POLITECNICO DI TORINO

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

Tesi di Laura Magistrale

Valutazione delle emissioni di CO_2 dagli impianti di trattamento termico

Relatore:
Panepinto Deborah

Candidata:
Federica Germinaro

Anno Accademico: 2021-2022

Abstract

The increase in the production of waste arouse many concerns about the possible environmental repercussions. In the recent years, it has been possible to extend the life cycle of the products, to reuse their still useful fractions once they reach the end of their life and recover their components that can still be exploitable, reducing waste production at source. Despite this, nowadays, waste production is still characterized by very high values both in Italy and Europe. Separate collection makes it possible to better manage this production, allowing the reintegration of the still useful fraction present in the waste in the production processes and the production of secondary materials. However, the share of waste collected in an undifferentiated way still constitutes a significant flow to be managed as sustainably as possible. So thermal treatment allow not only to improve the management of this flow, but also to enhance it through the recovery of thermal and electrical energy in a completely new conception of waste as a resource.

The growing interest in thermal treatment has allowed a rapid technological development that has allowed not only to greatly reduce the emissions of pollutants generated by these plants, but also to reduce operating costs. Indeed the application and control of emissions standards and the use of the modern technologies (BAT - Best Available Technologies) for the reduction of pollutant have made it possible to reduce atmospheric emissions to such levels that the risk associated with waste incinerators are now considered very low.

Therefore this thesis work aims to evaluate the possible environmental compatibility resulting from the use of waste-to-energy of municipal solid waste, as an alternative to other forms of management. The CO_2 emission was taken as a reference for the

assessment of these evaluations. The reason of this choice compared to other kind of pollutants, which are also extremely harmful to the environment, take place in the fact that CO_2 emissions represent the least governable aspect from a technological point of view. Indeed there are many suitable and modern abatement systems for all other types of pollutants (NO_x, SO_x, dust, etc...) that allow to reach concentrations in atmosphere much lower than those imposed by the legislations. For CO_2 there aren't still such consolidated technologies. Finally, as is know, CO_2 is one of the main Greenhouse Gas (GHG).

According to experts, climate change leads to an increasing frequency and intensity of extreme events such as heats waves, forest fires and floods. World leaders gathered during 2021 at the UN Climate Change Conference in Glasgow in order to commit to achieving challenging new goals, such as reducing greenhouse gas emissions by 2030 and decarbonisation by 2050.

The CO_2 emissions has been evaluated for 2019 for Northern Italy and taking as reference one typical plant by region. The calculations were based not only on the production of undifferentiated waste from each region, but also on their composition. The environmental convenience of electric or thermal and electric energy recovery implemented by the same plants was then evaluated, using waste itself as a resource and alternative to the use of fossil fuels for the generation of the same amount of energy. Finally, different waste management scenarios were discussed in terms of CO_2 emissions.

Contents

Abstract **ii**

Introduzione **vii**

1 I rifiuti: generalità e produzione **0**

1.1 Il contesto Europeo 2

1.1.1 Produzione di rifiuti 4

1.1.2 La gestione dei rifiuti urbani in Europa 6

1.2 Il contesto nazionale 9

1.2.1 Produzione di rifiuti 9

1.2.2 Raccolta differenziata 13

1.2.3 Tassi di avvio ad incenerimento 18

1.3 Conclusioni 22

2 I trattamenti termici **25**

2.1 Generalità 25

2.2 Incenerimento: caratteristiche e funzionamento 26

2.2.1 Conferimento, stoccaggio e alimentazione dei rifiuti 28

2.2.2 Camera di combustione 29

2.2.3 Depurazione fumi 39

2.2.4 Recupero energetico 56

2.2.5 Frazioni residue 57

2.3 Gassificazione 58

2.4 Pirolisi 61

2.5 Tecnologie a confronto 64

2.5.1 Recupero Energetico 66
2.5.2 Aspetti Ambientali 68

3 La CO_2 derivante da incenerimento 71
3.1 Introduzione e premessa metodologica 71
3.1.1 Definizione della CO_2 biogenica 72
3.2 La CO_2 nel Nord Italia da incenerimento 74
3.3 La CO_2 da combustibili fossili 94
3.3.1 Calcolo della CO_2 evitata 97

4 Trattamenti Meccanico Biologici 99
4.1 Aspetti Generali 99
4.2 Fasi di processo 102
4.2.1 Trattamenti meccanici 102
4.2.2 Trattamenti biologici 111
4.3 Valutazione delle emissioni di CO_2 secondo due differenti scenari 122
4.3.1 Conclusioni 125

5 Accenni ai cambiamenti climatici 127
5.1 Il ruolo della CO_2 130
5.2 Conseguenze 132
5.3 Interventi di mitigazione 138

6 Conclusioni e sviluppi futuri 142

Bibliography 148

List of Figures 149

Introduzione

L'interesse nei confronti dei processi di trattamento termico dei rifiuti deriva dalla consapevolezza che una moderna e sostenibile gestione dei rifiuti non possa prescindere dall'implementazione di processi termici, in alternativa ad altri sistemi di gestione. Negli ultimi anni si è riusciti ad estendere il ciclo di vita dei prodotti, a riutilizzare le loro frazioni ancora utili una volta giunti a fine vita e a recuperarne la componente ancora valorizzabile, riducendo così a monte la produzione dei rifiuti; pur tuttavia, oggigiorno, la produzione dei rifiuti sia in Italia che in Europa si attesta a valori ancora molto alti. La raccolta differenziata gioca quindi un ruolo prioritario nella gestione dei rifiuti, consentendo la realizzazione di sistemi di riuso e produzione di materiali secondari. Nonostante questo ci si trova ad avere a che fare con cospicue quantità di rifiuto indifferenziato, per il quale è necessario trovare opportune e per quanto possibile sostenibili modalità di gestione; ed è proprio in virtù di tale necessità che diviene fondamentale il ruolo svolto dal comparto dell'incenerimento. I trattamenti termici dei rifiuti infatti possono rappresentare una soluzione alle minacce ambientali legate all'esistenza di rilevanti flussi di rifiuti, riducendone il volume ed il rischio ad essi associato, concentrando o distruggendo le sostanze pericolose in essi contenute. Al contempo permettono il recupero di energia, minerali e/o sostanze chimiche, riducendo così globalmente l'impatto ambientale che potrebbe altrimenti derivarne. E' proprio grazie al crescente interesse nei confronti di questi tipi di processi che il comparto dell'incenerimento ha subito un rapido sviluppo tecnologico, consentendo di ridurre le emissioni in atmosfera prodotte dai singoli impianti e di limitare i costi mantenendo o addirittura migliorando le prestazioni ambientali. Inoltre, l'applicazione e il controllo delle norme di emissione e l'impiego di tecnologie moderne per la riduzione dell'inquinamento hanno permesso di abbattere le emissioni atmosferiche a livelli tali

che oramai i rischi di inquinamento associati agli inceneritori di rifiuti sono considerati molto bassi.

Il presente lavoro di tesi si pone come obiettivo la valutazione dei possibili benefici ambientali derivanti dal ricorso alla termovalorizzazione dei rifiuti solidi urbani in alternativa ad altre forme di gestione, grazie anche al recupero di energia attuato dagli impianti che utilizzando il rifiuto stesso come risorsa. In particolare, si sono valutate, prendendo come anno di riferimento il 2019, le emissioni di CO_2 nel Nord Italia prodotte da tali tecnologie e quelle evitate grazie al recupero energetico attuato.

I motivi che adducono a considerazione proprio l'anidride carbonica derivante da incenerimento rispetto ad altri tipi di inquinanti, anch'essi oltremodo dannosi per l'ambiente, risiede nei seguenti punti:

1. per prima cosa le emissioni di CO_2 rappresentano l'aspetto meno governabile tecnologicamente: mentre per tutti gli altri contaminanti (polveri, NO_x, SO_x, ecc.) esistono idonei sistemi di abbattimento (BAT - Best Available Technologies) che permettono di raggiungere concentrazioni di molto inferiori a quelle che la normativa pone come massime, per la CO_2 invece le tecnologie di riduzione non sono ancora così consolidate;

2. in secondo luogo, la CO_2 è uno dei principali gas climalteranti.

Proprio nel corso del 2021 si è tenuta la conferenza delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici a Glasgow, nel corso della quale le parti hanno esaminato i progressi compiuti in relazione agli impegni assunti nel quadro dell'accordo di Parigi. Secondo gli esperti sul cambiamento climatico, il riscaldamento globale sta provocando cambiamenti crescenti, e in alcuni casi irreversibili, sui diversi comparti ambientali determinando anche un aumento nella frequenza e nell'intensità di eventi estremi quali ondate di calore, inondazioni e incendi boschivi. Ecco quindi che la COP26 ha riunito i leader mondiali per agire insieme al fine di impegnarsi nel raggiungimento dei seguenti obiettivi:

- raggiungere obiettivi più ambiziosi di riduzione delle emissioni di gas a effetto serra entro il 2030;

- discutere di misure volte all'adattamento alle conseguenze inevitabili dei cambiamenti climatici;

- aumentare i finanziamenti a favore dell'azione per il clima, in particolare per i paesi in via di sviluppo.

Sulla base di quanto sopra esposto ne deriva che la struttura del presente lavoro è così articolata:

- Nel Capitolo 1 si fornisce un quadro generale in merito alla produzione e gestione dei rifiuti in Italia ed in Europa, analizzando l'evoluzione di tali fenomeni nel tempo. Questa analisi permette di contestualizzare i calcoli successivi di emissioni di CO_2 in relazione alla produzione dei rifiuti stessi.
- Nel Capitolo 2 viene affrontato il tema dei trattamenti termici, dettagliando le sue singole fasi e processi, analizzando diverse tecnologie di combustione e depurazione dei fumi, nonché confrontando i diversi approcci ad oggi in uso.
- Nel Capitolo 3 vengono illustrati i calcoli inerenti la valutazione delle emissioni di CO_2 nel Nord Italia, prendendo a riferimento un singolo impianto per regione e partendo da una composizione merceologica quanto più veritiera fornita dagli impianti stessi o dalle Arpae operanti sul territorio. All'interno dello stesso capitolo si è dimostrata la convenienza ambientale del recupero di energia elettrica e termica dai rifiuti.
- Nel Capitolo 4 vengono descritti i TMB (Trattamenti Meccanico Biologici) e si riporta uno studio che dimostra lo svantaggio, in termini di CO_2, di tali processi quali pre-trattamenti all'incenerimento.
- Nel Capitolo 5 si fa un breve accenno ai cambiamenti climatici ed al ruolo svolto dalla CO_2 quale gas climalterante.
- Il Capitolo 6 è preposto alle conclusioni e a possibili scenari futuri.

Chapter 1

I rifiuti: generalità e produzione

Nel linguaggio comune il rifiuto può essere definito come lo scarto della produzione e del consumo. In Italia i rifiuti vengono dapprima disciplinati dal Decreto Legislativo n.22 del 5 Febbraio 1997, il cosiddetto Decreto Ronchi, e poi con il successivo Decreto Legislativo del 3 Aprile 2006 n.152 (Testo Unico Ambientale) che lo amplia. Il suddetto decreto definisce rifiuto:

≪ Qualsiasi sostanza od oggetto che rientra nelle categorie riportate nell'Allegato A alla parte quarta del presente decreto e di cui il detentore si disfi o abbia l'intenzione o abbia l'obbligo di disfarsi; indipendentemente dal fatto che il bene possa potenzialmente essere oggetto di riutilizzo.≫

I rifiuti possono essere classificati in base all'origine in rifiuti urbani e rifiuti speciali, oppure in base alle loro caratteristiche di pericolosità in rifiuti pericolosi e non pericolosi.

Tutte le singole tipologie di rifiuti sono identificate con il codice CER - Codice Europeo dei Rifiuti: trattasi di un numero a sei cifre assegnato ai singoli rifiuti in base al processo di provenienza e alla composizione; tali cifre sono seguite da un asterisco (*) nel caso il rifiuto sia classificato come pericoloso. Il CER è in vigore dal 1 Gennaio 2002 e prevede l'identificazione dei rifiuti per mezzo di tre coppie di cifre che individuano rispettivamente:

- la classe, ossia il processo produttivo di provenienza del rifiuto;
- la sottoclasse, approfondimenti riguardanti il processo produttivo o il rifiuto;

- la categoria, ulteriori precisazioni sulla tipologia del rifiuto.

Ad oggi i rifiuti ed i suoi relativi impatti sull'ambiente sono un tema caldo sia a livello nazionale che europeo, proprio per questo si è intensificato l'iter legislativo e concetti quali economia circolare e raccolta differenziata. Lo sviluppo crescente della raccolta differenziata e la spinta data nel senso della riduzione dei rifiuti alla fonte, inducono ad una sempre più corretta gestione del problema, ma il vero cambiamento si è concretizzato nel concetto stesso di rifiuto: ad oggi rappresenta una risorsa e non più una minaccia.

Il rifiuto infatti è purtroppo diventato uno dei prodotti più diffusi delle società industrializzate e di conseguenza la smisurata quantità di materiali dispersi desta preoccupazioni per il danno ambientale, economico e per le ripercussioni sociali. Diventa fondamentale, quindi, una corretta gestione del rifiuto, specie per società che sono basate su un utilizzo sregolato dei beni di consumo e di risorse.

Ecco perchè nei successivi paragrafi verranno illustrati i dati relativi alla gestione e produzione dei rifiuti, nonchè dei tassi di raccolta differenziata e di avvio ad incenerimento per contesti nazionali ed europei.

1.1 Il contesto Europeo

Prima degli anni '80 la gestione dei rifiuti era improntata alla raccolta del materiale grezzo e al successivo smaltimento in discarica. In seguito, grazie anche ad una nuova e crescente sensibilità nei confronti degli aspetti ambientali, si è sviluppato a livello europeo un nuovo modello di gestione basato su alcuni principi fondamentali, che mirano in generale al recupero della frazione ancora utile del rifiuto.

La gestione dei rifiuti nell'Unione Europea è regolata dalla Direttiva 2008/98/CE (WFD - Waste Framework Directive) del 2008; nella legislazione italiana tale direttiva è recepita all'interno del Testo Unico Ambientale (D.Lgs. 152/2006). La direttiva mira a stabilire un ordine di priorità in grado di ridurre al minimo gli effetti nocivi sull'ambiente, nonché ad ottimizzare l'efficienza delle risorse nella produzione e nella gestione dei rifiuti. I principi su cui si fonda la direttiva in merito alla gestione dei rifiuti sono:

- la riduzione dell'uso di risorse;
- la considerazione dell'intero ciclo di vita dei materiali / prodotti;
- il conseguimento del miglior risultato ambientale complessivo;
- l'applicazione del principio "chi inquina, paga" attraverso il meccanismo della responsabilità estesa del produttore.

Inoltre, essa stabilisce la gerarchia a cinque livelli di intervento per la politica in materia di rifiuti (Figura n.1.1): prevenzione, preparazione per il riutilizzo, riciclaggio, recupero (tra cui il recupero di energia) e come ultima possibilità lo smaltimento. Nel dettaglio:

- **prevenzione**, che prevede una riduzione nella produzione dei rifiuti alla fonte e al contempo una riduzione della nocività per l'uomo e per l'ambiente;
- **preparazione al riutilizzo**, ovvero l'insieme delle tecniche tali per cui le componenti che non costituiscono un rifiuto possano essere reimpiegate per lo stesso scopo per cui erano state concepite.
- **riciclaggio**, che consiste nella trasformazione dei rifiuti in materiale riutilizzabile per altri scopi;

- **recupero di altro tipo** come ad esempio recupero di energia;
- **smaltimento finale**, quindi il conferimento in discarica controllata delle quote parti residuali del rifiuto che non sono recuperabili.

Figure 1.1: La gerarchia nella gestione dei rifiuti [Fonte: Laboratorio ref. ricerche]

Tale gerarchia specifica la priorità d'applicazione delle operazioni di gestione, secondo la quale è preferibile prevenire la produzione di rifiuti rispetto a qualsiasi altra modalità di gestione. Quando il rifiuto è stato prodotto, è preferibile innanzitutto prepararlo per il riutilizzo e secondariamente riciclarlo. Se nessuna di queste opzioni è perseguibile in maniera sostenibile, allora è preferibile ricorrere ad altre forme di recupero, come il recupero di energia, prima di ricorrere allo smaltimento [Fonte: Libro Bianco sull'incenerimento dei rifiuti].

Gli stati membri godono di una certa flessibilità nell'applicazione della gerarchia, dal momento che il risultato ultimo deve essere l'incoraggiamento di opzioni di gestione dei rifiuti volte al miglior risultato ambientale. L'ultima modifica della WFD è avvenuta a fine maggio 2018, con l'introduzione del cosiddetto "Pacchetto sull'Economia Circolare", ed è stata recepita dalla Legislazione italiana nel settembre del 2020. Particolare attenzione è posta all'obiettivo di mantenere i materiali il più a lungo possibile all'interno del ciclo di produzione e consumo dei beni, in modo da minimizzare,

da un lato, il fabbisogno di risorse materiali vergini, dall'altro, il quantitativo di rifiuti da sottoporre ad altre forme di recupero e/o a smaltimento finale. Il rafforzamento di alcuni concetti è perseguito anche mediante l'introduzione di nuovi obiettivi; per esempio, nell'ambito della gestione dei rifiuti urbani sono stati introdotti i seguenti obiettivi di "preparazione per il riutilizzo e riciclaggio":

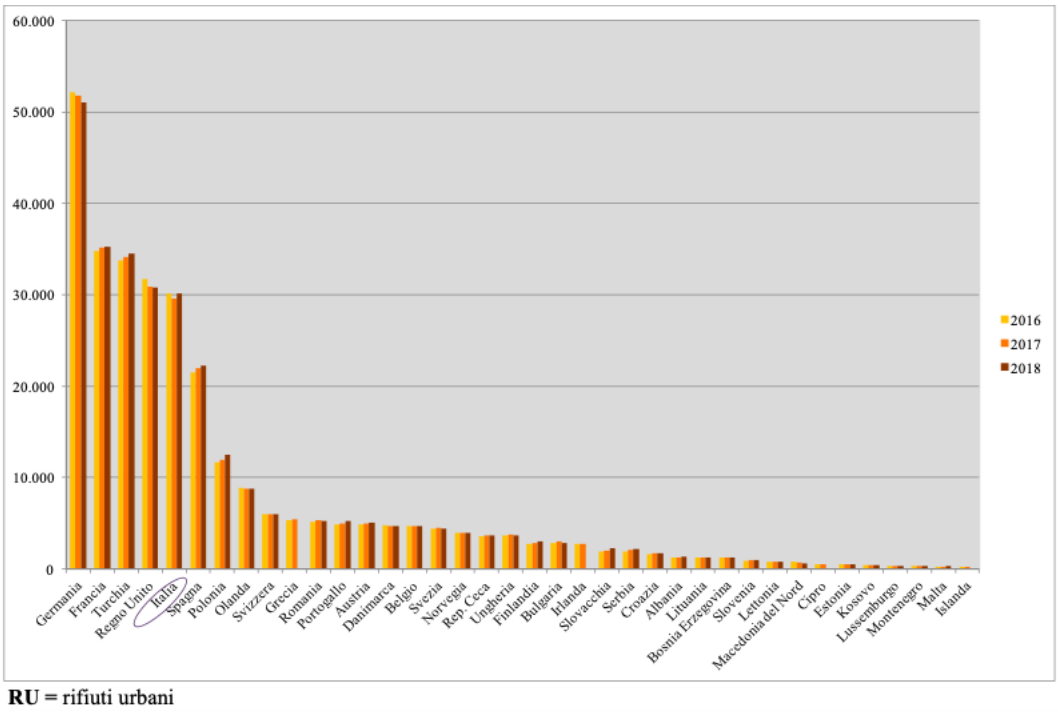
- almeno il 55% dei rifiuti urbani entro il 2025;
- almeno il 60% dei rifiuti urbani entro il 2030;
- almeno il 65% dei rifiuti urbani entro il 2035.

Nel caso dell'Italia, questi obiettivi si sovrappongono agli obiettivi già fissati dalla legislazione italiana in termini di Raccolta Differenziata (RD) dei rifiuti urbani. Tuttavia, come verrà illustrato di seguito, l'obiettivo di RD al 65% fissato dalla norma italiana per il 2012 non è ancora stato raggiunto da tutte le regioni italiane e, tantomeno, dall'Italia nel suo complesso.

1.1.1 Produzione di rifiuti

La produzione complessiva di rifiuti urbani e speciali nell'EU28 (Unione a 28 Stati) è quantificata da Eurostat per il 2018, ultima annualità per la quale sono disponibili i dati (Figura n.1.2). La produzione complessiva di rifiuti urbani nell'UE28 fa registrare un incremento rispetto al 2017 dello 0,4%, da circa 249,6 milioni di tonnellate a circa 250,6 milioni di tonnellate, e dello 0,7% rispetto al 2016.

Se si analizza il dato di produzione pro capite (Figura n. 1.3), calcolato come rapporto tra la produzione di rifiuti urbani e la popolazione media dell'anno di riferimento, consentendo così di svincolare l'informazione dalla popolazione residente, si osserva come tra il 2017 e il 2018 l'andamento del valore pro capite medio dei rifiuti urbani è pressoché stabile, infatti il valore passa da 488 a 489 kg/abitante per anno (+0,2%). L'Italia registra un incremento del 2,3% passando da 488 a 499 kg/abitante per anno.



RU = rifiuti urbani

Figure 1.2: Produzione totale di RU nell'UE (tonnellate*1.000), anni 2016 - 2018; [Fonte: ISPRA - Rapporto Rifiuti Urbani, 2020]

Il trend europeo di produzione dei rifiuti è dunque in leggero aumento negli ultimi anni. Questo aumento nella produzione è strettamente legato, come si accennava in precedenza, ai modelli di consumo e di produzione. Altri fattori determinanti sono fenomeni di tipo economico-sociale o cambiamenti demografici, per esempio l'aumento del numero di famiglie composte da un solo individuo, che incidono necessariamente sulla quantità di rifiuti generati (ad esempio imballaggio di prodotti in unità più piccole).

Paese/Raggruppamento	2016		2017		2018	
	kg/ab. anno	t*1.000	kg/ab. anno	t*1.000	kg/ab. anno	t*1.000
UE28	488	249.010	488	249.596	489	250.642
UE27	488	217.300	491	218.684	492	219.856
Albania	452	1.300	436	1.254	462	1.325
Austria	564	4.928	570	5.018	579	5.119
Belgio	419	4.746	411	4.672	411	4.698
Bosnia Erzegovina	354	1.244	352	1.235	356	1.244
Bulgaria	404	2.881	435	3.080	407	2.862
Cipro	640	545	637	547	n.a.	n.a.
Croazia	403	1.680	416	1.716	432	1.768
Danimarca	830	4.757	820	4.728	814	4.715
Estonia	376	494	390	514	405	535
Finlandia	504	2.768	510	2.812	551	3.041
Francia	521	34.766	526	35.188	527	35.272
Germania	633	52.133	627	51.790	615	51.013
Grecia	498	5.367	504	5.415	n.a.	n.a.
Irlanda	581	2.763	576	2.768	n.a.	n.a.
Islanda	656	220	656	225	n.a.	n.a.
Italia	497	30.112	488	29.572	499	30.165
Kosovo	222	395	228	409	226	407
Lettonia	410	802	411	798	407	785
Lituania	444	1.272	455	1.286	464	1.301
Lussemburgo	609	355	615	367	610	371
Macedonia del Nord	385	797	344	714	301	625
Malta	593	270	631	295	640	310
Montenegro	518	322	509	317	530	330
Norvegia	754	3.946	748	3.949	739	3.927
Paesi Bassi	520	8.859	513	8.792	511	8.806
Polonia	307	11.654	315	11.969	329	12.485
Portogallo	474	4.897	487	5.012	508	5.222
Regno Unito	483	31.710	468	30.912	463	30.786
Rep. Ceca	339	3.580	344	3.643	351	3.732
Romania	261	5.136	272	5.333	272	5.296
Serbia	268	1.890	306	2.150	319	2.230
Slovacchia	348	1.890	378	2.058	414	2.254
Slovenia	457	943	471	974	486	1.009
Spagna	463	21.542	473	22.018	475	22.222
Svezia	447	4.439	452	4.551	434	4.416
Svizzera	719	6.050	706	5.992	703	6.012
Turchia	426	33.763	425	34.173	424	34.533
Ungheria	379	3.721	385	3.768	381	3.729

Figure 1.3: Produzione pro capite (kg/abitante per anno) e totale (tonnellate*1.000) di RU nell'UE, anni 2016 - 2018; [Fonte: ISPRA - Rapporto Rifiuti Urbani, 2020]

1.1.2 La gestione dei rifiuti urbani in Europa

Della quantità totale di rifiuti prodotti in Europa è bene analizzare la loro ripartizione nelle principali forme di gestione, in particolare, come riportato da Eurostat, in Figura 1.4 è rappresentata, per singolo Stato membro, la ripartizione percentuale di rifiuti nei trattamenti quali riciclaggio, compostaggio e digestione anaerobica, incenerimento, recupero energetico, discarica, cui sono avviati i rifiuti urbani nel triennio 2016 - 2018.

Come è possibile notare dai dati riportati, nel 2018, il 31% dei rifiuti urbani è avviato a riciclaggio, il 28% è avviato a recupero di energia, il 17% a compostaggio e digestione aerobica/anaerobica, mentre il 23% e l'1% è, rispettivamente, smaltito in discarica o incenerito. Per quanto concerne l'Italia essa si mantiene abbastanza in linea con lo standard europeo, i rifiuti infatti sono, per il 2018, così ripartiti: per il 20% i rifiuti

sono avviati a recupero di energia, per il 23% a compostaggio e digestione e per il 32% riciclaggio (con una quota di riciclo totale del 55%.), per il 24% sono smaltiti in discarica e solo l'1% avviati ad incenerimento.

Paese/ Raggruppamento	Smaltimento						Riciclo e recupero								
	Incenerimento (D10)			Discarica e altre operazioni (D1-D7, D12)			Riciclaggio			Compostaggio e digestione aerobica/anaerobica			Recupero di energia (R1)		
	2016	2017	2018	2016	2017	2018	2016	2017	2018	2016	2017	2018	2016	2017	2018
UE28	**2%**	**1%**	**1%**	**25%**	**23%**	**23%**	**30%**	**30%**	**31%**	**17%**	**17%**	**17%**	**26%**	**28%**	**28%**
UE27	**2%**	**1%**	**1%**	**25%**	**24%**	**24%**	**30%**	**31%**	**31%**	**17%**	**17%**	**17%**	**25%**	**27%**	**27%**
Albania	3%	2%	2%	69%	2%	76%	17%	17%	18%	n.a.	n.a.	n.a.	1%	2%	3%
Austria	0%	0%	0%	3%	2%	2%	26%	26%	26%	33%	32%	33%	38%	39%	39%
Belgio	1%	1%	1%	1%	1%	1%	33%	34%	35%	20%	20%	20%	43%	42%	42%
Bosnia Erzegovina	0%	0%	0%	102%	99%	99%	0%	0%	n.a.	0%	0%	n.a.	0%	0%	n.a.
Bulgaria	0%	0%	0%	64%	62%	61%	23%	27%	30%	9%	8%	2%	4%	3%	7%
Cipro	0%	0%	n.a.	81%	82%	n.a.	14%	15%	n.a.	4%	2%	n.a.	0%	0%	n.a.
Croazia	0%	0%	0%	78%	75%	72%	20%	22%	25%	2%	2%	3%	0%	0%	0%
Danimarca	0%	0%	0%	1%	1%	1%	30%	29%	32%	18%	19%	18%	50%	51%	49%
Estonia	0%	0%	0%	11%	20%	23%	28%	26%	26%	3%	4%	4%	53%	44%	44%
Finlandia	0%	0%	0%	3%	1%	1%	29%	27%	29%	13%	13%	13%	55%	59%	57%
Francia	1%	0%	0%	23%	22%	21%	24%	25%	25%	18%	18%	19%	35%	35%	35%
Germania	5%	1%	1%	1%	1%	1%	49%	49%	50%	18%	18%	18%	27%	31%	31%
Grecia	n.a.	n.a.	n.a.	82%	80%	n.a.	14%	15%	n.a.	3%	4%	n.a.	1%	1%	n.a.
Irlanda	0%	0%	n.a.	26%	23%	n.a.	34%	32%	n.a.	7%	9%	n.a.	30%	32%	n.a.
Islanda	4%	4%	n.a.	57%	64%	n.a.	25%	19%	n.a.	8%	7%	n.a.	0%	1%	n.a.
Italia	7%	1%	1%	27%	26%	24%	30%	30%	32%	21%	22%	23%	14%	20%	20%
Kosovo	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Lettonia	0%	0%	0%	70%	70%	68%	16%	19%	22%	11%	8%	n.a.	3%	3%	n.a.
Lituania	0%	0%	0%	31%	33%	27%	26%	24%	27%	25%	24%	32%	18%	19%	14%
Lussemburgo	0%	0%	0%	6%	7%	6%	28%	29%	28%	21%	22%	22%	45%	43%	44%
Macedonia del Nord	n.a.	n.a.	n.a.	100%	100%	n.a.	n.a.	n.a	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Malta	0%	0%	0%	92%	92%	93%	8%	8%	7%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Montenegro	0%	0%	0%	92%	94%	92%	5%	4%	5%		0%	0%	0%	0%	0%
Norvegia	0%	0%	0%	4%	3%	3%	28%	29%	31%	10%	10%	10%	54%	53%	51%
Paesi Bassi	1%	1%	1%	1%	1%	1%	26%	26%	27%	28%	28%	29%	44%	43%	42%
Polonia	1%	2%	2%	46%	42%	42%	28%	27%	26%	7%	7%	8%	18%	23%	23%
Portogallo	0%	0%	0%	47%	50%	51%	15%	12%	13%	18%	18%	17%	20%	21%	19%
Regno Unito	3%	3%	3%	20%	17%	15%	27%	27%	27%	17%	17%	17%	33%	36%	38%
Rep. Ceca	0%	0%	0%	50%	48%	49%	27%	27%	27%	7%	7%	7%	16%	17%	16%
Romania	0%	0%	0%	70%	71%	76%	7%	7%	8%	7%	7%	4%	4%	4%	5%
Serbia	0%	0%	0%	100%	100%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Slovacchia	0%	0%	1%	66%	61%	55%	16%	21%	27%	8%	9%	10%	11%	10%	7%
Slovenia	2%	5%	1%	10%	13%	12%	48%	53%	54%	18%	20%	21%	21%	10%	12%
Spagna	0%	0%	0%	54%	51%	51%	18%	18%	18%	16%	18%	18%	12%	13%	13%
Svezia	0%	0%	0%	1%	0%	1%	32%	31%	30%	16%	15%	16%	51%	53%	53%
Svizzera	0%	0%	0%	0%	0%	0%	31%	31%	31%	21%	22%	22%	48%	47%	48%
Turchia	0%	0%	0%	90%	90%	88%	9%	9%	12%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Ungheria	0%	0%	0%	51%	49%	49%	27%	27%	29%	8%	8%	8%	15%	16%	13%

Figure 1.4: Percentuali di recupero e smaltimento sul totale di RU trattati nell'UE, anni 2016 - 2018; [Fonte: ISPRA - Rapporto Rifiuti Urbani, 2020]. Nota: i dati riportati sono arrotondati all'unità, per cui la somma delle percentuali delle quattro forme di gestione non sempre eguaglia 100. I Paesi aderenti all'UE28 sono evidenziati in grassetto. D1: deposito sul o nel suolo; D2: trattamento in ambiente terrestre; D3: iniezioni in profondità; D4: lagunaggio; D5: messa in discarica specialmente allestita; D6: scarico dei rifiuti solidi nell'ambiente idrico eccetto l'immersione; D7: immersione, compreso il seppellimento nel sottosuolo marino; D10: incenerimento a terra; D12: deposito permanente; R1: utilizzazione principale come combustibile o come altro mezzo per produrre energia.

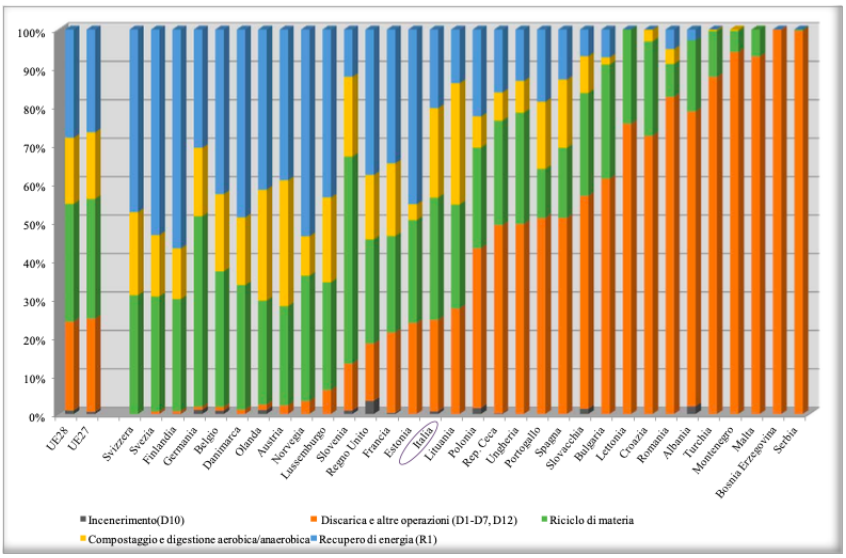


Figure 1.5: Ripartizione percentuale della gestione dei rifiuti urbani nell'UE, anno 2018 (dati ordinati per percentuali crescenti di smaltimento in discarica); [Fonte: ISPRA - Rapporto Rifiuti Urbani, 2020]

La Figura 1.5 mostra tuttavia un'estrema variabilità di approccio alla gestione dei rifiuti urbani tra i diversi Stati membri. Per esempio, con riferimento allo smaltimento in discarica, si passa dallo 0% della Svizzera al 100% della Serbia. Svizzera, Svezia, Finlandia, Germania, Belgio, Danimarca, Paesi Bassi, Austria e Norvegia allo smaltimento in discarica (sotto il 3,2%) privilegiano l'incenerimento con recupero energetico (R1) con percentuali che vanno dal 31% della Germania al 57% della Finlandia. L'incenerimento senza recupero di energia (D10) è poco utilizzato e la percentuale maggiore si rileva nel Regno Unito (3,4%). I Paesi con le più alte percentuali di rifiuti urbani avviati a compostaggio e digestione sono Austria (33%), Lituania (32%), Paesi Bassi (29%). Per quanto riguarda il riciclaggio 23 Paesi su 31, hanno percentuali superiori al 20% del rifiuto urbano trattato, con la Slovenia (54%) e la Germania (50%) capofila.

I dati mostrano quindi che, a livello di media europea, la maggior parte dei rifiuti viene effettivamente riciclata e recuperata e solo in minima parte incenerita, mantenendosi in linea con le Direttive Europee precedentemente citate. Lo smaltimento dei rifiuti in discarica mantiene tuttavia percentuali ancora piuttosto elevate sebbene, come propriamente esplicitato nelle stesse Direttive, debba costituire l'ultima alternativa nella gerarchia di gestione dei rifiuti.

1.2 Il contesto nazionale

Le politiche ambientali nazionali non possono che muoversi all'interno del quadro comunitario sui principi di gestione sostenibile dei rifiuti, basati su concetti quali prevenzione, riciclaggio e recupero di energia. La normativa italiana sui rifiuti è ormai da tempo orientata alla realizzazione di un sistema di gestione integrata mirato ad ottenere il duplice risultato di valorizzare economicamente la risorsa rifiuto e di tutelare l'ambiente. In tale sistema di gestione lo smaltimento costituisce solamente una fase residuale, mentre la raccolta differenziata finalizzata al riciclaggio assume un ruolo prioritario, in quanto consente di ridurre significativamente il flusso dei rifiuti da avviare allo smaltimento e di valorizzare le componenti merceologiche dei rifiuti sin dalla fase di raccolta. A valle di tali azioni i rifiuti indifferenziati possono essere valorizzati energeticamente, anche attraverso la produzione di combustibili derivati dai rifiuti, che possono dunque svolgere un ruolo di rilievo all'interno del sistema di produzione dell'energia ricavata da fonti rinnovabili.

1.2.1 Produzione di rifiuti

Le statistiche ufficiali per i rifiuti urbani nazionali sono redatte annualmente da ISPRA; in particolare, le statistiche afferenti all'anno 2019 sono raccolte nel Rapporto Rifiuti Urbani 2020. In Italia nel 2019 la produzione dei rifiuti urbani (RU) si attesta a quasi 30,1 milioni di tonnellate, con un lieve calo pari allo 0,3% rispetto al 2018 (Figura n.1.6).

Regione	2015	2016	2017	2018	2019
			(t)		
Piemonte	2.051.368	2.065.818	2.063.581	2.162.096	2.143.652
Valle d'Aosta	72.463	72.685	73.721	75.056	75.825
Lombardia	4.625.449	4.781.845	4.685.489	4.810.952	4.843.570
Trentino Alto Adige	488.477	510.477	519.034	543.626	546.636
Veneto	2.191.064	2.389.216	2.334.794	2.363.232	2.403.335
Friuli Venezia Giulia	562.443	582.052	589.018	595.729	603.107
Liguria	872.416	845.407	830.036	832.333	821.949
Emilia Romagna	2.855.593	2.904.852	2.859.763	2.945.291	2.960.609
Nord	**13.719.273**	**14.152.352**	**13.955.436**	**14.328.313**	**14.398.682**
Toscana	2.275.793	2.306.696	2.243.820	2.284.143	2.277.254
Umbria	462.962	470.603	450.830	460.610	454.254
Marche	793.004	810.805	816.984	810.118	796.289
Lazio	3.023.402	3.025.528	2.961.867	3.026.441	3.038.263
Centro	**6.555.161**	**6.613.633**	**6.473.502**	**6.581.313**	**6.566.059**
Abruzzo	593.894	601.991	596.745	603.838	600.278
Molise	121.864	120.445	116.658	116.491	111.241
Campania	2.567.347	2.627.865	2.560.999	2.602.769	2.595.166
Puglia	1.895.076	1.909.340	1.876.335	1.898.348	1.871.828
Basilicata	198.933	201.946	196.315	199.425	197.214
Calabria	802.978	793.893	772.518	785.414	767.220
Sicilia	2.350.191	2.357.112	2.300.196	2.292.421	2.233.279
Sardegna	719.624	733.503	723.472	749.947	737.730
Sud	**9.249.907**	**9.346.094**	**9.143.237**	**9.248.654**	**9.113.955**
Italia	**29.524.341**	**30.112.079**	**29.572.175**	**30.158.280**	**30.078.697**

Fonte: ISPRA

Figure 1.6: Produzione totale di rifiuti urbani per regione, anni 2015 - 2019; [Fonte: ISPRA - Rapporto Rifiuti Urbani, 2020]

Osservando l'andamento di produzione dei rifiuti riferito ad un arco temporale più lungo (Figura n.1.7), si può rilevare che tra il 2006 e il 2010 la produzione si è mantenuta costantemente al di sopra dei 32 milioni di tonnellate mentre, dopo un brusco calo nel biennio 2011-2012 (concomitante con la contrazione dei valori del prodotto interno lordo e dei consumi delle famiglie), la produzione di rifiuti si è attestata a quantitativi inferiori a 30 milioni di tonnellate fino al 2015. Successivamente, ad esclusione dell'anno 2017, i valori della produzione si sono mantenuti intorno ai 30,1 milioni di tonnellate.

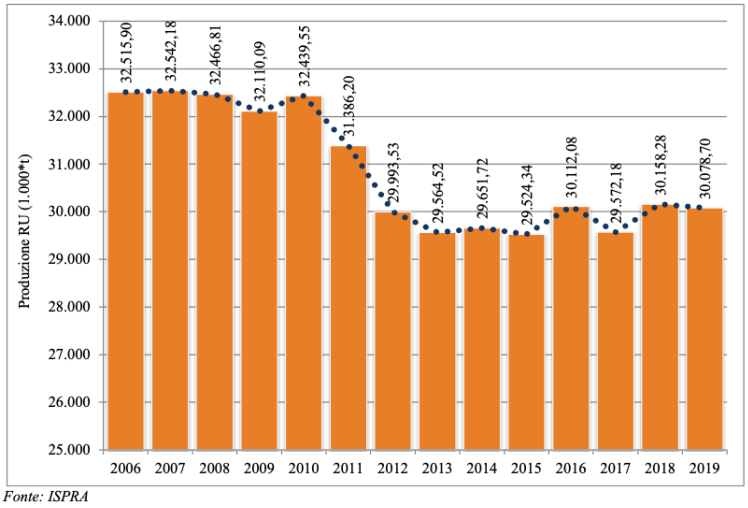
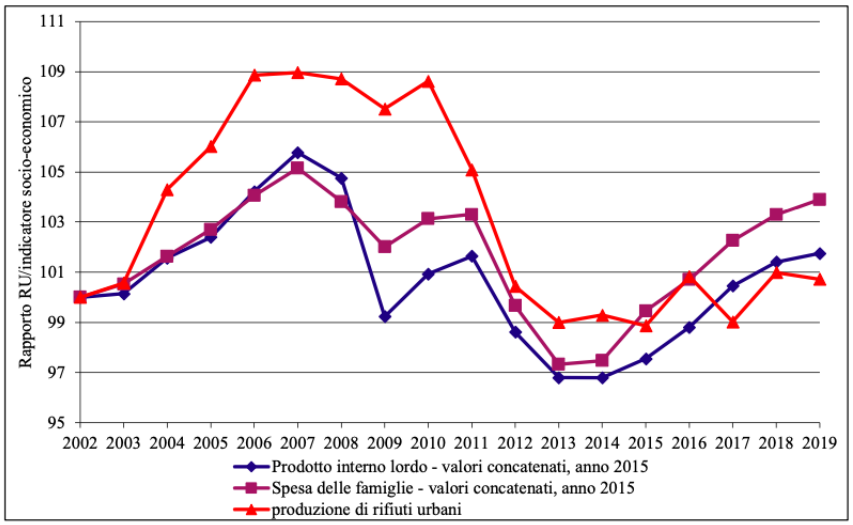


Figure 1.7: Andamento della produzione di rifiuti urbani, anni 2006 - 2019; [Fonte: ISPRA - Rapporto Rifiuti Urbani, 2020]

Rispetto al 2018, si rileva un disallineamento tra l'andamento della produzione dei rifiuti e quello degli indicatori socio-economici quali PIL e spesa per consumi finali sul territorio economico delle famiglie residenti e non residenti. Nel 2019, infatti, il prodotto interno lordo e la spesa delle famiglie (valori concatenati all'anno di riferimento 2015) fanno registrare un incremento pari, rispettivamente, allo 0,3% e allo 0,6%, mentre la produzione dei rifiuti mostra un lieve calo (-0,3%, Figura n. 1.8). Analizzando il dato riferito ad un arco temporale più lungo si osserva che nel periodo 2002 - 2013 si conferma la sostanziale correlazione tra la produzione di rifiuti urbani e gli indicatori macroeconomici, mentre dal 2013 in poi sembra che tale legame si sia quantomeno parzialmente allentato, auspicabilmente anche a esito dell'accresciuta attenzione politica in tema di gestione dei rifiuti (maggiore cura nella classificazione, nella contabilizzazione, nell'introduzione di tecniche che portano, indirettamente, alla riduzione della produzione di RU, quali la raccolta differenziata, la raccolta porta-a-porta, la tariffazione puntuale), nonché di una maggiore attenzione da parte della popolazione verso la tematica della riduzione dei rifiuti, anche attraverso fenomeni di cambiamento comportamentale.

Se si vanno a raffrontare invece i valori del 2019 con quelli del 2013 (anno in cui si è interrotto l'andamento decrescente del PIL e dei consumi), si osserva un aumento complessivo della produzione dei rifiuti più contenuto rispetto a quello dei due indicatori

socio-economici (+1,7%, a fronte di incrementi percentuali pari al 5,1% per il PIL e al 6,8% per le spese delle famiglie).

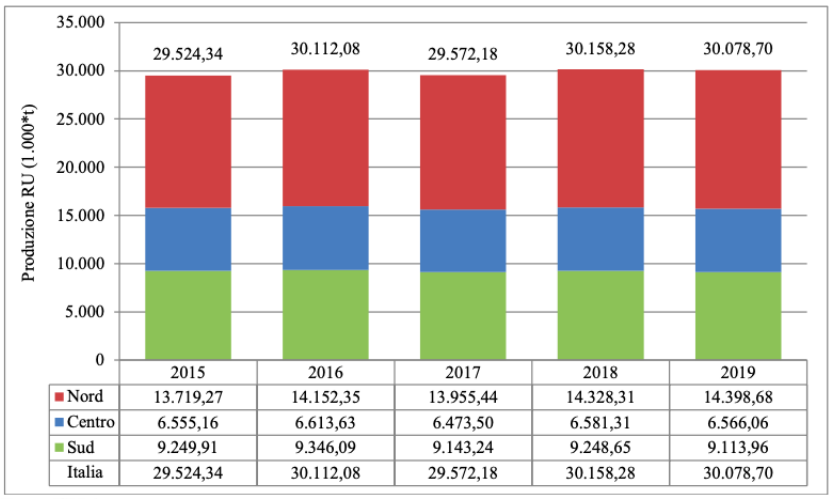


Note: sono stati assunti pari a 100 i valori della produzione dei rifiuti urbani, del PIL e della spesa delle famiglie dell'anno 2002.
Fonte: ISPRA; dati degli indicatori socio economici: ISTAT

Figure 1.8: Andamento della produzione dei rifiuti urbani e degli indicatori socio economici, anni 2002 - 2019

Si sottolinea che il Programma Nazionale di Prevenzione dei Rifiuti, previsto dall'articolo 180 del D.Lgs. n.152/2006 individua la produzione dei rifiuti urbani per unità di PIL come uno dei parametri oggetto di monitoraggio per la valutazione dell'efficacia delle misure intraprese. Per tale parametro è, infatti, fissato un obiettivo di riduzione del 5%, misurato in relazione ai valori del 2010, da conseguire entro il 2020. Il Programma prevede, inoltre, che nell'ambito del monitoraggio sia considerato anche l'andamento della produzione degli RU in rapporto ai consumi delle famiglie.

Analizzando la situazione di produzione dei rifiuti per macro-area geografica, i dati riferiscono che nel 2019 la produzione di rifiuti urbani cresce solo nelle regioni settentrionali (+0,5%), mentre al Centro si rileva un calo dello 0,2% e al Sud una decrescita più marcata pari a -1,5%. In valore assoluto, il nord Italia produce quasi 14,4 milioni di tonnellate, il Centro circa 6,6 milioni di tonnellate e il Sud 9,1 milioni di tonnellate (Figura n.1.9).



