

POLITECNICO DI MILANO  
Facoltà di Ingegneria Industriale  
Corso di Laurea in Ingegneria Energetica  
Dipartimento di Energia



Analisi tecnico-economica di un sistema  
integrato di gestione dei rifiuti (MBT+WtE)

Relatore: Prof. Stefano Consonni  
Co-relatore: Ing. Stefano Zannier

Tesi di Laurea di:  
Damiano Ranzini Matr. 771066



## Sommario

Il lavoro si propone di modellizzare un sistema di Trattamento Meccanico-Biologico (TMB) dei rifiuti, analizzando le caratteristiche dei flussi in ingresso (quantità/qualità) in relazione al contesto considerato.

Segue una definizione dei principali aspetti tecnico-economici del sistema di trattamento termico, con recupero energetico (WTE), posto a valle del precedente.

Infine viene sviluppata un'analisi economico-finanziaria del sistema integrato (TMB + WtE), in funzione dello scenario di riferimento, con la possibilità di adattarlo (tramite opportuno software) a diversi contesti e a varie opzioni tecnologiche disponibili.

Lo studio di seguito presentato è frutto di una collaborazione con l'ing. S. Zannier (Waste to Energy Unit Manager) in veste di Tutor dell'azienda Daneco Impianti, presso la quale lo studente ha svolto un tirocinio curriculare per redigere la tesi di Laurea Magistrale.



## **Abstract**

The aim of the present work is to evaluate, through a suitable software, a waste Mechanical Biological Treatment (MBT) system, by analyzing the characteristics of the incoming waste streams (amount/quality) in relation to the considered context.

Besides, the main technical-economical issues of the thermal treatment system with energy recovery (Waste To Energy - WtE), located downstream the previous one, have been defined.

Finally, an economic and financial analysis of the integrated system (MBT + WtE) has been developed, by considering the reference scenario and paying attention to the possibility to adapt the software in subject to the different areas and available technological options.

This document has been developed in collaboration with Stefano Zanier (Mechanical Engineer and Waste to Energy Unit Manager of Daneco Impianti), tutor of the Company connected with the Polytechnic University of Milan for the intership finalized to draw up the master thesis.



# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
1.1	Aspetti sociali . . . . .	1
1.2	Aspetti ambientali . . . . .	2
1.3	Aspetti tecnici . . . . .	5
1.4	Aspetti economici . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Trattamento Meccanico Biologico (MBT)</b>	<b>7</b>
2.1	Introduzione . . . . .	7
2.2	Sistema integrato MBT + WtE . . . . .	18
2.3	Impianto MBT di riferimento . . . . .	21
<b>3</b>	<b>Recupero Energetico da rifiuti (Waste to Energy - WtE)</b>	<b>29</b>
3.1	Introduzione . . . . .	29
3.2	Tecnologie di trattamento termico . . . . .	30
3.3	Impianto WtE di riferimento . . . . .	31
<b>4</b>	<b>La discarica</b>	<b>41</b>
4.1	Introduzione . . . . .	41
4.2	Normativa vigente . . . . .	42
4.3	Criteri e modalità di costruzione . . . . .	44
4.4	Criteri e modalità di gestione . . . . .	45
4.5	Recupero dell'area interessata . . . . .	46
4.6	Alcune considerazioni conclusive . . . . .	46
<b>5</b>	<b>Modello Excel sviluppato</b>	<b>49</b>
5.1	Introduzione . . . . .	49
5.2	Scheda: Control Panel . . . . .	49
5.3	Scheda: Sistema e Schema . . . . .	57
5.4	Scheda: Contesto . . . . .	57
5.5	Scheda: RD . . . . .	57
5.6	Scheda: MBT . . . . .	58

---

5.7	Scheda: WtE . . . . .	70
5.8	Scheda: Landfill . . . . .	71
5.9	Scheda: Analisi Economico-Finanziaria . . . . .	71
<b>6</b>	<b>Risultati tecnici</b>	<b>77</b>
6.1	Prestazioni del MBT . . . . .	80
6.2	Residui da MBT e WtE . . . . .	88
6.3	Flussi in uscita dal MBT . . . . .	95
6.4	Recupero di energia termica e produzione di energia elettrica .	101
6.5	Considerazioni finali . . . . .	108
<b>7</b>	<b>Risultati economico-finanziari</b>	<b>109</b>
7.1	Configurazione (I): MBT + WtE + (LND) . . . . .	113
7.2	Configurazione (II): WtE + (LND) . . . . .	118
7.3	Configurazione (III): MBT + (LND), fsc a terzi . . . . .	121
7.4	Conclusioni . . . . .	127
<b>8</b>	<b>Conclusioni e sviluppi futuri</b>	<b>129</b>
8.1	Conclusioni . . . . .	130
8.2	Sviluppi futuri . . . . .	131
	<b>Bibliografia</b>	<b>133</b>



# Capitolo 1

## Introduzione

La gestione dei rifiuti urbani è un tema molto complesso, di estrema attualità e particolarmente delicato a causa della grande quantità di problematiche che caratterizzano questo settore. L'aspetto più importante su cui si basa lo studio di fattibilità e la seguente realizzazione di impianti di recupero e smaltimento dei rifiuti, è un'approfondita e dettagliata **analisi del contesto** nel quale si vuole intervenire, dal punto di vista sociale, ambientale, tecnico ed economico.

### 1.1 Aspetti sociali

La scelta del sistema di gestione dei rifiuti, da adottare o modificare in una società, è fortemente influenzata dalla comunità in relazione:

- alle abitudini dei cittadini e alla conseguente organizzazione di una mirata ed efficace raccolta differenziata (RD);
- alla cultura, all'informazione e alla preparazione della comunità relativamente a come è possibile affrontare in modo realistico il problema.

Le scelte relative allo smaltimento dei rifiuti sono spesso oggetto di discussione da parte della collettività. Generalmente le idee dell'opinione pubblica su questo tema sono spesso contrastanti e caratterizzate purtroppo da numerosi equivoci e malintesi soprattutto relativamente al tema del recupero energetico dai rifiuti:

- dal punto di vista dell'inquinamento relativo alle emissioni in atmosfera spesso non si distingue la forte differenza tra rischio percepito e rischio reale (come ad esempio la concentrazione di polveri sottili, decisamente più elevata nel fumo di una sigaretta rispetto a quella al camino di un termovalorizzatore [1]);

- c'è ancora molta confusione tra ciò che è possibile realizzare tecnicamente e ciò che ha prospettive industriali (tutti i processi di riciclaggio producono dei residui per i quali, generalmente, non sono possibili ulteriori trattamenti di recupero di materia).

Convinzioni drastiche e ideologiche, come quella dei “*rifiuti zero*” spesso portano alla formazione del cosiddetto fenomeno N.I.M.B.Y. (*Not In My Backyard*, non nel mio cortile) o addirittura alla soluzione B.A.N.A.N.A. (*Build Absolutely Nothing Anywhere Near Anybody*, non si deve costruire assolutamente nulla da nessuna parte e vicino ad alcuna persona). A volte queste prese di posizione hanno l'effetto di rallentare l'evoluzione di una mirata gestione dei rifiuti e generalmente non contribuiscono alla ricerca di alternative valide o facilmente realizzabili.

## 1.2 Aspetti ambientali

L'Unione europea, al fine di dissociare la crescita economica di un Paese dalla produzione di rifiuti, propone un quadro giuridico volto a controllare tutto il ciclo dei rifiuti, dalla produzione allo smaltimento, ponendo l'accento sul recupero e il riciclaggio. La Direttiva 2008/98/CE del Parlamento europeo e del relativo Consiglio, del 19 novembre 2008 [2], mira a proteggere l'ambiente e la salute umana attraverso la prevenzione degli effetti nefasti della produzione e della gestione dei rifiuti. Gli Stati membri devono adottare delle misure per il trattamento dei loro rifiuti conformemente alla seguente gerarchia (ved. fig. 1.1), che si applica per ordine di priorità:

### 1. **Prevenzione:**

misure, prese prima che una sostanza, un materiale o un prodotto sia diventato un rifiuto, che riducono:

- la quantità dei rifiuti, anche attraverso il riutilizzo dei prodotti o l'estensione del loro ciclo di vita;
- gli impatti negativi dei rifiuti prodotti sull'ambiente e la salute umana;
- il contenuto di sostanze pericolose in materiali e prodotti.

### 2. **Preparazione per il riutilizzo:**

qualsiasi operazione attraverso la quale prodotti o componenti che non sono rifiuti, vengono reimpiegati per la stessa finalità per la quale erano stati concepiti;

**3. Riciclaggio:**

qualsiasi operazione di recupero attraverso cui i materiali di rifiuto sono trattati per ottenere prodotti, materiali o sostanze da utilizzare per la loro funzione originaria o per altri fini. Include il trattamento di materiale organico, ma non il recupero di energia né il trattamento per ottenere materiali da utilizzare quali combustibili o in operazioni di riempimento;

**4. Recupero di energia** o recupero di altro tipo:

si intendono quelle operazioni, a valle del processo di incenerimento o gassificazione dei rifiuti in impianti dedicati, in cui viene recuperato il calore prodotto dalla combustione per produrre energia elettrica e/o calore per il teleriscaldamento. In questa sezione è inclusa anche la digestione anaerobica della frazione organica dei rifiuti per ottenere biogas.

**5. Smaltimento:**

si intende lo stoccaggio definitivo in sicurezza di rifiuti (discarica) mediante il loro confinamento in un terreno predisposto e impermeabilizzato, in modo da minimizzare i rischi per l'uomo e per l'ambiente.

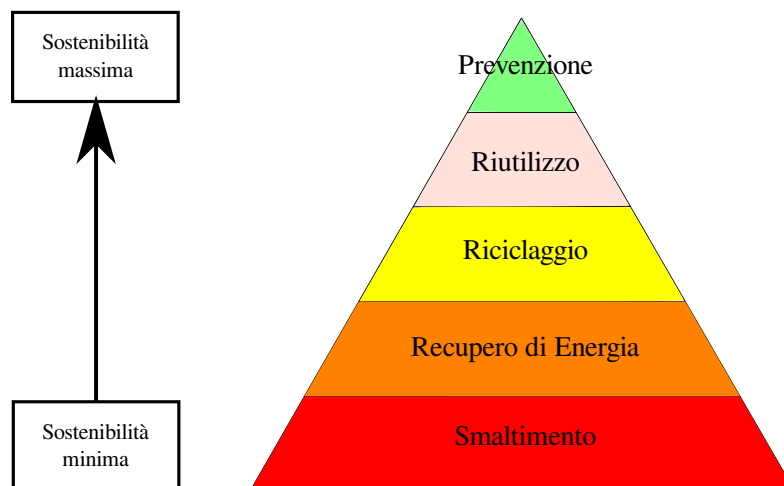


Figura 1.1: La piramide dei rifiuti, secondo la Direttiva 2008/98/CE.

Lo schema definito dalla direttiva cerca quindi di proporre un modello di gestione dei rifiuti che tenda a minimizzare i rifiuti da smaltire in discarica

e privilegia le operazioni di riciclaggio e recupero energetico, con lo scopo di migliorare la sostenibilità ambientale ed economica.

### 1.2.1 Approfondimenti

La figura 1.2 descrive in modo più dettagliato la piramide dei rifiuti.

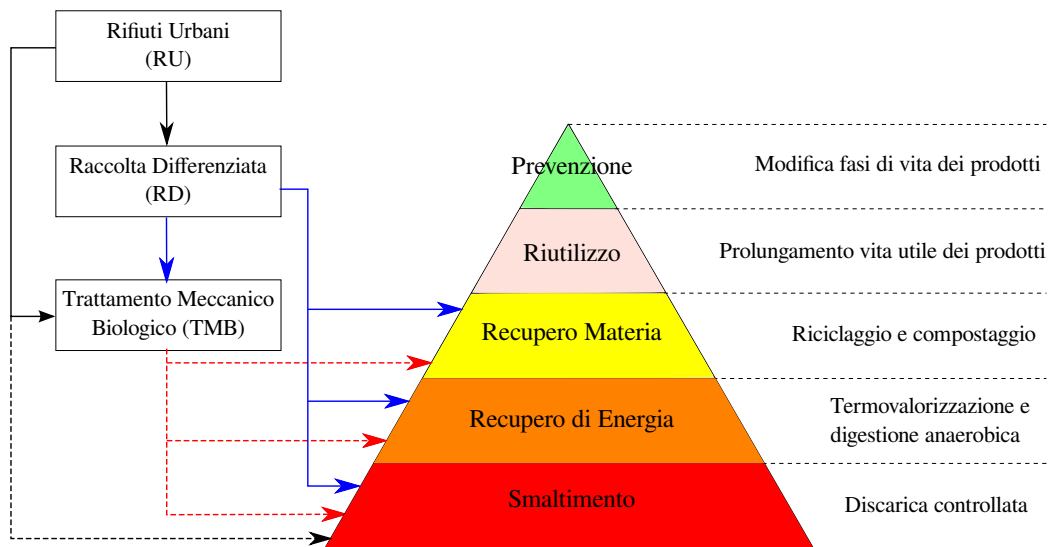


Figura 1.2: La piramide dei rifiuti: approfondimenti.

Risulta opportuno soffermarsi, per fare alcune analisi e considerazioni, sulla fase di recupero di materia. Spesso infatti si confonde il termine “raccolta differenziata” con “recupero di materia”. Relativamente al primo processo si intende *la raccolta in cui un flusso di rifiuti è tenuto separato in base al tipo e alla natura dei rifiuti al fine di facilitarne il trattamento specifico* [2] e quindi si intende solamente la **separazione** vera e propria delle frazioni merceologiche del rifiuto. Il secondo invece, descritto nel paragrafo precedente, indica tutti quei processi industriali in cui la materia in ingresso (raccolta e separata), viene effettivamente trattata per essere **recuperata** e quindi utilizzata come nuova Materia Prima Secondaria (MPS).

È importante perciò sottolineare che **la raccolta differenziata non coincide con il recupero di materia**, questo perché non tutta la percentuale di rifiuti raccolti e separati viene effettivamente riciclata. Sia i processi di selezione che di recupero producono infatti degli scarti che dovranno essere smaltiti in altro modo (ved. fig. 1.3).

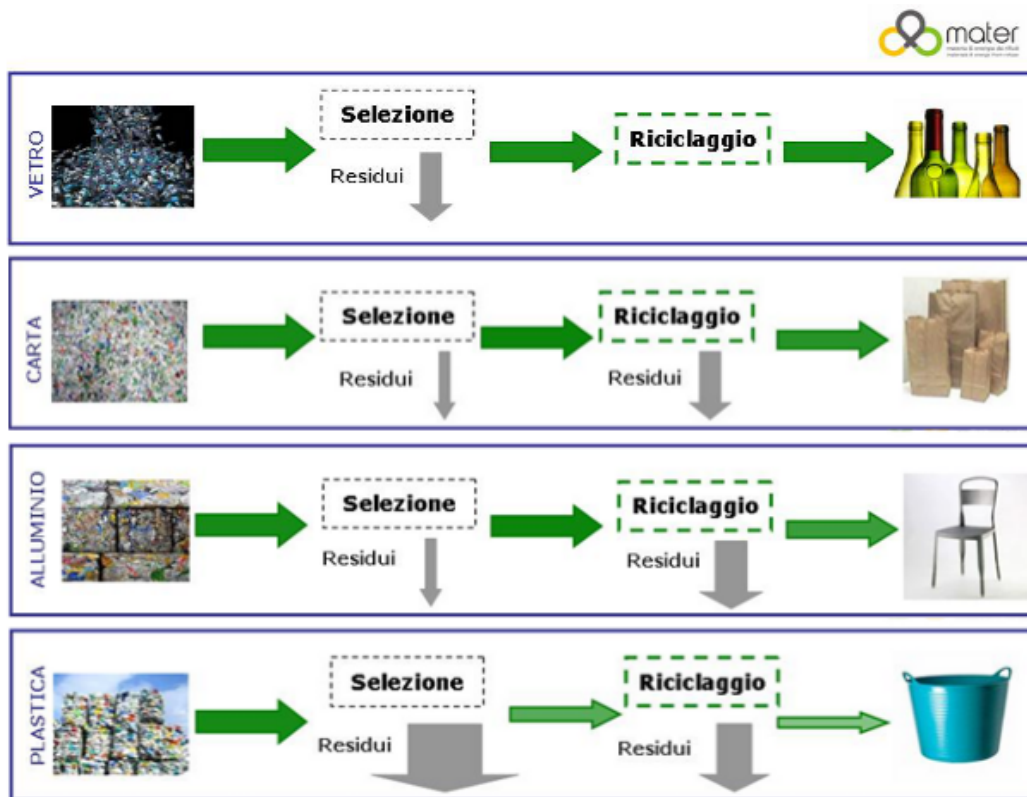


Figura 1.3: Flussi di materia nei processi di riciclaggio. Fonte: centro studi di ricerca MatER [3].

Un processo alternativo, o meglio integrativo<sup>1</sup>, alla raccolta differenziata e al successivo recupero, si può individuare nel processo industriale di **Trattamento Meccanico Biologico (TMB)** in inglese *Mechanical Biological Treatment (MBT)*. Tramite opportune macchine si separano le varie frazioni merceologiche dei rifiuti urbani (RU), o dei rifiuti urbani a valle della raccolta differenziata (RUR), destinandole a recupero di materiale, recupero energetico o smaltimento in discarica. Gli impianti MBT sono descritti più approfonditamente nel capitolo 2.

### 1.3 Aspetti tecnici

Dal punto di vista tecnico i parametri principali da considerare nell'analisi del contesto sono:

<sup>1</sup>Cioè che si trova a metà strada tra la raccolta differenziata e il successivo recupero.

1. la **quantità di rifiuti prodotti** annualmente;
2. la **composizione merceologica** dei *RU* o, se presente una certa percentuale di raccolta differenziata, dei *RUR*;
3. la **posizione geografica** di installazione degli impianti.

La quantità di rifiuti prodotti e la composizione merceologica generalmente rispecchiano il tipo di società sia dal punto di vista economico (PIL) che dal punto di vista delle abitudini dei cittadini. In particolare si osserva che il primo e il secondo aspetto (punti 1. e 2.) sono determinanti per il dimensionamento degli impianti, per la scelta di come intervenire e quali soluzioni progettuali prendere in considerazione in un determinato contesto, mentre il terzo (punto 3.) risulta fondamentale per agevolare la logistica della raccolta e della distribuzione dei servizi (combustibile, acqua, calore ed energia elettrica).

Nei capitoli successivi vengono descritte le principali soluzioni impiantistiche utilizzate nella gestione dei rifiuti a valle della raccolta differenziata per poi valutare e analizzare diversi scenari dal punto di vista ambientale ed economico.

## 1.4 Aspetti economici

La disponibilità di risorse economiche è fondamentale per valutare la possibilità di inserire una particolare tecnologia in un determinato contesto. Dal punto di vista ambientale facendo riferimento alla Fig.1.2 la soluzione migliore sarebbe quella di privilegiare le strategie “più nobili” limitando quelle “meno sostenibili”. L'adozioni di soluzioni “nobili” però richiede molto capitale da investire e non è detto che questo sia disponibile. Ad esempio in un paese in via di sviluppo che non ha ancora raggiunto un modello efficiente di gestione dei rifiuti, non è possibile introdurre nel breve termine impianti costosi di riciclaggio e di recupero energetico. E' necessario perciò reperire delle risorse affinché si possano effettuare investimenti per poter realizzare passo dopo passo soluzioni sempre più efficienti e compatibili.

# Capitolo 2

## Trattamento Meccanico Biologico (MBT)

### 2.1 Introduzione

*Il Trattamento Meccanico-Biologico (MBT) è una tecnica di trattamento a freddo dei rifiuti, differenziati e non, che sfrutta la combinazione di processi meccanici e processi biologici (in due fasi distinte) secondo diverse configurazioni [4].*

Gli scopi principali di un sistema MBT possono essere classificati nei seguenti punti:

- l'inertizzazione del rifiuto urbano prima di essere conferito in discarica;
- la riduzione del materiale da smaltire in discarica;
- la produzione di combustibile.

È possibile identificare due/tre tipologie di trattamento meccanico biologico delle frazioni residue:

- **a flusso separato**, nella quale si ha la differenziazione del materiale in due flussi: una frazione “organica” (la frazione di sottovaglio) da destinare al trattamento biologico e una frazione secca (sopravaglio) da destinare al recupero di materia, alla valorizzazione energetica o al conferimento in discarica [4];
- **a flusso unico**, cioè dove tutto il rifiuto in ingresso all'impianto subisce un trattamento biologico, mentre il trattamento meccanico si limita ad una semplice frantumazione del rifiuto [4].

- **misto** in cui si ha una prima biostabilizzazione<sup>1</sup> del rifiuto a monte del vaglio per eliminare gran parte dell'umidità del materiale organico e una successiva maturazione del sottovaglio per ottenere una biostabilizzazione completa.

La tecnologia MBT nasce per potenziare la raccolta differenziata (o sostituirla in parte o in toto se non è già presente in un determinato contesto) e quindi privilegiare il recupero di materia e di energia rispetto allo smaltimento in discarica. Ad oggi, però, nessun impianto è in grado di ridurre a zero la percentuale di materiale conferito in discarica. Infatti, come descritto nel capitolo precedente, i processi di selezione meccanica e di biostabilizzazione della frazione organica producono dei residui che devono essere necessariamente conferiti in discarica [4].

### 2.1.1 Il trattamento meccanico

Relativamente al trattamento meccanico si parla di **pre-trattamento** se il rifiuto viene vagliato<sup>2</sup> per separare la frazione umida dei rifiuti (destinata al successivo trattamento biologico), detta anche *sottovaglio*, da quella secca (destinata a recupero di materia e/o di energia) detta *sopravaglio*. Si parla invece di **post-trattamento** se si intende una semplice vagliatura del materiale in uscita dal trattamento biologico per ottenere una certa qualità del prodotto finale [4].

A seconda della complessità impiantistica il flusso primario non ancora vagliato e/o i due flussi separati di frazione secca e umida, vengono ulteriormente trattati per separare i metalli (ferrosi e non) e/o per subire eventualmente ulteriori processi di raffinazione e separazione degli scarti da smaltire in discarica. Di seguito sono riportate alcune di queste tecnologie.

#### Vaglio a tamburo rotante

L'operazione di separazione primaria della frazione secca da quella umida è generalmente ottenuta mediante un vaglio a tamburo rotante (velocità di rotazione compresa tra 10-18 rpm), cioè un selezionatore dimensionale a forma cilindrica che separa i rifiuti in base alle dimensioni delle maglie forate di cui è costituito (ved. fig. 2.1 e 2.2). Per facilitare la discesa del materiale, il vaglio a tamburo rotante è inclinato di 3-5 gradi. In particolare la dimensione del diametro dei fori (tipicamente compreso tra 0 e 200 mm) determina:

<sup>1</sup>Processo descritto nel paragrafo 2.1.2.

<sup>2</sup>Vaglio: Apparecchio che serve a separare elementi di diverse dimensioni facenti parte di un aggregato di sostanze incoerenti in pezzi o in polvere (fonte: vocabolario Treccani).



- La **quantità** dei due flussi. All'aumentare del diametro aumenta la percentuale dei materiali presenti nel sottovaglio, cioè quelli più pesanti e caratterizzati da dimensioni più elevate.
- La **qualità** dei due flussi. Nel caso in cui la frazione secca venga utilizzata in un termoutilizzatore posto a valle dell'impianto, si osserva che, all'aumentare del diametro, si riduce la quantità e aumenta il potere calorifico della frazione secca perché costituita prevalentemente da materiali più leggeri e più "nobili" dal punto di vista del contenuto energetico.

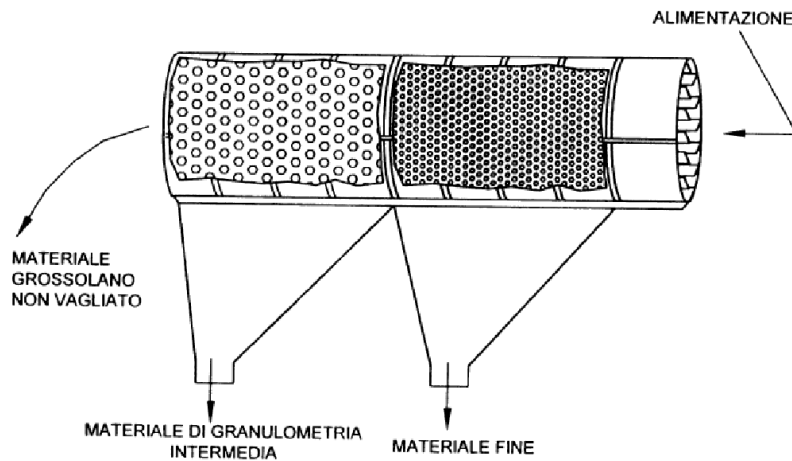


Figura 2.1: Rappresentazione di un vaglio a tamburo rotante [4]

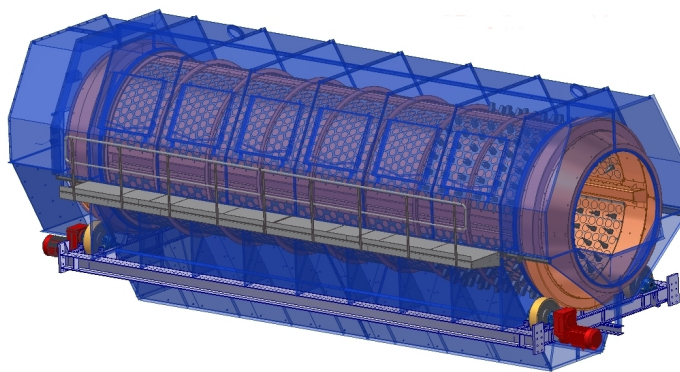


Figura 2.2: Esempio di vaglio a tamburo rotante (Emmen)

### Separatori magnetici

La figura 2.3 mostra un separatore magnetico a nastro palettato posto sopra il flusso principale di rifiuti che, tramite opportuni magneti permanenti o elettromagneti, raccoglie e separa i materiali ferrosi.

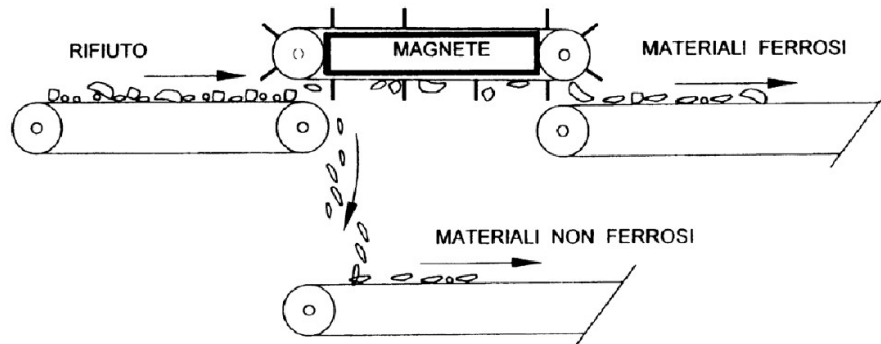


Figura 2.3: Rappresentazione di un separatore magnetico a nastro. [4]

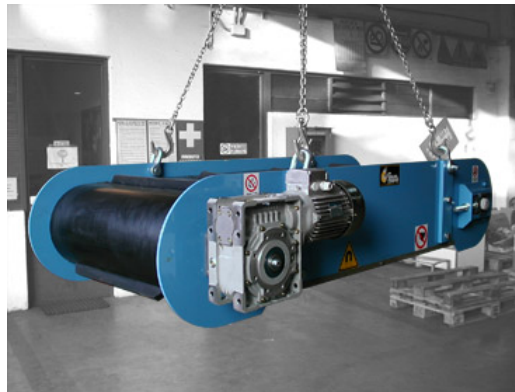


Figura 2.4: Esempio di separatore magnetico (Gauss Magneti).

### Separatori elettrostatici

Dato che i metalli non ferrosi, come alluminio e rame, non presentano caratteristiche magnetiche, ma possono essere caricati elettricamente, sono separati dal flusso principale dei rifiuti sfruttando il fenomeno delle correnti indotte. All'interno dell'estremità del nastro trasportatore è posizionato un rotore che genera un campo magnetico alternato il quale produce delle forze repulsive che spingono i materiali non ferrosi verso direzioni differenti da quelle degli

altri componenti. Alluminio e rame vengono raccolti così tramite opportuni deviatori (ved. fig. 2.5 e 2.6).

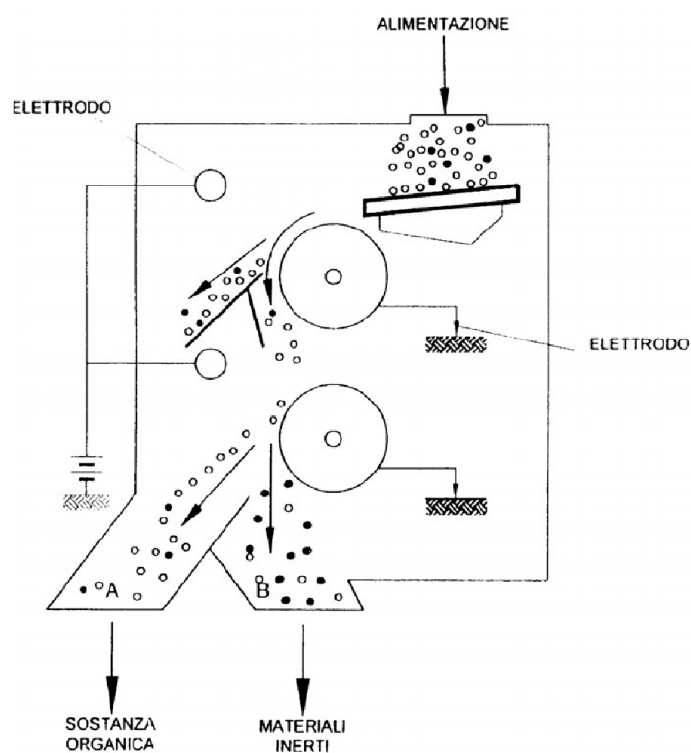


Figura 2.5: Rappresentazione di un separatore elettrostatico. [4]



Figura 2.6: Esempio di separatore elettrostatico (Gauss Magneti).

### Vaglio stellare

Questa macchina è utilizzata per raffinare i rifiuti organici o il compost (ved. fig. 2.7):

- la frazione fine cade attraverso lo spazio presente tra una ruota dentata e l'altra del vaglio (sottovaglio);
- la frazione con pezzatura maggiore percorre tutta la sezione del vaglio senza attraversare gli spazi (sopravaglio).

Le prestazioni dipendono prevalentemente dallo spazio presente tra ciascuna ruota dentata.



Figura 2.7: Esempio di vaglio Stellare (Neuenhauser)

### Tavole densimetriche

Le tavole densimetriche separano le frazioni dei rifiuti sfruttando la diversa densità degli stessi (ved. fig. 2.8). Sono costituite da piani nervati oscillanti che, grazie al loro moto alternativo, impongono al rifiuto dei sobbalzi con i

quali i materiali più pesanti si separano dai materiali più leggeri superando le nervature posizionate perpendicolarmente alla direzione del moto. In particolare questa macchina è utilizzata per raffinare la materia organica biostabilizzata del rifiuto o del compost tramite la separazione di materiali inerti (residui). Alcune di queste macchine sono dotate di un sistema di ventole che insufflano una portata d'aria attraverso la piastra perforata (e inclinata) che costituisce la tavola:

- la frazione leggera dei materiali organici si stacca dalla piastra e cade in un ciclone;
- la frazione fine di inerti cade attraverso i fori della piastra;
- i materiali con una pezzatura elevata sono trascinati sulla piastra e in particolare gli inerti salgono e si dirigono verso la parte superiore della piastra, mentre quelli organici sono trascinati verso quella inferiore.

I parametri principali che influenzano le prestazioni di questa macchina sono *la portata d'aria e il diametro dei fori della piastra.*

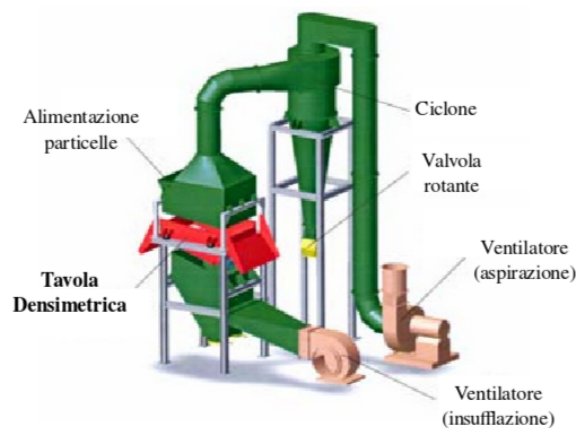


Figura 2.8: Esempio di tavola densimetrica (Urbar)

### 2.1.2 Il trattamento biologico

*Il trattamento biologico consiste in un processo volto a conseguire la mineralizzazione delle componenti organiche maggiormente degradabili (stabilizzazione) e l'igienizzazione per pastorizzazione del prodotto [4].* Gli scopi dei trattamenti biologici sono perciò:

- il raggiungimento della *stabilizzazione/inertizzazione della matrice organica* (cioè la perdita di fermentescibilità) mediante una serie di processi e reazioni chimiche [4];
- il conseguimento *dell'igienizzazione della massa* debellando i fitopatogeni presenti nei residui vegetali, nonché i patogeni umani veicolati presenti nei materiali di scarto (es.: fanghi civili) [4];
- *la riduzione del volume e della massa dei materiali trattati* [4].

I processi utilizzati per raggiungere questi obiettivi sono:

1. *la digestione anaerobica;*
2. *la digestione aerobica;*
3. *la biostabilizzazione;*
4. *la biodisidratazione o bioessiccazione.*

Per determinare la stabilità dei rifiuti o del compost, relativamente ai processi 2, 3 e 4 (aerobici), si ricorre al **IRD** (Indice di Respirazione Dinamico) descritto nella norma *UNI/TS 11184* e determinato mediante la procedura descritta da *Adani et al.(2001)*. Esso valuta il consumo di ossigeno richiesto per la degradazione nell'unità di tempo di una matrice organica (o delle sostanze putrescibili contenute nel flusso di rifiuti). Per valutarlo si effettuano delle prove in laboratorio per simulare i processi di bio-ossidazione che avvengono nei reattori degli impianti reali. Il test è effettuato generalmente tramite l'uso di un *respirometro aerobico a flusso continuo* seguendo il metodo proposto dal Dipartimento di Produzione Vegetale dell'Università di Milano.

L'ossigeno consumato durante l'attività biologica aerobica si calcola come differenza tra la concentrazione di quello entrante meno quello uscente e calcolata come la media degli Indici Respirometrici Istantanei ( $IRD_i$ ) [5]:

$$IRD_i = Q \cdot \frac{([O_2]_i - [O_2]_o)}{V_g - SV} \cdot 31,98 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \quad (2.1)$$

dove:

- $IRD_i$  = Indice di Respirazione Dinamico istantaneo (misurato ogni 2 ore);
- $Q$  = flusso d'aria ( $l/h^{-1}$ );

- $([O_2]_i - [O_2]_o) =$  differenza di concentrazione dell'ossigeno in ingresso e in uscita dal respirometro ( $\text{ml/l}^{-1}$ );
- $V_g =$  volume occupato da una mole di gas. Assumendo il valore standard per  $T_1 = 273,15 \text{ K}$  e  $p_1 = 1 \text{ atm}$  pari a  $V_{g,1} = 22,4 \text{ l/mol}^{-1}$ , il valore di  $V_g$  ( $V_{g,2}$ ) alla nuova temperatura  $T_2$  viene calcolato con la seguente equazione:  $V_{g,2} = (V_{g,1} \cdot T_2/T_1)$  con  $T$  espressa in kelvin;
- $31,98 =$  massa molecolare dell'ossigeno -  $O_2$  ( $\text{g/mol}^{-1}$ );
- $SV =$  solidi volatili (kg).

L'indice IRD viene calcolato come la media degli indici respirometrici istantanei ( $IRD_i$ ) relativi alle 24 h durante le quali la respirazione microbica è più elevata<sup>3</sup> (ved. fig. 2.9):

$$IRD = \frac{\sum_{i=0}^t IRD_i}{12} \quad (2.2)$$

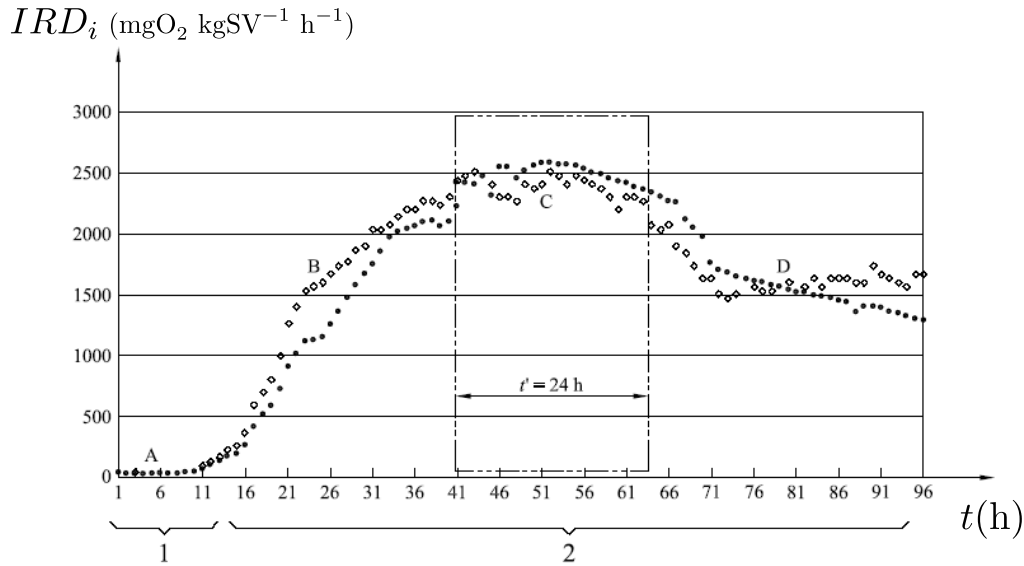


Figura 2.9: Andamento dell'IRD in funzione del tempo di analisi.

<sup>3</sup>NB: se l'indice  $IRD_i$  è calcolato ogni ora si dovrà dividere per 24 anziché 12.

### La digestione anaerobica

La digestione anaerobica consiste nella stabilizzazione della matrice organica in reattori chiusi, caratterizzati da un ambiente con scarsa/assente presenza di ossigeno ( $O_2$ ) e dalla presenza di opportuni batteri<sup>4</sup>. In queste condizioni i principali prodotti delle reazioni biochimiche, di parte della sostanza introdotta, sono due gas: il *metano* ( $CH_4$ ) e l'*anidride carbonica* ( $CO_2$ ). La frazione restante è composta da un *digestato* che dovrà subire ulteriori trattamenti e *acqua* che può essere in parte riutilizzata nel processo e in parte purificata in un apposito impianto. Nel caso in cui la matrice sia caratterizzata da substrati proteici complessi (e quindi con una concentrazione rilevante di composti azotati) si può trovare tra i prodotti una certa quantità di *ammoniaca* ( $NH_3$ ).

L'obiettivo principale della digestione anaerobica, oltre alla stabilizzazione della sostanza organica comune a tutti i processi di trattamento biologico, è quello del **recupero energetico** per mezzo della produzione di **biogas** (miscela caratterizzata prevalentemente da circa il 50-70% di  $CH_4$  e dal 25-50% di  $CO_2$ ). Questa miscela gassosa può essere utilizzata in motori a combustione interna per produrre energia elettrica e calore o immessa direttamente nella rete di distribuzione del gas naturale [4].

Esistono diverse tecnologie che sfruttano la digestione anaerobica e possono essere classificate in base al grado di solidi presenti nella matrice organica:

- digestione ad umido (contenuto di solidi < del 10%);
- digestione a secco (contenuto di solidi > del 20%);
- digestione a semi secco (contenuto di solidi compreso tra il 10 e il 20%).

### La digestione aerobica

La digestione aerobica (detta anche **compostaggio**) consiste nella decomposizione e umidificazione, da parte di macro e microrganismi<sup>5</sup> in presenza di ossigeno ( $O_2$ ), di matrici organiche selezionate<sup>6</sup>, con lo scopo di produrre compost di alta qualità da utilizzare in campo agronomico. Questo processo si può ottenere in *reattori chiusi* (generalmente di forma cilindrica) o posizionando la matrice organica in pile o mucchi posti all'aria aperta [4]. A seconda di come è ottenuta la digestione aerobica, l'aria necessaria per l'ossidazione

---

<sup>4</sup>Si possono usare batteri mesofili o termofili; nei reattori le reazioni biochimiche avvengono a circa 35 – 41 °C per i primi e 57 – 70 °C per i secondi.

