenderà dalla velocità di reazione e dalla presenza di effetti catalitici.

Nonostante tale complessità si possono ricavare importanti nozioni e caratteristiche dei prodotti in dipendenza dalle condizioni di processo del gassificatore [10], in particolare:

- In presenza di basse temperature, ci si aspetta che carbonio e ossigeno tendano ad essere sotto forma di anidride carbonica e char;
- Ad alte temperature, in caso di eccesso di carbonio, il biossido di carbonio reagisce formando ossido di carbonio. Un altro aspetto rilevante è che

l'ossigeno tende a reagire con il carbonio formando CO e CO₂ invece che con l'idrogeno andando a formare acqua. Ciò comporta che aumentando la temperatura aumenta anche il contenuto di idrogeno.

- Alle temperature operative di gassificazione il metano ed altri idrocarburi tendono a decomporsi, provocando nel caso di temperature molto elevate (>1000°C) una riduzione consistente di tar, anche se una eliminazione completa non sarà mai possibile e dunque è sempre necessario un sistema di rimozione o conversione a valle;
- Il char è in ogni caso presente ed equivale ad una perdita di conversione, essendo del carbonio non reagito che pertanto fuoriesce come prodotto in fase solida.

Date le innumerevoli reazioni e complessità reattoristica dei processi di gassificazione, la variabilità delle condizioni operative e relative differenze nei prodotti finali, è ora importante andare a definire quali sono i parametri fondamentali che principalmente vanno ad influenzare il processo di gassificazione e qualità del prodotto finale (solido e gassoso).

Questi parametri operativi sono: rapporto di equivalenza (ER), profilo di temperatura nel reattore, tempi di residenza, composizione del rifiuto e sue caratteristiche, agente gassificante e temperatura in ingresso. Ora si procede con la spiegazione di ciascuno:

- **Rapporto di equivalenza (ER)**

Corrisponde al rapporto adimensionale tra la quantità di ossigeno immessa tramite l'agente ossidante e la quantità stechiometrica realmente necessaria al fine di ossidare tutto l'ingresso. Tale parametro è il più significativo in un impianto di gassificazione, dato che al variare della quantità di ossigeno presente cambiano notevolmente i prodotti perciò i gas (syngas) e la loro composizione e relativa energia. Minore sarà la quantità di ossigeno aggiunta, maggiore sarà la somiglianza del gassificatore ad una condizione

di pirolisi, al contrario se il rapporto si avvicina all'unità ci si aspetterà un risultato simile alla completa combustione (incenerimento).

Il rapporto è strettamente legato alla temperatura. Infatti, definita una temperatura di gassificazione, il rapporto di equivalenza deve avere un valore tale da garantire l'autosostentamento del processo senza l'aggiunta di calore dall'esterno.

Tale relazione è mostrata nel grafico di seguito riportato [7], in cui si può notare come al variare dell'ER vari contemporaneamente la temperatura e il rendimento del processo: a maggiore ER, aumenta la temperatura ma diminuisce il rendimento, provocando un incremento di N_2 e CO_2 nel gas e riduzione del potere calorifico. Ciò è in linea con quanto detto precedentemente, ovvero che a rapporto di equivalenza prossimo all'unità corrisponde una maggiore somiglianza alla condizione di incenerimento e dunque minore potere calorifico restante nel syngas.

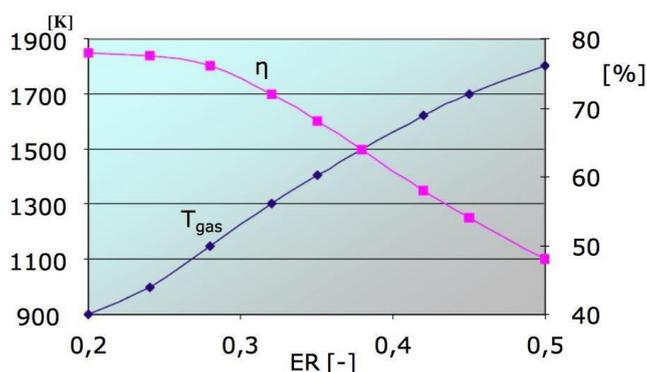


Figura 11- Rapporto tra ER, temperatura e efficienza di conversione

Si noti come tale rapporto è atteso, nella gassificazione, in un range tipico di funzionamento tra 0.2 e 0.5, come riportato nel grafico appena mostrato.

- Temperatura del reattore

Il parametro è meglio intenderlo come il profilo di temperatura presente nelle varie parti del gassificatore. Molto importante e significativo anche per quanto riguarda lo stato delle ceneri pesanti (bottom ashes) in uscita dal gassificatore e la quantità di tar presente nel syngas prodotto. Infatti, come precedentemente accennato, all'aumentare della temperatura è possibile avere una produzione di ceneri vetrificate, più facilmente riutilizzabili date le loro proprietà e la perdita di pericolosità che le rende a tutti gli

effetti un residuo solido inerte, da poter sfruttare ad esempio nel campo delle costruzioni.

In particolare, all'aumentare della temperatura raggiunta durante il processo, il syngas e le sue proprietà migliorano: si ha un aumento delle quantità di H₂ e CO e quindi diminuzione di CH₄, maggiore contenuto energetico e minore quantità di tar.

Ciò nonostante, una temperatura molto elevata ha come contro una gestione dell'impianto più complessa, maggiore spesa energetica e dunque minor rendimento ed alto calore sensibile del syngas con conseguente complessità dell'impianto di recupero di calore.

- **Tempi di residenza**

Il parametro è relativo sia al tempo di permanenza dei rifiuti nel reattore ma anche quello dei gas. Strettamente legati alla tipologia di reattore utilizzato, è possibile variarne il valore in un range molto ridotto di funzionamento.

- **Composizione del rifiuto**

Le caratteristiche del rifiuto in ingresso sono fondamentali per comprendere l'intero processo e quantificarne i prodotti derivanti. Nello specifico la composizione elementare, potere calorifico inferiore, contenuto in ceneri e umidità, contaminanti presenti, densità e dimensione sono gli aspetti che maggiormente influenzano il procedere dell'intero processo di gassificazione e la relativa riuscita. Come visto in precedenza la gassificazione necessita per una buona riuscita di un pretrattamento iniziale al fine di omogeneizzare il più possibile l'input di rifiuti e renderne minima la dimensione, ciò permette una buona sussistenza della reazione.

- **Agente gassificante e relativa temperatura**

Si è già descritta la possibilità di utilizzare diverse tipologie di agenti gassificanti ed i rispettivi aspetti a favore e non. Ma oltre che la loro composizione, anche la temperatura del fluido va ad influenzare i bilanci di massa ed energia del reattore ed è legata al

profilo di temperatura impostato lungo il gassificatore e alla possibilità di recuperare energia dal calore del syngas.

La complessità di tale processo è riscontrabile nell'alto numero di parametri da cui dipende e di cui è necessaria un'accurata taratura in dipendenza dai prodotti che si vogliono ottenere, tecnologia utilizzata e caratteristiche in ingresso.

2.4.1. Tecnologie di gassificazione

In merito all'applicazione industriale, la gassificazione presenta molteplici configurazioni impiantistiche e tecnologie, che oltre all'apparecchiatura utilizzata si differenziano anche nelle condizioni operative adottate nel produrre e utilizzare il syngas prodotto. Dunque, è necessario valutare caso per caso la soluzione ottimale che massimizzi l'efficienza dell'impianto stesso e il recupero energetico dello specifico rifiuto in ingresso.

I reattori principalmente utilizzati sono:

- Reattore a letto fisso;
- Reattore a letto fluido;
- Reattore a tamburo rotante.

Sostanziale differenza tra le diverse tecnologie e soluzioni impiantistiche è riscontrabile nei tempi di permanenza, dalle ore a pochi minuti, e nelle velocità di riscaldamento, da qualche °C/s nel reattore a letto fisso a 100°C/s nei reattori a letto fluido.

Si procede ora con la descrizione di tali soluzioni.

- **Reattore a letto fisso**

La tecnologia si basa sull'entrata del materiale combustibile dall'alto e la sua discesa verso il fondo del reattore, per gravità. Tale tipologia è la più comune e sviluppata a livello industriale, data la semplicità tecnica e l'elasticità rispetto alle condizioni operative richieste. Più in particolare, è la tecnologia utilizzata principalmente negli impianti di media taglia, data l'adattabilità ad un largo range di granulometria, da particelle medie a grandi. Un altro aspetto a favore è la possibilità di funzionamento in continuo o in discontinuo, ovvero in modalità batch, anche se in tale configurazione impiantistica si avrà una riduzione della potenzialità massima dato il bisogno di mantenere la pressione operativa costante.

Questa tipologia di reattori presentano configurazioni differenziate sulla base del moto che avviene tra combustibile e agente ossidante: updraft e downdraft.

1. Updraft

Configurazione denominata anche controcorrente o a tiraggio superiore, dove l'agente ossidante viene immesso dal fondo e sale, mentre il combustibile dall'alto scende verso il basso, facendo il percorso inverso.

La seguente immagine rappresenta la tecnologia appena descritta.

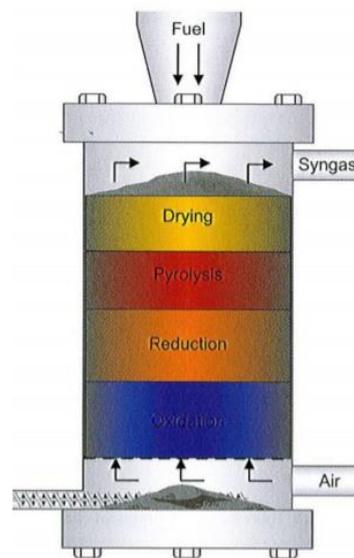


Figura 12-Reattore updraft [11]

Il reattore può essere suddiviso per semplicità in zone differenti in dipendenza dalle temperature e reazioni a cui va incontro il combustibile nel processo chimico.

Il rifiuto nella prima fase è soggetto ad una essiccazione alla temperatura di circa 400°C, nella parte più alta del reattore. Tale fase è seguita da una zona di pirolisi, caratterizzata dalla produzione di char e gas volatili a causa del processo di devolatilizzazione del rifiuto.

Il char, nella fase successiva di riduzione, va incontro alle principali reazioni di gassificazione, mentre l'ultima zona, alla base del reattore, è caratterizzata da reazioni di ossidazione di parte dei prodotti pirolitici a 1000-1300°C. Quest'ultima ha il compito di fornire il calore necessario all'intero processo.

Il gas derivante dal processo fuoriesce dalla parte superiore del reattore a bassa temperatura (200-300°C) con solitamente un elevato contenuto di tar che necessita di un sistema di

pulizia prima dell'emissione. Infatti, un'alta concentrazione di tar sotto forma di vapore viene prodotta durante la fase di pirolisi, una parte va poi a condensare nella zona di essiccazione mentre la rimanente la si ritrova nel syngas.

2. Downdraft

Configurazione detta anche a tiraggio inferiore o equicorrente. Il rifiuto entra come in precedenza nella parte superiore del reattore così come l'agente ossidante, che avrà l'entrata dall'alto o laterale; per questo motivo si avrà che rifiuti e gas procedono nella stessa direzione, grazie all'estrazione del syngas tramite aspirazione nella zona più bassa del reattore. Questo condotto d'aspirazione è a seguito di una griglia con l'obiettivo di separare le ceneri di scarto dal gas prodotto.

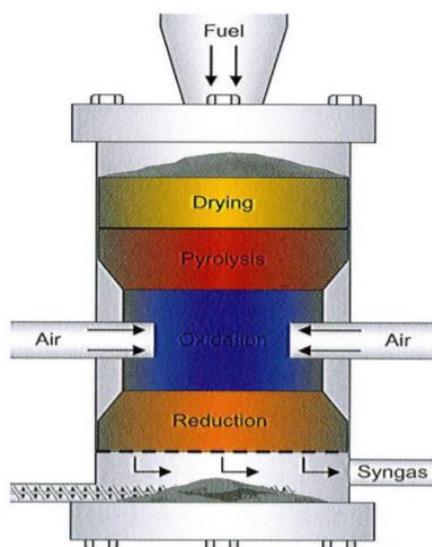


Figura 13-Reattore downdraft [11]

Anche questa configurazione può essere suddivisa in zone in dipendenza dalle temperature e reazioni che avvengono, solo che l'ordine è differente.

Diversamente dall'updraft si ha un restringimento, detta gola, all'altezza della zona di combustione, dove avvengono la maggior parte delle reazioni. A questa altezza si ha l'ingresso dell'agente di gassificazione e le temperature sono tra 1000 e 1300°C.

La produzione di calore in questa zona risulta necessaria per l'essiccamento del rifiuto nella zona più in alto del reattore e per garantire le reazioni di riduzione (endotermiche).

Tra l'essiccazione e la combustione si ha la zona di pirolisi, il cui tar prodotto viene scomposto nella gola grazie a un cracking termico, rendendo particolarmente minimizzata

la quantità di tar nel syngas in tale configurazione. Nonostante ciò, è inevitabile il bisogno di un trattamento del gas al fine di depurarlo dalle impurità.

I vantaggi relativi alla tecnologia a letto fisso sono rappresentati dalla semplicità dell'applicazione e utilizzo, l'affidabilità dato il largo impiego a scala industriale, il basso tenore di tar presente nel gas prodotto che rende facile l'utilizzo di motori a combustione interna per produrre energia elettrica e l'adattabilità a combustibili con bassa percentuale di umidità (minore di 30%) e pezzature medio-grandi (1-3 cm).

- **Reattore a letto fluido**

Il reattore a letto fluido è caratterizzato da una circolazione o sospensione di una miscela composta da combustibile solido, agente ossidante e sostanza inerte, solitamente sabbia silicea o le stesse ceneri prodotte dal rifiuto alimentato.

Tale miscelazione comporta, rispetto al letto fisso, una distribuzione della temperatura più omogenea nella zona di gassificazione, maggiore efficienza nella produzione di syngas e una più elevata velocità di reazione. Anche in questo caso si hanno diverse configurazioni di reattori: a letto fluido bollente, circolante e trascinato.

1. Letto fluido bollente – BFB (Boiling Fluidized Bed)

In questo reattore il contenuto solido è tenuto in sospensione dalla fase gassosa ad una velocità tra 0.7 e 3 m/s, tale da non avere un alto trascinamento di particelle nei fumi.

La configurazione è tale da avere l'agente ossidante insufflato dal basso, sotto una piastra, mentre il rifiuto in ingresso entra lateralmente o superiormente.

Dal punto di vista delle caratteristiche del rifiuto in ingresso è molto flessibile, sia come tipologia, composizione e anche come dimensioni, l'unico aspetto necessario è ci sia una uniformità soprattutto dimensionale per garantire un corretto funzionamento.

2. Letto fluido circolante – CFB

In questa configurazione le particelle sono soggette a moto rotatorio, spinte dall'agente ossidante in movimento. Si tratta di reattori sviluppati in altezza e con diametro ridotto, ma con velocità elevate fino a 8 m/s.

Date le velocità le particelle tendono a venir trasportate fino ad uscire dalla colonna di reattore dalla parte superiore, per tale motivo si ha un affiancamento di un ciclone che

separa la componente solida dal gas prodotto. Le particelle così separate vanno poi a reimmettersi dalla parte inferiore del gassificatore.

I rifiuti in ingresso entrano nella parte bassa del reattore poco sopra la griglia, successivamente sono soggetti a disidratazione e conseguente rapida gassificazione.

L'alta efficienza di combustione e scambio termico è dovuta alle turbolenze elevate causate dal movimento circolare descritto.

Di seguito si riportano entrambe le configurazioni appena descritte, così da mostrarne le differenze impiantistiche più chiaramente.

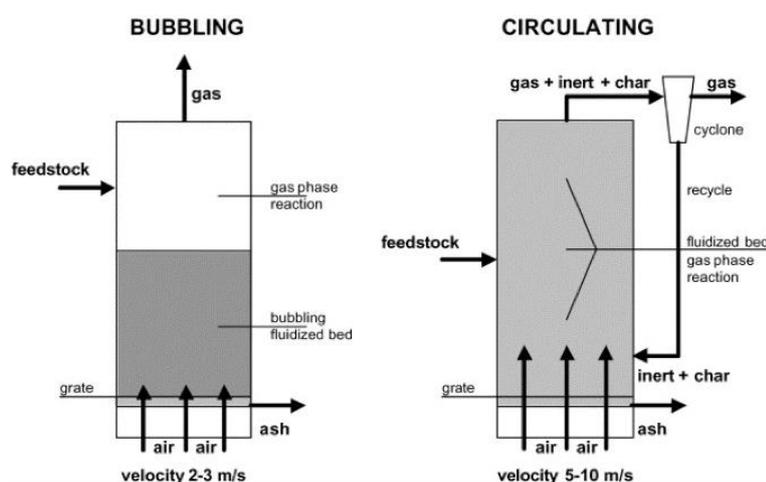


Figura 14- Rappresentazione schematica dei reattori BFB e CFB

3. Letto fluido trascinato

La terza configurazione di letto fluido ha rifiuto e agente gassificante che si muovono in equicorrente senza un materiale inerte.