	2015	2016	2017	2018	2019
Nord	13.719,27	14.152,35	13.955,44	14.328,31	14.398,68
Centro	6.555,16	6.613,63	6.473,50	6.581,31	6.566,06
Sud	9.249,91	9.346,09	9.143,24	9.248,65	9.113,96
Italia	29.524,34	30.112,08	29.572,18	30.158,28	30.078,70

Fonte: ISPRA

Figure 1.9: Andamento della produzione totale dei rifiuti urbani per macroarea geografica, anni 2015 - 2019

1.2.2 Raccolta differenziata

La raccolta differenziata permette di separare all'origine alcune classi merceologiche all'interno dei rifiuti (vetro, alluminio, plastica, carta, ecc..) e consente il loro riutilizzo o riciclo all'interno dei diversi processi produttivi. Sotto il profilo ambientale, questa operazione è molto importante poichè riduce la pressione dei rifiuti sull'ecosistema terrestre. La raccolta differenziata dei rifiuti quindi ha il vantaggio di condizionare positivamente il sistema di gestione degli stessi in quanto:

- valorizza le diverse componenti merceologiche dei rifiuti sin dalla fase di raccolta;
- consente di recuperare materiali ed energia nella fase di trattamento finale;
- consente la riduzione della quantità e della pericolosità dei rifiuti che si devono smaltire in maniera indifferenziata, individuando così tecnologie di gestione più idonee e rendendo minimo l'impatto ambientale dei processi di trattamento e smaltimento;
- promuove comportamenti più corretti da parte dei singoli cittadini.

Affinchè la raccolta differenziata abbia successo, deve essere organizzata in maniera tale da essere integrata rispetto all'intero ciclo di rifiuti, deve essere dotata di impianti di

recupero efficienti ed i rifiuti recuperati devono essere maggiormente utilizzati.

Il D.Lgs. n.152/2006 e la legge 27 dicembre 2006, n.296 individuano i seguenti obiettivi di raccolta differenziata:

- almeno il 35% entro il 31 dicembre 2006;
- almeno il 40% entro il 31 dicembre 2007;
- almeno il 45% entro il 31 dicembre 2008;
- almeno il 50% entro il 31 dicembre 2009;
- almeno il 60% entro il 31 dicembre 2011;
- almeno il 65% entro il 31 dicembre 2012.

La direttiva quadro sui rifiuti 2008/98/CE affianca agli obiettivi di raccolta previsti dalla normativa italiana target di preparazione per il riutilizzo e riciclaggio per specifici flussi di rifiuti quali i rifiuti urbani e i rifiuti da attività di costruzione e demolizione. Nel caso dei primi, in particolare, la direttiva quadro ha inizialmente previsto che, entro il 2020, la preparazione per il riutilizzo e il riciclaggio di rifiuti quali, come minimo, carta, metalli, plastica e vetro provenienti dai nuclei domestici, e possibilmente di altra origine, nella misura in cui tali flussi di rifiuti sono simili a quelli domestici, siano aumentatati complessivamente almeno al 50% in termini di peso. La direttiva è stata, successivamente, ampiamente modificata dalla direttiva 2018/851/UE, che ha aggiunto ulteriori obiettivi per la preparazione per il riutilizzo e il riciclaggio, da conseguirsi entro il 2025 (55%), 2030 (60%) e 2035 (65%). Tali nuovi obiettivi sono stati recepiti, nell'ordinamento nazionale, dal decreto legislativo 3 settembre 2020, n.116 che ha modificato l'articolo 181 del D.Lgs. n.152/2006. La direttiva quadro dispone che, ove necessario, per facilitare o migliorare la preparazione per il riutilizzo, il riciclaggio e le altre operazioni di recupero, facendo sì che le stesse siano attuate seguendo l'ordine di priorità della gerarchia dei rifiuti e garantendo una gestione che non danneggi la salute umana e non rechi pregiudizio all'ambiente, i rifiuti siano soggetti a raccolta differenziata e non siano miscelati con altri rifiuti o altri materiali aventi proprietà diverse [Fonte: Libro Bianco sull'incenerimento dei rifiuti urbani].

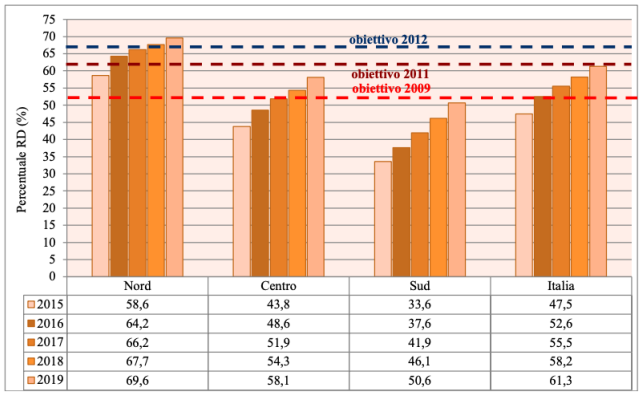
I dati riportano che nel 2019 la percentuale di raccolta differenziata è pari al 61,3% della produzione nazionale, con una crescita di 3,1 punti rispetto alla percentuale del 2018 (Figura n.1.10); in valore assoluto, la raccolta differenziata si attesta a poco meno di 18,5 milioni di tonnellate.

Anno	Quantitativo raccolto (RD) (1.000*t)				Percentuale RD (RD/RU) (%)				Pro capite RD (kg/ab.*anno)			
	Nord	Centro	Sud	Italia	Nord	Centro	Sud	Italia	Nord	Centro	Sud	Italia
2015	8.043,37	2.868,23	3.109,27	**14.020,86**	58,6	43,8	33,6	**47,5**	290	238	149	**231**
2016	9.091,29	3.214,31	3.517,17	**15.822,78**	64,2	48,6	37,6	**52,6**	328	266	169	**261**
2017	9.236,68	3.357,72	3.830,79	**16.425,20**	66,2	51,9	41,9	**55,5**	333	279	185	**272**
2018	9.698,49	3.574,93	4.265,70	**17.539,12**	67,7	54,3	46,1	**58,2**	350	298	207	**291**
2019	10.021,29	3.816,83	4.613,96	**18.452,09**	69,6	58,1	50,6	**61,3**	361	318	225	**306**

Fonte: ISPRA

Figure 1.10: Raccolta differenziata dei rifiuti urbani per macroarea geografica, anni 2015 - 2019

Indagando a livello di macro-area si osserva che nel Nord la raccolta complessiva si colloca a 10 milioni di tonnellate, nel Sud a 4,6 milioni di tonnellate e nel Centro a circa 3,8 milioni di tonnellate. Tali valori si traducono in percentuali, calcolate rispetto alla produzione totale dei rifiuti urbani di ciascuna macro-area, pari al 69,6% per le regioni settentrionali, al 58,1% per quelle del Centro e al 50,6% per le regioni del Mezzogiorno (Figura n.1.11). Rispetto al 2018, la percentuale delle regioni del Mezzogiorno cresce di 4,5 punti, quella delle regioni centrali di 3,8 punti e quella delle regioni del Nord di 1,9 punti.



	Nord	Centro	Sud	Italia
2015	58,6	43,8	33,6	47,5
2016	64,2	48,6	37,6	52,6
2017	66,2	51,9	41,9	55,5
2018	67,7	54,3	46,1	58,2
2019	69,6	58,1	50,6	61,3

Fonte: ISPRA

Figure 1.11: Andamento della percentuale di raccolta differenziata dei rifiuti urbani, anni 2015 - 2019

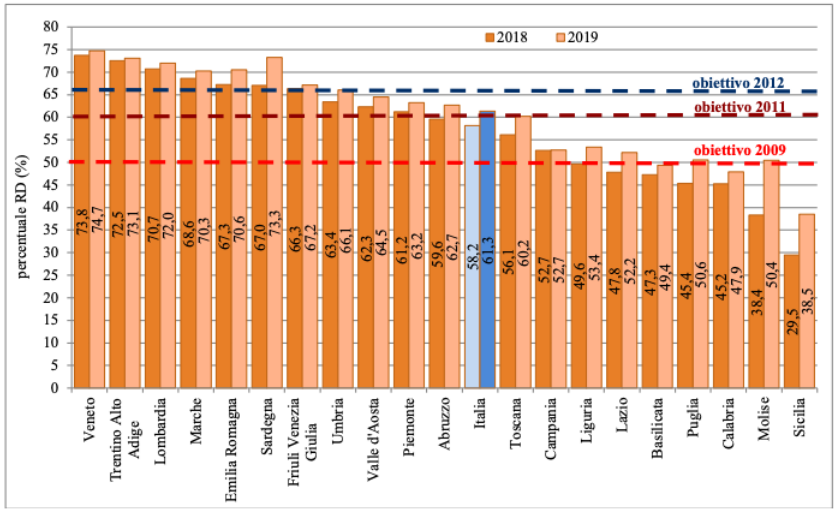
Considerando la situazione regionale (Figura n.1.12), i dati riportano che nel 2019 la più alta percentuale di raccolta differenziata è conseguita, analogamente al 2018, dalla regione Veneto, con il 74,7%, seguita da Sardegna (73,3%), Trentino Alto Adige (73,1%), Lombardia (72%), Emilia Romagna (70,6%) e Marche (70,3%). Superano il 65% e, quindi, l'obiettivo fissato dalla normativa per il 2012, altre 2 regioni: Friuli Venezia Giulia (67,2%) e Umbria (66,1%). Il Molise con una percentuale di 50,4% è la regione che fa registrare il maggiore incremento della percentuale di raccolta differenziata (+12 punti rispetto al 38,4% del 2018). Al di sotto del 50% risultano la Basilicata (49,4%) e la Calabria (47,9%). La Sicilia si colloca al di sotto del 40%, ma fa registrare un aumento di 9 punti rispetto alla percentuale di raccolta differenziata del 2018 (dal 29,5 al 38,5%).

Regione	2015	2016	2017	2018	2019
			(%)		
Piemonte	55,1	56,6	59,3	61,2	63,2
Valle d'Aosta	47,8	55,6	61,1	62,3	64,5
Lombardia	58,7	68,1	69,6	70,7	72,0
Trentino Alto Adige	67,4	70,5	71,6	72,5	73,1
Veneto	68,8	72,9	73,7	73,8	74,7
Friuli Venezia Giulia	62,9	67,1	65,5	66,3	67,2
Liguria	37,8	43,7	48,8	49,6	53,4
Emilia Romagna	57,5	60,7	63,8	67,3	70,6
Nord	**58,6**	**64,2**	**66,2**	**67,7**	**69,6**
Toscana	46,1	51,1	53,9	56,1	60,2
Umbria	48,9	57,6	61,7	63,4	66,1
Marche	57,9	59,6	63,3	68,6	70,3
Lazio	37,5	42,4	45,7	47,8	52,2
Centro	**43,8**	**48,6**	**51,9**	**54,3**	**58,1**
Abruzzo	49,3	53,8	56,0	59,6	62,7
Molise	25,7	28,0	30,7	38,4	50,4
Campania	48,5	51,6	52,8	52,7	52,7
Puglia	30,1	34,4	40,4	45,4	50,6
Basilicata	30,9	39,2	45,3	47,3	49,4
Calabria	25,0	33,2	39,6	45,2	47,9
Sicilia	12,8	15,4	21,7	29,5	38,5
Sardegna	56,4	60,2	63,1	67,0	73,3
Sud	**33,6**	**37,6**	**41,9**	**46,1**	**50,6**
Italia	**47,5**	**52,6**	**55,5**	**58,2**	**61,3**

Fonte: ISPRA

Figure 1.12: Percentuali di raccolta differenziata dei rifiuti urbani per regione, anni 2015 - 2019

Come si evince anche dalla Figura n.1.13, la Raccolta Differenziata dei rifiuti urbani è costantemente cresciuta nel tempo su base media nazionale. Ciò è, tuttavia, il risultato di una situazione alquanto diversificata tra le varie Regioni, con alcune impegnate nella pratica già dai primi anni 2000 e altre dove la sua introduzione risale solo agli anni recenti. Si evidenzia che l'obiettivo di RD più ambizioso fissato dalla normativa vigente (65% al 2012) è stato raggiunto solo da alcune Regioni e in ogni caso in ritardo rispetto a quanto prescritto. Per quanto riguarda il trasporto invece, esso dovrebbe essere gestito in base al principio di prossimità, nel senso che i rifiuti dovrebbero essere trattati il più vicino possibile alla fonte che li ha generati. Molto spesso, però, questa regola non viene applicata poiché sono molti i rifiuti che vengono trasportati da un luogo ad un altro.



Fonte: ISPRA

Figure 1.13: Percentuali di raccolta differenziata dei rifiuti urbani per regione, anni 2018 - 2019

1.2.3 Tassi di avvio ad incenerimento

Il Rapporto Rifiuti Urbani 2020 di ISPRA riporta la presenza, a fine 2019, di 37 impianti di incenerimento di rifiuti urbani sul territorio nazionale. Dalla Tabella 3.4.1 è possibile osservare che, dal 2013 al 2019, il numero di impianti si è ridotto di 11 unità e, in particolare, nelle regioni del centro Italia si osserva una riduzione di 7 impianti. Risulta evidente come il parco impiantistico sia prevalentemente localizzato nelle regioni del Nord: in Lombardia e in Emilia-Romagna sono presenti rispettivamente 13 e 8 impianti operativi che, nel 2019, hanno trattato complessivamente 2,9 milioni di tonnellate di rifiuti urbani che rappresentano il 74,7% di quelli inceneriti nel Nord. Al Centro e al Sud, con rispettivamente 5 e 6 impianti operativi, sono state trattate quasi 567 mila e oltre un milione di tonnellate di rifiuti urbani (Tabella 3.4.3).

Tabella 3.4.1 - Numero di impianti di incenerimento che trattano rifiuti urbani, anni 2013 – 2019

Regione	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
	(n.)						
Piemonte	2	2	1	1	1	1	1
Valle d'Aosta	-	-	-	-	-	-	-
Lombardia	13	13	13	13	13	13	13
Trentino-Alto Adige	1	2	1	1	1	1	1
Veneto	3	3	2	2	2	2	2
Friuli-Venezia Giulia	1	1	1	1	1	1	1
Liguria	-	-	-	-	-	-	-
Emilia-Romagna	8	8	8	8	8	8	8
Nord	**28**	**29**	**26**	**26**	**26**	**26**	**26**
Toscana	7	5	5	5	5	5	4
Umbria	-	-	-	-	-	-	-
Marche	1	-	-	-	-	-	-
Lazio	4	3	3	3	2	1	1
Centro	**12**	**8**	**8**	**8**	**7**	**6**	**5**
Abruzzo	-	-	-	-	-	-	-
Molise	1	1	1	1	1	1	1
Campania	1	1	1	1	1	1	1
Puglia	2	1	1	1	1	1	1
Basilicata	1	1	1	1	1	1	1
Calabria	1	1	1	1	1	1	1
Sicilia	-	-	-	-	-	-	-
Sardegna	2	2	2	2	1	1	1
Sud	**8**	**7**	**7**	**7**	**6**	**6**	**6**
Italia	**48**	**44**	**41**	**41**	**39**	**38**	**37**

Fonte: ISPRA

Tabella 3.4.3 - Numero di impianti di incenerimento e quantità di rifiuti urbani trattati per macroarea geografica, anni 2015 – 2019

Macroarea	n. impianti					Quantità RU incenerita (t/a)				
	2015	2016	2017	2018	2019	2015	2016	2017	2018	2019
Nord	26	26	26	26	26	3.928.035	3.726.258	3.683.270	3.823.048	3.905.723
Centro	8	8	7	6	5	587.332	651.534	598.891	584.745	566.711
Sud	7	7	6	6	6	1.066.684	1.026.281	984.618	1.039.848	1.049.216
Italia	**41**	**41**	**39**	**38**	**37**	**5.582.051**	**5.404.073**	**5.266.779**	**5.447.640**	**5.521.650**

Fonte: ISPRA

Dalla Tabella 3.4.5 è possibile evincere che delle oltre 5,5 milioni di tonnellate di rifiuti avviati ad incenerimento circa 2,7 milioni di tonnellate sono costituiti da rifiuti urbani tal quali, mentre la restante quota è rappresentata da rifiuti derivanti dal trattamento dei rifiuti urbani (frazione secca, rifiuti combustibili e, in minor misura, bio-essiccato) pari a 2,8 milioni di tonnellate. Inoltre, negli stessi impianti vengono inceneriti rifiuti speciali per un totale di circa 776 mila tonnellate di cui 58 mila sono costituiti da rifiuti pericolosi.

Sempre dalla stessa tabella emerge, tramite un confronto dei quantitativi di rifiuti urbani inceneriti e quelli prodotti nel 2019, che l'incidenza percentuale più elevata si registra in Molise (52%); ciò è da attribuirsi prevalentemente alle quote di rifiuti dal trattamento dei rifiuti urbani di provenienza extra-regionale trattati in tale regione. Seguono la Lombardia (40,5%) e l'Emilia Romagna (32,2%) dove incidono anche le quote importate dalle altre regioni. Valori percentuali superiori al 20% si rilevano per Campania (26,7%), Trentino Alto Adige (22,9%) e Friuli Venezia Giulia (21,8%).

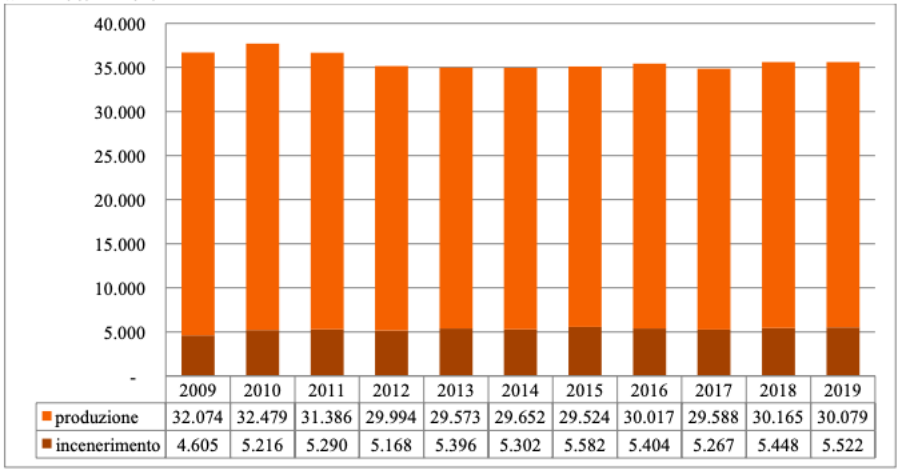
Tabella 3.4.5 – Rifiuti inceneriti suddivisi per regione, anno 2019

Regione	RU (t)	FS, CSS, BS (t)	Totale RU (t)	RS pericolosi (t)	RS non pericolosi (t)	TOTALE (t)	% rispetto ai RU prodotti
Piemonte	462.626	35.772	498.398	-	63.872	562.270	23,2
Lombardia	1.039.531	924.123	1.963.654	18.166	435.641	2.417.461	40,5
Trentino Alto Adige	96.389	28.920	125.309	-	2.950	128.259	22,9
Veneto	194.018	40.700	234.718	3.809	2.843	241.370	9,8
Friuli Venezia Giulia	101.414	29.834	131.248	-	16.290	147.538	21,8
Emilia Romagna	620.507	331.889	952.396	7.139	140.211	1.099.746	32,2
Nord	**2.514.485**	**1.391.238**	**3.905.723**	**29.114**	**661.807**	**4.596.644**	**28,9**
Toscana	83.823	142.364	226.187	2.330	2.017	230.534	9,9
Lazio	-	340.524	340.524	-	-	340.524	11,2
Centro	**83.823**	**482.888**	**566.711**	**2.330**	**2.017**	**571.058**	**10,7**
Molise	-	57.897	57.897	-	27.854	85.751	52,0
Campania	227	692.162	692.389	-	-	692.389	26,7
Puglia	-	71.155	71.155	-	-	71.155	3,8
Basilicata	6.206	10.643	16.849	26.479	13.268	56.596	8,5
Calabria	-	106.755	106.755	-	3.040	109.795	13,9
Sardegna	90.691	13.480	104.171	269	9.618	114.058	14,1
Sud	**97.124**	**952.092**	**1.049.216**	**26.748**	**53.780**	**1.129.744**	**16,7**
Italia	**2.695.432**	**2.826.218**	**5.521.650**	**58.192**	**717.604**	**6.297.446**	**22,0**

Fonte: ISPRA

La Figura 3.4.2 mostra invece l'andamento delle quantità di rifiuti urbani inceneriti rispetto a quelli prodotti nello stesso periodo di riferimento; nel 2019 circa il 18,4% dei rifiuti urbani prodotti viene incenerito (Figura 3.4.3).

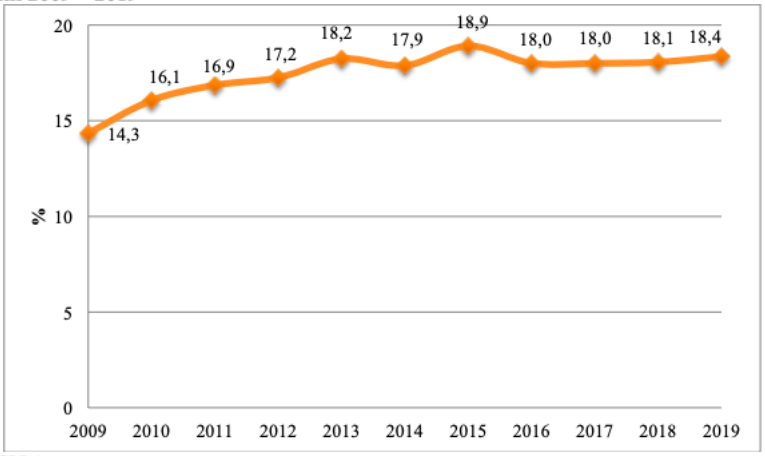
Figura 3.4.2 – Incenerimento in relazione alla produzione di rifiuti urbani (1.000*tonnellate), anni 2009 – 2019



	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
produzione	32.074	32.479	31.386	29.994	29.573	29.652	29.524	30.017	29.588	30.165	30.079
incenerimento	4.605	5.216	5.290	5.168	5.396	5.302	5.582	5.404	5.267	5.448	5.522

Fonte: ISPRA

Figura 3.4.3 - Percentuale di incenerimento di rifiuti urbani in relazione alla produzione di RU, anni 2009 – 2019



Fonte: ISPRA

In conclusione la Tabella 3.4.7 riporta i dati relativi al 2019 riguardanti il recupero energetico elettrico e termico distinguendo gli impianti nei quali è presente un ciclo cogenerativo. L'analisi dei dati mostra che tutti gli impianti sul territorio nazionale recuperano energia; 25 impianti hanno trattato circa 3,9 milioni di tonnellate di rifiuti e recuperano 3 milioni di MWh di energia elettrica. I restanti 12 impianti, invece, sono dotati di cicli cogenerativi ed hanno incenerito oltre 2,3 milioni di tonnellate di rifiuti con un recupero di oltre 2,1 milioni di MWh di energia termica e di quasi 1,6 milioni MWh di energia elettrica. Si segnala che il recupero di energia elettrica/termica è ascrivibile al totale dei rifiuti trattati dai singoli impianti non essendo possibile distinguere la quota parte relativa all'incenerimento dei soli rifiuti urbani.

Tabella 3.4.7 – Recupero energetico in impianti di incenerimento che trattano RU, anno 2019

	n. impianti	totale rifiuti trattati (t)	ReEnergetico		ReEnergetico per kg	
			REElettrico (MWhe)	RETermico (MWht)	kWhe/kg	kWht/kg
Impianti con RET&E	12	2.356.188	1.574.338	2.153.609	0,91	0,67
Impianti con REE	25	3.941.258	3.001.798	0	0,76	0,00
Totale	**37**	**6.297.446**	**4.576.136**	**2.153.609**	**0,73**	**0,34**
Legenda - *RET&E*=impianti con ciclo di cogenerazione; *REE*=impianti con solo recupero energetico elettrico.						

Fonte: ISPRA

1.3 Conclusioni

I paragrafi sopra riportati hanno lo scopo di inquadrare la situazione dei rifiuti a livello nazionale ed europeo. Riassumendo quindi quanto appena visto, ci si chiede l'Italia dove si collochi rispetto agli altri paesi europei. Sicuramente la nostra nazione dispone di svariati impianti di trattamento di rifiuti, sebbene non omogeneamente distribuiti sul territorio, infatti nel 2019 sono risultati operativi 656 impianti di gestione dei rifiuti urbani. Di questi, 345 sono dedicati al trattamento della frazione organica della raccolta differenziata (281 impianti di compostaggio, 41 impianti per il trattamento integrato aerobico /anaerobico e 23 impianti di digestione anaerobica), 130 sono impianti per il trattamento meccanico o meccanico biologico dei rifiuti, 131 sono impianti di discarica a cui si aggiungono 37 impianti di incenerimento e 13 impianti industriali che effettuano il co-incenerimento dei rifiuti urbani [Fonte: ISPRA - Rapporto Rifiuti Urbani, 2020].

In Figura n.1.14 è rappresentata la ripartizione percentuale di gestione dei rifiuti, da cui è possibile evincere che lo smaltimento in discarica interessa il 21% dei rifiuti urbani prodotti. Agli impianti di recupero di materia per il trattamento delle raccolte differenziate viene inviato, nel suo complesso, il 50% dei rifiuti prodotti: il 21% agli impianti che recuperano la frazione organica da RD (umido+verde) e oltre il 29% agli impianti di recupero delle altre frazioni merceologiche della raccolta differenziata. Il 18% dei rifiuti urbani prodotti è incenerito, mentre l'1% viene inviato ad impianti produttivi, quali i cementifici, centrali termoelettriche, ecc. per essere utilizzato all'interno del ciclo produttivo per produrre energia; il 2% è esportato (514 mila tonnellate) e l'1% viene gestito direttamente dai cittadini attraverso il compostaggio domestico (267 mila tonnellate). Infine, nella voce "altro" (2%), sono incluse le quantità di rifiuti che rimangono in giacenza alla fine dell'anno presso gli impianti di trattamento, le perdite di processo, nonché i rifiuti prodotti dagli impianti di trattamento meccanico biologico la cui destinazione non è desumibile dalla banca dati MUD. In merito al dato rilevato per le esportazioni è necessario precisare che non include i materiali esportati dopo operazioni di recupero a seguito delle quali gli stessi sono qualificati come prodotti o materie prime secondarie [Fonte: ISPRA - Rapporto Rifiuti Urbani, 2020].

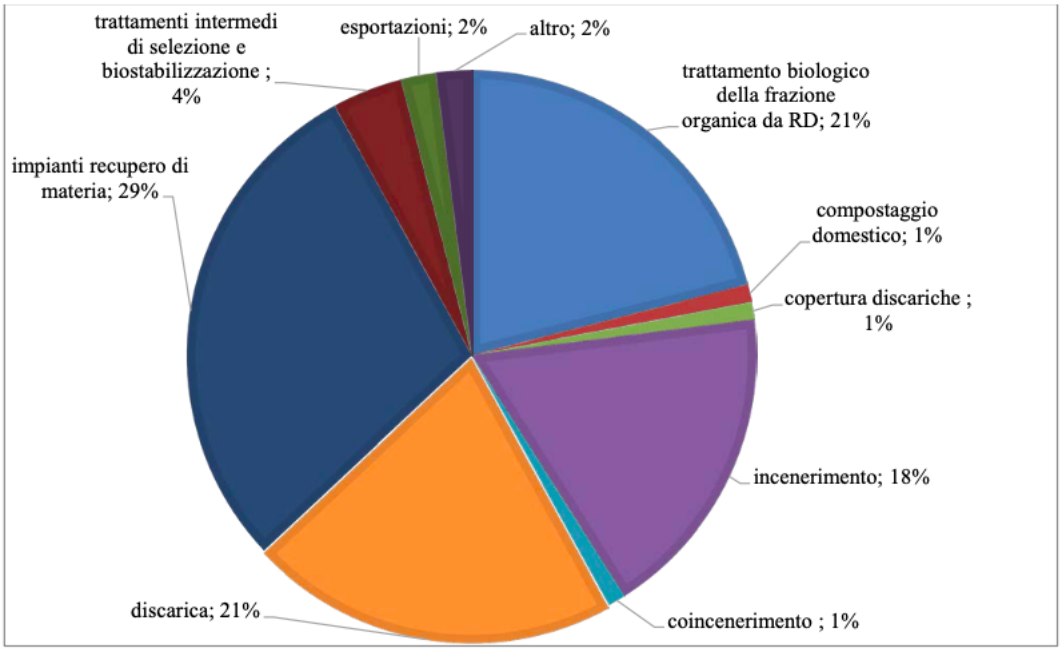
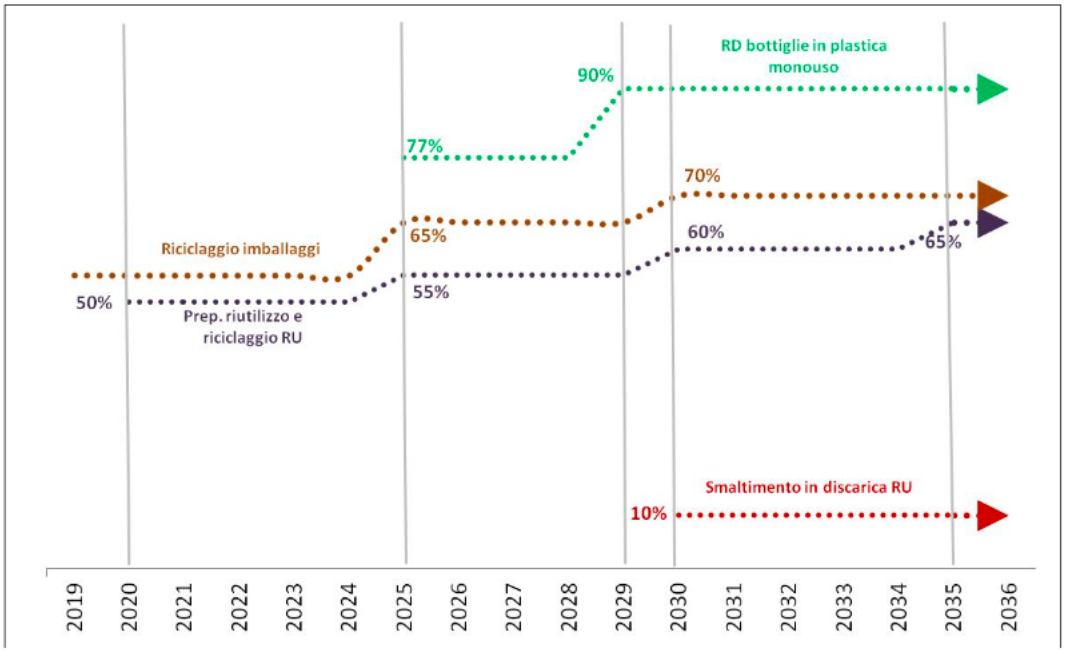


Figure 1.14: Ripartizione percentuale della gestione dei rifiuti urbani, anno 2019; [Fonte: ISPRA - Rapporto Rifiuti Urbani, 2020]

Analizzando i dati relativi alle diverse forme di gestione messe in atto a livello regionale si evidenzia che, laddove esiste un ciclo integrato dei rifiuti grazie ad un parco impiantistico sviluppato, viene ridotto significativamente l'utilizzo della discarica (ad esempio in Lombardia lo smaltimento in discarica è ridotto al 4%). Vi sono regioni in cui il quadro impiantistico è molto carente o del tutto inadeguato; è il caso della Sicilia, dove i rifiuti urbani smaltiti in discarica rappresentano ancora il 58% del totale dei rifiuti prodotti, ma anche del Lazio e della Campania, che non riescono a chiudere il ciclo all'interno del territorio regionale.

L'analisi dei dati invece evidenzia sicuramente la necessità di imprimere un'accelerazione nel miglioramento del sistema di gestione, soprattutto in alcune zone del Paese, per consentire il raggiungimento dei nuovi sfidanti obiettivi previsti dalla normativa europea, rappresentati in Figura n.1.15. Lo smaltimento in discarica nei prossimi 15 anni dovrà essere dimezzato, la percentuale di rifiuti che vengono avviati ad operazioni di recupero di materia dovrà essere notevolmente incrementata per garantire il raggiungimento del 60% di riciclaggio al 2030 e del 65% al 2035.



Fonte: elaborazione ISPRA

Figure 1.15: Principali obiettivi previsti dalla normativa europea

Si possono quindi individuare alcune criticità: le azioni di prevenzione per esempio non hanno portato ad un disaccoppiamento sensibile fra crescita economica e produzione dei rifiuti, inoltre le percentuali di RD crescono, ma chiaramente con un trend insoddisfacente e ben lontano da permettere il raggiungimento degli obiettivi sopra menzionati. A ciò si aggiunge che il passaggio alla discarica vista come soluzione solo residuale è ancora ben lontano ed il recupero energetico e l'incenerimento, anch'esso accompagnato da recupero energetico, sono caratterizzati da percentuali largamente inferiori a quelle auspicabili. In tale panoramica l'attuale disponibilità di trattamenti non sembra sufficiente al superamento di tali criticità, che sono essenzialmente connesse a problematica politiche, amministrative e sociali.

Appare ancor più urgente la necessità di un cambio di rotta se si considera che con i nuovi obiettivi sono state introdotte anche nuove metodologie di calcolo sia per il riciclaggio che per la valutazione dello smaltimento in discarica che appaiono decisamente più restrittive di quelle ad oggi utilizzate. A tal riguardo si evidenzia infatti che le quote di rifiuti avviate ad incenerimento senza recupero di energia dovranno essere computate nello smaltimento.

Chapter 2

I trattamenti termici

2.1 Generalità

I trattamenti termici sono processi chimici ad alta temperatura, per mezzo dei quali le sostanze organiche vengono demolite per originarne altre aventi composizione chimica più semplice. Ne consegue, che l'obiettivo primario di un qualsiasi trattamento termico è la trasformazione del rifiuto, con produzione di sostanze meno impattanti per l'ambiente e per l'uomo e la conseguente riduzione delle quantità e dei volumi di sostanze da inviare a smaltimento finale, ottenendo nel contempo un recupero del contenuto energetico del materiale.

Nel settore dei rifiuti, i trattamenti termici che trovano applicazione sono i seguenti:

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

Tra queste, l'incenerimento è la tecnologia maggiormente consolidata per quanto concerne i rifiuti solidi e la più applicata su vasta scala.

2.2 Incenerimento: caratteristiche e funzionamento

Nella fattispecie, l'incenerimento dei rifiuti urbani è un processo di ossidazione termica del rifiuto, nel quale gli elementi fondamentali costituenti le sostanze organiche contenute vengono ossidati, dando origine a molecole semplici e sostanzialmente allo stato gassoso in condizioni ambiente (fumi); il carbonio organico viene ossidato ad anidride carbonica (CO_2), l'idrogeno ad acqua (H_2O), lo zolfo a biossido di zolfo (SO_2), ecc.; la parte inorganica del rifiuto viene eventualmente ossidata anch'essa ed esce dal processo come residuo solido da smaltire e/o recuperare (ceneri pesanti). Poiché il processo è di tipo ossidativo, è necessaria la presenza di ossigeno per le reazioni: normalmente viene utilizzata aria, fornita in eccesso rispetto alla quantità stechiometrica per facilitare le reazioni chimiche [Fonte: Libro Bianco sull'incenerimento dei rifiuti, 2020].

Il processo in generale si può schematizzare come segue:

- Stoccaggio dei rifiuti - I rifiuti che arrivano da impianti di selezione e raccolta dislocati sul territorio sono stoccati in un'area dell'impianto dotato di un sistema di aspirazione, per evitare il disperdersi di cattivi odori. Successivamente, per mezzo di un carroponte, i materiali sono depositati nel forno attraverso una tramoggia di carico.

- Combustione - Il forno è l'elemento cardine dell'impianto e ve ne esistono di diverse tipologie, le più diffuse sono: a griglia mobile, a tamburo rotante e a letto fluido. Una corrente d'aria forzata viene iniettata nel forno per apportare una sufficiente quantità di ossigeno in grado di sostentare la combustione ad alta temperatura (fino a 1000°C). Accanto alla camera di combustione primaria viene associata una camera di combustione secondaria (camera di post-combustione), in accordo con la normativa vigente.

- Produzione di vapore surriscaldato - Proprio le alte temperature della combustione portano alla vaporizzazione dell'acqua in circolazione nella caldaia posta a valle, con produzione di vapore surriscaldato.

- Produzione di energia - Il vapore generato può essere utilizzato per mettere in movimento una turbina che, accoppiata ad un alternatore, trasforma l'energia

termica in energia elettrica producendo corrente alternata per espansione del vapore surriscaldato; inoltre vi è anche la possibilità di sfruttare l'energia termica immagazzinata nel vapore all'uscita della turbina negli impianti di teleriscaldamento.

- Ceneri - Le componenti dei rifiuti non combustibili vengono raccolte in una vasca piena d'acqua posta a valle dell'ultima griglia del forno. Le scorie, raffreddate in questo modo, sono quindi estratte e smaltite in discariche speciali.
- Trattamento dei fumi - Dopo la combustione i fumi caldi (circa il 140-150% in peso del rifiuti in ingresso) passano in un sistema multi-stadio di filtraggio, per l'abbattimento del contenuto di agenti inquinanti sia chimici che solidi. Dopo il trattamento ed il raffreddamento i fumi vengono rilasciati in atmosfera a circa 140°C.

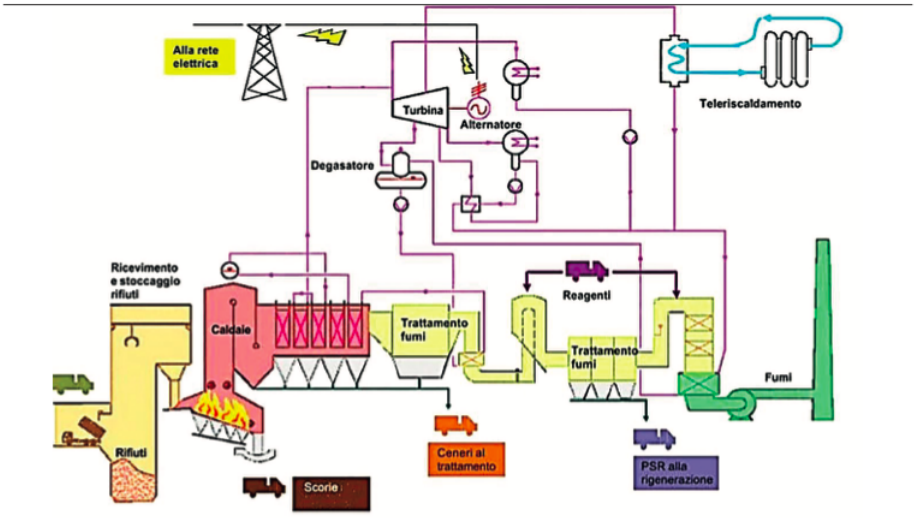


Figure 2.1: Schema impianto di incenerimento

Nei successivi paragrafi verranno analizzati nel dettaglio le singole fasi di processo.

2.2.1 Conferimento, stoccaggio e alimentazione dei rifiuti

I rifiuti in ingresso all'impianto passano attraverso una stazione di pesatura ed eventuale stazione di controllo della radioattività, e vengono successivamente accumulati in un'apposita fossa di stoccaggio. La capacità di stoccaggio della fossa è funzione della potenzialità dell'impianto, delle condizioni igienico sanitarie e delle esigenze dei servizi esterni di raccolta. Di norma la fossa è dimensionata in modo da garantire un'autonomia gestionale nel caso di:

- inattività dei servizi esterni di raccolta (in genere fino a 3-4 giorni)
- brevi periodi di arresto dell'impianto

Il suo volume utile (V_u) va calcolato sulla base di un tempo di stoccaggio (t_c) da definirsi in ore e per un periodo non inferiore ai 2 giorni di produzione del rifiuto (solitamente si considerano 4 o 5 giorni massimi di scorta), della potenzialità massima continua dell'impianto (P_{mc}) espressa in t/h, e tenendo conto del peso specifico medio (γ_s) del rifiuto raccolto in fossa (solitamente pari a 0,3-0,5 t/m^3). L'espressione che lega tali grandezze al volume V_u è la seguente:

$$V_u = \frac{P_{mc} \cdot t_c}{\gamma_s} \tag{2.1}$$

La sezione di conferimento e stoccaggio è costituita almeno dalle seguenti componenti:

- piazzale di scarico automezzi, sopraelevato rispetto al piano dei rifiuti, in modo da non causare ostacoli o interferenze con l'operazione di scarico;
- scarico di rifiuti in fossa con porte a tenuta completamente esterne alla fossa (bocca di lupo);
- eventuale sistema di triturazione dei rifiuti ingombranti, munito di scarico diretto in fossa, in modo da miscelare il materiale triturato con i rifiuti indifferenziati; copertura e tamponamento completo, sia della fossa di stoccaggio che dell'area di scarico;
- impianto di aspirazione al fine di mantenere, sia nella fossa che nell'area di carico, una leggera depressione tale da evitare qualsiasi fuoriuscita di polveri

e/o esalazioni moleste. Solitamente l'aria aspirata viene utilizzata come aria di combustione dei rifiuti;

- sistema di movimentazione e caricamento (mediante gru a ponte o simili con polipo) dei rifiuti presso le apposite tramogge di carico dei forni; solitamente almeno due sistemi di movimentazione per fronteggiare eventuali guasti o malfunzionamenti;
- cabina di pilotaggio dei sistemi di movimentazione dei rifiuti, di norma posta in una zona alta della fossa in modo da dare pieno campo visivo all'operatore sia sui rifiuti da movimentare che sulle tramogge di carico dei forni.

2.2.2 Camera di combustione

Come accennato in precedenza, il forno è l'elemento cardine dell'impianto e ve ne esistono di diverse tipologie, tra cui: forni a griglia (mobile o fissa), a tamburo rotante e a letto fluido.

FORNI A GRIGLIA

I forni a griglia costituiscono la principale tecnologia per la combustione di rifiuti solidi urbani, grazie alla flessibilità che ne caratterizza il funzionamento ed all'affidabilità derivante dalle numerose applicazioni.

Questi tipi di forni sono caratterizzati per l'appunto da una griglia (fissa o mobile), che presenta inclinazione variabile tra 10 - 20°, sopra la quale viene formato un letto di rifiuti dello spessore di alcune decine di centimetri (Figura n.2.2). La funzione della griglia consiste nel supportare e movimentare i rifiuti dalla zona d'ingresso fino alla zona di uscita delle scorie ad una velocità variabile a seconda del tempo di permanenza necessario ad ottenere il completamento della combustione (in genere compreso tra 30 e 60 minuti). Allo stesso tempo l'aria di combustione primaria viene iniettata al di sotto della griglia in una quantità stechiometrica necessaria per l'avvenimento della combustione. Un'ulteriore quantità di aria (aria secondaria) viene insufflata nella camera al di sopra della griglia, così da avere un eccesso d'aria atto a garantire un adeguato controllo della temperatura, data la natura discontinua del combustibile.

La griglia mobile è costituita da elementi mobili detti "barrotti", disposti in modo da consentire il passaggio dell'aria comburente e la sua ripartizione su tutto il letto del rifiuto. I barrotti esposti al fuoco sono realizzati in una speciale lega di acciaio al nichel-cromo e possono in genere sopportare temperature di esercizio di 1100°C. La forma dei barrotti della griglia, i meccanismi adottati per il loro movimento ed i sistemi di avanzamento del rifiuto caratterizzano i diversi tipi di griglie comunemente impiegati: si distinguono griglie mobili a movimento alternato, a tamburi, a catene oppure a barrotti oscillanti.

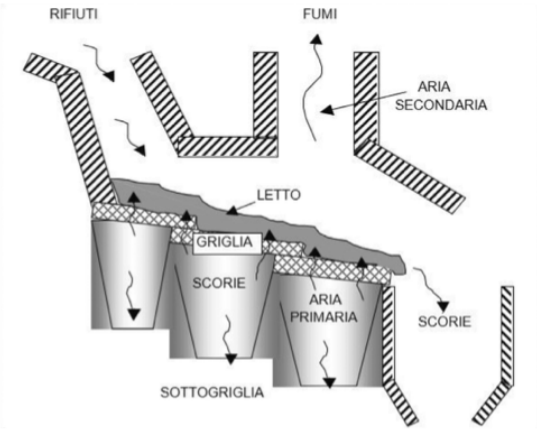


Figure 2.2: Schema di funzionamento del forno a griglia mobile

Tabella 2.1 Parametri di progetto e condizioni operative dei forni a griglia

Parametri di progetto	
Carico termico sulla griglia	400.000 - 800.000 $kcal/m^2h$
Carico termico volumetrico	60.000 - 200.000 $kcal/m^3h$
Tempo di residenza dei rifiuti	30-60 minuti
Tempo di residenza fumi	2-6 s
Condizioni operative	
Temperatura di esercizio	850-900°C (senza fusione scorie)
Rendimento energetico	20-80 % (a seconda che si recuperi solo energia elettrica o anche calore)
Eccesso d'aria	70-100 %

Il processo di combustione può essere suddiviso nelle seguenti fasi successive, come mostrato in Figura n.2.3:

- Essiccamento del rifiuto (100-300°C) nella parte prossima all'alimentazione;
- Pirolisi (400-700°C) con rilascio di composti volatili e gassificazione (700-1000°C) nella parte centrale della griglia;
- Combustione (800-1400°C).

A queste fasi segue la zona di post-combustione e la zona di spegnimento del materiale combustibile ancora acceso dove viene permessa l'ultimazione della fase di ossidazione fino ad esaurimento della stessa. La parte che giunge alla fine della griglia senza essere bruciata, o poiché incombustibile o per altre ragioni, viene scaricata tramite un apposito sistema ed avviata così agli opportuni trattamenti conseguenti. Parte delle scorie più fini prodotte possono anche passare attraverso il piano della griglia e quindi vengono raccolte da appositi dispositivi a tramoggia ed infine rimescolate alle scorie "pesanti" accumulatisi all'interno del bacino posto al termine della griglia.