<sup>5</sup>Sempre batteri mesofili o termofili.

<sup>6</sup>Cioè l'umido da raccolta differenziata e/o scarti dell'industria agro-alimentare.



viene insufflata per mezzo di ventilazione forzata (con ventilatori) o per circolazione naturale. Il calore necessario per il processo è fornito direttamente dalle reazioni di bio-ossidazione.

L'obiettivo principale del compostaggio è ottenere un materiale completamente stabilizzato che può essere utilizzato in agricoltura (il compost), come ricopertura delle discariche o essere conferito direttamente in queste ultime. Il gas prodotto dalla digestione aerobica non contiene metano ( $\text{CH}_4$ ), ma prevalentemente anidride carbonica ( $\text{CO}_2$ ), perciò non risulta possibile attuare anche un recupero energetico [4].

Anche per la digestione aerobica, le tecnologie impiegate possono essere classificate a seconda del tipo di processo cioè *a umido* o *a secco*.

### La biostabilizzazione

L'obiettivo della biostabilizzazione è quello di trattare la matrice organica putrescibile (generalmente contenuta nei rifiuti urbani) tramite bio-ossidazione, per ottenere un composto stabile dal punto di vista biologico (cioè un materiale *inerte*) [4] prima dello smaltimento in una discarica controllata o per produrre un materiale da utilizzare per ripristini ambientali. L'inertizzazione si ottiene combinando opportunamente processi meccanici e biologici secondo le configurazioni descritte nel paragrafo 2.1.

Lo scopo di questo orientamento è quindi quello di massimizzare la **perdita di processo** (cioè la produzione di  $\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{CO}_2$  ottenute dalla biostabilizzazione), la quantità e la qualità del combustibile da avviare al recupero energetico (cioè ottenere una frazione secca del sopravaglio con un contenuto minimo di materiale organico) e ottenere una matrice organica residua caratterizzata da un minimo impatto ambientale se collocata in discarica (in modo da avere basse produzioni di biogas e percolato dai processi anaerobici che si verificano in discarica).

### La bioessiccazione

La bioessiccazione consiste nella riduzione dell'umidità presente nel rifiuto per mezzo di reazioni biossidative della matrice organica. Gli obiettivi principali di questo processo sono:

- la **stabilizzazione della sostanza organica** (dal punto di vista igienico) per poter stoccare a lungo il prodotto finale ed evitare fenomeni di putrescibilità del rifiuto con emissioni maleodoranti di gas e solidi [4];

- **l'incremento del PCI del materiale organico** (che è di fatto una biomassa) per **ottenere un combustibile** con basso tenore di umidità adatto per un recupero energetico tramite termovalorizzazione [4].

Le fasi principali che caratterizzano la bioessiccazione sono:

- la *triturazione del rifiuto tal quale* per ottenere un aumento della superficie di contatto e quindi per accelerare lo scambio di calore e di massa [4];
- il *trattamento biologico* della sostanza triturata [4].

## 2.2 Sistema integrato MBT + WtE

Spesso gli impianti MBT sono accoppiati a impianti di recupero energetico detti anche WtE (Waste to Energy) per separare la frazione secca da quella umida e quindi incrementare il potere calorifico del flusso in ingresso. Il rifiuto a monte dell'impianto MBT infatti potrebbe essere caratterizzato da un *PCI* troppo basso e quindi tale da non garantire una buona combustione. In questo caso infatti sarebbe necessario ricorrere all'uso di una notevole quantità di combustibile secondario (come il gas naturale) per permettere il funzionamento dell'impianto in condizioni operative adeguate.

Il sopravaglio destinato al termoutilizzatore, se non trattato con ulteriori processi di raffinazione, può essere chiamato semplicemente *Frazione Secca Combustibile (FSC)*. In generale la definizione e classificazione dei combustibili utilizzati in questi impianti, o eventualmente<sup>7</sup> in co-combustione nei cementifici, è più complessa e inoltre sono cambiate recentemente le normative inerenti al tema. Prima delle modifiche del 2010, *il D.L.gs n. 152/2006 e s.m.i. nell'articolo 183* classificava i potenziali combustibili, da utilizzare negli impianti WtE, in tre categorie:

- **Frazione Secca** (generica), *rifiuto a bassa putrescibilità e a basso tenore di umidità proveniente da raccolta differenziata o trattamento dei rifiuti urbani, avente un rilevante contenuto energetico*. La frazione secca, di fatto, costituisce un potenziale combustibile derivante da processi di selezione secco-umido (in genere con  $PCI < 15$  MJ/kg);
- **Combustibile Da Rifiuti (CDR)**: *il combustibile classificabile, sulla base delle norme tecniche Uni 9903-1 e successive modifiche ed integrazioni, come RDF (Refuse-Derived Fuel) di qualità normale (con  $PCI >$*

<sup>7</sup>Cioè se soddisfano determinate caratteristiche di PCI e di composizione.

15 MJ/kg), che è ottenuto dai rifiuti urbani e speciali non pericolosi mediante trattamenti finalizzati a garantire un potere calorifico adeguato al suo utilizzo, nonché a ridurre e controllare:

1. il rischio ambientale e sanitario;
  2. la presenza di materiale metallico, vetri, inerti, materiale putrescibile e il contenuto di umidità;
  3. la presenza di sostanze pericolose, in particolare ai fini della combustione.
- **Combustibile Da Rifiuti di qualità elevata (CDR-Q):** il combustibile classificabile, sulla base delle norme tecniche *Uni 9903-1* e successive modifiche ed integrazioni, come *RDF di qualità elevata* (con  $PCI > 20$  MJ/kg);

Con il dlgs n. 205/2010, recepimento della direttiva 98/2008/CE, all' art.183 comma 1 lettera cc del dlgs 152/06, si introduce la definizione di **CSS Combustibile Solido Secondario** (che rispetta le caratteristiche di classificazione e di specificazione individuate dalle norme tecniche *UNI CEN/TS 15359*), classificato come rifiuto speciale. Il CSS è quindi un combustibile solido recuperato da rifiuti non pericolosi e destinati alla produzione di energia presso gli impianti di incenerimento e/o co-incenerimento. I CSS, di fatto, "sostituiscono" i CDR e ne ampliano le tipologie perché sono classificati in base:

- al **potere calorifico inferiore (PCI)**, che è un indicatore del valore di mercato del CSS perché rappresenta il suo contenuto energetico;
- al **contenuto di cloro**, che descrive l'indice di aggressività del combustibile sui componenti degli impianti;
- al **contenuto di mercurio** che è un indicatore dell'impatto ambientale del combustibile.

Nella tabella 2.1 si può notare che ciascun CSS è univocamente determinato da una terna di valori corrispondenti alle classi in cui cadono. Questo tipo di classificazione prevede ben 125 classi diverse<sup>8</sup>. A seconda della combinazione dei tre parametri, questo criterio fornisce all'utilizzatore del combustibile un'informazione chiara e immediata. Oltre a queste informazioni è necessario completare la definizione di CSS con altri parametri chimico-fisici:

- il diametro e la forma delle particelle;

---

<sup>8</sup>Per il CDR esistevano solamente due criteri di classificazione (CDR e CDR-Q).

- il contenuto di umidità;
- il contenuto di cenere;
- il contenuto di metalli pesanti elencati nella direttiva di incenerimento rifiuti. Infatti questi ultimi, precisati nel D.M. 22/2013, costituiscono una discriminante per definire se i CSS possono essere considerati “fine rifiuto”, e quindi prodotto, o CSS-combustibile, definito in Europa come Solid Recovered Fuels - End of Waste o SRF-EoW.

Caratteristica	Misura statistica	Unità di misura	Valori limite per classe				
			1	2	3	4	5
<b>PCI</b>	Media	MJ/kg t.q	≥ 25	≥ 20	≥ 15	≥ 10	≥ 3
<b>CI</b>	Media	% s.s.	≤ 0,2	≤ 0,6	≤ 1,0	≤ 1,5	≤ 3
<b>Hg</b>	Mediana	mg/MJ t.q	≤ 0,02	≤ 0,03	≤ 0,08	≤ 0,15	≤ 0,50
	80° percentile	mg/MJ t.q	≤ 0,04	≤ 0,06	≤ 0,16	≤ 0,30	≤ 1,00

Tabella 2.1: Caratteristiche di classificazione per i CSS (da UNI EN 15359).  
Fonte: Hera e Federambiente.

In questo elaborato il combustibile, utilizzato in impianti dedicati di termovalorizzazione, viene chiamato semplicemente FSC (Frazione Secca Combustibile) e classificato in base al potere calorifico variabile in funzione di:

- tipologia di rifiuto urbano in ingresso;
- diametro del vaglio primario, che consente di determinare il flusso di combustibile principale;
- caratteristiche delle altre apparecchiature, che definiscono il flusso di combustibile secondario.

In ultima analisi la FSC trattata nel presente elaborato sottintende un'ampia fascia di poteri calorifici e caratteristiche chimico fisiche, tali da rientrare nella suddetta classificazione dei CSS (vedi tabella 2.1). Peraltro l'impianto di trattamento meccanico di riferimento non considera ulteriori implementazioni (finalizzate a una raffinazione del CSS per incrementare il PCI e/o realizzare un CSS-combustibile, ossia un prodotto che possa essere venduto o utilizzato in altri impianti come i cementifici o le centrali termoelettriche), come ad esempio:

- la riduzione dimensionale ed omogeneizzazione dei materiali secchi grezzi;
- la pressatura in balle legate con reggette in plastica, addensamento o pellettizzazione<sup>9</sup>.

## 2.3 Impianto MBT di riferimento

Il sistema modellizzato (ved. fig. 2.11) fa riferimento, con la possibilità di modificare alcuni parametri, a un impianto di trattamento meccanico biologico a flusso misto, progettato dalla *Daneco Impianti*. La suddivisione dell'impianto prevede le seguenti dotazioni [5]:

1. **pretrattamento**, caratterizzato da un'area adibita allo stoccaggio e un successivo macchinario per l'apertura dei sacchi (lacerasacchi, ved. fig. 2.10);
2. **biostabilizzazione** del rifiuto urbano tal quale, ottenuta mediante l'uso di *biocelle* (a sistema statico, ciclo discontinuo);
3. **(I) selezione/vagliatura**, ottenuta mediante l'uso di un vaglio a tamburo rotante (il diametro scelto per il contesto considerato è di 60 mm, mentre il modello realizzato, grazie ai dati forniti da Daneco, è in grado di valutare le prestazioni in funzione di un diametro variabile da 0, assenza del vaglio, a 125 mm);
4. **Maturazione del sottovaglio**, che prevede una linea di maturazione e raffinazione del flusso finalizzata alla produzione di RBM (Rifiuto Stabilizzato Maturo) per mezzo di un sistema a “*bacino a ciclo continuo con apparato traslatore*”;

---

<sup>9</sup>Nella tecnica, operazione di agglomerazione destinata a trasformare prodotti polverulenti in granuli generalmente sferici (fonte: vocabolario Treccani).



Figura 2.10: Esempio di lacerasacchi (Shearmaster)

5. **(II) selezione/vagliatura** ottenuta tramite un *vaglio stellare* che consente una selezione più o meno accurata della RBM fine rispetto a quella grossolana (per produrre un RBM di buona qualità) e una *tavola densimetrica* che consente di separare la frazione fine vetrosa ed inerte (da smaltire in discarica) dalla frazione di RBM (destinata a recupero di materia).
6. **utilizzo/recupero del sottovaglio** (RBM) utilizzato per la copertura giornaliera dell'eventuale discarica o, se di qualità idonea, come ammendante agricolo;
7. **confezionamento in balle dei sopravagli**, cioè delle FSC (Frazioni Secche Combustibili) destinate al recupero energetico.

### 2.3.1 Biostabilizzazione a monte del vaglio

Le **biocelle a sistema statico**, utilizzate per la biostabilizzazione del rifiuto urbano (punto 2.), sono costituite da reattori, di forma rettangolare, in cemento a tenuta stagna e isolati termicamente (ved. fig. 2.12). Ogni biocella è provvista di un portellone sul lato minore per il caricamento della massa da trattare mediante una pala meccanica [5].

L'ossigeno necessario per le reazioni biochimiche della matrice organica è fornito da un apparato di ossigenazione così strutturato:

- l'aria viene prelevata dall'atmosfera per mezzo di un sistema ad aerazione forzata che insuffla l'aria all'interno del reattore attraverso il pavimento della cella, costituito da piastre metalliche forate [5];

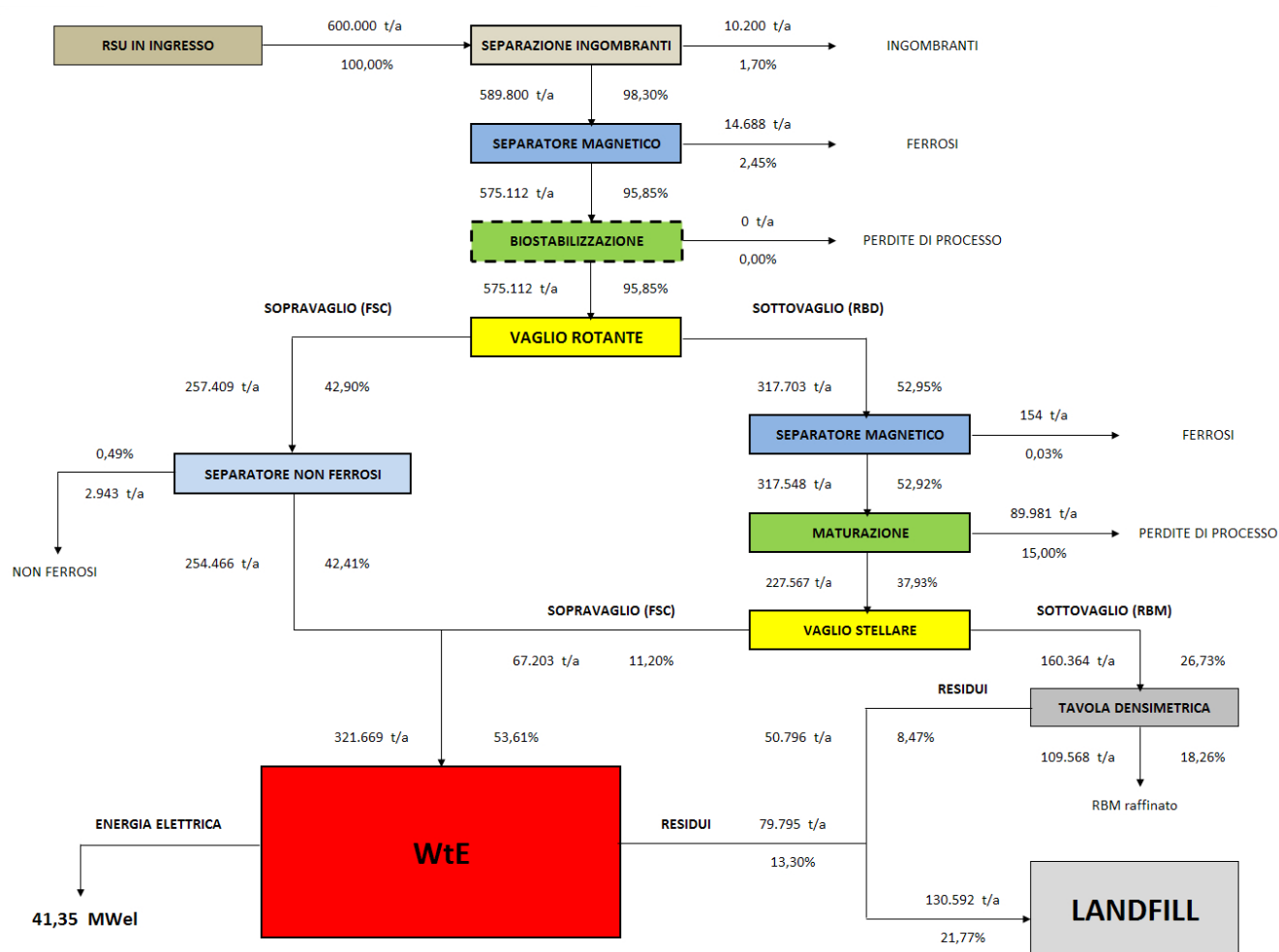


Figura 2.11: Schema dell'impianto di riferimento.

- l'aria esausta, prima di essere depurata attraverso un biofiltro<sup>10</sup> e successivamente emessa in atmosfera, viene prelevata tramite ventilatori nella parte superiore del reattore e raffreddata mediante uno scambiatore aria-aria e uno scambiatore aria-acqua [5].

Lo scambiatore aria-aria può essere utilizzato per pre-riscaldare l'aria in ingresso durante i periodi freddi (per favorire così la cinetica delle reazioni), mentre quello aria-acqua cede il calore accumulato dall'acqua attraverso un

<sup>10</sup>Utilizzato per abbattere le emissioni maleodoranti dovute alla decomposizione di alcune sostanze volatili organiche come ammine e mercaptani. Utilizza batteri e funghi che, grazie a reazioni biologiche di ossidazione e idrolisi, sono in grado di metabolizzare i composti organici e inorganici presenti nell'aria esausta.

evaporatore o lo recupera per soddisfare il fabbisogno termico dell'edificio di servizio. L'aria esausta viene raffreddata per separare le sostanze odorose solubili, mentre l'acqua di condensa, dopo essere stata trattata, può essere usata per umidificare le masse [5].

Il controllo del processo di biostabilizzazione viene gestito mediante la misurazione, con appositi strumenti, della quantità di  $\text{CO}_2$ . Gli altri parametri di controllo del processo di biostabilizzazione sono:

- la **temperatura** del materiale, che deve essere superiore a  $55\text{ }^\circ\text{C}$  (per igienizzare in modo completo il materiale) e compresa tra  $60 - 70\text{ }^\circ\text{C}$ ;
- la **concentrazione di ossigeno** ( $\text{O}_2$ ) dell'aria prelevata dall'atmosfera ed eventualmente ricircolata, che non deve avere un valore inferiore al 14%.

### 2.3.2 Maturazione del sottovaglio

Il principio di funzionamento della soluzione *bacino a ciclo continuo con apparato traslatore*, si basa sul rivoltamento delle masse con trasferimento del materiale mediante macchine portate su carroponete in corsia unica di larghezza elevata (oltre 33 m) e altezza del cumulo maggiore di 3 m. Le miscele fresche vengono trasportate e disposte a cumulo mediante nastri trasportatori. Il materiale quindi subisce un numero prestabilito di rivoltamenti fino a raggiungere, dopo un tempo prefissato, l'estremità del bacino per poi essere prelevato. La bio-ossidazione è favorita da sistemi ad aerazione forzata e da sistemi automatizzati per l'umidificazione della massa [5] (ved. fig. 2.12).



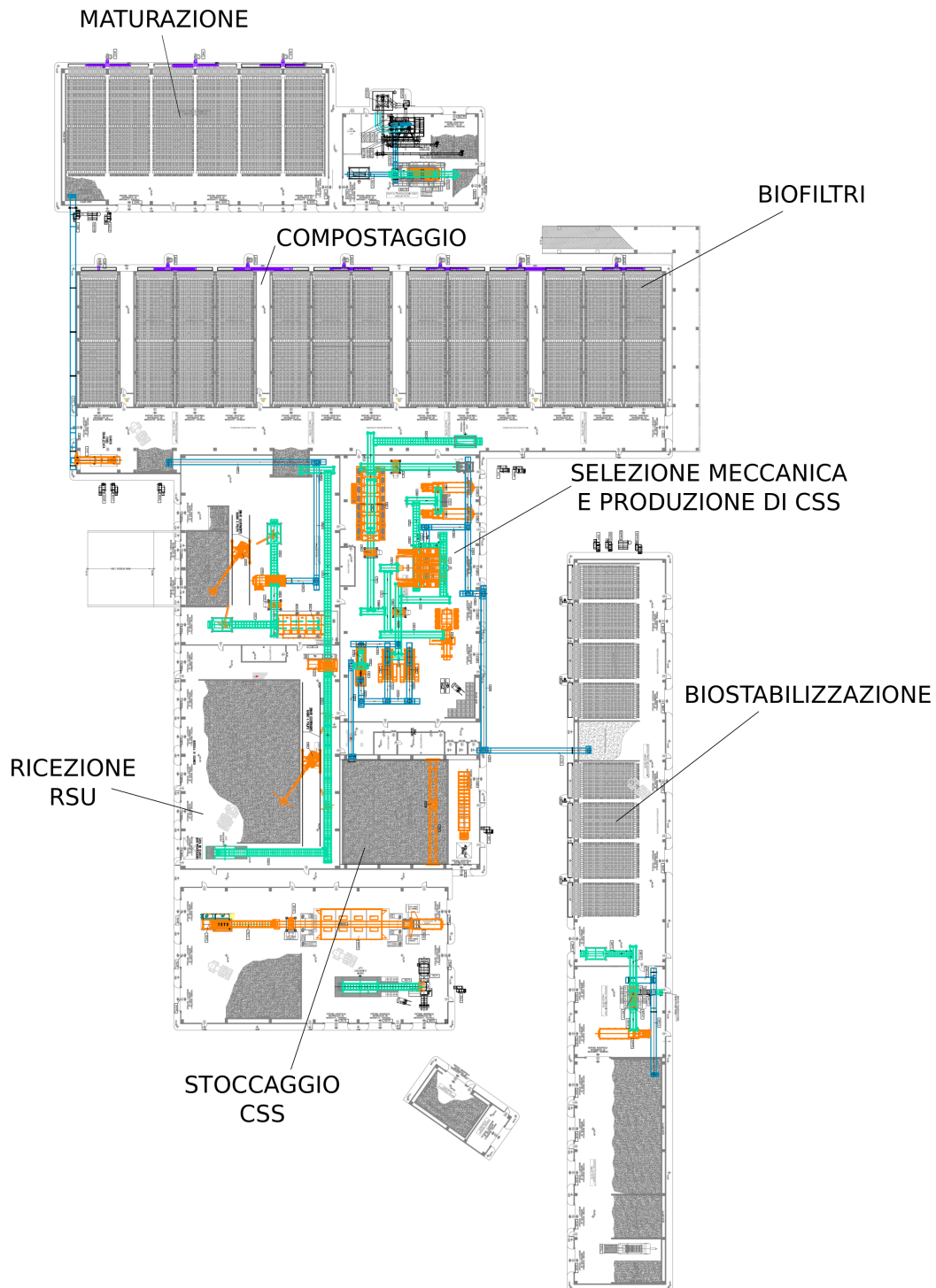


Figura 2.12: Planimetria di un ipotetico impianto MBT.



Figura 2.13: Vista interna di un ipotetico impianto MBT.

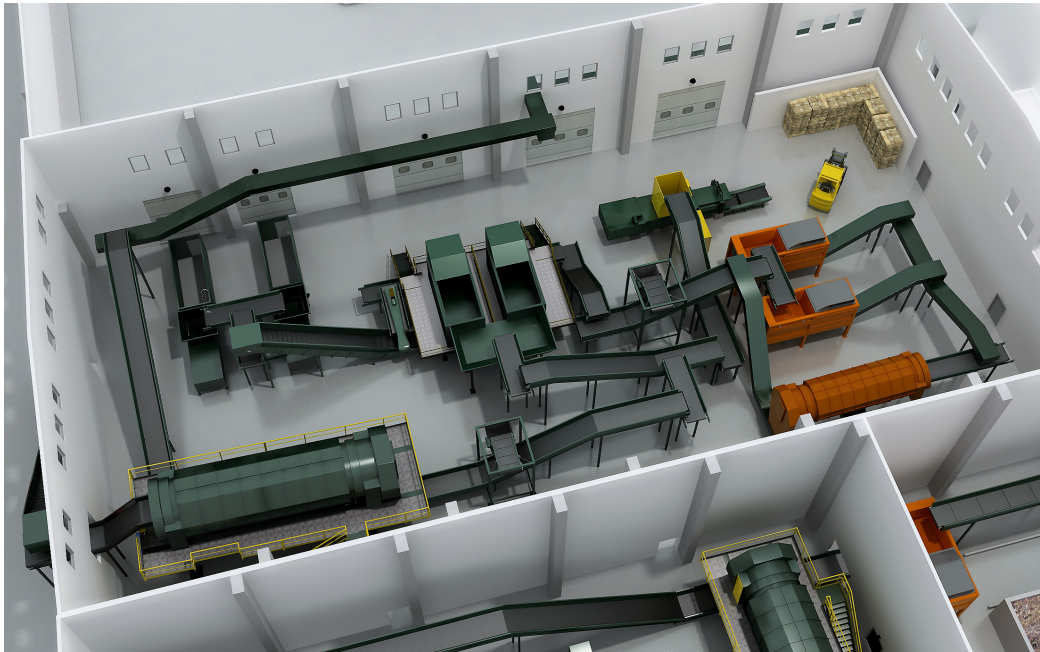


Figura 2.14: Vista interna di un ipotetico impianto MBT.



Figura 2.15: Vista esterna di un ipotetico impianto MBT.

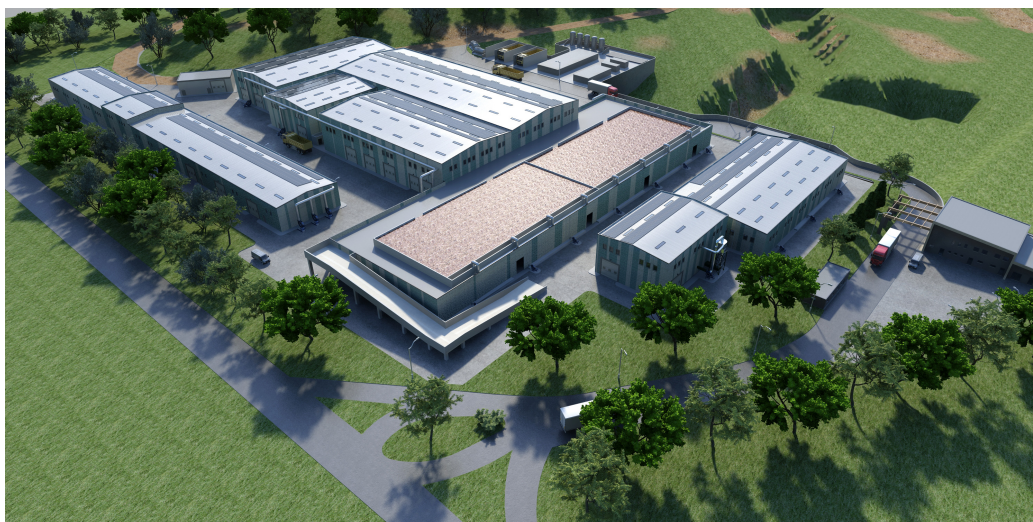


Figura 2.16: Vista esterna di un ipotetico impianto MBT.



# Capitolo 3

## Recupero Energetico da rifiuti (Waste to Energy - WtE)

### 3.1 Introduzione

L'obiettivo dei trattamenti termici è quello di ridurre in peso e in volume i rifiuti (RU) mediante l'ossidazione della frazione combustibile (FC).

Gli atomi che compongono i rifiuti in ingresso sono prevalentemente carbonio (C), idrogeno (H), ossigeno (O), azoto (N), zolfo (S), cloro (Cl) e in minor quantità fluoro (F), bromo (Br) ed eventuali metalli in tracce. Sono presenti inoltre una certa quantità di umidità (U) e di materiale inerte (Ashes, A).

In tabella 3.1 è riportato un esempio di analisi elementare che considera le sostanze principali presenti nei rifiuti urbani.

C	H	O	N	Cl	S	F	A	U
32,10%	4,35%	20,30%	0,34%	0,60%	0,16%	0,02%	18,00%	24,1%

Tabella 3.1: Esempio di analisi elementare del rifiuto tal quale (tq).

Dato che la quantità di frazione combustibile è data da:

$$\%FC = 100\% - \%U - \%A \quad (3.1)$$

si può ricavare l'analisi elementare della frazione combustibile dividendo la percentuale di ogni componente, presente in tabella 3.1, per quella della frazione combustibile:

$$\%C_{FC} = \frac{\%C}{\%FC}, \quad \%H_{FC} = \frac{\%H}{\%FC}, \quad \%O_{FC} = \frac{\%O}{\%FC}, \quad \dots \quad (3.2)$$

C	H	O	N	Cl	S	F
55,5%	7,50%	35,10%	0,58%	1,03%	0,27%	0,04%

Tabella 3.2: Esempio di analisi elementare della frazione combustibile.

Per calcolare il potere calorifico inferiore della frazione combustibile si può utilizzare la seguente formula [6]:

$$PCI_{FC} \left( \frac{\text{MJ}}{\text{kg}_{FC}} \right) = 33,95 \cdot C + 121,7 \cdot \left( H - \frac{O}{8} - \frac{Cl}{35,5} - \frac{F}{19} \right) + 9,4 \cdot S \quad (3.3)$$

Sottraendo il calore ceduto alla percentuale di acqua contenuta nel combustibile (cioè l'umidità), necessario per farla evaporare, si ottiene il potere calorifico dei RU in ingresso:

$$PCI_{RU} \left( \frac{\text{MJ}}{\text{kg}_{RU}} \right) = PCI_{FC} \cdot (1 - U - A) - 2,5 \cdot U \quad (3.4)$$

## 3.2 Tecnologie di trattamento termico

Esistono diverse tecnologie che sfruttano il trattamento termico dei rifiuti e possono essere classificate in quattro categorie principali:

- incenerimento (a griglia, letto fluido e tamburo rotante);
- gassificazione;
- pirolisi;
- altre minori (dissociazione molecolare, torcia al plasma, ecc...).

La più diffusa è quella dell'incenerimento con combustore a griglia, su cui si basa lo studio del presente elaborato.

Gli impianti moderni di incenerimento (termovalorizzatori o termoutilizzatori), detti anche WtE (ved. fig. 3.1), sono costituiti da:

1. sistema di ricezione, movimentazione e alimentazione del combustibile;
2. sistema di combustione e generazione vapore;
3. ciclo termico e turbogruppo;
4. sistema di trattamento dei fumi;

5. sistemi ausiliari meccanici ed elettrostrumentali;
6. camino di evacuazione fumi.

Esistono diverse soluzioni, che si differenziano nella configurazione e disposizione dei singoli componenti impiantistici (in particolare, per quanto riguarda il ciclo termico e per il trattamento dei fumi). In questo elaborato la tipologia impiantistica considerata (modellizzata a livello dimensionale in funzione della quantità e qualità dei rifiuti in ingresso), fa riferimento al progetto del termovalorizzatore di Salerno della *Daneco Impianti*.

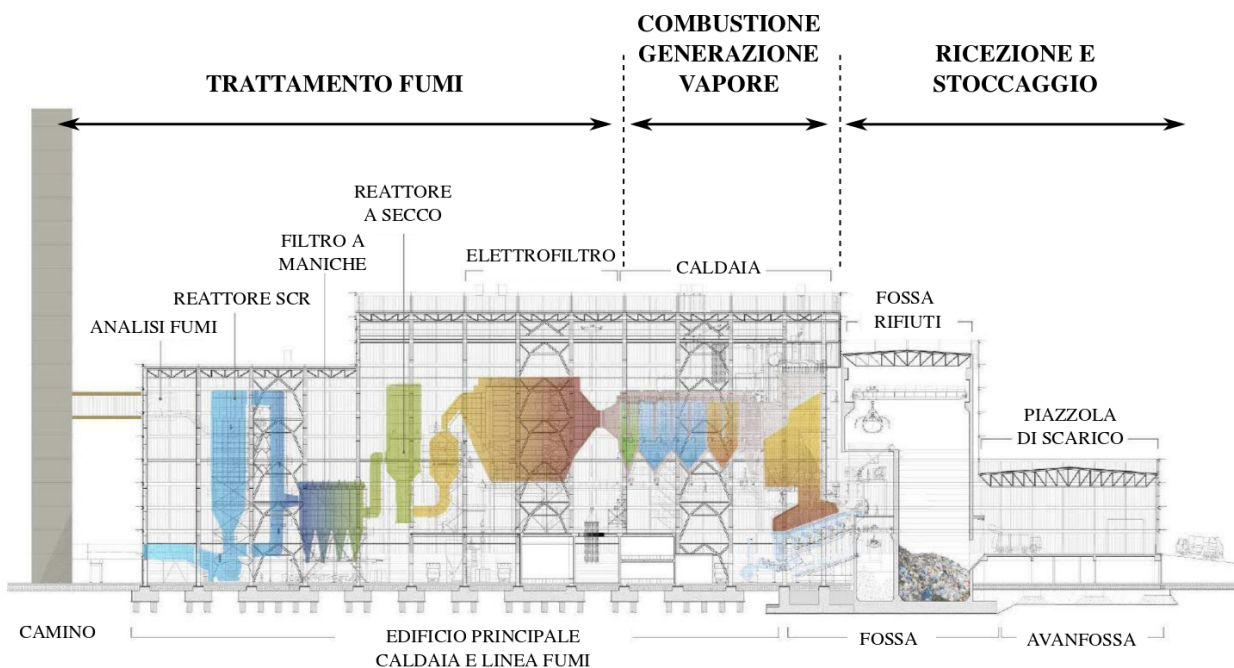


Figura 3.1: Sezione di un moderno WtE.

### 3.3 Impianto WtE di riferimento

L'impianto di Salerno è stato progettato con le più moderne ed efficienti tecnologie di combustione (con griglia mobile) e di trattamento dei fumi, in accordo con la definizione di BAT (*Best Available Techniques*) [7]. I flussi principali trattati dal WtE sono costituiti da Rifiuti Urbani Residui a valle della raccolta differenziata (RUR) e Frazione Secca Combustibile prodotta dai rifiuti urbani (FSC) attraverso impianti MBT.

L'impianto è stato dimensionato per ricevere circa 300 000 t/anno con un PCI intorno a 11 MJ/kg nelle condizioni di normale funzionamento (NOP -

Normal Operating Point), ed è quindi caratterizzato da una potenza termica di circa  $117,5 \text{ MW}_t$ <sup>1</sup> per una disponibilità di circa 7 800 h/anno.

La capacità massima raggiungibile al massimo carico continuo (MCR - Maximum Continuous Rate) è pari a 350 000 t/anno, che corrisponde a circa  $137,5 \text{ MW}_t$  [7]. Il potere calorifico inferiore può variare tra  $8 \div 17 \text{ MJ/kg}$ , questo permette il trattamento di rifiuti eterogenei in condizioni sicure e garantisce un adeguato margine di flessibilità di funzionamento. In figura 3.2 si osserva un tipico diagramma di combustione, che descrive il campo di funzionamento dell'impianto (zona evidenziata in grigio).

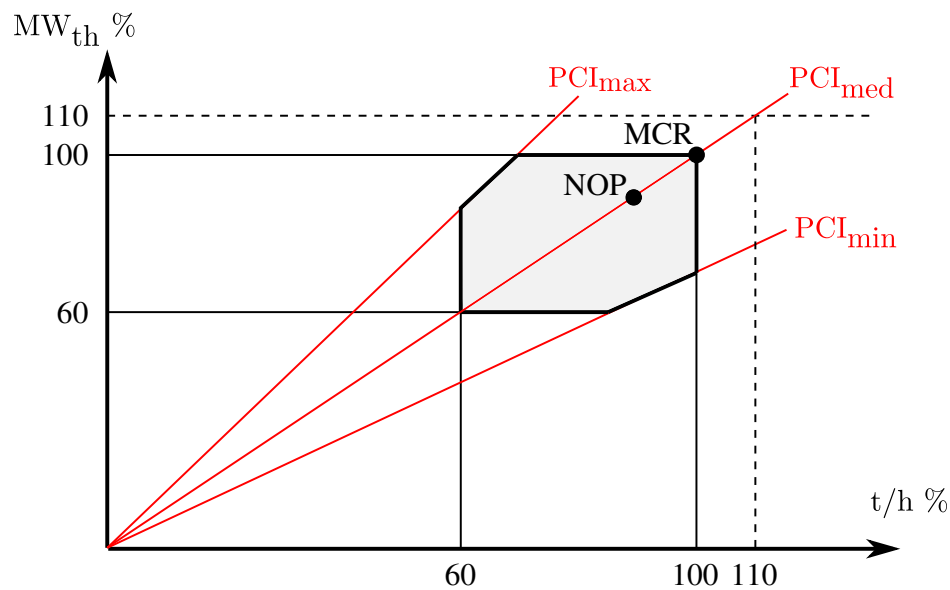


Figura 3.2: Diagramma di combustione.

La massima potenza elettrica lorda erogabile è pari a  $37,4 \text{ MW}_e$  (con un rendimento lordo pari al 27,2%). Nelle condizioni di NOP la potenza viene ridotta a  $31,7 \text{ MW}_e$ . L'impianto è in grado di fornire alla rete circa 220 000 MWh/anno di energia elettrica, pari al fabbisogno di circa 72 000 famiglie. In queste condizioni il recupero energetico da rifiuti rispetto all'uso di combustibili fossili consente di risparmiare circa 50 000 tep/anno [7].

### 3.3.1 Descrizione dell'impianto

L'impianto è realizzato su due linee indipendenti, ognuna delle quali è costituita dalla camera di combustione, dalla sezione di produzione vapore, in

<sup>1</sup>Questo parametro è relativo al WtE di riferimento, non a quello utilizzato nel modello (che varia in funzione delle dimensioni e della qualità dei rifiuti).



grado di generare al MCR circa 83 t/h di vapore surriscaldato a 420 °C / 50 bar (circa 72 t/h al NOP), e dal trattamento dei fumi.

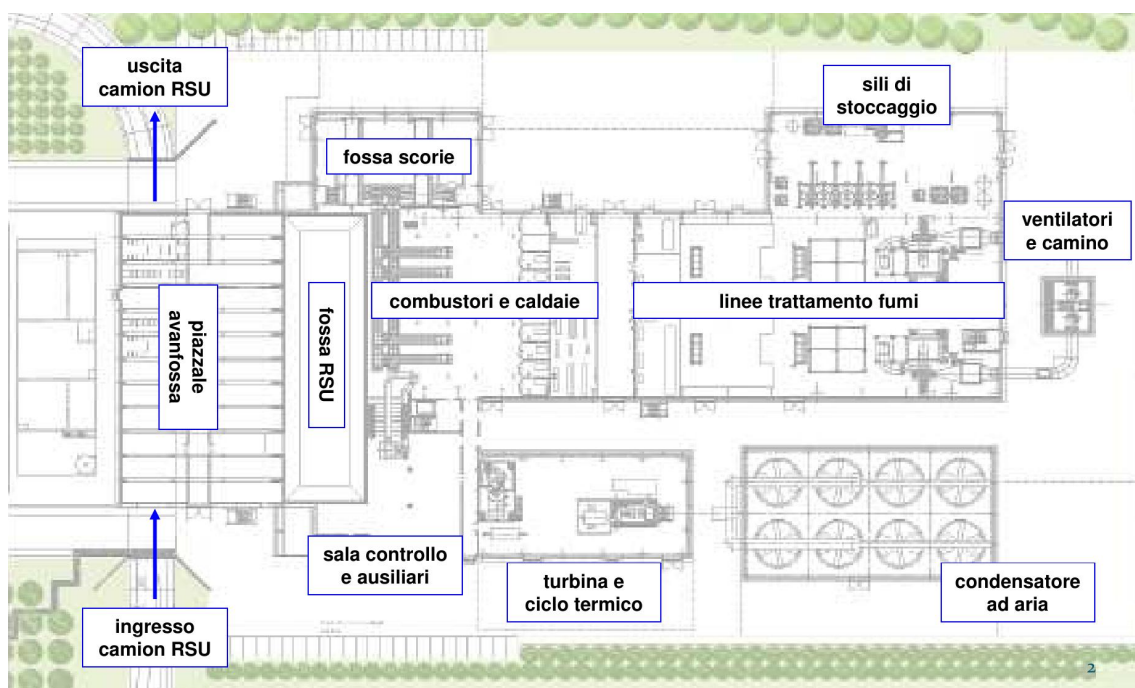


Figura 3.3: Planimetria edificio principale.