Date le alte temperature (maggiori di 1200°C) si ottiene un syngas con contenuto di tar molto basso. Inoltre, in questa specifica tecnologia si ha l'aggiunta di particelle di combustibile di ridotta dimensione (minore di 1 mm) all'acqua per produrre la miscela, composta da una concentrazione in solidi maggiore del 60%. L'acqua è necessaria per garantire una moderazione della temperatura, come mezzo di trasporto e in veste di reagente poiché favorisce la formazione di idrogeno.

Nella parte superiore del reattore si ha una fiamma che brucia parte dei carburanti, producendo ingenti quantità di calore a temperature elevate, 1200-1500°C, si dà origine

così ad un syngas di alta qualità con bassissima concentrazione di tar (ci si trova sopra alla temperatura di fusione delle ceneri).

Dunque, le ceneri tendono a cambiare di stato, da solido a liquido, facilitandone la rimozione.

- **Reattore a tamburo rotante**

I reattori a tamburo rotante permettono il movimento tra le zone di reazione e contemporaneamente il mescolamento dei rifiuti durante le reazioni. L'ambito di utilizzo va dall'incenerimento di rifiuti alla produzione di cemento, coprendo una vasta scala di applicazioni.

Il corpo principale del reattore è un cilindro in acciaio, rivestito internamente per evitarne il surriscaldamento. Solitamente inclinato sull'orizzontale, facilita la discesa dei rifiuti verso l'estremità più in basso, controllata a sua volta dalla velocità di rotazione del complesso.

2.5 Pirolisi

La pirolisi è insieme alla gassificazione una tecnologia alternativa alla combustione diretta. Si tratta di un trattamento termico dei rifiuti basato sull'assenza di agente ossidante, una decomposizione in molecole più semplici generata soltanto dall'energia termica in condizioni anaerobiche. Tale processo è endotermico e richiede dunque l'ausilio di calore dall'esterno, ma data la complessità del fenomeno non sono ancora ben chiare le dinamiche e reazioni alla base della decomposizione delle molecole e la produzione di carbonio elementare.

Nota è la composizione dei prodotti in uscita dal processo di pirolisi: residuo solido, liquido e gassoso.

La componente solida è formata da materiale carbonioso, char, caratterizzata dal un potere calorifico nel range di valori 5000-6000 kcal/kg.

La fase liquida, chiamata tar o bio-oil, si ottiene dalla condensazione, costituita da sostanze organiche complesse come alcoli, idrocarburi condensabili e chetoni.

La fase gassosa restante, che non ha condensato, è composta prevalentemente da idrogeno, idrocarburi leggeri, anidride carbonica e monossido di carbonio.

Come detto precedentemente i processi alternativi alla combustione diretta hanno maggiore efficienza se caratterizzati da un input omogeneo. In dipendenza dalle caratteristiche dell'ingresso si avranno diverse proprietà dei prodotti finali e conseguente diverso impiego, in dipendenza dal materiale trattato.

Nel caso di trattamento dei rifiuti il più frequente utilizzo è l'impiego come combustibile per produrre energia.

Un altro aspetto comune alla gassificazione è la dipendenza del processo dalle condizioni operative del trattamento quali temperatura e tempo di trattamento del materiale.

Tabella 4- Prodotti percentuali tipici

Prodotti	Percentuale in peso del prodotto iniziale
Solidi	20-30%
Liquidi	50-60%
Gassosi	15-30%

La temperatura va ad influenzare le quantità dei prodotti in dipendenza dalla lunghezza dell'esposizione: tempi lunghi e temperatura moderata comporta la produzione maggiore di char, al contrario una breve esposizione a temperature medio-alte implica la massima produzione di fase liquida.

Al variare dei parametri operativi fondamentali (temperatura, tempo di processo e pressione) si possono suddividere le tecnologie di pirolisi principalmente in quattro, differenziate dalle percentuali di prodotti ottenute:

1. Pirolisi slow: massimizzazione della produzione di char, grazie alle basse velocità di reazione e le temperature basse, tra 300 e 500°C;
2. Pirolisi convenzionale: Possibilità di utilizzare materia prima di dimensioni maggiori, grazie alle tempistiche maggiori delle ore e la temperatura operativa relativamente bassa, tra 300 e 700°C;

3. Pirolisi flash: il bisogno di temperature alte, circa 1000°C, ed una velocità di riscaldamento molto elevata e tempi di residenza anche minori del secondo rendono tale tecnologia opposta a quella convenzionale precedentemente mostrata;
4. Pirolisi fast: il processo è caratterizzato da condizioni intermedie tra la pirolisi convenzionale e la flash.

Si può dedurre, dunque, che la pirolisi convenzionale favorisce una più omogenea ripartizione tra le fasi, al contrario la flash e la fast incentivano la formazione delle fasi liquida e gassosa, producendo un gas più ricco di idrogeno e monossido di carbonio e quindi a più alto potere calorifico.

Un aspetto di fondamentale importanza del processo di pirolisi, da sottolineare come notevole vantaggio, è l'assenza di residui di lavorazione. Tutto il materiale entrante viene poi smaltito senza essere condotto in discarica, punto fondamentale della politica di circular economy, che come aspetto nevralgico ha la lotta alla produzione di residui e smaltimento in discarica.

Gli scarti vengono vetrificati e di conseguenza utilizzati per produrre sottofondi stradali o simili.

2.6 Processi combinati

Ciò che è stato descritto finora è applicabile singolarmente nel caso in cui i rifiuti da trattare sono pressoché omogenei e con poche differenze dal punto di vista delle caratteristiche chimico-fisiche.

Per questo motivo, nel caso di trattamento di rifiuti meno omogenei nel tempo, come ad esempio gli RSU, si sono sviluppate tecnologie più complesse, descrivibili come una combinazione delle soluzioni viste fino a questo punto. Di seguito si riportano le alternative e combinazioni al momento utilizzate in tali condizioni [12].

Tabella 5- Processi combinati

Processi combinati
Pirolisi + Gassificazione
Gassificazione + Combustione
Pirolisi + Combustione
Pirolisi + Gassificazione + Combustione
Gassificazione + Vetrificazione
Pirolisi + Vetrificazione
Gassificazione + Combustione + Vetrificazione

La scelta tra le diverse configurazioni risiede nei differenti obiettivi da conseguire, in dipendenza dai bisogni e necessità locali in cui va a posizionarsi l'impianto in questione.

2.7 Normativa

Il principale riferimento in Italia per quanto concerne l'interazione tra attività antropiche e ambiente, e più in particolare l'incenerimento di rifiuti, è il D.Lgs. 152/2006 [13]; precisamente la parte IV, titolo III-bis. In questa sezione del Testo Unico Ambientale è presente l'articolo 15 del D. Lgs. 46/2014, attuazione del D.Lgs. 133/2005 "Attuazione integrale della direttiva 2000/76/CE in materia di incenerimento di rifiuti".

In questa sezione si regolamentano tutte le operazioni di incenerimento e co-incenerimento a prescindere dal tipo di rifiuto, oltre alla regolarizzazione di tutte le fasi del trattamento termico dei rifiuti a partire dal conferimento del rifiuto in impianto allo smaltimento ultimo dei prodotti finali residui.

All'interno del D. Lgs.133/2005 [14] sono descritte attentamente le condizioni di esercizio e prescrizioni tecniche per quanto riguarda:

- I valori limite di emissione degli impianti di incenerimento e co-incenerimento;
- Le metodologie di analisi, campionamento e valutazione degli inquinanti prodotti da tali tecnologie;

- Le norme tecniche in merito alle caratteristiche costruttive, funzionali e gestionali da garantire per una adeguata e completa protezione ambientale dalle emissioni;
- Le concessioni e autorizzazioni necessarie per la costruzione, esercizio ed adeguamento degli impianti già esistenti;
- La gestione e caratteristiche dei residui derivanti dal trattamento.

La normativa va a descrivere e prescrivere precisi aspetti fondamentali al processo e al suo sviluppo, descrivendone i limiti da rispettare all'emissione in atmosfera, come operare lo smaltimento del residuo solido (e liquido) e quali sono le autorizzazioni per l'esercizio.

A monte di queste sezioni sono presenti specifiche e fondamentali definizioni, alla base di tutto il processo, necessarie per chiarire con tutti i soggetti il campo di applicazione della norma e caratteristiche.

La prima definizione è proprio quella di rifiuto: “qualsiasi sostanza o oggetto, nelle categorie riportate nell'allegato A alla parte IV del D.Lgs.152/06 [13], di cui il detentore si disfi o abbia l'intenzione o abbia l'obbligo di disfarsi”.

Nella normativa si ha anche la descrizione di residuo come “qualsiasi materiale liquido o solido, comprese le scorie e le ceneri pesanti, le ceneri volanti e la polvere di caldaia, i prodotti solidi di reazione derivanti dal trattamento del gas, i fanghi derivanti dal trattamento delle acque reflue, i catalizzatori esauriti e il carbone attivo esaurito, definito come rifiuto all'articolo 183, comma 1, lettera a), generato dal processo di incenerimento o di co- incenerimento, dal trattamento degli effluenti gassosi o delle acque reflue o da altri processi all'interno dell'impianto di incenerimento o di co-incenerimento”.

Infine, risulta di particolare importanza la definizione di “inceneritore” attribuita dalla norma: “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 a condizione che le sostanze risultanti dal trattamento siano successivamente incenerite [...]”.

Per quanto riguarda la domanda di autorizzazione necessaria all'esercizio e alla messa in funzione: l'AIA, Autorizzazione Integrata Ambientale, è obbligatoria per tutti gli impianti d'incenerimento, e quindi anche gassificazione e pirolisi, con capacità termica nominale maggiore di 3 t/h, di cui al D. Lgs. 59/2005 sulla prevenzione e la riduzione integrate dell'inquinamento (AIA / IPPC) [15]. Tale autorizzazione è singola e comprende tutti gli aspetti che vanno a legare e interconnettere l'attività antropica all'ambiente circostante, regolamentandone il rilascio di inquinanti in tutte le matrici (aria, suolo e acqua). L'obiettivo principale di questa procedura è di studiare l'impianto d'incenerimento e monitorarlo nel tempo, in modo da garantire un graduale adeguamento alle BAT (Best Available Techniques) per ridurre al minimo l'impatto ambientale e rispettare limiti di emissione più stringenti di quelli di legge.

Ai sensi della direttiva europea 96/61/CE (AIA-IPPC) art. 16, la Commissione organizza lo scambio di informazioni tra Stati membri e industrie che desiderano seguire le migliori tecniche disponibili, le prescrizioni in materia di controllo e le modificazioni e sviluppi. Con questo obiettivo la Commissione ha istituito un ufficio (IPPC Bureau) con il compito di redigere, tramite una serie di gruppi tecnici (TWG), dei documenti di riferimento per ogni categoria industriale interessata dall'obbligo di avere l'AIA, chiamati BREFs.

In merito al settore dei rifiuti i documenti BREFs di riferimento elaborati ed adottati dalla Commissione Europea sono due: "Waste incineration" e "Waste treatments" [12].

Riguardo alle specifiche prescrizioni sulle emissioni in atmosfera, come si è detto si avranno limiti stringenti per ogni attività produttiva da rispettare in dipendenza dal tipo di processo.

In merito a questi specifici impianti, la normativa prevede l'installazione di misuratori in continuo SME, sistemi di controllo delle concentrazioni emesse in atmosfera che verificano in continuo, durante tutto il funzionamento, che siano rispettati i limiti di emissione. Tali tecnologie sono previste per verificare e monitorare in continuo NO_x, CO, polveri totali, HCl, SO₂, HF, TOC e NH₃.

Per quanto riguarda invece i metalli, diossine e furani sono previste misure almeno quadrimestrali, eccetto che nel primo anno di funzionamento dell'impianto, in cui è richiesto trimestrale.

PROCESSI DI TRATTAMENTO TERMICO DEI RIFIUTI

Di seguito è riportata la tabella riassuntiva riguardante i limiti di legge per le emissioni in atmosfera, ai sensi del D.Lgs. 133/2005, integrata nel D.Lgs. 152/2006 [13].

Tali valori non potranno essere superati in alcun caso per quanto riguarda le medie giornaliere, mentre le medie in 30 minuti avranno una tolleranza di al massimo 25% superiore.

Tabella 6- Limiti di emissione atmosferica dei macroinquinanti

EMISSIONI GASSOSE	Media giornaliera [mg/Nm³]	Media in 30 minuti [mg/Nm³]
Polveri	10	10
TOC	10	10
HCl	10	10
HF	1	2
SO ₂	50	50
NO e NO ₂ espressi come NO ₂ per i nuovi impianti	200	200
NO e NO ₂ espressi come NO ₂ per gli impianti esistenti con capacità inferiore a 6 t/h	400	-
NH ₃	30	30

Tabella 7- Limiti di emissione atmosferica dei microinquinanti

Diossine e Furani (PCCD+PCDF)	0,1 ng/Nm ³
IPA	0,01 mg/Nm ³
PCB-DL	0,1 ng/Nm ³

Naturalmente, per raggiungere tali limiti, sarà necessario un trattamento dei fumi emessi, in modo tale da abbattere le concentrazioni di contaminanti e ridurre al minimo l'impatto dell'attività sull'ambiente circostante.

Passando allo smaltimento dei residui solidi, uno degli aspetti principali nell'utilizzo di tecnologie di trattamento termico è la riduzione al minimo del volume dei residui solidi e liquidi prodotti, oltre che la riduzione della loro pericolosità.

Tali residui necessitano di un trattamento apposito al fine di agevolarne la movimentazione e smaltimento definitivo. Riguardo alle ceneri pesanti non pericolose, sono presenti apposite norme tecniche, regolamentate dal D.Lgs. 152/06, che definiscono le modalità di gestione e recupero di tali residui solidi. Secondo il D.M. 5/02/1998, le ceneri possono essere usate senza trattamenti e senza test di cessione nella produzione di calcestruzzo e mattoni; al contrario è necessario il test di cessione se vengono utilizzate per realizzare rilevati, sottofondi stradali e recuperi ambientali [16].

Tale argomento relativo ai residui solidi verrà poi sviluppato più approfonditamente nei capitoli successivi.

3. RECUPERO ENERGETICO

Le soluzioni di termovalorizzazione appena presentate sono alla base di ciò che è chiamato “recupero energetico” del rifiuto, ovvero lo sfruttamento delle proprietà calorifiche dello scarto tramite l’utilizzo di processi ad alta temperatura, che hanno l’obiettivo di scomporre e semplificare le catene complesse e trarne il maggior quantitativo possibile di energia riducendo al minimo la componente solida.

Per questo motivo l’input energetico principale previsto è il rifiuto in ingresso al quale si deve sommare il quantitativo di fuel di supporto nel caso sia necessario (ad esempio nel caso di pirolisi) o l’elettricità importata se presente.

Di contro ci si aspetta che gli output energetici in un inceneritore siano sotto forma di calore, come vapore o acqua calda, e di elettricità. Infatti, le due possibili alternative sono: la combustione del gas direttamente in impianti convenzionali come una caldaia, posti a valle (conversione termica), oppure lo sfruttamento del gas in sistemi come motori alternativi, o turbine a gas, con la necessità di una approfondita depurazione a monte (conversione elettrica).

Nel caso di processi alternativi, quali gassificazione e pirolisi, si ha la possibilità di recuperare l’energia con diverse tecnologie, a causa delle maggiori temperature operative: turbine a gas, motori a combustione interna, cicli combinati gas vapore (CCGT) e utilizzo del syngas esternamente in centrali elettriche esistenti.

Di seguito sono riportate con i rispettivi range di efficienza [17].

Tabella 8- Efficienza netta delle tecnologie di produzione energetica

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.

In particolare, nel caso dei processi di pirolisi e gassificazione si ha la possibilità di esportare parte del potere calorifico del rifiuto sotto forma di syngas, char o oli. Tali prodotti dai processi alternativi sono spesso direttamente o successivamente bruciati come

RECUPERO ENERGETICO

carburanti utilizzando il potere calorifico rimasto al loro interno, oppure possono anche essere utilizzati come materia prima a sfruttandone la composizione chimica. Solitamente tale possibilità è da valutare a valle di un pretrattamento di pulizia, se necessario.

La corretta combinazione, ovvero la percentuale di flusso esportato come elettricità o come calore, dipende dalla situazione in cui è inserito l'impianto. Infatti, nel caso in cui si ha una richiesta locale di calore, tale necessità risulta decisiva nella corretta configurazione del processo, essendo la produzione di elettricità associata ad una minore efficienza e dunque maggiori perdite rispetto al calore.

I costi di vendita delle diverse forme di energia vanno ad influenzare in particolar modo la corretta modalità in cui utilizzare tale produzione, e di conseguenza la configurazione e tecnologie utilizzate.