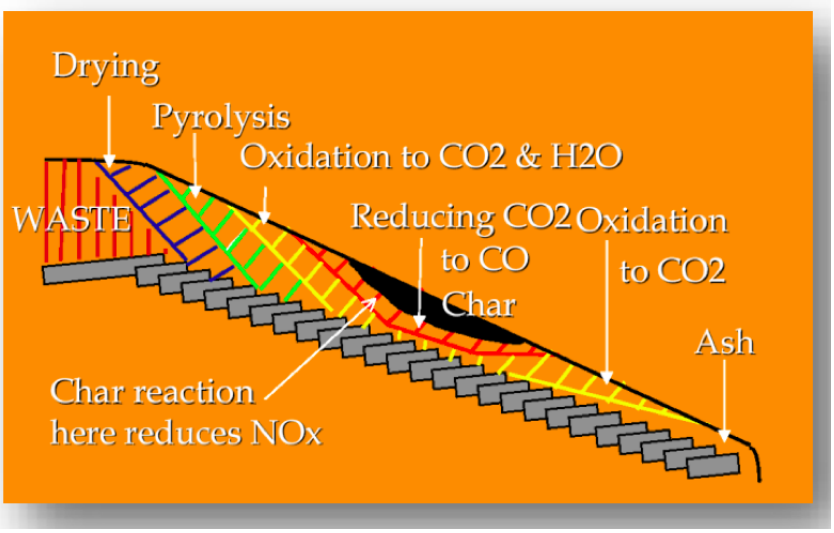


Figure 2.3: Fasi del processo di combustione

L'aspetto del raffreddamento degli elementi della griglia risulta estremamente importante per processi di questo tipo, per tale ragione sono stati pensati tre principali sistemi di raffreddamento degli elementi della griglia: sistemi di raffreddamento ad aria, ad acqua e misti. Nel caso di raffreddamento ad aria, al di sotto ed attraverso

il piano della griglia, viene insufflato un flusso di aria allo scopo sia di alimentare con fluido comburente il focolare, sia di raffreddare la parte degli elementi della griglia non direttamente esposta alla fiamma. Volendo migliorare le prestazioni del sistema di raffreddamento è possibile optare per un sistema a liquido refrigerante, solitamente acqua, che viene fatto fluire all'interno di appositi canalini realizzati direttamente all'interno della struttura dei barrotti, nel caso di griglia ad elementi alternati. Un tale sistema però impone un'elevata complessità impiantistica, spesso non giustificata appieno in quanto la parte della griglia realmente sottoposta ad un elevato carico termico risulta solo quella corrispondente alla zona di combustione e post-combustione del rifiuto.

Si precisa infine, che per consentire l'innesco della reazione di combustione della massa di rifiuto, nonché di supplire ad eventuali carenze termiche legate al basso potere calorifico del rifiuto (al di sotto delle 1000 kcal/kg), la camera di combustione viene inoltre provvista di un bruciatore ausiliario alimentato a gas metano con funzionamento automatico in una quantità variabile tra i 4 ed i 19 m^3 per tonnellata di rifiuti.

Questo tipo di forno è adatto a trattare quantitativi di rifiuto variabili da 40-50 t/giorno per forni di piccola taglia a 800-1000 t/giorno per forni di grande taglia.

FORNI A TAMBURO ROTANTE

I forni a tamburo rotante sono dispositivi molto semplici, essenzialmente costituiti da un tamburo rotante dotato di un'opportuna inclinazione (in genere 1-3%) per favorire il movimento del materiale (Figura n. 2.4).

La combustione del letto dei rifiuti avviene direttamente a contatto con la parete del forno, tipicamente costituita da materiale refrattario in protezione alle elevate temperature ed all'aggressione chimica. Nell'applicazione ai processi di termodistruzione, i rifiuti vengono alimentati in corrispondenza della testata di iniezione collocata in corrispondenza dell'estremità più alta del forno, mentre lo scarico delle scorie e dei residui avviene all'estremità opposta. L'aria di combustione può essere iniettata sia nella testata di ingresso dei rifiuti (configurazione in equi-corrente, di semplice realizzazione e gestione), che nella testata di scarico (configurazione in controcorrente).

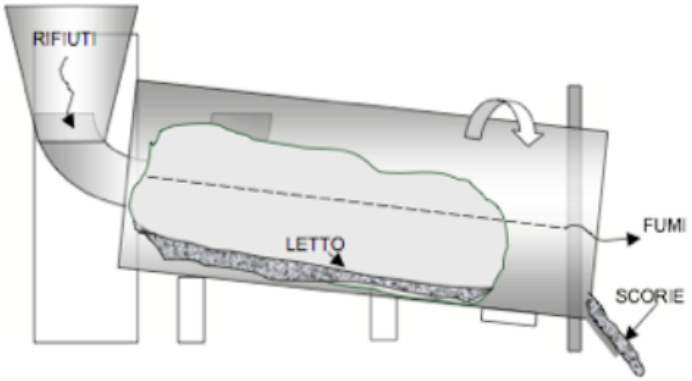


Figure 2.4: Schema di funzionamento di un forno a tamburo rotante

In questi tipi di forni, il contatto tra aria comburente e rifiuto è difficoltoso, infatti il materiale trattato forma uno strato, detto "suola", di alcune decine di centimetri; il contatto dello stesso con l'aria di combustione avviene solo superficialmente, per tale ragione per questi tipi di forni normalmente sono necessari elevati eccessi d'aria (100-150%). Il contatto può anche essere incrementato mediante l'introduzione di strutture interne che intensifichino la movimentazione del letto ed il contatto combustibile comburente (come ad esempio palettature per la movimentazione del rifiuto).

II tamburo rotante può assumere diverse configurazioni a seconda delle caratteristiche costruttive del cilindro. Può essere costituito da un semplice cilindro di acciaio senza rivestimento per alcune applicazioni, può avere le pareti a tubi d'acqua per la produzione di vapore intervallati da spazi per il passaggio dell'aria oppure come avviene nella maggior parte dei casi, può avere le pareti rivestite di materiale refrattario (cui tuttavia sono normalmente associate elevate dispersioni termiche, dell'ordine del 10%). In questo caso è da tenere presente che, per ragioni costruttive, il refrattario è posto direttamente in contatto con la parete metallica, senza interposizione di isolante, infatti lo strato isolante potrebbe subire ampie dilatazioni che porterebbero al distacco del refrattario. In conseguenza di ciò la temperatura del mantello metallico esterno può raggiungere valori tra i 200 ed i 300°C, con dispersioni di calore verso l'esterno non trascurabili. Questo fatto condiziona le dimensioni minime dei forni, specie nel diametro. Per evitare dispersioni all'esterno troppo elevate, che possono superare il 10% del bilancio termico

globale, è opportuno che i diametri minimi dei forni non siano inferiori ai 1,5 - 2 m. Per contro si possono realizzare dei forni aventi diametro del fasciame considerevoli, dell'ordine di 4 - 5 m.

Tabella 2.2 Parametri di progetto e condizioni operative dei forni a tamburo rotante

Parametri di progetto	
Diametro	1,5 ÷ 4m
Lunghezza	8 ÷ 15m
Rapporto L/D	2 ÷ 5
Carico termico volumetrico	50mila ÷ 200 mila $kcal/m^3h$
Carico termico superficiale	500mila ÷ 1.000.000 $Kcal/m^2h$
Tempo di residenza rifiuti	0,5 ÷ 1h
Dispersioni termiche	10%
Condizioni operative	
Temperatura di esercizio	850-1000°C (senza fusione scorie)
	1100 ÷ 1300°C (con scorie fuse)
Eccesso d'aria	100 ÷ 150 %
Velocità di rotazione	0,5 ÷ 1,2 giri/min

In conclusione, il forno rotante costituisce un sistema di termodistruzione semplice ed affidabile, il cui principale vantaggio risiede nell'elevata flessibilità rispetto al combustibile, che lo rende di notevole interesse per la termodistruzione di rifiuti industriali. Altri impieghi per questo genere di forni sono il trattamento dei fanghi e dei rifiuti ospedalieri. Questo tipo di forno è particolarmente adatto al trattamento di terre di bonifica ed alla inertizzazione termica di scorie da incenerimento. Nel caso specifico dei rifiuti solidi urbani invece può fornire prestazioni inferiori a quelle di altri sistemi appositamente progettati per tali combustibili, ciò è principalmente dovuto al fatto che le caratteristiche costruttive di tali forni non sono adeguate a smaltire ingenti quantità di materiale, tipiche dei rifiuti solidi urbani.

FORNI A LETTO FLUIDO

Il forno a letto fluido (Figura n. 2.5) è essenzialmente costituito da una camera cilindrica verticale con pareti refrattariate all'interno della quale viene mantenuto un certo quantitativo di materiale inerte (il "letto"), di solito costituito da sabbia, in sospensione ("fluido") da una corrente ascendente di aria (che funge anche da comburente). Il movimento del letto di sabbia garantisce un buon contatto comburente - combustibile, oltre a una notevole uniformità di temperatura e di miscelazione, che contribuiscono a garantire una combustione costante e completa. Questa apparecchiatura, messa a punto inizialmente nell'industria petrolchimica, è stata adattata successivamente alla combustione di sostanze piuttosto omogenee e di pezzatura ridotta. I rifiuti urbani debbono dunque subire un pretrattamento costituito, come minimo, da operazioni di vagliatura e triturazione [Fonte: Libro Bianco sull'incenerimento dei rifiuti, 2020].

Le caratteristiche di funzionamento che possono rendere interessante l'impiego dei sistemi a letto fluido per lo smaltimento dei rifiuti e specificatamente per RSU, sono essenzialmente:

- possibilità di un miglior controllo degli inquinanti in fase di combustione, sia tramite l'iniezione di additivi (per HCl e SO_2), che per mezzo di un'opportuna conduzione della combustione;
- possibilità di avere unità compatte rispetto ai forni convenzionali, a ragione dei maggiori carichi specifici;
- buona flessibilità rispetto al carico ottenuto tramite il controllo dell'aria di combustione, anche con ampie escursioni del carico specifico;
- possibilità di operare in modo discontinuo a causa dei minori tempi di accensione e spegnimento;
- ridotto numero di parti meccaniche in movimento e quindi, almeno in linea di principio, minori possibilità di rotture e guasti;
- possibilità di operare con bassi eccessi d'aria (20-30%), in quanto la temperatura è controllata anche mediante scambio termico (regime non adiabatico). Questo comporta un minore volume di fumi e di conseguenza impianti di bonifica di minori dimensioni ed un maggior rendimento energetico;

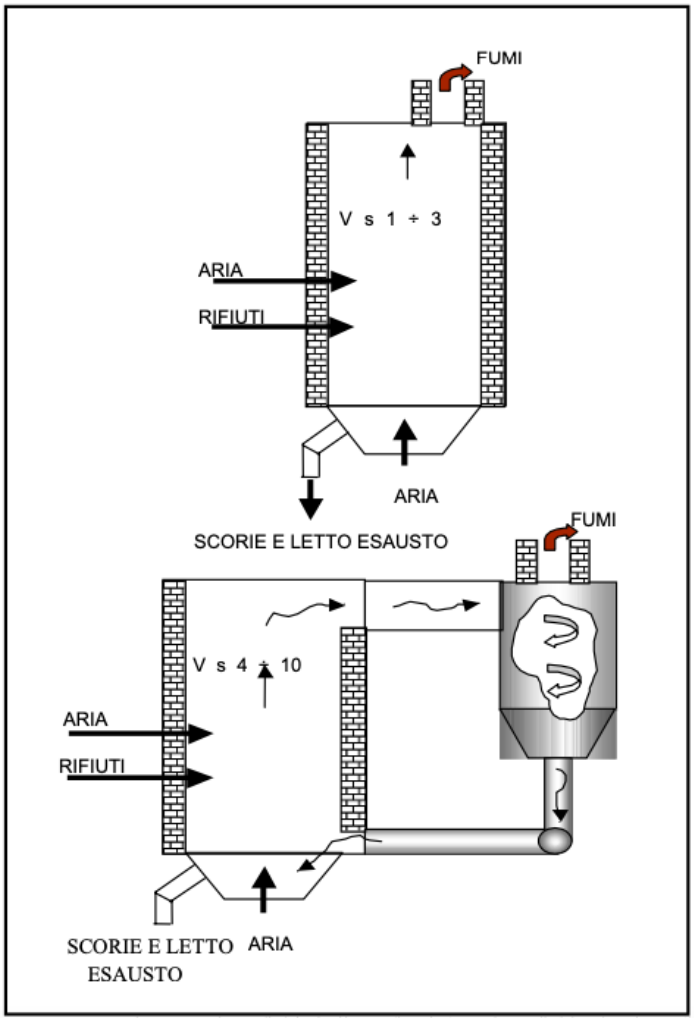


Figure 2.5: Combustore a letto fluido bollente (in alto) e a letto fluido circolante (in basso)

- elevata efficienza di combustione a causa dell'elevata turbolenza e degli elevati tempi di residenza, dell'ordine di 5-6 secondi;
- basso contenuto organico nelle scorie. Se il processo è ben condotto si hanno contenuti di organico anche inferiori a 0,2-0,3%, mentre nei forni a griglia ad esempio si ha un contenuto dell'ordine del 2-5%.

Il funzionamento dei letti fluidi non è comunque esente da problemi e questi sistemi richiedono una corretta gestione al fine di evitare pericoli di defluidizzazione del letto, che possono derivare dalla presenza di ceneri "basso fondenti" e portano a fenomeni di agglomerazione. E' consigliato usare i letti fluidi quando le caratteristiche dei

combustibili in alimentazione sono note ed è ben conosciuto il punto di rammollimento delle ceneri. C'è da tenere presente inoltre che le disomogeneità possono favorire quei fenomeni di agglomerazione cui prima si accennava.

I letti fluidi possono essere realizzati per operare in condizioni molto diverse, in proposito si evidenziano le due tipologie utilizzate comunemente:

- letti fluidi convenzionali (BFB - Bubbling Fluidized Bed) - costituiti essenzialmente da un cilindro in cui l'aria viene insufflata dal basso ed il combustibile iniettato dall'alto o lateralmente. La velocità di fluidizzazione è dell'ordine di $1 \div 3$ m/s ed induce solo un minimo trasporto di materiale particolato nella corrente.

- letti fluidi circolanti (CFB - Circulating Fluidized Bed) - in cui le velocità di fluidificazione possono raggiungere anche valori di 8-10 m/s consentendo quindi un notevole trascinamento di particolato solido che deve essere separato dalla corrente e riavviato nel letto stesso prima dello scarico dei fumi. La separazione avviene in genere attraverso un ciclone, dalla base del quale le particelle vengono reintrodotte con modalità diverse nel letto principale (si veda Figura n.2.5). Con i letti circolanti si ottengono notevoli turbolenze nelle sospensioni si riducono le disomogeneità trasversali, con possibilità di aumentare l'efficienza di alcuni processi (mescolamento, scambio termico, ecc.) e quindi di conseguenza i carichi specifici.

Vi è da aggiungere che mentre nel letto circolante la fase di separazione prevista con il ciclone permette di riciclare anche eventuali particelle di materiale incombuste, nel caso di letto fluido bollente la presenza di queste negli effluenti risulterebbe di fastidio per le successive fasi di trattamento dei fumi.

Si sottolinea anche che per gli impianti a letto fluido la normativa vigente in Italia non prevede l'installazione della camera di post-combustione anche se la temperatura del letto raggiunge al massimo valori dell'ordine di 850-900°C (per evitare processi di fusione delle ceneri determinati da temperature troppo elevate) contro un minimo stabilito per legge di 850°C. Questo può consentire una notevole semplificazione impiantistica anche se è da rilevare che le specifiche autorizzazioni all'esercizio possono prevedere l'obbligo di installazione della camera di combustione operante a 950°C. Tale fatto

comporta notevoli complicazioni in quanto porta alla necessità di elevare la temperatura dei forni di circa 100°C, con l'impiego di combustibile addizionale [Fonte: Libro bianco sull'incenerimento dei rifiuti urbani, 2020].

Tabella 2.3 Parametri di progetto e condizioni operative dei forni a letto fluido

Parametri di progetto	
Velocità di fluidificazione	3-5 m/s (letti fluidi bollenti)
	5-10 m/s (letti fluidi ricircolati)
Carico termico	10-50 MWth (letti fluidi bollenti)
	40-80 MWth (letti fluidi ricircolati)
Carico termico volumetrico	150.000 - 200.000 $kcal/m^3$
Tempo di residenza dei rifiuti	50-90 minuti
Tempo di residenza fumi	$>$ 3 s
Condizioni operative	
Velocità di fluidificazione	1-3 m/s (letti fluidi bollenti)
	5-8 m/s (letti fluidi ricircolati)
Temperatura di esercizio	850-900°C
Eccesso d'aria	20-30 %
Rendimento energetico	23-25 %

Si riporta infine la seguente tabella riassuntiva fra le varie tipologie di forni.

Griglia mobile	❑ Non richiede pretrattamento dei RU => largamente applicata per rifiuti urbani ❑ Apparecchiatura collaudata e affidabile ❑ Esistono molte applicazioni a livello mondiale ❑ Consente buoni livelli di recupero energetico ❑ Idoneo per rifiuti di diversa pezzatura	❑ Non adatto per rifiuti a elevato PCI (> 5000 kcal/kg) ❑ Non adatta per rifiuti polverulenti, pastosi, melme, liquidi ❑ Fattibilità economica ristretta a taglie di impianto medio-alte
Tamburo rotante	❑ Largamente applicata per rifiuti pericolosi, industriali, sanitari ❑ Possibilità di trattare rifiuti in qualsiasi stato fisico (solidi, liquidi, pastosi), anche mischiati ❑ Scarsa sensibilità al variare di composizione, umidità, pezzatura del rifiuto ❑ Semplicità costruttiva ❑ Elevata affidabilità di funzionamento	❑ Presenza di parti in movimento (problemi di tenuta e usura) ❑ Residui incombusti nelle scorie maggiori rispetto alla griglia ❑ Incompleta ossidazione dei fumi in forno => necessaria la post-combustione ❑ Eccessi d'aria elevati ❑ Consumo elevato del refrattario ❑ Ridotte efficienze di recupero energetico ❑ Potenzialità limitata
Letto fluido	❑ Largamente applicata per CDR e fanghi ❑ Elevata efficienza di combustione ❑ Basso contenuto di incombusti nelle scorie ❑ Carichi termici specifici elevati => unità compatte ❑ Tempi di avviamento rapidi => possibilità di operare in discontinuo ❑ Poche parti in movimento ❑ Possibilità di operare con bassi eccessi d'aria => migliore recupero termico e sistemi di depurazione più compatti ❑ Parziale riduzione di gas acidi (SO_2) in combustione tramite iniezione di sorbenti alcalini ❑ Residui incombusti nelle scorie minori rispetto alla griglia	❑ Fenomeni di agglomerazione => possibile defluidizzazione del letto ❑ Necessarie pezzature ridotte e omogeneità => necessità di pretrattamento, costi di gestione ❑ Necessario elevato mescolamento trasversale => vari punti di alimentazione e alte velocità di fluidizzazione ❑ Difficoltà di trattare rifiuti leggeri ❑ Ridotte esperienze applicative per impianti a RU ❑ Elevati carichi di polvere da captare alla sezione di trattamento fumi

Figure 2.6: Confronto fra le varie tecnologie

2.2.3 Depurazione fumi

La sezione di depurazione fumi è di estrema importanza, in quanto è preposta al controllo delle emissioni al camino, perciò da essa dipendono i più rilevanti effetti di impatto ambientale nonché il rispetto della normativa vigente. In quest'ultimo decennio sono stati realizzati formidabili progressi tecnologici in questo ambito ed infatti ad oggi per la riduzione delle emissioni ci si deve basare sulle BAT (Best Available Techniques, cioè le migliori tecniche attualmente disponibili e sfruttabili industrialmente), definite in un documento ufficiale dell'IPPC Bureau per gli impianti di incenerimento.

Un impianto di incenerimento dà origine a emissioni di tipo gassoso, liquido e solido.

Per quanto concerne specificatamente gli inquinanti che si trovano nel flusso gassoso, i criteri più attuali di valutazione delle emissioni da processi di incenerimento di rifiuti tendono a distinguere due famiglie di inquinanti:

- macroinquinanti $\longrightarrow$ ovvero inquinanti che si trovano nei fumi in concentrazioni misurabili nell'ordine dei mg/Nm^3. Trattasi di prodotti residuali delle reazioni di ossidazione termica delle componenti del rifiuto che si trovano nei gas di combustione come polveri, HCl, SO_2, NO_x, HF, con l'aggiunta di tipici prodotti di reazioni ossidative incomplete quali CO e TOC.

- microinquinanti $\longrightarrow$ ovvero inquinanti presenti in modeste concentrazioni, dell'ordine dei $\mu g/Nm^3$ (ricordando che 1 $\mu g = 0,001mg$), o addirittura dei ng/Nm^3 (ricordando che 1 ng equivale a un milionesimo di mg). Trattasi di sostanze che in gran parte comportano i maggiori rischi ambientali a causa della loro elevata tossicità e capacità di accumulo in sistemi naturali e nella stessa catena alimentare. Si citano in particolare i microinquinanti organici alogenati, tra cui le diossine (policlorodibenzodiossine, PCDD, e policlorodibenzofurani PCDF), PCB (policlorobifenili), IPA (idrocarburi policiclici aromatici) e, tra i microinquinanti inorganici, i metalli pesanti come Hg, Cd, Pb.

Prima del loro rilascio in atmosfera i fumi sono sottoposti ad un trattamento con l'obiettivo di ridurre in modo sostanziale le concentrazioni delle sostanze inquinanti. La sezione di trattamento fumi risulta molto articolata e complessa, in conseguenza dei limiti sempre più rigorosi imposti dalla normativa e di un concreto progresso tecnologico, che ha condotto negli ultimi anni allo sviluppo di sistemi sofisticati, in grado di consentire il raggiungimento di valori di emissione al limite della soglia di misurabilità [Fonte: Libro Bianco sull'incenerimento dei rifiuti urbani, 2020]. Il trattamento dei fumi può essere suddiviso in sotto-processi anche se, come vedremo in seguito, spesso vengono assolti dallo stesso tipo di impianto. Le principali attività di abbattimento degli inquinanti sono:

- Abbattimento delle polveri,

- Rimozione inquinanti gassosi,

  - Gas acidi,

  - Ossidi di azoto,

- Rimozione metalli pesanti,
- Rimozione composti organo-clorurati

Nella Tabella n.2.4 si riportano i limiti di emissione riferiti all'incenerimento di RU, rifiuti speciali non pericolosi e CSS secondo la vigente normativa italiana (D.L. 11 maggio 2005, n.133).

Tabella 2.4 Valori limite di concentrazione all'emissione per impianti di incenerimento di rifiuti secondo la normativa nazionale (D.L. 11 maggio 2005, n.133). I valori sono riferiti al gas secco e a un tenore di O_2 dell'11% in volume.

Parametri (mg/Nm^3 eccetto $TCDD_{eq}$ in ng/Nm^3)	Medi Giornalieri	Medi su 30 min	Medi con campionamento di 1h (*8h)
Polveri totali	10	30	-
$\sum Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V$	-	-	0,5
$\sum Cd, Tl$	-	-	0,05
Hg	-	-	0,05
Carbonio Organico Totale (TOC)	10	20	-
$TCDD_{eq}$	-	-	0,1*
Idrocarburi policiclici aromatici IPA	-	-	0,01*
CO	50	100	-
HCl	10	60	-
HF	1	4	-
NO_x (come NO_2)	200	400	-
SO_x (come SO_2)	50	200	-

Di seguito si riportano tipici valori di emissione a seguito dell'incenerimento e successivamente ai trattamenti di depurazione, i quali sono elencati nella quarta colonna (Figura n.2.7).

Si procede quindi all'analisi delle tecnologie impiegate per l'abbattimento nei singoli casi sopra elencati.

Tipologia di inquinante	*Valori tipici da combustione*	*Valori post-trattamento*	*Principali sistemi di abbattimento*
Polveri	1000 – 5000 mg/m^3	< 5 – 10 mg/m^3	▫ Elettrofiltri ▫ Filtri a maniche
Gas acidi : ▫ HCl ▫ HF ▫ SO_2	1000 mg/m^3 20 mg/m^3 100 - 500 mg/m^3	< 10 mg/m^3 < 1 mg/m^3 < 40 mg/m^3	▫ Torri di lavaggio (con acqua, acqua e calce) ▫ Reattore a secco (miscelazione con calce, bicarbonato di sodio)
Ossidi di azoto ▫ NO_x	200 – 450 mg/m^3	< 100 mg/m^3	▫ Iniezione di ammoniaca o urea in camera di combustione (SNCR) Oppure: ▫ Catalizzatori a base di ossidi di Vanadio, tungsteno, platino (SCR)
Metalli pesanti non volatili ▫ Pb, Cr, Cu, Mn ▫ Hg, Cd ▫ Diossine	2 – 5 mg/m^3 0,2 – 0,8 mg/m^3 1 – 3 ng/m^3	0,5 mg/m^3 0,05 mg/m^3 0,1 ng/m^3	▫ Reattori a secco con additivi adsorbenti (iniezione di carbone attivo)

Figure 2.7: Valori di emissione e sistemi di abbattimento tipici degli inquinanti

ABBATTIMENTO DELLE POLVERI

Le polveri sono particelle solide trascinate dai fumi: si tratta di ceneri volanti e frammenti di incombusti, che possono contenere vari materiali e avere granulometria varia (ultramicroscopiche - inferiori a 5 micron o macroscopiche - superiori a 30 micrometri). Per la rimozione delle polveri dal flusso gassoso si ricorre alla depolverazione, che consiste nella separazione della fase solida (le polveri per l'appunto) da quella gassosa (i fumi generati dalla combustione). I principali sistemi di abbattimento delle polveri sono i seguenti:

- Cicloni
- Filtri a manica
- Filtri elettrostatici

- CICLONI

Nei sistemi di depurazione come i cicloni con configurazione convenzionale (Figura n. 2.8) l'alimentazione del gas è tangenziale e le particelle in ingresso sono contemporaneamente sottoposte ad una forza centrifuga ed una forza di trascinamento. La particella compie dapprima un moto rettilineo, poi centrifugo ed infine ellittico all'interno del dispositivo. Le particelle vanno quindi a sbattere contro le pareti del dispositivo, pertanto il gas depurato fuoriesce dall'alto del dispositivo, mentre le polveri cadono verso il basso. Questi dispositivi sono di diffusa applicazione nel settore industriale essendo di semplice costruzione, senza organi in movimento e, con l'opportuna scelta del materiale di costruzione, possono operare a temperature anche molto diverse dalla temperatura ambiente.

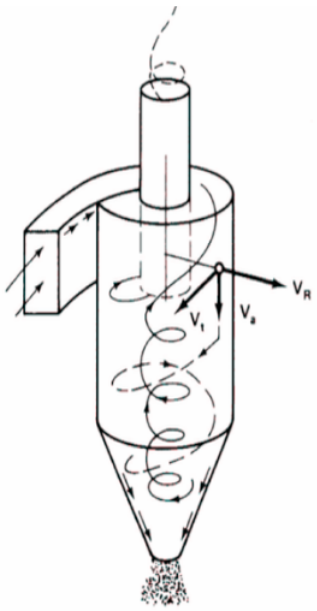


Figure 2.8: Schema funzionamento di un ciclone convenzionale con indicazione del moto compiuto dalla particella, del gas depurato e delle polveri

I cicloni possono però avere differenti configurazioni:

- convenzionale, con ingresso tangenziale dell'aria da trattare e uscita assiale dell'aria trattata e delle polveri;
- ad ingresso tangenziale e uscita laterale delle polveri;

- ad ingresso assiale e scarico assiale delle polveri;
- ad ingresso assiale e scarico laterale delle polveri.

Il sistema più impiegato è il ciclone convenzionale che basa il suo funzionamento su un processo che presenta le seguenti fasi:

- il gas contaminato viene inserito con direzione tangenziale al ciclone;
- grazie alla forma e dimensione del dispositivo il flusso d'aria assume un moto a spirale direzionato verso il basso;
- per effetto della forza centrifuga, si ha il deposito delle particelle sulle pareti del ciclone;
- per forza di gravità il contaminante precipita sul fondo, dove viene raccolto;
- grazie alla forma conica della bocca di uscita si crea una differenza di pressione nella zona inferiore del ciclone che genera l'inversione del moto di rotazione del flusso di gas.
- L'aria trattata senza le particelle più grossolane risale verso l'alto, si genera quindi un vortice più piccolo lungo il corpo del ciclone che permette la fuoriuscita del gas trattato dalla bocca di scarico posta lungo l'asse del ciclone.

Questi dispositivi vantano una grande semplicità, poiché privi di organi in movimento, bassi costi di impianto e di gestione, modeste richieste di spazio e recupero di polveri tal quali. Tuttavia presentano basse efficienze ($<80\%$) per polveri fini ($< 5\mu$) nonché rischi di erosione, abrasione ed intasamento qualora siano presenti polveri abrasive.

- FILTRI A MANICA

La filtrazione dell'aria mediante filtri a tessuto è un processo dedicato al trattamento dei fumi e di effluenti gassosi in cui siano presenti inquinanti sotto forma di particelle di piccole dimensioni. Il processo di filtrazione deve tener conto di numerose variabili:

- con riferimento ai tipo di inquinante, deve considerarne la concentrazione e il livello di abbattimento da raggiungere;
- con riferimento alle polveri, la dimensione, la forma, il peso delle particelle e le proprietà elettriche;
- con riferimento al flusso che veicola le polveri, la sua velocità e la presenza o meno di umidità.

Nei filtri a maniche (Figura n. 2.9) il gas viene fatto passare attraverso tessuti (fibre sintetiche) porosi, cosi che le particelle che hanno dimensione superiore alla luce libera fra le maglie si depositano sulla superficie del filtro separandosi dal flusso gassoso. In questo modo si forma uno strato sottile di particelle adese al tessuto, che non andrà rimosso poiché assolverà la funzione di centro di raccolta per le successive particelle. Quando lo spessore di questo strato diviene eccessivo al punto tale da ridurre l'efficienza di cattura delle particelle stesse allora andrà percosso meccanicamente. Per questo motivo la perdita di carico nell'attraversamento delle maniche è dovuta a due fattori: il primo relativo alla resistenza che la manica (pulita) oppone al passaggio del gas ed il secondo relativo alla resistenza dovuta allo strato di polvere in eccesso depositato sulla manica.

I vantaggi legati all'utilizzo dei filtri a maniche sono le efficienze elevate (>99%) per tutte le granulometrie, le prestazioni indipendenti dal tipo di carico di polveri, il recupero di polveri secche tal quali. D'altro canto sono elevati i rischi connessi all'incendio delle maniche per polveri incandescenti, al deterioramento dei tessuti per via dei gas caldi e/o aggressivi, all'intasamento dei tessuti e alla difficoltà per la pulizia dalle polveri igroscopiche o adesive ed infine vi deve essere un continuo controllo della temperatura e dell'umidità dei gas in entrata.

Figure 2.9: Schema funzionamento di un filtro a maniche [Fonte: US EPA]

- FILTRI ELETTROSTATICI

Il principio di funzionamento degli elettrofiltri (Figura n. 2.10) si fonda sulla cattura di particelle mediante l'azione di un campo elettrostatico, prodotto da due elettrodi: un elettrodo d'immissione, caricato negativamente ed un elettrodo di cattura, caricato positivamente. Ogni elettrofiltro presenta al suo interno una struttura modulare, formata da tanti elettrodi d'immissione e di cattura in sequenza. Dopo aver indotto un campo elettrico, la differenza di potenziale fa sì che si creino degli elettroni liberi e che i gas vengano ionizzati in ioni positivi e negativi. Le particelle polverulente attraggono un elevato numero di molecole negative e pertanto vengono attratte dall'elettrodo di raccolta, che è caricato positivamente.

Il sistema a filtri elettrostatici è quindi costituito da:

- elettrodi di raccolta, a forma di piastre o tubolari;
- elettrodi di scarica o di emissione, di forma filiforme. Questi sono posizionati parallelamente a quelli di raccolta (in modo coassiale nel caso di elettrodi di raccolta tubolari). Possono essere a sezione circolare, quadrata o a stella;
- gruppo di alimentazione, per generale i livelli di tensione richiesti al processo (dai 30 ai 100kV), costituito da un trasformatore e da un raddrizzatore;

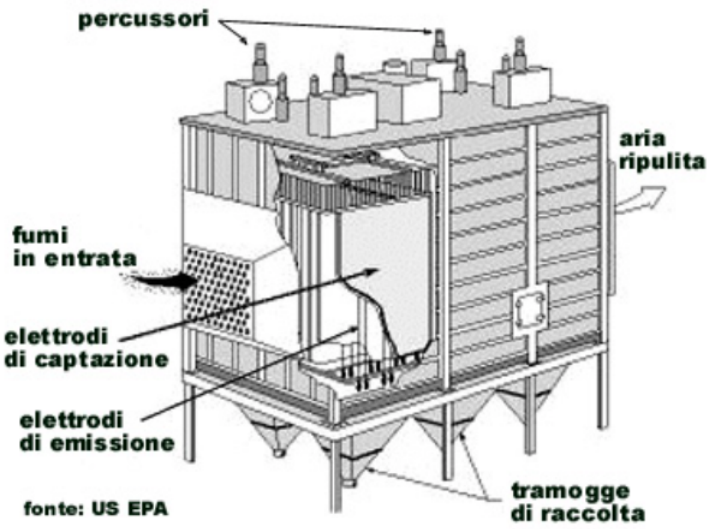


Figure 2.10: Schema funzionamento di un elettrofiltro [Fonte: US EPA]

- un apparato per la pulizia periodica degli elettrodi di raccolta. Il metodo maggiormente impiegato d il sistema a secco che realizza il distacco delle polveri fissate sugli elettrodi percuotendo o trasmettendo vibrazioni all'elettrodo.
- strutture di alloggiamento degli elettrodi e di distribuzione dei flussi di gas in ingresso ed in uscita;
- contenitori per la raccolta delle polveri (o dei fanghi nel caso del sistema ad umido).

RIMOZIONE INQUINANTI GASSOSI

A causa della non idealità del processo di combustione e della variabilità del materiale combustibile è inevitabile, a seguito dell'incenerimento, la formazione di sostanze gassose inquinanti. Si dovrà quindi procedere al trattamento dei gas combusti per poter eliminare:

- Gas acidi tra cui SO_2, HCl, HF
- Ossidi di azoto NO_X

- RIMOZIONE DEI GAS ACIDI

I principali gas acidi che si vengono a formare nel processo di combustione sono l'anidride solforosa (SO_2), l'acido cloridrico (HCl) e l'acido fluoridrico (HF), che derivano dalla trasformazione di sostanze a base di zolfo, cloro e fluoro. Lo zolfo presente nel rifiuto si trasforma, nel corso del processo di combustione, in SO_2 in percentuali comprese tra il 35 ed il 70%, mentre la parte rimanente si ritrova nelle ceneri e nelle scorie. Una piccola aliquota ($< 5\%$) si trasforma in SO_3, che in presenza di acqua può dar luogo alla formazione di acido solforico (H_2SO_4), con conseguenti problemi di corrosione. Il cloro con l'idrogeno da luogo alla formazione di HCl, con percentuali di conversione variabili tra il $50 \div 60\%$, anch'esso in grado di svolgere un'energica azione corrosiva. Comportamento analogo viene osservato per il fluoro, che origina la formazione di HF, pur se il contenuto di fluoro nei rifiuti è ben inferiore a quello del cloro. La pericolosità di queste sostanze non deve venire sottovalutata, anche poichè se immessi nell'atmosfera contribuiscono ad esaltare il fenomeno delle piogge acide diffondendo l'effetto nell'ambiente. Solitamente, per la rimozione dei gas acidi vengono impiegati: processi ad umido, processi a semisecco, processi a secco, carboni attivi, additivi nella camera di combustione. I trattamenti dei gas acidi sono di norma preceduti da una depolverazione primaria (in particolare se l'assorbimento e a secco/semisecco) per limitare il carico di polveri in arrivo e per separare le polveri di combustione da quelle derivanti dai processi di abbattimento dei gas acidi, provvedendone una diversa destinazione.

- RIMOZIONE OSSIDI DI AZOTO (NO_X)

Gli ossidi di azoto che caratterizzano i processi di combustione sono l'ossido nitrico (NO) ed il biossido di azoto (NO_2), complessivamente indicati con il simbolo NO_X. La loro formazione è dovuta alla reazione dell'azoto e dell'ossigeno contenuti nell'aria comburente ed in misura maggiore alla reazione dell'azoto organico dei rifiuti con l'ossigeno. Gli ossidi di azoto si generano durante i processi di combustione in tre modi (Figura n. 2.11):

- Thermal NO_X: durante la combustione una parte dell'aria azotata viene ossidata in ossidi di azoto. Questa reazione ha luogo solo in modo significativo a temperature superiori ai 1300°C. La velocità di reazione dipende esponenzialmente

dalla temperatura ed è direttamente proporzionale al contenuto di ossigeno.

- Fuel NO_X: durante la combustione una parte dell'azoto contenuto nel combustibile viene ossidata agli ossidi di azoto.
- Formazione di NO_X mediante reazione radicale (Prompt NO_X): l'azoto atmosferico può anche essere ossidato mediante reazione con radicali CH e formazione intermedia di HCN. Tuttavia questo meccanismo di formazione è di scarsa importanza nell'incenerimento dei rifiuti.

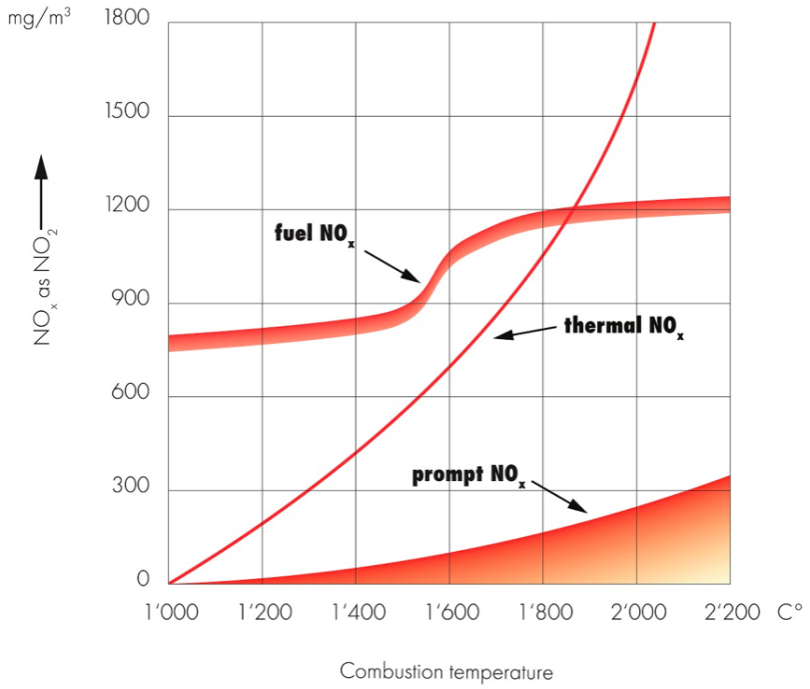


Figure 2.11: NO_X generati durante la combustione: Thermal NO_X, Fuel NO_X, Prompt NO_X [Fonte: Acid Rain: chemistry applied - Brieanne Kinnghorn, Kiana Lambert, Kris Beckett, Jacob Lower, Ben Fortini, Foster Lockerbie, Jack Babington].

Come si evince dalla Figura n.2.11 i Thermal NO_X sono i più impattanti e presentano una crescita esponenziale con l'aumentare della temperatura. Pertanto la produzione di NO_X può essere ridotta usando misure di controllo durante la combustione come per esempio impedire la fornitura di aria (ossia la prevenzione di immissione eccedente di azoto, normalmente presente in aria) e soprattutto evitare l'utilizzo di temperature non necessariamente troppo elevate del forno. Si possono definire delle tecniche di riduzione degli inquinanti in aria primarie e secondarie:

- azioni "primarie", cioè attraverso il controllo dei parametri di combustione per ridurre già in camera di combustione la formazione e le emissioni degli ossidi. Si agisce sugli aspetti termodinamici e cinetici del processo, con lo scopo di evitare che in alcune aree della camera di combustione si realizzino le due condizioni favorevoli alia formazione degli NO_X: temperature elevate ed eccesso d'aria.
- azioni "secondarie", cioè il trattamento degli effluenti gassosi. Gli ossidi di azoto presenti nei gas di combustione degli inceneritori possono essere rimossi per via:
  - Termica: processo ad alta temperatura: SNCR (Selective Non Catalytic Reduction)
  - Catalitica: processo a bassa temperatura: Riduzione Catalitica Selettiva (SCR - Selective Catalytic Reduction).

La Direttiva 2000/76/CE prevede un limite (come media giornaliera) di NO_X nei fumi (espresso come NO_2) pari a 200 mg/Nm^3. Al fine di ottenere la conformità a questo livello, occorre applicare misure di trattamento dell'inquinante presente nei fumi. La maggior parte dei processi utilizza ammoniaca o derivati di ammoniaca (ad esempio urea) come agente di riduzione. Gli ossidi di azoto contenuti nei fumi sono costituiti essenzialmente da NO e, in minor misura, NO_2 e possono essere ridotti ad azoto elementare (N_2) e vapore acqueo attraverso:

$$4\text{NO} + 4\ NH_3 + O_2 \longrightarrow 4\ N_2 + 6\ H_2O$$

$$2\text{NO} + CO(NH_2)_2 + 1/2\ O_2 \longrightarrow 2\ N_2 + 2\ H_2O + CO_2$$

CONVERSIONE TERMICA (NO_X) - Selective Non Catalytic Reduction (SNCR)

La riduzione non catalitica (illustrata in Figura n.2.12) prevede l'aggiunta in camera di combustione di un additivo, in genere ammoniaca (iniettata in soluzione acquosa) o urea, che reagendo con gli ossidi di azoto producono azoto e vapore acqueo. Le reazioni avvengono a temperature comprese tra 850 e 1000°C in quanto è necessaria una elevata energia di attivazione della reazione. Il processo permette efficienze di conversione nell'ordine del 50 - 70% (valore in uscita $< 200\ mg/Nm^3$).

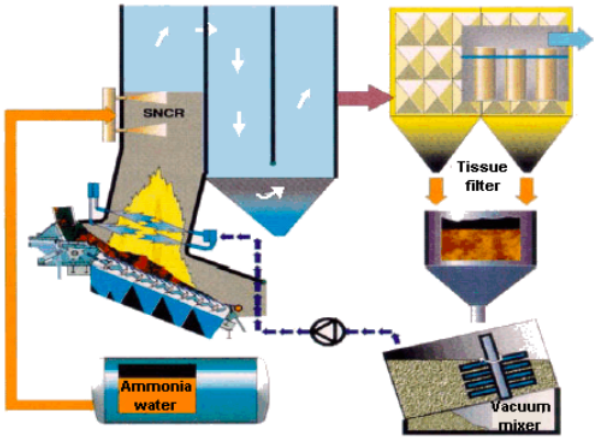


Figure 2.12: Illustrazione del processo SNCR

Nella Figura n.2.13, si illustra che, ad una temperatura di reazione di 1000°C, la riduzione degli NO_x è circa dell'85% con un residuo di ammoniaca di circa il 15%. Inoltre, a questa temperatura si osserva una produzione di NO_x, derivante dall'incenerimento dell'NH_3 iniettato, di circa il 25%. Pertanto, il range di temperatura ottimale per la riduzione degli NO_x è compresa fra 900-1100°C a seconda della composizione dei fumi. Per temperature più elevate (>1200°C) NH_3 stesso si ossida e forma ossidi di azoto, provocando un aumento di emissioni di NO_x, mentre per temperature operative inferiori la riduzione degli NO_x è meno efficace ed il residuo di ammoniaca aumenta (ammoniaca slip - Figura n.2.14). L'utilizzo dell'urea al posto dell'ammoniaca nel SNCR porta a emissioni relativamente più elevate di N_2O. Importante per l'ottimizzazione del processo SNCR è l'efficace miscelazione del gas di combustione con l'agente riducente gli NO_x, nonché un sufficiente tempo di permanenza del gas per consentire la completa reazione di riduzione, nell'intervallo di temperatura più appropriato. Nel caso di processi di pirolisi e di gassificazione, l'ottimizzazione del SNCR è ottenuta iniettando il reagente nelle zone di combustione con una temperatura ben controllata ed efficace miscelazione del gas.

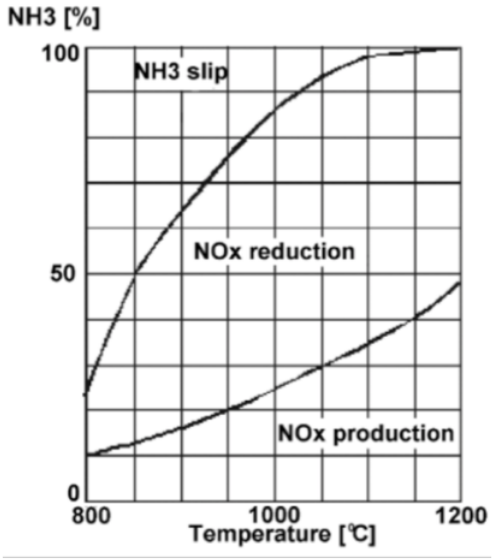


Figure 2.13: Relazione tra riduzione e produzione di NO_x, ammoniaca residua e temperatura di reazione per il processo SNCR [Fonte: Tesi di Laurea - Trattamento di NO_x da gas di scarico: confronto tra le tecniche SCR e SNCR - Antonio Di Vaio].

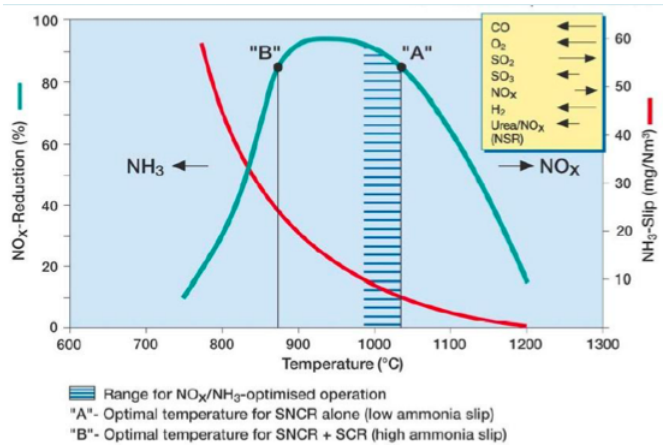


Figure 2.14: Relazione tra riduzione e produzione di NO_x, ammoniaca residua e temperatura di reazione per il processo SNCR [Fonte: Tesi di Laurea - Trattamento di NO_x da gas di scarico: confronto tra le tecniche SCR e SNCR - Antonio Di Vaio].