La produzione di energia elettrica è concentrata in un unico ciclo termico, comune a entrambe le linee [7]. Il resto dell'impianto è costituito dai sistemi ausiliari, quali ad esempio: la zona di ricezione, stoccaggio e movimentazione dei rifiuti, la zona di movimentazione e stoccaggio scorie, ceneri e prodotti residui, il sistema acqua di rete e acqua demineralizzata, il sistema aria compressa, il sistema combustibile ausiliario, il sistema antincendio, il sistema di ventilazione e condizionamento, il circuito chiuso dell'acqua di raffreddamento, l'impianto elettrico, il sistema di strumentazione di controllo, ecc... (ved. fig. 3.3)

### Combustore a griglia raffreddata ad acqua

Il combustibile introdotto nel WtE di Salerno è caratterizzato da un PCI piuttosto elevato; perciò si è deciso di installare, su ogni linea dell'impianto, una griglia raffreddata ad acqua (e non ad aria) per diminuire gli stress termici e meccanici e aumentare così la vita utile delle griglie stesse (ved. fig. 3.4). Il calore che proviene dalla griglia è assorbito da due scambiatori

di calore posti in serie: il primo cede calore all'aria primaria; il secondo, connesso al sistema di raffreddamento, smaltisce il calore in eccesso.

Le scorie di combustione vengono raffreddate in una vasca che contiene acqua, previa separazione dei ferrosi, e successivamente estratte e trasferite con appositi trasportatori a uno stoccaggio dedicato. I fumi che lasciano la zona degli estrattori vengono prelevati dal ventilatore dell'aria secondaria e inviati alla camera di combustione [7].



Figura 3.4: Esempio di camera di combustione e griglia raffreddata ad acqua (Babcock & Wilcox Volund)

### Produzione di vapore

Le condizioni di pressione e temperatura del vapore prodotto sono un compromesso per ottenere una buona efficienza termodinamica e garantire una durata ragionevole dei materiali (influenzata principalmente dai fenomeni di corrosione). Ogni linea dell'impianto è dotata di una caldaia a circolazione naturale, costituita da: **tre canali verticali a irraggiamento** (in configurazione up-down-up per facilitare la separazione delle polveri<sup>2</sup>) e **un canale orizzontale contenente le superfici di scambio termico a convezione** (fasci tubieri verticali) (ved. fig. 3.5).

Questa configurazione garantisce una riduzione della temperatura dei fumi fino a circa 600 °C, in modo da ridurre i rischi di corrosione e controllare la temperatura del vapore prodotto. Un altro accorgimento fondamentale

<sup>2</sup>I fumi vengono costretti a cambiare più volte la direzione di moto e questo permette alle particelle più grosse di separarsi dal resto della corrente.

per evitare questi fenomeni riguarda l'utilizzo di Inconel 625 per realizzare le pareti membranate della prima e della seconda sezione a irraggiamento.

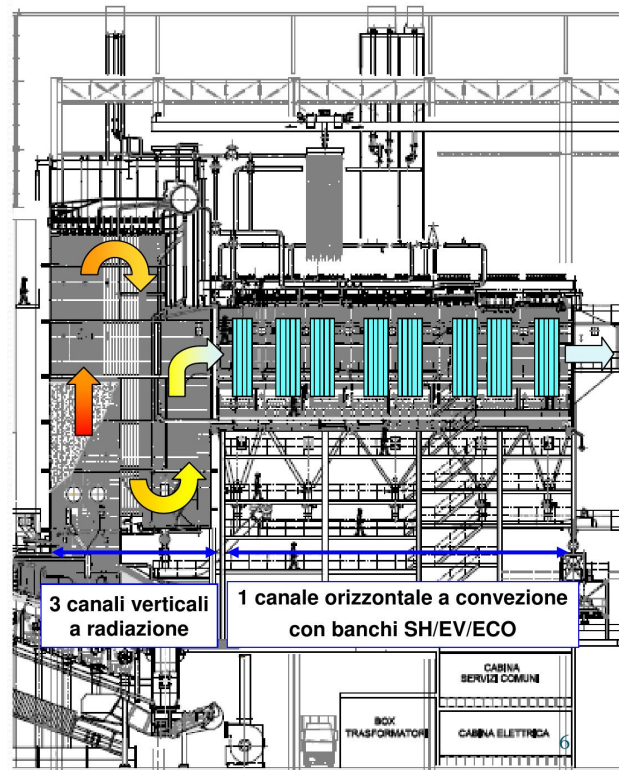


Figura 3.5: Sezione di generazione del vapore.

La sezione degli scambiatori a convezione, inseriti nel canale orizzontale, è costituita dai seguenti componenti (banchi di tubi): un evaporatore (EVA); quattro surriscaldatori (SH4 - SH3 - SH2 - SH1); un altro evaporatore (EVA); due economizzatori (ECO interni). L'acqua di alimento caldaia è inoltre preriscaldata da un economizzatore (esterno) posto dopo il precipitatore elettrostatico, nella sezione di trattamento dei fumi. Inoltre, per evitare i fenomeni di corrosione, si è pensato a un ulteriore rivestimento con leghe speciali per il SH4 (ossia il primo a essere lambito dai fumi) e le prime file del SH3. [7].

### Trattamento dei fumi (Flue Gas Treatment system - FGD)

La combustione dei rifiuti, in condizioni ideali, comporta l'ossidazione della frazione combustibile, composta da C, H e S, rispettivamente in  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  e

SO<sub>2</sub>. In condizioni reali però si verifica la formazione di una serie di inquinanti principalmente per tre motivi [6]:

- *combustione in varia misura incompleta* → formazione di incombusti CO e COT;
- *reazioni secondarie indesiderate* coinvolgono l'azoto presente nel combustibile e/o nell'aria → formazione di NO<sub>x</sub>;
- *presenza di impurezze nel combustibile* → particolato sospeso (PTS), gas acidi (SO<sub>x</sub>, HCl e HF), metalli pesanti (Pb, Cd e Hg) e microinquinanti quali diossine e furani (PCDD/F) e idrocarburi policiclici aromatici (IPA).

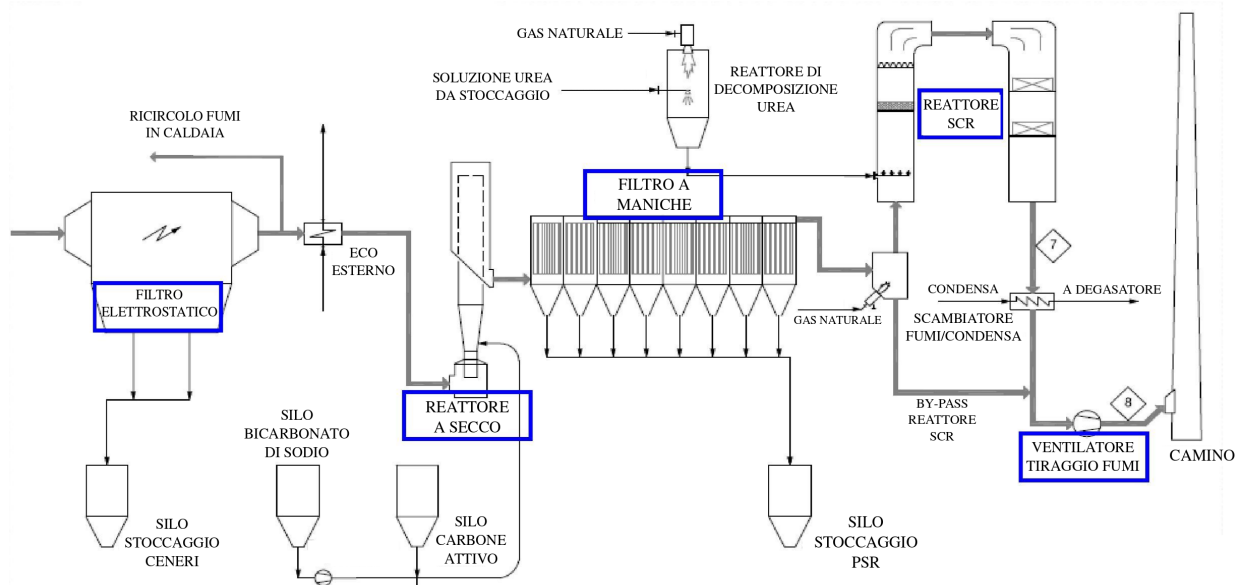


Figura 3.6: Schema del Trattamento Fumi.

Per abbattere questi inquinanti e rispettare le normative ambientali, ogni linea dell'impianto è costituita dalle seguenti sezioni poste in serie (ved. fig. 3.6):

- iniezione diretta di una miscela di  $\text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot \text{Mg}(\text{OH})_2$  in camera di combustione per una *primo abbattimento dei gas acidi* (in particolare di SO<sub>x</sub>);
- **precipitatore elettrostatico** (Electrostatic Precipitator, ESP) utilizzato per una *rimozione preliminare delle polveri*, tale da garantire una concentrazione minore di 50 mg/Nm<sup>3</sup>;

- **sistema a secco** costituito da:
  - **reattore venturi** dove viene iniettato: bicarbonato di sodio per *rimuovere i gas acidi a secco* (HCl, SO<sub>x</sub> e HF) e carbone attivo in polvere per *rimuovere i metalli pesanti e i microinquinanti organici*;
  - **filtro a maniche** (fabric filter, FF) usato per il completamento delle reazioni di deacidificazione e adsorbimento e per rimuovere i residui solidi, quali i sali prodotti dalle reazioni di assorbimento dei gas acidi e le polveri non rimosse dal ESP;
- **sistema di riduzione selettiva catalitica** (Selective Catalytic Reduction, SCR) per ridurre gli NO<sub>x</sub> ad azoto molecolare N<sub>2</sub> con iniezione di ammoniaca (NH<sub>3</sub>) in un catalizzatore ternario a base di TiO<sub>2</sub>, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e WO<sub>3</sub> operante a circa 190 °C. Un bruciatore a gas naturale, che funziona solo nelle fasi di accensione e spegnimento, controlla la temperatura dei fumi all'ingresso del reattore. L'ammoniaca viene ottenuta dalla decomposizione termica di urea (che è più facilmente stoccabile) tramite un bruciatore a gas naturale [7].

L'utilizzo delle tecnologie citate garantisce un pieno rispetto delle più severe normative ambientali vigenti. In tabella sono riportate le percentuali di emissione di inquinanti tipiche di questa configurazione rispetto ai limiti imposti dalla legge.

Inquinante	Unità	Valore di emissione	Limiti di emissione	Riduzione rispetto al limite di emissione
Polveri	mg/Nm <sup>3</sup>	2	10	80%
TOC	mg/Nm <sup>3</sup>	4	10	60%
CO	mg/Nm <sup>3</sup>	18	50	64%
HCl	mg/Nm <sup>3</sup>	4	10	60%
HF	mg/Nm <sup>3</sup>	0,2	1	80%
SO <sub>2</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>	8	50	84%
NO <sub>x</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>	38	200	81%
PCDD/F	ng/Nm <sup>3</sup>	0,023	0,1	77%

Tabella 3.3: Emissione di inquinanti e limiti di legge [7].

### Ciclo termico

Il vapore prodotto dai due generatori (uno per linea) viene fatto espandere in una turbina a condensazione, dalla quale viene estratto vapore attraverso i seguenti spillamenti:

- uno di tipo “controllato”, a 6 bar, per preriscaldare l’aria di combustione, fornire calore al degasatore, attivare gli eiettori del vuoto e scaldare l’aria dello stoccaggio scorie;
- uno di tipo “non controllato”, a circa 1 bar, per preriscaldare il condensato nello scambiatore rigenerativo, prima che entri nel degasatore.

Il vapore all’uscita della turbina viene condensato in un condensatore ad aria. Il condensato è trasferito così nel degasatore dopo essere stato preriscaldato dal rigeneratore e dagli scambiatori che recuperano calore dai fumi a valle dei sistemi SCR (uno per linea). Alla fine l’acqua viene introdotta nelle caldaie tramite l’utilizzo di tre pompe di alimento (due funzionanti e una di riserva) [7]. Come ulteriore unità di riserva, viene prevista una turbopompa atta ad alimentare l’acqua alle due caldaie anche in caso di black-out (ved. fig. 3.7).

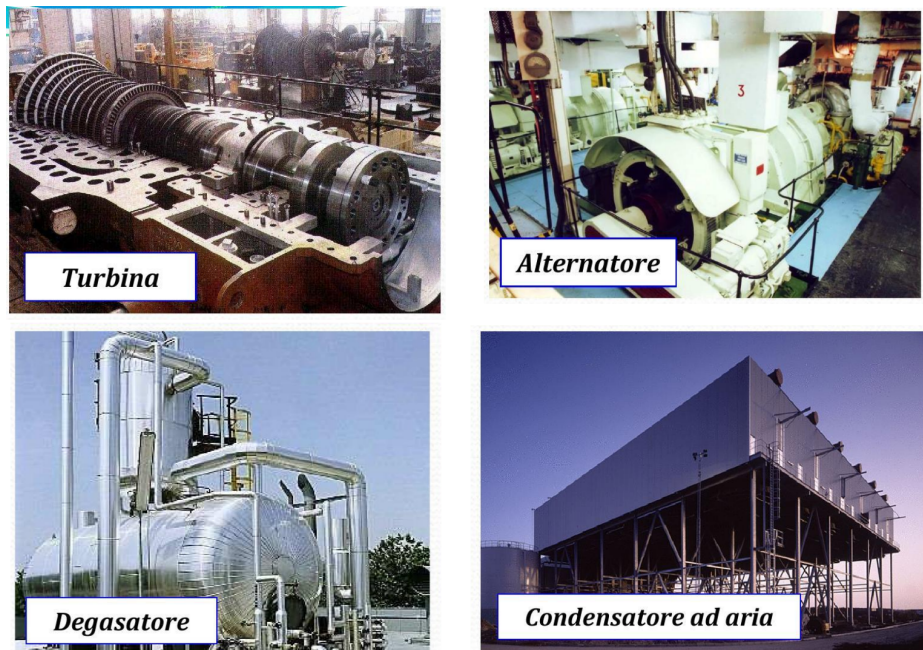


Figura 3.7: Alcuni componenti del ciclo a vapore.



Figura 3.8: Rappresentazione del WtE di Salerno.





# Capitolo 4

## La discarica

### 4.1 Introduzione

Come descritto nel capitolo 1, la discarica rappresenta “l’ultimo gradino della piramide dei rifiuti” perché è considerata la soluzione meno sostenibile dal punto di vista ambientale, per quanto concerne lo smaltimento dei rifiuti, e la destinazione finale dei residui derivanti dai processi a monte (discarica di servizio). Inoltre, dato che rappresenta una soluzione particolarmente vantaggiosa dal punto di vista economico, è importante cercare di limitare, per quanto possibile, il suo l’utilizzo improprio e legato al fenomeno delle cosiddette “discariche abusive”, che rappresenta una grossa fonte di guadagno in molti Paesi da parte della criminalità organizzata.

La discarica risulta comunque un anello fondamentale per la chiusura del ciclo dei rifiuti, perché necessaria per smaltire quei materiali non più riutilizzabili sia dal punto di vista del recupero di materia che del recupero di energia.

Essa rappresenta la soluzione più semplice e più antica per lo smaltimento finale dei RU anche se, in particolare negli ultimi decenni, ha subito modifiche e innovazioni tecnologiche sostanziali: si è passati infatti da semplici cumuli abbandonati o sotterrati in modo incontrollato, a sistemi adatti per un confinamento a lungo termine, idonei a garantire un impatto ambientale minimo e l’eventuale possibilità di recupero energetico dalla fermentazione anaerobica della frazione organica presente (produzione di biogas). I principali accorgimenti tecnici, ai fini della tutela ambientale, sono stati ad esempio: l’impermeabilizzazione del bacino di contenimento, la captazione del percolato<sup>1</sup> e del biogas, la copertura giornaliera con terra, la copertura definitiva,

---

<sup>1</sup>Il liquame che si forma a causa dell’attraversamento dell’acqua piovana tra la componente organica e biodegradabile dei rifiuti.

il reinserimento ambientale, ecc...) [8] (ved. fig. 4.1).

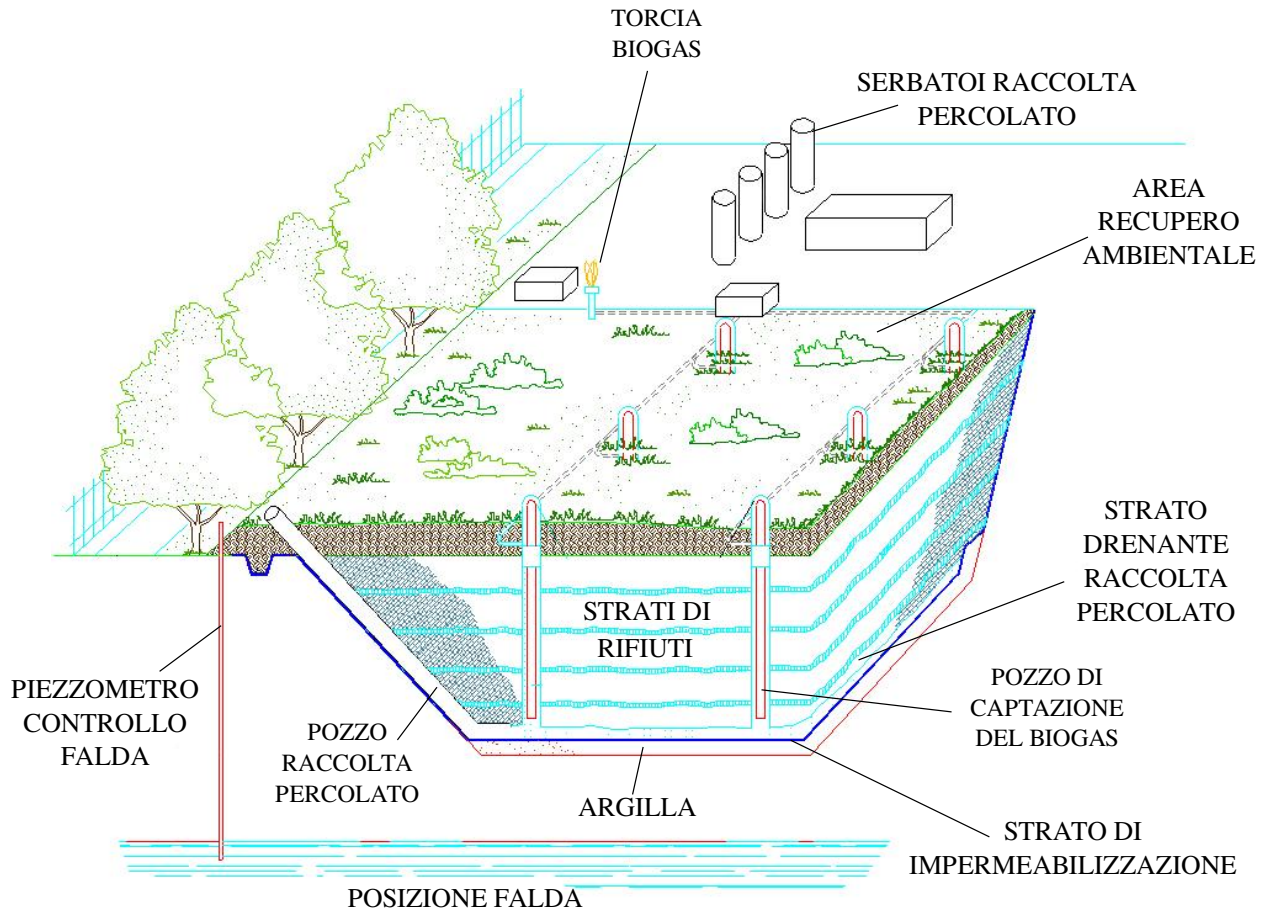


Figura 4.1: Vista prospettica di una discarica.

## 4.2 Normativa vigente

Nel *Dlgs 13 gennaio 2003 n. 36* sono contenute le nuove regole per la realizzazione e gestione delle discariche, che fanno riferimento alla direttiva 1999/31/CE dell'Unione Europea. I nuovi provvedimenti prevedono la distizione di tre tipologie di discariche:

- Per **rifiuti inerti**  
Ad esempio i residui non derivanti da processi industriali, i materiali da costruzione e i relativi sfridi, ecc...;
- Per **rifiuti non pericolosi**  
In generale, si intendono i residui di processo già rientranti in opportuni

classificazioni chimico-fisiche, o inertizzati dopo opportuni trattamenti, quali ad esempio i residui degli impianti TMB e WtE (scorie di combustione e prodotti stabilizzati della depurazione fumi).

- **Per rifiuti pericolosi**

Si intendono i residui di particolari trattamenti e processi industriali, quali ad esempio quelli del settore chimico-farmaceutico, petrolchimico, ecc... (oli esausti, pile, contenitori speciali, farmaci scaduti, prodotti non stabilizzati della depurazione fumi, ecc...)

La normativa prevede alcuni requisiti tecnici, misure e procedure con lo scopo di prevenire possibili danni all'ambiente circostante (in particolare del terreno e dei bacini idrici sotterranei e superficiali) e alla salute umana. Sono previste inoltre delle indicazioni per assicurare che il costo di smaltimento rifletta i costi reali delle seguenti fasi:

1. costruzione della discarica (investimento);
2. gestione della discarica (costi operativi);
3. chiusura della discarica (costo finale di esercizio);
4. post-chiusura della discarica (costo successivo alla chiusura, da sostenere per un periodo di vari anni).

La normativa specifica inoltre i trattamenti che i rifiuti devono subire, prima di essere conferiti in discarica, per ridurre il volume (compattazione) e la pericolosità degli stessi.

In particolare, il decreto stabilisce i requisiti che devono essere soddisfatti dalle tre tipologie di discarica, in relazione a:

- ubicazione;
- modalità di protezione delle acque e del terreno;
- dotazione di attrezzature e personale;
- criteri di coltivazione;
- misure di mitigazione dei disturbi e dei rischi connessi alla gestione dell'impianto.

La protezione del suolo, delle acque sotterranee e delle acque superficiali viene assicurata, durante la fase operativa, dalla combinazione della barriera geologica e del rivestimento impermeabile del fondo e delle sponde della discarica

e, a chiusura dell’impianto, dall’aggiunta della copertura superficiale. Tale rivestimento impermeabile dovrà avere caratteristiche idonee a resistere alle sollecitazioni chimiche e meccaniche presenti nella discarica (ved. fig. 4.2).

Il “sistema barriera di confinamento artificiale” previsto dal D.Lgs. 36 prevede la stesa di almeno 100 cm di materiale minerale compattato (argilla) con una conducibilità idraulica  $k \leq 10^{-7}$  cm/s, valore che rappresenta un altissimo coefficiente di impermeabilità.

Il decreto fissa, inoltre, specifici criteri riguardo alla gestione del percolato e del biogas nelle discariche che accolgono rifiuti non pericolosi e pericolosi.



Figura 4.2: Impermeabilizzazione scarpate e fine allestimento della discarica.

### 4.3 Criteri e modalità di costruzione

Prima di realizzare la discarica, per valutare l’idoneità del sito dove verrà costruita, è necessario effettuare **indagini geologiche** per analizzare il tipo di terreno e **indagini idro-geologiche** per verificare la presenza e la posizione di eventuali bacini idrici sotterranei o superficiali. Conoscere con precisione le quote delle falde idriche consente di stabilire che profondità può raggiungere il fondo della discarica. Secondo le disposizioni di legge, lo strato di terreno tra il fondo di una discarica e il livello massimo di falda deve essere di almeno un metro e mezzo. Se le analisi effettuate verificano l’adeguatezza del sito, risulta possibile passare alla fase progettuale e di costruzione.

Dopo aver effettuato gli scavi si passa alla fase di compattazione del materiale minerale (argilla), per realizzare la *barriera di confinamento artificiale* (una barriera geologica utilizzata per evitare la fuoriuscita dei rifiuti). Successivamente vengono installati dei rivestimenti impermeabili in HDPE sul fondo e sulle pareti della discarica. Per evitare le infiltrazioni di percolato nel terreno, si predispongono alcuni accorgimenti tecnici per convogliarlo in

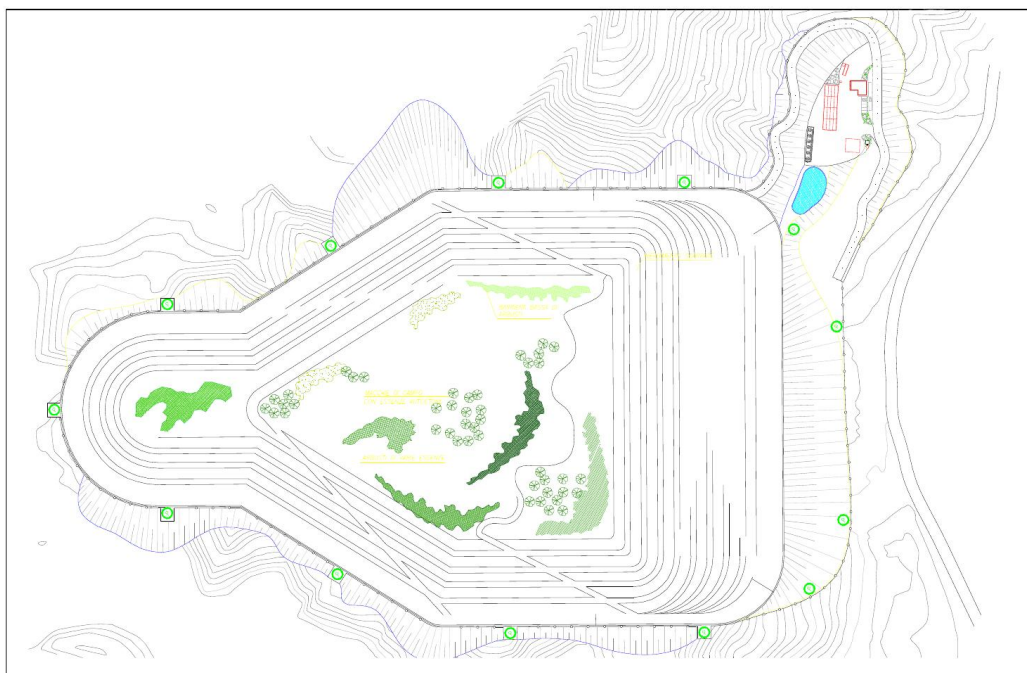


Figura 4.3: Planimetria generale discarica con progetto di recupero ambientale.

pozzi e, con appositi sistemi idraulici, aspirarlo verso sistemi di raccolta e depurazione [8].

## 4.4 Criteri e modalità di gestione

Per una corretta gestione della discarica (in base alla tipologia) risulta fondamentale conoscere la provenienza e la tipologia dei rifiuti in ingresso. Occorre inoltre controllare costantemente i livelli di percolato, per valutare le quantità da asportare e da inviare a depurazione. Per evitare emissioni di odori nell'atmosfera circostante, si ricorre alla compattazione dei rifiuti che, riducendo l'esposizione all'aria ambiente, favorisce i processi di decomposizione anaerobica. La ricopertura giornaliera con materiali inerti permette di ridurre ulteriormente questo sgradevole fenomeno.

La fermentazione dei rifiuti produce biogas che, essendo composto prevalentemente da metano, un potente gas serra (ha un GWP<sup>2</sup> pari a 21), è necessario smaltire in torcia o recuperare per produrre energia elettrica.

---

<sup>2</sup>Global Warming Potential: è un parametro che valuta l'effetto serra di un gas confrontandolo con la CO<sub>2</sub>, che ha un GWP pari a 1.

Numerosi monitoraggi di campioni d'acqua delle falde presenti nella zona consentono di verificare la sicurezza dell'opera [8].



Figura 4.4: Fase conclusiva delle operazioni di copertura.

## 4.5 Recupero dell'area interessata

La discarica, una volta chiusa e sigillata (ved. fig. 4.4) con una struttura multistrato di materiale inerte, viene controllata per diversi anni, sia per la produzione di percolato e biogas che per la qualità delle acque di falda. Dopo o durante questa fase, l'area utilizzata viene generalmente recuperata attraverso la piantumazione (ved. fig. 4.5) di specie vegetali (erba e alberi), possibilmente compatibili con la flora locale [8].

A questa prima "fase di impianto" possono seguire le più originali ipotesi di recupero: area di interesse ambientale e naturale, superficie a verde attrezzato con spazi di sosta, mostre permanenti con "sculture all'aperto", area ai fini didattico-ambientali con museo di tecniche del giardinaggio, pesca sportiva ed eco-sistema umido, campo di equitazione e pista ciclabile per mountain bike.

## 4.6 Alcune considerazioni conclusive

Si sottolinea che le problematiche legate alla captazione del percolato e al recupero del biogas vengono ridotte, se non del tutto eliminate, dall'applica-

zione della raccolta differenziata e/o dall'utilizzo dell'impianto MBT. Infatti tali "fasi" contribuiscono a migliorare la qualità dei RUR, attraverso la riduzione della frazione organica (generatrice di percolato e biogas). Non a caso, nel contesto del sistema integrato trattato, si definisce la "discarica di servizio", per lo smaltimento finale dei residui, e non la "discarica convenzionale", ante Dlgs 36/2003, per il conferimento dei rifiuti urbani.



Figura 4.5: Inerbimento argini perimetrali.





# Capitolo 5

## Modello Excel sviluppato

### 5.1 Introduzione

Per simulare il funzionamento del sistema integrato è stato sviluppato un software mediante l'utilizzo di Microsoft Excel. Lo scopo principale del programma è quello di:

- **analizzare i flussi di materia e di energia che attraversano i singoli impianti** (come ad esempio la quantità di FSC prodotta nell'impianto MBT, le perdite di processo, i residui prodotti, i materiale recuperati, l'energia prodotta dall'impianto WtE ecc...) ;
- **valutare le possibili soluzioni impiantistiche applicabili sia tecnicamente che industrialmente** (tenendo conto quindi degli aspetti ambientali ed economici);

### 5.2 Scheda: Control Panel

Nella prima scheda del file Excel è presente un pannello di controllo per la gestione degli input e output, grazie al quale è possibile modificare e visualizzare i parametri principali del contesto e del sistema integrato (ved. fig. 5.1).

#### 5.2.1 Pannello di controllo

##### Tipologia di RU e bacino di conferimento

Il software consente di analizzare diversi scenari a partire da differenti tipologie di RUR in ingresso, in relazione al **bacino di riferimento** (la quantità

annuale di rifiuti conferiti in tonnellate/anno), al **PCI** e alla **composizione merceologica**.

Sono presenti tre PCI di base, riferiti ai diversi RUR e definiti come PCI del  $RUR_{min}$ ,  $RUR_{med}$  e  $RUR_{max}$  (rispettivamente 6,5, 9 e 11,5 MJ/kg), ma grazie alla possibilità di cambiare la composizione merceologica (nella sezione dedicata) il programma consente di ottenere altre classi che variano in funzione del PCI specifico di ogni sostanza (organico, carta, plastica, ...), pesato rispetto alla sua percentuale sul totale.

<b>Frazione Merceologica</b>	<b>RUR min</b>	<b>RUR med</b>	<b>RUR max</b>
Organico (%)	55,00	47,00	34,00
Carta e Cartone (%)	14,00	19,00	26,00
Plastiche leggere (%)	3,60	7,30	11,00
Plastiche pesanti (%)	3,80	7,60	11,30
Vetro e inerti (%)	11,20	7,00	5,40
Tessili gomma legno e cuoio (%)	4,00	6,80	10,10
Ferrosi (%)	4,16	2,88	1,12
Non ferrosi (%)	1,04	0,72	0,28
Ingombranti+RAEE+RUP (%)	3,20	1,70	0,80
TOT (%)	100,00	100,00	100,00
PCI (MJ/kg)	<b>6,5</b>	<b>9,0</b>	<b>11,5</b>

Tabella 5.1: Frazioni merceologiche: tipologia di RUR

<b>Frazione Merceologica</b>	<b>PCI (MJ/kg)</b>	<b>PCI<sub>FV</sub> (MJ/kg)</b>	<b>Ceneri (%)</b>	<b>Umidità (%)</b>	<b>F.C. (%)</b>	<b>TOT (%)</b>
Organico	4,60	22,46	16,80	56,60	26,60	100
Carta e Cartone	10,84	16,20	7,80	22,00	70,20	100
Plastiche leggere	25,53	30,01	9,50	5,00	85,50	100
Plastiche pesanti	25,53	30,01	9,50	5,00	85,50	100
Vetro e inerti	0,00	4,03	96,00	2,50	1,50	100
Tessili gomma legno e cuoio	14,65	19,40	2,00	20,00	78,00	100
Ferrosi	0,00	1,61	90,00	4,00	6,00	100
Non ferrosi	0,00	1,61	90,00	4,00	6,00	100
Ingombranti+RAEE+RUP	-	-	-	-	-	-

Tabella 5.2: Frazioni merceologiche: PCI e composizione

<b>Pannello di Controllo</b>																																																							
<b>Tipologia RU</b>		<b>Configurazione MBT</b>																																																					
<b>med</b>		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">A monte del vaglio rotante</th> </tr> <tr> <th colspan="2">Trattamenti</th> <th colspan="2">Flusso in uscita</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Ingombranti</td> <td>SI</td> <td colspan="2">--&gt; Ingombranti</td> </tr> <tr> <td>Sep Ferrosi</td> <td>SI</td> <td colspan="2">--&gt; Mat. Ferrosi</td> </tr> <tr> <td>Biostabilizz</td> <td>NO</td> <td colspan="2">--&gt; Perd. processo</td> </tr> <tr> <th colspan="4">VAGLIO A TAMBURO ROTANTE</th> </tr> <tr> <td>Forometria (D)</td> <td>60</td> <td colspan="2">mm</td> </tr> <tr> <th colspan="4">A valle del vaglio rotante (FSC)</th> </tr> <tr> <th colspan="2">Trattamenti</th> <th colspan="2">Flusso in uscita</th> </tr> <tr> <td>Alluminio</td> <td>SI</td> <td colspan="2">--&gt; Alluminio</td> </tr> <tr> <td>Ferrosi</td> <td>SI</td> <td colspan="2">--&gt; Mat. Ferrosi</td> </tr> <tr> <td>Biostabilizz</td> <td>SI</td> <td colspan="2">--&gt; Perd. processo</td> </tr> <tr> <td>Vaglio Stellare</td> <td>SI</td> <td colspan="2">--&gt; FSC 2</td> </tr> </tbody> </table>		A monte del vaglio rotante				Trattamenti		Flusso in uscita		Ingombranti	SI	--> Ingombranti		Sep Ferrosi	SI	--> Mat. Ferrosi		Biostabilizz	NO	--> Perd. processo		VAGLIO A TAMBURO ROTANTE				Forometria (D)	60	mm		A valle del vaglio rotante (FSC)				Trattamenti		Flusso in uscita		Alluminio	SI	--> Alluminio		Ferrosi	SI	--> Mat. Ferrosi		Biostabilizz	SI	--> Perd. processo		Vaglio Stellare	SI	--> FSC 2	
A monte del vaglio rotante																																																							
Trattamenti		Flusso in uscita																																																					
Ingombranti	SI	--> Ingombranti																																																					
Sep Ferrosi	SI	--> Mat. Ferrosi																																																					
Biostabilizz	NO	--> Perd. processo																																																					
VAGLIO A TAMBURO ROTANTE																																																							
Forometria (D)	60	mm																																																					
A valle del vaglio rotante (FSC)																																																							
Trattamenti		Flusso in uscita																																																					
Alluminio	SI	--> Alluminio																																																					
Ferrosi	SI	--> Mat. Ferrosi																																																					
Biostabilizz	SI	--> Perd. processo																																																					
Vaglio Stellare	SI	--> FSC 2																																																					
RU --> min																																																							
RU --> med																																																							
RU --> max																																																							
<b>PCI</b>																																																							
2138,9	kcal/kg																																																						
9,0	MJ/kg																																																						
<b>Sistema Integrato</b>																																																							
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">Presenza impianto</th> <th colspan="3">n.impianti, availability, n.linee</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>MBT</td> <td>SI</td> <td>SI</td> <td>NO</td> <td>MBT</td> <td>h eq.</td> <td>n.linee</td> </tr> <tr> <td>WTE</td> <td>SI</td> <td>SI</td> <td>NO</td> <td>1</td> <td>3750</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>LND</td> <td>NO</td> <td>SI</td> <td>NO</td> <td>WTE</td> <td>h eq.</td> <td>n.linee</td> </tr> <tr> <td>FSC a terzi</td> <td>SI</td> <td>SI</td> <td>NO</td> <td>1</td> <td>7500</td> <td>2</td> </tr> </tbody> </table>				Presenza impianto				n.impianti, availability, n.linee			MBT	SI	SI	NO	MBT	h eq.	n.linee	WTE	SI	SI	NO	1	3750	2	LND	NO	SI	NO	WTE	h eq.	n.linee	FSC a terzi	SI	SI	NO	1	7500	2																	
Presenza impianto				n.impianti, availability, n.linee																																																			
MBT	SI	SI	NO	MBT	h eq.	n.linee																																																	
WTE	SI	SI	NO	1	3750	2																																																	
LND	NO	SI	NO	WTE	h eq.	n.linee																																																	
FSC a terzi	SI	SI	NO	1	7500	2																																																	
<b>Variabili econ/finanz</b>																																																							
<table border="1"> <tbody> <tr> <td>Tariffa conferimento</td> <td>125,00</td> <td>€/t<sub>RSU</sub></td> <td>Tipo di progetto:</td> <td>A</td> </tr> <tr> <td>Tariffa Energia Elettrica</td> <td>100,00</td> <td>€/MWh</td> <td>Project Financing</td> <td>A</td> </tr> <tr> <td>Tariffa residui</td> <td>125,00</td> <td>€/t</td> <td>Azienda in autofin.</td> <td>B</td> </tr> </tbody> </table>				Tariffa conferimento	125,00	€/t <sub>RSU</sub>	Tipo di progetto:	A	Tariffa Energia Elettrica	100,00	€/MWh	Project Financing	A	Tariffa residui	125,00	€/t	Azienda in autofin.	B																																					
Tariffa conferimento	125,00	€/t <sub>RSU</sub>	Tipo di progetto:	A																																																			
Tariffa Energia Elettrica	100,00	€/MWh	Project Financing	A																																																			
Tariffa residui	125,00	€/t	Azienda in autofin.	B																																																			
Capitale proprio		30,00%																																																					
Capitale di debito		70,00%																																																					
<b>Bacino di riferimento (qtà RU)</b>			<b>600.000 t/a</b>																																																				

Figura 5.1: Interfaccia del pannello di controllo.

### Sistema Integrato

Grazie ad appositi pulsanti e macro, è possibile configurare il sistema integrato includendo o escludendo determinati impianti. Le soluzioni analizzate nel capitolo 7 sono le seguenti:

- MBT + WTE + (discarica);

- WTE + (discarica);
- MBT + (discarica);

La discarica è stata segnata tra parentesi per valutare, a livello economico e finanziario, quali sono i vantaggi e svantaggi nel caso in cui si decida di conferire a terzi i residui di MBT e WTE o si preferisca allestire una discarica “dedicata”.

E' inoltre possibile cambiare manualmente<sup>1</sup> il *numero di impianti* e il *numero delle linee* di MBT e WtE a seconda del contesto analizzato (per quanto riguarda la quantità e il PCI del RUR in ingresso).

Nel paragrafo 5.9.1 sono presenti alcune considerazioni economiche relative al variare del numero di linee e di impianti.

### Configurazione MBT

Tramite questa sezione è possibile scegliere le fasi principali che caratterizzano il sistema di trattamento meccanico biologico, per valutare le diverse prestazioni ottenibili (produzione di FSC, predite di processo, RBM (Rifiuto Biostabilizzato Maturo), residui prodotti, ecc...).

L'analisi economico/finanziaria è focalizzata su un impianto a flusso separato; perciò, prima di valutare il progetto di investimento, è necessario controllare che siano incluse tutte le fasi (“SI”), tranne la biostabilizzazione a monte (“NO”).

Il parametro più significativo è il **diametro del vaglio rotante**, perché determina la separazione del flusso principale in due portate (sopravaglio e sottovaglio) e quindi il successivo dimensionamento del MBT e del WTE. All'aumentare del diametro, infatti, aumenta la portata di sottovaglio, quindi la dimensione di tutte le relative macchine, e in particolare degli edifici adibiti alla biostabilizzazione a valle. La portata di sopravaglio invece diminuisce e di conseguenza anche le dimensioni del WTE (nonostante l'aumento del PCI).