Parte dei fattori influenti sono di seguito raccolti, la tabella è riportata nelle BREFs riguardanti l'incenerimento dei rifiuti [12]:

Tabella 9- Fattori che influenzano la produzione di energia

Factor	Influence
High electricity price paid for supply or reliable demand	<ul style="list-style-type: none"> • encourages investment to produce electricity • boiler claddings may be purchased to allow higher steam pressures and greater electrical outputs • less heat will be available for supply • plant may import electricity to ensure own produced exports can be maximised
Higher electricity price for imported electricity than that produced	<ul style="list-style-type: none"> • encourages the use of own produced electricity for running the incineration process • heat only plants may decide to divert some energy to supply own electricity demands
Higher price paid for heat and higher reliability of demand	<ul style="list-style-type: none"> • investment in distribution networks becomes more viable • overall plant efficiency gains possible due to ability to supply more of the recovered energy
Colder climate	<ul style="list-style-type: none"> • can allow heat supply over more months of the year
Hotter climate	<ul style="list-style-type: none"> • less reliable heat demand for heating • may increase options to supply heat to drive chillers for air conditioning, to feed seawater thermal desalination plants, etc.
Base load energy supply contract	<ul style="list-style-type: none"> • increases reliability of sales contract and encourages investment in techniques to utilise available energy (heat and electricity)
Very low permitted air emissions	<ul style="list-style-type: none"> • additional energy demand of flue-gas treatment equipment
Not permitted to discharge treated waste water from wet scrubbers	<ul style="list-style-type: none"> • reduction in available heat for export owing to need to supply evaporation energy
Vitrification of ash required	<ul style="list-style-type: none"> • higher plant energy demand results in increased self-consumption and reduced outputs
Higher incineration temperature required	<ul style="list-style-type: none"> • possible need for additional fuels to obtain relevant temperature

RECUPERO ENERGETICO

L'energia che si avrà come output è da considerare solitamente come una percentuale di quella effettivamente in ingresso, considerando tutte le possibili perdite di conversione e di sistema.

Per questo motivo è importante che vengano valutati attentamente tutti gli aspetti che potrebbero influire sull'equilibrio energetico, che siano gli input dovuti a possibili fuel aggiuntivi, oppure l'utilizzo interno di maggiore energia a causa di pretrattamenti all'ingresso o semplicemente un corretto funzionamento della tecnologia.

Una buona norma risulta l'utilizzo dei fattori di equivalenza che permettano di passare con facilità da una forma all'altra di energia ed uniformarne la misura per un corretto confronto.

Tabella 10- Fattori di conversione dell'energia [18]

From:	Multiply by:			
To:	GJ	MWh	MWh_e	MWh_{th}
GJ	1	0.2778	0.1056	0.2528
MWh	3.6	1	0.3800	0.9100
MWh_e	9.4737	2.6316	1	-
MWh_{th}	3.9560	1.0989	-	1
Gcal	4.1868	1.163	0.4421	1.0583

La tabella riportata mostra i fattori di conversione stimati per garantire l'equivalenza tra le differenti forme di energia, considerando una media di 38% per l'efficienza di conversione elettrica, mentre 91% per la generazione esterna di calore.

In ogni caso la produzione di energia elettrica o utilizzo del calore dipendono fortemente dalle specifiche condizioni alla quale ci si trova: per quanto riguarda pressione e temperatura e naturalmente la composizione del rifiuto in ingresso, oltre che la taglia dell'impianto.

Come precedentemente affermato, l'energia in ingresso non viene interamente esportata, ciò è dovuto alla conversione stessa in energia fruibile, quindi all'efficienza del processo di trattamento e della produzione elettrica, ma è anche strettamente legato all'autoconsumo dovuto ad esempio alle tecnologie di trattamento dei gas oppure i pretrattamenti nel caso di gassificatore o pirolisi. Tali tecnologie fanno ridurre notevolmente la quota di elettricità realmente esportata: se ne riporta un esempio di seguito, dalle BREFs sull'incenerimento

RECUPERO ENERGETICO

dei rifiuti, uno studio del TWG energy subgroup sviluppato nel 2001, su diversi impianti [18].

Tabella 11- Produzione ed esportazione di elettricità per tonnellata di MSW

Electricity	Units	Minimum	Average	Maximum
Production	MWh _e /t waste	0.415 (12.9 %)	0.546 (18 %)	0.644 (22 %)
	GJ _e /t waste	1.494	1.966	2.319
Export	MWh _e /t waste	0.279 (8.7 %)	0.396 (13 %)	0.458 (18 %)
	GJ _e /t waste	1.004	1.426	1.649
1. Figures are given as measured (i.e. not factored equivalents) 2. Percentage efficiencies are given in parenthesis (also not factored) and take account of energy derived from imported fuels as well as from waste 3. Figures for production include all electricity generated 4. Figures for export exclude electricity produced by the process but consumed in the process 5. NCV average value was 2.9MWh/t				

Tale riduzione è stata sottolineata dallo stesso gruppo di ricerca anche per quanto riguarda la produzione di calore e la sua esportazione, e il caso di sistemi CHP, entrambi basati su impianti di MSW esistenti.

Tabella 12- Produzione ed esportazione di calore per tonnellata di MSW

Heat	Units	Minimum	Average	Maximum
Production	MWh _{th} /t waste	1.376 (45.9 %)	1.992 (65.8 %)	2.511 (74.3 %)
	GJ _{th} /t waste	4.953	7.172	9.040
Export	MWh _{th} /t waste	0.952 (29.9 %)	1.786 (58.8 %)	2.339 (72.7 %)
	GJ _{th} /t waste	3.427	6.600	9.259
1. All figures are given as measured (i.e. not factored equivalents) 2. Percentage efficiencies are given in parenthesis (also not factored) and take account of energy derived from imported fuels as well as from waste. 3. Figures for production include all heat produced by the boiler 4. Figures for export exclude heat produced by the process but consumed in the process				

Tabella 13- Percentuale di efficienza media si sistemi CHP

CHP	Average efficiency
Production	59.4 %
Export	49.3 %
Note: To allow addition of heat and electricity to provide a single efficiency measure, a factor of 2.6316 is applied to electrical efficiencies. This factor takes account of the unavoidable losses of electrical energy production and allows processes producing different balances of heat and power to be compared (and hence averaged) with greater meaning.	

Ricapitolando, la produzione e relativa esportazione di energia da parte di un impianto di questo tipo dipende da diversi fattori in maniera sostanziale, quali la configurazione e le tecnologie utilizzate.

Le principali cause di utilizzo interno e conseguente riduzione dell'energia esportabile sono:

- Pretrattamenti meccanici a monte del processo termico;
- Preriscaldamento dell'aria di incenerimento;
- Riscaldamento dei gas a monte dei trattamenti delle emissioni gassose;
- Operazioni di evaporazione dell'acqua reflua derivante dal processo eventualmente;
- Sistemi di trattamento dei gas ad alta pressione;
- Riduzioni del net heat value, che implica un'aggiunta di carburante per mantenere temperature adeguate al processo;
- Trattamento dei fanghi eventuali.

Inoltre, un grande problema quando si parla di syngas prodotto ed utilizzato in sistemi ad alto rendimento (motore endotermico e ciclo combinato) risiede nella pulizia del syngas. Infatti, tale pulizia risulta sempre più necessaria ed approfondita man mano che si impiega un sistema più complesso. Di conseguenza provoca una sostanziale riduzione del potere calorifico presente nei gas, poiché si vanno ad eliminare in tal modo alcune componenti come il tar ad alto contenuto energetico provocando una grande riduzione di efficienza e produzione energetica.

4. EMISSIONI GASSOSE

Come specificato nei capitoli precedenti, le emissioni derivanti da un impianto di trattamento termico sono sotto forma gassosa, liquida e solida.

In questa sezione si valuta più nello specifico l'emissione in atmosfera ed i trattamenti necessari al fine di rispettare i limiti di legge e garantire il minor carico di inquinanti emesso possibile, dato che risulta come l'aspetto più significativo e problematico dal punto di vista delle implicazioni ambientali.

La sezione di trattamento fumi è comune a tutti i trattamenti termici: posta a valle del processo vero e proprio, negli anni ha avuto un sempre maggiore rilievo ed importanza, date le molteplici normative a riguardo, rendendo lo sviluppo di nuove metodologie efficienti e a basso consumo una priorità in continua evoluzione.

Gli inquinanti presenti nei fumi sono suddivisibili in due gruppi: macroinquinanti e microinquinanti, in dipendenza dalle quantità (concentrazioni nel flusso).

I limiti imposti dalla normativa all'emissione sono specificati nella legge 133/2005, integrata nel D.Lgs.152/2006, riportato nei capitoli precedenti alla "Tabella 6- Limiti di emissione atmosferica dei macroinquinanti".

Da sottolineare è la necessità di un controllo in continuo delle emissioni gassose derivanti da un impianto di trattamento termico. Infatti, la legge fornisce i limiti da rispettare, tramite un misuratore in continuo SME, in concentrazioni medie all'ora e al giorno: la concentrazione media giornaliera non può essere in alcun modo superata, al contrario quella oraria si, a meno di un 25% di margine [13].

Questa necessità di monitorare in continuo ogni possibile condizione limite sottolinea la delicatezza e complessità di tali processi e la pericolosità derivante da un monitoraggio non adeguato.

Le emissioni maggiormente problematiche e per cui sono state sviluppate tecnologie sempre in continua evoluzione sono: particolato, gas a comportamento acido e ossidi di azoto.

Di seguito si procede con una descrizione delle principali tecnologie utilizzate per le specifiche rimozioni.

4.1 Particolato

Partendo con il primo contaminante elencato, il particolato, le tecnologie attualmente disponibili e affermate per la separazione di tali particelle (ceneri volanti) dal flusso sono:

- Cicloni,
- ESP: filtri elettrostatici o elettrofiltri,
- Filtri a maniche.

Si basano principalmente su caratteristiche fisiche di tali particelle da separare e le condizioni del flusso come: la dimensione media delle particelle e la distribuzione, la quantità, la portata di gas, la temperatura e compatibilità tra le tecnologie (una tecnologia a umido a monte necessita una continuità a valle).

Ora si procede con la descrizione delle principali tecnologie in commercio.

Cicloni:

I cicloni e multicicloni sono una tecnologia di separazione basata sulla forza centrifuga. Mentre i primi sono singoli, i multicicloni sono composti da una serie di cicloni più piccoli. Non sono tecnologie in grado di raggiungere efficienze di separazione tali da garantire un rispetto dei limiti di legge imposti, però possono essere utili se applicati a monte dell'impianto vero e proprio di trattamento fumi.

L'energia necessaria per questo apparato è minima poiché non presenta differenze di pressione ed inoltre la temperatura operativa risulta in un largo range.

Filtri elettrostatici:

Anche chiamati precipitatori elettrostatici, il funzionamento è basato sulla possibilità di caricare elettricamente il particolato e successivamente attrarlo e fermarlo tramite degli elettrodi con carica opposta. L'efficienza di questa rimozione è fortemente influenzata dalla resistività elettrica delle ceneri, dipendente dalla composizione del rifiuto.

La tecnologia ha come vantaggio la possibilità di operare a importanti temperature, fino a 300°C, oltre che elasticità di esercizio. Nonostante ciò, si tende a non superare i 250°C poiché si aumenterebbe il rischio di produzione di PCDD/F.

I filtri elettrostatici hanno diverse configurazioni, in dipendenza se sono a secco, semi-umido e umido.

Nel caso particolare dei filtri ad umido, le ceneri seguono lo stesso processo, ma poi vengono lavate via dai piatti collettori tramite un liquido, solitamente acqua, con una certa periodicità o in continuo. Tale processo, nel caso di quelli a secco, viene svolto facendo vibrare i piatti a cui vengono attratte le particelle.

Filtri a maniche:

Strutturati in un tessuto tubolare a cui viene inviato il flusso di fumi in pressione. La tecnologia, grazie a questa maglia di tessuto, blocca il particolato e riduce drasticamente la concentrazione di queste particelle al camino. In ogni caso l'efficienza di funzionamento dipende dalle proprietà del tessuto, che deve avere specifica resistenza chimica, fisica e termica. In dipendenza da ciò si avranno anche una determinata durata di vita, energia richiesta e mantenimento.

Il processo viene monitorato valutando la variazione di pressione attraverso il mezzo filtrante, che verrà man mano ostruito riducendone il corretto funzionamento: arrivato ad una pressione limite sarà necessario un cambio nel materiale con del nuovo.

Nel caso di rifiuti contenenti fosforo, solfato e silicio, si potrà avere una ostruzione ancora più facilitata a causa di polveri prodotte con proprietà igroscopiche ad alte temperature (300-600°C), che portano a maggiori deposizioni e dunque maggiore difficoltà di estrazione e pulizia.

Una tecnologia largamente utilizzata negli impianti di incenerimento dei rifiuti dato che presenta un'alta efficienza per un largo range di dimensioni delle particelle. Può essere anche utilizzata a seguito di un ESP per incrementare l'abbattimento.

4.2 Sostanze acide

La riduzione delle concentrazioni di sostanze acide nel flusso gassoso avviene tramite l'aggiunta di reagenti alcalini in tre tipologie di processi:

- a secco,
- semi-umido,
- umido.

Sistema a secco:

Il processo consiste in un agente quale idrossido di calcio Ca(OH)_2 o bicarbonato di sodio, aggiunto al flusso di gas completamente a secco, sotto forma di polvere.

La quantità aggiunta dipende dalla temperatura di reazione e dal tipo di reagente che andranno ad influire sulla quantità dei contaminanti a valle del trattamento e il rispetto dei relativi limiti di legge.

I prodotti risultanti da tali reazioni sono in forma solida e necessitano di un apparato di rimozione delle polveri a valle, tipicamente un filtro a maniche.

Sistema semi-umido:

Consiste in un assorbimento spray, ovvero il reagente è iniettato in un reattore spray in sospensione o soluzione nel flusso di gas caldo.

Questi processi sfruttano il calore del gas per l'evaporazione dell'acqua. I prodotti di reazione sono anche in questo caso solidi e il gas necessita quindi di una deposizione tramite un filtro a maniche successivo.

Un ulteriore sistema può esser applicato, a metà tra uno a secco e a semi-umido: sistema flash-dry.

Si basa sul ricircolo nel gas di parte dei solidi fermati con un filtro a maniche, e quindi di reagenti, mentre l'acqua viene aggiunta in quantità tali da evitare blocchi delle ceneri volanti e reagenti.

In questa configurazione non vengono prodotti effluenti (tipico dei sistemi ad umido) e non necessita di torri per il contatto (tipiche dei sistemi semi-umido).

Sistema a umido:

Il processo ad umido si basa sull'utilizzo di diverse tecnologie alternative. Si ha un primo stage di deposizione del HCl e HF ed una successiva fase di lavaggio in cui si abbattano le concentrazioni di SO_2 . Gli stage alla quale si va in contro variano tra 1 e 4 in dipendenza dalle condizioni operative e proprietà del gas.

I reagenti aggiunti allo scopo sono NaOH e Ca(OH)_2 in soluzione.

In dipendenza dall'agente si avranno differenti prodotti, per questo motivo si dovrà considerare, nel caso non siano solubili in acqua e quindi tendenti a sedimentare ed incrostarsi, un sistema di pulizia e recupero di tali sostanze.

Soltanto in questa configurazione, infatti, si avrà la produzione di acqua di scarto, necessariamente rimossa dal circuito al fine di mantenere una buona efficienza del processo ed evitare incrostazioni.

L'acqua estratta necessita inevitabilmente di un trattamento prima di un riuso o dello scarico, al fine di ridurre il contenuto di metalli pesanti presenti.

In alcuni casi questa acqua esausta viene fatta evaporare rimettendola a contatto con il flusso gassoso in uscita ed utilizzando un filtro per il particolato che blocchi le particelle di metalli.

4.3 Ossidi di azoto

Le ultime tecnologie da considerare, che fanno parte del processo di trattamento dei fumi, sono quelle atte ad abbattere le concentrazioni degli ossidi di azoto (NO_x). Tali inquinanti, tra i principali a seguito di un impianto di incenerimento, risultano particolarmente nocivi in quanto sono tra i principali gas serra con elevato GWP.

La produzione dipende, oltre che dalla composizione del rifiuto, dalle condizioni operative quali la quantità di aria aggiunta e la temperatura di processo. Per questo motivo sono definiti specifici accorgimenti da attuare a monte al fine di ridurre la sostanziale produzione di NO_x e quindi il quantitativo da trattare.

A seguito si necessita del processo vero e proprio di trattamento fumi ed abbattimento NO_x per raggiungere concentrazioni nel rispetto dei limiti.

I reagenti utilizzati in questi casi sono ammoniaca o urea, necessari come agenti riducenti in soluzioni acquose (solitamente NH₃ al 25% in soluzione).