CONVERSIONE CATALITICA (NO_X) - Selective Catalytic Reduction (SCR)

La riduzione catalitica selettiva (SCR) è un processo in cui si utilizzano sostanze catalitiche a base di ossidi di vanadio, tungsteno e/o platino su supporti di titanio

(Figura n.2.15). Quando il gas passa attraverso il catalizzatore, l'ammoniaca reagisce con gli NO_x per dare azoto e vapore acqueo. Per essere efficace, il catalizzatore richiede un'energia di attivazione inferiore e pertanto è necessaria una temperatura compresa tra 180 e 450°C. La maggior parte dei sistemi utilizzati negli inceneritori di rifiuti attualmente operano nella finestra d'intervallo compresa tra i 250-350°C; al di sotto di 250°C c'è infatti un maggior pericolo di contaminazione e avvelenamento del catalizzatore. Il processo SCR fornisce elevati tassi di riduzione degli NO_x (tipicamente oltre il 90%) e per questo è principalmente applicato nella zona del gas pulita, cioè dopo la depurazione e la rimozione del gas acido; permette concentrazioni in uscita degli NO_X inferiori a 100 mg/Nm^3.

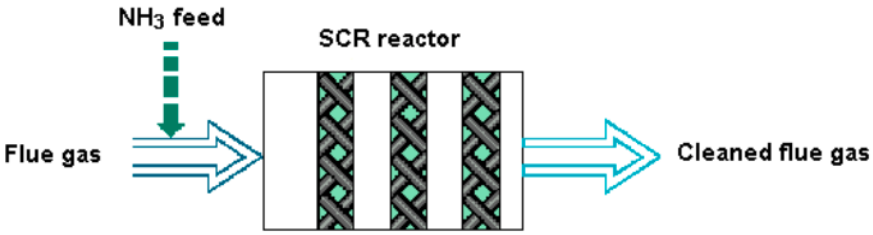


Figure 2.15: Schema di funzionamento di un processo SCR con aggiunta di ammoniaca

RIMOZIONE METALLI PESANTI

Le caratteristiche dei metalli presenti nei fumi sono ovviamente connesse alla tipologia del rifiuto solido; ne consegue che il sistema più efficace per un loro contenimento è la separazione a monte dell'impianto, in particolare per materiali che presentano metalli pesanti quali cadmio, piombo, cromo e mercurio, che, come noto, sono di elevata tossicità. Nel corso della combustione i metalli passano allo stato gassoso per poi ri-condensare nelle sezioni dell'impianto in cui la temperatura si riduce a circa 250°C. Viene così a formarsi un particolato metallico, che in buona parte si deposita su altre particelle solide contenute nella corrente gassosa, soprattutto quelle di più piccola dimensione; di conseguenza la rimozione dei metalli viene di norma condotta unitamente a quella del particolato, sovente con l'ausilio di filtri a maniche. Più complessa è la separazione del mercurio, che si trova presente nell'effluente allo stato gassoso ancora con alte concentrazioni, in quanto caratterizzato da un'elevata volatilità e per il quale è fissato un valore limite nella direttiva sull'incenerimento dei rifiuti di 0,05 mg/m^3.

RIMOZIONE COMPOSTI ORGANO-CLORURATI

I composti organo-clorurati sono sostanze organiche in forma alogenata quali clorobenzene, clorofenoli, policlorodibenzodiossine (abbreviate con la sigla PCDD e note solitamente con il nome di "diossine"), policlorodibenzofurani (PCDF, note anche come "furani"), tutte caratterizzate da elevata tossicità per l'uomo. Le molecole di PCDD e PCDF sono entrambe formate da due anelli benzenici uniti rispettivamente da due atomi di ossigeno e da un solo atomo di ossigeno (Figura n.2.16).

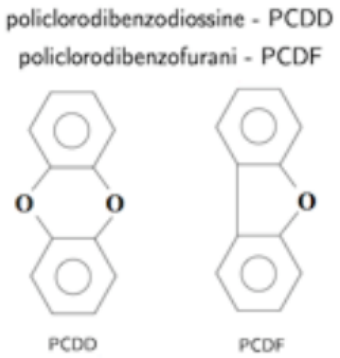


Figure 2.16: Composti organo-clorurati

La presenza di diossine e furani nei gas degli impianti di termodistruzione dei rifiuti è dovuta a meccanismi non ancora completamente chiariti. Le ipotesi che trovano maggior credito sono le seguenti:

- La prima prevede che essi siano presenti già originariamente nei rifiuti e non vengano eliminati con il processo di combustione;
- la seconda ritiene che i PCDD ed i PCDF si formino nei corso della combustione a partire da precursori contenenti cloro (quali clorofenoli o policlorobifenili);
- la terza ipotesi considera che le suddette sostanze si formino in processi di sintesi chimica, a partire da sostanze organiche e composti del cloro più semplici;
- la quarta ipotesi prevede la formazione di PCDD e PCDF a seguito di processi di sintesi, a valle della camera di combustione, in condizioni di temperatura più basse ($300 \div 400C$) di quelle che si determinano nei forno ed in presenza di vapore

d'acqua, ossigeno, HCl e di alcune specie metalliche (in particolare, rame) che catalizzano il processo.

Per esprimere la presenza di diossine, nei riguardi della potenziale tossicità, con un parametro univoco si è introdotto il fattore di tossicità equivalente (TEF) che rapporta la tossicità del singolo congenere a quella del congenere preso a riferimento (2,3,7,8 TCDD) al quale è attribuito un valore di TEF unitario. Le concentrazioni complessive si esprimono in unità di tossicità equivalente (TEQ).

Per quanto concerne l'abbattimento dei composti organo-clorurati, si sottolinea che la loro formazione può essere contenuta già nella camera di combustione, conducendo il processo ad alte temperature ($900 \div 950C$) con rilevanti tenori di ossigeno ed elevata turbolenza. La presenza di una camera di post-combustione, peraltro prevista dalla normativa, con temperature dei fumi di 1050°C e tempo di residenza di 2 secondi svolge un ruolo fondamentale nella pressoché totale decomposizione di tali inquinanti. Le tecniche di rimozione dei composti organo-clorurati è strettamente legata alla forma in cui essi sono presenti nella corrente gassosa: nel caso di un inceneritore per RSU si può ritenere che il $60 \div 80\%$ dei PCDD e PCDF sia contenuto allo stato di gas o vapore mentre la rimanente aliquota si accompagna allo stato solido al particolato. La frazione solida di PCDD e PCDF viene controllata mediante i sistemi per l'abbattimento del particolato, in particolare quelli efficaci per la rimozione delle particelle più fini. La frazione allo stato gassoso viene catturata invece utilizzando la tecnica della riduzione catalitica SCR, tuttavia in questo caso il sistema SCR deve essere progettato di conseguenza, in quanto richiede di solito un sistema più grande e multistrato rispetto a quelli che devono assolvere la semplice funzione di rimozione degli NO_x. Tutti i sistemi citati, in presenza di buona combustione, garantiscono, in genere, concentrazioni di composti organo-clorurati inferiori ai limiti fissati dalla normativa.

2.2.4 Recupero energetico

Il recupero di energia dall'incenerimento si ottiene mediante il raffreddamento dei fumi, già necessario per il loro successivo trattamento. Il recupero avviene sotto forma di produzione di energia elettrica e/o termica, ottenuta attraverso l'impiego del vapore generato in un'apposita caldaia, concettualmente costituita da uno scambiatore di calore. Lo schema impiantistico è del tutto simile a quello tipico delle centrali termoelettriche, anche se le condizioni operative (pressione, temperatura) sono assai meno severe, a causa della presenza nei fumi di composti corrosivi e di ceneri trascinate che possono dare luogo a fenomeni di corrosione e erosione, nonché alla formazione di depositi di materiale sulle pareti di scambio termico [Fonte: Libro Bianco sull'incenerimento dei rifiuti, 2020]. Il vapore prodotto dalla combustione può essere utilizzato:

- per la produzione di energia elettrica mediante espansione del vapore in turbina con ciclo a condensazione (solo elettricità);
- per la produzione combinata di energia elettrica e termica (cogenerazione).

Il rendimento di produzione di energia (ovvero il rapporto tra la quantità di energia utile prodotta e la quantità di energia contenuta nel rifiuto, ovvero il suo potere calorifico) è molto variabile nei diversi assetti di funzionamento. In particolare, nel caso di assetto "solo elettrico" il rendimento energetico lordo può raggiungere un valore prossimo o di poco superiore al 30% [Fonte: ATO-R/Politecnico di Torino 2009; ATO- R/Politecnico di Torino 2010]. Nel caso di assetto cogenerativo il rendimento energetico lordo può raggiungere o superare il 70% (circa 20% elettrico e 50% termico) [Fonte:ATO-R/Politecnico di Torino 2009; ATO-R/Politecnico di Torino. 2010]. Gli sviluppi tecnologici più recenti consentono di incrementare ulteriormente questi livelli di efficienza, attraverso il ricorso a:

- condensazione dei fumi, per recuperare anche il calore latente di condensazione dell'umidità in essi contenuta (si tratta in sostanza dello stesso principio di funzionamento delle caldaie a condensazione per uso domestico);
- sistemi di trigenerazione, ovvero generazione di elettricità, calore e freddo, mediante l'integrazione di sistemi a pompa di calore.

2.2.5 Frazioni residue

I residui solidi derivanti dal processo di combustione e depurazione dei fumi sono:

- Scorie (ceneri pesanti) e ferrosi $\longrightarrow$ le cui caratteristiche e quantitativi sono strettamente correlate al processo di trattamento e alla tipologia del rifiuto in ingresso. Gli impianti di incenerimento dei rifiuti urbani presenti in Europa producono tipicamente 150 - 250 kg di ceneri pesanti per tonnellata di rifiuto trattato;
- le ceneri volanti $\longrightarrow$ rimosse attraverso il sistema di trattamento dei fumi, di norma smaltite in discariche per rifiuti pericolosi.

Vi sono poi i sali dai trattamenti di depurazione dei fumi, le cui caratteristiche dipendono dal tipo di reagente utilizzato. Si tratta generalmente di rifiuti pericolosi che possono essere smaltiti in discariche apposite o anche avviati a processi di recupero. La possibilità di riutilizzo o di riciclaggio dei residui solidi è determinata fondamentalmente dalle loro caratteristiche in termini di contenuto di sostanze organiche e di lisciviabilità di metalli e sali [Fonte: Libro Bianco sull'incenerimento dei rifiuti, 2020].

Le scorie sono convogliate tramite trasportatori meccanici ad un sistema di stoccaggio in attesa del destino finale (smaltimento o recupero). Da tempo si tenta tuttavia di trovare una forma di utilizzazione almeno per le ceneri pesanti allo scopo di recuperane le frazioni ancora utilizzabili e di ridurre le spese di smaltimento definitivo. Dopo una deferrizzazione grossolana l'impiego più comune del residuo è come inerte per costruzioni stradali, potendo costituire un sottofondo con buone capacità drenanti e meccaniche. Inoltre le ceneri pesanti, essendo sostanzialmente formate da ossidi di metalli, possono essere considerate come materie prime per la preparazione di vetri.

2.3 Gassificazione

La gassificazione è un processo di ossidazione parziale in difetto di ossigeno (Figura n.2.17). Al contrario della combustione, infatti, nella quale l'ossidazione viene condotta con un eccesso di comburente rispetto al valore stechiometrico, la gassificazione viene condotta con quantitativi di agente ossidante (aria, aria arricchita con ossigeno o ossigeno puro) inferiore a quello stechiometrico. Grazie all'immissione di ossigeno in misura ridotta, si innesca un processo di ossidazione incompleta degli elementi da bruciare, i cui prodotti sono costituiti essenzialmente da:

- una corrente gassosa (gas derivato o syngas), costituente il prodotto principale e formato da monossido di carbonio e idrogeno (più di 85% in volume) e minori quantità di anidride carbonica e metano, che può contenere frazioni condensabili ("tar") a temperatura ambiente;
- un residuo solido costituito dagli inerti e dalla frazione organica non convertita ("char").

Dopo essere stata raffreddata e depurata, la corrente gassosa può essere utilizzata in motori a combustione interna per la produzione di energia elettrica o vapore e, mescolata con l'aria, nei motori a benzina o diesel lievemente modificati all'uopo.

A seconda di come viene condotto il processo di gassificazione, si ottiene un gas con caratteristiche differenti: l'ossidazione parziale con aria produce un gas che è diluito dall'azoto atmosferico e che presenta un potere calorifico che varia da $4 \div 8 MJ/Nm^3$ [Fonte: ATOR - Verifica della fattibilità di un impianto di trattamento termico dei rifiuti a tecnologia innovativa nella Provincia di Torino, 2009]. Se invece si conduce il processo per mezzo di un'ossidazione parziale con ossigeno si ricava un syngas libero da azoto e quindi con un più alto potere calorifico, generalmente compreso tra 8 e 14 MJ/Nm^3 [Fonte: ATOR - Verifica della fattibilità di un impianto di trattamento termico dei rifiuti a tecnologia innovativa nella Provincia di Torino, 2009]. La gassificazione con vapore produce infine un gas libero da azoto che ha tipicamente un potere calorifico che varia nell'intervallo di $14 \div 20 MJ/Nm^3$. Il processo in questo caso non prevede reazioni di ossidazione esotermiche e necessita pertanto di una sorgente esterna che fornisca il calore necessario alle reazioni endotermiche di gassificazione [Fonte: ATOR - Verifica

della fattibilità di un impianto di trattamento termico dei rifiuti a tecnologia innovativa nella Provincia di Torino, 2009].

Attualmente i migliori risultati nell'applicazione del processo di gassificazione sono stati ottenuti su rifiuti aventi caratteristiche piuttosto omogenee; per tale ragione nel caso di RU si preferisce applicarla ad un combustibile derivato (CDR) ovvero ad un rifiuto che ha subito dei pretrattamenti.

Per quanto concerne le diverse tipologie di apparecchiature adottate è possibile, in linea generale, raggruppare le varie configurazioni impiantistiche in:

- reattori a letto fisso contro-corrente;
- reattori a letto fisso equi-corrente;
- reattori a letto fluido;
- reattori a letto mobile.

In generale, gli impianti di gassificazione sono caratterizzati da:

- minori quantitativi di fumi prodotti rispetto agli inceneritori tradizionali;
- formazione predominante di CO anziché CO_2;
- utilizzo del materiale e dell'energia del gas di sintesi.

Tuttavia, il processo di gassificazione presenta i seguenti svantaggi:

- necessità di pretrattamenti;
- elevate pressioni di esercizio (in alcuni processi);
- accumulo di residui solidi come scorie;
- nella gassificazione ad alta temperatura (oltre 1000°C) si possono formare notevoli quantità di ossidi di azoto, che quindi dovranno essere successivamente eliminati, determinando un incremento dei costi per la depurazione fumi;
- in caso di gassificazione incompleta, cioè con formazione di residuo solido ancora combustibile, può darsi che non risultino soddisfatti i requisiti per lo smaltimento di tale rifiuto in discarica, rendendosi necessario un successivo trattamento, presumibilmente di combustione;

- presenza di particolato, gas acidi (HCl, H_2S) e alcalini (NH_3), nonché di idrocarburi pesanti condensabili (TAR). Questi ultimi danno origine a depositi oleosi già a 250-300°C, determinando problemi di sporcamento delle superfici.

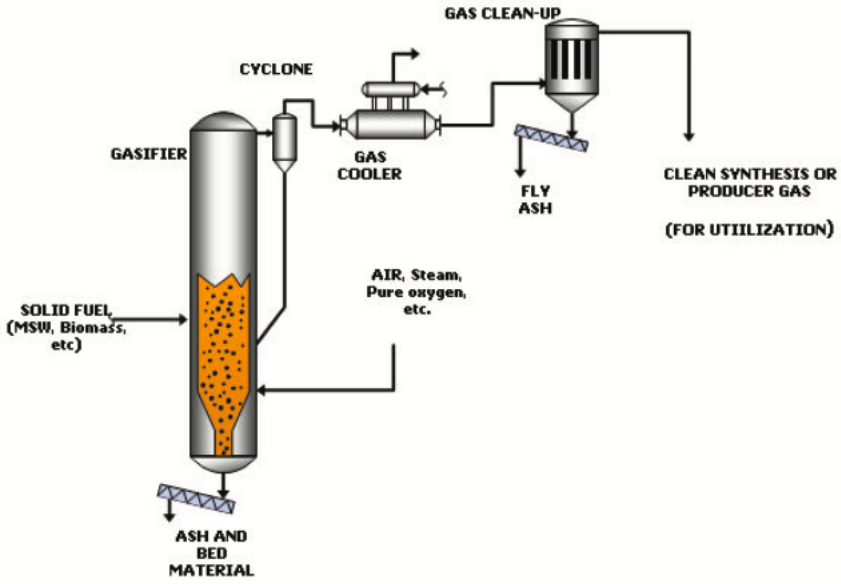


Figure 2.17: Schema di un impianto di gassificazione [Fonte:www.regione.vda.it]

2.4 Pirolisi

Anche la pirolisi, come l'incenerimento, ha origini molto lontane; infatti è una tecnica che risale ai primi anni del '900, tempi in cui si prestava come valida alternativa all'incenerimento per affrontare il problema dello smaltimento dei rifiuti solidi urbani.

La tecnologia della pirolisi (Figura n.2.18) è definita come una degradazione termica in assenza di ossigeno; il processo è complessivamente endotermico e richiede pertanto apporto di calore dall'esterno, in genere ottenuto attraverso la combustione di parte dei prodotti ottenuti, con particolare riguardo alla frazione gassosa. E' un processo che, per mezzo della decomposizione termica, spezza le molecole complesse delle sostanze organiche in elementi semplici e separati, costituiti generalmente da:

- 15-30% in peso del prodotto iniziale di frazione gassosa (percentuale crescente con la temperatura), contenente H_2, CO, CO_2 e idrocarburi leggeri (gas di pirolisi);
- 50-60% in peso di liquido, ottenibile dalla condensazione della fase vapore, costituito da sostanze organiche quali alcoli, idrocarburi condensabili e un elevato tenore di acqua (60-80%).
- 20-30% in peso del materiale iniziale da residui solidi ancora combustibili contenenti sostanze a base carboniosa (char); presentano un potere calorifico mediamente compreso tra 5000 e 6000 kcal/kg.

Le diverse condizioni operative attraverso le quali viene condotto il processo di pirolisi vengono principalmente individuate mediante il tempo di permanenza del materiale nelle condizioni caratteristiche del trattamento. Ciò consente di classificare tale processo secondo le seguenti categorie:

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

come combustibili o materia prima per l'industria chimica.

I prodotti di pirolisi possono avere diversi impieghi, in funzione del tipo di materiale trattato, anche se per il trattamento di rifiuti l'utilizzo più frequente è l'impiego come combustibile per la produzione di energia. Le caratteristiche dei materiali ottenuti e le loro quantità relative dipendono, oltre che dal tipo di materiale trattato, dalle condizioni operative con le quali viene condotta la pirolisi, in particolare la temperatura ed il tempo di esposizione del materiale a tale trattamento. Tempi lunghi di esposizione a temperature moderate favoriscono la produzione di char, mentre un'esposizione limitata a temperature medio - alte massimizza la produzione delle frazioni liquide [Fonte: ATOR - Verifica della fattibilità di un impianto di trattamento termico dei rifiuti a tecnologia innovativa nella Provincia di Torino, 2009].

Per quanto riguarda l'impianto, il suo funzionamento coinvolge diverse fasi. Prima di tutto, il materiale di alimentazione viene condotto all'ingresso del reattore di pirolisi attraverso sistemi che impediscano all'aria esterna di entrare. Il reattore è essenzialmente costituito da un cilindro in acciaio refrattario capace di sopportare temperature di 1100°C, con all'interno un sistema di coclee in grado di attuare un rimescolamento ed una movimentazione efficace del materiale; la temperature del processo è di circa $500 \div 600$°C. La camera di combustione è invece la sede in cui si brucia parte dei gas di pirolisi; la temperatura di combustione è di 1400°C ed è tale da assicurare un tempo di permanenza dei fumi di oltre tre secondi. Alla camera di combustione viene associato un forno rotativo, atto alla combustione del carbone ed alla vetrificazione della frazione solida. Le alte temperature, sviluppate dalla combustione nel forno vetrificatore, bruciano la parte organica, contenuta nel materiale solido uscente dalla pirolisi, e fondono la parte inorganica. Il materiale inerte vetroso, in uscita dal forno vetrificatore, invece viene raccolto in una vasca d'acqua dove si raffredda e da lì, mediante un trasportatore, viene depositato nel luogo di raccolta del materiale inerte vetrificato. I fumi della combustione passano all'interno dell'involucro del reattore, riscaldando dall'esterno il reattore stesso, cedendo così l'energia necessaria per la realizzazione del processo di pirolisi, senza entrare a contatto con il materiale posto al suo interno. La caldaia per la produzione di vapore sfrutta l'energia termica contenuta nei fumi per la produzione di vapore surriscaldato. L'impianto è poi dotato di un sistema di trattamento dei fumi, per abbattere le eventuali emissioni inquinanti

presenti nel flusso. I fumi caldi, in uscita dal reattore di pirolisi, hanno ancora un valore energetico considerevole e dunque questi prodotti possono essere utilizzati come fonte di energia termica per alimentare caldaie a recupero per produrre vapore. Il vapore prodotto si può espandere in turbine a vapore, allo scopo di produrre energia elettrica.

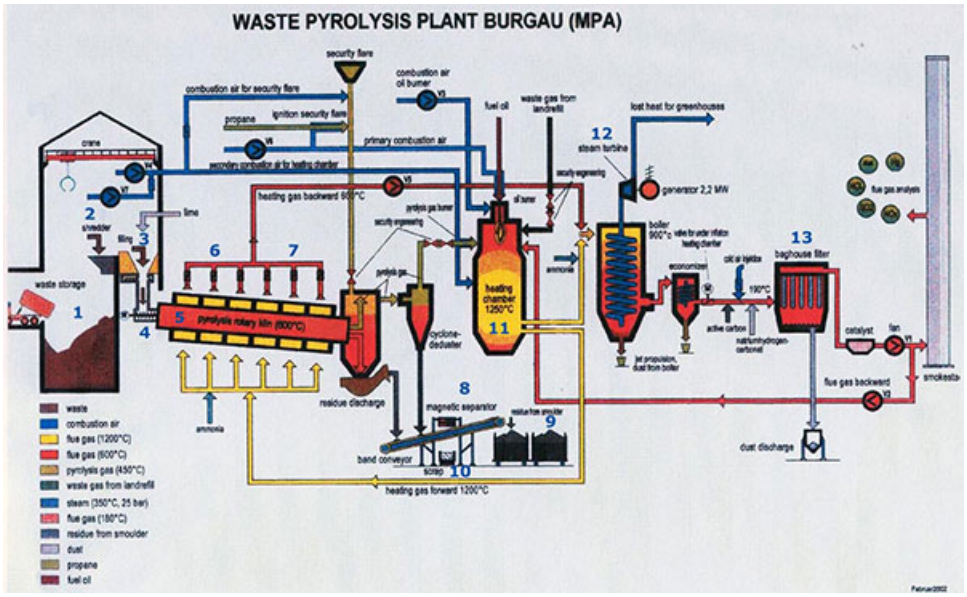


Figure 2.18: Schema di un impianto di pirolisi applicato allo smaltimento rifiuti a Burgau (Germania) [Fonte: ATOR rifiuti].

I vantaggi potenziali dei processi di pirolisi possono includere:

- possibilità di recupero del valore materiale della frazione organica;
- possibilità di aumentare la produzione elettrica utilizzando motori a gas o turbine a gas (al posto delle caldaie a vapore);
- riduzione dei volumi di gas dopo la combustione.

2.5 Tecnologie a confronto

Nel seguente capitolo si riportano le principali differenze del processo di incenerimento rispetto a quelle che vengono denominate "tecnologie innovative", ovvero gassificazione e pirolisi.

Per prima cosa a livello generale si ripota la Tabella 2.5 dove sono riassunte le differenze fra questi processi relativamente a: scopo del processo, condizioni di esercizio (ambiente di reazione, temperatura, pressione, reagenti), prodotti in uscita e necessità di pretrattamento del gas.

Tabella 2.5 Confronto tra combustione, gassificazione e pirolisi; [Fonte: Arena U. et al., 2009]

	Combustione	Gassificazione	Pirolisi
Scopo del processo	Massimizzare conversione del rifiuto a CO_2 e H_2O (produrre gas effluenti ad alta temperatura)	Massimizzare conversione del rifiuto a CO_2 e H_2 (produrre gas combustibile ad alto potere calorifico)	Massimizzare degradazione termica del rifiuto a gas e fasi condensate
Ambiente di reazione	Ambiente fortemente ossidante (elevati eccessi d'aria)	Ambiente riducente (quantità di ossigeno inferiore a quella stechiometrica)	Assenza di ossigeno
Temperatura	Tra 850°C e 1.200°C	Generalmente superiore a 800°C	Tra 500-800°C
Pressione	Generalmente atmosferica	Generalmente atmosferica ma può anche essere elevata	Leggera sovrapressione

	Combustione	Gassificazione	Pirolisi
Gas reagente	Aria	Aria, ossigeno, anidride carbonica, vapor d'acqua	Nessuno (si usa azoto o parte del gas prodotto)
Gas prodotti	CO_2, H_2O	CO, H_2, CO_2, H_2O, CH_4	CO, H_2, CH_4 e in genere C_nH_m
Inquinanti	SO_2, NO_x, HCl	H_2S, HCl, NH_3, HCN, tar	H_2S, HCl, NH_3, HCN, tar
Ceneri	Generalmente secche (materiale minerale convertito a ceneri di fondo e ceneri volanti) trattate e smaltite come rifiuti speciali	Ceneri di fondo, se vetrose, adatte per utilizzo nei materiali di costruzione. Ceneri volanti trattate e smaltite come rifiuti speciali	Spesso con contenuto di carbonio non trascurabile, trattate e smaltite come rifiuti speciali
Trattamento dei gas	Gas effluenti trattati e poi emessi in atmosfera	Possibilità di trattare i gas di sintesi per produrre chemicals o energia (con successiva emissione in atmosfera)	Possibilità di trattare i gas di sintesi per produrre chemicals o energia (con successiva emissione in atmosfera)

2.5.1 Recupero Energetico

Negli impianti di incenerimento il calore sviluppato durante la combustione dei rifiuti viene recuperato e utilizzato per produrre vapore, poi utilizzato per la produzione di elettricità o come vettore di calore per il teleriscaldamento. Il rendimento di tali impianti è per ovvie ragioni molto minore di quello di una normale centrale elettrica, poiché i rifiuti non sono un sufficiente combustibile a causa del loro basso potere calorifico. Come già evidenziato, talvolta per aumentare l'efficienza della combustione insieme ai rifiuti viene bruciato anche del gas metano. L'efficienza energetica di un inceneritore è variabile tra il 19 e il 27% se si recupera solo l'energia elettrica, ma aumenta significativamente grazie al recupero del calore (cogenerazione) con un rendimento energetico lordo che può raggiungere o superare il 70% (circa 20% elettrico e 50% termico). A titolo di confronto una moderna centrale termoelettrica a ciclo combinato, il cui scopo primario è ovviamente quello di produrre elettricità, ha una resa del 57% per la produzione elettrica, che se abbinata al teleriscaldamento raggiunge l'87%.

Volendo effettuare un confronto fra questi rendimenti e quelli derivanti dall'utilizzo di processi innovativi, per prima cosa è necessario sottolineare che le differenze sono determinate dal tipo di impianto, ma anche dal fatto che, mentre in un inceneritore i rifiuti vengono direttamente bruciati ed il calore viene usato per produrre vapore, negli impianti di gassificazione/pirolisi i rifiuti vengono invece convertiti parzialmente in gas (syngas) che può essere poi utilizzato in cicli termodinamici più efficienti, come ad esempio un ciclo combinato.

Gli impianti di gassificazione e pirolisi consentono una produzione lorda di energia elettrica confrontabile con quella di un inceneritore tradizionale: la soluzione più praticata è infatti la combustione diretta del syngas e la produzione di energia elettrica tramite un ciclo termico a vapore, come avviene in un tradizionale impianto di combustione diretta dei rifiuti. L'utilizzo del syngas in un ciclo a vapore (conversione di tipo termico) consente di ottenere efficienze nette di generazione elettrica variabili tra il 10% e il 20%. La produzione di calore, in aggiunta alla generazione dell'elettricità, migliora significativamente il rendimento energetico generale del sistema. Utilizzando il syngas, previa depurazione, come combustibile in un motore a gas dedicato o in

una turbina a gas si assiste ad un significativo incremento dei rendimenti energetici (fino a raggiungere valori del 30%); tuttavia tali soluzioni non trovano al momento applicazione su scala commerciale nell'ambito del trattamento termico del rifiuto indifferenziato. Nella Tabella che segue si riportano i rendimenti netti di generazione elettrica potenzialmente ottenibili con i vari sistemi di recupero energetico per le tecnologie innovative e gli inceneritori di nuova generazione.

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.		

Figure 2.19: Efficienze nette di generazione elettrica - Confronto tra tecnologie alternative e incenerimento [Fonte: ATOR - Verifica della fattibilità di un impianto di trattamento termico dei rifiuti a tecnologia innovativa nella Provincia di Torino, 2009].

Va tuttavia sottolineato che gli impianti a tecnologia innovativa presentano in generale autoconsumi più elevati rispetto ad un inceneritore per il fatto che necessitano di un sistema di pretrattamento più o meno complesso del rifiuto in ingresso. L'autoconsumo inoltre cresce sensibilmente per gli impianti ad alta temperatura con fusione delle scorie e/o utilizzo di ossigeno puro come agente gassificante raggiungendo il $30 \div 40\%$ della produzione; lo stesso processo di depurazione del syngas contribuisce in maniera significativa all'incremento dell'autoconsumo energetico dell'impianto. Si può pertanto affermare che l'efficienza elettrica netta per gli impianti di gassificazione/pirolisi è in genere inferiore al 20% e dunque più bassa di quella di un moderno inceneritore che è stimabile tra il 19% e il 27% [Fonte: ATOR - Verifica della fattibilità di un impianto di trattamento termico dei rifiuti a tecnologia innovativa nella Provincia di Torino, 2009].

2.5.2 Aspetti Ambientali

Per quanto concerne gli aspetti ambientali, le emissioni in atmosfera rappresentano il punto cardine, dal momento che determinano le maggiori implicazioni ambientali in questi tipi di processi. Prima del loro rilascio in atmosfera infatti i fumi sono sottoposti ad una serie di trattamenti volti alla riduzione delle concentrazioni delle sostanze inquinanti in essi presenti. I processi di trattamento fumi che vengono messi in coda ad un impianto a tecnologia innovativa sono del tutto analoghi a quella adottati negli impianti di incenerimento. Va sottolineato che negli ultimi anni, sia a causa di limiti normativi sempre più restrittivi sia grazie allo sviluppo di sistemi di depurazione sempre più sofisticati (BAT), ad oggi si è in grado di consentire il raggiungimento di valori di emissione molto bassi.

Va innanzitutto precisato che i processi di gassificazione e pirolisi producono volumi di fumi decisamente più contenuti rispetto ad un inceneritore convenzionale a causa delle caratteristiche intrinseche di questi processi, come ad esempio la quantità di ossigeno necessaria a far avvenire la combustione, si ricorda infatti che mentre per un processo di incenerimento si necessita di eccessi d'aria consistenti, le tecniche innovative operano invece in totale assenza di aria o in presenza di quantitativi contenuti di agente ossidante. Inoltre, per quanto riguarda le concentrazioni di sostante inquinanti nell'effluente gassoso si precisa che per gli impianti a tecnologia innovativa si ottengono emissioni ben al di sotto dei limiti normativi, ma sostanzialmente in linea con i moderni inceneritori, in quanto dispongono delle migliori tecniche disponibili.

Entrando nel merito degli inquinanti emessi si rileva innanzitutto che i processi di incenerimento presentano emissione di diossine in quantità superiori rispetto ai processi di gassificazione e pirolisi, ciò è correlato sostanzialmente alle differenti temperature (si veda Tabella n.2.5) di processo, al contenuto di ossigeno ed alla presenza di catalizzatori. Come esposto già in precedenza, la formazione di diossine infatti è correlata fra le altre cose alla presenza di precursori contenenti cloro, alla presenza di vapore d'acqua, ossigeno, HCl e di alcune specie metalliche (in particolare rame) che catalizzano il processo ed infine alle condizioni di temperatura più basse (300-400°C).

Con il processo di incenerimento si determina anche la formazione di NO_x, formazione che può essere scongiurata in un processo di gassificazione che utilizzi come agente

ossidante l'ossigeno puro o il vapor d'acqua, in questi casi infatti si ottiene un syngas libero da azoto. Quando invece si opta per un'ossidazione parziale con aria si ottiene un gas che è diluito dall'azoto atmosferico con conseguente formazione di ossidi di azoto.

Per quanto riguarda infine la generazione dei gas acidi non si rileva una sostanziale differenza nella loro produzione a seconda della tecnologia adottata. La loro presenza nei fumi infatti è determinata dalla composizione del rifiuto in ingresso ed ai sistemi di trattamento dei fumi scelti (processi ad umido, processi a semisecco, processi a secco, carboni attivi, additivi nella camera di combustione).

Nella Tabella che segue (Tabella n.2.20) si riassumono le caratteristiche emissive per queste tre tipologie di trattamenti termici.

	Unità di misura	PYR/GAS	PIR/GAS	PIR	GAS	GAS	GAS	PYR	PYR	PYR	COMB	COMB	2000/76/CE
Polveri	mg/Nm^3	<2	2	1	0,01	0,2	0,24	<0,05	<1	<0,5	<1	<1	10
SO_2	mg/Nm^3	<6	<1	20	17	<1	19,8	<0,7	<5	<1,5	20	<5	50
NO_x	mg/Nm^3	<45	<37	167	128	<10	42	<70	<10	<50	<200	<80	200
CO	mg/Nm^3	<6	<2	<10	0,1	<3	<2	<2,3	<5	<8	<5	<10	50
HCl	mg/Nm^3	<1,5	2	5	1,2	<0,2	3,61	<0,5	<0,5	<0,5	7	<1	10
HF	mg/Nm^3	<0,15	<0,1	-	0,0082	<0,1	<0,09	<0,05	<0,1	<0,1	<0,2	<0,1	1
TOC	mg/Nm^3	<1.5	<1	1,6	1	2	<0,2	<1	1	<0,5	<3	<2	10
Hg	mg/Nm^3	<0,01	0,006	0,011	0,0001	0,007	0,00327	0,006	<0,006	<0,001	0,004	<0,001	0,05
Cd/Tl	mg/Nm^3	0,0002	0,006	0,006	0,001	<0,002	0,00002	<0,002	<0,0035	<0,001	<0,001	<0,001	0,05
Metalli pesanti	mg/Nm^3	0,01	0,006	0,054	0,024	<0,04	0,00256	<0,05	<0,04	<0,006	<0,2	<0,05	0,5
PCDD/F	ng $ITEQ/Nm^3$	0,0005	<0,003	0,001	0,0009	<0,02	0,0008	<0,005	<0,01	<0,01	0,03	<0,05	0,1

Figure 2.20: Caratteristiche ambientali dei principali sistemi di trattamento termico [Fonte: Fichtner, 2004; Arena e Mastellone, 2010; Limerick-Clare-Kerry, Waste Management Plan, 2005]. Tutti i processi utilizzano per il recupero energetico un ciclo a vapore. Tutte le concentrazioni sono riferite ad un gas secco con un contenuto di O_2 pari all'11%. PYR sta per pirolisi, GAS per gassificazione, COM per combustione.

Sulla base dei dati riportati e delle considerazioni appena fatte emerge che l'utilizzo di tecnologie innovative per il trattamento dei rifiuti determina oltre che un minor volume di fumi generato, anche emissioni di inquinanti inferiori rispetto alla tradizionale combustione.

Va tuttavia specificato che questi tipi di impianti presentano maggiori vincoli sul tipo di alimentazione, che come si è detto deve subire processi di pretrattamento e deve presentare alcune precise caratteristiche; per esempio se il materiale da trattare è umido e/o possiede un elevato contenuto di sostanze non combustibili si avranno svantaggi in termini di rendimento energetico. Ci sono poi restrizioni anche in merito alla qualità del syngas, il quale deve presentare un grado di pulizia sempre crescente a seconda che

si voglia impiegare in caldaie combinate con turbine a vapore o in turbine a gas. Infatti il principale ostacolo tecnologico all'utilizzo del syngas prodotto attraverso processi di pirolisi/gassificazione in sistemi ad alto rendimento, quale un ciclo combinato o un motore endotermico, è la pulizia del syngas dai contaminanti in esso contenuti. La depurazione del syngas, però, oltre a costituire una complicazione di carattere operativo-gestionale, determina un impoverimento del contenuto energetico del gas, sia in termini di calore sensibile (raffreddamento), che di potere calorifico (rimozione del TAR). Infatti, tra i principali contaminanti presenti nel syngas, particolare importanza rivestono le particelle solide trascinate, i gas acidi (HCl, H_2S, acidi organici) ed alcalini (NH_3) ed il TAR, costituito da un complesso di idrocarburi pesanti condensabili. Quest'ultimo, in particolare, può formare depositi viscosi di sostanze oleose e polveri, a seguito del raffreddamento del gas già a temperature intorno ai 250-300°C, con conseguenti problemi di sporcamento e di intasamento delle superfici e degli organi meccanici. Le tecnologie per la rimozione dei tar dal syngas sono essenzialmente di tipo chimico (cracking termico o catalitico) o fisico (cicloni, scrubber, filtri ceramici, filtri a maniche o elettrostatici, e metodi ad adsorbimento). Sono tutti processi già in grado di offrire buone prestazioni, ma presentano due grossi svantaggi: costi di investimento e di esercizio elevati e perdita dell'energia chimica dei tar eliminati (ad alto tenore di carbonio ed idrogeno) [Fonte: ATOR - Verifica della fattibilità di un impianto di trattamento termico dei rifiuti a tecnologia innovativa nella Provincia di Torino, 2009].

Chapter 3

La CO_2 derivante da incenerimento

3.1 Introduzione e premessa metodologica

Il bilancio GHG (Greenhouse Gases) riferito agli impianti di termovalorizzazione ha lo scopo di determinare il loro contributo in termini di produzione di gas serra considerando da un lato le emissioni dirette prodotte dalla combustione dei rifiuti e dall'altro le emissioni evitate grazie al recupero di energia effettuato in tali impianti e dallo smaltimento dei medesimi quantitativi di rifiuti inceneriti in discarica (unica alternativa possibile seppur ultima nella gerarchia comunitaria di gestione dei rifiuti). Ai fini dei calcoli di seguito riportati, per emissioni dirette ed evitate si intende:

- emissioni dirette: emissioni di CO_2 di origine fossile, di N_2O e CH_4 derivanti direttamente dal processo di combustione (ovvero le emissioni al camino, determinate dal processo di combustione dei rifiuti);
- emissioni evitate: emissioni costituite complessivamente da due contributi: le emissioni di CO_{2eq} determinate dalla energia elettrica e termica prodotte dal termovalorizzatore attraverso una diversa tipologia impiantistica.

Lo studio di seguito proposto ha come obiettivo la valutazione delle emissioni di CO_2 derivanti da incenerimento circoscritta alle regioni del Nord Italia (eccezion fatta per la Liguria sul cui territorio non sono presenti impianti di termovalorizzazione). In particolare si è preso a riferimento un impianto tipico per regione ed una composizione

merceologica afferente all'anno 2019. E' importante sottolineare che le caratteristiche merceologiche del rifiuto sono soggette a variazioni temporali, dettate dai modelli di consumo e dallo sviluppo di materiali e beni, e presentano differenze territoriali legate al substrato sociale, alla tipologia del centro abitato e così via.

Proprio per tali ragioni, per prima cosa, sono stati raccolti i dati delle diverse composizioni merceologiche regione per regione, ottenute grazie alla collaborazione degli impianti di seguito citati e delle Arpae operanti sul territorio di riferimento che hanno condiviso le proprie analisi merceologiche. Successivamente, dalla loro elaborazione se ne è ricavato il quantitativo di carbonio ivi presente e quindi la corrispondente quota emissiva, in termini di CO_2, a seguito dell'incenerimento. Si sono infine ottenuti i fattori di emissione espressi in termini di t_{CO_2}/t_{RSU} e t_{CO_2}/MWh, che rappresentano rispettivamente la quantità di anidride carbonica sviluppata per tonnellata di rifiuto in ingresso all'inceneritore e la quantità di anidride carbonica sviluppata per MWh prodotto. Questi due fattori costituiscono i termini di paragone tra regioni a livello emissivo e di prestazioni ambientali ed impiantistiche.

3.1.1 Definizione della CO_2 biogenica

Per prima cosa è bene definire cosa si intende per CO_2 biogenica: essa è la CO_2 prodotta dal trattamento di fine vita delle biomasse e compensata dalla CO_2 assorbita nella fase di accrescimento vegetativo. Per tale ragione spesso si usa adottare la semplificazione in base alla quale il ciclo della CO_2 biogenica è nullo.

Per quanto riguarda specificatamente la termovalorizzazione ed in particolare la stima delle emissioni dirette di CO_2 che derivano dalla combustione dei rifiuti, si deve tener conto che essi sono composti sia da materiale misto di origine fossile (quale la plastica) che da materiale di origine biologico (quali legno, carta e cartone, frazione umida, ecc.). La quota di energia prodotta dalla combustione della frazione biologica, ovvero rinnovabile, all'interno della miscela di rifiuti avviati a un termovalorizzatore è considerata energia verde in quanto in tal caso come è noto, e scientificamente riconosciuto, si assume che l'anidride carbonica derivante dalla combustione del carbonio organico non contribuisce all'effetto serra e non deve quindi essere considerata nel calcolo delle emissioni di CO_2 (ciclo biogeochimico del carbonio).

Detto questo, tuttavia nel presente studio non si è tenuto conto di tale distinzione per diversi motivi. Innanzitutto il lavoro di seguito riportato è finalizzato ad un bilancio del carbonio, con l'intento di quantificare l'ammontare della CO_2 totale prodotta nelle diverse regioni del Nord Italia e non ad un'analisi LCA. In secondo luogo, dal momento che si vuole procedere ad una comparazione tra diversi sistemi di gestione dei RSU (nel successivo capitolo per esempio si valuterà la convenienza o meno, in termini di quote emissive di CO_2, di un pretrattamento del rifiuto, quale TMB, a monte dell'incenerimento), non è possibile differenziare la CO_2 di origine fossile da quella biogenica. Nel caso dei TMB infatti non si hanno emissioni solo di CO_2, ma anche di metano e come è noto, l'emissione di 1 kg di metano ha un potenziale serra 23 volte superiore a quello di 1 kg di CO_2, pertanto l'ipotesi di neutralità non è accettabile.

Ai punti sopra citati si aggiungono anche alcune considerazioni pratiche, infatti gli impianti di termovalorizzazione non effettuano una distinzione dei rifiuti in tal senso, in quanto tale concetto di distinzione è stato nel tempo superato, poichè di difficile attuazione nella pratica operativa.

In ultima analisi, non effettuando una distinzione tra la CO_2 di origine fossile e quella biogenica, il lavoro assume una posizione cautelativa (e dunque peggiorativa) nel bilancio finale di CO_2.

3.2 La CO_2 nel Nord Italia da incenerimento

PIEMONTE

Per il Piemonte si è preso a riferimento l'impianto TRM S.p.A. (Trattamento Rifiuti Metropolitani), unico termovalorizzatore attivo sul territorio (Figura n.3.1). Il termovalorizzatore TRM tratta esclusivamente rifiuti solidi urbani residui da raccolta differenziata (RSU) e rifiuti speciali assimilabili agli urbani (RSA). Grazie alla sua posizione centrale (località Gerbido), i rifiuti urbani bruciati provengono non solo dalla Città di Torino ma anche da molti comuni della Città Metropolitana, quali Grugliasco, Beinasco, Orbassano, Nichelino, Rivoli, Rivalta e Collegno (Figura n.3.2). L'impianto è dotato di un'area di recupero energetico; sebbene sia stato progettato per lavorare in assetto cogenerativo, al momento si ha solo un recupero dell'energia elettrica.

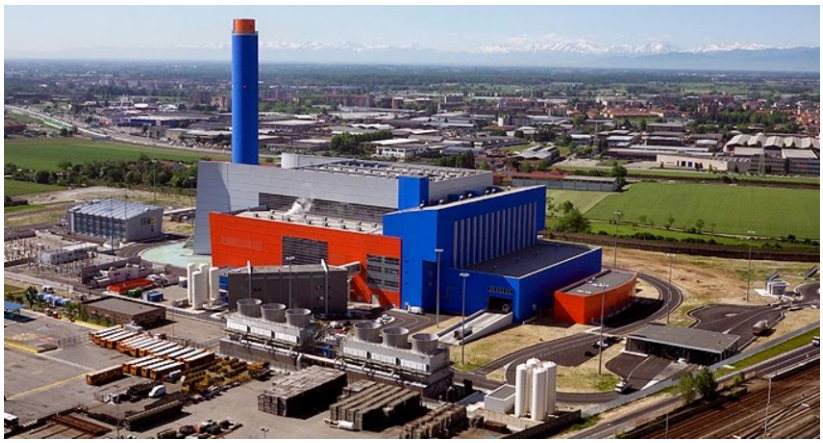


Figure 3.1: TRM - termovalorizzatore del Gerbido [Fonte: trm.to.it]

L'impianto risulta particolarmente innovativo, specie nel suo radicato impegno al rispetto ambientale, a tale scopo infatti la provincia di Torino incaricò una commissione speciale per individuare le tecnologie più idonee, secondo i criteri delle BAT.

Nella Tabella sottostante viene riportata la composizione merceologica del rifiuto indifferenziato della città di Torino, derivante da un'analisi effettuata in data 04/07/2019 (Allegato a pagina 159). In tabella 3.1 viene anche riportato il quantitativo di Carbonio espresso in percentuale.

Figure 3.2: Posizione del termovalorizzatore

Tabella 3.1 Composizione merceologica e percentuale di Carbonio

Frazione merceologica	% sul RUR	% di Carbonio tal quale
Carta	5,3	45%
Cartone	16,7	44%
Tessili	16	52%
Legno	2,2	50%
Plastica	17	62%
Vetro ed inerti	7,3	3%
Metalli	3	5%
Organico domestico	18,3	48%
Sfalci e potature	10	47%
Sottovaglio	4,2	26%

Considerando la composizione merceologica sopra specificata ne deriva che la percentuale di carbonio sul totale dei rifiuti corrisponde al %C = 45%. Il contenuto totale di carbonio sarà dunque dato dalla seguente equazione:

$$C = Q_{RSU} \cdot \%C \tag{3.1}$$

Essendo la portata di rifiuti pari a 562.270 t/a (Tabella 3.4.5 - Capitolo 1 pagina 20) se ne ricava una quantità di C totale pari a 253.021,5 t/a.