Inoltre è possibile scegliere, per la sezione di pre-trattamento (MBT) e successiva termovalorizzazione (WtE), la quantità di impianti, il numero delle linee e la disponibilità espressa in ore/anno equivalenti di funzionamento.

### Variabili economico/finanziarie

In questa parte del pannello è possibile modificare le tariffe che riguardano i ricavi e i costi del sistema integrato:

---

<sup>1</sup>Il programma non modifica automaticamente il numero di impianti e linee.

- la “Tariffa di conferimento” è il parametro principale, perché determina i ricavi maggiori;
- la “Tariffa dell’energia elettrica” determina i ricavi dovuti alla produzione di energia elettrica da parte del WtE;
- la “Tariffa dei residui” indica il costo per smaltire i residui di MBT e WTE, non ulteriormente trattati, presso terzi (nel caso in cui non sia presente una propria discarica di servizio).

E’ possibile inoltre modificare alcune variabili che riguardano un’ipotetica Società coinvolta nel progetto; questo sia dal punto di vista del *coinvolgimento o meno di istituti di credito* (project financing oppure azienda / gruppo di aziende in autofinanziamento) che, in caso affermativo, delle *disponibilità finanziarie* e quindi dello share tra capitale proprio (equity) e debito (debt). Generalmente, a causa della grande quantità di capitali necessari per questo tipo di investimenti, l’operazione di finanziamento segue lo schema del “project financing”. In tal caso si opera attraverso una società di scopo o SPV (Special Purpose Vehicle) che sviluppa una determinata concessione di servizi attraverso contratti di realizzazione degli impianti, affidati a una o più aziende (EPC Contractors), e contratti di gestione dei medesimi, stipulati con uno o più operatori (O&M Contractors) (ved. fig. 5.2).

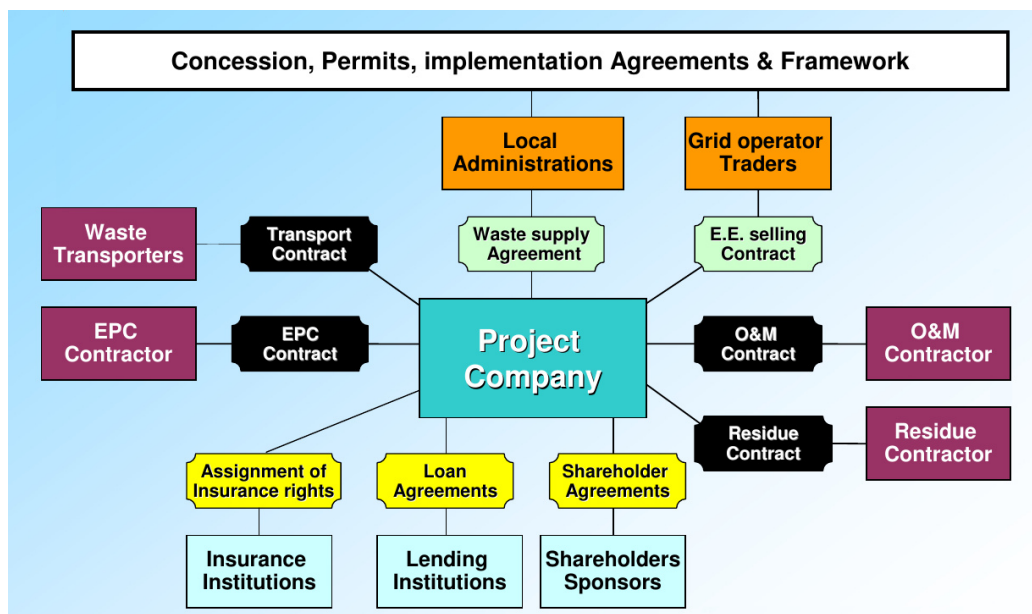


Figura 5.2: Struttura del Project Financing.

## 5.2.2 Risultati

In questa sezione sono presenti i principali output del programma, suddivisi nelle categorie *parametri tecnici* e *parametri economico-finanziari* (ved. fig. 5.3).

### Parametri tecnici

I parametri tecnici sono i seguenti output relativi alle rese e prestazioni ottenibili dal sistema integrato MBT+WtE, in funzione degli input inseriti dal pannello di controllo:

- *quantità di RU al MBT*, indica la quantità di rifiuti urbani in ingresso al MBT;
- *PCI del RU*, è il potere calorifico inferiore del rifiuto urbano a monte del MBT;
- *forometria del vaglio primario*, rappresenta il valore (compreso tra 0 e 125 mm) del diametro dei fori del vaglio primario;
- *efficienza di recupero di materia ( $\eta_m$ )*, indica il rapporto tra la quantità di frazione secca combustibile (FSC) e il rifiuto urbano (RU) in ingresso;
- *Efficienza di recupero di energia ( $\eta_t$ )*, è il rapporto tra l'energia termica entrante nel WtE ( $m_{FSC} \cdot PCI_{FSC}$ ) e quella contenuta nel rifiuto urbano in ingresso ( $m_{RU} \cdot PCI_{RU}$ );
- *RBM raffinato*, rappresenta la quantità di rifiuto biostabilizzato maturo in uscita dal MBT;
- *quantità di residui dal MBT*, indica la quantità di scarti leggeri e pesanti in uscita dal MBT;
- *perdite di processo*, rappresentano le perdite in massa (principalmente umidità e, secondariamente, frazione combustibile) del rifiuto dovuta alla biostabilizzazione della frazione putrescibile;
- *quantità di FSC al WtE ( $\eta_{materiale}$ )*, è la quantità di frazione secca combustibile che verrà trattata dal WtE;
- *PCI della FSC*, indica il potere calorifico della FSC;

- *Incremento del PCI ( $\Delta PCI$ )*, rappresenta l'incremento del potere calorifico del rifiuto dopo aver subito una serie di trattamenti meccanici (che rimuovono le frazioni inerti o con basso potere calorifico) e biologici (biostabilizzazione delle frazioni organiche);
- *potenza termica al WtE*, indica la potenzialità termica di combustione della FSC;
- *potenza elettrica (netta e lorda) al WtE*, rappresenta l'output elettrico del ciclo a vapore della centrale (considerando o non considerando gli autoconsumi);
- *quantità di residui dal WtE (stabilizzati)*, è la somma delle ceneri di caldaia e dei prodotti solidi residuali del sistema di trattamento fumi, dopo aver subito eventuali processi di inertizzazione per un corretto conferimento a discarica;
- *quantità totale di residui*, indica la somma dei residui prodotti dal MBT e dal WtE.

### Parametri economico-finanziari

Questi parametri sono gli output generati dall'analisi economico-finanziaria, in funzione degli input inseriti dal pannello di controllo con riferimento a un impianto MBT a flusso separato e un impianto WtE caratterizzato da tecnologia di combustione a griglia:

- *investimento complessivo*, rappresenta la somma degli investimenti relativi a MBT, WtE ed eventuale discarica;
- *ricavi operativi*, questa voce comprende i ricavi da conferimento (calcolati sul RUR in ingresso) e da energia elettrica prodotta dal WtE;
- *costi operativi*, ossia la somma dei costi sostenuti per la gestione e manutenzione di ogni impianto;
- *EBITDA* (Earnings Before Interest, Taxes, Depreciation and Amortization), parametro che indica la differenza tra ricavi e costi operativi, cioè il Margine Operativo Lordo;

sono presenti anche alcuni indici utili per valutare il progetto di investimento:

- *EBITDA/Investimento*;
- *NPV* (Net Present Value) o VAN (Valore Attuale Netto);

- *PBT* (Pay Back Time);
- *IRR lordo* (Internal Rate of Return) o Tasso Interno di Rendimento (dell'investimento complessivo), al lordo delle imposte;
- *IRR netto*, l'indice precedente calcolato a valle delle imposte;
- *ERR lordo* (Equity Rate of Return) o Tasso di Rendimento rispetto al capitale proprio, al lordo delle imposte;
- *ERR netto*, l'indice precedente calcolato a valle delle imposte.

PARAMETRI TECNICI			PARAMETRI ECONOMICO/FINANZIARI		
Quantità di RU al MBT	%	100%	INVESTIMENTI complessivi	M€	352,7
	t/a	600.000	Investimento MBT	M€	84,6
PCI del RU	MJ/kg	9,0	Investimento WtE	M€	268,1
Forometria del vaglio primario	mm	60	Investimento discarica	M€	0,0
Efficienza di recupero di materia ( $\eta_m$ )	%	53,61%	<b>RICAVI operativi</b>	<b>M€</b>	<b>106,0</b>
Efficienza di recupero di energia ( $\eta_e$ )	%	81,34%	Ricavi da conferimento	M€	75,0
RBM raffinato	%	18,26%	Ricavi da Energia Elettrica	M€	31,0
	t/a	109.568	<b>COSTI Operativi (O&amp;M contract)</b>	<b>M€</b>	<b>45,88</b>
Quantità di Residui dal MBT	%	8,47%	Costi MBT	M€	14,8
	t/a	50.796	Costi WtE	M€	31,1
Perdite di processo	%	15,00%	Costi discarica	M€	0,0
	t/a	89.981	<b>EBITDA</b>	<b>M€</b>	<b>60,1</b>
Quantità di FSC al WtE ( $\eta$ materiale)	%	53,61%	EBITDA/Investimenti	%	17,05%
	t/a	321.669	NPV	M€	148,6
Portata di FSC	t/h	42,89	PBT	anni	11
PCI della FSC	MJ/kg	13,58	IRR lordo (ante imposte)	%	12,34%
Incremento del PCI ( $\Delta$ PCI)	%	51,73%	IRR netto (post tax)	%	11,42%
Potenza termica al WtE	MW <sub>t</sub>	161,84	ERR lordo	%	18,49%
Potenza elettrica lorda al WtE	MW <sub>el</sub>	47,83	ERR netto	%	17,55%
Potenza elettrica netta al WtE	Mw <sub>el</sub>	41,35			
$\eta_{el}$ lordo	%	29,55%			
Quantità di Residui dal WtE (stabilizzati)	%	13,30%			
	t/a	79.795			
Quantità totale di residui	%	21,77%			
	t/a	130.592			

Figura 5.3: Esempio di risultati tecnici ed economico-finanziari (MBT+WtE).



### 5.2.3 Altre opzioni

Nel pannello di controllo sono presenti alcuni pulsanti particolari collegati a macro sviluppate in VBA (Visual Basic for Application, un'implementazione di Visual Basic inserita in Microsoft Excel), che utilizzano lo strumento "risolutore":

- *Varia Tariffa (IRR = cost)*, pulsante molto utile che valuta la variazione di tariffa di conferimento per garantire un IRR minimo pari a un valore percentuale arbitrario (ad esempio 12%);
- *Refresh Abaco*, pulsante che valuta e riporta in apposite tabelle i risultati tecnici in funzione del diametro del vaglio nell'intervallo da 0 a 125 mm;
- *Refresh Analisi di Redditività*, pulsante che valuta e riporta in apposite tabelle i risultati economici in funzione del diametro del vaglio nell'intervallo da 0 a 125 mm;
- *NPV lordo  $\rightarrow 0$* , che serve per valutare la tariffa minima di conferimento tale da uguagliare i flussi di cassa uscenti ed entranti;

## 5.3 Scheda: Sistema e Schema

Nella sezione **sistema** è presente un diagramma di flusso sintetico con i principali componenti del sistema integrato (MBT, WTE e discarica) e con i relativi input e output.

Nella sezione **schema** (suddivisa in schema 1 e 2) è invece presente l'esplosivo del sistema MBT, con tutte le fasi che lo caratterizzano.

## 5.4 Scheda: Contesto

In questa scheda sono presenti i principali input e output utilizzati per l'analisi tecnica. In particolare sono presenti i dati prodotti con la funzione "Refresh Abaco".

## 5.5 Scheda: RD

In questa sezione è possibile impostare un certo livello di raccolta differenziata (RD), per sottrarre una certa quantità di materia dal bacino di riferimento (RU) prima di inviarla agli impianti MBT (RUR). Oltre alla percentuale è

possibile scegliere due tipi di raccolta differenziata: il primo è finalizzato alla raccolta di materiale inerte e organico per poter *innalzare il potere calorifico del RUR* in ingresso al MBT; il secondo invece ha lo scopo di includere anche gli altri materiali (carta, plastica, tessili) in modo da ottenere una *raccolta "spinta"*.

Come scritto precedentemente (ved. paragrafo 1.2.1) la percentuale di raccolta differenziata non coincide con il recupero di materia, perciò gli scarti prodotti durante la fase di riciclaggio (relativamente alla frazione secca) dovrebbero alla fine rientrare nel sistema integrato per poter essere smaltiti correttamente. Per semplicità nel modello sviluppato non sono stati inclusi questi flussi, ma si ipotizza che vengano smaltiti da terzi in altri impianti dedicati.

## 5.6 Scheda: MBT

Nella scheda MBT è descritto e sviluppato il modello di trattamento meccanico biologico adottato. Per ogni fase del processo sono calcolati: i *flussi di materia entranti e uscenti* e la *variazione del potere calorifico del rifiuto*. Il PCI del rifiuto varia grazie:

- alla sottrazione di materiale inerte (in modo da incrementare la frazione dei materiali più adatti per la combustione successiva);
- ai processi di biostabilizzazione che fanno variare il contenuto di umidità e di frazione secca di alcuni materiali (organico, carta e materiali tessili).

Il flusso principale dei rifiuti che attraversa la fase  $i$ -esima è rappresentato dal vettore  $\mathbf{v}$ , nel quale sono memorizzate le quantità delle frazioni merceologiche in percentuale.

$$\mathbf{v}_i = \left\{ \begin{array}{c} \text{Organico} \\ \text{Carta e cartone} \\ \text{Plastiche leggere} \\ \text{Plastiche pesanti} \\ \text{Vetro e inerti} \\ \text{Tessili, legno, gomma e cuoio} \\ \text{Metalli ferrosi} \\ \text{Metalli non ferrosi} \\ \text{Ingombranti} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} v_{i,A} \\ v_{i,B} \\ v_{i,C} \\ v_{i,D} \\ v_{i,E} \\ v_{i,F} \\ v_{i,G} \\ v_{i,H} \\ v_{i,I} \end{array} \right\} \quad (5.1)$$

In ogni fase gli elementi di questi vettori, prima di essere opportunamente modificati in base allo specifico trattamento, vengono *normalizzati* in modo

che la somma delle frazioni merceologiche dia il valore 100%. Questo accorgimento permette di visualizzare i kg di materiale per kg di rifiuto in ingresso alla fase. Per esempio il vettore in ingresso alla fase  $i$ -esima,

$$\mathbf{v}_{i,IN} = \begin{pmatrix} v_{i,A,IN} \\ v_{i,B,IN} \\ v_{i,C,IN} \\ v_{i,D,IN} \\ v_{i,E,IN} \\ v_{i,F,IN} \\ v_{i,G,IN} \\ v_{i,H,IN} \\ v_{i,I,IN} \end{pmatrix} \quad \sum_{j=A}^I v_{i,j,IN} = 100\% \quad (5.2)$$

dopo aver subito il trattamento specifico diventa:

$$\mathbf{v}_{i,OUT} = \begin{pmatrix} v_{i,A,OUT} \\ v_{i,B,OUT} \\ v_{i,C,OUT} \\ v_{i,D,OUT} \\ v_{i,E,OUT} \\ v_{i,F,OUT} \\ v_{i,G,OUT} \\ v_{i,H,OUT} \\ v_{i,I,OUT} \end{pmatrix} \quad \sum_{j=A}^I v_{i,j,OUT} < 100\% \quad (5.3)$$

e prima di entrare nella fase  $i+1$  viene opportunamente normalizzato

$$v_{i+1,j,IN} = \frac{v_{i,j,OUT}}{\sum_{j=A}^I v_{i,j,OUT}} \quad (5.4)$$

e perciò diventa:

$$\mathbf{v}_{i+1,IN} = \begin{pmatrix} v_{i+1,A,IN} \\ v_{i+1,B,IN} \\ v_{i+1,C,IN} \\ v_{i+1,D,IN} \\ v_{i+1,E,IN} \\ v_{i+1,F,IN} \\ v_{i+1,G,IN} \\ v_{i+1,H,IN} \\ v_{i+1,I,IN} \end{pmatrix} \quad \sum_{j=A}^I v_{i+1,j,IN} = 100\% \quad (5.5)$$

Accanto al vettore  $\mathbf{v}$ , viene utilizzato anche il vettore  $\mathbf{z}$  che rappresenta le quantità dei materiali separati (o le perdite di processo) dalla fase  $i$ -esima. Parallelamente ai vettori  $\mathbf{v}$  e  $\mathbf{z}$ , per visualizzare la massa di ogni frazione merceologica espressa in kg di materiale per kg di rifiuto in ingresso a monte dell'impianto MBT, vengono utilizzati i vettori  $\mathbf{s}$  e  $\mathbf{t}$ . Questi ultimi non vengono normalizzati e quindi rappresentano le medesime frazioni ma con riferimento a una base diversa (ved. fig. 5.4).

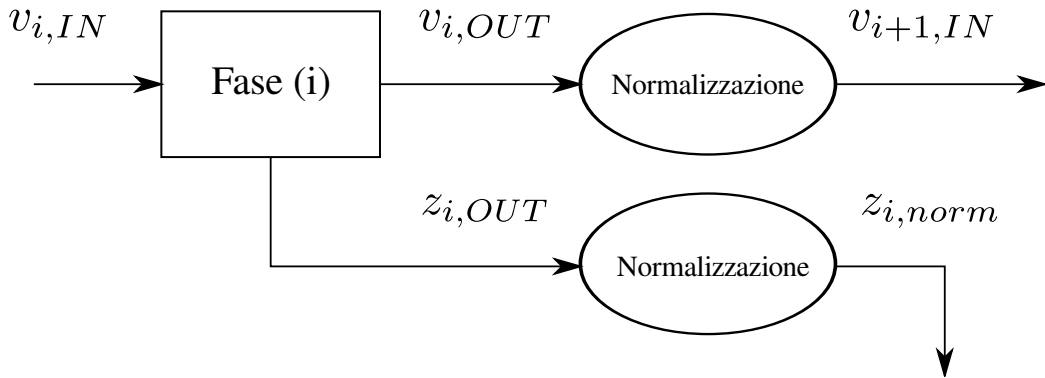


Figura 5.4: Schema flussi MBT.

### 5.6.1 Lacerasacchi e separazione di ingombranti

Il trituratore o lacerasacchi è usato per ridurre le dimensioni del rifiuto in ingresso, in modo da ottenere una pezzatura adatta<sup>2</sup> per i trattamenti successivi.

Il modello sviluppato calcola la frazione dei materiali ingombranti che vengono separati in questa fase.

Un coefficiente specifico  $C_1$  (espresso in percentuale) viene moltiplicato per la frazione dei materiali ingombranti e questo prodotto rappresenta il flusso che viene separato e inviato successivamente al recupero di materiale o direttamente a discarica.

$$\begin{cases} z_{i,I,OUT} = z_{i,I,IN} \cdot C_1 & \text{(Ingombranti separati)} \\ v_{i,I,OUT} = v_{i,I,IN} \cdot (1 - C_1) & \text{(Ingombranti rimasti)} \end{cases} \quad (5.6)$$

Questo coefficiente è fisso e si assume per ipotesi che in questa fase vengano separati il 100% dei materiali ingombranti.

<sup>2</sup>Si ottiene una pezzatura massima di circa 300-400 mm

### 5.6.2 Separatore magnetico

Grazie all'utilizzo di un elettromagnete questa macchina separa i materiali ferrosi dal resto dei rifiuti.

Il modello sviluppato calcola la frazione separata di questi materiali grazie a un coefficiente specifico  $C_2$  (espresso in percentuale) moltiplicato per la frazione dei materiali ferrosi presenti nella composizione merceologica. Questo coefficiente è fisso e rappresenta una media ragionevole ottenuta dall'esperienza<sup>3</sup> su questo tipo di macchine in condizioni di lavoro differenti (in particolare con composizione diversa dei rifiuti trattati).

$$\begin{cases} z_{i,G,OUT} = z_{i,G,IN} \cdot C_2 & \text{(Ferrosi separati)} \\ v_{i,G,OUT} = v_{i,G,IN} \cdot (1 - C_2) & \text{(Ferrosi rimasti)} \end{cases} \quad (5.7)$$

In questo tipo di separatore a volte vengono separate anche piccolissime quantità di altre frazioni merceologiche che, per ipotesi, sono state trascurate. Il coefficiente  $C_2$  può variare in un intervallo compreso tra 75 e 90%.

Nel modello questa fase può essere esclusa selezionando l'opzione dal pannello di controllo.

### 5.6.3 Separatore a induzione

Grazie all'utilizzo di un generatore di correnti parassite questa macchina separa i materiali non ferrosi (come rame e alluminio) dal resto dei rifiuti.

Il modello sviluppato calcola la frazione separata di questi materiali grazie a un coefficiente specifico  $C_3$ , moltiplicato per la frazione dei materiali non ferrosi presenti nella composizione merceologica. Questo coefficiente è fisso e rappresenta una media ragionevole ottenuta dall'esperienza<sup>3</sup>.

$$\begin{cases} z_{i,H,OUT} = z_{i,H,IN} \cdot C_3 & \text{(Non ferrosi separati)} \\ v_{i,H,OUT} = v_{i,H,IN} \cdot (1 - C_3) & \text{(Non ferrosi rimasti)} \end{cases} \quad (5.8)$$

Anche in questo tipo di separatore vengono separate piccolissime quantità di altre frazioni merceologiche (per ipotesi, sono state trascurate). Il coefficiente  $C_3$  può variare in un intervallo compreso tra 75 e 90%.

Nel modello questa fase può essere esclusa selezionando l'opzione dal pannello di controllo.

### 5.6.4 Biostabilizzazione

L'obiettivo della biostabilizzazione è quello di trattare la frazione organica biodegradabile tramite bio-ossidazione per ottenere:

<sup>3</sup>Cioè dalle misure effettuate dall'azienda

- la riduzione in massa dei rifiuti (in particolare per quanto riguarda l'evaporazione dell'umidità presente);
- un composto stabile dal punto di vista biologico da usare come ricopertura delle discariche o per le bonifiche ambientali.

I parametri principali che caratterizzano questa fase e che ne determinano le prestazioni sono:

- la durata del processo di biostabilizzazione;
- la portata d'aria utilizzata;
- il modo con cui l'aria viene insufflata all'interno delle aree di maturazione.

La procedura implementata, che tiene conto degli effetti della biostabilizzazione, si basa sul modello di calcolo rappresentato in figura 5.5.

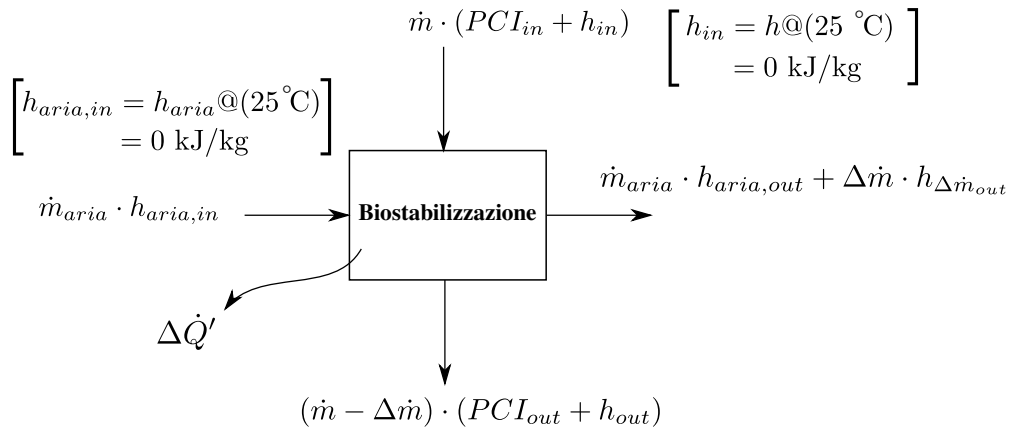


Figura 5.5: Modello utilizzato per descrivere la biostabilizzazione.

Si parte dal bilancio di energia:

$$\dot{m} \cdot PCI_{in} = (\dot{m} - \Delta\dot{m}) \cdot PCI_{out} + \Delta\dot{Q} \quad (5.9)$$

$$(\dot{m} - \Delta\dot{m}) \cdot PCI_{out} = \dot{m} \cdot PCI_{in} - \Delta\dot{Q} \quad (5.10)$$

dove  $\Delta\dot{Q}$  rappresenta la somma di questi termini:

- $\Delta\dot{Q}'$  (le perdite di energia dalle pareti del reattore);
- $\dot{m}_{air} \cdot (h_{air,out} - h_{air,in})$  (l'energia trasportata dall'aria utilizzata per il processo);

- $\Delta\dot{m} \cdot h_{\Delta\dot{m}}$  (l'energia trasportata dalla perdita di massa che il flusso di rifiuti subisce durante il processo);
- $(\dot{m} - \Delta\dot{m}) \cdot h_{out}$  (l'energia posseduta dal rifiuto in uscita dovuta all'incremento di temperatura).

Perciò risulta possibile introdurre un rendimento del processo di biostabilizzazione così definito:

$$\eta_{bio} = \frac{\dot{m} \cdot PCI_{in} - \Delta\dot{Q}}{\dot{m} \cdot PCI_{in}} \quad (5.11)$$

e di conseguenza:

$$\eta_{bio} \cdot (\dot{m} \cdot PCI_{in}) = \dot{m} \cdot PCI_{in} - \Delta\dot{Q} \quad (5.12)$$

che, sostituito nel bilancio, fornisce la seguente equazione:

$$(\dot{m} - \Delta\dot{m}) \cdot PCI_{out} = \eta_{bio} \cdot \dot{m} \cdot PCI_{in} \quad (5.13)$$

Dividendo tutto per  $\dot{m}$  l'equazione diventa:

$$\left(1 - \frac{\Delta\dot{m}}{\dot{m}}\right) \cdot PCI_{out} = \eta_{bio} \cdot PCI_{in} \quad (5.14)$$

dove  $\eta_{bio}$  vale circa 97,5% [9]. In particolare, dall'equazione 5.12 si può calcolare il valore delle perdite  $\Delta\dot{Q}$ :

$$\frac{\Delta\dot{Q}}{\dot{m}} = PCI_{in} \cdot (1 - \eta_{bio}) \quad (5.15)$$

A questo punto la variazione di umidità ( $H_2O$ ) e frazione volatile si valutano a partire da questo sistema di equazioni (bilancio di materia e di energia):

$$\begin{cases} \frac{\Delta\dot{m}_{H_2O}}{\dot{m}} \cdot PCI_{H_2O} + \frac{\Delta\dot{m}_{FV}}{\dot{m}} \cdot PCI_{FV} - PCI_{in} \cdot (1 - \eta_{bio}) = 0 \\ \frac{\Delta\dot{m}}{\dot{m}} = \frac{\Delta\dot{m}_{H_2O}}{\dot{m}} + \frac{\Delta\dot{m}_{FV}}{\dot{m}} \end{cases} \quad (5.16)$$

dove  $PCI_{H_2O}$  indica il calore latente di evaporazione dell'acqua:

$$PCI_{H_2O} = -\Delta H_{H_2O} \quad (5.17)$$

La quantità di  $\Delta\dot{m}_{FV}$  consumata durante questa fase è attribuibile ai materiali soggetti a una più veloce bio-ossidazione; perciò, per ipotesi, si considera

esclusivamente il consumo di frazione volatile dell'organico. Tutte le altre sostanze, invece, subiscono solo una variazione di umidità.

Il potere calorifico inferiore della nuova composizione tal quale si determina per mezzo della seguente equazione, che tiene conto del PCI della frazione volatile e della quantità di umidità presente:

$$PCI_{TQ} = PCI_{FV} \cdot (1 - y_{H_2O} - y_{ceneri}) + y_{H_2O} \cdot PCI_{H_2O} \quad (5.18)$$

Il modello sviluppato calcola la nuova composizione di umidità, ceneri e frazione volatile a partire da una perdita globale in massa fissata  $\Delta m$  (da una stima ragionevole, ottenuta misurando questa variazione in impianti esistenti, risulta variabile in un intervallo compreso tra il 15 e il 25%). Sostituendo questo valore nella seconda equazione del sistema 5.16, si ricava la frazione volatile di organico consumata e di conseguenza la quantità di umidità globale sottratta alla massa di rifiuti.

Per stimare le perdite di processo relative a ogni materiale, occorre distribuire in modo adeguato la variazione di umidità su tutti i componenti imponendo un bilancio di massa. Per ipotesi si considera che l'umidità relativa della massa di ogni frazione merceologica uscente ( $U_{i,out}$ , espressa in kg di acqua su kg di materiale), sia data dal prodotto di un coefficiente  $\beta$ , uguale per tutte le sostanze, moltiplicato per l'umidità relativa del materiale entrante ( $U_{i,in}$ , espressa in kg di acqua su kg di materiale).

$$U_{i,out} = \frac{m_{H_2O,i,out}}{m_{i,out}} = U_{i,in} \cdot \beta = \frac{m_{H_2O,i,in}}{m_{i,in}} \cdot \beta \quad (5.19)$$

Da questa espressione si calcola il nuovo valore della massa d'acqua contenuta in ogni componente:

$$m_{H_2O,i,out} = \frac{(m_{ceneri,i,out} + m_{fv,i,out})}{1 - U_{i,out}} \cdot U_{i,out} \quad (5.20)$$

Questa equazione si può anche esprimere con la grandezza  $y'$ <sup>4</sup>, definita come il rapporto tra la nuova massa d'acqua, contenuta in ogni componente, rispetto alla massa di rifiuto totale in ingresso:

$$y'_{H_2O,i,out} = \frac{(y'_{ceneri,i,out} + y'_{fv,i,out})}{1 - U_{i,out}} \cdot U_{i,out} \quad (5.21)$$

---

<sup>4</sup> $y'_{H_2O}$  non è la frazione massica  $y_{H_2O}$ . Quest'ultima infatti è definita come il rapporto tra la massa d'acqua, contenuta in ogni componente, rispetto alla massa del componente stesso.



$m_{ceneri,i,out}$  (la massa di ceneri) e  $m_{fv,i,out}$  (la massa di volatili) sono entrambi valori noti e costanti, perché non variano durante il processo di biostabilizzazione ( $m_{ceneri,i,out} = m_{ceneri,i,in}$  e  $m_{fv,i,out} = m_{fv,i,in}$ ); infatti varia solo la massa di organico  $m_{fv,org}$ , che diminuisce per fornire energia al processo:

$$m_{fv,org,out} = m_{fv,org,in} - \Delta m_{fv,org} \quad (5.22)$$

Sommando le quantità di ceneri, umidità e volatili si ottiene la massa uscente di ogni sostanza e, di conseguenza, la massa totale in uscita.

$$m_{out} = \sum_{i=A}^I m_{i,out} \quad (5.23)$$

Il valore di  $\beta$  quindi si calcola imponendo che la differenza tra la massa totale uscente dalla fase di biostabilizzazione ( $m_{out}$  o  $y'_{out}$ ) sia uguale alla massa entrante ( $m_{in}$ ) meno le perdite ( $\Delta m$ ):

$$m_{out} - (m_{in} - \Delta m) \rightarrow 0 \quad (5.24)$$

oppure

$$y'_{out} - \left(1 - \frac{\Delta m}{m_{in}}\right) \rightarrow 0 \quad (5.25)$$

Questo bilancio può essere azzerato in modo iterativo con il risolutore di excel o esplicitando la variabile  $\beta$ .

Grazie a questo modello è possibile calcolare le rese di processo  $C_{4,j}$  per ogni frazione merceologica:

$$C_{4,j} = \frac{m_{in,j} - m_{out,j}}{m_{in,j}} \quad (5.26)$$

Nel modello questa fase può essere esclusa selezionando l'opzione dal pannello di controllo.

### 5.6.5 Vaglio a tamburo rotante

Questa macchina separa i rifiuti in funzione delle dimensioni di ogni frazione:

- la frazione fine cade attraverso i fori realizzati sulle pareti cilindriche del vaglio (sottovaglio);
- la frazione con pezzatura maggiore percorre tutto il cilindro senza attraversare i fori (sopravaglio).

Il diametro dei fori è il parametro più importante per valutare le prestazioni del vaglio (per esempio, se il diametro è maggiore il flusso di sottovaglio sarà maggiore), che variano anche in funzione del tipo di materiale. La lunghezza e la velocità del vaglio invece determinano la massima portata che può essere trattata da questa macchina.

$$\begin{cases} z_{i,j,OUT} = v_{i,j,IN} \cdot C_{5,j} & \text{(Sottovaglio)} \\ v_{i,j,OUT} = v_{i,j,IN} \cdot (1 - C_{5,j}) & \text{(Sopravaglio)} \end{cases} \quad (5.27)$$

Il modello sviluppato calcola il sottovaglio separato, grazie a specifici coefficienti moltiplicati per ogni frazione merceologica. Ogni coefficiente è valutato in base all'esperienza maturata su questo tipo di macchine e, grazie a una macro sviluppata in VBA, questo valore può essere cambiato in funzione del diametro (D) scelto e del materiale trattato (ved. fig. 5.6):

$$C_{5,j} = f(D, j) = f(\text{diametro, tipo di rifiuto}) \quad (5.28)$$

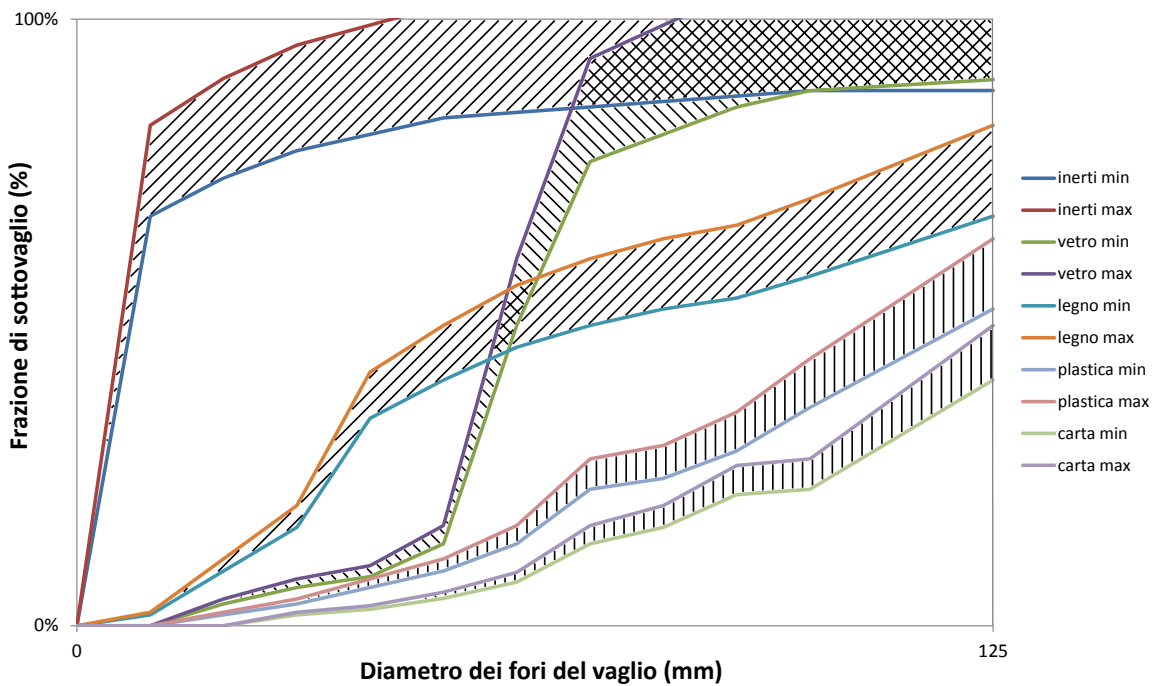
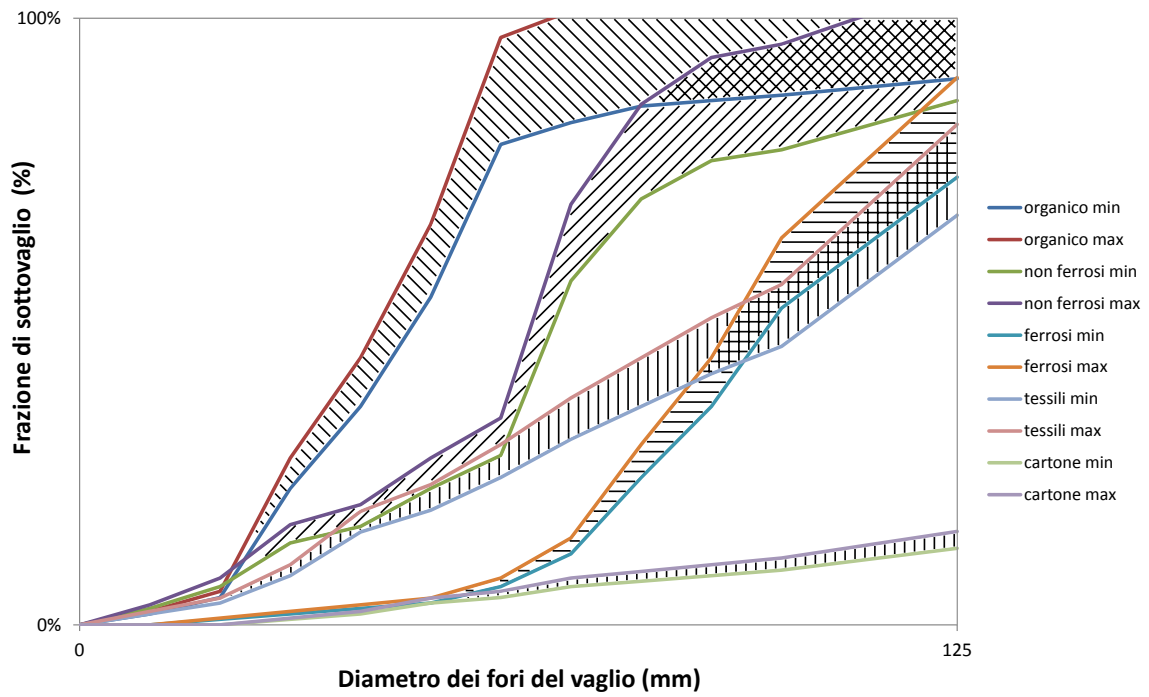


Figura 5.6: Rese medie del vaglio a tamburo rotante (Daneco Impianti).

### 5.6.6 Vaglio stellare

Questa macchina è utilizzata per raffinare i rifiuti organici o il compost:

- la frazione fine cade attraverso lo spazio presente tra una ruota dentata e l'altra del vaglio (sottovaglio);
- la frazione con pezzatura maggiore percorre tutta la sezione del vaglio senza attraversare gli spazi (sopravaglio).

Le prestazioni dipendono prevalentemente dallo spazio presente tra ciascuna ruota dentata.

Il modello sviluppato calcola il sottovaglio separato, grazie a specifici coefficienti moltiplicati per ogni frazione merceologica.

$$\begin{cases} z_{i,j,OUT} = v_{i,j,IN} \cdot C_{6,j} & \text{(Sottovaglio)} \\ v_{i,j,OUT} = v_{i,j,IN} \cdot (1 - C_{6,j}) & \text{(Sopravaglio)} \end{cases} \quad (5.29)$$

I coefficienti sono fissati e valutati in base all'esperienza<sup>3</sup> maturata su questo tipo di macchine.

<b>Materiale</b>	<b>Sottovaglio (<math>C_6</math>) resa %</b>
Organico	19 ÷ 23
Carta e Cartone	75 ÷ 90
Plastiche leggere	74 ÷ 88
Plastiche pesanti	78 ÷ 95
Vetro e inerti	18 ÷ 23
Tessili, gomma, legno e cuoio	62 ÷ 76
Ferrosi	80 ÷ 95
Non Ferrosi	80 ÷ 95

Tabella 5.3: Rese del vaglio stellare.

Nel modello questa fase può essere esclusa selezionando l'opzione dal pannello di controllo.

### 5.6.7 Tavola densimetrica

Questa macchina è utilizzata per raffinare la materia organica biostabilizzata del rifiuto o il compost tramite la separazione di materiali inerti (residui). Un sistema di ventole genera una portata d'aria che viene insufflata attraverso la piastra perforata (e inclinata) che costituisce la tavola:

- la frazione leggera dei materiali organici si stacca dalla piastra e cade in un ciclone;
- la frazione fine di inerti cade attraverso i fori della piastra;
- i materiali con una pezzatura elevata sono trascinati sulla piastra e in particolare gli inerti salgono e si dirigono verso la parte superiore della piastra, mentre quelli organici sono trascinati verso quella inferiore.