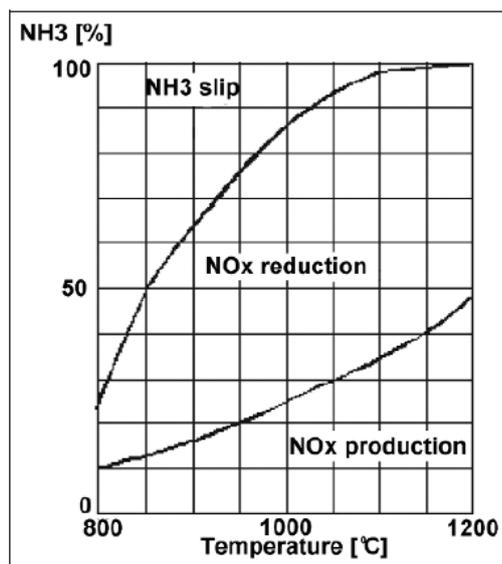
Le due possibili tecnologie sono:

- SNCR: riduzione non catalitica
- SCR: riduzione catalitica

SNCR

La rimozione in questo caso avviene tramite una riduzione selettiva non-catalitica, tramite l'iniezione del reagente nel forno, che va a reagire con gli ossidi di azoto appena formati. Le reazioni di riduzione avvengono a temperature molto elevate (850-1000°C) con efficienze basse, rendendo necessaria l'aggiunta di un ulteriore quantitativo di agente riducente. Tale aggiunta può portare però ad emissioni di ammoniaca al camino, chiamata "ammonia slip". Più nello specifico di seguito si riporta il grafico sperimentale della relazione tra NOx prodotto, NOx ridotto e l'ammonia slip, in dipendenza dalla temperatura. Il grafico è riportato nelle BREF, da "TWGComments,2003" [18].

Figura 15- NOx prodotto, NOx ridotto e ammoniaca slip in dipendenza dalla temperatura [12]



L'aspetto principale in questa tecnologia è l'importanza di avere un efficace contatto tra i gas da trattare e il reagente immesso, in modo da garantirne la reazione ed una quantità adatta alle necessità.

SCR

Il sistema è di riduzione selettiva catalitica: l'ammonia miscelata con l'aria viene poi aggiunta al gas e di seguito passata attraverso un catalizzatore che riduce l'NOx producendo azoto e vapore acqueo.

Le condizioni operative in questo processo sono differenti: si avrà bisogno di temperature tra 230 e 300°C, per garantire una buona efficienza di abbattimento.

La riduzione della concentrazione di NOx è molto spinta quando si utilizza questo tipo di processo, al contrario del SNCR, e viene applicato solitamente a valle degli altri trattamenti, quando la temperatura si è notevolmente ridotta e il gas è pulito dalle possibili ceneri e gas acidi. Data la riduzione della temperatura, spesso è anche necessario un riscaldamento al fine di raggiungere le temperature richieste per un corretto funzionamento.

Nel caso in cui i processi precedenti vengano sviluppati ad umido si ha il bisogno di eliminare l'umidità per evitare la deposizione dei sali all'interno del catalizzatore.

4.4 Sistemi FGT

Date le tecnologie appena descritte, importante ora è valutare la relativa applicazione attuale a livello europeo nel campo del trattamento termico dei rifiuti urbani.

Tabella 14- Tecnologie FGT in Europa (2000/2001) [12]

Number of MSWI plants with various flue-gas treatment systems									
	Dry with FF	Semi-dry with FF	Wet	Dry and Wet	SD and Wet	Electrostatic precipitator only	Fabric filter only	SNCR de-NO _x	SCR de-NO _x
Austria			2					applied	applied
Belgium	2	9	8		1			applied	applied
Denmark	7	17	6			1	1	applied	
France	13	25	45			19		applied	
Germany	5	16	30	2	5		1	17	42
Great Britain	1	9						applied	
Hungary						1			
Italy	26	6	3	8	4				
Netherlands		1	5		4			3	applied
Norway	4	1	3						
Portugal		3						3	
Spain	1	7							
Sweden	5	1	7	2			2	applied	applied
Switzerland		1	29						applied
Total plants	64	95	138	12	14	21	4	23	43 (of 200)³

Notes:

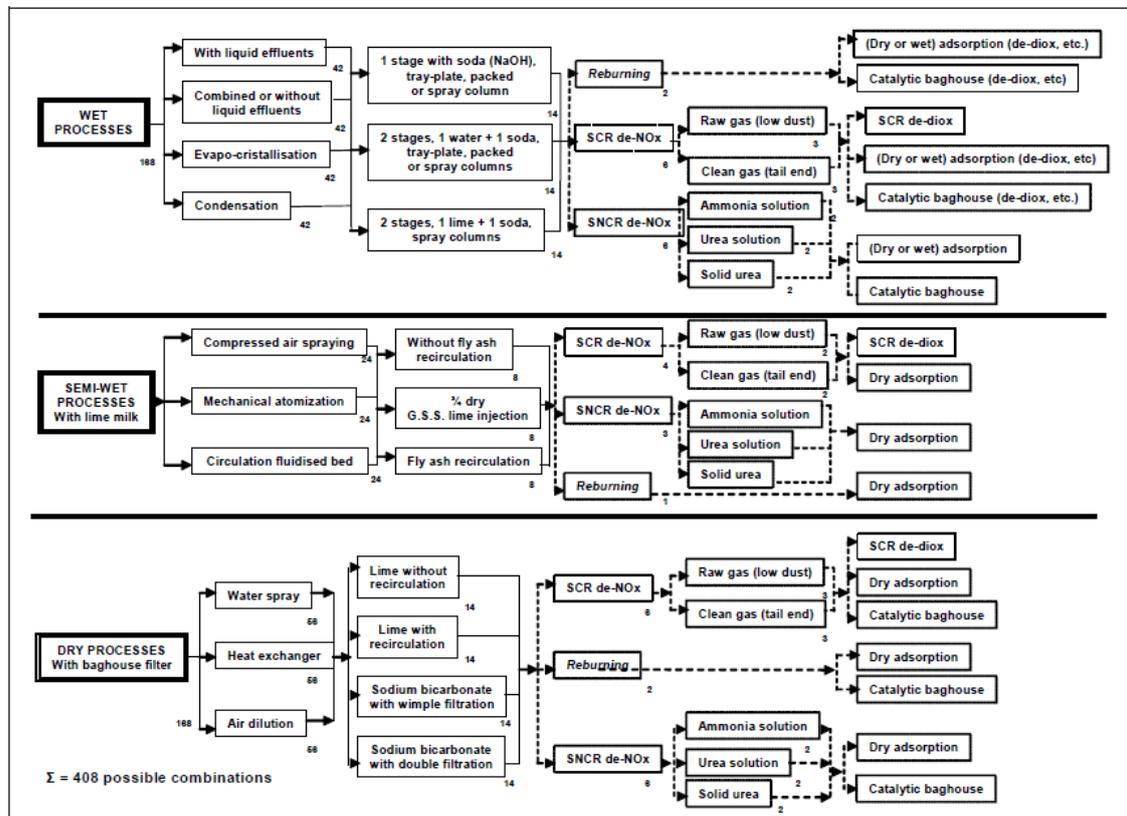
1. All figures (except SCR data) are derived from data provided to TWG in [42, ISWA, 2002] - Tables 1 and 2 and TWG Comments
2. Other combinations of FGT unit operations are applied but not included in the table
3. Data supplied to EIPPCB by FEAD suggests 43 of around 200 surveyed MSWI use SCR
4. Belgium data only represents Flemish region and Brussels only
5. *applied* indicates that the technique is applied - data for blanks was not provided

La tabella riporta il numero di impianti presenti in Europa nel 2000/01 aventi una specifica tecnologia di trattamento fumi.

Si sottolinea l'evidente tendenza ad utilizzare tecnologie ad umido ed un sistema catalitico per gli NOx, date le maggiori prestazioni in termini di qualità del flusso gassoso emesso (efficienze di rimozione) e di impatto ambientale.

Un sistema FGT è composto dalle diverse tecnologie descritte, poste in serie al fine di trattare completamente il flusso gassoso. Data la presenza di numerose tecnologie e proprietà sono possibili una grande varietà di configurazioni riportate nel diagramma sottostante, dalle BREFs sull'incenerimento dei rifiuti [12].

Figura 16-Configurazioni per il sistema FGT



In ogni caso oltre a tali tecnologie può esserci la necessità di aggiungerne delle altre al fine di abbattere concentrazioni elevate di altri inquinanti, nel caso in cui l'input sia con specifiche caratteristiche. Un'altra possibilità da considerare è l'aggiunta di reagenti appositi o il seguire precisi accorgimenti per una buona prevenzione.

Le tecnologie descritte hanno l'obiettivo di andare a ridurre il quantitativo in concentrazione dei diversi inquinanti, al fine di rientrare alla misurazione all'emissione

EMISSIONI GASSOSE

entro i limiti imposti dalla normativa (D.Lgs.133/2005) [14] e ancora più stringenti dalle BAT.

Nella tabella di seguito, presa dall'IPPC (2006) [4], si riportano i valori limite: in corrispondenza delle BAT si ha un range relativo alle possibili concentrazioni a valle.

Tabella 15- Valori limite di emissione gassosa secondo normativa e BAT - IPPC,2006

Inquinante	Unità di misura	Valore limite D. Lgs. 133/2005	BATAEL – BAT Associated Emission Levels	Intervallo 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 (SO ₂)	[mg/Nm ³]	50	1-40	Valore medio giornaliero
Ossidi di azoto (NO ₂)	[mg/Nm ³]	200	40-100	Valore medio giornaliero
Sostanze organiche	[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 (PCDD / PCDF)	[ng TEQ/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 ore)
Mercurio (Hg)	[mg/Nm ³]	0.05	<0.05	Valore medio (periodo di campionamento: 1 ore)
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 ore)

Gli impianti di incenerimento tradizionali e alternativi di rifiuti, con capacità maggiore a 3 tonnellate, hanno l'obbligo di attuare l'Autorizzazione Integrata Ambientale (AIA),

riportata nel D.Lgs. 59/2005 sulla prevenzione e riduzione integrata dell'inquinamento-AIA/IPPC [15].

Proprio in questi casi risulta necessario che l'impianto rispetti i valori limite più stringenti imposti dalle BAT. Infatti, l'autorizzazione presuppone un progressivo allineamento e adozione delle Best Available Techniques ed un aggiornamento e miglioramento continuo al fine di ridurre l'impatto ambientale.

5. RESIDUI SOLIDI

I processi di trattamento termico dei rifiuti danno origine a tre principali residui solidi, in percentuali e natura differenti in dipendenza dal rifiuto in ingresso e relativa composizione, che a sua volta dipende dai cambiamenti nei metodi di produzione, consumi e gestione dei rifiuti.

- Bottom ashes, o anche dette scorie, residuo di fondo o ceneri pesanti. Sono il primo residuo solido derivante dal processo e corrispondono a tutte le particelle solide incombustibili o non reagite, che dunque non compiono alcun passaggio di stato alla fase gassosa.
- Boiler ashes, ceneri collettate nella camera di combustione e spesso trattate e smaltite con le ceneri leggere.
- Flying ashes o dette ceneri volanti e residui APC. Sono tutte le particelle più fini, bloccate tramite appositi sistemi di trattamento fumi e successivamente generalmente smaltite in discarica per rifiuti pericolosi, essendo la composizione con alte concentrazioni di metalli pesanti ed inquinanti precipitati nel trattamento delle emissioni.

Più nello specifico si possono suddividere i residui solidi del processo in diverse classi, in dipendenza dal processo che le origina, il quale va ad influenzarne le quantità prodotte e la collocazione successiva.

La tabella di seguito mostra nello specifico i range in quantità di residui solidi che tipicamente si hanno in dipendenza dalla tecnologia utilizzata per trattare i fumi. Dati dalle BREF [1, UBA, 2001] [12].

RESIDUI SOLIDI

Tabella 16- Range tipici di produzione di residui solidi

Types of waste	Specific amount (dry) (kg/t of waste)
Slag/ash (including grate siftings/riddlings)	200 – 350
Dust from boiler and de-dusting	20 – 40
FGC residues, reaction products only:	
Wet sorption	8 – 15
Semi-wet sorption	15 – 35
Dry sorption	7 – 45
Reaction products, and filter dust, from:	
Wet sorption	30 – 50
Semi-wet sorption	40 – 65
Dry sorption	32 – 80
Loaded activated carbon	0.5 – 1
Note: wet sorption residue has a specific dryness (e.g. 40 – 50 % d.s.) [74, TWGComments, 2004]	

Data l'attuale e crescente importanza della circular economy, che pone obiettivi sempre più stringenti in merito agli scarti di produzione, residui ed in generale sugli impatti ambientali, si ha la necessità di recuperare la quantità maggiore possibile dei residui prodotti dalla lavorazione. Ciò avviene tramite la cessazione della qualifica di rifiuto, End of waste (EoW), quando possibile.

Secondo l'Art.187-ter/Legge 128/2019 [19]: “Un rifiuto cessa di essere tale se, dopo essere stato sottoposto ad un processo di recupero (R), soddisfa determinati criteri nel rispetto delle seguenti condizioni:

- la sostanza o l'oggetto sono destinati ad essere utilizzati per scopi specifici;
- esiste un mercato o una domanda per tale sostanza od oggetto;
- la sostanza o l'oggetto soddisfa i requisiti tecnici per gli scopi specifici e rispetta la normativa e gli standard esistenti applicabili ai prodotti;
- l'utilizzo della sostanza o dell'oggetto non porterà a impatti complessivi negativi sull'ambiente o sulla salute umana.”

A questo fine si hanno specifici Decreti Ministeriali: D.M. 5 febbraio 1998 e D.M. 12 giugno 2002, n. 161, rispettivamente per rifiuti non pericolosi e pericolosi, con le indicazioni dei criteri nazionali sulle procedure semplificate delle operazioni di recupero dei rifiuti, ovvero le situazioni in cui sarà possibile seguire un determinato processo di recupero del materiale dando origine ad un prodotto o materia prima. Il controllo continuo

delle ceneri prodotte per valutarne l' idoneità a specifici trattamenti e forme di riciclo sicure è inevitabile.

Negli ultimi anni, inoltre, si stanno emanando una serie di decreti specifici sugli EoW in merito a determinate classi di rifiuti, atti a descrivere con attenzione e precisione le possibili soluzioni che si hanno al fine di recuperare la maggiore quantità di rifiuto prodotto, e le tecnologie da poter utilizzare [20].

Al momento, sulla base di dati relativi all' anno 2005, si stima che la maggior parte delle ceneri di fondo prodotte in Italia sono state poste in discariche per rifiuti non pericolosi, mentre le ceneri volanti in discariche con controlli e protezioni adatti (per rifiuti pericolosi) data l' alta probabilità che siano rifiuti tossici a causa dei metalli pesanti e PCDD/F, IPA.

Infatti, in Italia solo una minima percentuale di ceneri pesanti viene utilizzata come materia prima nell' industria cementizia per produrre clinker, come previsto dai decreti sopra citati. Contemporaneamente però, in altri Paesi europei, quali Olanda (>90%), Danimarca (90%) Belgio (21%), Germania (80%) e Francia (>70%), dove i processi termici per i rifiuti urbani sono più conosciuti e sviluppati, le ceneri pesanti vengono in gran parte riciclate ed utilizzate come riempimento in opere edili, nella produzione di cemento e asfalto [18].

Tale utilizzo dipende principalmente dalle concentrazioni di metalli lisciviati o dai trattamenti di inertizzazione, tutto specificato in dipendenza dal Paese di riferimento e le relative leggi.

La Direttiva Europea 2000/76/EC norma l' incenerimento dei rifiuti e definisce la necessità di test appropriati per valutare le caratteristiche chimico-fisiche e il potenziale d' inquinamento, basandosi su di un controllo continuo e monitoraggio dei prodotti e delle reazioni al fine di incrementarne l' efficienza e qualità. Sulla base di tali controlli si può di conseguenza intervenire sui dosaggi, frequenze e velocità delle parti, quantità, temperatura e distribuzione dell' aria.

Nonostante ciò, si evidenzia nell' articolo di Federico Valerio "Impatti ambientali delle ceneri e dei residui solidi prodotti dall' incenerimento di rifiuti urbani: rassegna bibliografica" [21], pubblicato nel 2008, come degli studi abbiano messo in luce che nel lisciviato di ceneri leggere e pesanti si abbiano composti organici tossici oltre ai metalli. Tali risultati suggeriscono l' emanazione, da parte dell' Unione Europea, di norme di

controllo più stringenti, che considerino anche valutazioni tossicologiche adatte sulle frazioni organiche residuali e se necessario dei trattamenti appositi di inertizzazione spinta. La decisione del Consiglio europeo del 19/12/2002 stabilisce, invece, i criteri e procedure per i rifiuti da conferire nelle diverse tipologie di discariche: per rifiuti inerti, non pericolosi e pericolosi.

I criteri sono rispetto alla concentrazione di specifici metalli, cloruri, fluoruri, solfati, TOC e TS.

Le misure per controllare i residui uscenti dal processo sono primarie quali:

- garantire una buona ossidazione del carbonio,
- promuovere la volatilizzazione dei metalli pesanti e
- ridurre la lisciviabilità degli elementi;

Ma anche secondarie come:

- la riduzione della dimensione,
- segregazione dei metalli,
- lavaggio per rimuovere i sali solubili,
- invecchiamento per ridurre la reattività e
- trattamento termico per la vetrificazione.