E' bene sottolineare che in una combustione efficiente, il carbonio organico viene pressoché totalmente convertito in anidride carbonica. Viceversa, la presenza di CO nei fumi rappresenta una misura di inefficienza della combustione. L'efficienza della combustione in fase gas E_c (%) può infatti essere misurata come segue:

$$E_c = \frac{CO_2}{CO_2 + CO} \cdot 100$$

La determinazione viene effettuata tramite misura e registrazione in continuo di CO e CO_2 in uscita dalla camera di post-combustione. Per un'efficiente combustione è richiesto di norma che $E_c \geq 99,9\%$.

Ne consegue che è del tutto ragionevole assumere che tutto il carbonio presente nei rifiuti si ossidi a CO_2 (combustione completa) e che dunque solo una minima parte si ossidi a CO.

Pertanto, il quantitativo di anidride carbonica sviluppata sarà pari a:

$$CO_{2,RSU} = \frac{C_{RSU} \cdot PM_{CO_2}}{PM_C}$$

Da cui deriva $CO_{2,RSU} = 927.745,5 t/a$.

Successivamente è possibile calcolare il cosiddetto fattore di emissione, ovvero la quantità di anidride carbonica che si sviluppa per ogni tonnellata di rifiuto in ingresso tCO_2/t_{RSU}, pari a:

$$CO_{2,RSU} = \frac{C_{RSU} \cdot PM_{CO_2}}{Q_{RSU} \cdot PM_C} = 1,65$$

Per ciò che riguarda la definizione del secondo parametro di confronto, ovvero le tCO2/MWh prodotti, si assume come potere calorifico inferiore del rifiuto in ingresso tal quale un valore di 15.000 KJ/Kg (definito come media dei due poteri calorifici forniti dalle analisi effettuate in data 08/01/2019 e 05/07/2019 (rispettivamente allegati n. e n.). Si constata che il rendimento di produzione di energia elettrica dall'inceneritore sia variabile fra il 19-27 % circa ed il rendimento termico sia intorno al 50 %, mentre il rendimento totale di incenerimento sia pari circa all'85 %. Infine, sebbene come

precedentemente espresso, l'impianto al momento attua solo un recupero di energia elettrica, si ipotizza un recupero anche dell'energia termica, essendo l'impianto già predisposto a lavorare in assetto cogenerativo.

$$P = \eta \cdot pci = 12.750 kJ/kg_{RSU} \tag{3.2}$$

da cui si ricavano i KW elettrici e termici prodotti:

$$KWh_{el} = P \cdot \eta_{el} \cdot \frac{1}{3600}\frac{KWh}{KJ} = 12.750.000\frac{KJ}{t_{RSU}} \cdot 0,23 \cdot \frac{1}{3600}\frac{KWh}{KJ} = 814,6\frac{KWh_{el}}{t_{RSU}} \tag{3.3}$$

$$KWh_{te} = P \cdot \eta_{te} \cdot \frac{1}{3600}\frac{KWh}{KJ} = 12.750.000\frac{KJ}{t_{RSU}} \cdot 0,5 \cdot \frac{1}{3600}\frac{KWh}{KJ} = 1.770,8\frac{KWh_{te}}{t_{RSU}} \tag{3.4}$$

Pertanto i MWh elettrici e termici prodotti in un anno saranno pari rispettivamente a:

$$MWh_{el} = 0,8146\frac{MWh_{el}}{t_{RSU}} \cdot Q_{RSU} = 458.025,1\frac{MWh}{a}$$

$$MWh_{te} = 1,7708\frac{MWh_{te}}{t_{RSU}} \cdot Q_{RSU} = 995.667,7\frac{MWh}{a}$$

e di conseguenza si avranno come fattori emissivi:

- 2 tCO_2/MWh_{el}
- 0,93 tCO_2/MWh_{te}
- 0,64 tCO_2/MWh

LOMBARDIA

Come si evince dalla Tabella 3.4.1, nella regione Lombardia sono presenti ben 13 impianti attivi. L'impianto di termovalorizzazione preso a riferimento, noto come Silla 2, è collocato in un'area del Comune di Milano a Nord-Ovest della città, nel Municipio 7 (Baggio, De Angeli, San Siro), adiacente al lato Est dello stabilimento Amsa S.p.A. di Via Silla (Figura n.3.3). L'impianto è gestito dal Gruppo A2A Ambiente, che dispone di un vasto patrimonio di impianti affidabili ed innovativi, tra cui tre impianti di cogenerazione ad alta efficienza, a servizio delle reti urbane di teleriscaldamento di Bergamo, Brescia e Milano.

Figure 3.3: Localizzazione del termovalorizzatore Silla2

L'energia termica generata dalla combustione dei rifiuti viene utilizzata per produrre energia elettrica, ceduta alla rete nazionale, e calore, ceduto alla rete di teleriscaldamento, in un rapporto variabile in funzione delle richieste della rete. L'impianto di termovalorizzazione produce energia e calore utilizzando quale fonte energetica i rifiuti stessi, costituiti in massima parte da rifiuti urbani, generati nel Comune di Milano e nell'hinterland, nonché dalla frazione secca selezionata in altri

impianti aziendali. Una parte minore è costituita da rifiuti speciali non pericolosi prodotti da attività commerciali e industriali e trasportati da soggetti autorizzati; l'impianto non accetta rifiuti pericolosi.

Nella seguente Tabella 3.2 viene riportata la composizione media del rifiuto conferito al Termovalorizzatore Silla 2, come risulta dalle analisi merceologiche effettuate nel 2019. (Allegato a pagina 161).

Tabella 3.2 Composizione merceologica e percentuale di Carbonio

Frazione merceologica	% sul RUR	% di Carbonio tal quale
Carta e cellulosici	24,51	45%
Tessili	13,55	52%
Legno	0,45	50%
Plastica	22,14	62%
Vetro ed inerti	7,49	3%
Metalli	3,13	5%
Organico domestico	10,07	48%
Sfalci e potature	2,31	47%
Sottovaglio ed altro	16,35	26%

Considerando la composizione merceologica sopra specificata ne deriva che la percentuale di carbonio sul totale dei rifiuti corrisponde al %C = 43%. Il contenuto totale di carbonio sarà dunque dato dalla seguente equazione:

$$C = Q_{RSU} \cdot \%C = 1.039.508,2t/a \tag{3.5}$$

Essendo la portata di rifiuti pari a 2.417.461 t/a (Tabella 3.4.5 - Capitolo 1 pagina 20). Ne consegue un quantitativo di anidride carbonica sviluppata pari a:

$$CO_{2,RSU} = \frac{C_{RSU} \cdot PM_{CO_2}}{PM_C}$$

Da cui deriva $CO_{2,RSU} = 3.811.530,2t/a$.

Per la Lombardia, il fattore di emissione, ovvero la quantità di anidride carbonica che si sviluppa per tonnellata di rifiuto in ingresso tCO_2/t_{RSU}, è pari a:

$$CO_{2,RSU} = \frac{C_{RSU} \cdot PM_{CO_2}}{Q_{RSU} \cdot PM_C} = 1,58$$

Per ciò che riguarda la definizione del secondo parametro di confronto, ovvero le tCO2/MWh prodotti, si assume come potere calorifico inferiore del rifiuto in ingresso un valore medio pari a 11.000 kJ/kg (come media dei valori minimi e massimi forniti, Allegato N., pag.15), mentre i rendimenti per semplicità vengono ritenuti i medesimi.

$$P = \eta \cdot pci = 9.350 KJ/Kg_{RSU} \tag{3.6}$$

da cui si ricavano i KW elettrici e termici prodotti:

$$KWh_{el} = P \cdot \eta_{el} \cdot \frac{1}{3600} \frac{KWh}{KJ} = 9.350.000 \frac{KJ}{t_{RSU}} \cdot 0,23 \cdot \frac{1}{3600} \frac{KWh}{KJ} = 597,4 \frac{KWh_{el}}{t_{RSU}} \tag{3.7}$$

$$KWh_{te} = P \cdot \eta_{te} \cdot \frac{1}{3600} \frac{KWh}{KJ} = 9.350.000 \frac{KJ}{t_{RSU}} \cdot 0,5 \cdot \frac{1}{3600} \frac{KWh}{KJ} = 1.298,6 \frac{KWh_{te}}{t_{RSU}} \tag{3.8}$$

Pertanto i MWh elettrici e termici prodotti in un anno saranno pari rispettivamente a:

$$MWh_{el} = 0,5974 \frac{MWh_{el}}{t_{RSU}} \cdot Q_{RSU} = 1.444.191,2 \frac{MWh}{a}$$

$$MWh_{te} = 1,2986 \frac{MWh_{te}}{t_{RSU}} \cdot Q_{RSU} = 3.139.314,8 \frac{MWh}{a}$$

e di conseguenza si avranno come fattori emissivi:

- 2.64 tCO_2/MWh_{el}
- 1,21 tCO_2/MWh_{te}

- 0,83 tCO_2/MWh

TRENTINO ALTO ADIGE

Nella Regione del Trentino Alto Adige attualmente è presente un unico impianto di termovalorizzazione (Figura n.3.4), gestito da Eco Center, una società dei Comuni dell'Alto Adige e della Provincia Autonoma di Bolzano. Si tratta di un impianto attivo dal luglio del 2013, in grado di trattare rifiuti urbani e rifiuti speciali assimilabili agli urbani, asservendo 116 comuni. Il termovalorizzatore di Bolzano recupera il calore prodotto dalla combustione dei rifiuti convertendolo in vapore, per mezzo del quale produce energia termica ed elettrica. La maggior parte dell'energia elettrica prodotta viene ceduta alla rete nazionale, mentre solo una minima quantità viene utilizzata per i servizi di impianto. La quota di vapore che non viene convertita in energia elettrica fornisce energia termica alla rete di teleriscaldamento della città di Bolzano.

Figure 3.4: Termovalorizzatore di Bolzano - Eco Center [Fonte: www.eco-center.it]

Di seguito viene illustrata la composizione merceologica fornita dal termovalorizzatore (Allegato a pagina 162) e afferente all'anno 2017. Sebbene, come precedentemente detto, le caratteristiche merceologiche del rifiuto siano soggette a variazioni temporali, si suppone che nell'arco di due anni la composizione merceologica del rifiuto non abbia subito stravolgimenti tali da compromettere l'analisi di seguito esposta.

Tabella 3.3 Composizione merceologica e percentuale di Carbonio

Frazione merceologica	% sul RUR	% di Carbonio tal quale
Carta e Cartone	18,7	45%
Tessili	5,5	52%
Plastica	19,7	62%
Vetro ed inerti	2,1	3%
Metalli	1,7	5%
Organico domestico e sfalci e potature	31,7	48%
Sottovaglio ed altro	20,6	26%

Dalla Tabella sopra riportata ne deriva una percentuale di carbonio pari al %C = 44%. Il contenuto totale di carbonio, considerata una portata di rifiuti pari a 128.259 t/a (Tabella 3.4.5, pagina 20), sarà dunque:

$$C = Q_{RSU} \cdot \%C = 56.433,9 t/a \tag{3.9}$$

E quindi un quantitativo di anidride carbonica sviluppata pari a:

$$CO_{2,RSU} = \frac{C_{RSU} \cdot PM_{CO_2}}{PM_C} = 206.924,3 t/a$$

Conseguentemente è possibile calcolare il fattore di emissione tCO_2/t_{RSU}:

$$CO_{2,RSU} = \frac{C_{RSU} \cdot PM_{CO_2}}{Q_{RSU} \cdot PM_C} = 1,61$$

Come effettuato per le altre Regione è possibile definire anche il secondo parametro, ovvero le tCO_2/MWh prodotti, assumendo come valore medio del potere calorifico

inferiore dei rifiuti dell'Alto Adige un valori pari a 11.400 KJ/kg (Allegato N., pag.76), mentre i rendimenti vengono ritenuti i medesimi.

$$P = \eta \cdot pci = 9.690 KJ/kg_{RSU} \tag{3.10}$$

da cui si ricavano i KW elettrici e termici prodotti:

$$KWh_{el} = P \cdot \eta_{el} \cdot \frac{1}{3600}\frac{KWh}{KJ} = 9.690.000\frac{KJ}{t_{RSU}} \cdot 0,23 \cdot \frac{1}{3600}\frac{KWh}{KJ} = 619,1\frac{KWh_{el}}{t_{RSU}} \tag{3.11}$$

$$KWh_{te} = P \cdot \eta_{te} \cdot \frac{1}{3600}\frac{KWh}{KJ} = 9.690.000\frac{KJ}{t_{RSU}} \cdot 0,5 \cdot \frac{1}{3600}\frac{KWh}{KJ} = 1.345,8\frac{KWh_{te}}{t_{RSU}} \tag{3.12}$$

Pertanto i MWh elettrici e termici prodotti in un anno saranno pari rispettivamente a:

$$MWh_{el} = 0,6191\frac{MWh_{el}}{t_{RSU}} \cdot Q_{RSU} = 79.405,1\frac{MWh}{a}$$

$$MWh_{te} = 1,3458\frac{MWh_{te}}{t_{RSU}} \cdot Q_{RSU} = 172.610,9\frac{MWh}{a}$$

e di conseguenza si avranno come fattori emissivi:

- 2.6 tCO_2/MWh_{el}
- 1,2 tCO_2/MWh_{te}
- 0,82 tCO_2/MWh

VENETO

Per ciò che concerne la regione Veneto, nel suo territorio sono presenti due impianti attivi di termovalorizzazione: un impianto a Padova - S. Lazzaro (gruppo Hera) ed uno a Vicenza - Schio (Alto Vicentino Ambiente). Concentrandosi sul termovalorizzatore dei rifiuti di Padova (Figura n.3.5), realizzato nel quartiere San Lazzaro negli anni '50 e messo in funzione nel 1962, si sottolinea la sua grande innovazione per l'epoca, essendo il primo impianto italiano a provvedere anche al recupero energetico. Attualmente l'impianto di termovalorizzazione di Padova, che fa parte del gruppo Herambiente, è costituito da tre linee di incenerimento: la terza Linea, più recente, ha cominciato la produzione di energia elettrica nel 2010. Il suddetto termovalorizzatore è addetto a trattare rifiuti urbani, rifiuti speciali non pericolosi e sanitari a rischio infettivo. Il vapore prodotto alimenta tre turbine, una per ciascuna linea, che mettono in funzione alternatori sincroni trifase per la produzione di energia elettrica.

Figure 3.5: Termovalorizzatore di Padova - Hera-Ambiente

Non essendo state fornite indicazioni in merito alla composizione merceologica del rifiuto indifferenziato, si è ipotizzata una possibile composizione sulla base delle caratteristiche del rifiuto nella regione Veneto e sulle composizioni merceologiche delle altre regioni del Nord Italia. Si è desunta quindi una composizione così formata (Tabella 3.4):

Tabella 3.4 Composizione merceologica e percentuale di Carbonio

Frazione merceologica	% sul RUR	% di Carbonio tal quale
Carta e Cartone	18	45%
Tessili	10	52%
Plastica	21	62%
Vetro ed inerti	8	3%
Metalli	3	5%
Organico domestico e sfalci e potature	27 %	48%
Sottovaglio ed altro	13 %	26%

Dalla Tabella sopra riportata si ottiene una $\%C$ pari al 43 % e considerando una portata di rifiuti pari a 241.370 t/a (Tabella 3.4.5, pagina 20) si ottiene:

$$C = Q_{RSU} \cdot \%C = 103.789 t/a \tag{3.13}$$

Pertanto, il quantitativo di anidride carbonica dai rifiuti sviluppata sarà pari a:

$$CO_{2,RSU} = \frac{C_{RSU} \cdot PM_{CO_2}}{PM_C} = 380.559,7 t/a$$

Successivamente è possibile calcolare il cosiddetto fattore di emissione, ovvero la quantità di anidride carbonica che si sviluppa per ogni tonnellata di rifiuto in ingresso tCO_2/t_{RSU}, pari a:

$$CO_{2,RSU} = \frac{C_{RSU} \cdot PM_{CO_2}}{Q_{RSU} \cdot PM_C} = 1,58$$

Per ciò che riguarda la definizione del secondo parametro di confronto, ovvero le tCO_2/MWh prodotti, si assume come potere calorifico inferiore del rifiuto in ingresso tal quale un valore medio di 12,5 MJ/Kg (Fonte: sito HERAmbiente), mentre i rendimenti vengono ritenuti i medesimi.

$$P = \eta \cdot pci = 10.625 kJ/kg_{RSU} \tag{3.14}$$

da cui si ricavano i KW elettrici e termici prodotti:

$$KWh_{el} = P \cdot \eta_{el} \cdot \frac{1}{3600}\frac{KWh}{KJ} = 10625000\frac{KJ}{t_{RSU}} \cdot 0,23 \cdot \frac{1}{3600}\frac{KWh}{KJ} = 678,8\frac{KWh_{el}}{t_{RSU}} \tag{3.15}$$

$$KWh_{te} = P \cdot \eta_{te} \cdot \frac{1}{3600}\frac{KWh}{KJ} = 10625000\frac{KJ}{t_{RSU}} \cdot 0,5 \cdot \frac{1}{3600}\frac{KWh}{KJ} = 1.475,7\frac{KWh_{te}}{t_{RSU}} \tag{3.16}$$

Ne consegue che i MWh elettrici e termici prodotti in un anno saranno pari rispettivamente a:

$$MWh_{el} = 0,6788\frac{MWh_{el}}{t_{RSU}} \cdot Q_{RSU} = 163.842\frac{MWh_{el}}{a}$$

$$MWh_{te} = 1,4757\frac{MWh_{te}}{t_{RSU}} \cdot Q_{RSU} = 356.189,7\frac{MWh_{te}}{a}$$

e di conseguenza si avranno come fattori emissivi:

- 2,3 tCO_2/MWh_{el}
- 1,1 tCO_2/MWh_{te}
- 0,73 tCO_2/MWh

FRIULI VENEZIA GIULIA

Nella Regione del Friuli Venezia Giulia è presente un unico impianto di termovalorizzazione, localizzato a Trieste (Figura n.3.6). L'impianto è gestito dal Gruppo HERAmbiente, una società che possiede diversi impianti di compostaggio, termovalorizzazione, nonché discariche in tutto il centro-nord Italia. In particolare, sono assoggettati a questa società i termovalorizzatori di Bologna, Ferrara, Forlì, Modena, Padova, Pozzilli, Rimini e per l'appunto Trieste. La città di Trieste, oggi è servita dall'impianto denominato "Errera 3", che nasce come naturale evoluzione di "Errera 2"; l'impianto originario infatti è stato ammodernato e modificato realizzando una terza linea di trattamento rifiuti ed un ciclo termico interamente nuovo a servizio di tutte e tre le linee per il recupero di energia elettrica. L'impianto tratta rifiuti urbani e rifiuti speciali non pericolosi.

Figure 3.6: Termovalorizzatore di Trieste - HERAmbiente [Fonte: area marina protetta miramare]

Nella Tabella 3.5 di seguito riportata viene indicata la composizione merceologica del rifiuto in ingresso al termovalorizzatore, ottenuta grazie ai dati forniti (Allegato a pagina 163) ed afferente all'anno 2020. Come per il Trentino Alto Adige, è plausibile ipotizzare che la composizione del rifiuto al 2019 non discosti di molto da quella del 2020.

Tabella 3.5 Composizione merceologica e percentuale di Carbonio

Frazione merceologica	% sul RUR	% di Carbonio tal quale
Carta	11	45%
Cartone	6	44%
Tessili	27	52%
Legno	1,7	50%
Plastica	22	62%
Vetro ed inerti	10	3%
Metalli	6,3	5%
Organico domestico	8,5	48%
Sfalci e potature	6	47%
Sottovaglio	1,5	26%

Considerando la composizione merceologica sopra specificata ne deriva che la percentuale di carbonio sul totale dei rifiuti corrisponde al %C = 44%. Il contenuto totale di carbonio sarà dunque dato dalla seguente equazione:

$$C = Q_{RSU} \cdot \%C = 64.916,72 \tag{3.17}$$

avendo una portata di rifiuti pari a 147.538 t/a (Tabella 3.4.5, pagina 20). Pertanto, il quantitativo di anidride carbonica sviluppata sarà pari a:

$$CO_{2,RSU} = \frac{C_{RSU} \cdot PM_{CO_2}}{PM_C} = 238.027,97 t/a$$

Il fattore di emissione tCO_2/t_{RSU} sarà pari a:

$$CO_{2,RSU} = \frac{C_{RSU} \cdot PM_{CO_2}}{Q_{RSU} \cdot PM_C} = 1,61$$

Per quanto concerne invece il secondo parametro di confronto, ovvero le tCO_2/MWh prodotti, si ipotizza come potere calorifico inferiore del rifiuto un valore medio di 9.544 KJ/Kg (Fonte: sito HERAmbiente), mentre i rendimenti vengono ritenuti i medesimi ipotizzati in precedenza.

$$P = \eta \cdot pci = 8.112,4 KJ/kg_{RSU} \tag{3.18}$$

da cui si ricavano i KW elettrici e termici prodotti:

$$KWh_{el} = P \cdot \eta_{el} \cdot \frac{1}{3600}\frac{KWh}{KJ} = 8.112.400\frac{KJ}{t_{RSU}} \cdot 0,23 \cdot \frac{1}{3600}\frac{KWh}{KJ} = 518,3\frac{KWh_{el}}{t_{RSU}} \tag{3.19}$$

$$KWh_{te} = P \cdot \eta_{te} \cdot \frac{1}{3600}\frac{KWh}{KJ} = 8.112.400\frac{KJ}{t_{RSU}} \cdot 0,5 \cdot \frac{1}{3600}\frac{KWh}{KJ} = 1.126,7\frac{KWh_{te}}{t_{RSU}} \tag{3.20}$$

Pertanto i MWh elettrici e termici prodotti in un anno saranno pari rispettivamente a:

$$MWh_{el} = 0,5183\frac{MWh_{el}}{t_{RSU}} \cdot Q_{RSU} = 76.468,9\frac{MWh}{a}$$

$$MWh_{te} = 1,1267\frac{MWh_{te}}{t_{RSU}} \cdot Q_{RSU} = 166.234,3\frac{MWh}{a}$$

e di conseguenza si avranno come fattori emissivi:

- 3,1 tCO_2/MWh_{el}
- 1,43 tCO_2/MWh_{te}
- 0,98 tCO_2/MWh

EMILIA-ROMAGNA

Nella regione dell'Emilia Romagna sono presenti ben 8 impianti di incenerimento di rifiuti, tra questi si è preso a modello l'inceneritore della città di Ferrara (Figura n.3.7). L'impianto di termovalorizzazione di Ferrara, attivo dal 1994, si trova all'interno del sito "Geotermia", dove è situata anche la centrale di teleriscaldamento della città di Ferrara ed è anch'esso gestito dal Gruppo HERAmbiente. L'attività della centrale di teleriscaldamento è regolabile in base alle condizioni climatiche e ai consumi degli utenti. In base alle necessità, una parte del vapore generato dalla combustione viene spillato dalla turbina e cede energia all'adiacente centrale di teleriscaldamento. Lo scopo principale è quello di produrre, accumulare e distribuire alla rete cittadina l'energia termica proveniente da tre fonti: la geotermia, la termovalorizzazione e la centrale a gas metano.

Tra le fonti di produzione utilizzate dalla centrale di teleriscaldamento, il termovalorizzatore si colloca al secondo posto per quantità produttiva. La prima fonte di produzione è rappresentata, infatti, dall'energia termica proveniente dal fluido geotermico, estratto dal sottosuolo per mezzo di due pozzi. Una terza fonte, utilizzata per la produzione di acqua calda, è invece rappresentata da una centrale termica composta da 7 caldaie alimentate a metano.

Figure 3.7: Termovalorizzatore di Ferrara - HERAmbiente [Fonte: HERAmbiente]

Dal 2008 il termovalorizzatore si avvale di due linee di termovalorizzazione, realizzate, come previsto nel Piano Provinciale di Gestione dei Rifiuti, per fare fronte allo smaltimento di rifiuti urbani indifferenziati e di rifiuti speciali provenienti prioritariamente dall'ambito unico regionale.

La capacità massima autorizzata è di 130.000 ton annue di rifiuti in ingresso. In caso di necessità, l'Autorità Competente può inoltre autorizzare lo smaltimento di ulteriori 12.000 ton/anno di rifiuti urbani di provenienza extraregionale.

Nella Tabella 3.6 viene riportata la composizione merceologica del rifiuto in ingresso al termovalorizzatore, ottenuta grazie ai dati forniti di un'analisi merceologica effettuata in data 21-10-2019 (Allegato a pagina 160).

Tabella 3.6 Composizione merceologica e percentuale di Carbonio

Frazione merceologica	% sul RUR	% di Carbonio tal quale
Carta e Cartone	18,53	45%
Legno	0,42	50%
Plastica	9,31	62%
Vetro ed inerti	3,42	3%
Metalli	1,43	5%
Organico	29,84	48%
Sottovaglio e altro	37,05	26%

Dalla Tabella si evince una percentuale di carbonio del %C=39% ed avendo una portata di rifiuti pari a 1.099.746 t/a (Tabella 3.4.5 - Capitolo 1 pagina 20), si ottiene:

$$C = Q_{RSU} \cdot \%C = 428.901 t/a \tag{3.21}$$

Pertanto, il quantitativo di anidride carbonica sviluppata sarà pari a:

$$CO_{2,RSU} = \frac{C_{RSU} \cdot PM_{CO_2}}{PM_C}$$

Da cui deriva $CO_{2,RSU} = 1.572.637 t/a$.

Successivamente è possibile calcolare il cosiddetto fattore di emissione, ovvero la quantità di anidride carbonica che si sviluppa per ogni tonnellata di rifiuto in ingresso tCO_2/t_{RSU}, pari a:

$$CO_{2,RSU} = \frac{C_{RSU} \cdot PM_{CO_2}}{Q_{RSU} \cdot PM_C} = 1,43$$

Per quanto concerne il secondo parametro di confronto, ovvero le tCO2/MWh prodotti, si assume come potere calorifico inferiore del rifiuto in ingresso tal quale un valore di 10.465 KJ/Kg (Fonte: sito HERAmbiente), mentre i rendimenti sono i medesimi ipotizzati in precedenza, ovvero un rendimento di produzione di energia elettrica pari al 23%, un rendimento termico del 50% ed infine un rendimento totale di incenerimento pari all'85%.

$$P = \eta \cdot pci = 8.895,25 kJ/kg_{RSU} \tag{3.22}$$

da cui si ricavano i KW elettrici e termici prodotti:

$$KWh_{el} = P \cdot \eta_{el} \cdot \frac{1}{3600}\frac{KWh}{KJ} = 8.895.250\frac{KJ}{t_{RSU}} \cdot 0,23 \cdot \frac{1}{3600}\frac{KWh}{KJ} = 568,3\frac{KWh_{el}}{t_{RSU}} \tag{3.23}$$

$$KWh_{te} = P \cdot \eta_{te} \cdot \frac{1}{3600}\frac{KWh}{KJ} = 8.895.250\frac{KJ}{t_{RSU}} \cdot 0,5 \cdot \frac{1}{3600}\frac{KWh}{KJ} = 1.235,4\frac{KWh_{te}}{t_{RSU}} \tag{3.24}$$

Di conseguenza i MWh elettrici e termici prodotti in un anno saranno pari rispettivamente a:

$$MWh_{el} = 0,5683\frac{MWh_{el}}{t_{RSU}} \cdot Q_{RSU} = 624.985,6\frac{MWh}{a}$$

$$MWh_{te} = 1,2354\frac{MWh_{te}}{t_{RSU}} \cdot Q_{RSU} = 1.358.626,2\frac{MWh}{a}$$

e quindi si avranno come fattori emissivi:

- 2,52 tCO_2/MWh_{el}
- 1,16 tCO_2/MWh_{te}
- 0,79 tCO_2/MWh

Nella Tabella 3.7 vengono riassunti i risultati ottenuti, sulla base della quantità di rifiuti urbani inceneriti in ogni Regione e dei fattori di emissione calcolati.

Tabella 3.7 Tabella riassuntiva

Regione	Quantità di rifiuti inceneriti (t/a)	tCO_2/t_{RSU}	tCO_2/MWh
Piemonte	562.270	1,65	0,64
Lombardia	2.417.461	1,58	0,83
Trentino Alto Adige	128.259	1,61	0,82
Veneto	241.370	1,58	0,73
Friuli Venezia Giulia	147.538	1,61	0,98
Emilia Romagna	1.099.746	1,43	0,79

3.3 La CO_2 da combustibili fossili

La produzione di energia termica ed elettrica è stata per anni indissolubilmente legata all'utilizzo di fonti fossili e solo negli ultimi decenni si è manifestata la volontà di ridurne l'impiego incentivando l'utilizzo di fonti rinnovabili. Come già anticipato nei capitoli precedenti infatti i rifiuti possono in tal senso costituire una risorsa; proprio per tale ragione si sono moltiplicati gli sforzi e gli investimenti nella produzione di energia da fonti rinnovabili portando ad un esponenziale aumento di energia prodotta; pur tuttavia carbone, petrolio e gas naturale mantengono ancora il predominio nella composizione del mix energetico globale.

Ad avvalorare quanto appena detto si mostra ad esempio la Tabella 2.3 tratta dall'ISPRA, dove sono riportati i fattori di emissione specifici per le diverse tipologie di combustibili utilizzati nelle centrali termoelettriche nazionali. Tra i combustibili fossili i gas derivati presentano i fattori di emissione più elevati, seguiti dai combustibili solidi e dai prodotti petroliferi; il gas naturale mostra i fattori di emissione più bassi. Gli altri combustibili [1] (costituiti da rifiuti biodegradabili, biogas e biomasse di origine vegetale) presentano fattori emissivi estremamente inferiori; infine per Altri combustibili [2] si cosidera la produzione elettrica dalla sola componente non biodegradabile dei rifiuti, tra i quali figurano anche i rifiuti industriali.

Tabella 2.3 – *Fattori di emissione di CO_2 da produzione termoelettrica lorda per combustibile (gCO_2/kWh).*

Combustibili	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018
Solidi	876,9	863,2	852,0	919,9	889,5	899,8	895,7	870,0	884,3
Gas naturale	529,9	518,8	480,4	396,2	387,9	364,8	367,5	368,3	367,3
Gas derivati	1.816,4	1.855,8	1.498,3	1.906,3	1.664,9	1.624,8	1.639,5	1.498,4	1.651,2
Prodotti petroliferi	683,5	674,0	713,0	675,1	691,8	562,4	548,4	547,9	545,7
Altri combustibili[1]	1.231,6	540,0	265,0	296,8	255,8	136,2	137,6	133,3	132,8
Altri combustibili[2]	2.463,1	2.439,8	1.253,1	1.394,8	1.381,9	1.224,0	1.209,6	1.185,9	1.194,0
Totale termoelettrico[1]	708,0	680,6	633,6	571,4	522,4	487,7	465,6	445,4	444,4
Totale termoelettrico[2]	708,2	681,6	638,0	582,6	544,8	542,6	516,3	491,0	493,8

[1] È compresa l'elettricità prodotta da rifiuti biodegradabili, biogas e biomasse di origine vegetale.
[2] È esclusa l'elettricità prodotta da rifiuti biodegradabili, biogas e biomasse di origine vegetale.

Figure 3.8: [Fonte: ISPRA - Fattori di emissione atmosferica di gas a effetto serra nel settore elettrico nazionale e nei principali Paesi Europei, 2020]

Come si può notare dalla Tabella, il fattore di emissione per la produzione termoelettrica lorda nazionale diminuisce costantemente nel tempo, con valori che vanno da 708 g CO2/kWh nel 1990 a 444,4 g CO2/kWh nel 2018. Tale riduzione

è dovuta principalmente all'incremento della quota di gas naturale nella produzione termoelettrica e alla continua riduzione del fattore di emissione specifico di questo combustibile, riduzione dovuta a sua volta all'incremento dell'efficienza di conversione elettrica degli impianti alimentati da gas naturale. Un ruolo importante assume anche l'utilizzo di bioenergie con bilancio emissivo zero tra gli altri combustibili che nel 2018 contribuiscono per il 10% della produzione termoelettrica. Si tratta di un notevole incremento considerando che nel 1990 il contributo delle bioenergie alla produzione termoelettrica era dello 0,03% e fino al 2005 era di 1,9%. La differenza tra i fattori di emissione del parco termoelettrico con e senza il contributo delle bioenergie mostra il ruolo di tali fonti nella riduzione del fattore di emissione. La differenza diventa rilevante successivamente al 2000 in seguito all'incremento della quantità di biomasse solide e di rifiuti solidi urbani o assimilabili utilizzati per la produzione elettrica [Fonte: ISPRA - Fattori di emissione atmosferica di gas a effetto serra nel settore elettrico nazionale e nei principali Paesi Europei, 2020].

In Figura n.3.9 si osserva la variazione percentuale di energia termoelettrica prodotta e delle relative emissioni atmosferiche di CO_2 rispetto al 1990 per tipologia di combustibile. Dall'immagine si può notare che sussiste una covariazione tra energia termoelettrica prodotta ed emissioni di CO_2 per i combustibili solidi, gas derivati e soprattutto prodotti petroliferi. Di contro, per il gas naturale e specie per gli altri combustibili si osserva un incremento della produzione elettrica cui non corrisponde un pari incremento di emissioni di CO_2, ovvero un disaccoppiamento tra i due parametri. E' possibile definire questo fattore di disaccoppiamento in termini di rapporto tra i rispettivi incrementi. Per gli "altri combustibili [1]", che sono per l'appunto i rifiuti e le bioenergie, l'incremento di energia elettrica nel 2018 è 9,27 volte più grande dell'incremento delle emissioni, mentre per gas naturale il fattore di disaccoppiamento è 1,44. Anche per i prodotti petroliferi si osserva un fattore di disaccoppiamento pari a 1,25 essenzialmente dovuto alla crescente quota dei gas di sintesi con elevata efficienza di conversione elettrica. Il fattore di disaccoppiamento dei gas derivati è 1,1 mentre il combustibile solido presenta un disaccoppiamento quasi nullo (0,99) [Fonte: ISPRA - Fattori di emissione atmosferica di gas a effetto serra nel settore elettrico nazionale e nei principali Paesi Europei, 2020]. .

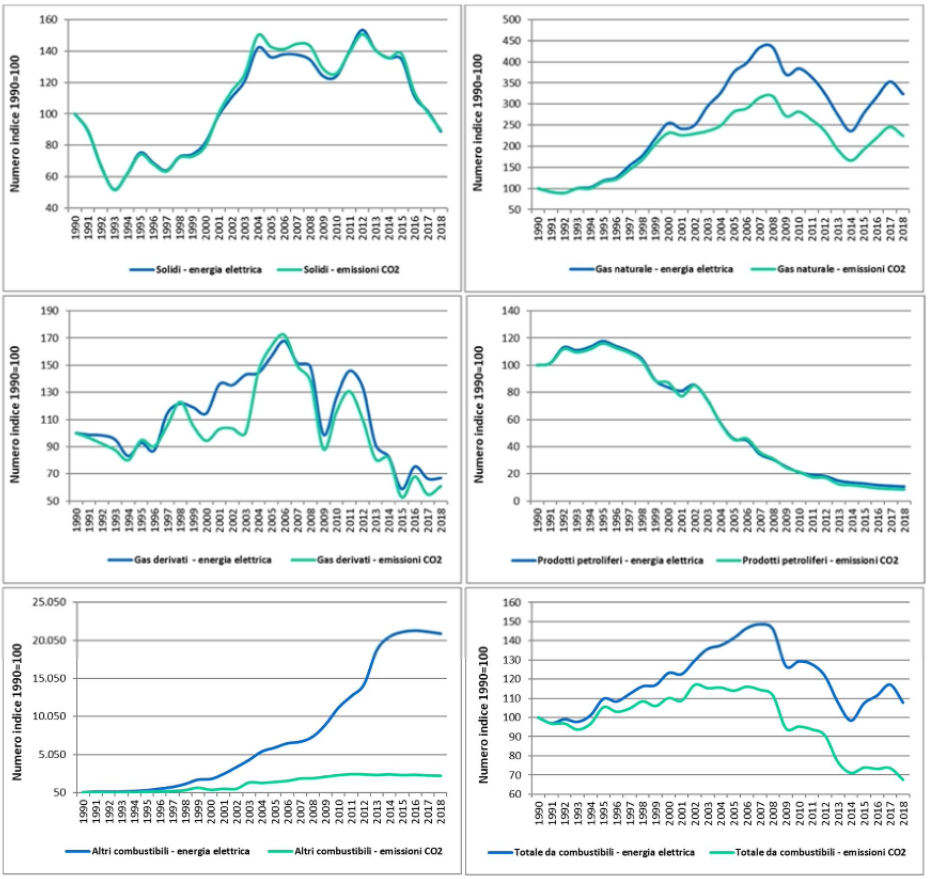


Figure 3.9: Variazione annuale della produzione termoelettrica e delle emissioni per combustibile; [Fonte: ISPRA - Fattori di emissione atmosferica di gas a effetto serra nel settore elettrico nazionale e nei principali Paesi Europei, 2020]

Da quanto esposto emerge che il parco termoelettrico nazionale presenta, a partire dal 1990, un incremento della produzione elettrica cui non è corrisposto un proporzionale incremento delle emissioni atmosferiche di CO_2 per via del miglioramento tecnologico e per l'incremento della quota di combustibili con fattori di emissione inferiori. Ad avvalorare questa tesi si mostra la Figura n.3.10 , dove è chiaramente visibile che la produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili determina una riduzione del fattore di emissione per la produzione elettrica totale poiché tali fonti hanno un bilancio emissivo pari a zero.

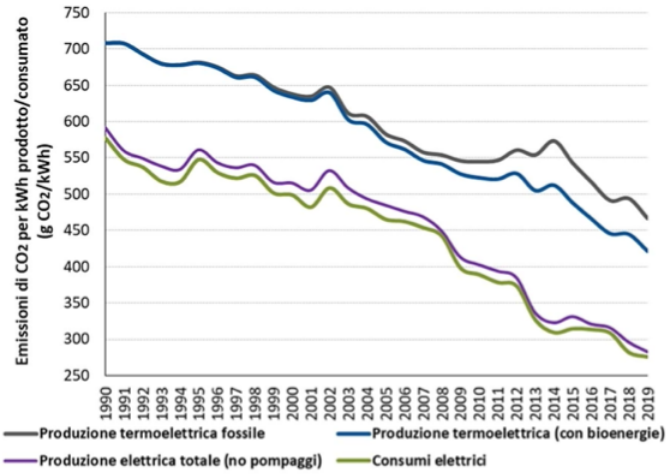


Figure 3.10: Andamento del fattore di emissione per la produzione lorda ed il consumo di energia elettrica (gCO_2/ kWh); [Fonte: ISPRA - Fattori di emissione atmosferica di gas a effetto serra nel settore elettrico nazionale e nei principali Paesi Europei, 2020].

3.3.1 Calcolo della CO_2 evitata

Da quanto appena riportato emerge chiaramente come i rifiuti possano costituire una risorsa in termini energetici, nonché un'alternativa all'utilizzo dei combustibili fossili. Si tiene a precisare che l'obiettivo primario di un inceneritore rimane pur sempre la gestione del rifiuto e che dunque il recupero energetico costituisce un valore aggiuntivo, permettendo contemporaneamente di smaltire i rifiuti e di produrre energia.

Pur tuttavia, il recupero dell'energia elettrica e termica da termovalorizzazione presenta risvolti importanti in termini di emissioni di CO_2 evitate, in quanto sostituisce la stessa quota di energia altrimenti prodotta da combustibili tradizionali. Si esegue quindi un calcolo del quantitativo di CO_2 evitata grazie al recupero energetico svolto dagli impianti di termovalorizzazione del Nord Italia. Conoscendo i fattori di emissione dell'anidride carbonica, ossia quanti grammi di CO_2 sono emessi per la produzione di un kWh elettrico e di un kWh termico è possibile calcolare la CO_2 evitata da ogni regione in virtù della produzione energetica operata dagli impianti.

I fattori di emissione dell'anidride carbonica sono riportati nella Tabella n.3.8 che segue.

Tabella 3.8 Parametri utilizzati nel calcolo della CO_2 evitata

Parametro	Valore
CO_2 evitata recupero elettrico $[gCO_2/kWh]$	675
CO_2 evitata recupero termico $[gCO_2/kWh]$	210

I risultati invece dei calcoli effettuati sono riportati nella seguente Tabella riassuntiva (Tabella n.3.9).

Tabella 3.9 Tabella riassuntiva dei fattori di emissione

Regione	CO_2 evitata [t/a]	tCO_2/t_{RSU}	tCO_2/MWh	tCO_2/t_{RSU}*	tCO_2/MWh*
Piemonte	518.257,2	1,65	0,64	**0,73**	**0,28**
Lombardia	1.634.085,2	1,58	0,83	**0,91**	**0,47**
Trentino	89.846,7	1,61	0,82	**0,91**	**0,46**
Veneto	185.393,3	1,58	0,73	**0,81**	**0,37**
FVG	86.525,7	1,61	0,98	**1,02**	**0,62**
Emilia	707.176,8	1,43	0,79	**0,79**	**0,43**

*si tiene conto della CO_2 evitata grazie alla produzione di energia elettrica e termica

Come è chiaramente osservabile dalla Tabella sopra riportata, il recupero energetico permette di abbattere notevolmente i fattori di emissione, al punto tale quasi da dimezzarli. La CO_2 complessivamente evitata nel Nord Italia risulta essere pari circa a 3.221.285 t/a. Appare pertanto evidente come il recupero di energia attuato dagli impianti di termovalorizzazione costituisca un aspetto rilevante nei confronti della compatibilità ambientale degli impianti stessi, nonché fattore di riduzione delle emissioni atmosferiche di CO_2 se si considera che la stessa energia si sarebbe dovuta ottenere dai combustibili fossili.

Chapter 4

Trattamenti Meccanico Biologici

Per fornire una maggiore visione d'insieme, nel presente capitolo viene riportato un confronto tra differenti scenari di gestione del rifiuto. Nel precedente capitolo si sono analizzati solo i trattamenti cosiddetti "a caldo" (incenerimento), mentre ora si esamineranno scenari di gestione del rifiuto che prevedono trattamenti "a freddo" (in particolare trattamento meccanico - biologico - TMB), per la valutazione della compatibilità ambientale.

4.1 Aspetti Generali

Quanto finora descritto si riferisce esclusivamente ai trattamenti termici e quindi ad una gestione del rifiuto che prevede la valorizzazione energetica del flusso residuale della raccolta differenziata senza ulteriori trattamenti di separazione. In questo capitolo, si riportano i risultati di un studio effettuato in merito ai TMB al fine di valutare anche questa opportunità gestionale.

Come si può osservare dai dati delle differenti composizioni merceologiche dei rifiuti nel Nord Italia, riportati nel Capitolo 3, la frazione organica del rifiuto indifferenziato rappresenta in peso la componente prevalente dei rifiuti urbani. Gli impianti di trattamento meccanico biologico (TMB) consentono di trattare tale frazione al fine di riciclarla sotto forma di fertilizzanti organici o di stabilizzarla (riducendo umidità

e volume) allo scopo di ridurre gli impatti che si originerebbero dal suo conferimento definitivo in discarica. Il trattamento meccanico biologico viene infatti diffusamente utilizzato come forma di pretrattamento dei rifiuti allo smaltimento in discarica ma anche all'incenerimento, incrementando il loro potere calorifico per rendere più efficiente il processo di combustione.

Si delineano quindi due linee operative complementari che originano due distinti flussi di materiale organico:

- compostaggio di frazioni organiche "di qualità" e biomasse separate a monte tramite raccolta differenziata, o rifiuti organici originati da specifiche attività produttive o di recupero che consentono di ottenere un flusso omogeneo e ben caratterizzabile analiticamente e merceologicamente;
- trattamento meccanico biologico di rifiuti indifferenziati con contenuto variabile di sostanze organiche, o frazioni organiche non di qualità derivanti dal trattamento meccanico di rifiuti indifferenziati o di frazioni organiche selezionate ma con carico di elementi pericolosi relativamente elevato (ad esempio alcuni fanghi civili).

Come accennato in precedenza, nel presente capitolo si seguirà la filiera dei TMB applicati ai rifiuti indifferenziati, per valutarne la compatibilità ambientale in termini di emissioni di CO_2.

Il trattamento meccanico biologico consta di due fasi ben distinte:

1. il trattamento meccanico $\rightarrow$ dove il rifiuto viene vagliato per separare le diverse frazioni merceologiche e/o condizionato per raggiungere gli obiettivi di processo;
2. il trattamento biologico $\rightarrow$ ovvero un processo biologico volto a conseguire la mineralizzazione delle componenti organiche maggiormente degradabili (stabilizzazione) e l'igienizzazione delle stesse.

La parte meccanica del TMB consiste in una fase di separazione e classificazione dei vari componenti dei rifiuti utilizzando dei sistemi meccanici automatizzati quali nastri trasportatori, magneti, separatori galvanici a corrente parassita, vagli a tamburo o a dischi, tavoli vibranti classificatori ad aria, macchine trituratrici, ecc. In questo modo dalla massa dei rifiuti vengono rimossi i componenti quali carta, metalli, plastiche e vetro; la frazione secca ottenuta può essere in parte riciclata oppure usata per produrre

combustibile derivato dai rifiuti (CDR), rimuovendo i materiali incombustibili. La componente biologica invece di questo tipo di processo è finalizzata a stabilizzare la frazione putrescibile dei rifiuti urbani residui mediante l'azione di microrganismi decompositori e possono essere condotti sia in condizioni aerobiche (in presenza di ossigeno), sia in condizioni anaerobiche (assenza di ossigeno) [Fonte: Libro Bianco sull'incenerimento dei rifiuti urbani, 2020].

I processi aerobici utilizzati nel trattamento dei RUR sono [Fonte: ENEA, 2008]:

- biostabilizzazione, applicata alla frazione putrescibile per dare luogo alla cosiddetta frazione organica stabilizzata (FOS), prevalentemente come forma di pretrattamento a monte dello smaltimento in discarica, al fine di ridurre gli impatti connessi alla produzione di biogas e percolato; in particolari condizioni la FOS può essere oggetto di forme di riutilizzo (ad esempio per recuperi ambientali di aree degradate);

- bioessiccazione, consistente nell'asportazione di gran parte dell'umidità originariamente presente, sfruttando il calore sviluppato dai processi biologici, in modo da aumentare il potere calorifico inferiore dei RUR in previsione di successivi utilizzi energetici.

In ultima analisi, gli obiettivi di un trattamento meccanico biologico possono essere così sintetizzati [Fonte: Favoino E. et al., 2007]:

- riduzione della reattività biologica del rifiuto da smaltire in discarica, grazie alla parziale degradazione aerobica o anaerobica della componente organica putrescibile; nonchè riduzione volumetrica e ponderale del rifiuto;

- recupero, attraverso l'integrazione dei trattamenti biologici con quelli meccanici, delle frazioni di rifiuto a più elevato potere calorifico in termovalorizzatori dedicati, oppure in forni di cementeria, centrali termoelettriche ecc.