I parametri principali che influenzano le prestazioni di questa macchina sono:

- la portata d'aria;
- il diametro dei fori della piastra.

Il modello sviluppato calcola la frazione di inerti fini e con pezzatura più elevata moltiplicando due diversi coefficienti per ogni frazione merceologica del flusso in ingresso. La frazione leggera e quella con pezzatura elevata del materiale organico separato (insieme costituiscono il flusso di RBM raffinato) si ottiene per differenza. Dato che in questa macchina è presente un flusso uscente in più, occorre un terzo vettore  $\mathbf{w}$  per memorizzare tutti i dati.

$$\begin{cases} z_{i,j,OUT} = v_{i,j,IN} \cdot C_{7,j} & \text{(Scarto fine)} \\ w_{i,j,OUT} = v_{i,j,IN} \cdot C'_{7,j} & \text{(Scarto pesante)} \\ v_{i,j,OUT} = v_{i,j,IN} \cdot (1 - C_{7,j} - C'_{7,j}) & \text{(RBM raffinato)} \end{cases} \quad (5.30)$$

Questi coefficienti, diversi per ogni materiale, sono fissati e rappresentano una media ragionevole ottenuta dall'esperienza<sup>3</sup>.

<b>Materiale</b>	<b>Scarto fine (<math>C_7</math>) resa %</b>	<b>Scarto pesante (<math>C'_7</math>) resa %</b>
Organico	12 ÷ 16	4 ÷ 7
Carta e Cartone	12 ÷ 16	4 ÷ 7
Plastiche leggere	48 ÷ 66	0
Plastiche pesanti	57 ÷ 78	10 ÷ 12
Vetro e inerti	57 ÷ 78	18 ÷ 24
Tessili, gomma, legno e cuoio	18 ÷ 27	4 ÷ 7
Ferrosi	65 ÷ 89	14 ÷ 18
Non Ferrosi	65 ÷ 89	14 ÷ 18

Tabella 5.4: Rese della tavola densimetrica.

## 5.7 Scheda: WtE

In questa sezione viene calcolata la potenza elettrica prodotta dal termovalorizzatore in funzione della potenza termica introdotta dalla Frazione Secca Combustibile (FSC) prodotta dal RUR. Questo flusso  $\dot{m}_{FSC}$  è dato dalla somma della  $FSC_1$  (il sopravaglio del vaglio a tamburo rotante) e della  $FSC_2$  (il sopravaglio del vaglio stellare). Il potere calorifico della FSC è dato da una media pesata dei due flussi.

$$P_{el} = \eta_{el}(taglia) \cdot \dot{m}_{FSC} \cdot PCI_{FSC} = \eta_{el}(taglia) \cdot \dot{Q}_{th} \quad (5.31)$$

Il rendimento elettrico varia in funzione della taglia, cioè in funzione della potenza termica entrante e delle caratteristiche del ciclo termico di produzione energia. Questa dipendenza può essere espressa con due curve differenti:

1. la prima ( $\eta_1$ ) cerca di rispecchiare la realtà industriale del contesto italiano, perché basata su condizioni del vapore “medie” (40 ÷ 50 bar e 400 ÷ 420 °C) e non correlate alla taglia;
2. la seconda ( $\eta_2$ ) tiene conto del fatto che, per migliorare i rendimenti complessivi dell’impianto, all’aumentare della taglia risulta opportuno incrementare i valori di pressione e temperatura del ciclo termico (si passa da un minimo di 30 bar / 350 °C a un massimo di 70 bar / 450 °C) [10].

Si è scelto di considerare la seconda curva, perché riflette ciò che sarebbe più opportuno considerare dal punto di vista tecnico e risulta più allineata con quanto riportato nei documenti relativi alle B.A.T. (Best Available Techniques) (ved. fig. 5.7).

In questa sezione vengono inoltre calcolati i residui prodotti dall’impianto e da avviare a discarica (sia le ceneri del sistema combustore/caldaia che i prodotti del trattamento dei fumi, considerando anche i reagenti utilizzati per la stabilizzazione).

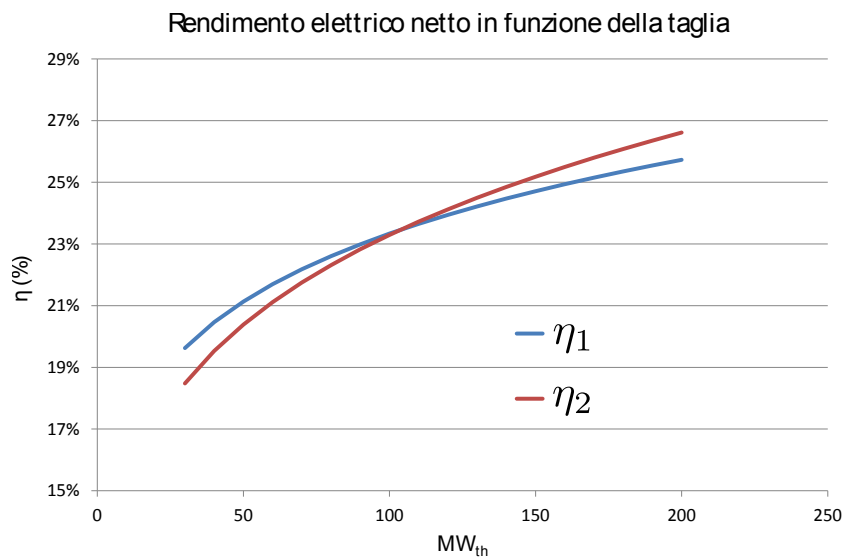


Figura 5.7: Rendimento elettrico del WtE in funzione dell'input termico.

## 5.8 Scheda: Landfill

In questa scheda vengono riassunti i flussi dei residui da MBT e/o WtE a seconda della configurazione impiantistica scelta. A partire da questi valori viene dimensionato il volume della discarica (tenendo conto di un adeguato indice di compattazione) per garantire un conferimento minimo di 15 anni. Oltre ai flussi di residui è stato considerato un certo quantitativo di RBM (Rifiuto Biostabilizzato Maturo), utilizzato per la copertura della discarica.

## 5.9 Scheda: Analisi Economico-Finanziaria

In questa scheda sono presenti tutti i dati e le formule con cui è stata realizzata l'analisi economico-finanziaria. La sezione può essere divisa in tre parti: *ipotesi* (1), *calcolo di investimenti e costi/ricavi operativi* (2) e infine *analisi di redditività (degli investimenti)* (3).

### 5.9.1 Ipotesi

In questa parte sono presenti gli investimenti relativi a MBT, WtE e discarica nonché i costi/ricavi operativi specifici.

## Investimenti

I costi di investimento sono valutati con apposite curve<sup>5</sup> che, per quanto riguarda l'impianto MBT, sono definite in funzione della quantità e qualità dei rifiuti in ingresso, mentre per l'impianto WtE fanno riferimento alla potenza termica entrante. Come è già stato descritto precedentemente, l'impianto MBT considerato è del tipo a "flusso separato", mentre il WtE è basato sulla tecnologia di "combustione a griglia".

Il programma utilizza tre differenti curve per MBT e WtE, che considerano tre tipologie di impianti (caratterizzati rispettivamente da una, due o tre linee) e che fanno riferimento alle taglie disponibili sul mercato (ved. fig. 5.8 e 5.9).

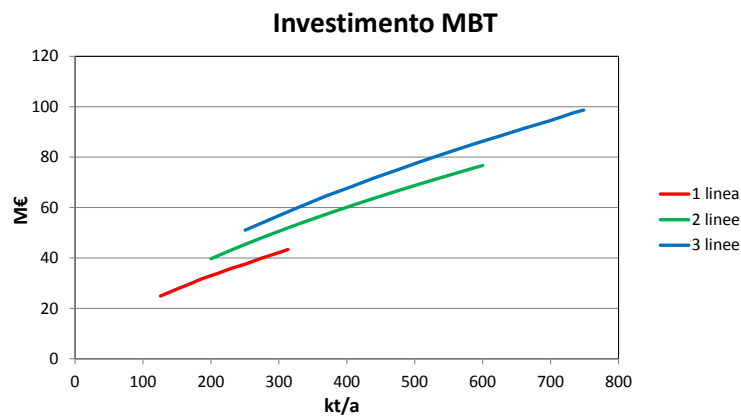


Figura 5.8: Investimento MBT in funzione del numero di linee.

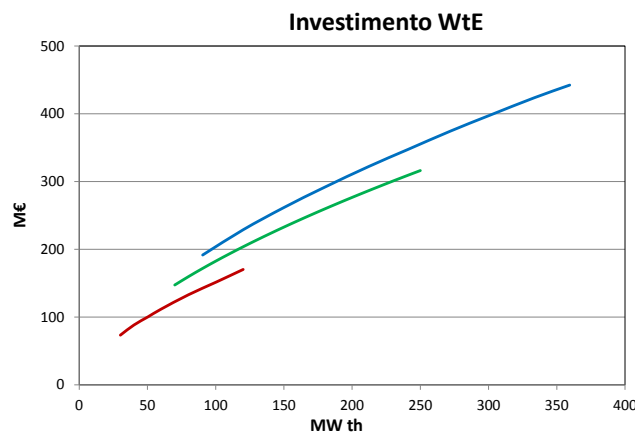


Figura 5.9: Investimento WtE in funzione del numero di linee.

<sup>5</sup>Le curve tengono conto delle economie di scala.



### Costi operativi

I costi sono suddivisi in cinque categorie (ved. fig. 5.10):

1. *personale* di conduzione, cioè le retribuzioni delle figure specialistiche idonee alla gestione e manutenzione dell'impianto;
2. *reagenti e utilities*, cioè i costi dei combustibili ausiliari, dell'acqua, dei chemicals e dei reagenti utilizzati nel MBT e nel WtE; nonché i costi dell'energia elettrica spesa dalle macchine presenti nell'impianto MBT;
3. *smaltimento residui*, cioè la spesa per smaltire i residui presso terzi (nel caso di smaltimento presso una propria discarica di servizio, la presente voce risulta azzerata in questa sezione);
4. *manutenzione ordinaria e straordinaria*, ossia le spese sostenute per riparare o sostituire parti di normale usura o componenti di macchine o strutture (le manutenzioni includono eventuale personale specialistico esterno e le relative parti di ricambio);
5. *spese generali e amministrative*, cioè gli altri costi di diversa natura, sostenuti per analisi e controlli sanitari, guardiania, sicurezza, cancelleria, software, telefono e fax, assicurazioni, consulenze, ecc...

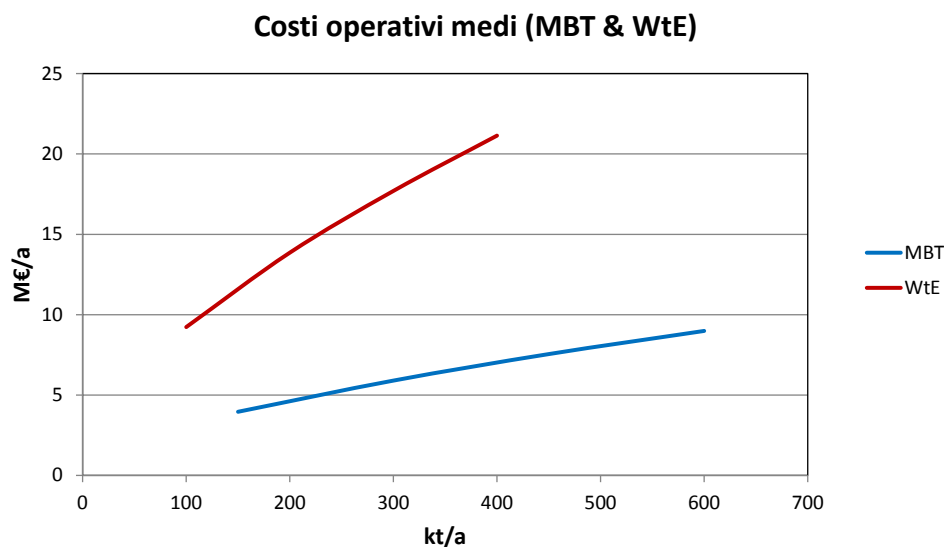


Figura 5.10: Costi operativi senza smaltimento residui.

<b>Costi operativi</b>	<b>MBT</b>	<b>WTE</b>
Personale (%)	10 ÷ 15	10 ÷ 20
Reagenti e Utilities (%)	15 ÷ 20	15 ÷ 20
Smaltimento Residui (%)	30 ÷ 45	25 ÷ 35
Manutenzione (%)	15 ÷ 25	20 ÷ 30
Spese amministrative (%)	10 ÷ 15	10 ÷ 15

Tabella 5.5: Ripartizione indicativa dei costi di gestione.

### Ricavi operativi

Per quanto riguarda i ricavi, invece, si hanno le seguenti voci:

- *ricavi da conferimento*, cioè il corrispettivo ricevuto per il trattamento dei rifiuti in ingresso al sistema;
- *ricavi da energia elettrica*, cioè i proventi derivanti dalla produzione netta di energia elettrica (in uscita dal WtE).

### Considerazioni su flessibilità e numero di linee

In generale l'incremento del numero di linee consente di ottenere una maggiore flessibilità e affidabilità di funzionamento. Per contro questo incremento determina un aumento di tutti i costi di investimento e dei costi di gestione, ad eccezione di quelli per l'approvvigionamento di reagenti e utilities e per lo smaltimento dei residui (che dipendono unicamente dalla taglia, cioè dalla capacità di trattamento).

Nel caso in cui sia necessario avere più linee per gestire in modo adeguato un certo bacino, occorre effettuare con attenzione la scelta di come localizzare la capacità di trattamento, cioè in un unico sito o in più siti (per esempio, installazione di un impianto su doppia linea o di due impianti separati con singola linea).

Nel primo caso gli investimenti e i costi di gestione non aumentano in modo direttamente proporzionale all'aumentare del numero di linee, perché entrano in gioco alcune importanti sinergie. Per esempio, per un impianto MBT risulta possibile:

- distribuire in modo più efficiente ed efficace il personale e quindi non risulta necessario raddoppiarlo;
- utilizzare edifici, apparecchiature e servizi comuni alle varie linee (cappannoni e amministrazione, sistemi di trasporto e stoccaggio dei materiali, ausiliari meccanici ed elettrostrumentali, servizi vari);

Per quanto riguarda l'impianto WtE invece è possibile:

- condividere lo stesso ciclo a vapore, in particolare turbina e condensatore, opere civili e sistemi ausiliari<sup>6</sup>;
- distribuire in modo più efficiente il personale, senza la necessità di raddoppiarlo;

Nel secondo caso invece (localizzazione in più siti) non sarebbe possibile sfruttare queste sinergie. Per esempio, nel caso di due impianti separati gli investimenti e i costi di gestione raddoppierebbero.

La localizzazione in un unico sito però potrebbe non essere vantaggiosa per la logistica. Occorre infatti valutare, caso per caso, come e dove realizzare un impianto in base alla distanza dalle zone dove vengono prodotti i rifiuti. Perciò la scelta, tra una localizzazione baricentrica o decentrata, dipende molto dal contesto analizzato e quindi da una corretta valutazione dell'impatto ambientale ed economico (incluso i trasporti e i relativi costi).

**Nell'analisi economica (presente nel capitolo 7) si è scelto di collocarsi su taglie di riferimento più frequenti e consolidate, considerando quindi un'unica tipologia di impianto <sup>7</sup> compatibile con gli scenari individuati.** Si è, in definitiva, quindi di analizzare alcuni scenari compresi in uno specifico intervallo di capacità di trattamento e che consentano di:

- non avere punti di discontinuità economico-finanziaria, ossia andamenti a gradini a causa della disomogeneità nell'andamento degli investimenti;
- non avere ulteriori variabili, oltre a quelle già considerate, a causa della diversa incidenza del personale, delle manutenzioni e degli aspetti amministrativi.

### 5.9.2 Calcolo di investimenti e costi/ricavi operativi

In base alle ipotesi viste precedentemente in questa sezione vengono calcolati gli investimenti e i costi/ricavi per un contesto specifico, considerato in riferimento a un anno operativo.

---

<sup>6</sup>Movimentazione e stoccaggio dei rifiuti e dei residui, componenti elettrostrumentali, ausiliari meccanici (ventilazione e condizionamento edifici, aria compressa, combustibile ausiliario, sistema riutilizzo acque, antincendio, sistema acqua di rete, demi e raffreddamento).

<sup>7</sup>Su due linee, sia per MBT che WtE, le cui dimensioni variano in funzione dei bacini scelti e in relazione alla tipologia di rifiuto.

### 5.9.3 Analisi di redditività degli investimenti

In questa sezione viene valutato il progetto di investimento, considerando un arco temporale di diciotto anni (tre per la realizzazione degli impianti e quindici di funzionamento del sistema integrato). Vengono quindi calcolati i parametri descritti nel paragrafo 5.2.2, tramite l'elaborazione di un conto economico semplificato composto dalle seguenti voci:

- EBITDA (Earnings Before Interest, Taxes, Depreciation and Amortization) o Margine Operativo Lordo;
- EBIT (Earnings Before Interest and Taxes) o Risultato Operativo;
- EBT (Earnings Before Taxes) o Utile Ante Imposte;
- Utile Netto.

A partire da questi risultati e considerando il suddetto orizzonte finanziario, vengono poi calcolati gli indici economico-finanziari, in particolare NPV, PBT, IRR ed ERR. Tra questi si è posta maggiore attenzione al parametro **IRR**, perché è uno degli indici di riferimento che gli istituti di credito valutano per decidere se finanziare o meno un progetto (generalmente, in questo settore, deve risultare maggiore del 12%).

A questa sezione è collegata la funzione *“Refresh Analisi di Redditività”* presente nel pannello di controllo.

# Capitolo 6

## Risultati tecnici

In base al modello realizzato risulta dunque possibile analizzare e ottimizzare, dal punto di vista tecnico, numerose varianti del sistema, costituito dall'impianto MBT di riferimento in relazione al successivo recupero energetico nell'impianto WtE. I parametri che caratterizzano e descrivono questo sistema possono essere rappresentati da *quattro grafici principali*:

- **prestazioni dell'impianto MBT**, descrivono la qualità e la quantità del combustibile prodotto ( $FSC$ ) in relazione al suo potenziale energetico;
- **residui da MBT e WtE**, cioè tutti quei materiali destinati allo smaltimento in discarica prodotti da MBT e WtE;
- **flussi di materia in uscita dal MBT**, si intendono tutti i materiali recuperati, i residui totali prodotti e le perdite di processo;
- **recupero di energia termica (ET) dal MBT e produzione di energia elettrica (EE) dal WtE**, rappresentano rispettivamente l'energia termica disponibile a valle del MBT e l'energia elettrica prodotta in funzione della precedente e del rendimento (lordo e netto) del WtE;

I parametri descritti in questi grafici, sono tutti in funzione del diametro dei fori del vaglio primario, che costituisce la fase più importante di tutto il sistema. La dimensione dei fori infatti, definisce la quantità e la qualità del combustibile primario prodotto ( $FSC_1$  - ved. par. 2.1.1). Il diametro inoltre definisce le dimensioni di tutto il sistema posto a valle di detto vaglio. Infatti, per trattare una portata di sottovaglio maggiore, che aumenta all'aumentare della dimensione dei fori, sono necessari macchinari ed edifici più grandi.

I valori percentuali riportati sono tutti riferiti alle caratteristiche del RUR in ingresso.

Per ogni parametro sono presenti inoltre due curve, una per il  $RUR_{min}$  ( $PCI = 6,5$  MJ/kg) e una per il  $RUR_{max}$  ( $PCI = 11,5$  MJ/kg) che indicano gli estremi di una fascia, nella quale sono compresi tutti gli altri possibili casi.

Relativamente alla configurazione dell'impianto, si è scelto di analizzare sei diverse combinazioni (vedi tabella 6.1 e fig. 6.1), caratterizzate dalla presenza o dall'assenza delle seguenti fasi:

- la *biostabilizzazione* a monte del vaglio rotante;
- la *biostabilizzazione* a valle del vaglio rotante;
- la separazione nel *vaglio stellare*;

Config. impianto	Biostabiliz. a monte	Biostabiliz. a valle	Vaglio stellare
(A)	SI	SI	SI
(B)	NO	SI	SI
(C)	NO	SI	NO
(D)	SI	NO	SI
(E)	SI	NO	NO
(F)	SI	SI	NO

Tabella 6.1: Configurazioni impiantistiche analizzate.

Le prime due influenzano il PCI del combustibile e le perdite di processo, mentre l'ultima permette di recuperare la parte di frazione secca presente nel sottovaglio del flusso primario (FSC 2). La somma di  $FSC_1$  e  $FSC_2$  fornisce così il valore della frazione secca totale  $FSC$  che alimenta il WtE. Le altre fasi, in particolare il recupero di ferrosi e non ferrosi, non influenzano sensibilmente i parametri in oggetto; perciò non sono state prese in considerazione possibili variazioni delle loro rese rispetto alla configurazione di partenza.

I valori riportati nei grafici sono "misurati" a valle dell'impianto MBT o a valle del WtE.

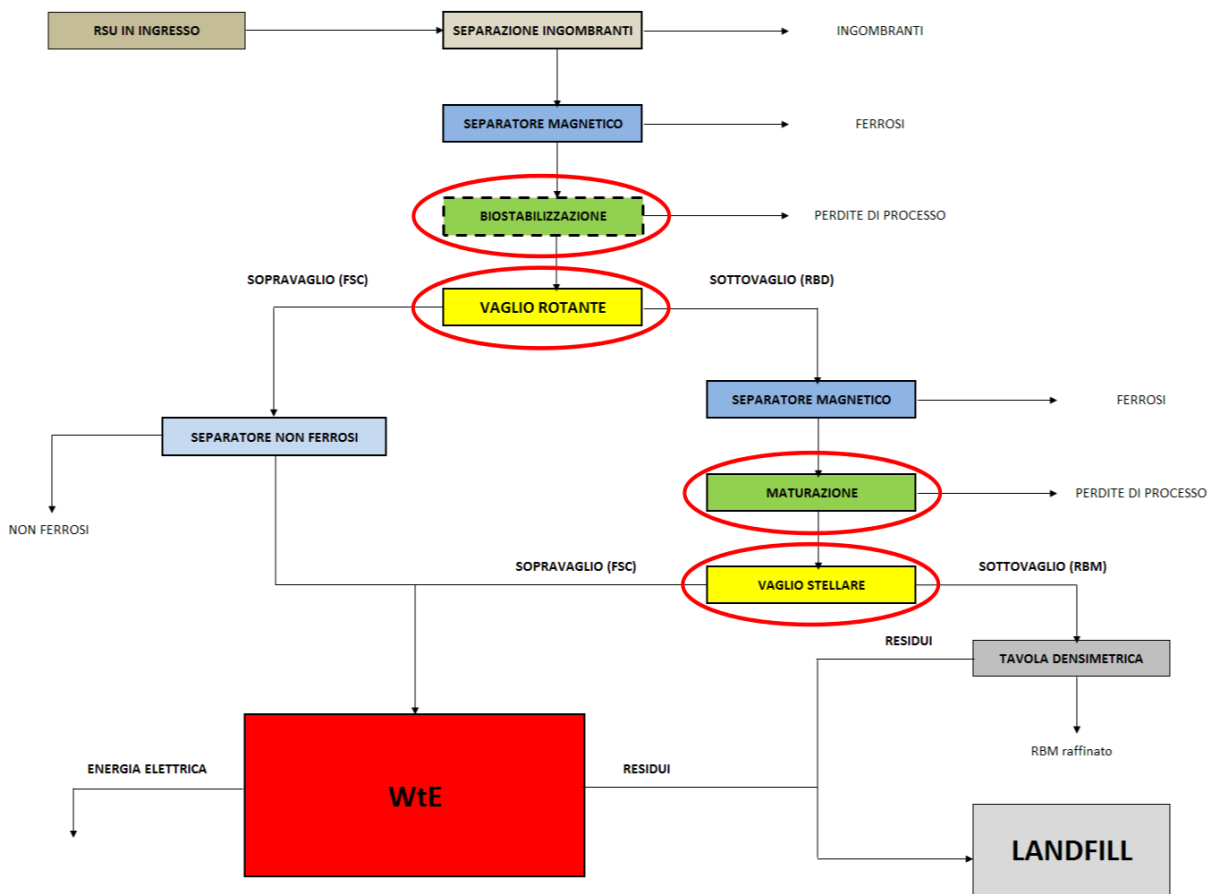


Figura 6.1: Fasi relative all'analisi tecnica.

## 6.1 Prestazioni del MBT

Nel grafico PRESTAZIONI sono riportati i seguenti parametri [11]:

- il *rendimento di materia* ( $\eta_m$ ) o di produzione materiale è definito come il rapporto tra la quantità di FSC recuperata, dal vaglio primario e dal vaglio stellare, e la quantità di RUR in ingresso al MBT:

$$\eta_m = \frac{m_{FSC}}{m_{RUR}} = \left(1 - \frac{m_{PP} + m_{FS}}{m_{RUR}}\right) \cdot 100 \text{ (\%)} \quad (6.1)$$

con PP = Perdite di processo e FS = Flussi Secondari = Residui + RBM + Metalli.

- l'*incremento del PCI* ( $\Delta PCI$ ) indica la variazione del PCI della FSC rispetto al RUR in ingresso:

$$\Delta PCI = \frac{PCI_{FSC} - PCI_{RUR}}{PCI_{RUR}} \cdot 100 \text{ (\%)} \quad (6.2)$$

- il *rendimento termico* ( $\eta_{th}$ ), o recupero energetico, è definito come il rapporto tra il contenuto energetico della FSC rispetto al RUR in ingresso:

$$\eta_{th} = \frac{m_{FSC} \cdot PCI_{FSC}}{m_{RUR} \cdot PCI_{RUR}} \cdot 100 \text{ (\%)} \quad (6.3)$$

Noti i valori di  $\eta_m$  e  $\eta_{th}$  è possibile determinare il valore di  $K$  (coefficiente fondamentale del MBT):

$$K = \frac{\eta_{th}}{\eta_m} \quad (6.4)$$

Tale coefficiente è legato al  $\Delta PCI$ , poiché:

$$K = \frac{\eta_{th}}{\eta_m} = \frac{m_{FSC} \cdot PCI_{FSC}}{m_{RUR} \cdot PCI_{RUR}} \cdot \frac{m_{RUR}}{m_{FSC}} = \frac{PCI_{FSC}}{PCI_{RUR}} \quad (6.5)$$

è possibile esprimere  $\Delta PCI$  come:

$$\begin{aligned} \Delta PCI &= \frac{PCI_{FSC} - PCI_{RUR}}{PCI_{RUR}} \cdot 100 \text{ (\%)} \\ &= \left(\frac{PCI_{FSC}}{PCI_{RUR}} - 1\right) \cdot 100 \text{ (\%)} \\ &= (K - 1) \cdot 100 \text{ (\%)} \end{aligned} \quad (6.6)$$

$K$  rappresenta quindi il rapporto tra il PCI della FSC e del RUR, ovvero tra il rendimento di recupero energetico e il rendimento di produzione materiale del MBT. Pertanto, noti  $m_{RUR}$  e  $PCI_{RUR}$ , dai valori di  $\eta_m$  e  $\eta_{th}$  (ovvero  $\Delta PCI$ ), presenti sul grafico prestazioni risulta possibile calcolare i valori di  $m_{FSC}$  e  $PCI_{FSC}$  (ovvero  $K$  e quindi  $PCI_{FSC}$ ).



## 6.1.1 Configurazione (A)

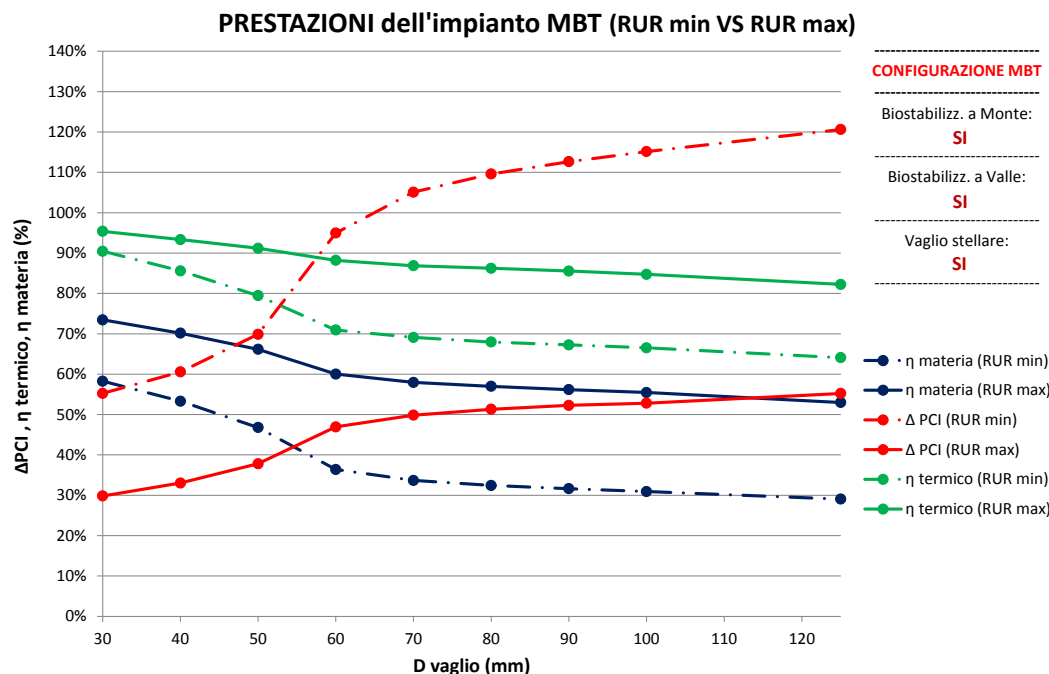


Figura 6.2: Prestazioni dell'impianto MBT in funzione del diametro dei fori del vaglio primario.

Nel caso (A) sono presenti tutte le relative alle sei combinazioni (ved. fig. 6.2). Si osserva che per il  $RUR_{max}$  il valore di  $\eta_m$  è sempre più elevato. La frazione di organico e di materiali inerti (vetro, metalli, ecc.), che compongono il sottovaglio, è infatti maggiore nel caso del  $RUR_{min}$  e ciò determina una minore portata di FSC (il sopravaglio) e, di conseguenza, un valore di  $\eta_m$  più basso.

L'incremento del PCI è decisamente più marcato nel caso del  $RUR_{min}$ . Questa variazione dipende soprattutto dal vaglio primario, che sottrae una grande quantità di materiale caratterizzato da un basso PCI (cioè organico e inerti); ciò incrementa sensibilmente il PCI della FSC ottenuta. La presenza di entrambi i processi di biostabilizzazione, inoltre, accentua notevolmente questo risultato; infatti, grazie alle perdite di processo, questa fase aumenta il PCI e diminuisce la massa delle sostanze più umide, in particolare l'organico e la carta. Dall'analisi effettuata su questa e sulle altre configurazioni si può quindi definire la seguente regola generale:

$$D \uparrow \Rightarrow \eta_m \downarrow \quad PCI \uparrow \quad (6.7)$$

Si osserva inoltre, che il valore di  $\eta_{th}$  diminuisce all'aumentare del diametro del vaglio per ogni tipo di RUR. L'incremento del PCI infatti, non è in grado di compensare la diminuzione di FSC (e quindi di  $\eta_m$ ) e ciò implica un minore recupero energetico a valle dell'impianto MBT. Quindi il rendimento termico, è più sensibile alle variazioni di  $\eta_m$  che a quelle di  $\Delta PCI$ , secondo lo schema seguente:

$$\eta_{th} = \frac{m_{FSC} \cdot PCI_{FSC}}{m_{RUR} \cdot PCI_{RUR}}, \quad \text{e se } D \uparrow \begin{cases} PCI_{FSC}/PCI_{RUR} \uparrow \\ m_{FSC}/m_{RUR} \downarrow \end{cases} \quad (6.8)$$

La scelta del diametro dei fori è un passo fondamentale per il dimensionamento del sistema integrato. Il suo valore ottimo dipende molto dalla tipologia del RUR trattato e quindi dal contesto di riferimento.

L'incremento del PCI risulta più importante per il  $RUR_{min}$  piuttosto che per il  $RUR_{max}$ ; infatti, un valore troppo basso del potere calorifico potrebbe non garantire una buona combustione.

Di conseguenza il valore del diametro ottimo aumenta al diminuire del PCI del RUR in ingresso e quindi:

$$D_{RUR_{min}}^{ottimo} > D_{RUR_{max}}^{ottimo} \quad (6.9)$$

Il recupero energetico a valle dell'impianto MBT dipende molto da questa scelta, pertanto occorre trovare un buon compromesso tra la diminuzione della portata di FSC e l'incremento del PCI.

## 6.1.2 Configurazione (B)

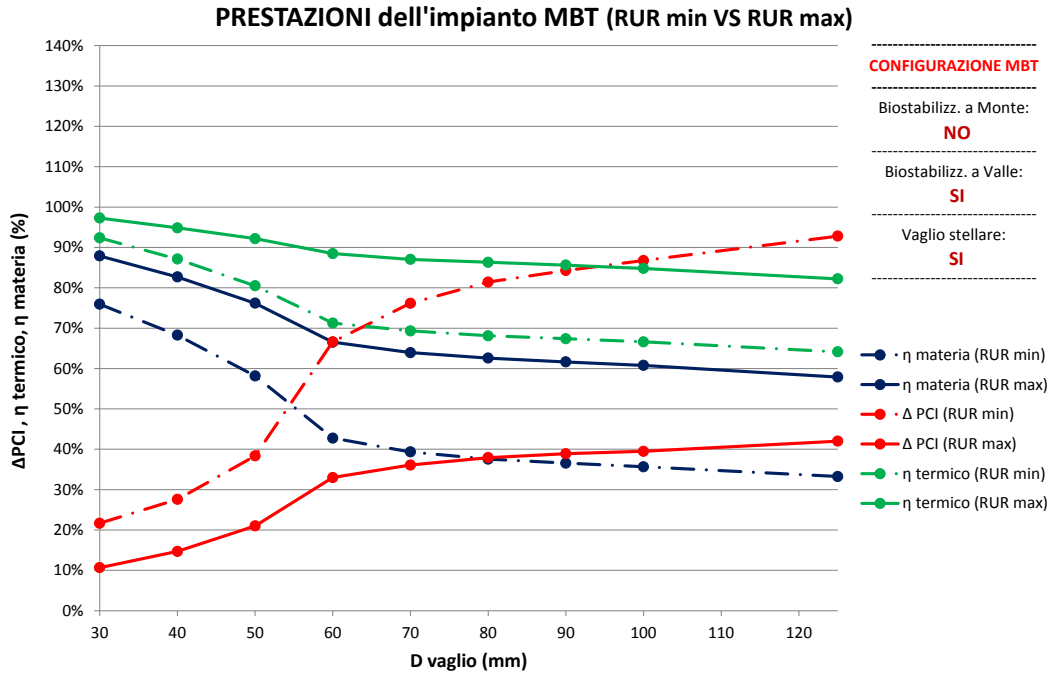


Figura 6.3: Prestazioni dell'impianto MBT in funzione del diametro dei fori del vaglio primario.

Le perdite di processo e l'incremento del PCI del flusso principale di rifiuti dipendono in modo significativo dalla biostabilizzazione a monte (ved. fig. 6.3). Perciò, rispetto alla configurazione precedente, l'assenza di questa fase dà origine a:

1. un aumento di  $\eta_m$ , poiché il flusso principale di rifiuti non subisce perdite di processo e ciò fa aumentare la quantità del sopravvaglio primario ( $FSC_1$ );
2. una diminuzione di  $\Delta PCI$ , dovuta all'aumento dell'umidità della  $FSC_1$ ;
3. un andamento di  $\eta_t$  sostanzialmente invariato rispetto al caso precedente; non si osservano infatti variazioni percepibili, soprattutto per diametri  $> 60$  mm.

### 6.1.3 Configurazione (C)

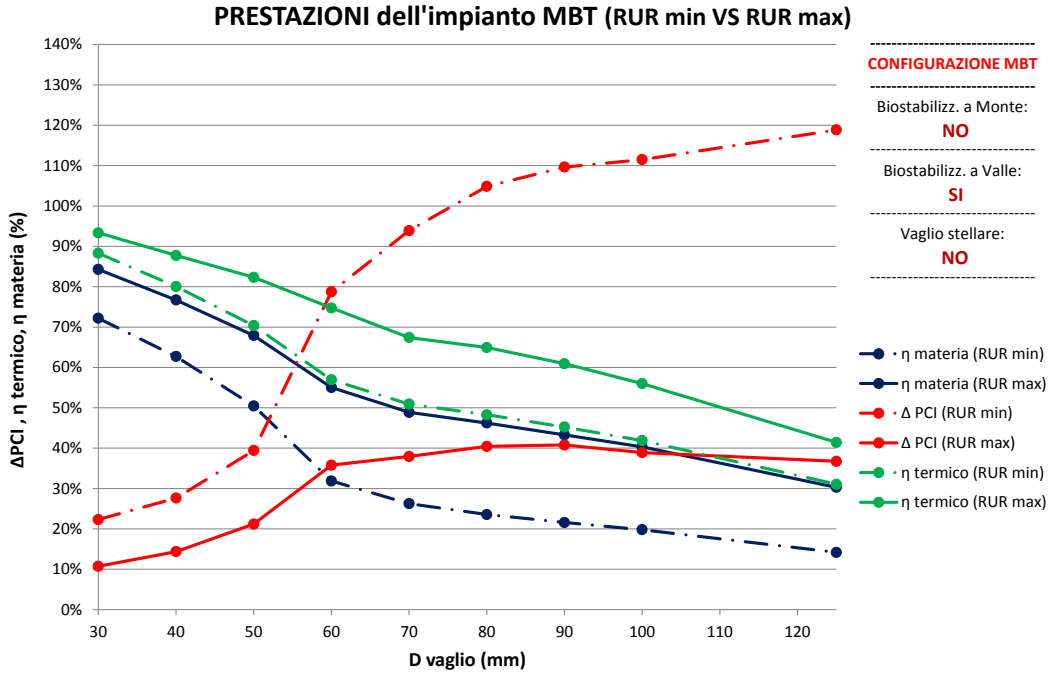


Figura 6.4: Prestazioni dell'impianto MBT in funzione del diametro dei fori del vaglio primario.

La quantità di  $FSC_2$ , prodotta dal vaglio stellare, aumenterebbe con la portata del sottovaglio primario, e di conseguenza, con il diametro dei fori. Rispetto alla  $FSC_1$  però, la qualità di questo combustibile, in termini di potere calorifico, sarebbe generalmente più bassa. Infatti la  $FSC_2$  sarebbe recuperata dal sottovaglio primario, che possiede un PCI inferiore a quello del sopravaglio ( $FSC_1$ ). Pertanto l'aggiunta di  $FSC_2$  aumenterebbe la quantità totale di combustibile ma non il suo potere calorifico, dato dalla media pesata tra il PCI della  $FSC_1$  e quello della  $FSC_2$ :

$$PCI_{FSC} = \frac{m_{FSC_1} \cdot PCI_{FSC_1} + m_{FSC_2} \cdot PCI_{FSC_2}}{m_{FSC_1} + m_{FSC_2}} \quad (6.10)$$

Rispetto alla configurazione precedente, l'assenza del vaglio stellare determina (ved. fig. 6.4):

- una drastica riduzione di  $\eta_m$ , che non è compensata dal recupero di  $FSC_2$ ;
- un incremento elevato di  $\Delta PCI$ , a causa dell'assenza della  $FSC_2$  (che possiede un PCI inferiore rispetto a quello della  $FSC_1$ );

- una forte diminuzione di  $\eta_{th}$ , legata principalmente all'andamento di  $\eta_m$ .