5.1 Bottom ashes

Le ceneri di fondo, o bottom ashes, hanno la possibilità di essere riutilizzate o riciclate in dipendenza dalle caratteristiche chimico-fisiche, contenuto di sostanze organiche e presenza e separazione dei metalli e sali.

A tal fine esistono specifici accorgimenti per ottenere un residuo solido con qualità migliori possibili e che rispecchino i requisiti imposti dalle normative in materia di riciclo, recupero ed end of waste. Alla base si ha la necessità di garantire un basso tenore di incombusti, in ognuno dei trattamenti dipendente dal materiale che si ha in ingresso al processo di trattamento e dalla rispettiva omogeneità (più si ha input omogeneo, più il processo lavora in modo adeguato producendo quantitativi minori di materie organiche nelle scorie), oltre che dal tipo di processo e quantità di agente ossidante, condizioni operative, temperature e tempistiche.

Questo contenuto di carbonio organico residuo viene valutato durante le misurazioni analizzando la concentrazione di TOC (Total Organic Carbon) nelle scorie, valore che solitamente in media si aggira intorno all'1%, in ogni caso minore del quantitativo di 3% prescritto nella 2000/76/CE [22].

Necessaria, inoltre, è la distinzione tra i tre principali processi e le rispettive scorie prodotte. Le ceneri di fondo dall'incenerimento tendono ad essere con basso o nullo contenuto di sostanze organiche, questo a causa del metodo di trattamento del rifiuto e quindi dell'eccesso di ossigeno che porta alla completa ossidazione della frazione combustibile.

Mentre, per quanto riguarda la gassificazione, si possono differenziare le ceneri di fondo e le loro qualità in dipendenza dalle condizioni operative. Infatti, nel caso in cui ci troviamo a temperature medie, tra i 700 e 800°C, ci si aspetta una produzione di scorie residue simili a quelle dell'incenerimento tradizionale in aspetto e composizione, perciò la destinazione finale prevista in entrambi i casi è la discarica di rifiuti speciali; al contempo i quantitativi si mostrano solitamente minori nel caso della gassificazione.

In merito alla gassificazione a fusione diretta delle scorie (nel caso di temperature operative elevate), di grande importanza è la capacità di produrre scorie vetrificate, ovvero con caratteristiche molto migliori delle altre dal punto di vista ambientale e quindi con maggiori possibilità di essere riutilizzate e non portate direttamente in discarica, data la riduzione della pericolosità.

In questo caso sono composte da circa 10 kg/ton di rifiuto di metalli ed una loppa granulare di ossidi di metalli (circa 90-100 kg/ton). Dati dal "Quaderno 51" [17]. Quest'ultima componente in Giappone viene utilizzata nel campo edilizio, mentre in Italia dipende dalle specifiche caratteristiche in relazione alla normativa vigente. Le ceneri vetrificate sono veri e propri inerti e quindi smaltibili in discariche per inerti, non pericolose (D.M.3/08/2005) [23].

Di seguito si riporta la tabella con i relativi limiti per l'utilizzo e smaltimento delle ceneri pesanti (bottom ashes) in Italia ("Management of Bottom Ash from WTE Plants. Working group on thermal treatment of waste", ISWA, 2006) [24].

RESIDUI SOLIDI

Tabella 17- Limiti per l'utilizzo e smaltimento delle ceneri pesanti da incenerimento in Italia [16]

Substance	Utilization (cement, concrete, landscaping, embankments)		Landfilling	
	Government Decree n° 22 of February 5 th of 1997 / Ministerial Decree of February 5 th of 1998		Ministerial Decree n° 201 of 3 rd August 2005 CEN 12457-4, L/S=10	
	mg/l.	mg/kg (L/S = 5)	mg/l.	mg/kg (L/S = 10)
Cl	200	1000	1500	15 000
F	1.5	7.5	15	150
SO4	250	1250	2000	20 000
Na	-	-	-	-
NO ₃	50	250	-	-
Cyanid (CN)	0.05	0.25	0.5	5
As	0.05	0.25	0.2	2
Ba	1	5	10	100
Pb	0.05	0.25	1	10
Cd	0.005	0.025	0.02	0.2
Cr, total	0.05	0.25	1	10
Cu	0.05	0.25	5	50
Hg	0.001	0.005	0.005	0.05
Mo	-	-	1	10
Ni	0.01	0.05	1	10
Zn	3	15	5	50
Sb	-	-	0.07	0.7
Se	0.01	0.05	-	-
Sr	-	-	0.05	0.5
Be	0.01	0.05	-	-
Co	0.25	1.25	-	-
V	0.25	1.25	-	-
Asbesto	30	150	-	-
COD	30	150	-	-
pH	5.5<>12.0	5.5<>12.0	-	-
Aromatic organic solvents*	-	-	0.4	4
Nitrogenic organic solvents	-	-	0.2	2
Chlorid organic solvents	-	-	2	20
Total pesticides not phosphorates	-	-	0,05	0.5
DOC**	-	-	80	800
TDS***	-	-	6000	60 000

Il trattamento termico della pirolisi invece dà origine ad un residuo solido differente: carbone coke con carbonio circa pari al 30% ed uno specifico potere calorifico (PCI 9 MJ/kg). Tale quantitativo di carbonio necessita di una adeguata allocazione a valle: o inertizzazione oppure utilizzo come combustibile se rispetta specifiche caratteristiche.

In uno studio descritto nel Quaderno 51 si sono valutate differenti tecnologie di trattamento termico e confrontati i risultati ottenuti [17].

Di seguito si riportano due tabelle che mostrano diversi impianti e i loro quantitativi di ceneri di fondo e volanti, oltre che la composizione media delle ceneri di fondo analizzate.

RESIDUI SOLIDI

Tabella 18-Quantitativo di ceneri rispetto al rifiuto entrante [17]

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%

Si sottolinea come il quantitativo di ceneri di fondo aumenti quando si va ad utilizzare il processo di pirolisi e quindi produzione di pyrocoke.

Tabella 19- Composizione del residuo solido di fondo [17]

Costruttore		Caratteristiche qualitative residuo solido di fondo: composizione							
		SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	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

Nella tabella è possibile notare la differenza che si ha nel residuo solido in uscita al variare della tecnologia utilizzata: le composizioni percentuali variano molto a causa delle condizioni operative, influenzando composizione e caratteristiche del residuo.

Nello studio sopra citato si è anche sottolineato come le tecnologie di gassificazione differenti abbiano comunque prodotto residui affini alle caratteristiche richieste per

RESIDUI SOLIDI

l'accettazione in discarica per inerti grazie alle scorie vetrificate, ovvero rispettando i limiti del D.M. 3/08/2005 [23]:

Tabella 20- Caratteristiche di accettabilità in discarica per inerti

Componenti – D.M. 3/08/2005 – Caratteristiche di accettabilità in discarica per inerti	[mg/l]
As	0.05
Cd	0.004
Cr totale	0.05
Hg	0.001
Pb	0.05
Se	0.01

Le ceneri pesanti, in dipendenza dalle caratteristiche chimiche e i processi e materie in ingresso al trattamento che le originano, hanno la possibilità di venir recuperate nel caso in cui le proprietà rispettino specifici limiti normativi, perdendo in caso l'attribuzione di "rifiuto" e dando origine a nuove materie prime e prodotti.

I codici CER attribuibili sono molteplici, schematizzati insieme alla descrizione e possibili processi nella tabella di seguito:

Figura 17- Codici CER per incenerimento o pirolisi di rifiuti

CER 190100	RIFIUTI DA INCENERIMENTO O PIROLISI DI RIFIUTI	
CER 190102	Materiali ferrosi estratti da ceneri pesanti	D13;D14;D15 ;R12;R13;
CER 190105*	Residui di filtrazione prodotti dal trattamento dei fumi	D13;D15;R12 ;R13;
CER 190106*	Rifiuti liquidi acquosi prodotti dal trattamento dei fumi e di altri rifiuti liquidi acquosi	D9;D13;D15; R13;
CER 190107*	Rifiuti solidi prodotti dal trattamento dei fumi	D13;D15;R12 ;R13;
CER 190110*	Carbone attivo esaurito, impiegato per il trattamento dei fumi	D13;D14;D15 ;R12;R13;
CER 190111*	Ceneri pesanti e scorie, contenenti sostanze pericolose	D13;D15;R12 ;R13;
CER 190112	Ceneri pesanti e scorie, diverse da quelle di cui alla voce 190111	D13;D15;R12 ;R13;

RESIDUI SOLIDI

CER 190113*	Ceneri leggere, contenenti sostanze pericolose	D13;D15;R12 ;R13;
CER 190114	Ceneri leggere, diverse da quelle di cui alla voce 190113	D13;D15;R12 ;R13;
CER 190115*	Ceneri di caldaia, contenenti sostanze pericolose	D13;D15;R12 ;R13;
CER 190116	Polveri di caldaia, diverse da quelle di cui alla voce 190115	D13;D15;R12 ;R13;
CER 190117*	Rifiuti della pirolisi, contenenti, contenenti sostanze pericolose	D13;D15;R12 ;R13;
CER 190118	Rifiuti della pirolisi, diversi da quelli di cui alla voce 190117	D13;D14;D15 ;R12;R13;
CER 190119	Sabbie dei reattori a letto fluidizzato	D13;D15;R12 ;R13;
CER 190199	Rifiuti non specificati altrimenti	

“R” nella tabella sta per recupero: si hanno determinati processi che originano residui solidi potenzialmente trattabili e recuperabili anche parzialmente, secondo i decreti:

- D.M. 5 febbraio 1998 per i rifiuti non pericolosi [16]
- D.M. 12 giugno 2002, n. 161 per i rifiuti pericolosi [25]

In particolare nel caso del CER 190102:

“3.1 Tipologia: rifiuti di ferro, acciaio e ghisa [120102] [120101] [100210] [160117] [150104] [170405] [190118] [190102] [200140] [191202] e, limitatamente ai cascami di lavorazione, i rifiuti identificati dai codici [100299] e [120199].

3.1.1 **Provenienza:** attività industriali, artigianali, agricole, commerciali e di servizi; lavorazione di ferro, ghisa e

acciaio, raccolta differenziata; impianti di selezione o di incenerimento di rifiuti; attività di demolizione.

3.1.2 **Caratteristiche del rifiuto:** rifiuti ferrosi, di acciaio, ghisa e loro leghe anche costituiti da cadute di officina,

rottame alla rinfusa, rottame zincato, lamierino, cascami della lavorazione dell'acciaio, e della ghisa, imballaggi, fusti,

latte, vuoti e lattine di metalli ferrosi e non ferrosi e acciaio anche stagnato; PCB, PCT <25 ppb, ed eventualmente

contenenti inerti, metalli non ferrosi, plastiche, etc., <5% in peso, oli <10% in peso; non radioattivo ai sensi del decreto

legislativo 17 marzo 1995, n. 230.

3.1.3 **Attività di recupero:**

a) recupero diretto in impianti metallurgici [R4];

b) recupero diretto nell'industria chimica. [R4];

c) messa in riserva [R13] per la produzione di materia prima secondaria per l'industria metallurgica mediante selezione

eventuale, trattamento a secco o a umido per l'eliminazione di materiali e/o sostanze estranee in conformità alle seguenti caratteristiche [R4]:

oli e grassi <0,1% in peso

PCB e PCT <25 ppb,

Inerti, metalli non ferrosi, plastiche, altri materiali indesiderati max 1% in peso come somma totale solventi organici

<0,1% in peso;

polveri con granulometria <10 μ non superiori al 10% in peso delle polveri totali;

non radioattivo ai sensi del decreto legislativo 17 marzo 1995, n. 230;

non devono essere presenti contenitori chiusi o non sufficientemente aperti, né materiali pericolosi e/o esplosivi e/o

armi da fuoco intere o in pezzi.

3.1.4 *Caratteristiche delle materie prime e/o dei prodotti ottenuti:*

a) metalli ferrosi o leghe nelle forme usualmente commercializzate;

b) sali inorganici di ferro nelle forme usualmente commercializzate;

c) materia prima secondaria per l'industria metallurgica conforme alle specifiche CECA, AISI, CAEF e UNI.”

Ciò mostra come il recupero delle componenti metalliche sia molto importante e da incentivare, data l'applicabilità di questo capo del D.M. a tutti gli impianti di incenerimento dei rifiuti, ed essendo la componente metallica una buona percentuale del residuo solido di fondo e facilmente separabile con tecnologie largamente conosciute e sviluppate.

Per quanto riguarda il codice CER 190112:

“**13.2. Tipologia:** ceneri dalla combustione di biomasse (paglia, vinacce) ed affini, legno, pannelli, fanghi di cartiere

[190112] [190114] [100101] [100115] [100103] [100117].

13.2.1 **Provenienza:** impianti di recupero energetico di biomasse, legno e fanghi di cartiera.

13.2.2 **Caratteristiche del rifiuto:** ceneri costituite principalmente da potassio, calcio, sodio e loro composti; PCDD in

concentrazione non superiore a 0.1 ppb sul secco, PCB, PCT <25 ppm PCB, PCT <5 ppm sul secco.

13.2.3 **Attività di recupero:**

a) produzione di conglomerati cementizi [R5];

b) cementifici [R5];

c) industria dei laterizi e dell'argilla espansa [R5];

d) formazione di rilevati e riutilizzo per recuperi ambientali (il recupero è subordinato all'esecuzione del test di cessione

sul rifiuto tal quale secondo il metodo in allegato 3 al presente decreto) con esclusione delle ceneri derivanti dalla

combustione dei rifiuti di cui ai punti 9.5 e 9.6 del presente allegato [R5] [R10];

13.2.4 **Caratteristiche delle materie prime e/o dei prodotti ottenuti:**

a) conglomerati cementizi nelle forme usualmente prodotte;

b) cemento nelle forme usualmente commercializzate

c) laterizi e argilla espansa nelle forme usualmente commercializzate.”

In questo possibile recupero risulta limitante la tipologia di input al processo. Infatti, il recupero suggerito è compatibile soltanto con un recupero energetico da biomasse ecc. In ogni caso le caratteristiche del rifiuto sono ben definite e saranno da ottenere tramite appositi trattamenti delle ceneri.

“**13.3 Tipologia:** ceneri pesanti da incenerimento di rifiuti solidi urbani e assimilati e da CDR [190112].

13.3.1 **Provenienza:** impianti di incenerimento di rifiuti solidi urbani e assimilabili.

13.3.2 **Caratteristiche del rifiuto:** ceneri costituite da inerti, ossidi, idrossidi, silicati, cloruri, solfati, carbonati metallici, metalli pesanti e tracce di inquinanti organici.

13.3.3 **Attività di recupero:** cementifici [R5].

13.3.4 **Caratteristiche delle materie prime e/o dei prodotti ottenuti:** cemento nelle forme usualmente commercializzate.”

La soluzione riportata è applicabile, al contrario del precedente, nel caso di incenerimento di tutti i rifiuti solidi urbani, senza distinzione. La limitazione principale in questo caso risiede nelle caratteristiche che deve avere il rifiuto, ovvero essere inertizzato e quindi con le caratteristiche proprie di una scoria vetrificata (gassificazione ad alta temperatura o inertizzazione a valle/ trattamento), non pericolosa.

In questo caso molto importante e rilevante per lo studio e per il confronto tra tecnologie tradizionali e alternative si hanno prodotti finali ricavati dal residuo solido dalla gassificazione tal quale, grazie alle capacità di processo e condizioni operative che ne garantiscono la riuscita del processo di inertizzazione e dunque la possibilità di recupero senza alcuna separazione o trattamento intermedio. Questo aspetto è uno dei vantaggi principali nell'utilizzo del processo di gassificazione al posto dell'incenerimento tradizionale, il quale richiede uno step aggiuntivo a valle al fine di raggiungere le specifiche caratteristiche richieste con metodi di trattamento appositi.

5.2 Flying ashes

Per quanto riguarda le flying ashes, o ceneri volanti, viene attribuita questa denominazione a tutte le particelle che si accumulano durante il processo di trattamento dei fumi, ricche di metalli pesanti ad alte concentrazioni. Per questo motivo si tende principalmente a trattarle per ridurre la pericolosità e l'impatto ambientale, al fine di rispettare le proprietà richieste dalla discarica.

La normativa associa a tali residui due specifici codici CER in dipendenza dalla pericolosità o meno:

- CER 190113*: Ceneri leggere, contenenti sostanze pericolose. Operazioni possibili D13-D15-R12-R13.
- CER 190114: Ceneri leggere, diverse da quelle di cui alla voce 190113*. Operazioni possibili D13-D15-R12-R13.

Le operazioni riportate attuabili sono distinguibili in deposito e quindi discarica oppure recupero di materia. La modalità spesso dipende dalle proprietà e qualità di tali residui, che devono rispettare i limiti imposti dalle direttive sul recupero tramite procedure semplificate:

- D.M. 5 febbraio 1998 per i rifiuti non pericolosi
- D.M. 12 giugno 2002, n. 161 per i rifiuti pericolosi

Nello specifico, si ha che i residui con CER 190114 vengono descritti e trattati al capo 13.2. “Ceneri dalla combustione di biomasse (paglia, vinacce) ed affini, legno, pannelli, fanghi di cartiere”.