- produzione di biogas per generazione di calore o energia;

- recupero per via meccanica delle frazioni avviabili a riciclaggio, quali i metalli, o di frazioni stabilizzate a granulometria fine destinabili ad applicazioni controllate (ripristini ambientali).

4.2 Fasi di processo

Si illustrano ora le differenti fasi nel dettaglio per fornire una visione d'insieme del processo ed i meccanismi che ne stanno alla base.

4.2.1 Trattamenti meccanici

La scelta dei trattamenti meccanici (tipi di apparecchiature da utilizzare) è fortemente condizionata dalla natura e dalle caratteristiche del rifiuto in ingresso all'impianto, ma anche dal tipo di processo biologico che si vuole adottare (aerobico o anaerobico).

4.2.1.1 Pre-trattamenti

Con il termine di pretrattamenti si intendono tutte quelle operazioni destinate alla preparazione del rifiuto per il corretto svolgimento del successivo processo biologico. La prima operazione che viene eseguita sui rifiuti urbani indifferenziati scaricati in fosse di accumulo in depressione o su platee di ricezione è la rottura dei sacchi che li contengono; l'operazione, detta dilacerazione, ha anche lo scopo di ridurre la pezzatura del materiale più voluminoso per permettere una selezione corretta. Il trattamento dei RUR destinati ad un processo biologico di tipo aerobico (biostabilizzazione o bioessiccazione) si articola in genere in una prima fase di frantumazione-triturazione grossolana cui segue una di vagliatura, detta primaria, per la separazione della frazione secca (sopravaglio), da quella fine costituita in varia misura da inerti e materiale putrescibile, in modo da favorire il successivo trattamento biologico e, al contempo, il recupero di materiali valorizzabili. La de-metallizzazione, facoltativa nel caso della bioessiccazione, viene invece sempre realizzata nel caso in cui si opti per la biostabilizzazione. I trattamenti preliminari ad un processo di digestione anaerobica sono differenti a seconda che la tecnologia sia del tipo a secco (dry) oppure ad umido (wet). Nel secondo caso, oltre al controllo della pezzatura attraverso le fasi di vagliatura e triturazione, si provvede alla miscelazione con acqua ed alla contemporanea separazione della fase leggera (plastica) e pesante in particolari apparecchiature (flottatori) [Fonte: ATOR - Valutazioni sull'applicabilità dei trattamenti meccanico-biologici nel ciclo integrato dei rifiuti urbani della Provincia di Torino, 2009].

Oltre alla regolazione del contenuto d'acqua, è anche necessario provvedere all'omogeneizzazione della miscela prima dell'introduzione nel digestore. La miscela deve inoltre essere portata alla temperatura richiesta per il processo utilizzato: la regolazione della temperatura può essere effettuata sia all'esterno del reattore (generalmente riscaldando l'acqua di diluizione o la miscela stessa tramite scambiatori di calore) sia all'interno (ricorrendo sempre a scambiatori di calore o all'iniezione diretta di vapore nel digestore).

Si riporta di seguito una breve descrizione delle principali operazioni di pretrattamento sia per un impianto di trattamento aerobico dei rifiuti, sia per un impianto di digestione anaerobica.

RIDUZIONE DIMENSIONALE

La riduzione dimensionale permette di ridurre la pezzatura dei rifiuti, ottenendo prodotti con pezzatura contenuta entro opportuni limiti, al fine di agevolare le successive operazioni di trattamento. I trituratori agiscono sul materiale attraverso azioni di macinazione e taglio e possono essere di diversi tipi; le principali tipologie sono:

- mulini a martelli (Figura n.4.1);

- trituratori a coltelli (Figura n.4.2);

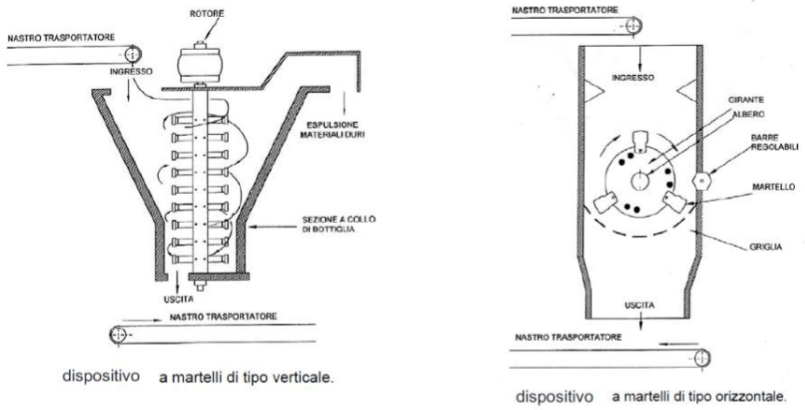


Figure 4.1: Mulino a martelli verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) [Fonte: Dispense Applied Environmental Engineering; Zanetti]

I mulini a martelli sono dotati di una serie di masse ("martelli") fissate ad un albero rotante (sono macchine veloci con una velocità di rotazione di 1.000 - 2.000 giri/min); i martelli, colpendo ripetutamente il rifiuto, ne determinano la frantumazione in parti sempre più ridotte. La camera di comminuzione è interna al dispositivo ed il materiale comminuito cade verso il basso per gravità. Nella configurazione orizzontale si ha invece un cilindro orizzontale che ruota ad elevata velocità ed i martelli montati sul cilindro distruggono il materiale grazie alla potente azione rotante.

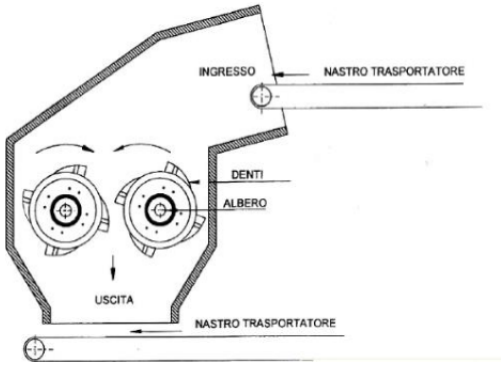


Figure 4.2: Trituratore a coltelli [Fonte: Dispense Applied Environmental Engineering; Zanetti]

I trituratori a coltelli sono dotati di utensili affilati (coltelli) montati attorno ad uno o più alberi orizzontali rotanti in contrapposizione tra loro (uno orario e l'altro antiorario); sono macchine più lente rispetto ai sistemi precedenti (meno di 125 giri/min); i coltelli lacerano e tagliano il materiale che viene loro in contatto per caduta, dal sistema di alimentazione posto nella parte alta. Questo tipo di macchina trova impiego anche come lacera sacchi.

SEPARAZIONE

A seguito della riduzione dimensionale, i materiali presenti nel rifiuto vengono tra loro separati sfruttando le diverse proprietà fisiche da essi possedute, quali: dimensioni, densità, resistenza aerodinamica, inerzia, magnetismo, conduttività elettrica, proprietà ottiche. Sottoponendo il rifiuto a successive selezioni si tende ad isolare i suoi componenti, al fine di ottenere singoli prodotti con accettabili gradi di purezza. La fase di separazione può avvenire ricorrendo a diversi sistemi, tra cui i più diffusi sono:

- la separazione dimensionale
- la separazione gravimetrica

- la separazione magnetica
- la separazione elettrostatica

L'operazione di separazione dimensionale viene comunemente definita "vagliatura" e si basa sulle differenti dimensioni che caratterizzano i materiali contenuti nel rifiuto trattato. I materiali vengono separati per pezzatura, attraverso il passaggio attraverso uno o più apparecchiature dotate di fori o maglie di diverse dimensioni; i vagli più diffusi sono quelli a tamburo, a dischi e i vibrovagli. Il materiale in ingresso al separatore dimensionale viene suddiviso in due flussi distinti:

- sottovaglio: è il materiale raccolto nelle tramogge sottostanti il separatore
- sopravaglio (o sovvallo): è la parte di materiale che rimane sopra le maglie di separazione e che giunge dall'estremità della macchina.

Il vaglio a tamburo rotante (Figura n.4.3) è costituito da un cilindro rotante dotato di un dispositivo di carico all'estremità, inclinato e messo in rotazione intorno al proprio asse per consentire l'avanzamento dei rifiuti. Questo vaglio ha una superficie dotata di fori di diametro variabile (da 60 a 100 mm nel caso della vagliatura primaria, da 20 a 60 mm per quella secondaria), attraverso i quali passa la frazione fine.

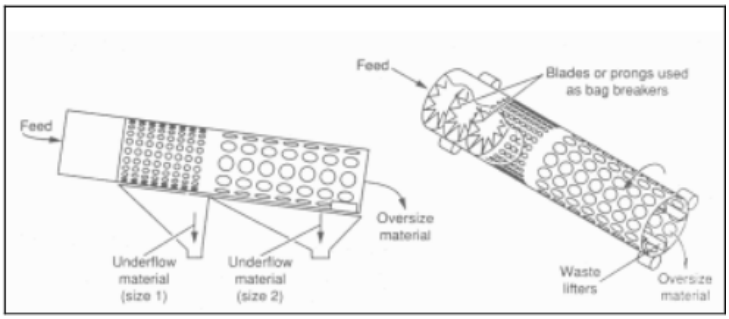


Figure 4.3: Schema di un vaglio a tamburo [Fonte: ATOR - Valutazioni sull'applicabilità dei trattamenti meccanico-biologici nel ciclo integrato dei rifiuti urbani della Provincia di Torino, 2009]

Il vaglio vibrante (Figura n.4.4) è dotato di una griglia forata inclinata vibrante per consentire il passaggio della frazione fine; può essere dotato di più piastre forate al di sotto della griglia forata, con maglie di diverse dimensioni.

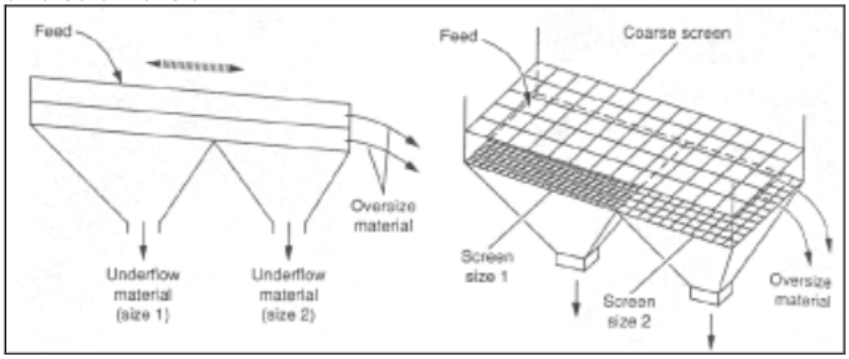


Figure 4.4: Schema di un vibrovaglio [Fonte: ATOR - Valutazioni sull'applicabilità dei trattamenti meccanico-biologici nel ciclo integrato dei rifiuti urbani della Provincia di Torino, 2009]

Il vaglio a dischi (Figura n.4.5) è formato da più assi rotanti paralleli, montati orizzontalmente su uno stesso piano; su tali assi sono montati dischi di varia sagoma (ad esempio ovali o esagonali), che formano una sorta di griglia. Il materiale fine passa attraverso lo spazio lasciato tra i vari dischi; il sovvallo, invece, viene spinto dalla rotazione dei dischi verso la sezione di uscita del vaglio stesso.

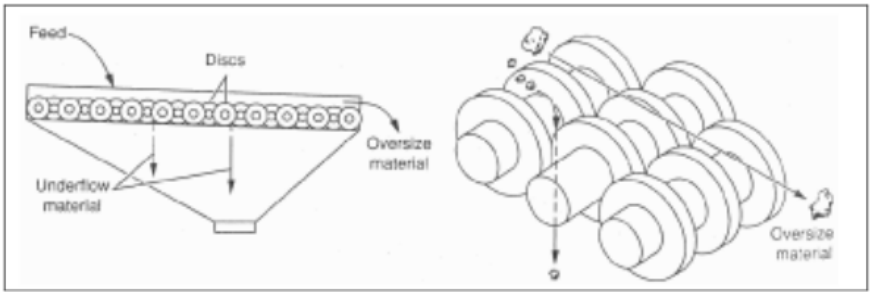


Figure 4.5: Schema di un vaglio a dischi [Fonte: ATOR - Valutazioni sull'applicabilità dei trattamenti meccanico-biologici nel ciclo integrato dei rifiuti urbani della Provincia di Torino, 2009]

La separazione gravimetrica invece si basa sulla diversa densità e resistenza aerodinamica delle componenti del rifiuto che, in genere, ha già subito un trattamento di triturazione e vagliatura e che, quindi si presenta già sminuzzato e distinto nelle due frazioni principali: sopravaglio e sottovaglio. I principali sistemi impiegati comprendono i classificatori ad aria, a letto fluido ed i separatori balistici. I classificatori ad aria (Figura n.4.6) sono sistemi molto semplici ed efficaci per la rimozione delle frazioni leggere (carta e plastica) e sono costituiti da condotti verticali nei quali attraverso una tramoggia vengono alimentati i rifiuti; la corrente d'aria viene insufflata dal basso. Ne

consegue che il materiale più pesante ricade nella parte sottostante e viene raccolto da un nastro trasportatore, mentre il materiale più leggero viene trascinato dall'aria nella sezione superiore e da qui convogliato ad un ciclone che separa la frazione leggera dalla corrente d'aria.

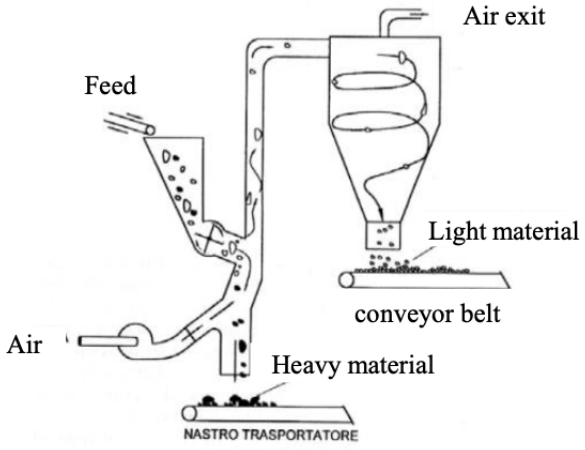


Figure 4.6: Classificatore ad aria [Fonte: Dispense Applied Environmental Engineering; Zanetti]

Un'altra tecnologia è costituita dai separatori gravimetrici a letto fluido (Figura n.4.7), che consistono in un piano vibrante poroso e leggermente inclinato, attraversato dal basso da un flusso d'aria. L'azione combinata di sostentamento, provocata dall'aria, e di vibrazione, attribuita direttamente dal piano di appoggio, fa sì che si produca una differenziazione fra materiale leggero e materiale pesante.

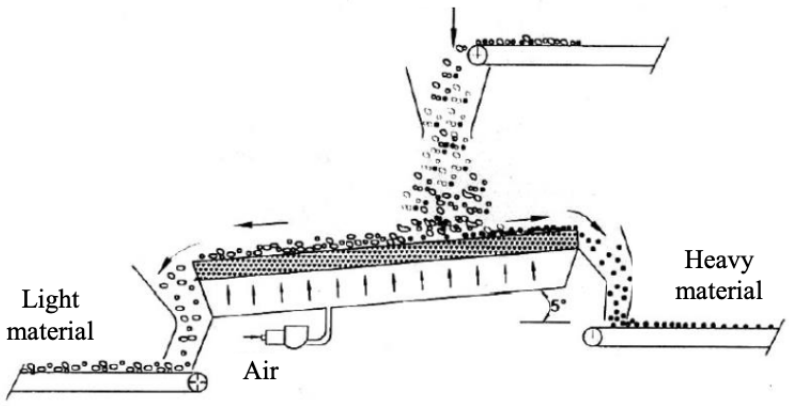


Figure 4.7: Separatore a letto fluido [Fonte: Dispense Applied Environmental Engineering; Zanetti]

I separatori balistici (Figura n.4.8) sono invece in grado di compiere la separazione delle parti del rifiuto trattato sfruttando le differenze di densità e di elasticità esistenti. Nel primo caso i rifiuti vengono immessi dall'alto per essere ripresi e proiettati in direzione opposta ad alta velocità: in base alla diversa densità dei materiali, essi cadranno più o meno lontano rispetto alla zona d'ingresso. Nel secondo caso i rifiuti vengono introdotti su una puleggia, che, imprimendo una forte accelerazione, proietta il materiale contro un disco di gomma ruotante su un piano ortogonale alla direzione di lancio; a causa dell'urto il materiale rimbalza con traiettorie di caduta diverse, in funzione delle sue proprietà elastiche.

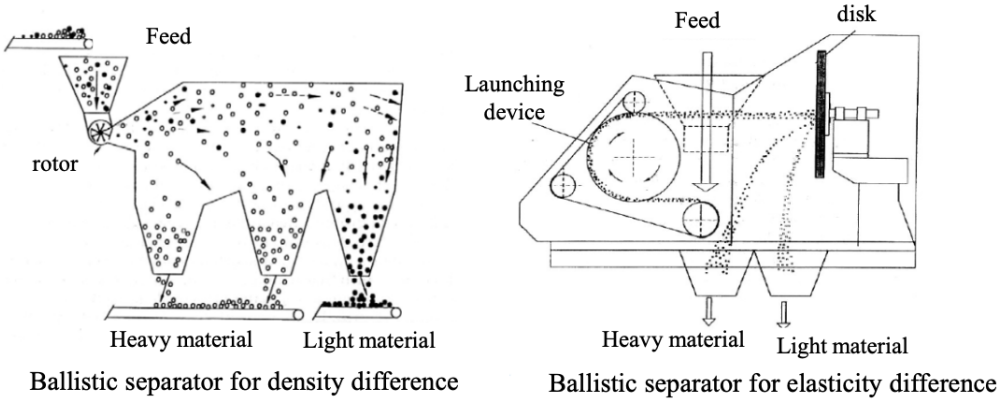


Figure 4.8: Separatore balistico per densità (a sinistra), per elasticità (a destra) [Fonte: Dispense Applied Environmental Engineering; Zanetti]

La separazione magnetica avviene sfruttando le proprietà magnetiche del materiale: la frazione di materiale ferroso presente in un insieme di diversi materiali viene separata per mezzo di magneti permanenti o elettromagneti con efficienze di separazione superiori al 95%. Questi separatori si fondano sulla proprietà chiamata suscettività magnetica μ, in particolare si differenziano materiali:

- ferromagnetici con 0,1 $< \mu < 10^{-4}$
- paramagnetici con $10^{-6} < \mu < 10^{-4}$
- diamagnetici con $\mu < 10^{-6}$

Le principali tipologie di apparecchiature sono del tipo a tamburo o a nastro. Il separatore a tamburo (Figura n.4.9) è costituito da un nastro trasportatore palettato, inclinato, che porta il materiale da separare verso l'estremità a quota più elevata; uno

dei due rulli di traino del nastro (quello più in alto, in corrispondenza della sezione di scarico del materiale) ha al proprio interno il magnete, che attrae il materiale ferroso presente nel prodotto da trattare, facendo in modo che i due flussi, nella caduta, seguano traiettorie differenti; tramite un deviatore opportunamente disposto nella parte sottostante la zona di caduta del materiale, è possibile raccogliere separatamente i materiali.

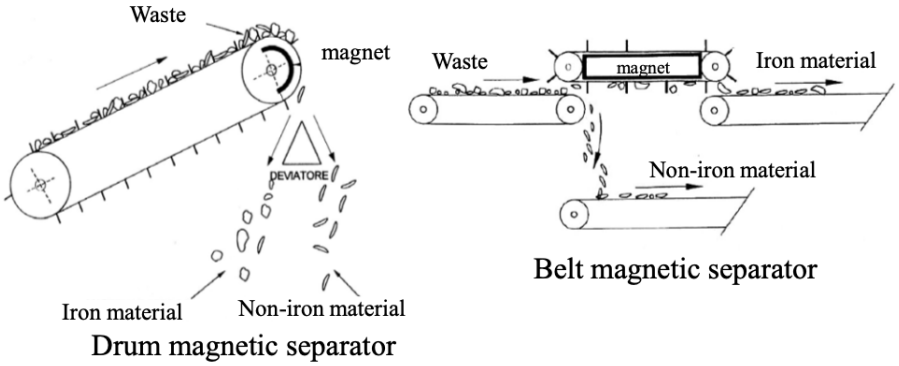


Figure 4.9: Separatore magnetico a tamburo (a sinistra) e a nastro (a destra) [Fonte: Dispense Applied Environmental Engineering; Zanetti]

Nel separatore a nastro il materiale da trattare è movimentato da un trasportatore orizzontale a nastro. In prossimità dell'estremità di scarico è opportunamente disposto, un po' più in alto, un secondo nastro trasportatore, palettato, avente un magnete tra i due rulli di traino. Il materiale ferroso presente nel prodotto da trattare, attratto dal magnete, resta aderente al nastro palettato, e viene trasportato in una zona di raccolta, mentre il materiale non ferroso cade subito all'uscita dal primo nastro. Nel caso si intenda eseguire una separazione più spinta si può ricorrere a separatori a doppio tamburo.

Oltre alla separazione dei metalli ferrosi dal rifiuto, è possibile recuperare i metalli non ferrosi, quali l'alluminio, il rame, l'acciaio inox puro, l'ottone, ecc... Il separatore per metalli non ferrosi è detto anche "a correnti indotte" o ECS (Eddy Current System) e si basa sul principio fisico per cui i componenti metallici, esposti a un campo magnetico ad alte frequenze, sono percorsi da correnti di Foucault, che creano un campo magnetico che si oppone alla causa che l'ha generato: ne risulta una forza di repulsione che tende ad allontanarli dalla sorgente del campo magnetico. Un separatore per metalli non ferrosi del tipo "a rullo induttore" (Figura n.4.11) è configurato un nastro trasportatore che

scorre su due rulli. Il flusso dei materiali mescolati arriva sul nastro a un'estremità e viene smistato in getti distinti all'altra estremità. Qui, all'interno del rullo su cui gira il nastro, si trova l'elemento essenziale del sistema: un rotore che sostiene rigidamente una serie di magneti a barra disposti a raggiera. Il rotore non è fissato al rullo e gira molto più rapidamente. Facendo ruotare i magneti, esso fa variare il campo magnetico nella zona circostante. I corpi non metallici, che non risentono del campo magnetico e delle sue variazioni, quando giungono in fondo al nastro, cadono per gravità in un recipiente; mentre le componenti metalliche subiscono una forza magnetica repulsiva e cadono più lontano, in un recipiente separato.

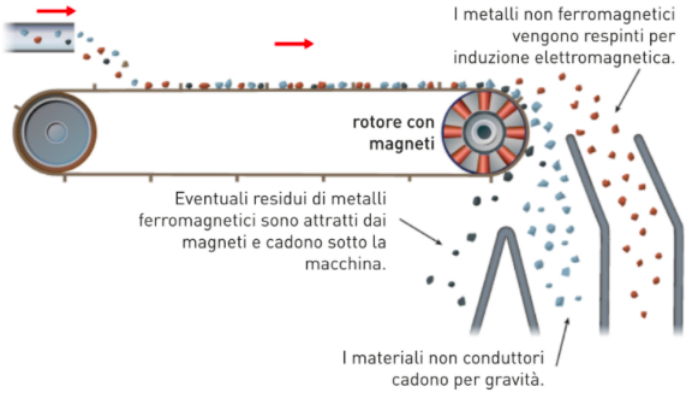


Figure 4.10: Separatore a rullo induttore

RAFFINAZIONE

Per assicurare la qualità dei prodotti in uscita da un trattamento meccanico - biologico, è necessario ricorrere a trattamenti di raffinazione, che risultano essenziali nel caso di sistemi di bioessiccazione, ossia quando il trattamento biologico precede quello meccanico (sistema a flusso unico).

Come si è già accennato, i trattamenti meccanici e biologici possono essere opportunamente combinati in un impianto TMB in modo da ottenere output diversi, pertanto la fase di raffinazione sarà strutturata in funzione del destino del flusso in uscita: smaltimento discarica, ammendante per il suolo, combustibile in impianti dedicati o in impianti industriali. Gli obiettivi dei trattamenti di raffinazione sono:

- rimuovere contaminanti, quali ad esempio vetro e plastica;

- preparare al meglio il rifiuto trattato per gli impieghi successivi attraverso operazioni di selezione e riduzione dimensionale;
- confezionare il prodotto nel caso del CDR tramite sistemi di compattazione: i più comuni prevedono la riduzione in balle, bricchette (blocchetti) o pellets (cilindretti).

Produzione di CDR

La frazione secca derivante dai trattamenti meccanici di triturazione e vagliatura (schema a flusso separato) o da un processo biologico di essiccazione (schema a flusso unico) può essere direttamente inviata a termovalorizzazione oppure, se l'obiettivo dell'impianto TMB è quello di ottenere un combustibile solido (CDR) essere sottoposta ad una serie di trattamenti di raffinazione. I trattamenti cui è sottoposto il sovvallo derivante da operazioni di triturazione e vagliatura primaria, al fine di ottenere un CDR di qualità, sono in genere i seguenti:

1. separazione dei materiali a maggiore densità;
2. separazione dei materiali ferrosi;
3. separazione dei materiali non ferrosi;
4. seconda riduzione dimensionale (50x50mm);
5. addensamento (densità $>$ 300 kg/m^3) o bricchettatura/pellettizzazione (densità $>$ 600 kg/m^3) o semplice pressatura in balle a seconda del tipo di alimentazione del forno di destinazione.

4.2.2 Trattamenti biologici

La scelta tra trattamento aerobico ed anaerobico è influenzata dalla configurazione impiantistica. Nello schema "a flusso separato" (Figura n.4.11) le due correnti vengono ottenute mediante un'operazione di vagliatura denominata "primaria": il sopravaglio o sovvallo consiste di una frazione di materiale secco di grande pezzatura, ricco di componenti ad elevato potere calorifico, mentre il sottovaglio è una frazione di piccola pezzatura, ricca di materiale organico putrescibile, che viene in genere avviata

a trattamento biologico di tipo aerobico, detto biostabilizzazione, concettualmente analogo al compostaggio, ma che conduce alla produzione del "biostabilizzato", materiale dall'utilizzo non normato, di scarsa qualità e la cui unica destinazione finale possibile è spesso la discarica. È tuttavia possibile, nel caso di flusso separato, optare per un trattamento biologico di tipo anaerobico, sia pure con notevoli complicazioni impiantistiche e gestionali. Nello schema a "flusso unico" (Figura n.4.11) il trattamento biologico costituisce la prima operazione, mentre il trattamento meccanico successivo ha il compito di raffinare il prodotto organico stabilizzato, rimuovendo ogni residuo estraneo agli usi finali, come plastica, carta, metalli, vetro, inerti; in questo caso la scelta del trattamento aerobico è obbligata [Fonte: ATOR - Valutazioni sull'applicabilità dei trattamenti meccanico-biologici nel ciclo integrato dei rifiuti urbani della Provincia di Torino, 2009].

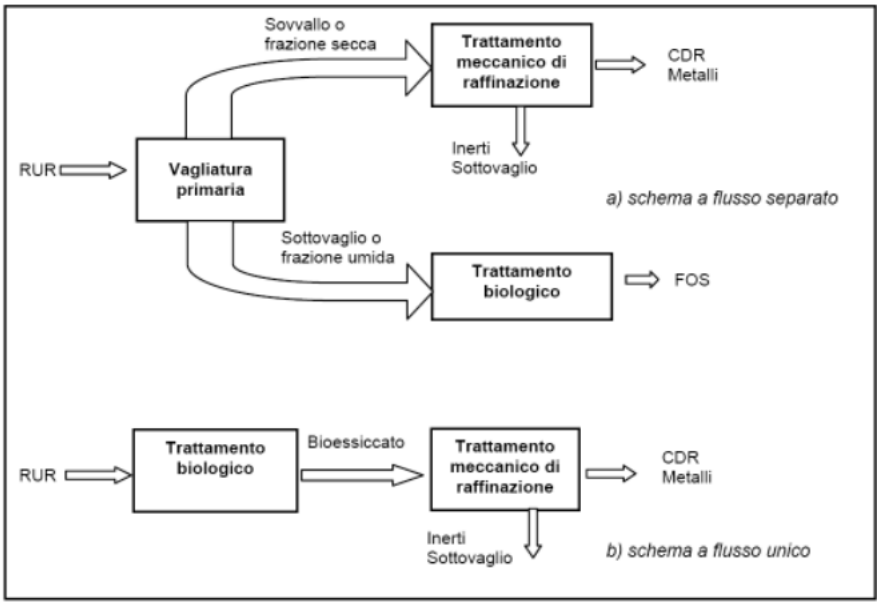


Figure 4.11: Schema delle configurazioni a flusso unico e a flusso separato [Fonte:Elaborazione ENEA]

BIOSTABILIZZAZIONE

La biostabilizzazione, nota anche come MBE (mechanical biological and composting), è uno dei processi maggiormente diffusi in Europa. Lo scopo di un trattamento meccanico biologico dei rifiuti è quello di separare in due frazioni il flusso entrante: una con un alto potere calorifico (RDF) con la quale produrre energia, mentre l'altra, biodegradabile, adatta ad un trattamento biologico, con possibile recupero energetico dal biogas. Il

derivato dal trattamento biologico può essere valorizzato per la gestione e la chiusura di discariche. La stabilità biologica viene raggiunta, come prima evidenziato, mediante un processo a "flussi differenziati", di cui si individuano tre tappe:

- pre-trattamento meccanico: volto a separare la cosiddetta frazione "secca" (sovvallo) dalla frazione umida (sottovaglio) che concentra in sè il materiale organico;

- stabilizzazione della frazione umida: in seguito a processi ossidativi da parte dei microrgansismi, mediante il periodico rivoltamento, aerazione e bagnatura della massa, allo scopo di ottenere un prodotto il più possibile stabile da un punto di vista biologico;

- eventuale post-trattamento meccanico: per la raffinazione del materiale da destinare all'attività di ripristino ambientale o alla copertura giornaliera di discariche.

Nel processo di biostabilizzazione (della durata di circa 4 settimane) dovranno essere tenuti sotto controllo i seguenti fattori:

- la concentrazione di ossigeno e l'areazione;
- la ricerca delle condizioni termometriche ottimali nelle diverse fasi del processo;
- l'umidità, che deve essere sufficiente alle attività microbiche, ma non eccessiva.

I sistemi utilizzati sono i seguenti:

- sistemi aperti o chiusi, a seconda che il processo avvenga all'aperto o in aree chiuse e confinate rispetto all'ambiente esterno (capannoni, tunnel, reattori a tamburo, box) con captazione e trattamento delle arie di processo;
- sistemi statici o dinamici: a seconda che la massa, almeno durante la fase intensiva (termofila), sia o meno soggetta a rivoltamento;
- sistemi aerati o non aerati, a seconda che il processo avvenga con o senza ventilazione forzata (per aspirazione o insufflazione).

Il processo di biostabilizzazione avviene generalmente in sistemi dinamici aerati, ossia con insufflazione di aria forzata all'interno del materiale e suo periodico rivoltamento. Le perdite di processo (anidride carbonica, acqua e altre sostanze gassose in quantità minori) ammontano a circa il 40% della FOP in ingresso; la FOS sarà dunque pari al 60% circa in massa rispetto alla FOP, e circa il 20% rispetto

al rifiuto complessivamente entrante nell'impianto TMB [Fonte: ATOR - Valutazioni sull'applicabilità dei trattamenti meccanico-biologici nel ciclo integrato dei rifiuti urbani della Provincia di Torino, 2009].

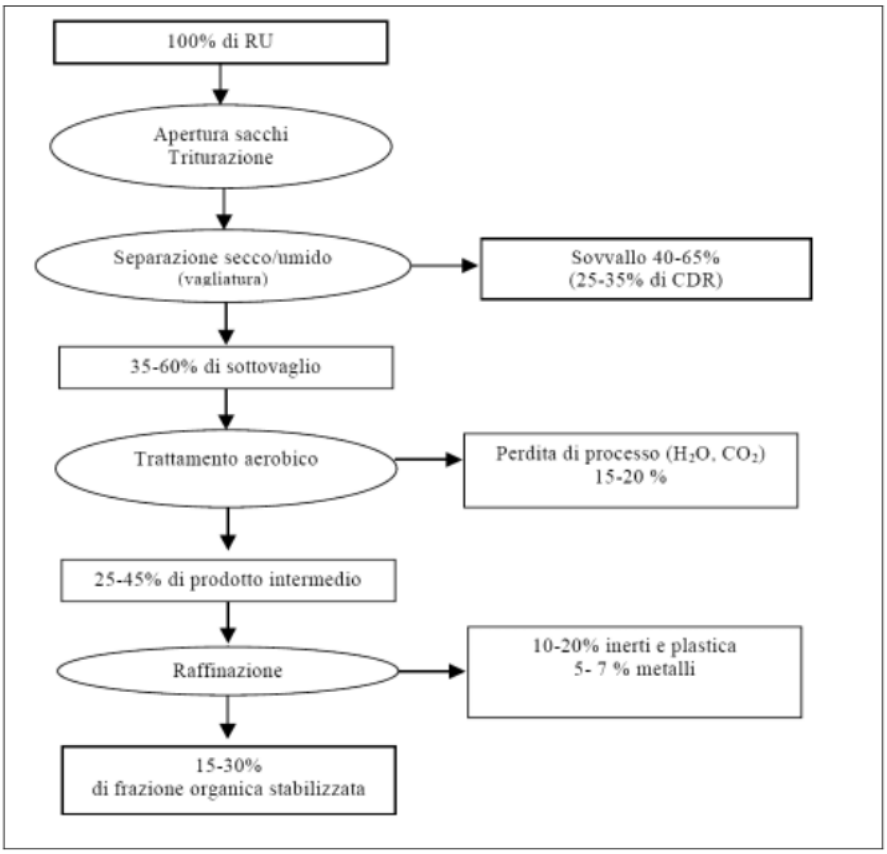


Figure 4.12: Biostabilizzazione: schema di processo e bilancio di massa con metodo a separazione di flusso

BIOESSICCAZIONE

Per quanto concerne invece la bioessiccazione, nota anche come mechanical-biological and stabilate method (MBS); tale processo ha lo scopo primario di ridurre l'umidità del rifiuto in seguito ad una fase di bio-ossidazione della sostanza organica. Inoltre questo processo permette di:

- assicurare la stabilità biologica dei rifiuti per lo stoccaggio a lungo termine, in modo tale da ridurre o eventualmente annullare maleodoranti emissioni di gas e polveri, ed igienizzare il rifiuto;

- produrre un buon substrato per la termoutilizzazione (elevato potere calorifico).

La bioessiccazione viene raggiunta attraverso due stadi principali:

1. triturazione meccanica blanda del rifiuto tal quale, per aumentarne la superficie di evaporazione e di scambio della massa, ottenendo così un'accelerazione dei processi di bioessiccazione;

2. trattamento biologico della matrice precedentemente triturata. Questo stadio avviene a mezzo di aerazione forzata della biomassa, sfruttando il calore sviluppato dalle reazioni biologiche aerobiche. Il materiale bioessiccato, dotato di buon potere calorifico, potrebbe essere sottoposto ad un'ulteriore fase di raffinazione finalizzata a produrre CDR o a effettuare ulteriori recuperi di materiali potenzialmente riciclabili.

Il carbonio contenuto nei rifiuti rappresenta il potenziale energetico; è quindi auspicabile ridurre al massimo la decomposizione della sostanza organica al fine di mantenere elevato il potere calorifico. La stabilizzazione del rifiuto avviene tramite la riduzione del contenuto percentuale di umidità fino a valori del $7 \div 15\%$ (in funzione dell'umidità iniziale); in tali condizioni ogni attività biologica è soppressa e non si ha degradazione. Il prodotto finale è quindi dotato di buon potere calorifico e può essere utilizzato come combustibile (CDR) in impianti di termoutilizzazione.

Dal punto di vista del bilancio di materia, in funzione del contenuto di sostanza organica del RUR, si può osservare una perdita in peso compresa tra il 10 e il 25% circa, rispettivamente per le situazioni con basso (8%) e alto (50%) contenuto di organico, con una durata del processo non superiore a 15 giorni [Fonte: ATOR - Valutazioni sull'applicabilità dei trattamenti meccanico-biologici nel ciclo integrato dei rifiuti urbani della Provincia di Torino, 2009].

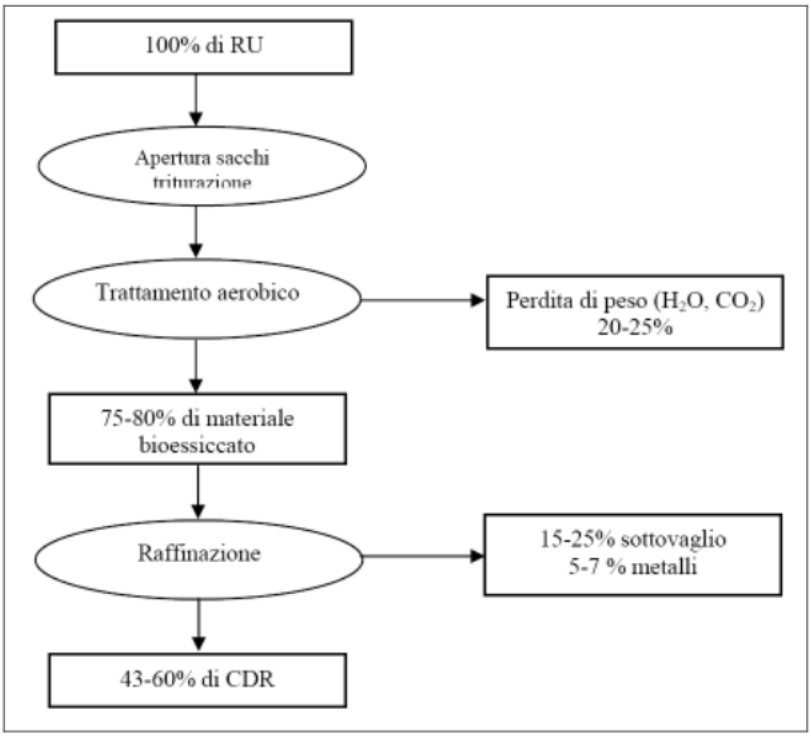


Figure 4.13: Bioessiccazione: schema di processo e bilancio di massa (Linee Guida CITEC).

DIGESTIONE ANAEROBICA

La digestione anaerobica è un processo biologico che avviene in assenza di ossigeno, attraverso cui è possibile conseguire la riduzione del quantitativo di materiale organico biodegradabile e contestualmente la produzione di biogas sfruttabile per il recupero energetico. La digestione anaerobica genera un importante flusso di rifiuto residuo, detto digestato, la cui collocazione è fortemente condizionata dalla qualità del materiale in ingresso, potendo essere destinato allo smaltimento in discarica o trovare impiego come ammendante in agricoltura, dopo una eventuale maturazione aerobica, qualora rispetti i requisiti di qualità imposti dalle norme locali in materia [Fonte: ATOR - Valutazioni sull'applicabilità dei trattamenti meccanico-biologici nel ciclo integrato dei rifiuti urbani della Provincia di Torino, 2009].

A tal proposito, sono diverse le matrici organiche destinabili alla digestione anaerobica, tra cui:

- biomasse agro-industriali;

- frazione organica dei rifiuti urbani (FORSU);
- reflui zootecnici;
- scarti animali;
- fanghi organici di depurazione;
- acque reflue concentrate.

I processi di digestione anaerobica si distinguono in:

- digestione a umido (wet), quando il substrato in digestione ha un contenuto di sostanza secca inferiore al 10%;
- digestione a secco (dry), quando il substrato in digestione ha un contenuto di sostanza secca superiore al 20%.

Processi con valori intermedi di sostanza secca sono meno comuni e vengono in genere definiti a semisecco (semi-dry).

La digestione di tipo wet trae origine dall'applicazione nel campo della depurazione dei reflui civili e industriali e si rivolge principalmente a rifiuti organici con bassa contaminazione, facilmente depurabili e fluidificabili. Di contro, la digestione di tipo dry è stata sviluppata specificatamente per l'applicazione sui rifiuti solidi con elevati indici di contaminazione da plastiche e altri materiali non biodegradabili, quali RSU e FORSU.

Le fasi del processo di digestione anaerobica sono schematizzate in Figura n.4.14

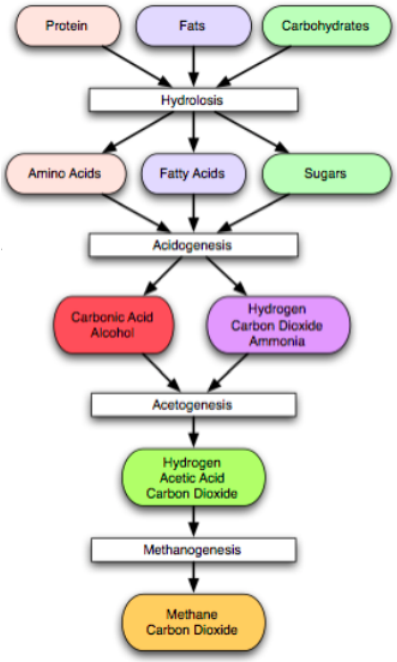


Figure 4.14: Percorso biochimico di trasformazione dei substrati organici in biogas

Questo genere di processi vengono condotti in ambienti isolati e controllati al fine di mantenere le condizioni ottimali per il corretto sviluppo dei batteri responsabili della degradazione nelle sue diverse fasi. Sono dunque da tenere sotto controllo alcuni fattori chimico-fisici che influiscono in modo rilevante sull'attività batterica, quali temperatura, pH, alcalinità ed anche sostanze tossiche e fattori inibitori.

TEMPERATURA

Il regime termico entro cui i batteri svolgono la propria funzione è di estrema importanza, per tale ragione è possibile individuare tre distinti campi di temperatura, ognuno caratterizzato da ben distinti gruppi batterici attivi:

- batteri psicrofili, operanti a temperature inferiori ai 20°C;

- batteri mesofili, operanti a temperature comprese fra i 20 ed i 40°C;

- batteri termofili, operanti a temperature superiori ai 45°C (generalmente non superiori ai 60°C).

Contestualmente si parla di digestione psicrofila, mesofila e termofila dipendentemente

dalla temperatura di digestione attuata. Quando si passa da un regime termico ad un altro si osserva un vero e proprio cambiamento nella composizione della comunità batterica. Inoltre, in ciascuno dei tre campi di temperatura esiste un valore ottimale che corrisponde per la digestione psicrofila a 20°C, per la mesofila a 36°C e per la termofila a 55°C.

La temperatura influenza significativamente, in ciascuno di questi tre campi, la velocità di digestione; tale correlazione è rappresentata dalla nota equazione di Arrhenius modificata:

$$(r_s)_T = (r_s)_{20C} \cdot \theta^{(T-20)} \tag{4.1}$$

dove $(r_s)_T$ è la velocità di digestione anaerobica alla temperatura generica T (mg/ l h), $(r_s)_{20C}$ è la velocità di digestione alla temperatura di riferimento, 20°C (mg/ l h), T è la temperatura di digestione (°C) e θ è una costante adimensionale.

Pertanto all'aumentare della temperatura corrisponde un aumento della velocità di digestione e dunque vale la regola generale secondo cui la digestione in fase termofila determina una più favorevole cinetica di processo e maggiori rese di produzione del biogas, rispetto alla digestione in fase mesofila e ancor più psicrofila. Inoltre, il livello di temperatura mantenuto in digestione termofila consente anche una riduzione più efficace degli agenti patogeni eventualmente presenti nella matrice organica; questa condizione non è tuttavia esente da svantaggi. Infatti, la digestione in condizione mesofili è maggiormente stabile e più tollerante alle variazioni microambientali, comportando minori problemi gestionali ed essendo dunque la più applicata.

PH

Per il buon decorso del processo di digestione anaerobica il pH deve mantenersi nell'intorno della neutralità. Infatti, la metanogenesi, considerata la fase più sensibile, rallenta per valori di pH inferiori o superiori al range 6,5 ÷ 7,8. La fermentazione acida è invece meno sensibile alle variazioni di pH. Proprio per questa differente sensibilità, un problema frequente è il prevalere della fase di acidogenesi con conseguente inacidimento del processo e blocco della metanogenesi. Diviene fondamentale allora la misura del pH in sede di esercizio per l'andamento del processo.

Un parametro che viene utilizzato per monitorare lo stato del digestore da un punto di vista della stabilità del pH è il $\frac{FOS}{TAC}$, definito come il rapporto tra la concentrazione degli acidi grassi volatili e l'alcalinità. Gli acidi grassi volatili si generano nella fase di acidogenesi: un aumento di tali acidi determina una riduzione del pH nel sistema, con conseguente inibizione dei batteri addetti alla produzione del metano, determinando ulteriormente un'acidificazione dell'intero sistema stesso.

ALCALINITA'

L'alcalinità rappresenta notoriamente il potere tampone del mezzo, ovvero la capacità di neutralizzare protoni H^+. Maggiore è dunque l'alcalinità in digestione, minore è il rischio di inacidimento. Valori di alcalinità dell'ordine di 3.000-5.000 $mgCaCO_3/l$ sono tipici di digestori anaerobici operanti in condizioni stabili. I benefici di un'elevata alcalinità del mezzo si rilevano soprattutto in occasione di significativi incrementi del carico organico in ingresso al digestore i quali si rendono causa di un forte aumento delle attività idrolitiche e acidificanti, con alta produzione di acidi grassi volatili (AGV) e conseguente rallentamento delle attività metanigene.

SOSTANZE TOSSICHE E FATTORI DI INIBIZIONE

La tipologia della matrice organica può fornire informazioni sommarie sulle caratteristiche dei substrati organici alimentati in digestione, come anche sulla concentrazione di nutrienti ed elementi tossici o inibenti. Sicuramente un parametro importante è il rapporto carbonio/azoto C/N, il quale deve soddisfare le esigenze biochimiche della popolazione batterica: un valore ottimale è C/N= 25-30.

Vi sono poi diversi elementi che, se in concentrazioni eccessive, possono inibire l'attività batterica come:

1. zolfo e suoi composti: questo elemento è fondamentale come macronutriente per le cellule batteriche, ma al contempo può determinare tossicità ed inibizione per concentrazioni elevate. La concentrazione limite per i solfuri al fine di non rallentare il processo di metanogenesi è di 200 mg/l;
2. ammoniaca, derivata dalla digestione anaerobica dei substrati organici che può essere presente come gas disciolto NH_3) o come ione ammonio (NH_4^+) in soluzione. Le due forme sono in equilibrio tra loro con prevalenza della prima

in campo basico e della seconda in campo acido. Entrambe le forme però possono inibire il processo di digestione: è stato osservato che concentrazioni di azoto ammoniacale comprese nel range 1.500-3.000 mg/l con pH inferiore a 7,4 sono in grado di inibire la metanogenesi. Se invece la concentrazione oltrepassa la soglia di 3.000 mg/l l'effetto tossico si manifesta per qualsiasi valore di pH;

3. metalli pesanti: la tossicità degli ioni metallici è determinata dalla loro capacità di interagire con il gruppo solfidrilico (-SH) contenuto negli enzimi, determinandone l'inattività;

4. salinità: in letteratura sono indicati effetti inibenti a partire da concentrazioni saline di circa 10.000 mg/l.