### 6.1.4 Configurazione (D)

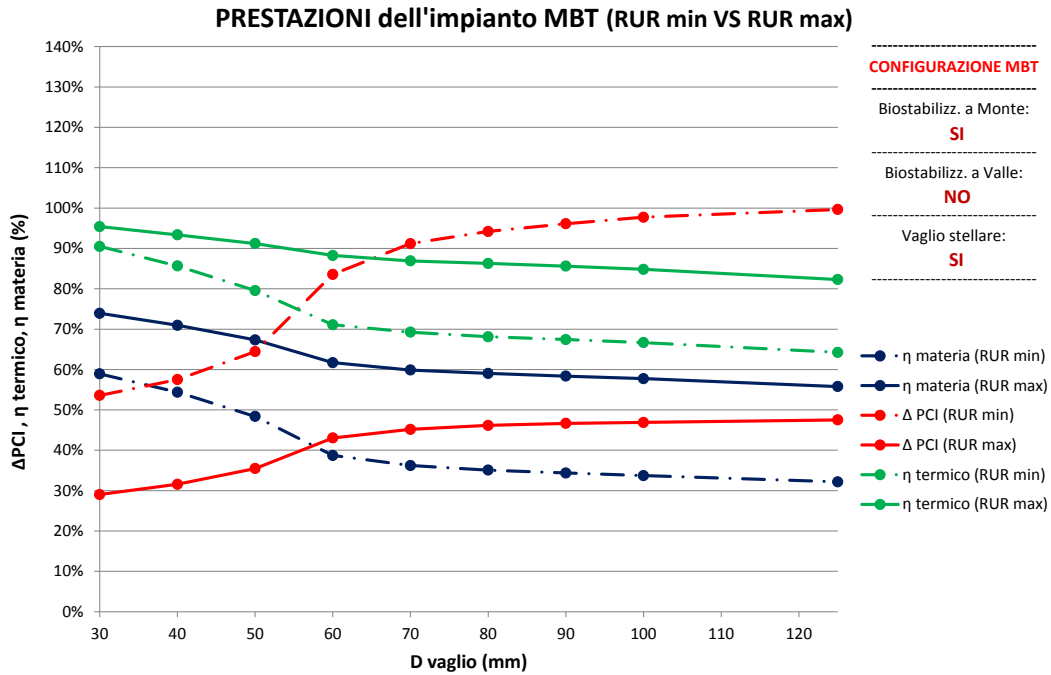


Figura 6.5: Prestazioni dell'impianto MBT in funzione del diametro dei fori del vaglio primario.

Le perdite di processo e l'incremento del PCI del sottovaglio del flusso primario dipendono dalla biostabilizzazione a valle. L'assenza di questa fase, rispetto alla configurazione (A), determina unicamente una diminuzione di  $\Delta PCI$  e un leggero aumento di  $\eta_m$  (ved. fig. 6.5).

### 6.1.5 Configurazione (E)

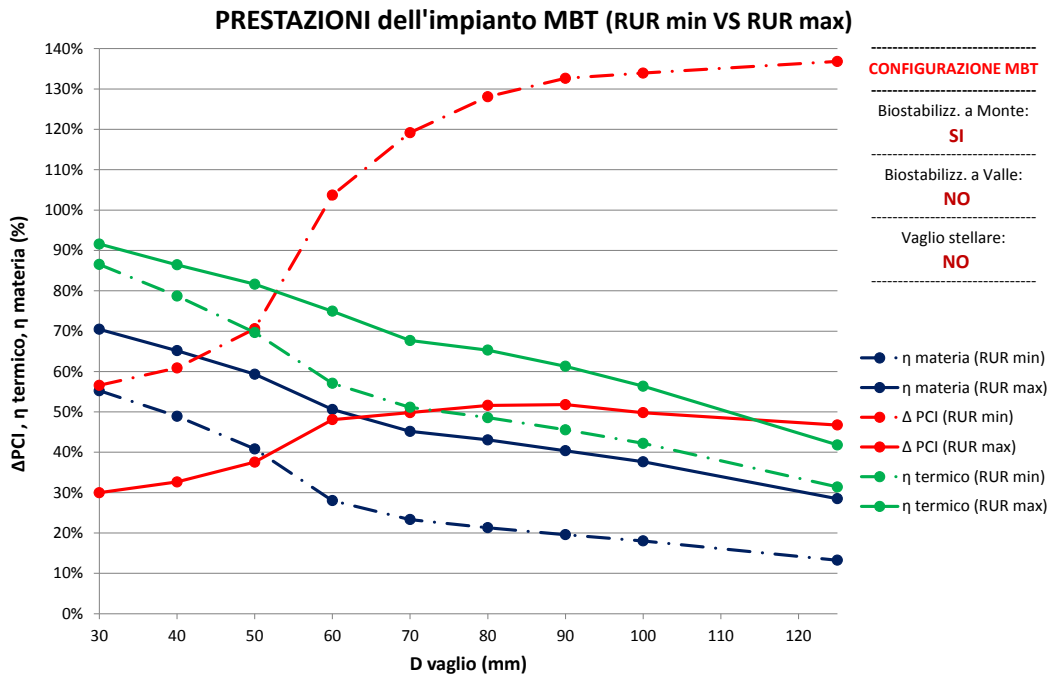


Figura 6.6: Prestazioni dell'impianto MBT in funzione del diametro dei fori del vaglio primario.

La presenza della biostabilizzazione a monte e l'assenza del vaglio stellare, incrementano notevolmente il  $\Delta PCI$  della  $FSC_1$ . La prima fase, infatti, sottrae umidità al flusso di rifiuti, mentre l'eliminazione della seconda non aggiunge la  $FSC_2$  al resto del combustibile. Per contro, rispetto alla configurazione precedente, si ottiene una sensibile diminuzione di  $\eta_m$  e, di conseguenza, anche di  $\eta_{th}$  (ved. fig. 6.6).

## 6.1.6 Configurazione (F)

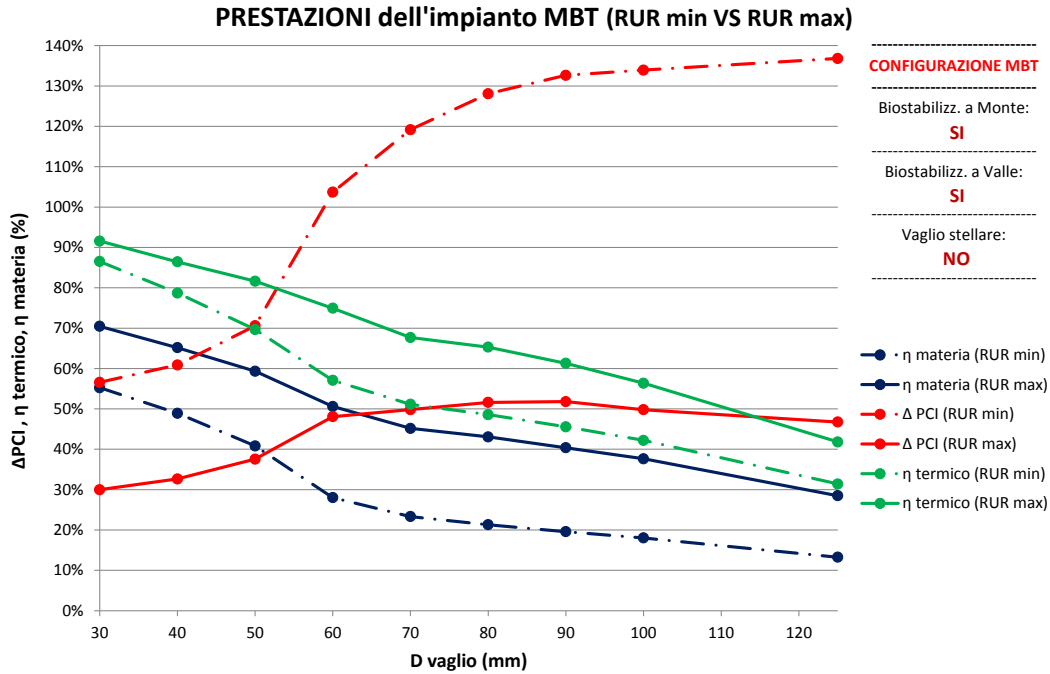


Figura 6.7: Prestazioni dell'impianto MBT in funzione del diametro dei fori del vaglio primario.

La presenza della biostabilizzazione a valle incrementa il PCI della  $FSC_2$ . D'altra parte, non essendo presente il vaglio stellare, questa frazione non viene recuperata e, di conseguenza, rispetto alla configurazione precedente questa fase non modifica gli andamenti dei tre parametri (ved. fig. 6.7).

## 6.2 Residui da MBT e WtE

In questo grafico sono riportati gli andamenti dei *residui prodotti da MBT, WtE* e da *tutto il sistema integrato (MBT+WtE)*. Gli scarti prodotti dall'impianto MBT sono costituiti principalmente da materiali inerti (vetro e metalli) e dalle frazioni che non sono state separate completamente dalle altre fasi. I residui del WtE, invece, sono le scorie di combustione (preponderanti) e i prodotti stabilizzati della depurazione fumi.

### 6.2.1 Configurazione (A)

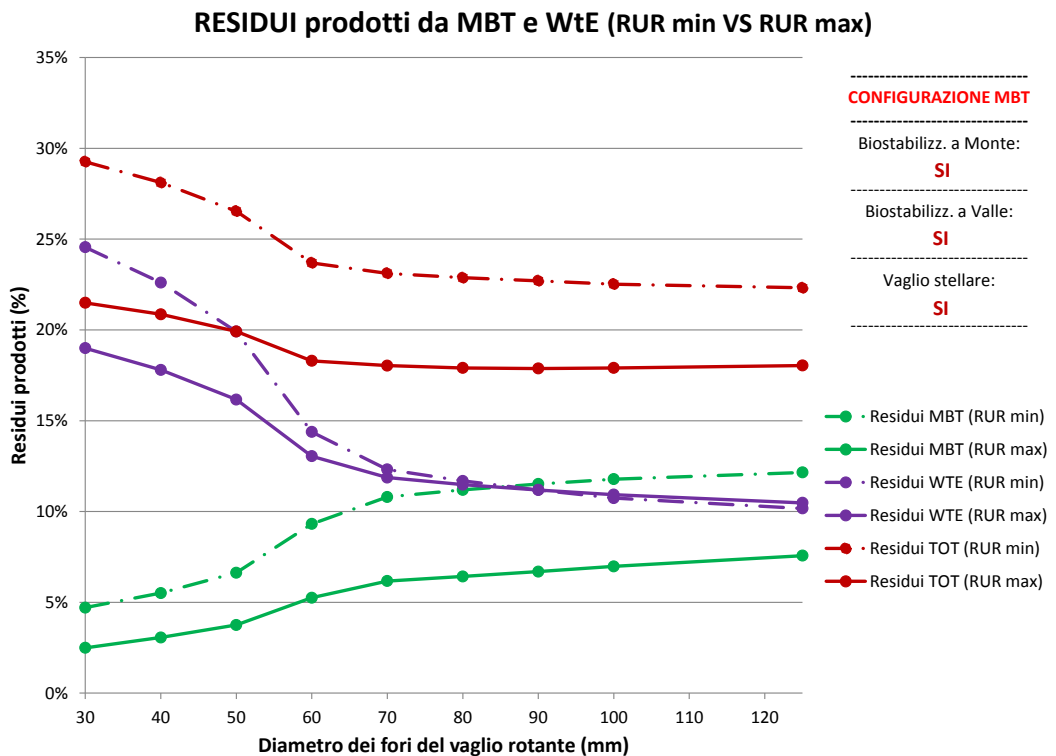


Figura 6.8: Produzione di residui in funzione del diametro dei fori del vaglio primario.

Nel caso (A) sono presenti tutte le fasi relative alle sei combinazioni. Si osserva che il vaglio primario influenza in modo diverso la produzione dei residui: nell'impianto MBT questi flussi aumentano all'aumentare del diametro dei fori, mentre nel WtE diminuiscono. Diametri piccoli implicano una maggiore quantità di materiale a recupero energetico (più residui al WtE), mentre diametri grandi implicano una quota più elevata di sottovaglio



(più residui al MBT).

$$D \uparrow \Rightarrow RESIDUI_{WtE} \downarrow \text{ e } RESIDUI_{MBT} \uparrow \quad (6.11)$$

Si osserva inoltre che l'impianto MBT produce sempre più residui nel caso di  $RUR_{min}$ , a causa del contenuto maggiore di inerti e organico (ved. fig. 6.8). Nel WtE invece questa regola non è sempre rispettata. Verso diametri elevati, infatti, alcuni materiali non sono più presenti nella composizione merceologica della FSC (come ad esempio organico, vetro e metalli). A parità di diametro, quindi, il sopravaglio del  $RUR_{min}$  e del  $RUR_{max}$  potrebbe contenere gli stessi materiali, come carta e plastica, caratterizzati dallo stesso contenuto percentuale di ceneri. Perciò il  $RUR_{max}$  produce più residui, poiché contiene più carta e plastica del  $RUR_{min}$ .

Infine, per quanto riguarda i residui totali, si osserva che sono sempre maggiori nel caso del  $RUR_{min}$ . Tale risultato dipende dalla composizione merceologica (MBT) e dalle proprietà chimico-fisiche dei materiali trattati (WtE).

## 6.2.2 Configurazione (B)

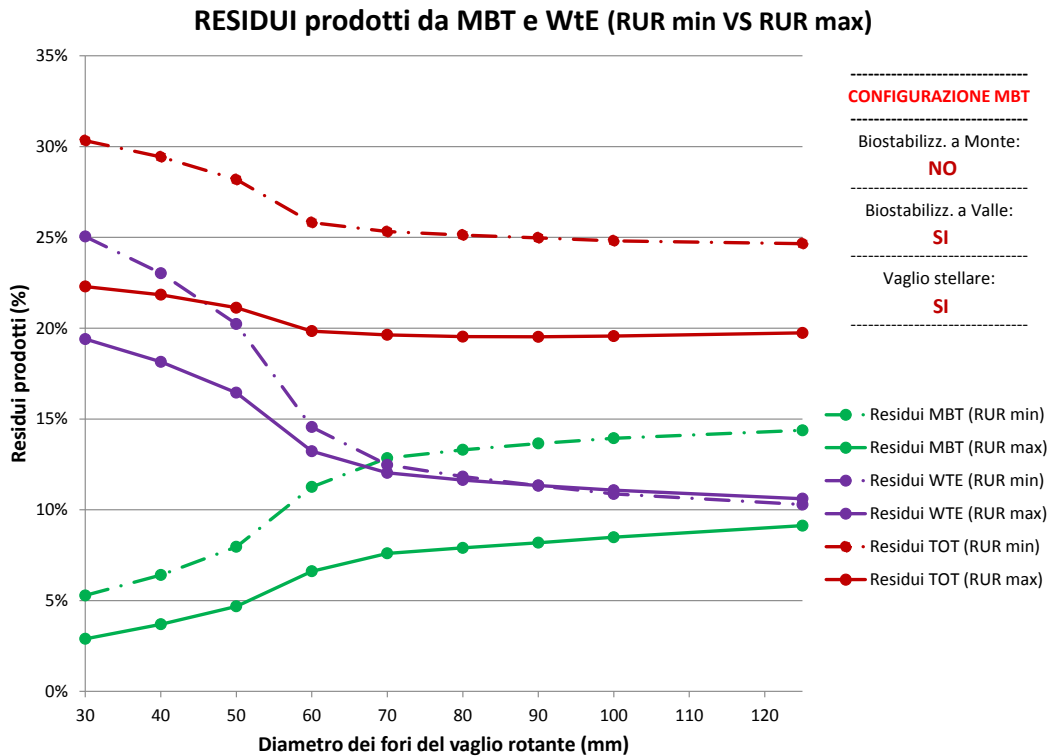


Figura 6.9: Produzione di residui in funzione del diametro dei fori del vaglio primario.

L'assenza della biostabilizzazione a monte implica una diminuzione delle perdite di processo. In questo modo i materiali trattati dall'impianto MBT subiscono una minore perdita in massa (umidità) e, di conseguenza, aumentano i residui contenuti nel sottovaglio. Questo effetto si ripercuote anche sui residui del WtE, ma in modo molto meno evidente (ved. fig. 6.9).

## 6.2.3 Configurazione (C)

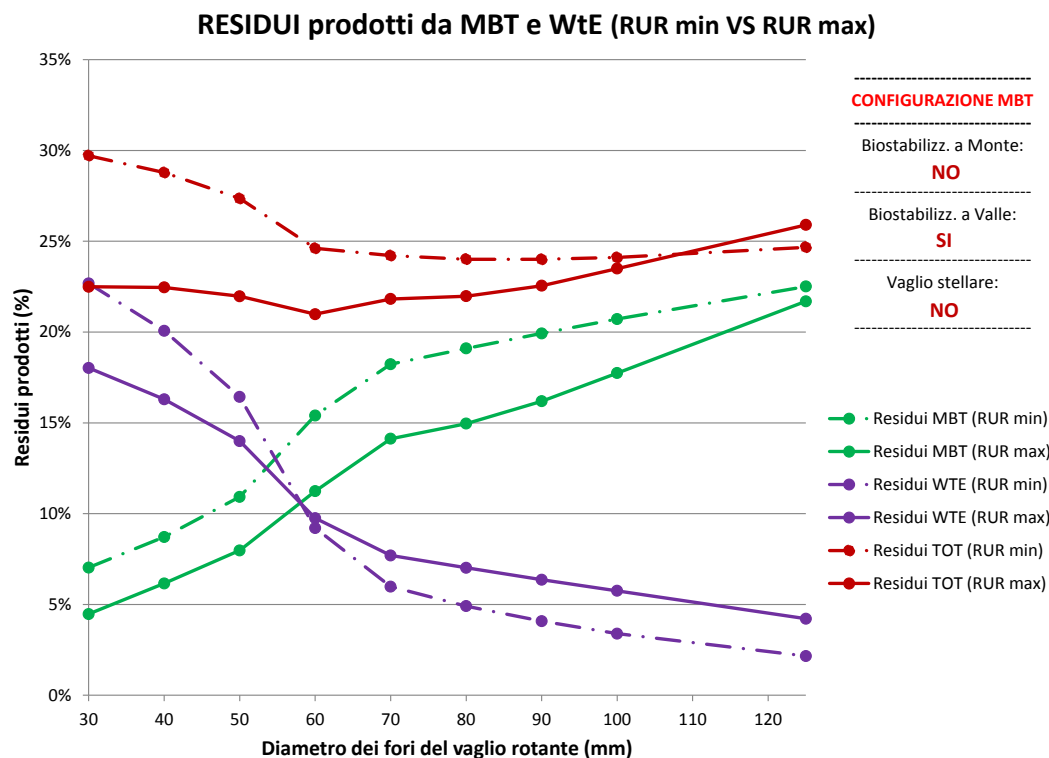


Figura 6.10: Produzione di residui in funzione del diametro dei fori del vaglio primario.

Come detto in precedenza, la quantità di  $FSC$  diminuisce all'aumentare del diametro dei fori del vaglio (ved. fig. 6.10). Questa riduzione sarebbe parzialmente compensata dal recupero di  $FSC_2$ , separata dal vaglio stellare; senza questa fase quindi la  $FSC$  diminuisce rapidamente all'aumentare del diametro. Questa modifica perciò ha l'effetto di amplificare gli andamenti visti nei grafici precedenti. In particolare si osserva che i residui del WtE nel caso di  $RUR_{max}$  superano quelli del caso  $RUR_{min}$  in anticipo (cioè per diametri minori) rispetto ai grafici precedenti; ciò dipende dalla rapida diminuzione del sopravvaglio, che non è compensata dall'aumento di  $FSC_2$ .

Per diametri elevati i residui globali del  $RUR_{max}$  risultano maggiori di quelli del  $RUR_{min}$ . Questo fenomeno è dovuto al fatto che le fasi di biostabilizzazione non sono in grado di ridurre in peso i materiali più leggeri come carta e soprattutto plastica.

In questa configurazione, soprattutto per il  $RUR_{max}$ , si evidenzia bene la presenza di un diametro ottimo ( $D = 60$  mm), tale da minimizzare la

produzione di residui totali. Peraltro, questo concetto di “residui minimi” in corrispondenza di uno o più diametri, risultava già intuibile anche nelle configurazioni precedenti.

### 6.2.4 Configurazione (D)

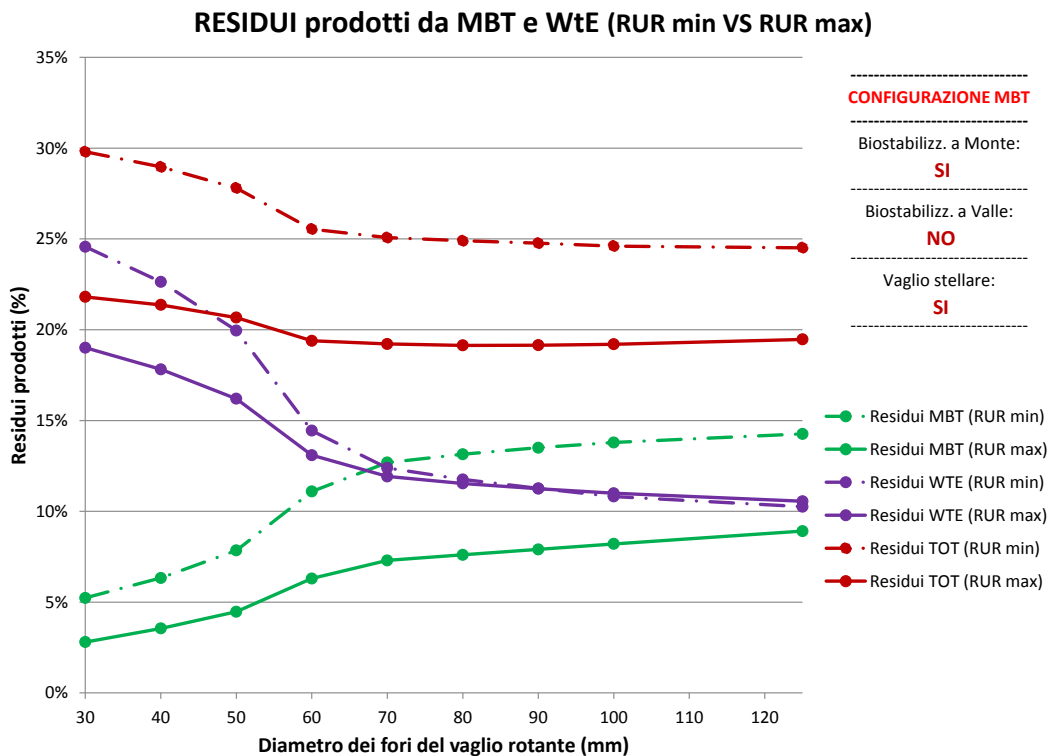


Figura 6.11: Produzione di residui in funzione del diametro dei fori del vaglio primario.

Confrontando gli andamenti di questo grafico con quelli della configurazione (B), si osserva una leggera diminuzione dei valori delle tre curve. Perciò il sostituire la biostabilizzazione a valle con quella a monte non influenza sensibilmente il risultato finale (ved. fig. 6.11).

## 6.2.5 Configurazione (E)

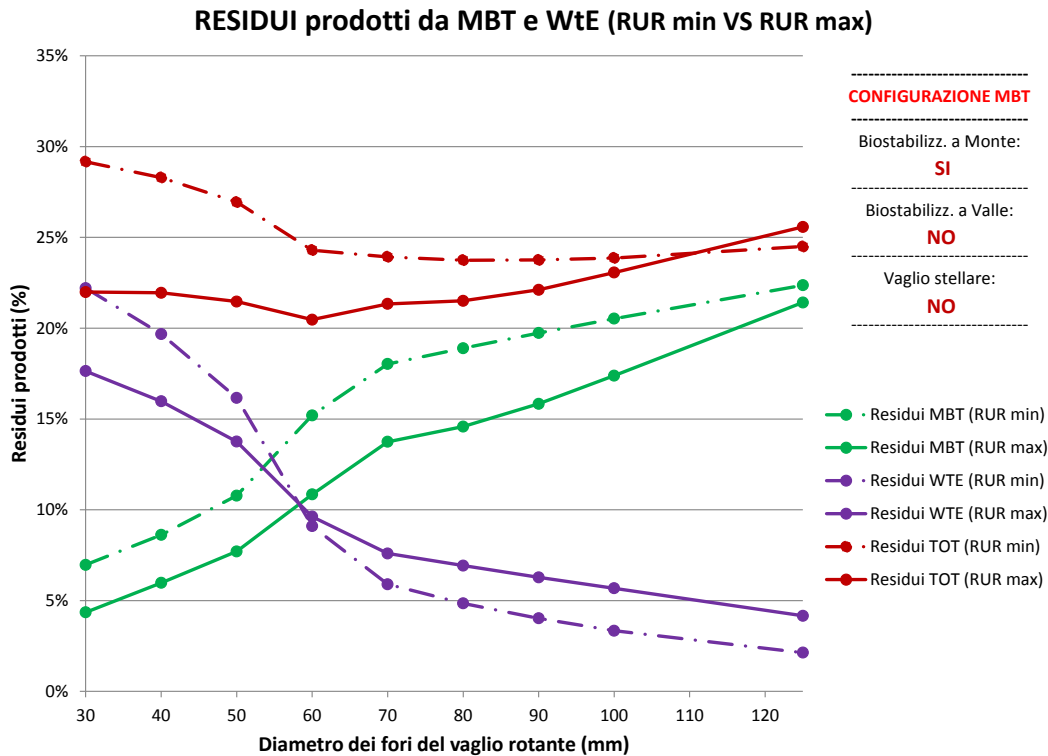


Figura 6.12: Produzione di residui in funzione del diametro dei fori del vaglio primario.

Confrontando gli andamenti di questo grafico con quelli della configurazione (C), si osserva una leggera diminuzione dei valori delle tre curve. Perciò il sostituire la biostabilizzazione a valle con quella a monte, in assenza di vaglio stellare, non influenza sensibilmente il risultato finale (ved. fig. 6.12).

## 6.2.6 Configurazione (F)

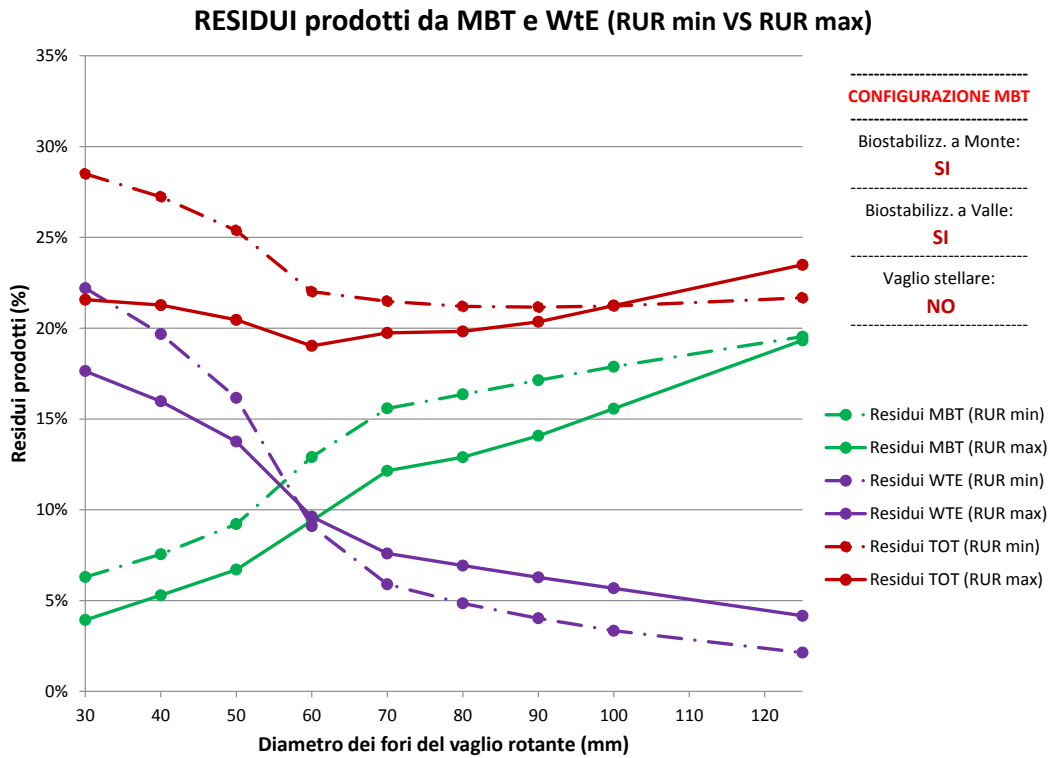


Figura 6.13: Produzione di residui in funzione del diametro dei fori del vaglio primario.

Rispetto al grafico precedente, l'aggiunta della biostabilizzazione a valle aumenta ulteriormente le perdite di processo. La  $FSC_2$  biostabilizzata non viene recuperata dal vaglio stellare, ma è in quantità minore, di conseguenza la produzione di residui al MBT diminuisce. In ultima analisi anche la produzione di residui totali diminuisce (ved. fig. 6.13).

## 6.3 Flussi in uscita dal MBT

Nel grafico “FLUSSI in USCITA” sono riportati gli andamenti dei *residui totali*, delle *perdite di processo* e dei *materiali recuperati*, cioè i metalli (ferrosi e non ferrosi) e il Rifiuto Biostabilizzato Maturo raffinato (RBM).

### 6.3.1 Configurazione (A)

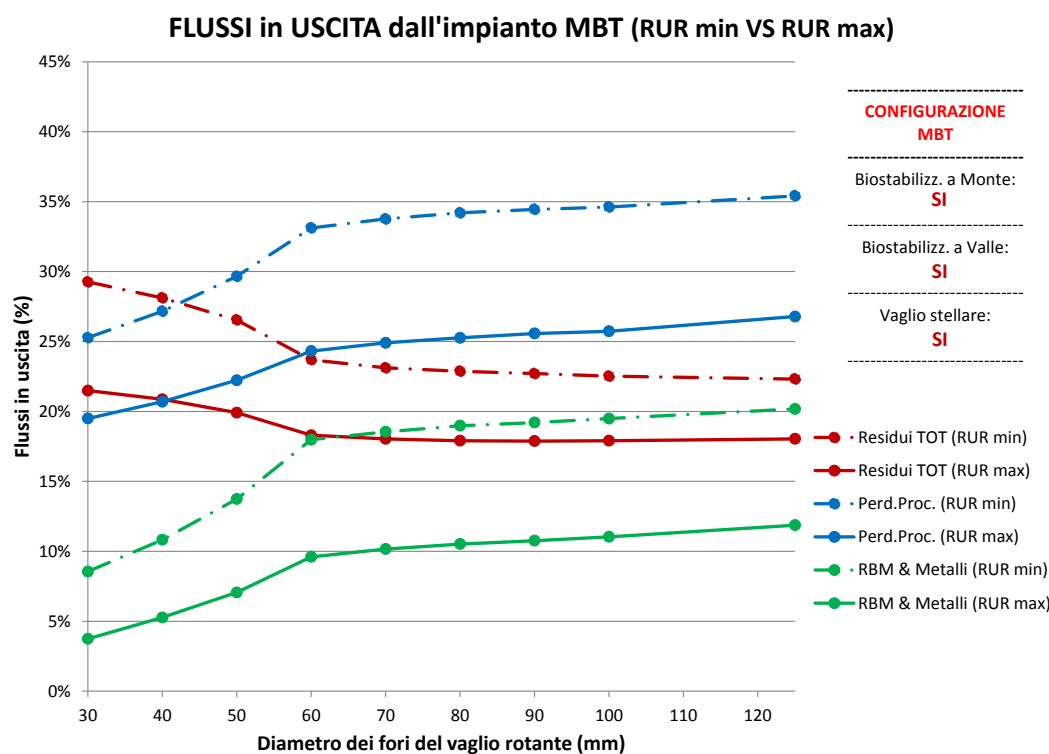


Figura 6.14: Flussi di materia in uscita in funzione del diametro dei fori del vaglio primario.

Nel caso (A) sono presenti tutte le fasi relative alle sei combinazioni (ved. fig. 6.14). Sia le perdite di processo che i materiali recuperati aumentano all’aumentare del diametro del vaglio primario. I processi di biostabilizzazione e di recupero presenti a valle, infatti, trattano una portata di sottovaglio maggiore e, di conseguenza, aumentano entrambi i flussi in uscita.

Nel caso di  $RUR_{min}$  le perdite di processo e i materiali recuperati sono sempre maggiori rispetto al  $RUR_{max}$ . Questo risultato dipende principalmente dalla maggiore quantità di organico, che è ricco di umidità ed è il componente principale del rifiuto biostabilizzato maturo. Inoltre, il contenuto più elevato di metalli incrementa ulteriormente la quota di flussi recuperati.

### 6.3.2 Configurazione (B)

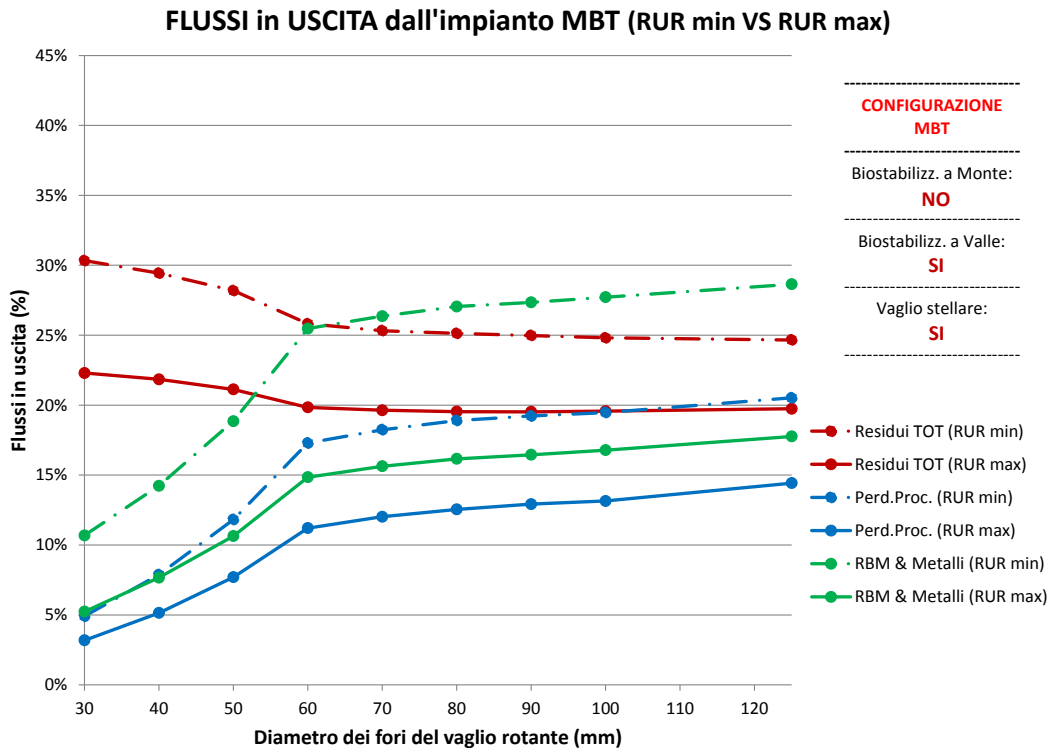


Figura 6.15: Flussi di materia in uscita in funzione del diametro dei fori del vaglio primario.

L'assenza della biostabilizzazione a monte implica una diminuzione delle perdite di processo. I materiali recuperati invece aumentano; in particolare grazie alla portata di RBM, composto prevalentemente da materiale organico e quindi in quantità maggiore rispetto al caso precedente (ved. fig. 6.15).



## 6.3.3 Configurazione (C)

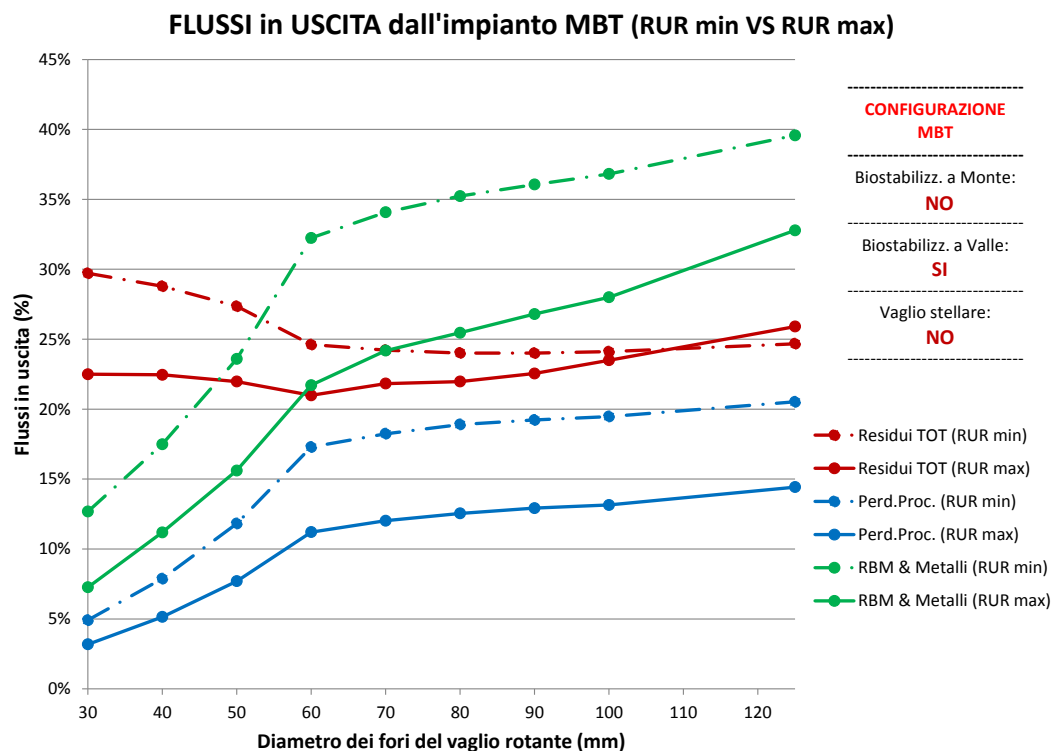


Figura 6.16: Flussi di materia in uscita in funzione del diametro dei fori del vaglio primario.

Come detto in precedenza, il vaglio stellare ridurrebbe la quantità del flusso di biostabilizzato ricavato dal sottovaglio primario, recuperando frazione secca ( $FSC_2$ ). Senza questa fase i materiali recuperati a valle dell'impianto MBT aumentano rapidamente. Le perdite di processo invece non cambiano, perché la biostabilizzazione è posta a monte del vaglio stellare e, di conseguenza, non è influenzata da questa modifica.

Sarebbe peraltro da testare la "qualità" dei materiali recuperati, in quanto l'eliminazione del vaglio stellare (e della successiva tavola densimetrica) potrebbe non garantire le caratteristiche finali del prodotto (RBM) per gli scopi prefissati (ved. fig. 6.16).

### 6.3.4 Configurazione (D)

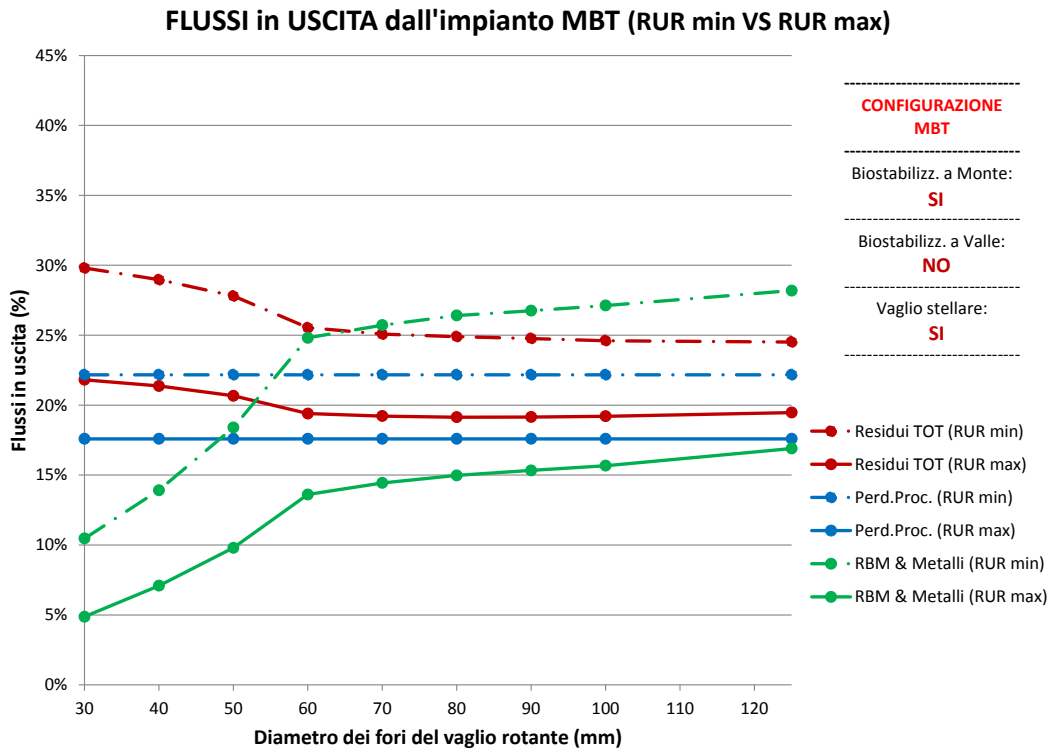


Figura 6.17: Flussi di materia in uscita in funzione del diametro dei fori del vaglio primario.