Dunque, il recupero di tali sostanze è possibile solo nel caso che la provenienza sia da un impianto di recupero energetico di biomassa, legno e fanghi di cartiera, con specifiche caratteristiche: “ceneri costituite principalmente da potassio, calcio, sodio e loro composti; PCDD in concentrazione non superiore a 0.1 ppb sul secco, PCB, PCT <25 ppm PCB, PCT <5 ppm sul secco”.

Le attività di recupero normate ed accettate sono:

- produzione di conglomerati cementizi [R5];
- cementifici [R5];
- industria dei laterizi e dell'argilla espansa [R5];
- formazione di rilevati e riutilizzo per recuperi ambientali (il recupero è subordinato all'esecuzione del test di cessione sul rifiuto tal quale secondo il metodo in allegato 3 al presente decreto) con esclusione delle ceneri derivanti dalla combustione dei rifiuti di cui ai punti 9.5 e 9.6 del presente allegato [R5] [R10].

Le materie prime e prodotti in questo modo ottenuti sono: “conglomerati cementizi nelle forme usualmente prodotte, cemento nelle forme usualmente commercializzate e laterizi e argilla espansa nelle forme usualmente commercializzate”, cessano così la qualifica di rifiuto.

Mentre per quanto riguarda il CER 190113* non si ha alcun riferimento sulla possibilità di recuperarlo, ciò a causa della natura pericolosa che rende la discarica l'unica possibilità.

Analogamente ai residui CER 190114 non derivanti dagli specifici processi e con le caratteristiche indicate.

5.3 Residui solidi dal trattamento fumi o propri dei processi

Tra i residui solidi risultano anche tutti quelli derivanti dai trattamenti dei fumi e quindi date dall'aggiunta di specifici reagenti o l'utilizzo di determinate tecnologie.

Si noti infatti come i CER 190105*, 190106*, 190107*, 190110* sono relativi al trattamento dei fumi che producono questi ulteriori residui.

L'unico CER tra i citati riportato nei Decreti Ministeriali per il recupero semplificato è il 190110*, dei residui derivanti dai carboni attivi esausti.

“7.1 Tipologia: carboni attivi esausti [060702*] [061302*] [190110*] [070109*] [070110*] [070209*] [070210*] [070309*] [070310*] [070409*] [070410*] [070509*] [070510*] [070609*] [070610*] [070709*] [070710*].

7.1.1 **Provenienza:** processi produttivi industriali e artigianali, incenerimento o pirolisi rifiuti urbani e assimilati.

7.1.2 **Caratteristiche del rifiuto e valori limite delle sostanze pericolose:** granulato solido con presenza di sostanze inorganiche ed organiche adsorbite identificate come sostanze pericolose, molto tossiche, tossiche e nocive ai sensi della direttiva 67/548 e successive modifiche, in concentrazioni inferiori a quelle stabilite nell'art. 1 della decisione 94/904 del 12 dicembre 1994.

7.1.3 **Attività di recupero:** trattamento termico di rigenerazione diretta. Le partite di carboni attivi esausti provenienti da processi produttivi diversi devono essere rigenerate separatamente [R5].

7.1.4 **Caratteristiche delle materie prime e/o dei prodotti ottenuti:** carboni attivi riattivati, riutilizzabili esclusivamente nello stesso processo produttivo di provenienza o similare.”

Mentre i CER 190115*, 190116, 190117*, 190118, 190119 sono relativi alle tecniche di processo alle quali corrispondono determinati residui inevitabili, legati alle condizioni operative.

Il CER 190118 risulta anch'esso al capo 3.1. del D.M. 5/02/98, ed è l'unico tra gli appena elencati ad aver possibilità di recupero semplificato.

In tutti gli altri casi, in cui il residuo prodotto non soddisfa le specifiche caratteristiche richieste dalle due normative per il recupero semplificato, l'unica possibilità sarà lo

smaltimento, previo trattamento nel caso in cui non rispetti i limiti di legge per la messa in discarica.

6. IL MODELLO MATEMATICO

Il lavoro svolto in questa tesi, successivamente ad uno studio approfondito sulle tecnologie, processi termici, reazioni caratterizzanti, limiti di legge e prodotti e residui relativi ad ogni configurazione, ha come obiettivo l'elaborazione di tali dati in un modello di calcolo.

Il fine è la descrizione degli output previsti, imposti degli specifici input quali:

- Caratteristiche del rifiuto in ingresso e relativa composizione percentuale,
- Condizioni operative di funzionamento,
- Parametri fondamentali,
- Tecnologie di trattamento dei fumi.

Il modello è stato sviluppato per descrivere la combustione diretta e la gassificazione, in modo tale da poterne valutare ed evidenziare le differenze, con particolare attenzione ai pro e contro descritti nei capitoli precedenti e di quanto si discosti la gassificazione dalle configurazioni e caratteristiche note della combustione diretta.

Tale sviluppo è atto a sottolineare le dinamiche e le principali reazioni che avvengono nelle differenti condizioni operative e mostrare come questi aspetti sono fondamentali nella successiva quantificazione dei prodotti e residui.

Lo studio si basa sull'esempio del modello Francese WILCI sulle tecnologie di incenerimento e le relative due pubblicazioni [26]:

- Beylot A., Muller S., Descat M., Ménard Y., Michel P., Villeneuve J. 2017. "WILCI: a LCA tool dedicated to MSW incineration in France". Proceedings of the 16th International waste management and landfill symposium. Sardinia, 2017.

- Beylot A., Hochar A., Michel P., Descat M., Ménard Y., Villeneuve J. 2017. "Municipal Solid Waste incineration in France: an overview of Air Pollution Control techniques, emissions and energy efficiency". Journal of Industrial Ecology. In press.

Sulla base di questo esempio, si è proceduto con lo sviluppo autonomo dell'intero modello, applicato alle due tecnologie precedentemente descritte.

6.1 Struttura

Il modello di calcolo è strutturato in diversi fogli organizzativi, atti a scomporre in caratteristiche principali i processi studiati e porli a confronto.

Ora si procede con la descrizione delle fasi di sviluppo e assunzioni alla base del modello, descrivendo in ogni sottocapitolo un diverso foglio di calcolo.

6.2 Composizione del rifiuto

Il primo foglio “info” è relativo alla descrizione delle varie caselle, caratterizzate da specifici colori in relazione alla possibilità o no di modificarne il contenuto. A seguito si ha il foglio “composizione del rifiuto” relativo alla composizione elementare di ogni specifica classe merceologica.

Tabella 21- Composizione elementare delle classi merceologiche

Componenti	Analisi chimico-fisica (% in peso)			Analisi elementare (% in peso)					Pcs
	umidità	ceneri	combustibile	C	H	O	N	S	Kcal/kg
cartone da imballaggio	20	2.26	77.74	36.79	5.08	35.41	0.11	0.23	3463
carta da giornale	25	1.55	73.45	36.62	4.66	31.76	0.11	0.19	3457
riviste e libri	16	13.13	70.87	32.93	4.64	32.85	0.11	0.21	3025
altra carta	23	9.06	67.94	32.41	4.51	29.91	0.31	0.19	3045
materie plastiche	15	8.59	76.41	56.43	7.79	8.05	0.85	0.29	6437
materiale tessile	10	22.49	67.51	43.09	5.37	11.57	1.34	1.17	4685
gomma e cuoio	16	2.82	81.18	41.2	5.03	34.55	0.24	0.07	3852
legno	25	1.98	73.02	37.23	5.02	27.11	3.11	0.28	3664
residui da giardinaggio	45	10.07	44.93	23.29	2.93	17.54	0.89	0.15	2225
residui alimentari	60	5.1	34.9	17.93	2.55	12.85	1.13	0.06	1814
frazione fine (<20mm)	25	44.9	30.1	15.03	1.91	12.15	0.5	0.15	1441

La tabella sopra riportata (sorgente “Tillman et al.-Incineration of municipal and hazardous solid wastes [27]) è stata utilizzata per caratterizzare, negli elementi principali, i materiali in ingresso al trattamento. Perciò in corrispondenza di ogni materiale si hanno le relative quantità in percentuale di:

- Umidità,
- Ceneri,
- Componenti combustibili, suddivisi nei principali elementi: Carbonio, Idrogeno, Ossigeno, Azoto e Zolfo

Inoltre si riportano anche i relativi poteri calorifici superiori medi.

Da sottolineare è la natura ipotetica di tali percentuali e composizioni; identificando un'unica generale composizione e relativo potere calorifico per ogni classe si va ad omogeneizzare le proprietà e conseguentemente ridurre la precisione e specificità. Tale approssimazione risulta necessaria ai fini modellistici, data l'ingente quantità di rifiuti in ingresso e la ridotta variabilità all'interno di una stessa classe, l'errore dovuto all'approssimazione si può tranquillamente trascurare.

Dal potere calorifico superiore si ha il calcolo del potere calorifico inferiore (PCI), tramite una formula empirica semplificata basata sulla quantità di umidità, idrogeno ed il corrispettivo PCS:

$$P.C.I. = P.C.S. - 581 \left(\frac{Umidità}{100} + \frac{9}{100} H \right)$$

Il calcolo sopra riportato è necessario, data la differenza fisica tra i due poteri calorifici:

- Potere calorifico superiore (PCS): Comprende il calore latente di evaporazione dell'acqua prodotta durante la combustione.
- Potere calorifico inferiore: Non tiene conto di tale calore latente di evaporazione. Questa quantità si utilizza per il calcolo della potenza termica e l'energia sviluppata e prodotta.

Questo foglio di calcolo ha al suo interno anche un'altra tabella, legata anch'essa alla composizione elementare di ogni materiale, ma in cui tali componenti non saranno più espresse in termini percentuali ma saranno calcolate in kg/h in dipendenza dalle quantità imposte nel foglio "input" che si introduce di seguito.

6.3 Input

Nella sezione denominata "input" si ha la possibilità da parte dell'utente di immettere le proprie caratteristiche del rifiuto in ingresso. Ciò in termini di quantità annue di rifiuto trattato, ore totali di lavoro all'anno e percentuali delle varie frazioni merceologiche che compongono il combustibile in ingresso. Più nello specifico è necessario che l'utente vada

a specificare la percentuale di ogni classe merceologica sul totale. Le classi sono riportate nella tabella di seguito.

Tabella 22- Classi merceologiche

Componenti
cartone da imballaggio
carta da giornale
riviste e libri
altra carta
materie plastiche
materiale tessile
gomma e cuoio
legno
residui da giardinaggio
residui alimentari
frazione fine (<20mm)

Ovvero le stesse frazioni merceologiche in cui abbiamo visto suddivisa la tabella al capitolo precedente, riguardante le percentuali elementali.

In questo foglio si ha anche il calcolo dei kg/h trattati, composizione totale del rifiuto e quindi quantità di ogni elemento caratteristico in cui sono state scomposte in prima analisi le classi merceologiche e contenuto in ceneri e umidità.

Tabella 23-Composizione elementare

Analisi chimico-fisica (kg/h)			Analisi elementare (kg/h)				
umidità	ceneri	combustibile	C	H	O	N	S

La tabella ora mostrata risulta di colore diverso rispetto a quella antecedente poiché hanno diverse funzioni all'interno del modello. Infatti, alcune caselle e dati, di colore giallo, saranno modificabili dall'utente, il quale potrà scegliere il quantitativo e caratteristiche del determinato fattore o parametro. Al contrario le caselle che si presentano di colore verde saranno imm modificabili dall'utente, ciò perché saranno il risultato di un calcolo interno al

modello e dunque calcolato direttamente dal software sulla base dei dati autonomamente inseriti.

6.4 Combustione

Questa sezione è cruciale per quanto concerne il calcolo dei prodotti gassosi e residui solidi della combustione diretta.

6.4.1 Residui solidi

Come primo aspetto si ha il calcolo delle ceneri.

Partendo dalla quantità totale di ceneri, calcolata nella sezione precedente, sulla base dei dati immessi, si è proceduto valutandone il tenore di polveri fini (flying ashes) e pesanti (bottom ashes).

Questa suddivisione e quantificazione è stata sviluppata ipotizzando una percentuale di ceneri volanti rispetto al totale pari al 15%. Di conseguenza le bottom ashes risultano essere l'85% delle ceneri totali presenti nel rifiuto [12].

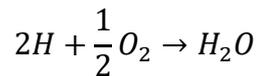
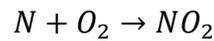
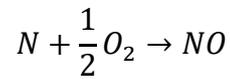
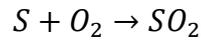
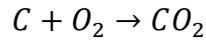
Tale assunto è derivato da studi in letteratura, secondo cui in media la loro proporzione può esser ipotizzata in questo modo.

Da questa ipotesi si ha poi lo sviluppo e calcolo delle più adeguate tecnologie di trattamento dei fumi al fine di estrarne il particolato, ovvero le ceneri volanti.

Infatti le ceneri leggere sono rappresentate dal particolato che, data la dimensione molto fine, procede verso l'alto con il flusso di fumi, andando ad inquinare il gas prodotto. A tal fine si procede poi a un trattamento dei fumi per separare dal flusso gassoso la maggior parte delle particelle solide e non averne l'emissione in atmosfera. Le polveri avranno inoltre un limite di emissione in atmosfera da rispettare adeguatamente regolamentato.

6.4.2 Prodotti gassosi

Nel foglio "combustione" si ha il calcolo di tutti i prodotti gassosi, dati come risultato di specifiche, principali, reazioni di combustione. Ovvero si ipotizza che tutti i componenti, quali: carbonio, azoto, idrogeno e zolfo, vadano a reagire con l'ossigeno, portandone a completa ossidazione delle componenti. Le reazioni considerate, viste precedentemente nel capitolo riguardante la combustione diretta, sono:



Sulla base di tali reazioni equilibrate, si è sviluppato il calcolo dei prodotti all'interno del foglio, avvalendosi anche dei pesi molecolari presenti al foglio "3".

Come risultato si ha la quantità di ciascun gas in kg/h, kg/ton di rifiuto, e moli/h.

Un esempio del calcolo sviluppato viene riportato di seguito per la CO₂ prodotta in kg/h:

$$CO_2 = C * \frac{PM_{CO_2}}{PM_c}$$

Per quanto riguarda l'azoto, data la presenza di due reazioni con produzione di monossido e biossido di azoto, si è ipotizzato, sulla base di studi in letteratura, che il 95% dell'azoto entrante reagisca producendo NO e il restante NO₂ [6].

Tali prodotti sono necessari per valutarne in seguito la concentrazione, sulla base del volume gassoso totale, poiché sono regolamentati da specifici limiti di legge all'emissione gassosa in atmosfera. Dunque, il gas prodotto necessita conseguentemente di specifici trattamenti al fine di ridurne le concentrazioni sotto le soglie ammesse.

6.4.3 NOx termici

Le formule viste pocanzi sono caratteristiche di un processo di combustione. Le conoscenze che si hanno sul trattamento sono tali da dare una sicurezza sulla loro quantificazione e sulle reazioni che le producono.

Nonostante ciò, si ha la produzione di ulteriori inquinanti, precisamente NOx termici, la cui quantificazione è molto più complessa. Per questo motivo ci si aspetta che tali concentrazioni di NOx aggiuntivo siano approssimative e con un grado di errore ed incertezza legato alla molteplicità dei fattori che ne influenzano la produzione.

Più in generale gli ossidi di azoto (NO_x) sono tra i composti più pericolosi e dunque normati con limiti di legge stringenti all'emissione. I principali sono NO e NO₂, oltre che N₂O.

La pericolosità di questi composti è data da:

- La capacità che hanno di reagire con l'ozono e ridurre la concentrazione in stratosfera, contribuendo al buco dell'ozono;
- La natura tossica, nociva per la salute umana e gli esseri viventi in genere;
- La possibilità di reagire in troposfera formando acido nitrico, responsabile delle piogge acide;
- Le proprietà dell'NO₂ che lo rendono uno dei gas serra principali.

Data la pericolosità, è necessario studiare i meccanismi di formazione degli NO_x così da poterne chiarire e quantificare la produzione. Esistono tre meccanismi di formazione e di conseguenza tre classi:

- a. NO_x endogeni (o anche fuel NO_x): formati dall'azoto nella struttura chimica del combustibile. Sono gli NO_x calcolati con il metodo precedente, considerando le reazioni di ossidazione dell'azoto presente.
- b. NO_x termici: formati in condizioni di alte temperature ed eccesso d'aria. Sono gli NO_x che si vanno a calcolare in questa specifica sezione, essendo la combustione diretta un processo sovra stechiometrico ad elevate temperature.
- c. Prompt NO_x: in dipendenza dalla stechiometria della reazione, hanno una cinetica di reazione molto veloce.

L'NO_x termico, prodotto dalla presenza di azoto nell'aria di combustione, necessita di un'alta energia di attivazione, questo è il motivo per cui viene prodotto soltanto alle alte temperature.