4.3 Valutazione delle emissioni di CO_2 secondo due differenti scenari

In questo paragrafo si riporta uno studio della Giunta Provinciale di Torino relativo alla Fase di scoping della Valutazione Ambientale Strategica (VAS) di cui al D.lgs 152/06 e s.m.i e L.R. 40/98 e s.m.i. Tale documento prende in considerazione quattro possibili scenari impiantistici su cui effettuare l'analisi definiti per far fronte al fabbisogno di smaltimento complessivo della Provincia di Torino. Questi scenari sono:

(a) SCENARIO A: prevede, insieme al Termovalorizzatore del Gerbido della potenzialità di 421.000 t/a (al momento dello studio ancora in fase di realizzazione), un secondo impianto di termovalorizzazione come previsto nel PPGR2006;

(b) SCENARIO B: Termovalorizzatore del Gerbido e impianti di trattamento termico a tecnologia innovativa;

(c) SCENARIO C: ampliamento dell'impianto di termovalorizzazione del Gerbido;

(d) SCENARIO D: prevede un trattamento TMB, cioè trattamento meccanico del rifiuto preventivo alla successiva termovalorizzazione (della frazione secca) e digestione anaerobica (della frazione umida).

Nell'ambito del presente studio si sono inoltre effettuate alcune valutazioni inerenti il bilancio della CO_2, espressa come t CO_2/t rifiuto trattato e come t CO_2/MWh di energia prodotta, parametri che costituiranno il metro di paragone fra due differenti sistemi di gestione del rifiuto. Uno scenario che prevede il solo incenerimento di tutto il rifiuto indifferenziato, la cui elaborazione è riportata nel Capitolo 3, ed il secondo scenario, in particolare lo scenario D, che prevede dei trattamenti di tipo meccanico biologico dai quali si ottengono due flussi: una frazione secca inviata ad incenerimento assieme al flusso di sovvalli tecnici ed una frazione umida inviata a digestione anaerobica.

Come base per lo studio sono stati i seguenti quantitativi stimati a regime (2015):

- 470.000 t/anno di rifiuto urbano residuo alla raccolta differenziata (RUR);

- 70.000 t/anno di sovvalli tecnici (scarti derivanti dal recupero delle frazioni raccolte separatamente).

In particolare nello scenario D che prevede i TMB si è assunto di inviare a trattamento di separazione meccanica la quota di rifiuto che residua dalla raccolta differenziata (470.000 t/a). Per ciò che concerne invece la digestione anaerobica si sono valutate due alternative:

- digestione anaerobica a secco ("dry", tecnologia OWS - Dranco in quanto ritenuta la più consolidata nel settore);
- digestione anaerobica a umido ("wet", tecnologia: ArrowBio, Valorga e BTA in quanto dotate di sistema Hydropulper a monte del digestore).

Per l'ottenimento di questi dati si è assunta come composizione del rifiuto residuo della Provincia di Torino quella stimata al 2008 e riportata nel "Rapporto sullo stato del sistema di gestione dei rifiuti, 2009" dell'Osservatorio Provinciale dei Rifiuti, con le voci opportunamente aggregate al fine di poter ricavare la percentuale di Carbonio della frazione (Tabella n.4.1).

Tabella 4.1 Composizione merceologica del rifiuto

Frazione merceologica	% sul RUR	% di Carbonio tal quale
Carta	25 %	45%
Cartone	7 %	44%
Tessili	5 %	52%
Legno	1 %	50%
Plastica (mat. platico)	19 %	62%
Vetro ed inerti	9 %	3%
Metalli	3 %	5%
Organico domestico	22 %	48%
Sfalci e potature	2 %	47%
Sottovaglio	5 %	26%

Per quanto concerne invece le emissioni di CO_2, si sono considerati distintamente tre diversi flussi, ognuno dei quali generante emissioni:

- Separatore meccanico → per valutare la CO_2 emessa dall'impianto è stata effettuata la seguente valutazione: il trattamento di separazione meccanica richiede un quantitativo di energia elettrica pari a 100 kWh/t. Conoscendo la CO_2 emessa per ogni kWh prodotto (675 gCO_2/ kWh) è possibile calcolare il quantitativo di CO_2 emesso per il trattamento di selezione meccanica, che risulta pari a 67,5 kg CO_2/t rifuto;
- Incenerimento → per il flusso di secco avviato a incenerimento si è ipotizzato che tutto il carbonio contenuto nel rifiuto sia ossidato a CO_2.
- Digestione anaerobica → si sono considerati in uscita dal digestore due flussi: il biogas ed il digestato. Nello studio si è ipotizzato che tutto il metano presente nel biogas prodotto (e pari al 60% in peso) venga ossidato a CO_2. Per quanto riguarda il digestato, si è escluso di poterlo destinare ad uso agronomico per via di rigorosi requisiti di qualità imposti dalla normativa vigente che non sono in genere rispettati dal prodotto derivante da frazione organica selezionata meccanicamente. Si è scelta come destinazione per il digestato la discarica, escludendo la destinazione termica a causa del contenuto d'acqua considerevole in esso contenuto, che andrebbe a peggiorare sensibilmente le condizioni di combustione; si presenterebbe in questo caso la necessità di un pretrattamento di essiccazione. La collocazione del digestato in discarica comporta che una percentuale di carbonio pari al 10% venga trattenuta dal terreno e il restante quantitativo di carbonio in esso contenuto sia ossidato a CO_2.

Definiti i parametri di base dello studio si riportano i risultati ottenuti nella seguente Tabella riassuntiva

	SCENARIO A	SCENARIO B	SCENARIO C	SCENARIO D			
				ArrowBio	OWS	Valorga	BTA
Totale Energia prodotta [MWh]	1.087.619	1.062.779	1.087.619	966.543	1.092.159	927.570	878.852
Totale CO2 prodotta [t]	841.812	841.812	841.812	853.522	866.408	850.501	846.725
Produzione di CO2 per unità di rifiuto trattata [t CO2 / t rif]	1,56	1,56	1,56	1,58	1,60	1,58	1,57
Produzione di CO2 per unità di energia prodotta [t CO2 / MWh]	0,77	0,79	0,77	0,88	0,79	0,92	0,96
Totale CO2 evitata [t]	365.673	357.321	365.673	338.773	375.504	322.762	302.749
Produzione di CO2 per unità di rifiuto trattata* [t CO2 / t rif.]	0,88	0,90	0,88	0,95	0,91	0,98	1,01
Produzione di CO2 per unità di energia prodotta* [t CO2 / MWh]	0,44	0,46	0,44	0,53	0,45	0,57	0,62

Il calcolo tiene conto della CO_2 evitata per via della produzione di energia elettrica e termica

Figure 4.15: Bilancio della CO_2

4.3.1 Conclusioni

Nella Figura 4.16 sono riportati i risultati ottenuti secondo i due differenti scenari di gestione.

Sulla base dei calcoli effettuati e dei dati riportati è possibile affermare che non sussistano vantaggi a favore dei processi di trattamento meccanico-biologico: per i processi selezionati i parametri sono paritari o in alcuni casi persino peggiorativi rispetto allo scenario che prevede l'incenerimento diretto (si veda ad esempio il Piemonte). La regione che risulta essere meno virtuosa in termini di emissioni di CO_2 è il Friuli Venezia Giulia, i cui fattori di emissione risultano in ogni caso pari alla tecnologia BTA. Con riferimento ad una tonnellata di rifiuto di partenza il sistema BTA fornisce una prestazione sostanzialmente paragonabile, in termini di emissione di CO_2, a quella che prevede il trattamento solo termico per la regione del Friuli, ma peggiorativa per tutte le altre regioni. Stesso risultato si ottiene considerando la produzione di 1 MWh di energia. Il Piemonte invece

Bilancio della CO_2 derivante da TMB+Incenerimento

TMB+INCENERIMENTO				
SCENARIO D				
	Arrow Bio	OWS	Valorga	BTA
Totale Energia prodotta [MWh]	966.543	1.092.159	927.570	878.852
Totale CO_2 prodotta	853.522	866.408	850.501	846.725
t CO_2 / t rif	1,58	1,60	1,58	1,57
t CO_2 / MWh	0,88	0,79	0,92	0,96
Totale CO_2 evitata	338.773	375.504	322.762	302.749
t CO_2 / t rif	0,95	0,91	0,98	1,01
t CO_2 / MWh	0,53	0,45	0,57	0,62

Bilancio della CO_2 derivante dal solo incenerimento

INCENERIMENTO						
	Piemonte	Lombardia	Trentino Alto Adige	Veneto	Friuli Venezia Giulia	Emilia-Romagna
Totale Energia prodotta [MWh/a]	1.453.692,8	4.583.506	252.016	520.032	242.703	1.983.612
Totale CO_2 prodotta	927.745	3.811.530	206.924	380.560	238.028	1.572.637
t CO_2 / t rif	1,65	1,58	1,61	1,58	1,61	1,43
t CO_2 / MWh	0,64	0,83	0,82	0,73	0,98	0,79
Totale CO_2 evitata [t/a]	518.257	1.634.085	89.847	185.393	86.526	707.177
t CO_2 / t rif	0,73	0,91	0,91	0,81	1,02	0,79
t CO_2 / MWh	0,28	0,47	0,46	0,37	0,62	0,43

Figure 4.16: Confronto fra diversi scenari di gestione del rifiuto

risulta essere la regione più virtuosa sotto questo punto di vista ed ogni tipo di tecnologia (Arrow Bio, Valorga, BTA, OWS) risulta sfavorevole.

Chapter 5

Accenni ai cambiamenti climatici

Il cambiamento del clima globale viene considerato la maggiore minaccia per l'ambiente a livello mondiale con effetti sugli esseri umani, sugli animali e sugli ecosistemi.

Con il termine cambiamento climatico solitamente ci si riferisce alle variazioni nello stato del clima che possono essere identificate da cambiamenti rispetto alla media e/o dalla variabilità delle proprietà dello stato climatico stesso, che persistono per un periodo esteso, tipicamente dell'ordine delle decine, o anche centinaia, di anni. Il termine in analisi si riferisce a qualsiasi cambiamento del clima nel tempo, che sia dovuto a variabilità naturale o sia conseguenza di attività antropiche. Questa definizione, tuttavia, non è universalmente adottata; talvolta, infatti, si preferisce distinguere tra cambiamento climatico, attribuito alle sole cause antropiche dirette o indirette, e variabilità climatica, attribuita alle sole cause naturali.

Nel tempo la quantità totale di energia solare che giunge sulla superficie terrestre dovrebbe essere circa la stessa che viene re-immessa nello spazio, mantenendo la temperatura terrestre approssimativamente invariata, ci sono tuttavia alcune cause naturali che scatenerebbero cambiamenti climatici nel nostro pianeta. Queste cause sono ad esempio le variazioni delle emissioni solari, della composizione atmosferica, delle correnti oceaniche o dell'orbita terrestre; queste possono modificare la distribuzione dell'energia e il bilancio radiativo terrestre,

alterando il clima. Variazioni nelle concentrazioni di gas serra in atmosfera e nell'irraggiamento solare alterano il bilancio energetico del sistema climatico e sono fattori scatenanti in termini di cambiamenti climatici, poiché influenzano assorbimento, scattering ed emissione della radiazione all'interno dell'atmosfera e nei pressi della superficie del pianeta Terra. Le risultanti variazioni nel bilancio energetico, positive o negative che siano, sono espresse in termini di forzante radiativa [1], la quale è generalmente utilizzata per confrontare le influenze che riscaldamento o raffreddamento globali hanno sul clima.

Alla variabilità climatica, come si è accennato in precedenza, concorrono alcune forzanti naturali:

- variazioni dell'orbita terrestre e dell'asse di rotazione. Alcuni cambiamenti nel moto e nell'orientamento modificano infatti la quantità di radiazione solare che raggiunge la Terra, oltre alla sua distribuzione sulla superficie terrestre. Questo fenomeno è chiamato forcing solare o forzatura solare (un tipo di forcing radiativo). Sono effetti ciclici che cambiano le condizioni di esposizione della superficie terrestre al flusso solare e prendono il nome di cicli di Milanković. Si tratta di variazioni climatiche su scala di centinaia e decine di migliaia di anni;

- variazioni della radiazione solare e delle macchie solari. Recenti studi dimostrano che anche un piccolo aumento di attività solare influenza in maniera determinante l'area tropicale e le precipitazioni di tutto il globo terrestre. In particolare gli effetti di una maggiore attività solare si fanno sentire in maniera preponderante nel riscaldamento della troposfera tropicale, nell'aumento della forza dei venti, nell'aumento dell'annuvolamento e delle precipitazioni;

- effetto serra naturale. Si tratta di un fenomeno naturale dovuto alla presenza in atmosfera di gas serra, i quali assorbono la radiazione infrarossa proveniente dalla Terra che incide su di essi;

[1] Il forzante radiativo è la misura dell'influenza di un fattore, quale ad esempio l'aumento dell'anidride carbonica nell'atmosfera, nell'alterare il bilancio di energia entrante ed uscente nel sistema terra-atmosfera. Esso è un indice dell'importanza di un fattore come un possibile meccanismo di cambiamento climatico. Un forzante radiativo positivo tende a scaldare la superficie terrestre, viceversa, un forzante negativo tende a raffreddarla. Il forzante radiativo viene espresso in W/m^2.

- albedo. È la frazione di energia solare che viene riflessa nello spazio, senza essere assorbita dal pianeta. Quello della Terra è pari a circa 0.3 (30%) e buona parte della riflessione è imputabile alle nubi, la cui formazione è favorita dagli aerosol presenti in aria;
- eventi eccezionali. Si tratta di fenomeni che cambiano le proprietà dell'atmosfera terrestre su scala globale, poiché immettono in aria (troposfera e stratosfera) elevate quantità di polveri e gas che modificano l'assorbimento della radiazione solare nei pressi della superficie del pianeta o nell'atmosfera stessa. Tra questi si annoverano eruzioni vulcaniche ed impatti di corpi celesti con la Terra.

Tuttavia, si ritiene che i cambiamenti climatici registrati a livello globale siano principalmente di origine antropica, determinati ad esempio dall'utilizzo di combustibili fossili, provocando una grande impennata nella concentrazione atmosferica di gas come CO_2 e metano, dall'allevamento intensivo di bestiame, ed infine dal ricorso a colture a sommersione (per esempio il riso). Anche prodotti di sintesi, quali i clorofluorocarburi (CFC) ed i perfluorocarburi, contribuiscono, oltre al noto problema del buco dell'ozono, all'intensificazione dell'effetto serra.

5.1 Il ruolo della CO_2

Responsabili di questo fenomeno, detto effetto serra poichè determina un "intrappolamento" di calore, sono alcuni gas presenti in atmosfera (GHG= GreenHouse Gasses quali N_2O, CH_4, CFC, ecc...), prima fra tutti l'anidride carbonica. Questa viene prodotta in piccola parte nel corso di processi naturali quali la respirazione di animali e piante, la decomposizione di organismi morti da parte di batteri decompositori, le emissioni vulcaniche, ecc.. Tuttavia la CO_2 viene immessa in atmosfera, in misura assai più rilevante, attraverso processi artificiali, quali processi di combustione di sostanze contenenti carbonio (combustibili derivati da petrolio, carbonio, gas naturale, legna, rifiuti organici) ed attività industriali. Ad aumentare l'accumulo di anidride carbonica nell'atmosfera ha un forte peso la deforestazione, poichè essa riduce l'effetto della funzione della clorofilliana, determinando un eccesso di diossido di carbonio atmosferico.

L'influenza antropica sul sistema climatico è chiara: le recenti emissioni antropiche di gas serra longevi sono le più elevate mai verificatesi nella storia del pianeta Terra ed i conseguenti effetti sono stati la causa dominante del riscaldamento globale osservato a partire da metà del XX secolo. Sebbene le attività umane abbiano determinato un innalzamento dei livelli atmosferici di numerosi gas serra, l'attenzione è rivolta soprattutto all'incremento di CO_2. La concentrazione di questo gas infatti è aumentata più del 30% negli ultimi 100 anni, come dimostrano i risultati del monitoraggio iniziato nel 1958 nelle Hawaii, a Mauna Loa, parte della Scripps Institution of Oceanography (Figura n.5.1). I dati precedenti alle misure dirette vengono stimati con numerose tecniche, inclusa l'analisi delle bolle d'aria intrappolate nei ghiacciai in Groenlandia e in Antartide.

Prendendo in considerazione gli ultimi 300 anni, fino alla metà del 1800 si sono osservati valori di CO_2 atmosferica compresi tra 280 e 290 ppm (Figura n.5.2), mentre dalla rivoluzione industriale in poi il valore è aumentato costantemente, con un andamento esponenziale a partire dal 1950 circa. Come si osserva dalla figura si passa dai 314 ppm (parti per milione) del 1958 ai 334 ppm del 1978, corrispondenti ad un aumento netto di 42 miliardi di tonnellate di diossido di carbonio atmosferico.

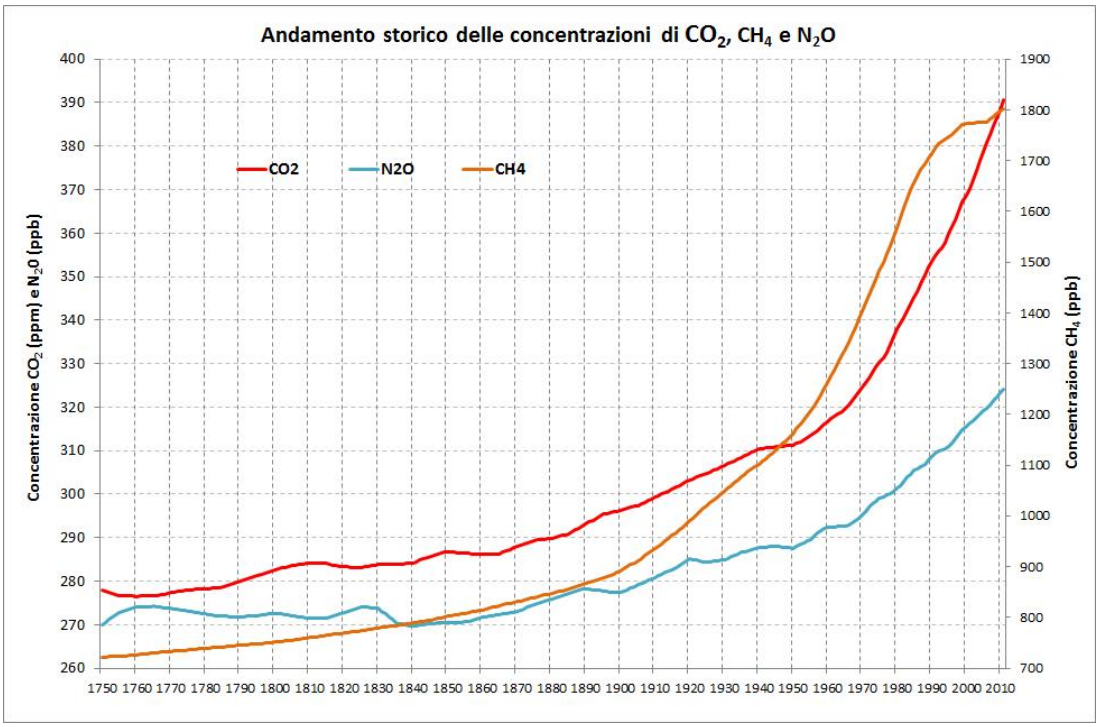


Figure 5.1: Andamento delle concentrazioni medie globali di alcuni gas serra; IPCC, 2013. I dati precedenti alle osservazioni dirette (dal 1958 ad oggi) sono stimati attraverso diverse tecniche, compresa l'analisi dell'aria intrappolata negli strati di ghiaccio dell'Antartide.

L'impennata è da mettere in relazione con l'utilizzo dei combustibili fossili da parte dei Paesi industrializzati per la produzione di energia. Nel 2008, oltre il 70% delle emissioni totali di CO_2 proveniva dall'impiego dei combustibili fossili nei Paesi sviluppati. Nel 2006 la Cina ha superato gli Stati Uniti d'America come Paese maggiormente responsabile di emissioni. Nel 2009, dati CDIAC (Carbon Dioxide Information Analysis Center) indicano la Cina come responsabile del 25.5% del totale di emissioni globali, seguita dagli Stati Uniti con il 17.5% (Figura n.5.3). Tuttavia questi ultimi continuano a primeggiare nelle emissioni di carbonio pro-capite, con 17 tonnellate l'anno per persona (in Cina 5.8). L'Italia genera l'1.3% delle emissioni totali (6.6 tonnellate annue pro capite).

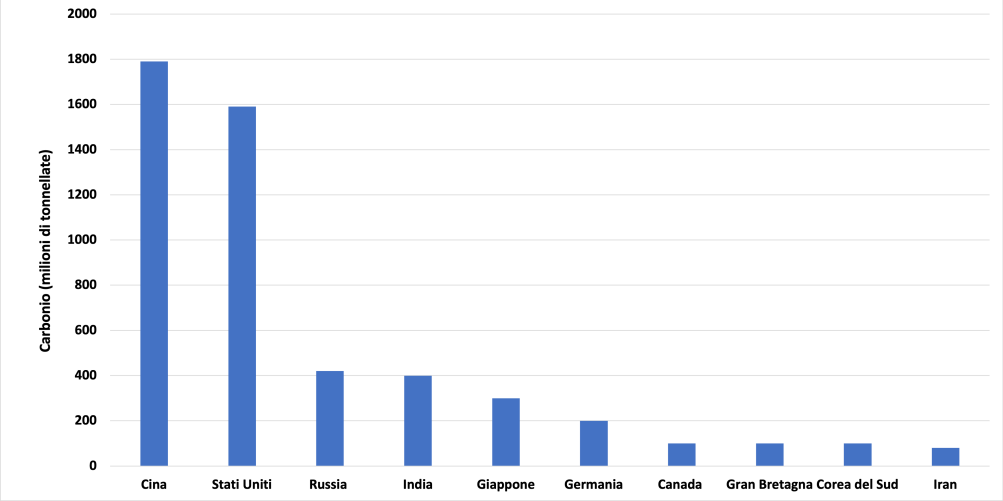


Figure 5.2: Emissioni di carbonio dovute all'uso di combustibili fossili nei 10 Paesi principali responsabili di emissioni nel 2008 [Fonte:DOE-CDIAC 2009]

5.2 Conseguenze

Allo stato attuale non si è ancora del tutto in grado di individuare con chiarezza quali possano essere le conseguenze, soprattutto sul piano climatico, dell'incremento delle concentrazioni di CO_2 nell'atmosfera stessa. Le ipotesi formulate dai ricercatori si basano su modelli matematici e simulazioni computerizzate, tuttavia è la mancanza di dati certi che determina la difficoltà maggiore nell'esprimere un giudizio e che divide la comunità scientifica, specie in relazione a fenomeni di lunga durata. In ogni caso, alcuni effetti dei cambiamenti climatici sul nostro Pianeta sono già attualmente osservabili e infatti il Sesto Rapporto del Gruppo Intergovernativo sui Cambiamenti Climatici (IPCC) del 2021 afferma che ≪ si sono verificati cambiamenti diffusi e rapidi nell'atmosfera, nell'oceano, nella criosfera e nella biosfera ≫.

Per esempio tra le conseguenze dirette del cambiamento climatico causato dall'uomo vi sono:

- aumento delle temperature massime;
- aumento delle temperature minime;
- aumento del livello del mare;

- aumento delle temperature dei mari;
- aumento di eventi estremi (precipitazioni, cicloni, inondazioni, ecc..);
- aumento dell'aridità e della siccità;
- diminuzione e ritiro dei ghiacciai;
- scioglimento del permafrost.

Tra le conseguenze indirette del cambiamento climatico che interessano in primis noi uomini ma anche l'ambiente vi sono:

- aumento delle carestie alimentari e idriche, soprattutto nei Paesi in via di sviluppo;
- minaccia ai mezzi di sussistenza a causa delle inondazioni e degli incendi boschivi;
- rischi per la salute dovuti all'aumento della frequenza e dell'intensità delle ondate di caldo;
- perdita della biodiversità dovuta a una minore adattabilità e velocità di adattamento di flora e fauna, acidificazione degli oceani come conseguenza dell'aumento delle concentrazioni di CO_2.

ACIDIFICAZIONE DEGLI OCEANI

L'acidificazione degli oceani è causata da un aumento dell'anidride carbonica atmosferica che viene assorbita dall'acqua. Sebbene il carbonio sia un elemento costitutivo naturale praticamente per tutte le forme di vita, diventa dannoso quando viene immesso in quantità maggiori di quanto il sistema possa assorbire. La CO_2 con l'acqua origina reazioni chimiche che formano l'acido carbonico, il quale a sua volta si scompone in ioni idrogeno, con conseguente diminuzione del pH, creando un ambiente più acido. È stato stimato che tra il 1751 e il 1994, il pH superficiale delle acque oceaniche si sia abbassato da 8,2 a 8,1 con un corrispondente aumento della concentrazione di ioni H^+ pari al 26%.

AUMENTO DELLA TEMPERATURA

Molti degli incrementi di temperatura media globale osservati a partire dal 1950

paiono strettamente correlati con l'aumento della concentrazione di gas serra dovuto a forzanti antropiche. Il riscaldamento globale diffuso di atmosfera ed oceano, assieme allo scioglimento dei ghiacci, supporta la conclusione secondo la quale esiste una bassissima probabilità che il cambiamento climatico degli ultimi settant'anni possa essere spiegato senza introdurre forzanti esterne, ed una buona probabilità che non sia dovuto alle sole cause naturali.

Secondo alcune valutazioni, se la concentrazione di CO_2 dovesse raddoppiare rispetto ai valori di un secolo fa e secondo gli attuali tassi di immissione, si verificherebbe un aumento di 2°C della temperatura media terrestre. Inoltre, va considerato che l'azione di altri gas serra legati all'attività umana (N_2O, CH_4, CFC, ecc...) rafforzano sensibilmente l'effetto serra, accelerando il processo di riscaldamento globale. Le conseguenze di tale aumento risultano drammatiche per l'ambiente e per lo stesso genere umano, provocando una parziale fusione dei ghiacci polari, innalzamento dei livelli del mare, intensificazione del tasso di evaporazione dell'acqua della superficie terrestre con probabile aumento della nuvolosità.

EFFETTI SULLA SALUTE UMANA

I cambiamenti climatici influiranno anche sulla salute umana, con conseguenze dirette, come stress da calore, asma, patologie respiratorie, ma anche indirette, come una maggiore incidenza di malattie trasmissibili, un aumento di morti e feriti a seguito di disastri naturali (inondazioni, uragani, ecc...) e variazioni nella dieta e nella nutrizione connesse ai cambiamenti nella produzione agricola. Anche la diffusione ed il tasso di trasmissione di numerose malattie infettive subiranno gli effetti delle alterazioni climatiche; le infezioni sono determinate nell'uomo essenzialmente da agenti patogeni come virus, batteri e protozoi. Gli insetti che fungono da vettori per questi agenti patogeni si sono adattati a vivere e a riprodursi in ecosistemi particolari e mostrano una tolleranza specifica a determinate condizioni di umidità e temperatura [Fonte: Smith, Thomas M and Smith, Robert L (2007) - Elementi di ecologia].

Di seguito si riportano alcune immagini concernenti la variabilità nel tempo di alcuni parametri, quali temperatura media globale (Figura n.5.4), temperatura superficiale degli oceani (Figura n.5.5), siccità (Figura n.5.6).

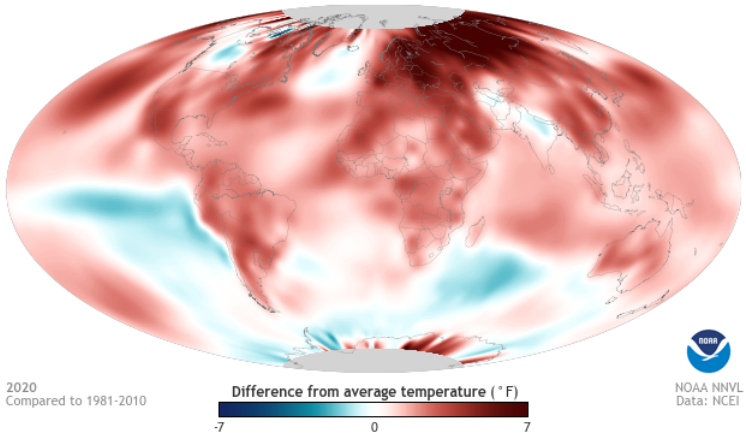


Figure 5.3: Variazioni nella temperatura rispetto alla temperatura media registrata nel periodo dal 1981 al 2010. Le sfumature in rosso rappresentano una temperatura media annuale più alta della media dal 1981 al 2010, mentre le sfumature in blu mostrano dove la media annuale era più bassa. Più scuro è il colore, maggiore è la differenza rispetto alla temperatura media. Le aree bianche indicano una temperatura sostanzialmente invariata. Le aree grigie vicino ai poli nord e sud indicano mancanza di dati. [Fonte: NOAA's Environmental Visualization Lab (NNVL), 2020]

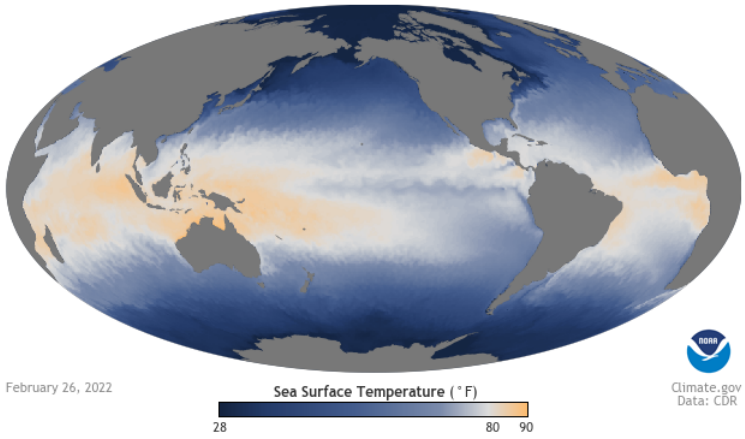


Figure 5.4: Temperatura superficiale degli oceani. I colori sulla mappa mostrano la temperatura dell'acqua proprio sulla superficie dell'oceano. Il blu più scuro mostra l'acqua più fredda: in queste zone è solitamente presente ghiaccio marino galleggiante. Tonalità più chiare di blu mostrano temperature fino a 80°F. Le aree bianche e arancioni mostrano dove le temperature superficiali sono superiori a 80°F, abbastanza calde da alimentare cicloni o uragani tropicali. [Fonte: NOAA's Climate Data Records Program, 2022]

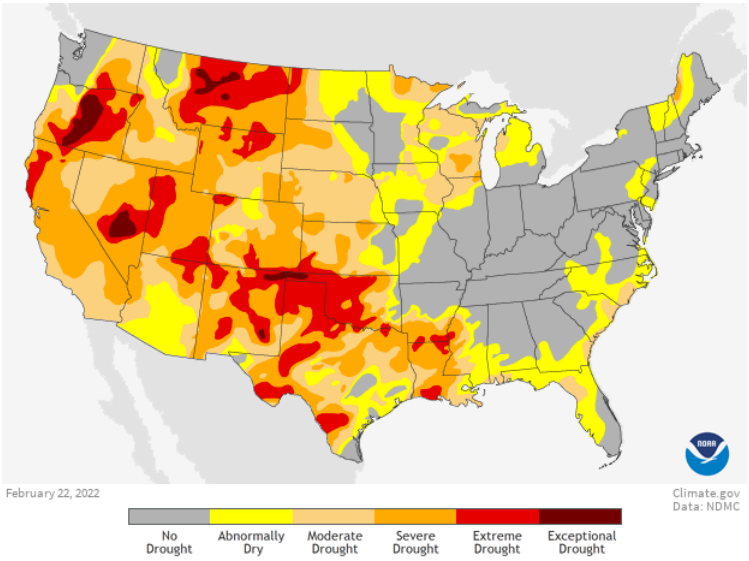


Figure 5.5: Siccità. I colori mostrano le valutazioni degli esperti sulle condizioni relative alla secchezza e alla siccità. Queste mappe si concentrano su condizioni su larga scala, quindi le condizioni locali possono variare. I colori indicano variazioni nella siccità prendendo a riferimento lo stesso periodo dell'anno. Le aree in giallo sono anormalmente secche. In generale, questa categoria indica una terra che sta entrando o uscendo dalla siccità. Le aree ocra stanno vivendo una moderata siccità: le riserve d'acqua potrebbero essere scarse e potrebbero verificarsi danni alle colture e ai pascoli. Le aree arancioni sono in grave siccità: la carenza d'acqua è comune e sono probabili perdite di raccolti e pascoli. Le aree rosse stanno vivendo una siccità estrema. Le aree di questa categoria possono subire carenze idriche diffuse e grandi perdite di raccolti e pascoli; le foreste in queste aree diventano secche e suscettibili al fuoco. Le aree rosso scuro sono in siccità eccezionale. La carenza di acqua nei corsi d'acqua, nei bacini idrici e nei pozzi in queste aree può portare a emergenze idriche. [Fonte: National Drought Mitigation Center (NDMC) - University of Nebraska-Lincoln, 2022]

Le successive immagini mostrano invece proiezioni future, relativamente alla temperatura dei "picchi pomeridiani", secondo due differenti scenari: nella Figura n.5.7 si ipotizza un aumento delle emissioni rispetto ai valori attuali, nella Figura 5.8 si ipotizzano emissioni paritarie a quelle odierne.

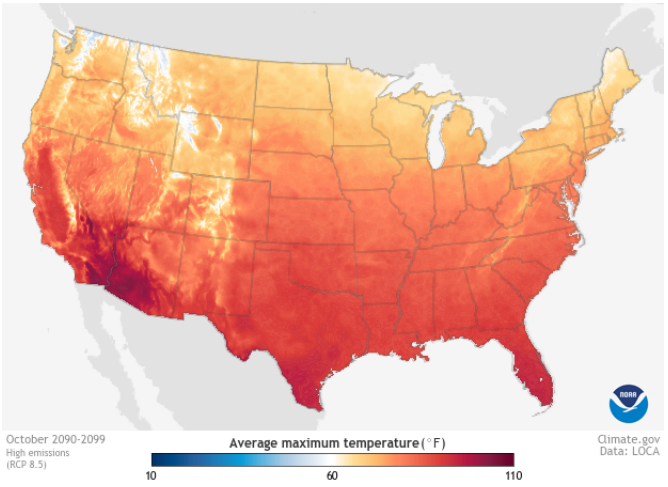


Figure 5.6: Previsioni future in merito ai "picchi pomeridiani" previsti per i decenni futuri qualora le emissioni globali di gas ad effetto serra continueranno ad aumentare fino al 2100. Le sfumature di blu indicano dove la temperatura media massima era, o dovrebbe essere, inferiore a 60°F. Più scura è la tonalità di blu, più bassa è la temperatura. Le aree mostrate nei toni dell'arancione e del rosso avevano, o si prevede che abbiano, temperature massime medie superiori a 60°F. Più scura è la tonalità dell'arancione o del rosso, maggiore è la temperatura. I colori bianchi o molto chiari mostrano dove la temperatura media massima era, o dovrebbe essere, vicino a 60°F. [Fonte: LOCA (Localized Constructed Analogs) data]

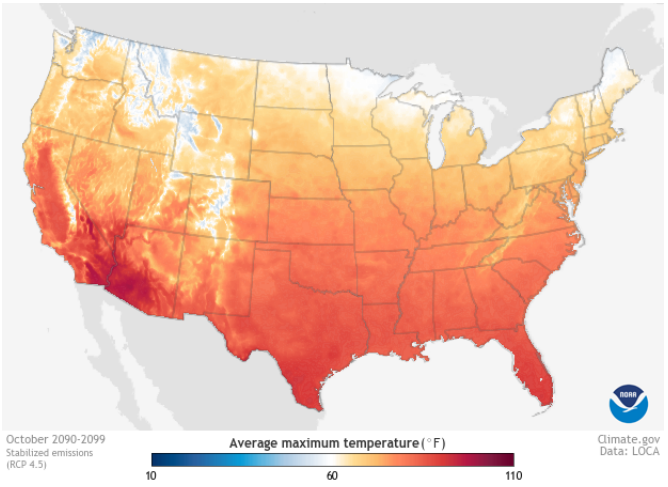


Figure 5.7: Previsioni future in merito ai "picchi pomeridiani" previsti per i decenni futuri qualora si riuscisse a ridurre e stabilizzare le emissioni globali di gas ad effetto serra entro i prossimi due decenni. I colori hanno il medesimo significato della Figura n.5.7; [Fonte: LOCA (Localized Constructed Analogs) data]

5.3 Interventi di mitigazione

Le risposte ai cambiamenti climatici sono essenzialmente di due tipi:

- adattamento agli impatti dei cambiamenti climatici;
- mitigazione, ossia riduzione delle emissioni di gas serra.

  L'adattamento consente di ridurre la vulnerabilità nei confronti di variazioni nello stato del clima e di eventi estremi. Tuttavia, non ci si aspetta che l'adattamento da solo faccia fronte a tutti gli effetti dei cambiamenti climatici previsti, in particolare a lungo termine, poiché la maggior parte degli impatti aumenta di intensità. La capacità di adattarsi dipende da circostanze socio-economiche ed ambientali, oltre che dalla disponibilità di informazioni.

  Per quanto concerne invece la mitigazione, lo scopo è quello di ridurre le emissioni nette di gas serra e di favorire risorse energetiche diverse da quelle rappresentate dai combustibili fossili. Si può agire anche in maniera diretta riducendo la deforestazione o immagazzinando la CO_2 in sistemi naturali (riforestazione) ed artificiali (pozzi di raccolta).

  La Convenzione UNFCCC (acronimo dell'inglese United Nations Framework Convention on Climate Change, in italiano Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici) è il principale forum multilaterale adibito ad affrontare i cambiamenti climatici. Si tratta di un trattato internazionale che punta alla riduzione delle emissioni dei gas serra, sulla base del riscaldamento globale. Il trattato, come stipulato originariamente, non poneva limiti obbligatori per le emissioni di gas serra alle nazioni individuali; era quindi non vincolante. Allo stesso tempo, però, includeva alcuni "protocolli" che avrebbero posto limiti obbligatori di emissioni: il principali di questi è il Protocollo di Kyoto.

  L'adesione al Protocollo di Kyoto è stato il primo passo verso la riduzione delle emissioni di gas serra. Nel 1998 sono stati stabiliti gli obiettivi di riduzione delle emissioni per i 15 Stati membri che allora facevano parte dell'Unione Europea per raggiungere l'obiettivo comune di riduzione dell'8% rispetto ai livelli del 1990. L'obiettivo di riduzione delle emissioni assegnato

all'Italia era del 6.5% nel periodo 2008 - 2012. Le politiche per la riduzione delle emissioni si collocano in un contesto normativo molto ampio che prevede, tra le diverse misure, l'impiego delle migliori tecnologie disponibili nei processi industriali, la liberalizzazione del mercato e l'uso efficiente dell'energia, lo sviluppo delle fonti rinnovabili e delle fonti a basse emissioni nel settore energetico, la riduzione dei consumi di carburante per i trasporti, la coltivazione di biomasse energetiche in agricoltura, l'adeguamento delle politiche dei rifiuti, gli usi del suolo e la coltivazione delle foreste per l'assorbimento delle emissioni di CO_2. Tra i principali strumenti messi a punto dall'UE per favorire il raggiungimento degli obiettivi di Kyoto si citano il Programma Europeo per i Cambiamenti Climatici (European Climate Change Program, ECCP), il sistema di scambio delle quote di gas serra nella Comunità (Emission Trading Scheme, EU-ETS), l'utilizzo dei crediti di emissione derivanti dai progetti internazionali, JI e CDM, previsti dal Protocollo di Kyoto (Direttiva 2003/87/CE) e il meccanismo di monitoraggio delle emissioni comunitarie di gas serra (Decisione 280/2004/CE poi abrogato dal Regolamento 525/2013).

Per il periodo 2013-2020 invece l'UE ha adottato il Pacchetto Clima e Energia (Integrated Energy and Climate Change Package, IECCP). L'IECCP impegna gli Stati membri dell'Unione Europea a conseguire entro il 2020 i seguenti obiettivi:

- produzione di energia da fonti rinnovabili pari al 20% dei consumi energetici e utilizzo di biocombustibili pari al 10% nei trasporti;
- riduzione delle emissioni di gas a effetto serra del 20% rispetto al 1990;
- riduzione dei consumi energetici del 20% rispetto allo scenario base da raggiungere migliorando l'efficienza energetica.

  Di recente la Commissione Europea ha proposto nuovi obiettivi di riduzione delle emissioni atmosferiche da raggiungere entro il 2030. Gli obiettivi devono essere raggiunti per mantenere il proposito di riduzione delle emissioni di gas serra a livello europeo di almeno 80% entro il 2050 rispetto al 1990. Gli obiettivi fissati dalla Commissione per il 2030

prevedono una riduzione delle emissioni totali del 40% rispetto al 1990, l'aumento dell'energia da fonti rinnovabili al 27% del consumo finale e il risparmio del 30% di energia attraverso l'aumento dell'efficienza energetica. Attualmente gli obiettivi menzionati e la ripartizione degli obiettivi nazionali sono oggetto di dibattito negoziale. Come per il 2020 l'anno di riferimento per gli obiettivi dei singoli paesi sarà il 2050.

Si sottolinea, infine, che nel 1998 si è costituito dall'ONU l'IPCC, ovvero un organo atto alla valutazione delle informazioni scientifiche, tecniche e socioeconomiche dei cambiamenti climatici, oltre che alla determinazione dell'impatto dei cambiamenti climatici, delle opzioni di adattamento e mitigazione degli stessi. L'IPCC è organizzata in tre gruppi (Working Group): WG1 si occupa delle basi scientifiche dei cambiamenti climatici, WG2 degli impatti dei cambiamenti climatici sui sistemi naturali ed umani, delle opzioni di adattamento e della loro vulnerabilità, infine WG3 si occupa della mitigazione dei cambiamenti climatici, ovvero della riduzione delle emissioni di gas ad effetto serra.

Nella Figura 5.8 si riportano alcuni possibili interventi di mitigazione ai cambiamenti climatici per diversi settori.

Come si può osservare anche dalla Figura, una gestione corretta del rifiuto contribuisce in maniera significativa alla riduzione degli inquinanti in atmosfera ed in particolare alle emissioni di gas ad effetto serra. Circa 489 kg/abitante per anno di rifiuti urbani vengono generati annualmente nell'UE, con una porzione significativa che ancora viene smaltita nelle discariche. Sebbene siano stati compiuti progressi significativi negli Stati membri e nei comuni, esistono tuttora grandi sfide per ridurre gli sprechi e generare flussi di rifiuti di alta qualità per il riutilizzo e il recupero.

Proprio per tale ragione, il piano d'azione per l'economia circolare, parte integrante del Green Deal europeo, indica il concetto di circolarità come base per raggiungere l'obiettivo UE di neutralità climatica entro il 2050, specificando una serie di misure relative all'intero ciclo di vita dei prodotti utili per raggiungere tale obiettivo. Il piano include regole

per progettare i prodotti con un maggiore impiego di materie prime riciclate, prodotti più duraturi, più facili da riutilizzare, riparare e riciclare. La politica dell'Unione Europea nella gestione dei rifiuti è rivolta a trasformare i rifiuti in una risorsa, gli obiettivi di gestione dei rifiuti devono essere allineati con gli obiettivi di una transizione dell'economia circolare.

Sin dalla loro progettazione i beni dovranno essere pensati per durare più a lungo, essere più facili da riutilizzare, riparare e riciclare e incorporare il più possibile materiale riciclato anziché materie primarie. L'usa e getta sarà limitato, saranno vietati l'"obsolescenza programmata" e la distruzione di beni durevoli invenduti.

Tabella 1. Tecnologie e azioni chiave per la riduzione delle emissioni in funzione del settore. Settori e tecnologie sono elencati senza un ordine previsto. Pratiche non tecnologiche come i cambiamenti di stile di vita non sono incluse in questa tabella.

Settore	Tecnologie e azioni
Fornitura di energia	Fornitura e distribuzione più efficiente dell'energia; passaggio dal carbone al gas; energia nucleare; energie rinnovabili (idrogeno, solare, eolico, geotermia e bioenergia); cogenerazione, prime applicazioni del Carbon Capture Storage (CCS), ad esempio stoccaggio della CO_2 rimossa dal gas naturale.
Trasporti	Maggior numero di veicoli efficienti; veicoli ibridi; veicoli diesel meno inquinanti; biocarburanti; trasporto modulare da strada a ferrovia; trasporti pubblici; sistemi di trasporto non motorizzati (bicicletta e a piedi); pianificazione dei trasporti e dell'uso del territorio.
Edifici	Illuminazione efficiente e daylighting; più efficienti apparecchiature elettriche e per riscaldamento e raffrescamento; apparecchiature di cottura più efficienti; maggior isolamento termico; progettazione solare attiva e passiva per il riscaldamento e il raffrescamento; fluidi frigorigeni a basso GWP; recupero e riciclo dei gas fluorurati.
Industria	Apparecchiature elettriche più efficienti; recupero del calore e della potenza; riciclo e sostituzione dei materiali; controllo dell'emissione di gas non-CO_2; ampio spettro di tecnologie specifiche.
Agricoltura	Miglioramento della gestione del raccolto e del pascolo con l'obiettivo di aumentare lo stoccaggio del carbonio nel suolo; bonifica di terre abbandonate e paludose; miglioramento delle tecniche di coltivazione del riso, della gestione del bestiame e del letame in modo da ridurre l'emissione di metano; miglioramento dei concimi azotati in modo da ridurre le emissioni di N_2O; parte del raccolto sarà utilizzata per sostituire i combustibili fossili; miglioramenti dell'efficienza energetica.
Selvicoltura e foreste	Riduzione della deforestazione, aumento del rimboschimento; gestione delle foreste e del taglio del legno; uso dei prodotti della foresta per sostituire le biomasse ai combustibili fossili.
Rifiuti	Recupero del metano da discarica; incenerimento dei rifiuti con recupero dell'energia; compostaggio dei rifiuti organici; controllo del trattamento dell'acqua reflua; riciclo e minimizzazione dei rifiuti.