La biostabilizzazione a monte, al contrario di quella a valle, è indipendente dal vaglio primario. Le perdite di processo quindi non sono influenzate dal diametro del vaglio e, di conseguenza, restano costanti. Rispetto alla configurazione (B) si osserva una leggera diminuzione dei materiali recuperati; perciò il sostituire la biostabilizzazione a valle con quella a monte non influenza sensibilmente il risultato finale (ved. fig. 6.17).

## 6.3.5 Configurazione (E)

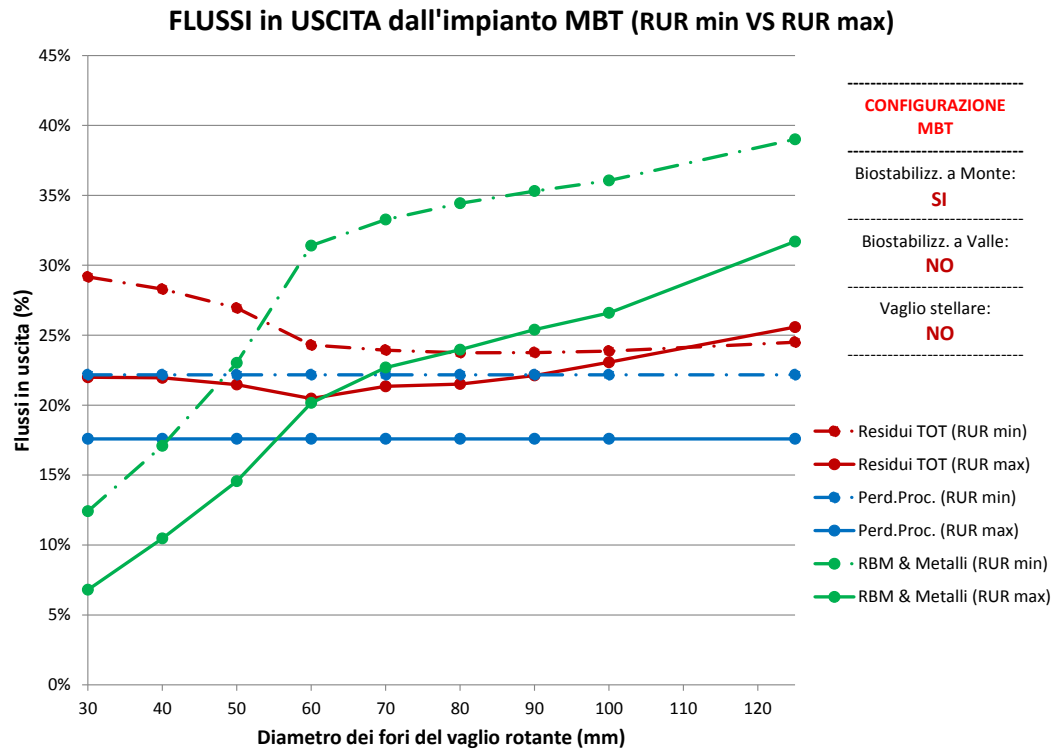


Figura 6.18: Flussi di materia in uscita in funzione del diametro dei fori del vaglio primario.

Rispetto alla precedente configurazione, l'assenza del vaglio stellare (come nel caso (C)) fa aumentare rapidamente la quota di materiali recuperati a valle dell'impianto MBT (ved. fig. 6.18). Le perdite di processo invece non cambiano, perché la biostabilizzazione non è influenzata da questa modifica.

Inoltre, come nel caso (C), sarebbe opportuno testare la "qualità" dei materiali recuperati, in quanto l'eliminazione del vaglio stellare (e della successiva tavola densimetrica) potrebbe non garantire le caratteristiche finali del prodotto (RBM) per gli scopi prefissati.

### 6.3.6 Configurazione (F)

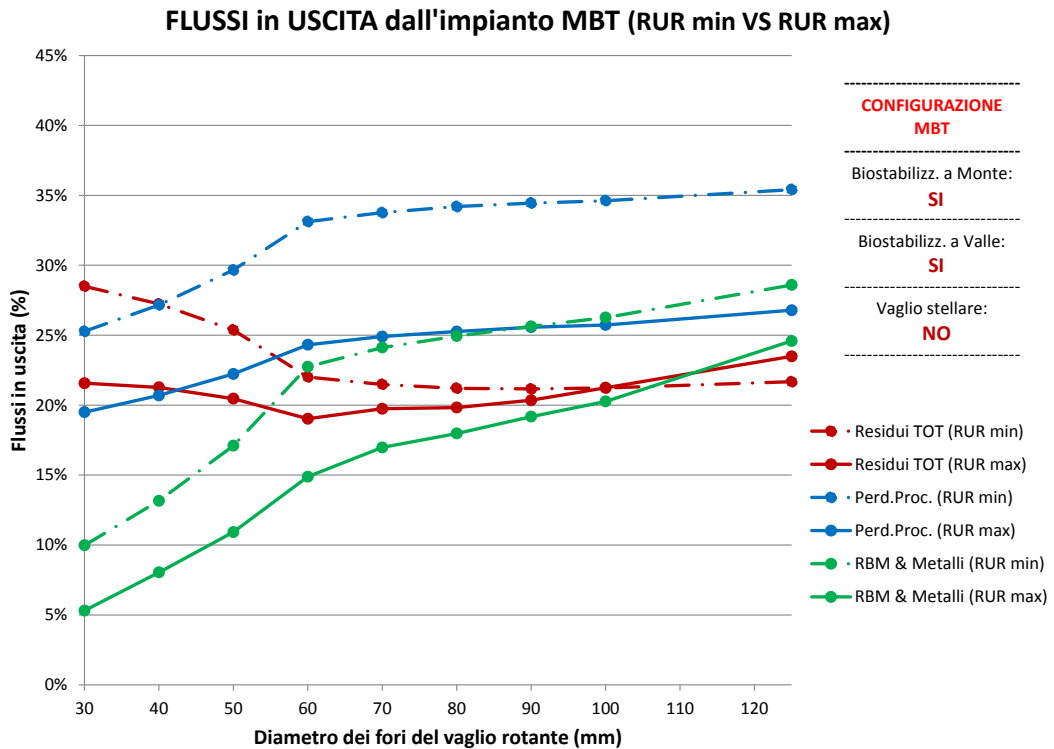


Figura 6.19: Flussi di materia in uscita in funzione del diametro dei fori del vaglio primario.

Rispetto al caso (A), si osserva un flusso maggiore di materiali recuperati a valle dell'impianto MBT, dovuto all'assenza della  $FSC_2$  (ved. fig. 6.19). Le perdite di processo invece non cambiano, perché entrambi i processi di biostabilizzazione sono posti a monte del vaglio stellare e non sono influenzati da questa modifica.

Valgono inoltre le stesse considerazioni sul tema della "qualità" dei materiali recuperati descritte per i casi (C) ed (E).

## 6.4 Recupero di energia termica e produzione di energia elettrica

In questo grafico sono riportati gli andamenti dei seguenti parametri:

- $\eta_{th}$  o  $ET$ , presente nei grafici del paragrafo 6.1, rappresenta l'energia termica disponibile a valle del MBT (l'input termico del WtE) rispetto all'energia posseduta dal RUR in ingresso al MBT;
- $EE_{el,lorda}$  e  $EE_{el,netta}$  indicano la quantità di energia elettrica lorda e netta prodotta, ottenute moltiplicando  $ET$  per il rendimento elettrico (lordo -  $\eta_{el,lordo}$  e netto -  $\eta_{el,netto}$ ) del WtE, ossia:

$$EE_{el,lorda} = \eta_{el,lordo}(taglia) \cdot \eta_{th} = \eta_{el,lordo}(taglia) \cdot ET \quad (6.12)$$

$$EE_{el,netta} = \eta_{el,netto}(taglia) \cdot \eta_{th} = \eta_{el,netto}(taglia) \cdot ET \quad (6.13)$$

I rendimenti  $\eta_{el,lordo}$  e  $\eta_{el,netto}$  dipendono dalla taglia dell'impianto WtE, che a sua volta è influenzata dall'input termico e quindi da  $ET$  moltiplicato per la massa di RUR e per il corrispettivo potere calorifico:

$$Q_{in} = ET \cdot m_{RUR} \cdot PCI_{RUR} \quad (6.14)$$

ovvero dalla massa di FSC moltiplicata per il suo potere calorifico:

$$Q_{in} = m_{FSC} \cdot PCI_{FSC} \quad (6.15)$$

Non è dunque possibile generalizzare i valori dell'energia elettrica prodotta (vedi fig. 5.7). Gli andamenti di questi due parametri si possono comunque stimare scegliendo un contesto "standard" di riferimento (ad esempio 600 000 t/anno di RUR all'ingresso del MBT).

### 6.4.1 Configurazione (A)

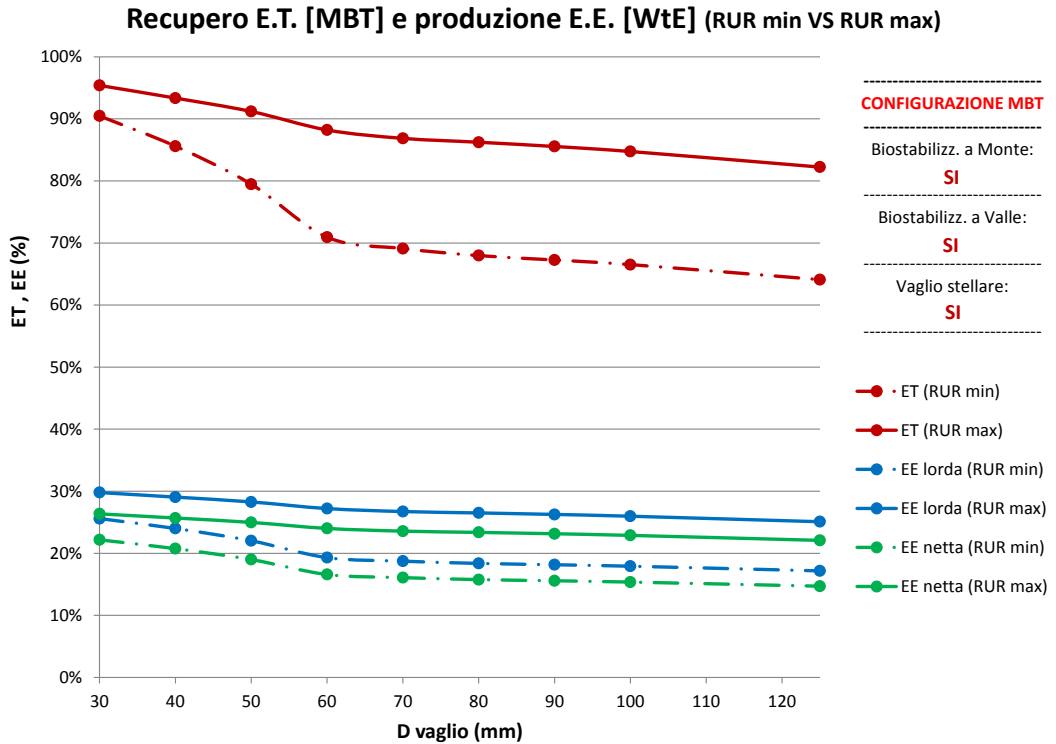


Figura 6.20: Energia termica ed energia elettrica in funzione del diametro dei fori del vaglio primario.

Nel caso (A) sono presenti tutte le fasi relative alle sei combinazioni (ved. fig. 6.20). Tutti i parametri diminuiscono all'aumentare del diametro dei fori del vaglio primario, a causa della minor portata di FSC prodotta. Come detto in precedenza il parametro  $\eta_{th}$ , e quindi  $ET$ , è più sensibile alle variazioni di portata ( $\eta_m$ ) piuttosto che alle variazioni del PCI; di conseguenza i valori di tutte e tre le grandezze diminuiscono.

$ET$  e  $EE$  del  $RUR_{max}$  sono sempre maggiori di quelle del  $RUR_{min}$ , a causa della maggior quantità di FSC prodotta.

## 6.4.2 Configurazione (B)

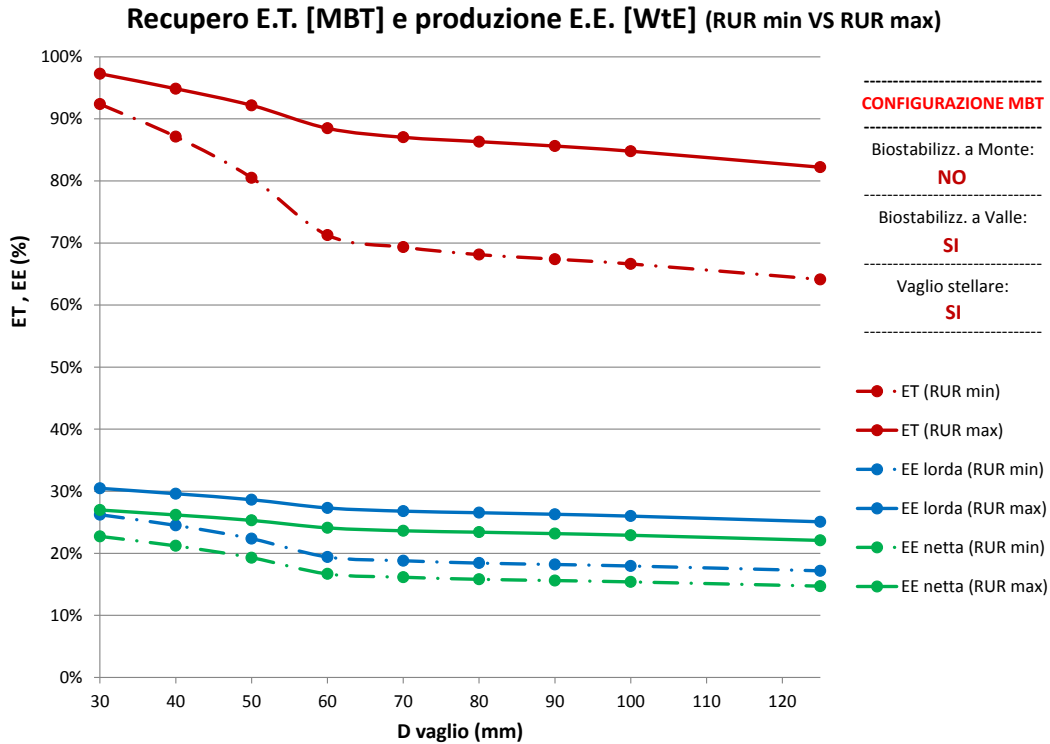


Figura 6.21: Energia termica ed energia elettrica in funzione del diametro dei fori del vaglio primario.

L'assenza della biostabilizzazione a monte incrementa leggermente i valori di tutte le curve, in particolare per i diametri compresi tra 30 e 60 mm. Le minori perdite di processo, infatti, aumentano la massa della FSC e di conseguenza l'energia finale (ved. fig. 6.21).

### 6.4.3 Configurazione (C)

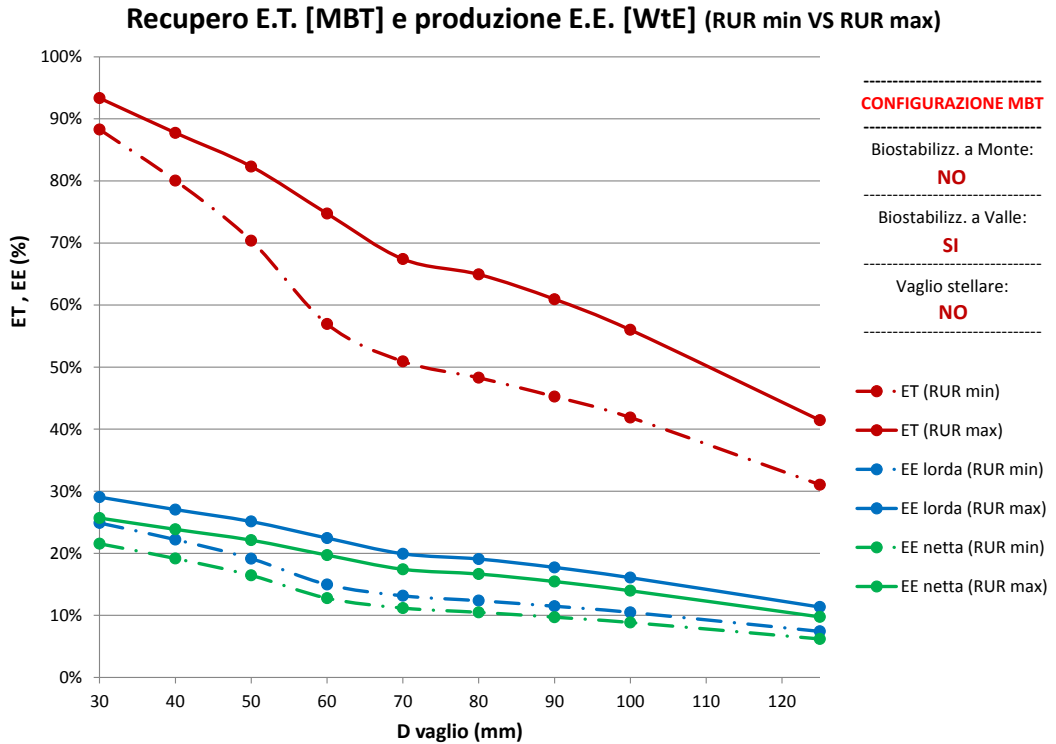


Figura 6.22: Energia termica ed energia elettrica in funzione del diametro dei fori del vaglio primario.

Il mancato recupero della  $FSC_2$  diminuisce molto la quantità di FSC ricevuta dal WtE. L'assenza del vaglio stellare quindi amplifica gli andamenti di tutte e tre le curve che diminuiscono rapidamente (ved. fig. 6.22).



## 6.4.4 Configurazione (D)

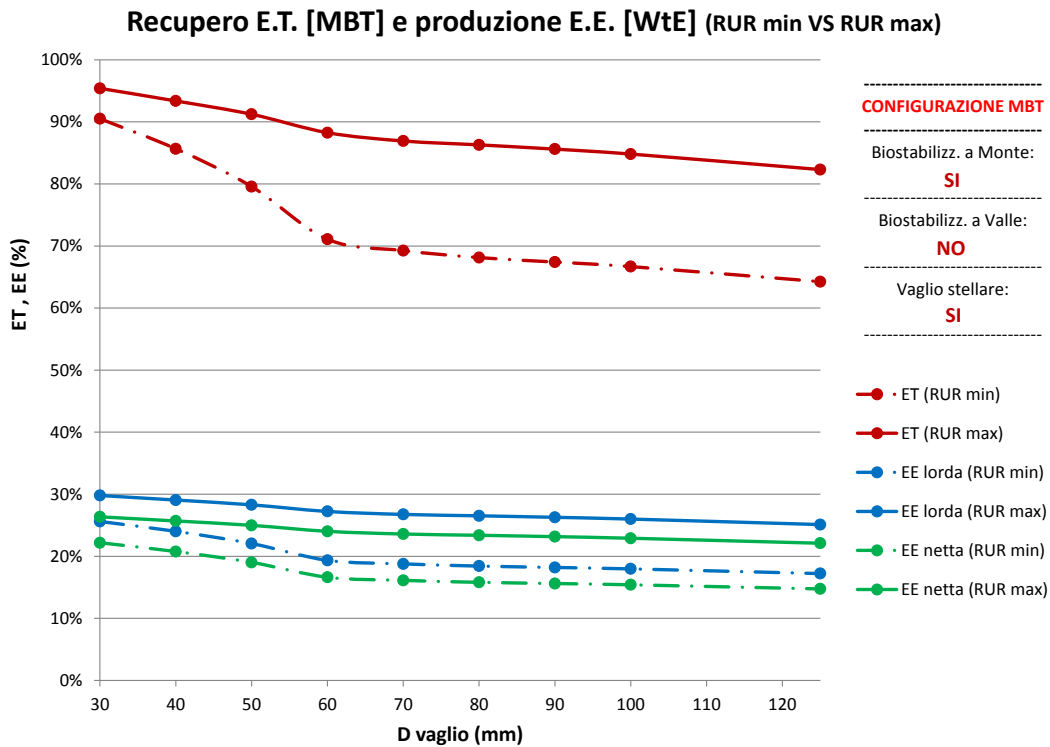


Figura 6.23: Energia termica ed energia elettrica in funzione del diametro dei fori del vaglio primario.

Rispetto alla configurazione (B), si osserva una leggera diminuzione dei valori delle tre curve; perciò il sostituire la biostabilizzazione a valle con quella a monte non influenza sensibilmente il risultato finale (ved. fig. 6.23).

### 6.4.5 Configurazione (E)

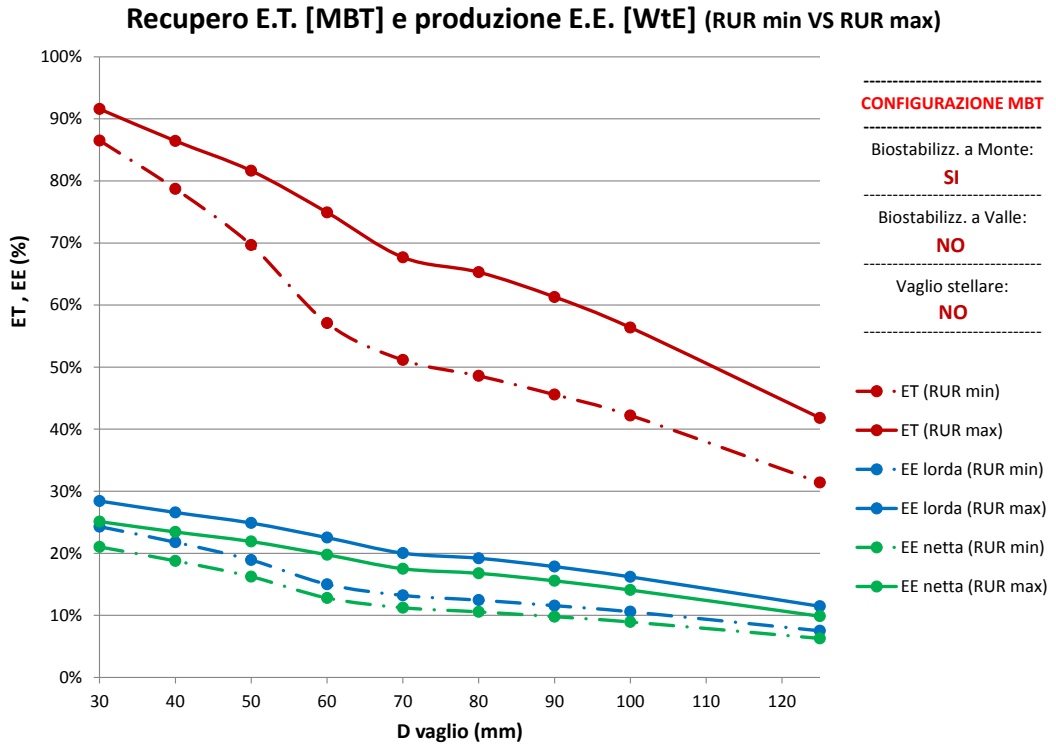


Figura 6.24: Energia termica ed energia elettrica in funzione del diametro dei fori del vaglio primario.

Rispetto alla configurazione (C), si osserva un leggerissimo aumento dei valori delle tre curve; perciò il sostituire la biostabilizzazione a valle con quella a monte, in assenza di vaglio stellare, non influenza sensibilmente il risultato finale (ved. fig. 6.24).

## 6.4.6 Configurazione (F)

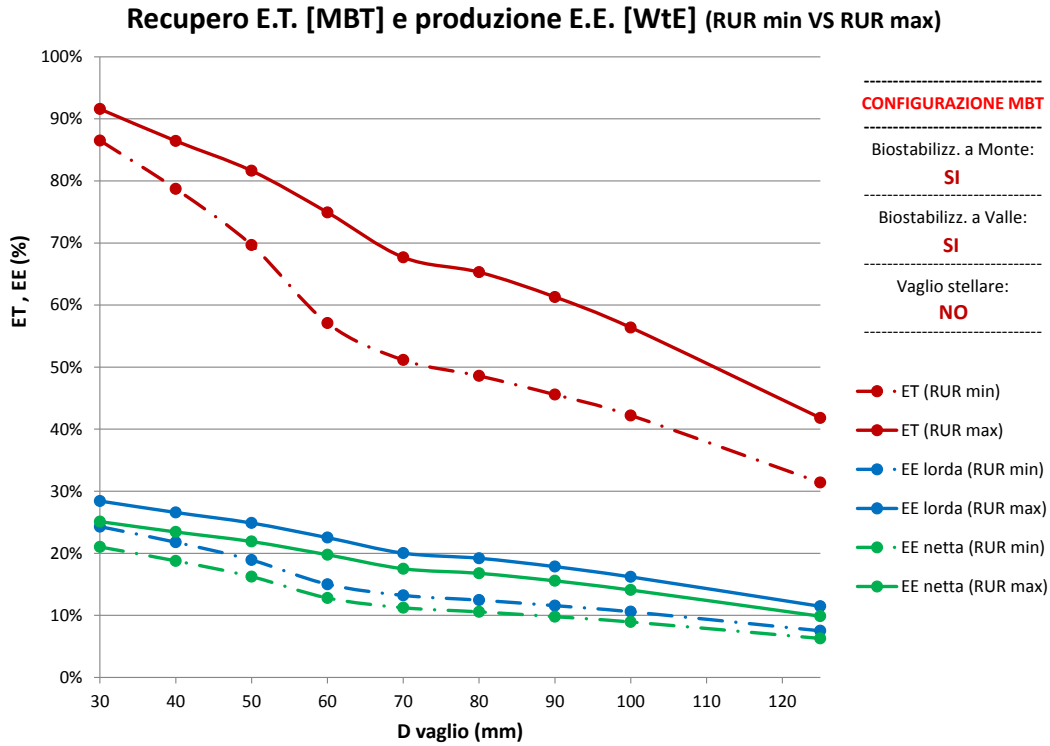


Figura 6.25: Energia termica ed energia elettrica in funzione del diametro dei fori del vaglio primario.

Rispetto alla configurazione precedente l'aggiunta della biostabilizzazione a valle non modifica l'andamento delle curve. La  $FSC_2$  biostabilizzata, infatti, non viene recuperata dal vaglio stellare e di conseguenza l'energia recuperabile non cambia (6.25).

## 6.5 Considerazioni finali

L'analisi tecnica descritta nei paragrafi precedenti rappresenta un passo fondamentale e propedeutico per lo studio di fattibilità di un sistema integrato MBT + WtE. Il grafico “prestazioni”, in particolare, permette di definire il Diagramma di Combustione (su cui si basa il progetto di tutto l'impianto WtE) più idoneo a fronteggiare le oscillazioni di composizione dei RUR in un determinato contesto. Il grafico “residui” invece, consente di individuare la strategia più “ambientalmente sostenibile”, cioè quella che garantisce la minimizzazione dei residui finali da smaltire in discarica.

Inoltre, da un punto di vista più generale, sulla base di tutti gli output ricavati, si può notare che non esiste una configurazione ottimale in senso assoluto; ogni soluzione impiantistica deve infatti essere considerata in funzione della tipologia dei RUR. Si può però sostanzialmente affermare, in termini prestazionali, che:

1. nel caso di rifiuti molto umidi e con alto tenore di organico ( $RUR_{min}$ ) sono preferibili soluzioni che contemplano la biostabilizzazione a monte;
2. nel caso di rifiuti piuttosto secchi ed “energetici” sono più convenienti configurazioni “ridotte” e che prevedono la sola presenza di una biostabilizzazione a valle.

Dato il discreto tasso di Raccolta Differenziata (RD) dell'organico riscontrabile nel contesto italiano (seppur non ancora del tutto in linea con le direttive europee), si è quindi ipotizzato di sviluppare la successiva analisi economica solo per il caso (B) (ved. capitolo 7). Si sottolinea comunque che tale configurazione, “a doppio flusso” e con biostabilizzazione a valle, ben si adatta anche alle situazioni di scarsa applicazione della RD.

# Capitolo 7

## Risultati economico-finanziari

Come detto in precedenza, lo studio di fattibilità e la successiva realizzazione di impianti di recupero e smaltimento dei rifiuti si basa su un'approfondita **analisi del contesto** nel quale si vuole intervenire. Il presente elaborato focalizza l'attenzione sul sistema integrato MBT + WtE per il trattamento dei RUR, senza considerare quindi tutti i processi di raccolta differenziata e riciclaggio presenti a monte (ved. fig. 7.1).

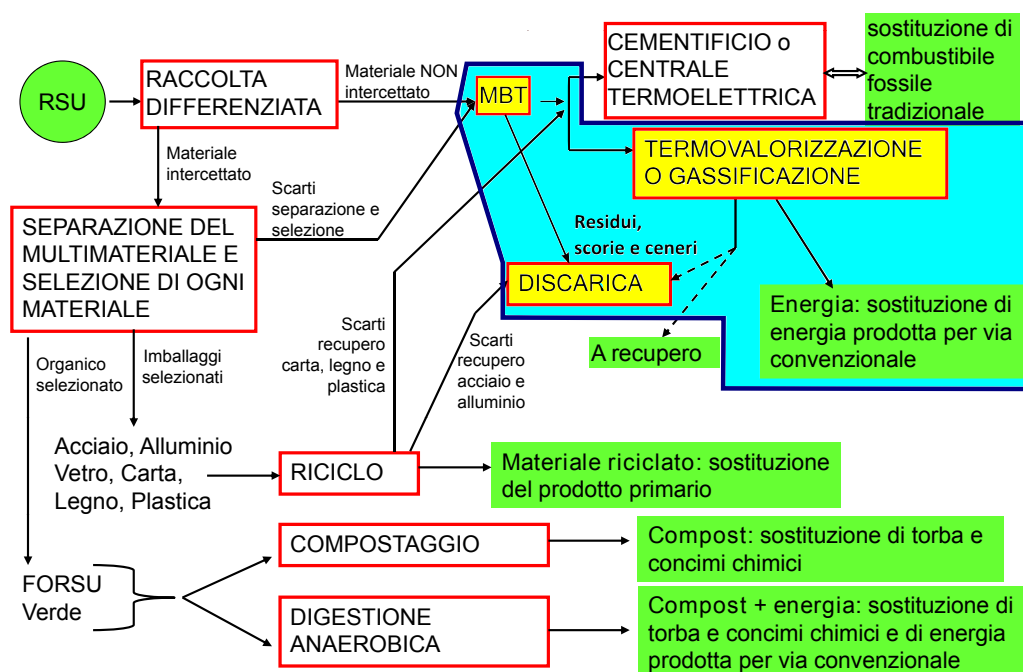


Figura 7.1: Recupero e smaltimento dei rifiuti: area di interesse [12].

Dalla composizione e qualità dei RUR è comunque possibile ottenere una serie di informazioni utili per capire come intervenire in un determinato contesto. Una quantità elevata di organico, vetro e metalli, ad esempio, evidenzia una scarsa organizzazione della raccolta differenziata, e di conseguenza, la necessità di un pre-trattamento del rifiuto prima di un eventuale recupero di energia. Inoltre la qualità dei rifiuti può essere un indice dello sviluppo economico di un Paese, un fattore determinante per valutare se sono disponibili sufficienti risorse da investire nella realizzazione di certi tipi di impianti. Una quantità notevole di carta e plastica spesso riflette gli alti livelli di consumo di una società caratterizzata da un elevato benessere economico.

Nel presente capitolo, a completamento dell'analisi tecnica effettuata nel cap. 6, si ripercorrono dal punto di vista economico-finanziario le medesime tecnologie, applicate a realtà diverse e quindi a vari tipi di RUR, con l'obiettivo di fornire un quadro generale delle possibili soluzioni.

Come descritto nel capitolo 5, si è scelto di collocarsi su taglie di riferimento più frequenti e consolidate, considerando quindi un'unica tipologia di impianto compatibile con tutti gli scenari individuati. Infatti **sia l'impianto MBT che il WtE sono organizzati su due linee**, le cui dimensioni variano in funzione dei bacini scelti e in relazione alla tipologia di rifiuto. Questa scelta non risulta sempre vantaggiosa in quanto alcuni costi, in particolare per le piccole taglie, potrebbero risultare sovrastimati. Ad esempio, il considerare un'unica linea per le taglie inferiori, ossia per l'impianto MBT nel range 150 000 ÷ 300 000 e per il WtE tra 100 000 e 200 000 t/a, consentirebbe di ridurre i costi e di ottimizzare gli output economici in tali campi (tariffa di conferimento minore, ecc...).

L'obiettivo di questa analisi, però, non quello di stimare con precisione le tariffe finali di conferimento, bensì quello di valutare l'andamento degli indici finanziari in funzione di vari input (tecnici ed economici); si tratta in altri termini, di effettuare *un'analisi di sensitività* e non di definire rigorosamente ed univocamente gli output economico-finanziari in gioco.

Le configurazioni impiantistiche scelte sono le seguenti:

(I) MBT<sup>1</sup> + WTE + (LND);

(II) WTE + (LND);

(III) MBT + (LND);

---

<sup>1</sup>Si è considerata solo la tipologia a "flusso separato" (configurazione (B)) in quanto rappresenta una soluzione che ben si adatta ai vari contesti, sia quelli ove la RD non è particolarmente spinta o del tutto assente, sia quelli caratterizzati da un tasso di RD, in particolare dell'organico, già sufficientemente elevato.

La discarica (in inglese Landfill - LND) è stata segnata tra parentesi per valutare, a livello economico e finanziario, quali siano le differenze tra il caso in cui si decida di conferire a terzi i residui di MBT e WTE (al costo fissato di 125 €/t) e quello in cui si preferisca allestire una propria discarica di servizio “dedicata”.

I risultati dell’analisi di sensitività, relativi alle configurazione scelte, sono riportati nei seguenti grafici:

- (a) **IRR lordo VS D. fori vaglio primario**, valuta l’andamento dell’Internal Rate of Return (IRR) dell’investimento, per tre tipi di RUR ( $RUR_{min}$ ,  $RUR_{med}$  e  $RUR_{max}$ ) in funzione del diametro dei fori del vaglio primario (D). In questo grafico sono mantenuti costanti i seguenti parametri: la quantità dei rifiuti annuali trattati (600 000 t/a), la tariffa di conferimento (125 €/t) e la tariffa dell’energia elettrica (100 €/MWh).
- (b) **Tariffa di conferimento VS Quantità di RUR**, valuta la tariffa di conferimento per il  $RUR_{min}$  e il  $RUR_{max}$  in funzione della quantità di rifiuti annuali trattati (bacino di conferimento). A seconda della configurazione presa in esame, questo grafico considera tre diametri dei fori (rispettivamente 30, 60 e 90 mm) oppure tre tariffe dell’energia elettrica (rispettivamente 80, 100 e 120 €/MWh). Nel primo caso i parametri, mantenuti costanti, sono l’IRR (12%) e la tariffa dell’energia elettrica (100 €/MWh); nel secondo sono l’IRR (12%) e il diametro dei fori (60 mm).

Relativamente ad alcuni dati presenti nelle ipotesi, occorre fare alcune precisazioni importanti:

1. Il bacino di 600 000 t/a è stato scelto come riferimento, perché indica la massima quantità di rifiuti che, generalmente, può essere trattata da un impianto MBT organizzato su due linee. Tale valore inoltre rappresenta una tipica configurazione di un sistema integrato di grossa taglia, idoneo a soddisfare le esigenze di aree metropolitane (contesti che prevedono anche oltre 1 000 000 di abitanti).
2. La tariffa media di conferimento, fissata pari a 125 €/t, tiene conto dei valori applicabili agli impianti di grossa taglia presenti sul mercato, in relazione agli incentivi elettrici di cui gli stessi usufruivano in passato (CIP 6 o certificati verdi); riparametrando detti valori delle tariffe di conferimento sulla base dell’attuale criterio di incentivazione (DM 07/2012 ossia 100 €/MWh) si ottengono valori almeno pari a quanto

considerato (ad esempio la tariffa prevista per il WtE di Salerno, prossima a 90 €/t in presenza di CIP 6, subirebbe un incremento medio di circa 50÷60 €/t con le attuali incentivazioni elettriche).

Va peraltro precisato che la tariffa di 125 €/t rappresenta solo un valore di riferimento, atto a sviluppare un caso base; successivamente, al variare della capacità in ingresso, vengono infatti calcolate le reali tariffe riportate negli scenari in funzione di un IRR pari al 12%.

3. Il prezzo dell'energia elettrica, fissato pari a 100 €/MWh, è stato calcolato in riferimento a quanto previsto nel Dm 6 luglio 2012. Le tariffe incentivanti di riferimento, pari a 125 €/MWh, sono applicate alla sola frazione biodegradabile del rifiuto (ossia alla produzione imputabile a fonti rinnovabili) che, in base a una valutazione forfettaria, rappresenta il 51% del totale. Il prezzo finale perciò si ottiene come media pesata tra il prezzo zonale (stimato pari a circa 75 €/MWh) e quello della tariffa incentivante:

$$\begin{aligned} \text{Tariffa elettrica WtE} &= 51\% \cdot 125 \text{ €/MWh} + 49\% \cdot 75 \text{ €/MWh} \\ &= 100,5 \text{ €/MWh} \approx 100 \text{ €/MWh} \end{aligned} \quad (7.1)$$

4. il costo medio di smaltimento dei residui (scarti del MBT, scorie di combustione e prodotti finali della depurazione fumi), fissato a 125 €/t, tiene conto di due fattori: un valore "conservativo" di deposito pari a circa 100 ÷ 110 €/t e un costo di trasporto compreso tra 15 e 25 €/t [8].

I bacini di riferimento considerati nel grafico (a) sono compresi tra 150 000 e 600 000 t/a per le configurazioni MBT + WtE + (LND) e MBT + (LND), mentre per WTE + (LND) variano tra 100 000 a 400 000 t/a. L'ultimo intervallo, in particolare, contempla le stesse dimensioni dei WtE ottenute nella configurazione (I) in funzione della quantità di combustibile prodotto, ma considerando direttamente il RUR in ingresso al posto della FSC.