Per quantificare questa concentrazione di NO_x aggiuntivo, si è partito da due grafici sperimentali, sotto riportati:

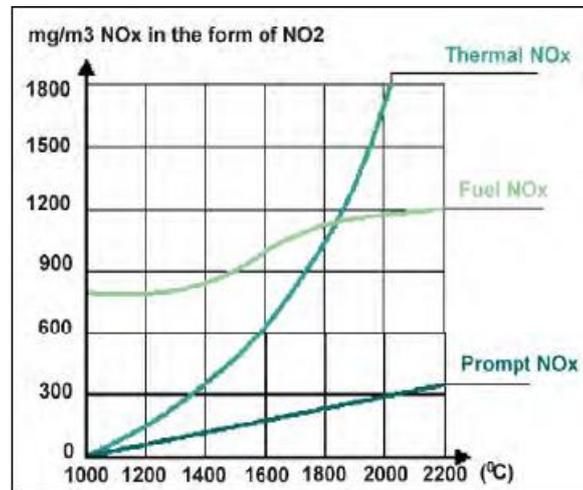


Figura 18- NOx in funzione della temperatura

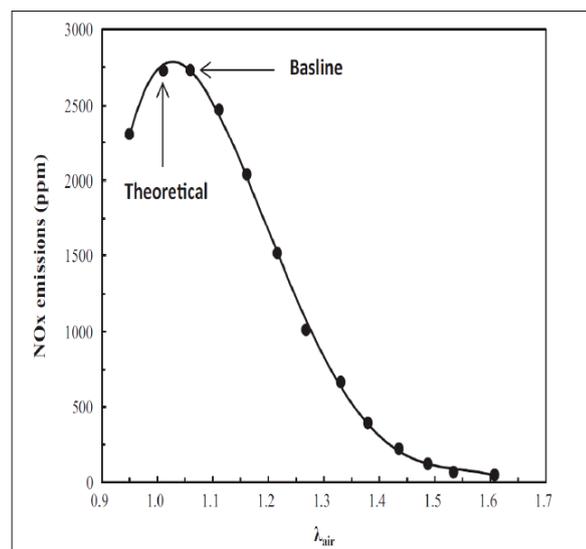


Figura 19- NOx in funzione dell'eccesso d'aria

Rispettivamente raffigurano la quantità di NOx prodotti in dipendenza dalla temperatura e dall'eccesso d'aria. Essendo grafici sperimentali, nel modello sono stati inseriti dando all'utente la possibilità di scegliere la dipendenza (nel caso in cui si abbiano conoscenze maggiori sulla temperatura di processo o sull'eccesso di aria), e di conseguenza valutare dal grafico la concentrazione di NOx corrispondente.

Importante è sottolineare che, essendo una sezione basata sulla libera interpretazione dei grafici lasciata all'utente, sarà necessaria un'accurata osservazione dei dati e delle indicazioni fornite nel modello, al fine di non avere risultati incongruenti con la realtà.

Di seguito si mostra la sezione nel modello con dei dati di esempio.

Tabella 24- NOx termici

NOx termici dal grafico della temperatura		NOx termici dal grafico dell'eccesso aria	
mgNOx/Nm3 (da grafico)	0	Eccesso d'aria	1.5238095
NOx termici in ppm	0 ppm	NOx termici ppm (da grafico)	120.00 ppm
NOx termici in moli	0 kmoliNOx/h	NOx termici in moli	0.0050451 kmoliNOx/h
NOx termici	0 kg/h	NOx termici	0.2321003 kg/h

Da riempire nel caso si calcolino gli NOx termici rispetto all'aria in eccesso o alla temperatura. Di conseguenza l'altro deve essere posto pari a "0"

6.4.4 Portata di fumi

Infine, all'interno di questa sezione si arriva al calcolo della portata di fumi in Nm³. In merito a tale output risulta necessario in prima analisi il calcolo dell'ossigeno stechiometrico sulla base delle moli di ossigeno necessarie a completamente ossidare il combustibile. Infatti, a valle della quantificazione dei prodotti gassosi è stato possibile valutarne le moli da cui ricavare la quantità in kg/h di ossigeno. Si è poi sottratto il quantitativo di ossigeno già presente nel rifiuto, così da avere la quantità esatta da aggiungere per una perfetta stechiometria.

$$O_2\text{aggiunto} = O_2\text{necessario} - O_2\text{presente nel rifiuto}$$

Poiché nella combustione l'agente ossidante è l'aria, si è proceduto valutando il corrispettivo di azoto ed aria stechiometrici, considerando l'aria come sommatoria delle due componenti principali: N₂ e O₂.

$$N_2 = O_2\text{aggiunto} * \frac{79}{21}$$

$$\text{Aria} = O_2 + N_2$$

Essendo questi risultati tutti in kg/h, la portata è stata di seguito calcolata, approssimando i fumi alle caratteristiche di un gas perfetto e quindi tramite l'approssimazione che 1 mole equivale a 22.4 L, così da ricavare la portata di fumi stechiometrici in Nm³/h.

A questo punto, conoscendo la necessità di un eccesso d'aria, al fine di favorirne la completa ossidazione dei composti, si è calcolata l'aria secondaria da immettere nel reattore come supporto alla principale immessa da sottogriglia.

Questa sezione è stata sviluppata considerando l'immissione, da parte dell'utente, della percentuale di ossigeno voluta nei fumi in uscita. Su questa base si ha il calcolo automatico della quantità di aria secondaria, l'eccesso d'aria percentuale e la portata di fumi totale, data come:

$$Portata\ fumi\ totali = aria\ stechiometrica + aria\ secondaria$$

Anche questa portata in Nm³/h.

6.5 Trattamento delle polveri

Con questo foglio del modello inizia la sezione specifica sul trattamento degli inquinanti presenti nei fumi, in cui vengono mostrati i principali trattamenti e metodi, con relative efficienze di abbattimento della concentrazione.

Come precedentemente detto, i trattamenti a cui andrà in contro il fumo esausto prima di venire emesso in aria sono finalizzati all'abbattimento di: polveri, sostanze acide quali HCl, HF e SO₂ e infine ossidi di azoto NO_x.

Partendo quindi dalle polveri, le tecnologie sono molteplici e differenziate per quanto riguarda il meccanismo di funzionamento: cicloni, multi-cicloni, ESP secco, ESP umido e filtri a manica.

Le tecnologie sono state descritte nella sezione apposita; ad ognuna corrisponde una specifica efficienza di trattenimento delle polveri e quindi abbattimento delle concentrazioni del particolato sospeso nei fumi.

Perciò in questo foglio si ha prima di tutto un calcolo delle concentrazioni di ceneri volanti derivanti dalla quantità di ceneri totali, e di seguito le efficienze relative a ciascuna delle tecnologie possibilmente applicabili. Tali percentuali sono le tipiche, derivate da letteratura a valle di studi sulle tecnologie.

Tabella 25-Efficienze di abbattimento polveri

	Efficienze di rimozione
Cicloni	95%
Multicicloni	95%
ESP-secco	99%
ESP-umido	99%
Filtri a manica	99%

In corrispondenza di ogni tecnologia e rispettiva efficienza si ha il calcolo della quantità di ceneri presenti nel flusso gassoso a valle del trattamento e quindi la quantità di polveri che non verranno captate ed estratte dal macchinario. Si ha inoltre il calcolo dei quantitativi in kg/h di ceneri volanti rimosse dal flusso e quindi da smaltire o recuperare adeguatamente.

6.6 Trattamento sostanze acide

La sezione riguarda il trattamento delle sostanze acide presenti nei fumi. Queste sono normate per quanto riguarda i limiti di emissione in atmosfera e le tecnologie maggiormente utilizzate e sviluppate al fine di abbatterne le concentrazioni nella fase gassosa.

Le sostanze trattate sono principalmente HCl, HF e SO₂, i principali inquinanti acidi, ognuno con le proprie efficienze di abbattimento e limiti da rispettare.

Le tecnologie utilizzate a tal fine sono: trattamento ad umido, semi-umido, secco, secco con ricircolo reagenti; ognuna con le proprie efficienze.

Nel modello si è ipotizzata una efficienza di rimozione degli inquinanti costante tra le varie tecnologie, ciò in seguito ad uno studio in letteratura, che ha evidenziato efficienze pressoché equivalenti, differenziandosi soltanto a livello della tecnologia utilizzata e l'utilizzo o meno di acqua per il trattamento e trasferimento degli acidi in altra fase.

Nello specifico si denotano efficienze pari a 99, 99.5 e 99%, rispettivamente per HCl, HF e SO₂.

Specificatamente al modello si ha una grande approssimazione, poiché si andrà a valutare soltanto la quantità ed abbattimento dell'SO₂. Ciò è una conseguenza della scomposizione elementare del rifiuto in ingresso che, essendo un'approssimazione, dà le percentuali in massa dei vari elementi senza considerare cloro (Cl) e fluoro (F), poiché in quantità minime rispetto agli altri.

Dunque, nel foglio del modello si evidenziano le diverse tecnologie, efficienze di rimozione, e conseguenti concentrazioni (mg/Nm³) e quantità di SO₂ (kg/h) rimanenti nel flusso gassoso, ed estratte (kg/h).

Inoltre, tramite uno studio delle tecnologie si ha anche il calcolo dell'acqua di scarto prodotta dalle specifiche metodologie "wet" e "semi-wet". L'ipotesi è di 300 litri/ton di

rifiuto nel caso di wet scrubber, e 200 litri/ton di rifiuto per semi-wet scrubber. Le quantità di acqua di scarto sono calcolate in m³/h.

6.7 Trattamento degli ossidi di azoto

L'ultimo trattamento considerato è quello degli NO_x, ossidi di azoto.

La sezione presenta nella parte superiore la quantità di NO_x prodotti dal trattamento dei rifiuti, in concentrazione (mg/Nm³) e in massa (kg/h).

A valle si mostrano le due tecnologie utilizzate principalmente per tale trattamento: SCR e SNCR, con le rispettive efficienze pari a 99% e 75%. Tali efficienze, ipotizzate a seguito di uno studio sulle tecnologie attualmente presenti sul mercato, evidenziano la grande differenza conseguente all'utilizzo dei due trattamenti [12].

Associate a tali tecnologie si hanno inoltre le quantità di NO_x restanti nel flusso gassoso in concentrazione (mg/Nm³) e massa (kg/h), e la quantità estratta con le due tecnologie analizzate.

Data la grande differenza di efficienza si prevede una maggiore difficoltà di utilizzo del SNCR, poiché una bassa efficienza implica una maggiore concentrazione degli NO_x all'uscita.

6.8 Reagenti

Nella presente sezione si trattano e calcolano i reagenti per il trattamento dei fumi, considerando gli acidi e NO_x.

Il primo aspetto da considerare e sottolineare è che le quantità qui calcolate corrispondono ai reagenti puri, senza considerarne la diluizione.

Si è basato questo calcolo, per quanto riguarda le sostanze acide, sui quantitativi in kg dei tre inquinanti principali, HCl, HF e SO₂. In corrispondenza di 1 kg di ogni sostanza si ha il corrispettivo in kg dei diversi reagenti. Tali quantità sono state definite in letteratura, più precisamente nelle BREF sulla "waste incineration", calcolate tramite un equilibrio delle reazioni chimiche alla base del trattamento [12]. I reagenti valutati sono i tre maggiormente utilizzati: Ca(OH)₂, NaOH e bicarbonato di sodio.

IL MODELLO MATEMATICO

In corrispondenza di ogni inquinante e rispettivo reagente si ha anche la quantità di residuo solido prodotto, anch'esso in kg rispetto a 1 kg di inquinante da rimuovere.

Di seguito l'estratto del modello che concerne ciò che è stato appena spiegato.

Tabella 26- Quantità di reagenti e residui dell'abbattimento acido

inquinante		Ca(OH) ₂	prodotti residui	
	kg	kg		kg
HCl	1	1.014	CaCl ₂	1.521
HF	1	1.85	CaF ₂	1.95
SO ₂	1	1.156	CaSO ₄	2.125
inquinante		NaOH	prodotti residui	
	kg	kg		kg
HCl	1	1.097	NaCl	1.6
HF	1	2	NaF	2.1
SO ₂	1	1.249	Na ₂ SO ₄	2.217
inquinante		Bicarbonato di sodio	prodotti residui	
	kg	kg		kg
HCl	1	2.301	NaCl	1.603
HF	1	4.2	NaF	2.1
SO ₂	1	2.625	Na ₂ SO ₄	2.219

Partendo da tali assunti, specificati nelle BREFs, nel modello si è calcolato l'effettivo quantitativo di reagenti necessari e di residui prodotti, entrambi soltanto rispetto alla quantità di SO₂ presente poiché, come specificato nella sezione di trattamento degli inquinanti acidi, abbiamo il calcolo e quantificazione soltanto di questa componente tra le considerate.

Come conseguenza ci si deve aspettare una sottostima di tali quantità ed una mancanza delle quantità di prodotti residui derivanti da HCl e HF, perché impossibili da quantificare con i dati a disposizione.

Per quanto riguarda i reagenti per il trattamento degli NO_x, il procedimento è identico a quello riportato per gli acidi. Si ha una suddivisione tra NO e NO_x e la quantità relativa di reagenti da utilizzare: ammoniaca e urea, in kg rispetto a 1 kg di inquinanti. Le quantità riportate nelle BREF ed utilizzate per il calcolo nel modello sono riportate di seguito.

Tabella 27- Quantità di reagenti dell'abbattimento di NOx

inquinante		Ammonia	
	kg		kg
NO	1		0.37
NO2	1		0.739
inquinante		Urea	
	kg		kg
NO	1		0.652
NO2	1		1.304

In questo caso non si avranno prodotti solidi residui quindi si avrà soltanto il calcolo dei quantitativi di tali immissioni. Considerando, inoltre, che l'ammonia risulta utilizzabile solitamente in soluzione al 25%, allora si è calcolato anche il quantitativo di acqua necessaria a diluirla.

6.9 Residui solidi

In questa sezione si ha un riepilogo dei principali residui solidi prodotti dal trattamento dei rifiuti in ingresso. Dunque, sono riportati i quantitativi di ceneri di fondo e volanti, calcolate secondo le ipotesi mostrate precedentemente, e le quantità di residui prodotti dalle tecnologie di trattamento dei fumi, più nello specifico Na_2SO_4 e CaSO_4 , derivanti dal trattamento ed abbattimento dei quantitativi di SO_2 presente nei fumi prodotti.

Le percentuali di tali prodotti recuperate o smaltite dipendono dallo specifico rifiuto in ingresso e non sono state possibili da quantificare e stimare, neanche in modo approssimativo, non sapendone le percentuali delle componenti.

6.10 Energia

Il foglio denominato "energia" è relativo al calcolo della potenza termica prodotta dalla combustione dei rifiuti e di conseguenza la quantità di energia effettivamente derivante ed esportata. Essendo la gassificazione una parziale combustione del rifiuto totale, si avranno

differenti risultati e quantità, oltre che differenti tecnologie per estrarre e produrre energia dal fumo prodotto.

Si parte con la quantificazione dei poteri calorifici inferiori per ogni classe merceologica in cui era stato precedentemente suddiviso il campione, come descritto nei capitoli precedenti. Questi poteri calorifici inferiori, in kcal/kg, sono calcolati tramite la formula semplificata mostrata nella sezione “composizione rifiuti”, partendo dai p.c.s., umidità ed idrogeno. Tale formula è una semplificazione ed approssimazione della reale quantità di p.c.i., ma risulta necessaria per il procedere del calcolo di potenza ed energia.

Dato il p.c.i., si trasforma in kWh/kg, da cui a sua volta si calcolano le potenze termiche sviluppate da ciascuna componente merceologica e dunque la potenza termica totale dell'intera frazione in ingresso al processo:

$$Potenza\ termica_{classe} = P.C.I._{classe} * Kg_{classe}$$

$$Potenza\ termica_{tot} = \sum P.C.I._i * Kg_i$$

Immediatamente di seguito si ha quest'ultima quantità normalizzata sulle tonnellate di rifiuto in ingresso, in MWh/ton.

Partendo da tali dati si è proceduto quantificando l'efficienza elettrica netta di generazione, a seguito dell'utilizzo di una turbina a vapore, percentuale suggerita in un range tra 14-27% secondo le normali e più diffuse tecnologie trovate sul mercato, la cui scelta ricade sull'operatore in dipendenza dalla tecnologia e relative capacità.

Così si è calcolata l'effettiva potenza elettrica generata se tutta la potenza termica prodotta viene sfruttata a tal fine, considerandone l'utilizzo interno all'azienda e dunque mostrando soltanto l'efficienza e quantità finale di quella effettivamente esportabile e vendibile, esclusi gli autoconsumi.

$$Potenza\ elettrica = Efficienza\% * Potenza\ termica$$

Nel caso invece di sistema di cogenerazione, ovvero di produzione e utilizzo di energia elettrica e termica, sistema CHP, si è proceduto dando la possibilità all'operatore di andare

ad immettere i MWh/ton di generazione di energia elettrica e termica nette, poste di default, secondo i dati tipici e tramite una ricerca in letteratura, rispettivamente pari a 0.61 MWhe/ton e 0.535 MWht/ton.