Figure 5.8: Tecnologie ed azioni di mitigazione per diversi settori [Fonte: Schiavon Stefano, Zecchin Roberto (2007) - I cambiamenti climatici - Cause, conseguenze e strategie di mitigazione]

Chapter 6

Conclusioni e sviluppi futuri

In un sistema virtuoso, secondo le direttive comunitarie, quello che residua dalla raccolta differenziata deve essere avviato a recupero energetico in impianti di trattamento termico per evitare la discarica, che deve costituire solo l'ultima alternativa. I trattamenti termici consentono quindi di gestire al meglio i rifiuti indifferenziati per mezzo di una riduzione volumetrica ed una riduzione delle sostanze contaminanti in essi presenti. Una moderna e sostenibile gestione del rifiuto non può pertanto prescindere dall'implementazione dei processi termici. L'implementazione di tali processi consta non solo nell'attività di recupero energetico attuato dagli impianti, ma anche nell'utilizzo di tecnologie idonee e moderne volte all'abbattimento di sostanze inquinanti (BAT). Se da un lato il recupero di energia consente di abbattere di molto i fattori di emissione caratteristici degli impianti di termovalorizzazione, contestualmente l'utilizzo delle migliori tecnologie permettono di aumentare l'affidabilità degli impianti stessi, grazie alla riduzione delle emissioni a livelli tali che ormai i rischi associati a questi tipi d'impianti sono davvero molto bassi.

Il presente lavoro consta proprio in un confronto fra diverse tecnologie di trattamento termico dei rifiuti e diversi scenari di gestione degli stessi. In particolare si sono confrontate le tecnologie quali l'incenerimento e

le tecnologie cosiddette innovative, si sono poi comparate le diverse regioni del Nord Italia in termini di emissioni di CO_2 generate da un impianto tipico di trattamento termico per ogni territorio ed infine si sono paragonati diversi scenari di gestione del rifiuto al fine di valutarne la compatibilità ambientale.

Per quanto concerne il confronto fra le diverse tecnologie di trattamento termico, le considerazioni in merito si possono così riassumere:

* le tecnologie innovative determinano un minor volume di fumi generato;
* le tecnologie innovative determinano anche emissioni di inquinanti inferiori rispetto alla tradizionale combustione;
* le tecnologie innovative presentano però maggiori vincoli sul tipo di alimentazione, che deve subire processi di pretrattamento;
* gassificazione e pirolisi inoltre hanno restrizioni anche in merito alla qualità del syngas, il quale deve presentare un certo grado di purezza;
* gli impianti di gassificazione e pirolisi hanno una produzione lorda di energia elettrica confrontabile con quella di un inceneritore tradizionale, qualora la combustione diretta del syngas avvenga per mezzo di un ciclo termico a vapore;
* l'utilizzo del syngas, previa depurazione, come combustibile in un motore a gas dedicato o in una turbina a gas determina un significativo incremento dei rendimenti energetici, superiori a quelli ottenibili dagli impianti di incenerimento tradizionali;
* gli impianti innovativi sono tanto più svantaggiosi, in termini energetici, quanto più il materiale da trattare è umido e/o ha un contenuto elevato di sostanze non combustibili.

Per quanto concerne l'analisi delle emissioni di CO_2 dagli impianti di trattamento termico nel Nord Italia invece emergono considerazioni interessanti. I trattamenti termici, infatti, permettono di gestire al

meglio il residuo indifferenziato derivante da raccolta differenziata, permettendo di trarre un doppio vantaggio: smaltire una cospicua percentuale di rifiuto e recuperare energia utilizzando il rifiuto stesso come risorsa. Nel Nord Italia i fattori di emissione tra le varie regioni si discostano tra loro sulla base dell'energia prodotta (e quindi anche del potere calorifico dei rifiuti) dai diversi impianti, della quantità dei rifiuti inceneriti, e della loro qualità (per esempio contenuto di carbonio). Ciò che emerge con chiarezza dall'analisi dei dati è la convenienza, da un punto di vista della compatibilità ambientale, del recupero di energia elettrica o termoelettrica dagli impianti stessi di termovalorizzazione, sostituendo così l'utilizzo di fonti fossili per la generazione della stessa quantità di energia. In questo modo i fattori di emissione si abbattono notevolmente, in alcuni casi persino dimezzando.

Per quanto concerne invece l'analisi dei risultati relativi al confronto tra scenari di gestione del rifiuto con soli trattamenti termici e scenari di gestione del rifiuto con accoppiamento di sistemi TMB ai sistemi di trattamento termico si può dedurre che non emergono vantaggi a favore di questo secondo scenario rispetto al primo. In molti casi infatti i fattori di emissione sono i medesimi che si ottengono dai processi solamente termici, e per alcune regioni risultano persino peggiorativi.

Gli impianti di trattamento termico presentano quindi i seguenti vantaggi:

* tecnologia adatta a trattare rifiuti che non necessitano pretrattamenti e di svariate dimensioni;
* recupero energetico dai rifiuti;
* considerevole riduzione del volume dei rifiuti trattati.

Di contro, questi impianti producono delle scorie (ceneri pesanti), la cui unica destinazione è la discarica.

SVILUPPI FUTURI

Come appena accennato, i trattamenti di incenerimento producono delle scorie, le cui caratteristiche e quantitativi sono strettamente correlati al processo di trattamento e alla tipologia del rifiuto in ingresso. Gli impianti di incenerimento dei rifiuti urbani presenti in Europa producono tipicamente 150 - 250 kg di ceneri pesanti per tonnellata di rifiuto trattato. Risulta pertanto fondamentale, sotto un punto di vista ambientale, un recupero di tali frazioni che ad oggi vengono destinati in discarica. Dal punto di vista tecnico, le limitazioni al loro recupero sono dovute ad una contaminazione da metalli pesanti associata ad elevate concentrazioni di sali solubili, che obbligano a trattamenti di "lavaggio" prima della fase di inertizzazione. Ne consegue un'elevata quantità di acqua da depurare così come lo smaltimento dei fanghi di risulta dal ciclo chiuso delle acque.

Per tali ragioni si è cercato di sviluppare un sistema di trattamento elettrochimico (EKS ElectoKinetic Stabilization) che sfrutta il campo elettrico indotto da due elettrodi posti a contatto con le ceneri, al fine di far migrare ed ossidare a cloro i cloruri presenti nelle scorie e far muovere gli agenti stabilizzanti in forma di anioni fosfato e i cationi dei metalli pesanti, che precipitano così sotto forma di minerali apatite o altri fosfati praticamente insolubili [Fonte: Morselli Luciano (2007) - La cultura e le tecnologie ambientali in Italia ed in Europa]. L'effetto detossificante è inoltre influenzato in vario modo dai cambiamenti del pH, dal potenziale re-dox, dalla concentrazione, varietà e valenza degli inquinanti, da fenomeni di adsorbimento/desorbimento, precipitazione ed altro ancora.

I principali fenomeni, schematizzati nella figura sottostante, possono essere così riassunti [Fonte: Morselli Luciano (2007) - La cultura e le tecnologie ambientali in Italia ed in Europa]:

* elettromigrazione: spostamento di cationi (ioni con carica positiva, quali metalli pesanti ed alcalino-terrosi) ed anioni (ioni a carica

negativa, come cloruri, nitrati) verso l'elettrodo di carica opposta;

* elettroosmosi: flusso di acqua indotto dal momento di trascinamento dei cationi, che, concentrati alle pareti di un ipotetico tubo (capillare), muovono in massa verso il catodo. In realtà il flusso elettrosmotico non sempre è diretto verso il catodo, subendo spesso delle variazioni di intensità e direzione al variare del pH, per il seguente cambio dello stato di carica superficiale nella particella di suolo;

* elettroforesi: flusso di particelle polari o generalmente cariche, come corpuscoli argillosi, acidi fulvici ed umici e colloidi, che seppur con moto lento, migrano verso il contro-elettrodo;

* elettrolisi dell'acqua: reazioni di ossidazione e riduzione dell'acqua, che generano un fronte acido ed uno basico, rispettivamente all'anodo ed al catodo. Questi, migrando verso l'elettrodo di carica opposta, tendono a modificare il pH originale del suolo/rifiuto e la seguente disponibilità di inquinanti, specie per i metalli pesanti. Solitamente l'acidificazione controllata contribuisce positivamente, mentre il flusso basico limita il processo facendo precipitare i metalli nelle vicinanze del catodo sotto forma di idrossidi, creando inoltre una zona di bassa conducibilità, che finisce per ostacolare il normale flusso elettrico. Al fine di controllare il pH, si opera spesso con aggiunta di tamponi o altri agenti che vanno a influenzare decisamente il costo della bonifica.

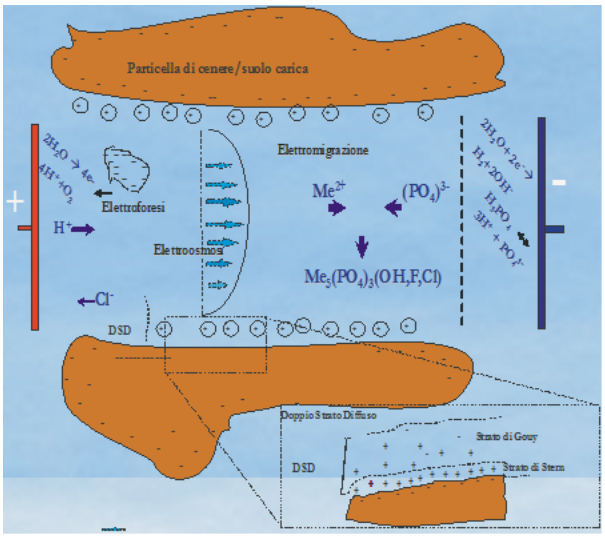


Figure 6.1: Schema generico del Trattamento di Stabilizzazione Elettrocinetica (EKS)

In ultima analisi si rileva la possibilità di utilizzo degli impianti IGCC a carbone con CCS per la cattura della CO_2. L'impianto IGCC è infatti generalmente indicato come una tecnologia idonea alla cattura pre-combustione della CO_2 perché è possibile convertire cataliticamente il CO a CO_2 prima della camera di combustione e operare uno stadio di separazione del diossido di carbonio. La trasformazione del carbone avviene ad alta temperatura $(800 \div 1800C)$ in ambiente riducente. La reazione avviene all'interno di un reattore pressurizzato che costituisce il gassificatore. Da qui si ottiene il syngas, una miscela di CO e H_2 e altri gas in quantità marginali. Il gas prodotto contiene i solfuri H_2S e, in piccola quantità, COS; quest'ultimo viene convertito in CO_2 e forma ulteriore H_2S; questi gas vengono separati in appositi impianti dopo il raffreddamento del syngas. Il syngas ripulito e contenente essenzialmente H_2 e CO viene inviato come combustibile nella turbina a gas che con il Generatore di Vapore a Recupero (GVR) e la turbina a vapore costituisce la cosiddetta isola di potenza, ovvero il ciclo combinato dell'impianto IGCC.

Bibliography

[1] Ammendola P., Miccio F., Zanetta A. *Impianti IGCC a carbone con CCS*

[2] Arena U., Mastellone M.L. (2010), *Processi di gassificazione dei rifiuti solidi: aspetti tecnologici e di processo. Gassificazione e pirolisi tecnologie innovative per la valorizzazione energetica dei rifiuti*

[3] ARPA Piemonte (2019), *Collaborazione alla predisposizione di report annuali e pluriennali relativamente agli indicatori descrittivi previsti nel PMA di cui alla DCR 19 aprile 2016, n. 140-14161*

[4] ATO-R, Politecnico di Torino (2010), *Valutazioni sull'applicabilità dei trattamenti meccanico-biologici nel ciclo integrato dei rifiuti urbani della Provincia di Torino - Quaderno 53*

[5] ATO-R, Politecnico di Torino (2009), *Verifica della fattibilità di un impianto di trattamento termico dei rifiuti a tecnologia innovativa nella Provincia di Torino - Quaderno 51*

[6] Brieanne Kinnghorn, Kiana Lambert, Kris Beckett, Jacob Lower, Ben Fortini, Foster Lockerbie, Jack Babington (2019), *Acid Rain: Chemistry applied*

[7] Di Vaio Antonio (2014), *Tesi di Laurea - Trattamento di NOx da gas di scarico: confronto tra le tecniche SCR e SNCR*

[8] European Commission (2006) *Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration*

[9] Favoino E., Confalonieri E. (2007), *Il trattamento meccanico-biologico, quadro strategico e prospettive, ARPA Rivista N. 2*

[10] IPCC (2021), *Climate Change 2021 -The Physical Science Basis*

[11] ISPRA (2020), *Fattori di emissione atmosferica di gas ad effetto serra nel settore elettrico nazionale e nei principali Paesi Europei*

[12] ISPRA (2020), *Rapporto Rifiuti Urbani*

[13] Møller J., Boldrin A., Christensen T.H. (2009), *Anaerobic digestion and digestate use: accounting of greenhouse gases and global warming contribution*

[14] Morselli Luciano (2007), *La cultura e le tecnologie ambientali in Italia ed in Europa*

[15] Natale G. Calabretta (2007), *Gestione dei rifiuti solidi - Differenza fra trattamento e smaltimento*

[16] Raboni Massimo, Torretta Vincenzo, Urbini Giordano (2015), *Ingegneria Sanitaria Ambientale - Processi e impianti*

[17] Schiavon Stefano, Zecchin Roberto (2007), *I cambiamenti climatici - Cause, conseguenze e strategie di mitigazione*

[18] Smith, Thomas M and Smith, Robert L (2007), *Elementi di ecologia*

[19] Stehlik P., Puchlyr R., Oral J. (2000), *Simulation of processes for thermal treatment of wastes, Waste Management*

[20] Stefano Cernuschi (Responsabile Scientifico), Mario Grosso, Federico Viganò, Maria Chiara Zanetti, Deborah Panepinto, Marco Ragazzi (2020), *Libro Bianco sull'incenerimento dei rifiuti urbani*

List of Figures

1.1 La gerarchia nella gestione dei rifiuti [Fonte: Laboratorio ref. ricerche] 3

1.2 Produzione totale di RU nell'UE (tonnellate*1.000), anni 2016 - 2018; [Fonte: ISPRA - Rapporto Rifiuti Urbani, 2020] 5

1.3 Produzione pro capite (kg/abitante per anno) e totale (tonnellate*1.000) di RU nell'UE, anni 2016 - 2018; [Fonte: ISPRA - Rapporto Rifiuti Urbani, 2020] 6

1.4 Percentuali di recupero e smaltimento sul totale di RU trattati nell'UE, anni 2016 - 2018; [Fonte: ISPRA - Rapporto Rifiuti Urbani, 2020]. Nota: i dati riportati sono arrotondati all'unità, per cui la somma delle percentuali delle quattro forme di gestione non sempre eguaglia 100. I Paesi aderenti all'UE28 sono evidenziati in grassetto. D1: deposito sul o nel suolo; D2: trattamento in ambiente terrestre; D3: iniezioni in profondità; D4: lagunaggio; D5: messa in discarica specialmente allestita; D6: scarico dei rifiuti solidi nell'ambiente idrico eccetto l'immersione; D7: immersione, compreso il seppellimento nel sottosuolo marino; D10: incenerimento a terra; D12: deposito permanente; R1: utilizzazione principale come combustibile o come altro mezzo per produrre energia. 7

1.5 Ripartizione percentuale della gestione dei rifiuti urbani nell'UE, anno 2018 (dati ordinati per percentuali crescenti di smaltimento in discarica); [Fonte: ISPRA - Rapporto Rifiuti Urbani, 2020] . . . 8

1.6 Produzione totale di rifiuti urbani per regione, anni 2015 - 2019; [Fonte: ISPRA - Rapporto Rifiuti Urbani, 2020] 10

1.7 Andamento della produzione di rifiuti urbani, anni 2006 - 2019; [Fonte: ISPRA - Rapporto Rifiuti Urbani, 2020] 11

1.8 Andamento della produzione dei rifiuti urbani e degli indicatori socio economici, anni 2002 - 2019 12

1.9 Andamento della produzione totale dei rifiuti urbani per macroarea geografica, anni 2015 - 2019 13

1.10 Raccolta differenziata dei rifiuti urbani per macroarea geografica, anni 2015 - 2019 15

1.11 Andamento della percentuale di raccolta differenziata dei rifiuti urbani, anni 2015 - 2019 15

1.12 Percentuali di raccolta differenziata dei rifiuti urbani per regione, anni 2015 - 2019 16

1.13 Percentuali di raccolta differenziata dei rifiuti urbani per regione, anni 2018 - 2019 17

1.14 Ripartizione percentuale della gestione dei rifiuti urbani, anno 2019; [Fonte: ISPRA - Rapporto Rifiuti Urbani, 2020] 23

1.15 Principali obiettivi previsti dalla normativa europea 24

2.1 Schema impianto di incenerimento 27

2.2 Schema di funzionamento del forno a griglia mobile 30

2.3 Fasi del processo di combustione 31

2.4 Schema di funzionamento di un forno a tamburo rotante 33

2.5 Combustore a letto fluido bollente (in alto) e a letto fluido circolante (in basso) 36

2.6 Confronto fra le varie tecnologie 39

2.7 Valori di emissione e sistemi di abbattimento tipici degli inquinanti 42

2.8 Schema funzionamento di un ciclone convenzionale con indicazione del moto compiuto dalla particella, del gas depurato e delle polveri 43

2.9 Schema funzionamento di un filtro a maniche [Fonte: US EPA] . . 46

2.10 Schema funzionamento di un elettrofiltro [Fonte: US EPA] 47

2.11 NO_X generati durante la combustione: Thermal NO_X, Fuel NO_X, Prompt NO_X [Fonte: Acid Rain: chemistry applied - Brieanne Kinnghorn, Kiana Lambert, Kris Beckett, Jacob Lower, Ben Fortini, Foster Lockerbie, Jack Babington]. 49
2.12 Illustrazione del processo SNCR 51
2.13 Relazione tra riduzione e produzione di NO_x, ammoniaca residua e temperatura di reazione per il processo SNCR [Fonte: Tesi di Laurea - Trattamento di NO_x da gas di scarico: confronto tra le tecniche SCR e SNCR - Antonio Di Vaio]. 52
2.14 Relazione tra riduzione e produzione di NO_x, ammoniaca residua e temperatura di reazione per il processo SNCR [Fonte: Tesi di Laurea - Trattamento di NO_x da gas di scarico: confronto tra le tecniche SCR e SNCR - Antonio Di Vaio]. 52
2.15 Schema di funzionamento di un processo SCR con aggiunta di ammoniaca 53
2.16 Composti organo-clorurati 54
2.17 Schema di un impianto di gassificazione [Fonte:www.regione.vda.it] 60
2.18 Schema di un impianto di pirolisi applicato allo smaltimento rifiuti a Burgau (Germania) [Fonte: ATOR rifiuti]. 63
2.19 Efficienze nette di generazione elettrica - Confronto tra tecnologie alternative e incenerimento [Fonte: ATOR - Verifica della fattibilità di un impianto di trattamento termico dei rifiuti a tecnologia innovativa nella Provincia di Torino, 2009]. 67
2.20 Caratteristiche ambientali dei principali sistemi di trattamento termico [Fonte: Fichtner, 2004; Arena e Mastellone, 2010; Limerick-Clare-Kerry, Waste Management Plan, 2005]. Tutti i processi utilizzano per il recupero energetico un ciclo a vapore. Tutte le concentrazioni sono riferite ad un gas secco con un contenuto di O_2 pari all'11%. PYR sta per pirolisi, GAS per gassificazione, COM per combustione. 69

3.1 TRM - termovalorizzatore del Gerbido [Fonte: trm.to.it] 74
3.2 Posizione del termovalorizzatore 75

3.3 Localizzazione del termovalorizzatore Silla2 78
3.4 Termovalorizzatore di Bolzano - Eco Center [Fonte: www.eco-center.it] 81
3.5 Termovalorizzatore di Padova - Hera-Ambiente 84
3.6 Termovalorizzatore di Trieste - HERAmbiente [Fonte: area marina protetta miramare] 87
3.7 Termovalorizzatore di Ferrara - HERAmbiente [Fonte: HERAmbiente] 90
3.8 [Fonte: ISPRA - Fattori di emissione atmosferica di gas a effetto serra nel settore elettrico nazionale e nei principali Paesi Europei, 2020] 94
3.9 Variazione annuale della produzione termoelettrica e delle emissioni per combustibile; [Fonte: ISPRA - Fattori di emissione atmosferica di gas a effetto serra nel settore elettrico nazionale e nei principali Paesi Europei, 2020] 96
3.10 Andamento del fattore di emissione per la produzione lorda ed il consumo di energia elettrica (gCO_2/ kWh); [Fonte: ISPRA - Fattori di emissione atmosferica di gas a effetto serra nel settore elettrico nazionale e nei principali Paesi Europei, 2020]. 97

4.1 Mulino a martelli verticale (a sinistra) e orizzontale (a destra) [Fonte: Dispense Applied Environmental Engineering; Zanetti] . . 103
4.2 Trituratore a coltelli [Fonte: Dispense Applied Environmental Engineering; Zanetti] 104
4.3 Schema di un vaglio a tamburo [Fonte: ATOR - Valutazioni sull'applicabilità dei trattamenti meccanico-biologici nel ciclo integrato dei rifiuti urbani della Provincia di Torino, 2009] 105
4.4 Schema di un vibrovaglio [Fonte: ATOR - Valutazioni sull'applicabilità dei trattamenti meccanico-biologici nel ciclo integrato dei rifiuti urbani della Provincia di Torino, 2009] 106
4.5 Schema di un vaglio a dischi [Fonte: ATOR - Valutazioni sull'applicabilità dei trattamenti meccanico-biologici nel ciclo integrato dei rifiuti urbani della Provincia di Torino, 2009] 106
4.6 Classificatore ad aria [Fonte: Dispense Applied Environmental Engineering; Zanetti] 107

4.7 Separatore a letto fluido [Fonte: Dispense Applied Environmental Engineering; Zanetti] 107
4.8 Separatore balistico per densità (a sinistra), per elasticità (a destra) [Fonte: Dispense Applied Environmental Engineering; Zanetti] . . 108
4.9 Separatore magnetico a tamburo (a sinistra) e a nastro (a destra) [Fonte: Dispense Applied Environmental Engineering; Zanetti] . . 109
4.10 Separatore a rullo induttore 110
4.11 Schema delle configurazioni a flusso unico e a flusso separato [Fonte:Elaborazione ENEA] 112
4.12 Biostabilizzazione: schema di processo e bilancio di massa con metodo a separazione di flusso 114
4.13 Bioessiccazione: schema di processo e bilancio di massa (Linee Guida CITEC). 116
4.14 Percorso biochimico di trasformazione dei substrati organici in biogas 118
4.15 Bilancio della CO_2 125
4.16 Confronto fra diversi scenari di gestione del rifiuto 126

5.1 Andamento delle concentrazioni medie globali di alcuni gas serra; IPCC, 2013. I dati precedenti alle osservazioni dirette (dal 1958 ad oggi) sono stimati attraverso diverse tecniche, compresa l'analisi dell'aria intrappolata negli strati di ghiaccio dell'Antartide. 131
5.2 Emissioni di carbonio dovute all'uso di combustibili fossili nei 10 Paesi principali responsabili di emissioni nel 2008 [Fonte:DOE-CDIAC 2009] 132
5.3 Variazioni nella temperatura rispetto alla temperatura media registrata nel periodo dal 1981 al 2010. Le sfumature in rosso rappresentano una temperatura media annuale più alta della media dal 1981 al 2010, mentre le sfumature in blu mostrano dove la media annuale era più bassa. Più scuro è il colore, maggiore è la differenza rispetto alla temperatura media. Le aree bianche indicano una temperatura sostanzialmente invariata. Le aree grigie vicino ai poli nord e sud indicano mancanza di dati. [Fonte: NOAA's Environmental Visualization Lab (NNVL), 2020] 135

5.4 Temperatura superficiale degli oceani. I colori sulla mappa mostrano la temperatura dell'acqua proprio sulla superficie dell'oceano. Il blu più scuro mostra l'acqua più fredda: in queste zone è solitamente presente ghiaccio marino galleggiante. Tonalità più chiare di blu mostrano temperature fino a 80°F. Le aree bianche e arancioni mostrano dove le temperature superficiali sono superiori a 80°F, abbastanza calde da alimentare cicloni o uragani tropicali. [Fonte: NOAA's Climate Data Records Program, 2022] 135

5.5 Siccità. I colori mostrano le valutazioni degli esperti sulle condizioni relative alla secchezza e alla siccità. Queste mappe si concentrano su condizioni su larga scala, quindi le condizioni locali possono variare. I colori indicano variazioni nella siccità prendendo a riferimento lo stesso periodo dell'anno. Le aree in giallo sono anormalmente secche. In generale, questa categoria indica una terra che sta entrando o uscendo dalla siccità. Le aree ocra stanno vivendo una moderata siccità: le riserve d'acqua potrebbero essere scarse e potrebbero verificarsi danni alle colture e ai pascoli. Le aree arancioni sono in grave siccità: la carenza d'acqua è comune e sono probabili perdite di raccolti e pascoli. Le aree rosse stanno vivendo una siccità estrema. Le aree di questa categoria possono subire carenze idriche diffuse e grandi perdite di raccolti e pascoli; le foreste in queste aree diventano secche e suscettibili al fuoco. Le aree rosso scuro sono in siccità eccezionale. La carenza di acqua nei corsi d'acqua, nei bacini idrici e nei pozzi in queste aree può portare a emergenze idriche. [Fonte: National Drought Mitigation Center (NDMC) - University of Nebraska-Lincoln, 2022] 136

5.6 Previsioni future in merito ai "picchi pomeridiani" previsti per i decenni futuri qualora le emissioni globali di gas ad effetto serra continueranno ad aumentare fino al 2100. Le sfumature di blu indicano dove la temperatura media massima era, o dovrebbe essere, inferiore a 60°F. Più scura è la tonalità di blu, più bassa è la temperatura. Le aree mostrate nei toni dell'arancione e del rosso avevano, o si prevede che abbiano, temperature massime medie superiori a 60°F. Più scura è la tonalità dell'arancione o del rosso, maggiore è la temperatura. I colori bianchi o molto chiari mostrano dove la temperatura media massima era, o dovrebbe essere, vicino a 60°F. [Fonte: LOCA (Localized Constructed Analogs) data] . . . 137

5.7 Previsioni future in merito ai "picchi pomeridiani" previsti per i decenni futuri qualora si riuscisse a ridurre e stabilizzare le emissioni globali di gas ad effetto serra entro i prossimi due decenni. I colori hanno il medesimo significato della Figura n.5.7; [Fonte: LOCA (Localized Constructed Analogs) data] 137

5.8 Tecnologie ed azioni di mitigazione per diversi settori [Fonte: Schiavon Stefano, Zecchin Roberto (2007) - I cambiamenti climatici - Cause, conseguenze e strategie di mitigazione] 141

6.1 Schema generico del Trattamento di Stabilizzazione Elettrocinetica (EKS) 147

AppendixA

Iren Laboratori S.p.A.
Laboratorio di Torino
10156 Torino (TO)
Tel.: 011-2223476

LAB N° 0957 L

Rapporto di prova n°: **190006-001**

Accettazione: **190006**
Data Prelievo: **08-gen-19**
Data Arrivo Camp. **08-gen-19**
Data Rapp. Prova: **24-feb-19**

Spettabile:
T.R.M. S.p.A.
Via Gorini 50
10137 TORINO (TO)
Italia

Descrizione: **Rifiuto presente nella fossa ricezione rifiuti**

Luogo Prelievo: **Fossa ricezione rifiuti - Termovalorizzatore T.R.M.**
Prelevatore: **Prelevato a ns cura**
Mod.Campionam.: **(*) UNI 10802:2013**

Prova	U.M	Metodo	Risultato	Incertezza	L.Min.	L.Max.	Data esec. prova
Sottovaglio < 20 mm	§ %	ANPA RTI CTN_RIF 1/2000	**3,68**	± 0,74			10/01/2019
Putrescibile da cucina	§ %	ANPA RTI CTN_RIF 1/2000	**13,7**	± 2,7			10/01/2019
Putrescibile da giardino	§ %	ANPA RTI CTN_RIF 1/2000	**2,66**	± 0,53			10/01/2019
Bioplastica	§ %	ANPA RTI CTN_RIF 1/2000	**0,284**	± 0,057			10/01/2019
Altro organico	§ %	ANPA RTI CTN_RIF 1/2000	**7,1**	± 1,4			10/01/2019
Totale putrescibile	§ %	ANPA RTI CTN_RIF 1/2000	**26,3**	± 5,0			10/01/2019
Imballaggi in carta	§ %	ANPA RTI CTN_RIF 1/2000	**0,254**	± 0,051			10/01/2019
Giornali ed altra carta non imballaggio	§ %	ANPA RTI CTN_RIF 1/2000	**6,8**	± 1,4			10/01/2019
Cartone da imballo ondulato	§ %	ANPA RTI CTN_RIF 1/2000	**8,8**	± 1,8			10/01/2019
Cartoncino teso	§ %	ANPA RTI CTN_RIF 1/2000	**4,51**	± 0,90			10/01/2019
Altro cartone	§ %	ANPA RTI CTN_RIF 1/2000	**< 0,025**				10/01/2019
Totale materiale cellulosico	§ %	ANPA RTI CTN_RIF 1/2000	**20,6**	± 4,1			10/01/2019
Totale materiale cellulosico imballaggi	§ %	ANPA RTI CTN_RIF 1/2000	**13,8**	± 2,8			10/01/2019
Plastica in film	§ %	ANPA RTI CTN_RIF 1/2000	**4,81**	± 0,96			10/01/2019
Traccianti in film	§ %	ANPA RTI CTN_RIF 1/2000	**2,87**	± 0,57			10/01/2019
CPL fino a 5 l in volume	§ %	ANPA RTI CTN_RIF 1/2000	**1,77**	± 0,35			10/01/2019
Contenitori in plastica rigida	§ %	ANPA RTI CTN_RIF 1/2000	**8,7**	± 1,7			10/01/2019

Dove non altrimenti specificato, le incertezze di misura riportate in questo Rapporto di Prova sono state determinate in accordo con il documento EA-04-16. Esse sono espresse come incertezza estesa ottenuta moltiplicando l'incertezza tipo per il fattore di copertura "k" corrispondente ad un livello di fiducia di circa il 95%. Normalmente tale fattore "k" è pari a 2. I Risultati contenuti nel presente rapporto si riferiscono esclusivamente al campione provato. Il presente rapporto non può essere riprodotto parzialmente, salvo autorizzazione scritta del nostro Laboratorio. I risultati forniti come "< valore" si intendono come "risultato inferiore al Limite di quantificazione LOQ".

Documento Elettronico con Firma Digitale: RPA190006-001-0047-937.PDF.P7M

Analisi Merceologica Piemonte - 8 Gennaio 2019

AMIAT S.p.A.
Via Germagnano 50
10156 Torino (TO)
Tel.: 011-2223476

Internet: *www.amiat.it*

LAB N° 0957 L

Rapporto di prova n°: **191116-001**

Accettazione: **191116**
Data Prelievo: **04-lug-19** Ora Prelievo: **9.30**
Data Arrivo Camp. **04-lug-19**
Data Rapp. Prova: **29-ago-19**
Verbale di campionamento n°: **AM/040719LT001**

Spettabile:
T.R.M. S.p.A.
Via Gorini 50
10137 TORINO (TO)
Italia

Descrizione: **Rifiuti solidi urbani e assimilabili (merceologica+ analisi)**

Luogo Prelievo: **Fossa ricezione rifiuti - Termovalorizzatore T.R.M.**
Prelevatore: **Prelevato a ns cura**
Mod.Campionam.: **(*) UNI 10802:2013**

Prova		U.M	Metodo	Risultato	Incertezza	Data esec. prova
Sottovaglio < 20 mm	§	%	ANPA RTI CTN_RIF 1/2000	**4,22**	± 0,84	05/07/2019
Putrescibile da cucina	§	%	ANPA RTI CTN_RIF 1/2000	**18,3**	± 3,7	05/07/2019
Putrescibile da giardino	§	%	ANPA RTI CTN_RIF 1/2000	**10,0**	± 2,0	05/07/2019
Bioplastica	§	%	ANPA RTI CTN_RIF 1/2000	**0,295**	± 0,059	05/07/2019
Altro organico	§	%	ANPA RTI CTN_RIF 1/2000	**7,2**	± 1,4	05/07/2019
Totale putrescibile	§	%	ANPA RTI CTN_RIF 1/2000	**38,7**	± 5,0	05/07/2019
Imballaggi in carta	§	%	ANPA RTI CTN_RIF 1/2000	**0,201**	± 0,040	05/07/2019
Giornali ed altra carta non imballaggio	§	%	ANPA RTI CTN_RIF 1/2000	**5,3**	± 1,1	05/07/2019
Cartone da imballo ondulato	§	%	ANPA RTI CTN_RIF 1/2000	**7,2**	± 1,4	05/07/2019
Cartoncino teso	§	%	ANPA RTI CTN_RIF 1/2000	**3,21**	± 0,64	05/07/2019
Altro cartone	§	%	ANPA RTI CTN_RIF 1/2000	**< 0,025**		05/07/2019
Totale materiale cellulosico	§	%	ANPA RTI CTN_RIF 1/2000	**16,7**	± 3,3	05/07/2019
Totale materiale cellulosico imballaggi	§	%	ANPA RTI CTN_RIF 1/2000	**11,4**	± 2,3	05/07/2019
Plastica in film	§	%	ANPA RTI CTN_RIF 1/2000	**8,0**	± 1,6	05/07/2019
Traccianti in film	§	%	ANPA RTI CTN_RIF 1/2000	**0,71**	± 0,14	05/07/2019
CPL fino a 5 l in volume	§	%	ANPA RTI CTN_RIF 1/2000	**1,75**	± 0,35	05/07/2019
Contenitori in plastica rigida	§	%	ANPA RTI CTN_RIF 1/2000	**4,21**	± 0,84	05/07/2019
Altre plastiche	§	%	ANPA RTI CTN_RIF 1/2000	**1,85**	± 0,37	05/07/2019
Gomma naturale e sintetica	§	%	ANPA RTI CTN_RIF 1/2000	**0,482**	± 0,096	05/07/2019
Totale materiali in plastica e gomma	§	%	ANPA RTI CTN_RIF 1/2000	**17,0**	± 3,4	05/07/2019
Totale materiali in plastica imballaggi	§	%	ANPA RTI CTN_RIF 1/2000	**14,7**	± 2,9	05/07/2019

Dove non altrimenti specificato, le incertezze di misura riportate in questo Rapporto di Prova sono state determinate in accordo con il documento EA-04-16. Esse sono espresse come incertezza estesa ottenuta moltiplicando l'incertezza tipo per il fattore di copertura "k" corrispondente ad un livello di fiducia di circa il 95%. Normalmente tale fattore "k" è pari a 2. I Risultati contenuti nel presente rapporto si riferiscono esclusivamente al campione provato. Il presente rapporto non può essere riprodotto parzialmente, salvo autorizzazione scritta del nostro Laboratorio. I risultati forniti come "< valore" si intendono come "risultato inferiore al Limite di quantificazione LOQ".

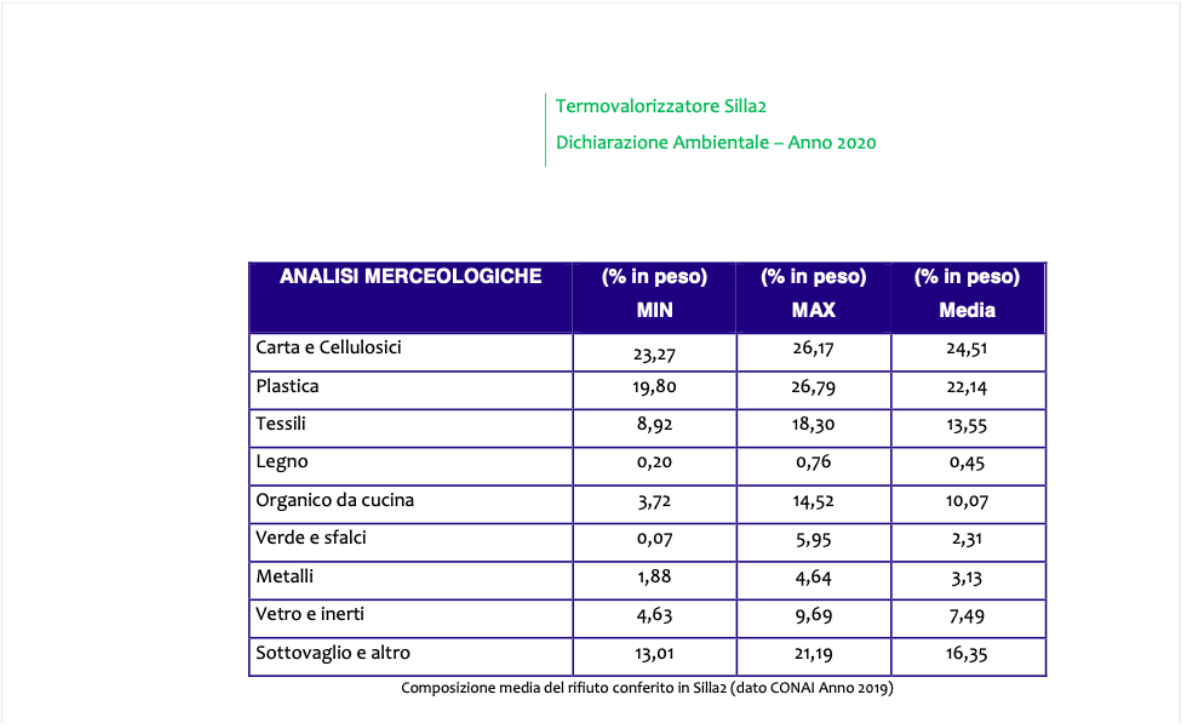
Documento Elettronico con Firma Digitale: RPA191116-001-0047-1329.PDF.P7M

Analisi Merceologica Piemonte - 4 Luglio 2019

Impianto	INC Forlì	INC Forlì	INC Ferrara	INC Ferrara	INC Ferrara	INC Ferrara	
Provincia	FC	FC	FE	FE	FE	FE	
Tipo raccolta	pap	pap	stradale	stradale	pap	pap	
Data campionamento	23-ott-19	4-dic-19	9-ott-19	6-dic-19	21-ott-19	11-dic-19	
	%	%	%	%	%	%	
Imballaggi in alluminio	0,20	0,05	0,17	0,38	0,62	0,50	6
FMS alluminio (non imballaggi)	0,00	0,00	0,00	0,14	0,04	0,95	
Imballaggi in acciaio	0,20	0,28	0,39	0,76	0,34	1,43	
FMS acciaio (non imballaggi)	0,40	0,51	0,23	0,30	0,21	0,58	
Altri metalli	0,45	0,00	0,00	0,12	0,22	0,93	
Imballaggi in legno	0,28	0,00	0,00	0,26	0,15	0,43	
Tappi in sughero	0,08	0,00	0,04	0,02	0,03	0,00	
Altro legno	0,15	0,55	0,00	0,17	0,24	1,22	
Cartone ondulato e teso	0,54	2,29	0,99	2,59	2,26	4,61	
Poliaccoppiati a prevalenza cellulosica	0,21	0,26	0,18	0,68	0,75	0,74	
Altri materiali cellulosici	12,12	7,38	15,12	16,17	11,63	5,34	
Altri imballaggi cellulosici	0,29	0,88	0,24	0,84	1,13	0,82	
Carta grafica	1,34	2,63	4,18	3,29	2,76	5,34	
Tessile e pelle	24,39	15,12	5,32	7,06	10,11	4,46	
CLP (Contenitori per liquidi)	0,28	7,15	0,39	1,41	1,98	4,80	
Plastica traccianti	0,12	0,46	0,00	0,27	0,38	3,02	
Cassette CAC (per imballaggi bottiglie)	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	
Imballaggi in plastica rigida (non bottiglie e flaconi)	0,60	2,01	0,84	1,34	0,65	6,41	
Cassette CONIP (per imballaggi prodotti ortofrutticoli)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Film Oxodegradabili	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Piatti e bicchieri di plastica	0,14	0,20	0,12	1,13	0,75	0,16	
Imballaggi plastici contaminati (imballaggi pieni)	0,69	1,24	2,67	0,97	0,61	1,48	
Imballaggi in plastica flessibile	1,34	2,29	5,18	3,84	2,64	4,74	
Poliaccoppiati a prevalenza plastica	0,32	0,05	0,10	0,24	0,22	0,06	
MaterBi	0,39	0,22	0,37	1,04	0,30	0,66	
Tessili sanitari (Pannolini)	35,72	35,22	19,66	24,41	14,46	18,02	
Altra plastica	5,19	5,81	4,33	2,63	2,69	2,21	
Imballaggi in vetro	0,22	0,12	1,22	1,56	2,75	1,39	
Vetro non imballaggio	0,03	0,00	0,00	0,09	0,18	0,00	
Inerti	0,74	0,25	0,76	0,42	0,49	0,16	
Organico cucina	3,80	11,25	28,59	17,93	12,95	17,95	
Organico sfalci e potature	1,02	0,00	0,34	1,13	16,59	7,98	
RUP (Rifiuto Urbano Pericoloso)	0,02	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	
Sottovaglio (< 20 mm)	6,87	1,26	4,66	6,09	7,98	3,61	
Altro rifiuto	1,86	2,27	3,91	2,68	3,89	0,00	
Totale rifiuto selezionato	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	

FRAZIONI PRINCIPALI	INC Forlì	INC Forlì	INC Ferrara	INC Ferrara	INC Ferrara	INC Ferrara
Frazione merceologica						
Imballaggi in alluminio	0,20	0,05	0,17	0,52	0,66	1,45
Imballaggi in acciaio	0,60	0,79	0,62	1,06	0,55	2,01
Metalli non imballaggio	0,45	0,00	0,00	0,12	0,22	0,93
Imballaggi in legno	0,36	0,00	0,04	0,28	0,18	0,43
Legno non imballaggio	0,15	0,55	0,00	0,17	0,24	1,22
Imballaggi cellulosici	2,38	6,06	5,59	7,40	6,90	11,51
Cellulosici non imballaggio	12,12	7,38	15,12	16,17	11,63	5,34
Imballaggi in plastica	2,80	12,41	6,63	8,23	6,62	19,19
Plastica non imballaggio	5,19	5,81	4,33	2,63	2,69	2,21
Imballaggi in vetro	0,25	0,12	1,22	1,65	2,93	1,39
Vetro/inerti non imballaggio	0,74	0,25	0,76	0,42	0,49	0,16
Organico	5,21	11,47	29,30	20,10	29,84	26,59
Altro	69,55	55,11	36,22	41,25	37,05	27,57
Totale	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Analisi Merceologica Emilia Romagna

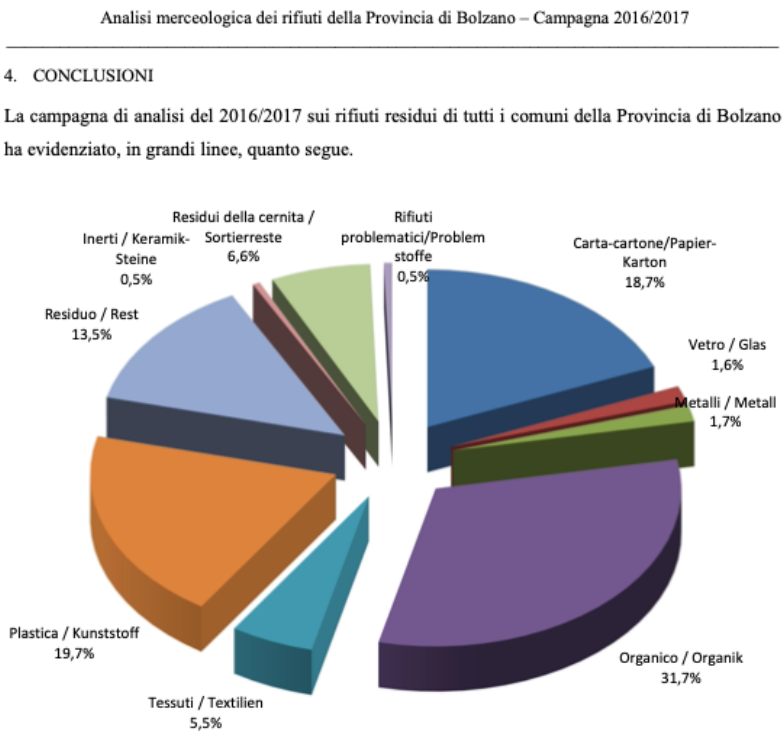


Termovalorizzatore Silla2
Dichiarazione Ambientale – Anno 2020

ANALISI MERCEOLOGICHE	(% in peso) MIN	(% in peso) MAX	(% in peso) Media
Carta e Cellulosici	23,27	26,17	24,51
Plastica	19,80	26,79	22,14
Tessili	8,92	18,30	13,55
Legno	0,20	0,76	0,45
Organico da cucina	3,72	14,52	10,07
Verde e sfalci	0,07	5,95	2,31
Metalli	1,88	4,64	3,13
Vetro e inerti	4,63	9,69	7,49
Sottovaglio e altro	13,01	21,19	16,35

Composizione media del rifiuto conferito in Silla2 (dato CONAI Anno 2019)

Analisi Merceologica Lombardia



Analisi Merceologica Trentino Alto Adige

CER	Provincia	Comune	Gestore
200301	UD	Basiliano	A&T2000
200301	GO	Savogna d'Isonzo	ISONTINA AMBIENTE
200301	GO	San Pier d'Isonzo	ISONTINA AMBIENTE
200301	UD	Moimacco	A&T2000
200301	UD	Buttrio	A&T2000
200301	GO	Doberdò del Lago	ISONTINA AMBIENTE

Carta TOTALE	Plastica TOTALE	Metalli TOTALE	Organico - Putrescibile da cucina
20,6	33,5	2,2	4,4
6,6	15	11,7	11,4
14	16,8	9,5	14,4
8,5	19,6	6,5	1,5
7,7	27,8	8,4	2,9
9,4	18,8	5,1	16,3

Organico TOTALE	Tessili TOTALE	Inerti - Inerti	Sottovaglio - >10 mm / 10-5 mm, 5-3 mm / <3 mm
7,9	24,6	1,1	
18	18,4	9,7	4
18,1	19,9	6,9	1,1
16,3	41,5	4	0,7
7	37,3	3,4	1
19,3	23,2	3,7	0,7

Legno - Legno	Vetro - Vetro trasparente, colorato/ Altro
1	1,2
1,1	10,7
3	8,3
	1,5
0,3	4,4
3,3	7,9

Analisi Merceologica Friuli Venezia Giulia