Conseguentemente a tale immissione si ha automatico il calcolo delle potenze (elettrica e termica) in kW e dunque la potenza totale e relativa energia in kWh.

$$Potenza\ elettrica = 0.61 * tonnellate_{rifiuto}$$

$$Potenza\ termica = 0.535 * tonnellate_{rifiuto}$$

$$Potenza\ totale = Pot_{elettrica} + Pot_{termica}$$

Successivamente si ha la descrizione del procedimento attuato per quanto riguarda la gassificazione e l'energia prodotta in tali processi, con le relative tecnologie possibili.

6.11 Gassificazione

Il foglio riguarda il processo di gassificazione arrivando alla definizione delle quantità di agenti ossidanti, potenza termica del syngas e produzione di energia elettrica e/o calore da asportare.

Inizialmente, sulla parte superiore del foglio, si può notare il grafico su cui sono basati i calcoli sviluppati, che differenziano la gassificazione dalla combustione diretta.

Il grafico, riportato anche precedentemente in un capitolo di introduzione alla gassificazione, è sperimentale e relativo alla relazione tra il rapporto ER, ossigeno presente rispetto allo stechiometrico, la temperatura del processo e l'efficienza di reazione: al variare del primo termine si hanno i rispettivi altri due.

Per sviluppare la presente sezione si è quindi proceduto alla parametrizzazione delle due equazioni valutandone l'intercetta di un gran numero di punti raffigurati, in modo tale da aver maggiore precisione e quindi minor varianza tra i valori sperimentali e quelli definiti dalle equazioni derivate.

6.11.1 Parametri al variare di ER

Nella prima parte si ha la possibilità da parte dell'utente di immettere il rapporto tra l'ossigeno immesso e quello realmente necessario per la completa ossidazione.

Tale valore deve risultare in un range tra 0.2 e 0.5 per una corretta gassificazione.

A seguito dell'immissione si ha il calcolo automatico della temperatura ed efficienza di reazione come appena descritto, oltre che della rispettiva quantità di agenti ossidanti da immettere in kg/h: aria, ossigeno o vapore acqueo.

6.11.2 Potenza termica syngas

A questo punto si ha una suddivisione tra i differenti agenti ossidanti per cui viene calcolato il quantitativo totale di fumi prodotti in moli e in portata (Nm³/h).

Tali calcoli si sviluppano rispetto alla condizione di semplice combustione, ovvero nel caso in cui si ha una quantità di ossidante sopra allo stechiometrico. Infatti, sulla base di questi dati, ricavati precedentemente, si può valutare questa portata di fumi come una frazione della ricavata nel foglio "combustione", in dipendenza dal rapporto ER.

Successivamente si procede con il calcolo del potere calorifico inferiore del syngas sulla base del PCI del rifiuto in ingresso, sfruttando l'efficienza di reazione calcolata tramite l'equazione implementata dal grafico.

La formula utilizzata è [7]:

$$PCI_{syngas} = \frac{\eta * PCI_{input} * Input}{Portata_{fumi}}$$

Si quantifica infine la potenza termica del syngas prodotto, valutata come:

$$Potenza\ termica_{syngas} = PCI_{syngas} * Portata_{fumi}$$

6.11.3 Energia dalla gassificazione

Si procede con l'ultima sezione, dedicata al calcolo dell'energia prodotta dal processo, in dipendenza dal PCI del syngas e le tecnologie utilizzate per ricavare energia elettrica o un sistema di cogenerazione.

Date le maggiori temperature a cui si trovano i fumi, si hanno molteplici tecnologie da poter applicare nel caso di produzione di energia elettrica: caldaia e turbina a vapore, motori a

combustione interna, ciclo combinato turbina a gas oppure utilizzo del syngas in centrali elettriche già esistenti. Ciascuna soluzione ha una propria efficienza di produzione elettrica, perciò a tal fine si lascia all'utente la possibilità di scegliere in un range di percentuali suggerite, rispetto alle tecnologie presenti sul mercato e condizioni operative, il più adatto e conforme alle proprie esigenze e condizioni.

Oltre alla possibilità di produrre esclusivamente energia elettrica si ha anche l'efficienza relativa al sistema di cogenerazione CHP. In corrispondenza di tutte le tecnologie si ha, a valle dell'immissione dell'efficienza scelta, il calcolo della potenza generata e relativa energia.

6.12 Limiti all'emissione in atmosfera

Il presente foglio raccoglie tutti i dati relativi ai contaminanti che richiedono trattamento apposito per rispettare i limiti di emissioni in atmosfera dati dalla normativa e dalle BAT. Il foglio è completamente illustrativo dei risultati precedentemente ottenuti, non si ha alcuna ulteriore immissione di dati e nozioni da parte dell'utente.

Si ha una prima raccolta delle concentrazioni di inquinanti a monte del trattamento dei fumi ed una successiva descrizione dei limiti imposti dalla normativa e quelli consigliati nelle BREFs, come di seguito mostrati [12] [13]:

Tabella 28-Limiti di legge e delle BAT

Concentrazioni ammesse per legge		Limiti BAT	
SO ₂	50 mg/Nm ³	10 mg/Nm ³	
NO _x	200 mg/Nm ³	70 mg/Nm ³	
Polveri	10 mg/Nm ³	5 mg/Nm ³	
HCl	10 mg/Nm ³	5 mg/Nm ³	
CO	50 mg/Nm ³	50 mg/Nm ³	
HF	1 mg/Nm ³	0.5 mg/Nm ³	
TOC	10 mg/Nm ³	10 mg/Nm ³	
Hg	0.05 mg/Nm ³		
Cd e Tl	0.05 mg/Nm ³		
PCDD/F	0.1(ng/m ³)		

Poi si procede con la valutazione delle concentrazioni degli inquinanti studiati, a valle dei trattamenti considerati.

Come visto gli inquinanti presi in considerazione sono SO₂, NO_x e polveri, per cui sono state valutate le efficienze dei differenti metodi di trattamento e conseguenti concentrazioni all'uscita dei fumi, in mg/Nm³.

Si è posto a questo punto un confronto tra i valori derivati ed i limiti sopra riportati, in modo tale da avere automaticamente una valutazione del modello se i limiti vengono o no rispettati e con quali tecnologie, in modo da lasciare all'utente la possibilità di scegliere la soluzione che meglio massimizza le richieste normative in materia ambientale.

6.13 Criticità

Il modello permette di simulare in modo accurato l'andamento dei processi termici per il trattamento di rifiuti, nello specifico di incenerimento e gassificazione. La finalità è quindi quella di valutare i prodotti finali in relazione agli input di materiali trattati, alle tecnologie adottate e alle condizioni operative di processo. Nonostante sia stato sviluppato con l'obiettivo di minimizzare l'errore e simulare al meglio le condizioni reali di processo, è stato necessario apporre specifiche approssimazioni, dovute alla complessità determinata da una grande variabilità dei fattori che influenzano le reazioni coinvolte.

La prima approssimazione riscontrabile risulta essere la riduzione dell'input a specifiche classi merceologiche con le rispettive composizioni elementari medie, necessaria poiché i rifiuti in ingresso non possono essere analizzati chimicamente uno ad uno a monte del trattamento e quindi inevitabilmente arrotondati tramite una caratterizzazione media standard.

Un'altra semplificazione considerata nella fase iniziale riguarda la valutazione del PCI: calcolato tramite una formula sperimentale, con uno specifico margine di errore, sulla base di altri dati approssimativi e medi (PCS, idrogeno e umidità).

Ulteriore assunzione necessaria allo sviluppo del modello è la suddivisione delle ceneri totali in percentuali volatili e di fondo. Le reali frazioni sono molto complesse da definire e da valutare caso per caso in dipendenza dallo specifico rifiuto in ingresso, incompatibilmente con le approssimazioni di un modello.

Le stesse reazioni sono caratterizzate da un grado di incertezza dato dall'aleatorietà delle componenti e dalle condizioni operative, quali il contatto tra ossigeno ed elementi, la

turbolenza o la temperatura. Tale incertezza risulta maggiore nello studio della gassificazione, data la compresenza di più reazioni interconnesse e la condizione sottostechiometrica, che porta ad una non chiara e complessa quantificazione dei prodotti e condizioni di equilibrio.

Gli NO_x termici, come precedentemente detto, dovranno essere calcolati dall'utente tramite i grafici sperimentali forniti. In questo modo verrà sommato l'errore nella lettura dell'utente alla sperimentabilità dei dati forniti dai grafici.

Per quanto riguarda il trattamento dei gas l'approssimazione, inevitabile, è legata alla scelta dell'efficienza percentuale per ogni tecnologia che viene determinata sulla base delle analisi dei dati presenti sul mercato. Inoltre, nel caso del trattamento degli acidi, si va a considerare soltanto l'SO₂ e dunque non tutti gli inquinanti acidi da trattare. Tale assunzione comporta una sottostima della sezione poiché non si prende in considerazione la possibilità che tale trattamento non sia sufficiente a ridurre HCl e HF sotto i limiti stabiliti. Tali stime ed approssimazioni risultano necessarie al fine di produrre un modello completo ed adeguato all'obiettivo, con un grado di dettaglio pari a quello mostrato finora. Si è cercato di minimizzare l'errore ed aumentare così il grado di precisione e stima, basando l'intero sviluppo su dati certi e studi affermati scientificamente. Ciò ha apportato stabilità e validità allo studio, rendendolo una buona partenza per la valutazione delle tecnologie.

7. CONCLUSIONI

Il presente lavoro auspica di fornire un modello che possa divenire uno strumento pratico per la stima dei processi di incenerimento e gassificazione dei rifiuti solidi urbani.

Lo studio è stato svolto, al fine di fornire risultati attendibili, basandosi sui dati ricavati sperimentalmente e sulla bibliografia disponibile

Il modello implementato fa riferimento alle possibili diverse condizioni operative alla quale può performare il processo di gassificazione. Tali informazioni, infatti, influenzano fortemente i risultati e la qualità dei prodotti finali.

Inoltre si è evidenziata una stima delle emissioni gassose sviluppate dai processi, il tutto attraverso una valutazione delle tecnologie attualmente disponibili sul mercato ed associando a ciascuna una percentuale di rimozione degli inquinanti adeguata. Questo aspetto aiuta l'utenza con la scelta della tecnologia che maggiormente soddisfa i requisiti e limiti di emissione.

Il modello contiene un grado di incertezza ed errore dovuti alla natura sperimentale dei dati di partenza e alla valutazione dello stato dell'arte come una caratterizzazione media delle tecnologie presenti sul mercato.

Un limite del modello risulta essere la definizione del rifiuto in ingresso come un insieme di classi merceologiche con specifiche caratteristiche medie dal punto di vista elementare e del potere calorifico. Tale assunto diviene necessario a causa dell'eterogeneità dei possibili residui trattabili che di conseguenza comportano piccoli errori nei calcoli e nei risultati successivi.

Un aspetto che non è stato sviluppato nel modello, ma solo dal punto di vista teorico nello studio, risulta essere il problema relativo al residuo solido. Infatti, ci si è limitati ad una valutazione delle caratteristiche qualitative e possibili recuperi o smaltimenti in dipendenza dalle condizioni operative e tipologia di processo, senza però applicare i risultati all'interno del modello. Ciò è dovuto alla complessità dell'argomento e la variabilità dei fattori. Infatti, risulta necessario uno studio chimico del residuo per valutarne la corretta destinazione a valle del processo; aspetto che non è possibile da valutare in questo modello poiché privo di dati sufficienti ed esaustivi.

CONCLUSIONI

Per questo motivo un possibile ulteriore sviluppo del lavoro svolto potrebbe essere la valutazione, basandosi su dati scientifici, di una possibile destinazione del residuo a valle del processo termico. Questo passo aggiuntivo potrà avvenire a seguito di una definizione molto approfondita del rifiuto in ingresso e delle relative caratteristiche chimiche attese.

Tale differenziazione chimica del rifiuto solido urbano in ingresso andrebbe inoltre ad influenzare le caratteristiche del flusso gassoso da trattare ed il rispetto dei limiti di legge, fornendo una maggiore completezza del processo analizzato e la relativa applicabilità.

Mediante questo studio si vuole andare ad incoraggiare l'utenza, a fronte dell'ancora ridotto utilizzo dei processi termici nel campo dei rifiuti solidi urbani indifferenziati.

Il modello perciò può risultare come un buono strumento di partenza al fine di progettare e verificare la compatibilità tra le condizioni locali, quali rifiuti da raccolta indifferenziata o specifiche necessità energetiche, e l'applicazione di una tecnologia termica, quale l'incenerimento o la gassificazione.

BIBLIOGRAFIA

- [1] ISPRA, «Rapporto rifiuti urbani,» 2020.
- [2] *Direttiva quadro sui rifiuti, 2008/98/EC.*
- [3] Screening of waste management performance of eu member states, European Commission, 2012.
- [4] *European Commission- Integrated Pollution Prevention and Control, 2006.*
- [5] S. Cernuschi, M. Grosso, F. Viganò, M. C. Zanetti, D. Panepinto e M. Ragazzi, "Libro bianco sull'incenerimento dei rifiuti urbani", Settembre 2020.
- [6] G. Cau e D. Cocco, «Processi di gassificazione».
- [7] D. Panepinto, «Analisi analitico sperimentale dei trattamenti termici tradizionali ed innovativi per diverse matrici solide,» 2011.
- [8] F. Asdrubali, «Energia dai rifiuti- Corso di Impatto ambientale, Modulo Pianificazione energetica,» 2012/13.
- [9] U. Arena, «Gassificazione dei rifiuti solidi urbani: stato dell'arte dei principali processi e tecnologie,» in *RS Rifiuti Solidi vol. XXVI n. 1*, 2012.
- [10] U. Arena e M. L. Mastellone, «I processi di gassificazione di rifiuti solidi: aspetti tecnologici e di processo,» in *Gassificazione e porlisi tecnologie innovative per la valorizzazione energetica dei rifiuti*, 2010.
- [11] ENEA, «Analisi e modellazione numerica del processo di gassificazione del carbone in reattori updraft,» 2010.
- [12] Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration, Integrated Pollution Prevention and Control, Eurpean Commission, Agosto 2006.
- [13] *Decreto Legislativo 152/2006 - Testo Unico Ambientale.*
- [14] *Decreto Legislativo 133/2005, "Attuazione della direttiva 2000/76/CE, in materia di incenerimento dei rifiuti".*
- [15] *Decreto Legislativo 59/2005, "Attuazione integrale della direttiva 96/61/CE relativa alla prevenzione e riduzione integrate dell'inquinamento".*

BIBLIOGRAFIA

- [16] *D.M. 5/02/1998, "Individuazione dei rifiuti non pericolosi sottoposti alle procedure semplificate di recupero ai sensi degli art. 31-33 del D.Lgs. 5/02/1997, n. 22".*
- [17] G. Genon, V. Tedesco, P. Urso e C. Del Taglia, Quaderno 51 "Verifica della fattibilità di un impianto di trattamento termico dei rifiuti a tecnologia innovativa nella Provincia di Torino", ATOR-Associazione d'ambito torinese per il governo dei rifiuti, Novembre 2009.
- [18] «Studi sugli inceneritori esistenti,» TWG energy subgroup, 2003.
- [19] *Art.187-ter/Legge 128/2019.*
- [20] Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana.
- [21] F. Valerio, «Impatti ambientali delle ceneri dei residui solidi prodotti dall'incenerimento di rifiuti urbani,» Istituto nazionale ricerca sul cancro, Servizio semplice chimica ambientale, Genova, Ottobre 2008.
- [22] «Linee guida per l'applicazione della disciplina end of waste di cui all'art.184 ter comma 3 ter del D.Lgs. n.152/06,» Consiglio SNPA.
- [23] *Decreto Ministeriale 3/08/2005, "Definizione dei criteri di ammissibilita' dei rifiuti in discarica".*
- [24] Management of bottom ash from WTE Plants. Working group on thermal treatment of waste, ISWA, 2006.
- [25] *Decreto Ministeriale 161/2002, "Individuazione dei rifiuti pericolosi che e' possibile ammettere alle procedure semplificate.".*
- [26] A. Beylot, S. Muller, M. Descat, Y. Menard, P. Michel e J. Villeneuve, *WILCI: A LCA tool dedicated to MSW incineration in France*, CISA Publisher, Italia, 2017.
- [27] Tillman, Incineration of municipal and hazardous solid wastes.
- [28] U. Arena, F. Ardolino e F. D. Gregorio, «A life cycle assessment of environmental performances of two combustion- and gassificatio-based waste-to-energy technologies,» 2015.
- [29] F. Ardolino, C. Lodato, T. Astrup e U. Arena, «Energy recovery from plastic and biomass waste by means of fluidized bed gasification: A life cycle inventory model,» 2018.

BIBLIOGRAFIA

- [30] U. Arena, «Il ruolo della termovalorizzazione nella Recycling Society,» in *Il cantiere dell'energia dai rifiuti: tecnologie ed esperienze*, 2015.
- [31] S. Consonni, M. Giugliano e M. Grosso, *Alternative strategies for energy recovery from municipal solid waste*, 2005.