## 7.1 Configurazione (I): MBT + WtE + (LND)

### 7.1.1 MBT + WtE

Nel grafico di figura 7.2 si osserva che, per tutti e tre i tipi di RUR, l'IRR diminuisce all'aumentare del diametro. Fori più grandi infatti determinano una maggiore quantità di sottovaglio che, per essere trattata, necessita di macchinari ed edifici sempre più grandi: la conseguenza è un aumento dell'investimento e dei costi operativi dell'impianto MBT. Inoltre tale andamento è sostenuto anche da una diminuzione dei ricavi da energia elettrica, dovuti a una minore portata di frazione combustibile.

$$MBT + WtE : D \uparrow \Rightarrow IRR \downarrow \quad (7.2)$$

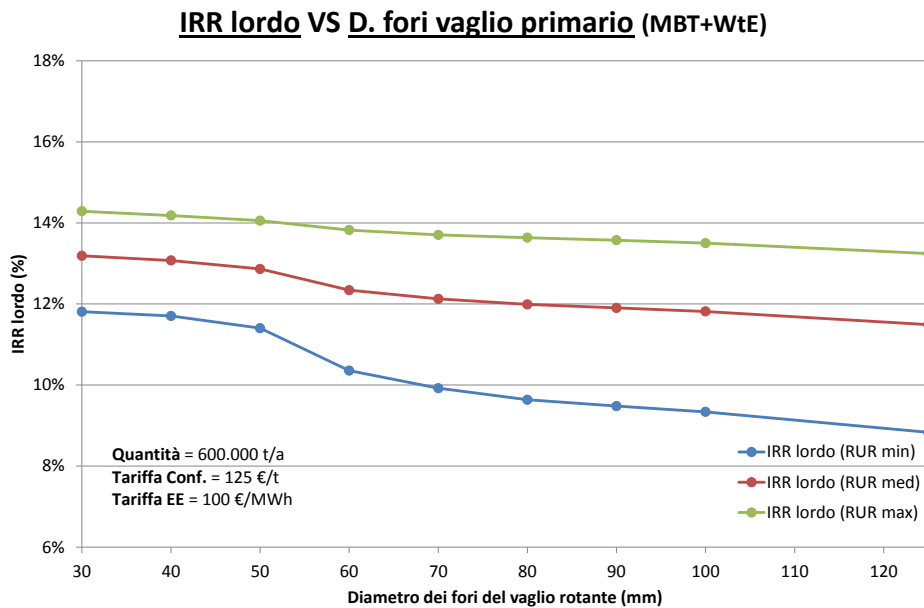


Figura 7.2

In riferimento a questo specifico contesto, il  $RUR_{min}$  rappresenta il caso peggiore e il più sensibile alle variazioni del diametro dei fori. L'elevato contenuto di sottovaglio di questo rifiuto, infatti, amplifica gli effetti descritti. In generale si può affermare che per un rifiuto di scarsa qualità, in termini di PCI, sono necessari maggiori trattamenti, realizzabili in impianti MBT più grandi e quindi più costosi. È importante sottolineare che nel caso di  $RUR_{max}$  gli impianti WtE sono più grandi perché, a parità di diametro, viene prodotta una maggiore potenza termica. In base ai risultati ottenuti si

osserva dunque che l'aumento della taglia del WtE, nel caso di  $RUR_{max}$ , incide in modo positivo sull'andamento dell'EBITDA e, di conseguenza, sulla redditività dell'investimento. Pertanto la qualità del RUR risulta un parametro importante, da considerare con attenzione nelle scelte progettuali e di investimento; infatti:

$$\text{a parità di } D, \text{ se } PCI_{RUR} \uparrow \Rightarrow \begin{cases} \text{Costi MBT} \downarrow \\ \text{Costi/Ricavi WtE} \uparrow \end{cases} \Rightarrow IRR \uparrow \quad (7.3)$$

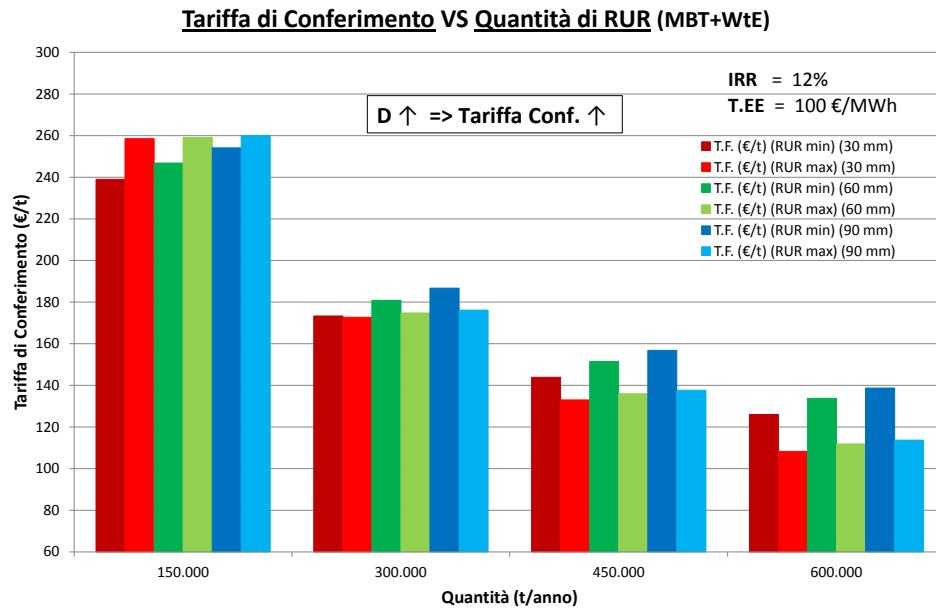


Figura 7.3

Nel grafico di figura 7.3 si osserva che la tariffa di conferimento diminuisce all'aumentare della quantità di rifiuti. Grazie alle economie di scala, infatti, risulta possibile diminuire il costo specifico degli impianti e quindi ottenere lo stesso IRR con tariffe più basse. Tale tendenza conferma che la realizzazione di un impianto grande, nel settore energetico/ambientale, è più conveniente sia per il costruttore/gestore sia per la collettività.

Per ogni tipologia di rifiuto (in particolare per il  $RUR_{min}$ ), si evidenzia inoltre un incremento della tariffa di conferimento per diametri maggiori. Questo trend è dovuto a un aumento di tutti i costi dell'impianto MBT; infatti:

$$\text{a parità di } IRR, \text{ se } D \uparrow \Rightarrow \text{Costi MBT} \uparrow \Rightarrow \text{T.Conf.} \uparrow \quad (7.4)$$

Dall'analisi dei risultati ottenuti per il  $RUR_{min}$  e il  $RUR_{max}$ , passando da piccoli a grandi bacini di conferimento emerge una singolare tendenza. Infatti,

per le taglie inferiori i sistemi che trattano il  $RUR_{min}$  garantiscono l'ottenimento di tariffe minori rispetto a quelli riferiti al  $RUR_{max}$ ; mentre per le taglie superiori l'andamento si inverte. Quanto detto è spiegabile nel modo seguente. Impianti di dimensioni contenute sono caratterizzati da investimenti e costi operativi specifici molto elevati: nel caso di  $RUR_{max}$  i costi maggiori sostenuti per WtE più grandi non sono compensati dalla vendita di energia elettrica e, di conseguenza, la tariffa di conferimento risulta più alta.

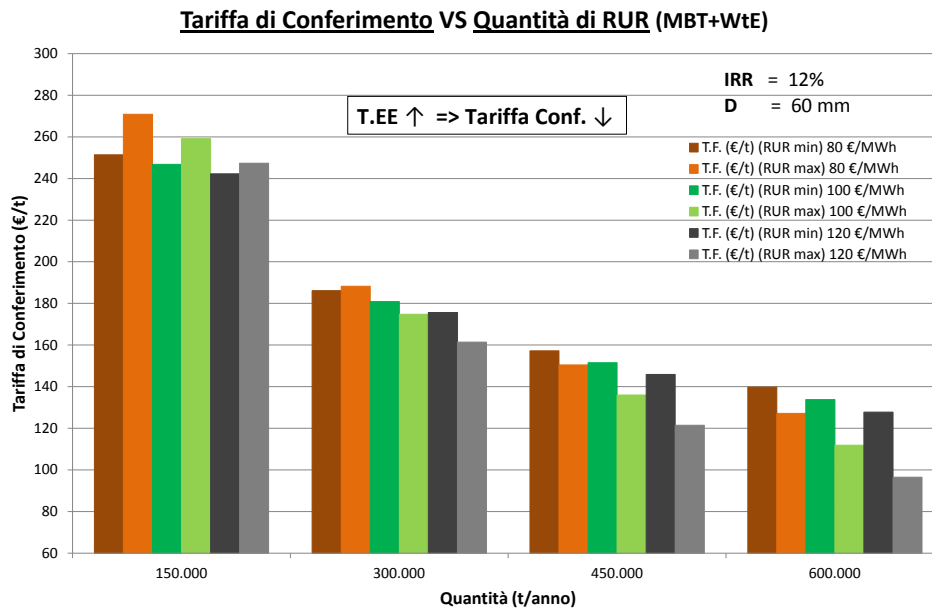


Figura 7.4

In riferimento a queste conclusioni è importante sottolineare che, nel caso di  $RUR_{min}$ , diametri troppo bassi (ad esempio 30 mm) potrebbero non garantire una buona qualità della FSC prodotta e quindi un'adeguata combustione nel WtE a valle. L'analisi però non considera eventuali costi aggiuntivi conseguenti all'aggiunta di combustibile ausiliario, effettuata al fine di riprodurre condizioni e rese di processo analoghe a quelle del  $RUR_{max}$ . Per tale ragione, la tariffa di conferimento potrebbe risultare sottostimata. In ogni caso nel paragrafo 7.2.3, relativo al WtE senza pre-trattamento, si è cercato di valutare in modo approssimativo quanto potrebbe incidere l'aggiunta di combustibile ausiliario (Gas Naturale) sulla tariffa finale.

Il grafico di figura 7.4 mostra invece come variano le tariffe di conferimento in funzione di tre diverse tariffe elettriche (80, 100 e 120 €/MWh). Ovviamente, diverse ipotesi di questo tipo non influenzano i parametri progettuali degli impianti e non hanno alcun effetto sui costi operativi e di investimento. Un aumento della tariffa elettrica, perciò, non può che aumentare la red-

ditività dell'investimento, in particolare per il  $RUR_{max}$ ; la stessa quantità di FSC con un PCI più elevato, infatti, permette di produrre più energia elettrica e quindi ricavi maggiori.

### 7.1.2 MBT + WtE + LND

I grafici seguenti evidenziano che l'allestimento di una discarica di servizio risulta più conveniente, rispetto all'esternalizzazione dello smaltimento dei residui (cioè rispetto al conferimento presso terzi, al costo di 125 €/t). Questo aspetto è piuttosto prevedibile, in quanto gli oneri di costruzione e gestione di una propria discarica, portano a ridurre drasticamente i costi di smaltimento dei residui (si è infatti in una fascia compresa tra i 50 e i 90 €/t).

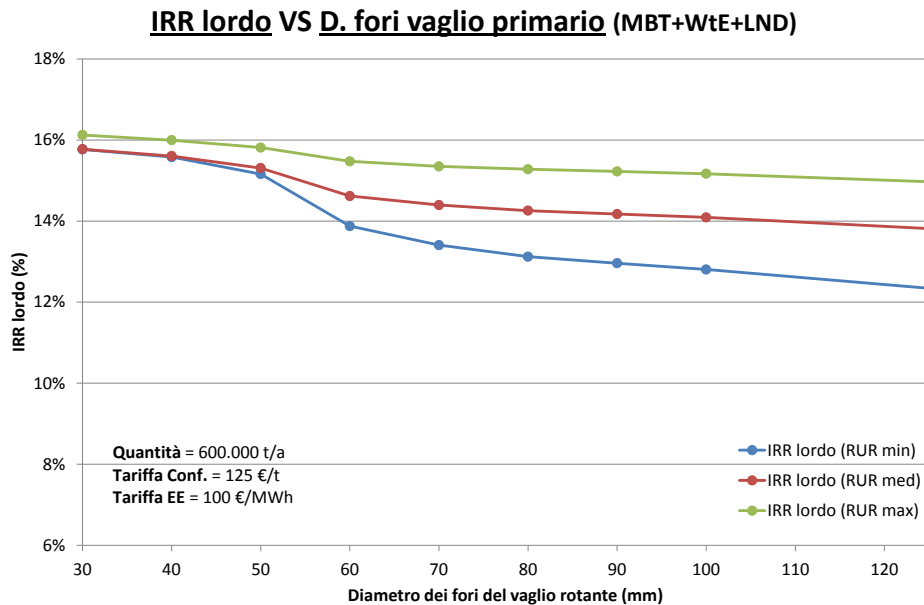


Figura 7.5

Il valore dell'IRR relativo a ogni RUR tende a mantenere gli andamenti della configurazione precedente e, in particolare, a convergere al diminuire del diametro. La discarica perciò tende ad “ammorbidire” il costo dello smaltimento dei residui, in particolare per quei rifiuti che contengono una quantità maggiore di inerti e ceneri. Il  $\Delta IRR$  perciò, come nel caso precedente, è maggiore per il  $RUR_{min}$ .

In questa configurazione le tariffe di conferimento seguono gli stessi andamenti visti prima ma, grazie alla presenza della discarica “di servizio”, assumono valori inferiori (ved. fig. 7.6 e 7.7).

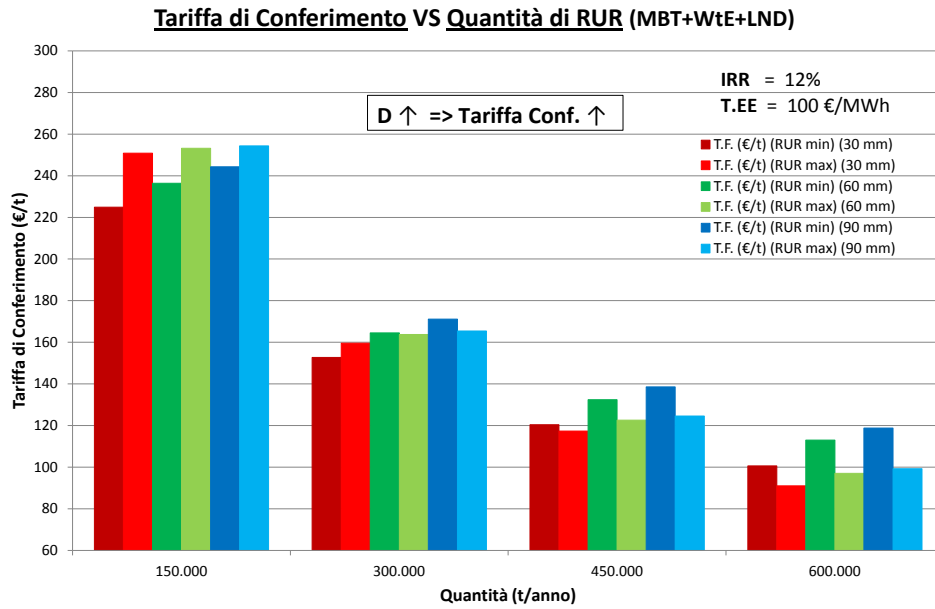


Figura 7.6

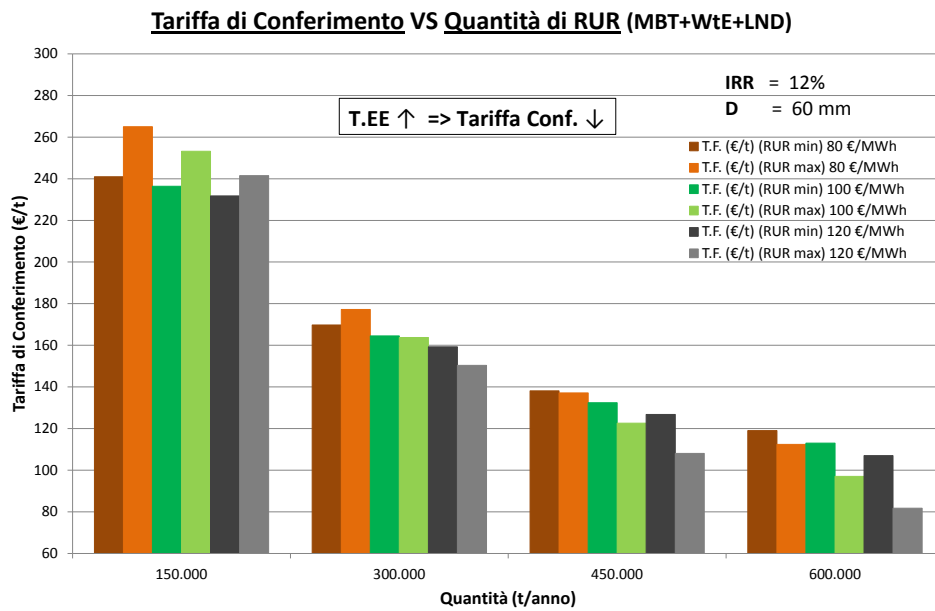


Figura 7.7

## 7.2 Configurazione (II): WtE + (LND)

In questa configurazione si analizza l'impianto WtE senza pre-trattamento. Non essendo presente l'impianto MBT non risulta possibile analizzare l'andamento dell'IRR in funzione del diametro dei fori del vaglio, né l'andamento della tariffa di conferimento al variare dello stesso parametro. Perciò si pone l'attenzione unicamente sulla tariffa di conferimento in relazione alla quantità di rifiuti trattati, considerando tre diversi prezzi dell'energia elettrica (80, 100 e 120 €/MWh).

### 7.2.1 WtE

L'andamento ottenuto è molto simile al grafico di figura 7.4, relativo alla configurazione (I) MBT + WtE. Si osserva sempre che, per le taglie inferiori, i sistemi che trattano il  $RUR_{min}$  garantiscono l'ottenimento di tariffe minori rispetto a quelle riferite al  $RUR_{max}$ , mentre per le taglie superiori l'andamento si inverte (ved. fig. 7.8). Per ipotesi, infatti, non si considerano eventuali costi aggiuntivi conseguenti all'aggiunta di combustibile ausiliario, effettuata al fine di riprodurre condizioni e rese di processo analoghe a quelle del  $RUR_{max}$ .

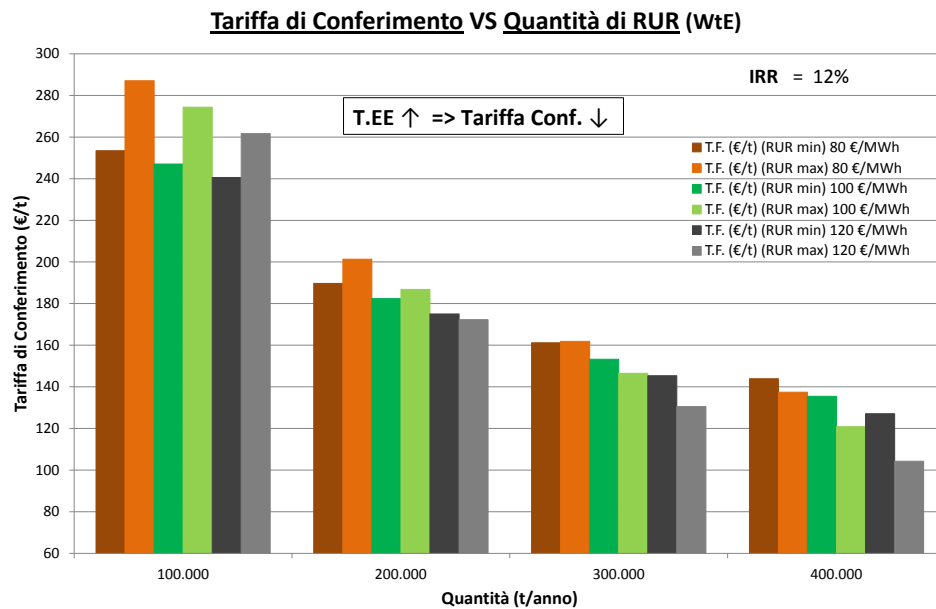


Figura 7.8

### 7.2.2 WtE + LND

In questa configurazione le tariffe di conferimento hanno gli stessi andamenti visti prima ma, grazie alla discarica, assumono valori inferiori (ved. fig. 7.9).

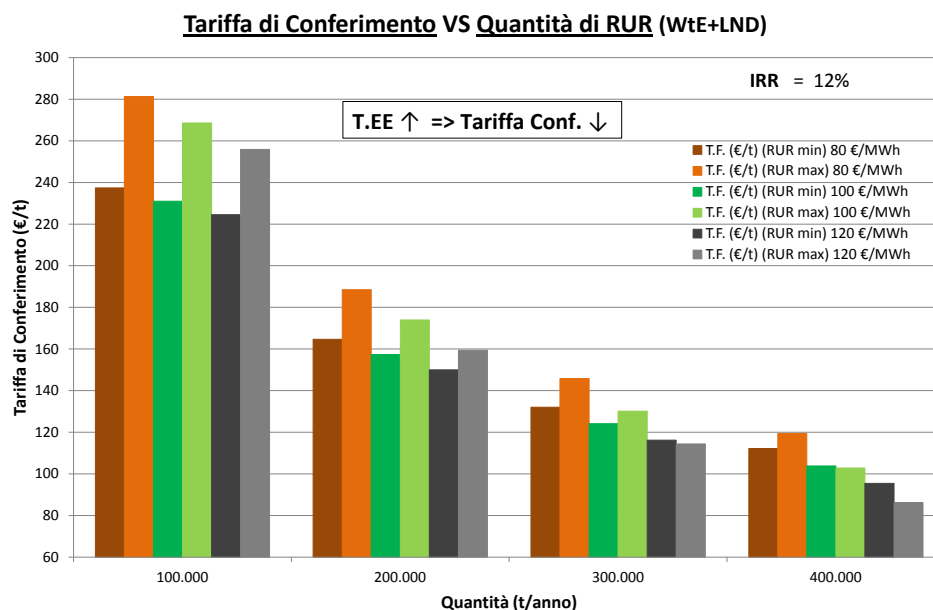


Figura 7.9

### 7.2.3 WtE + LND + Gas Naturale

In questo studio si valuta quanto potrebbe incidere l'introduzione di combustibile ausiliario, per favorire la combustione di rifiuti con potere calorifico molto basso ( $RUR_{min}$ ). Per ipotesi, si considera un consumo di gas naturale tale da compensare la differenza tra il PCI del  $RUR_{med}$  (9,0 MJ/kg) e quello del  $RUR_{min}$  (6,5 MJ/kg). Gli effetti ottenuti da questa modifica sono considerevoli, al punto da rendere più conveniente economicamente, in ogni situazione, l'utilizzo del  $RUR_{max}$  (ved. fig. 7.10). Il gas naturale infatti è un combustibile costoso, generalmente utilizzato in centrali con rendimenti elettrici molto più elevati<sup>2</sup>. Ciò dimostra l'importanza del pre-trattamento per il  $RUR_{min}$ , grazie al quale è possibile evitare un consumo significativo di combustibile ausiliario.

<sup>2</sup>Come i cicli combinati che raggiungono rendimenti superiori al 55%.

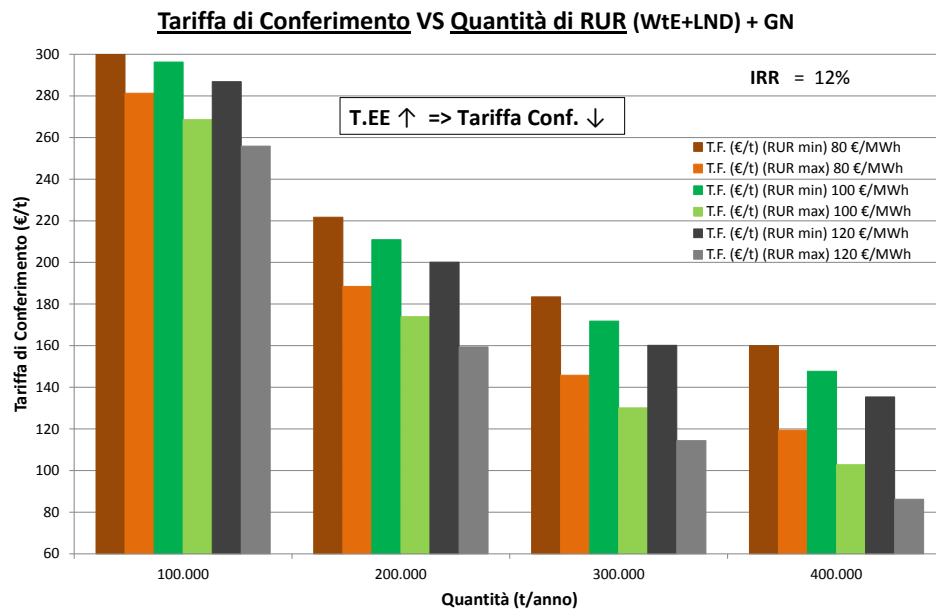


Figura 7.10



## 7.3 Configurazione (III): MBT + (LND), fsc a terzi

Nella presente configurazione è previsto il solo pretrattamento del rifiuto, al fine di ridurre in massa il RUR tramite biostabilizzazione e recuperare alcuni materiali, come i metalli e il RBM (Rifiuto Biostabilizzato Maturo). Oltre ai residui prodotti dall'impianto MBT, si è scelto di conferire presso terzi (ad esempio gestori esteri di impianti WtE) la frazione secca combustibile prodotta. Nel contesto italiano non è ancora stato applicato, ovvero è stato posticipato, il divieto di conferire in discarica i rifiuti con un PCI superiore a 13 MJ/kg, previsto dall'art. 6 del decreto legislativo n. 36/2003, il cui obiettivo era quello di favorire il recupero energetico della FSC mediante processi di termovalorizzazione (WtE). In base a ciò la frazione secca "potrebbe" essere conferita in discarica ma, per rispettare le direttive dell'Unione Europea relative alla piramide dei rifiuti, si è scelto di applicare un "costo di smaltimento" alla FSC prodotta, che viene ritirata e successivamente utilizzata da soggetti terzi per produrre energia elettrica.

Questa configurazione è presente in alcuni contesti del Centro-Sud Italia. Alcuni impianti MBT, infatti, producono una frazione secca, che successivamente viene inviata all'estero per essere smaltita in WtE "dedicati" (ad esempio in Olanda, Germania, Danimarca, Svezia o altri Paesi dotati di numerosi impianti WtE, generalmente di grossa taglia). Il concetto sopraesposto è valido ovunque vengano prodotte FSC in eccedenza rispetto alle possibilità di collocazione in impianti regionali.

### 7.3.1 MBT, fsc a terzi

Come prima ipotesi si è scelto di applicare un costo di smaltimento della FSC pari a quello dei residui. Nel grafico di figura 7.11 si osserva un andamento dell'IRR molto particolare. In generale si nota un rapido incremento dell'IRR per diametri compresi tra 30 e 60 mm, dato che la FSC prodotta diminuisce velocemente e di conseguenza anche i costi per smaltirla. In particolare, per il  $RUR_{min}$  si osserva l'esistenza di un IRR ottimo; mentre per il  $RUR_{med}$  e il  $RUR_{max}$  l'IRR aumenta all'aumentare del diametro. In questa soluzione il  $RUR_{min}$  permette di ottenere IRR maggiori rispetto al  $RUR_{max}$ , grazie alla minore quantità di FSC da cedere a terzi. L'ottimo però è collocato in una zona instabile e, di conseguenza, occorre valutare con attenzione la scelta del diametro. Come nei casi precedenti, nel grafico di figura 7.12 si osserva un aumento della tariffa di conferimento per taglie di impianto più piccole. In particolare, emerge l'esistenza di un diametro ottimo che permette

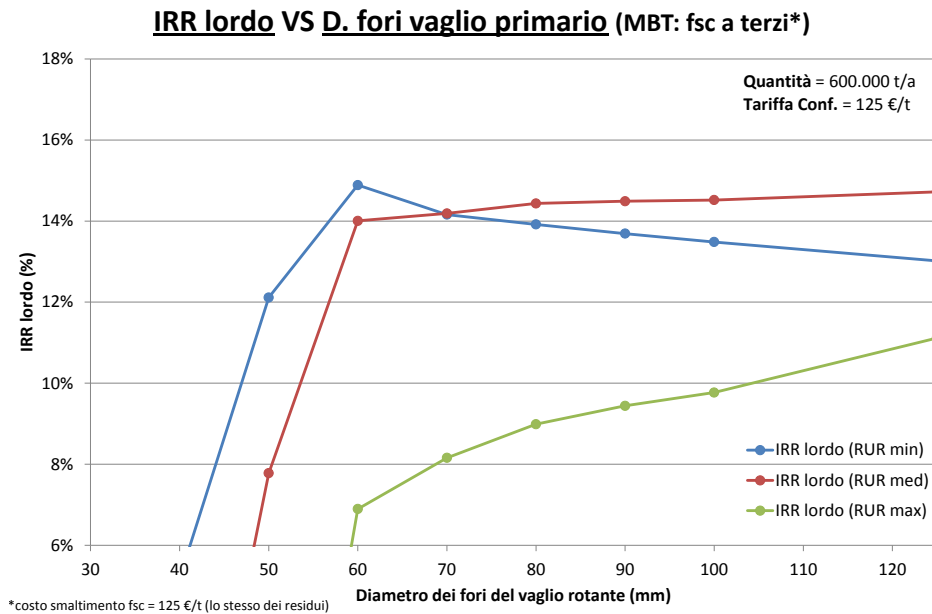


Figura 7.11

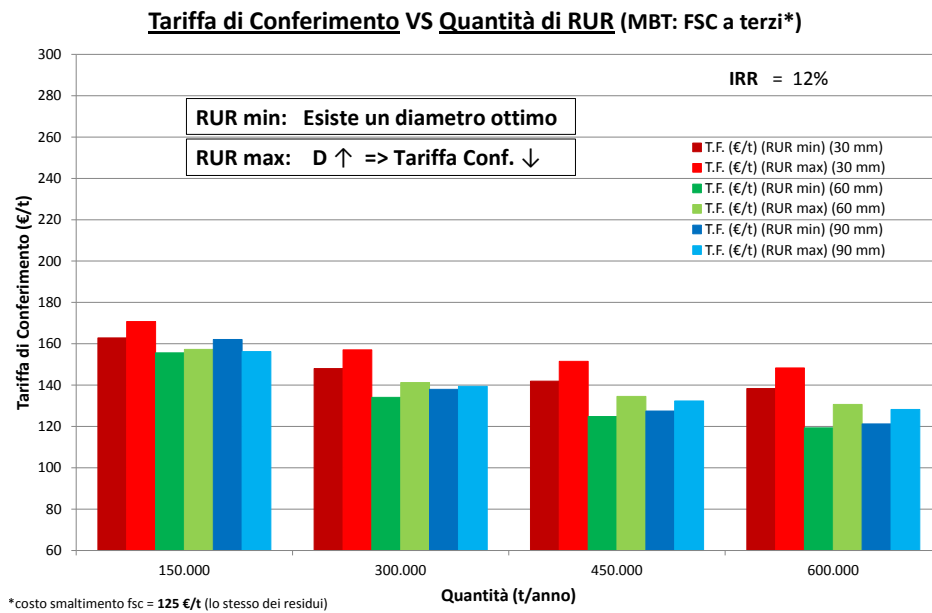


Figura 7.12

di minimizzare la tariffa nel caso del  $RUR_{min}$ ; mentre per il  $RUR_{max}$  la tariffa scende all'aumentare della dimensione dei fori (quindi in modo simile a quanto visto per l'IRR).

## 7.3.2 MBT + LND, fsc a terzi

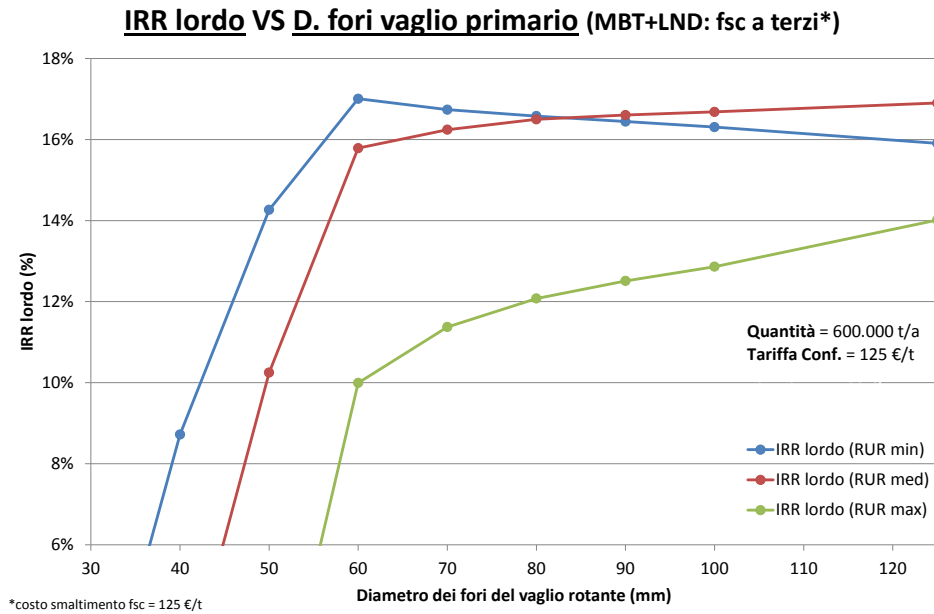


Figura 7.13

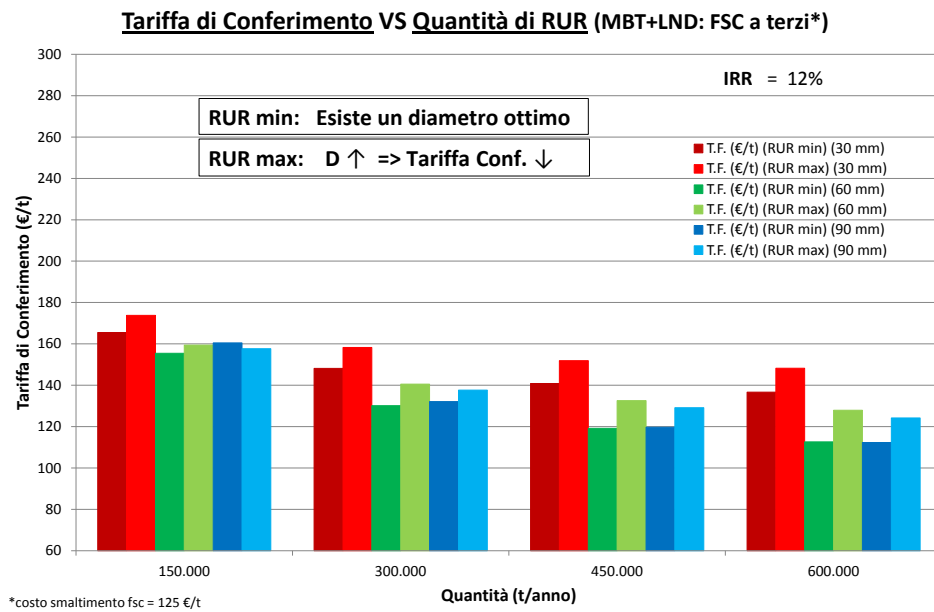


Figura 7.14

Anche in questa configurazione la presenza della discarica dedicata, utilizzata solo per i residui, conferma la sua convenienza rispetto allo smaltimento

presso terzi. I costi risultano ammorbiditi e, di conseguenza, l'IRR aumenta e la tariffa di conferimento diminuisce (ved fig. 7.13 e 7.14).

### 7.3.3 MBT + LND, fsc a terzi (con costo maggiore)

Applicare un costo di smaltimento della FSC pari a quello dei residui potrebbe non essere un'ipotesi molto realistica. In genere, gli impianti WtE di terzi sono molto lontani dal contesto di riferimento e ciò implica un aumento dei costi di trasporto. Inoltre i gestori potrebbero applicare tariffe più elevate per incrementare i loro margini di profitto. Per tener conto dell'incertezza della tariffa finale, si è scelto quindi di aumentare il costo di smaltimento della FSC fino a 160 €/t. Nel grafico di figura 7.15 si osserva una notevole diminuzione dell'IRR, in particolare per il  $RUR_{max}$  che scompare scendendo sotto il limite minimo dell'IRR (fissato pari al tasso di interesse sul debito). Si evidenzia inoltre un considerevole aumento della tariffa di conferimento,

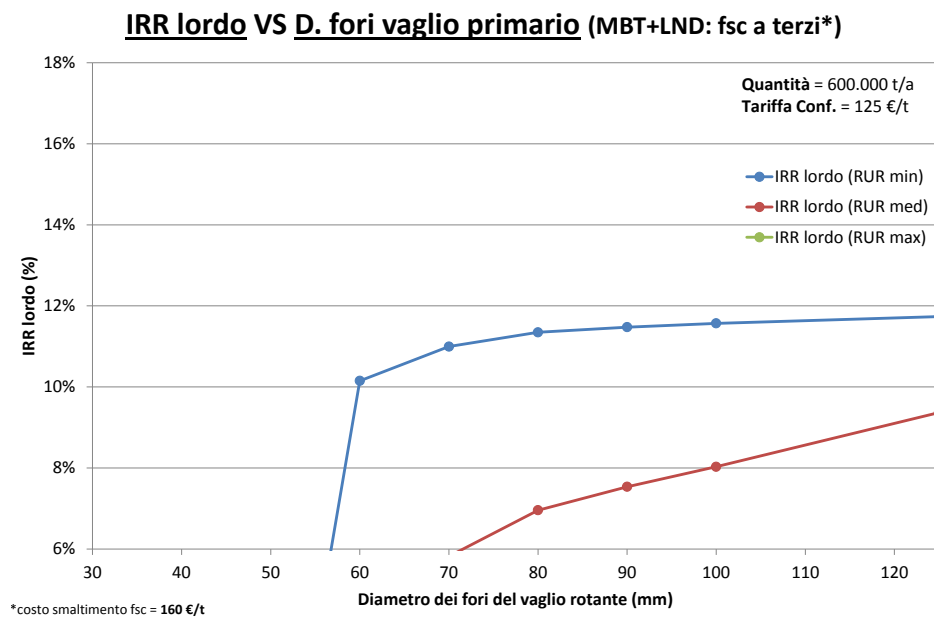


Figura 7.15

soprattutto per diametri piccoli (ved. fig. 7.16).

In ogni caso, a prescindere dai risultati economico-finanziari, ciò che contraddistingue questa configurazione è l'incertezza del costo e della possibilità di smaltimento della frazione secca. Esiste quindi una forte dipendenza dai soggetti terzi, che potrebbero essere rappresentati dai Paesi esteri (dell'Europa nord-occidentale). Inoltre, sarebbe opportuno valutare l'impatto di questa soluzione sulla mancata creazione di posti di lavoro e sull'eventuale risparmio

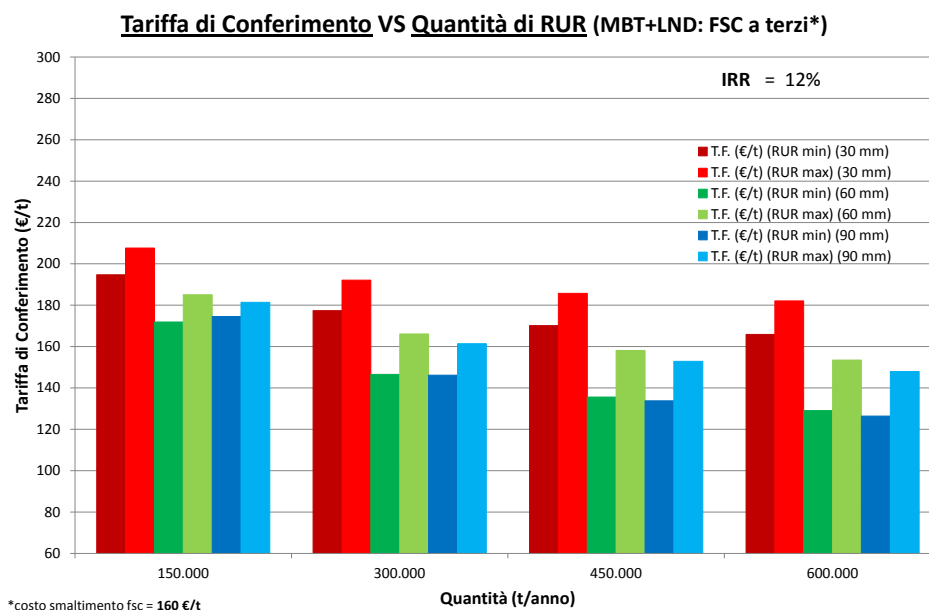


Figura 7.16

di combustibile convenzionale per la produzione di energia elettrica. Infatti il conferimento dei rifiuti all'estero rischia, in alcuni, casi di creare una situazione paradossale: l'Italia sostiene costi enormi di smaltimento per convogliare altrove combustibili, con i quali viene prodotta energia elettrica in altri Paesi da cui, poi, l'Italia importa detta energia elettrica ad un ulteriore costo di cessione. Dallo smaltimento irrazionale dei rifiuti si genera quindi un "doppio onere".

#### 7.3.4 MBT+LND, fsc a terzi (con costo minore)

Negli ultimi anni si è sviluppato molto il dibattito relativo alla possibilità di creare un CSS-combustibile, che risulti conforme a quanto precisato nel DM 22/2013 e che possa essere commercializzato o utilizzato in altri impianti "non dedicati" (come ad esempio cementifici o centrali termoelettriche convenzionali). L'impianto MBT di riferimento, però, non prevede ulteriori implementazioni atte a conferire al "prodotto" le caratteristiche previste dalla procedura "End of Waste"; per simulare questo possibile scenario si è quindi ipotizzato che il potenziale combustibile abbia un costo di smaltimento pari a 50 €/t, ossia di molto inferiore a quello stimato in precedenza ma in ogni caso tale da tener conto sia degli oneri per effettuare le necessarie modifiche/integrazioni all'impianto MBT sia dei costi di logistica e trasporti.

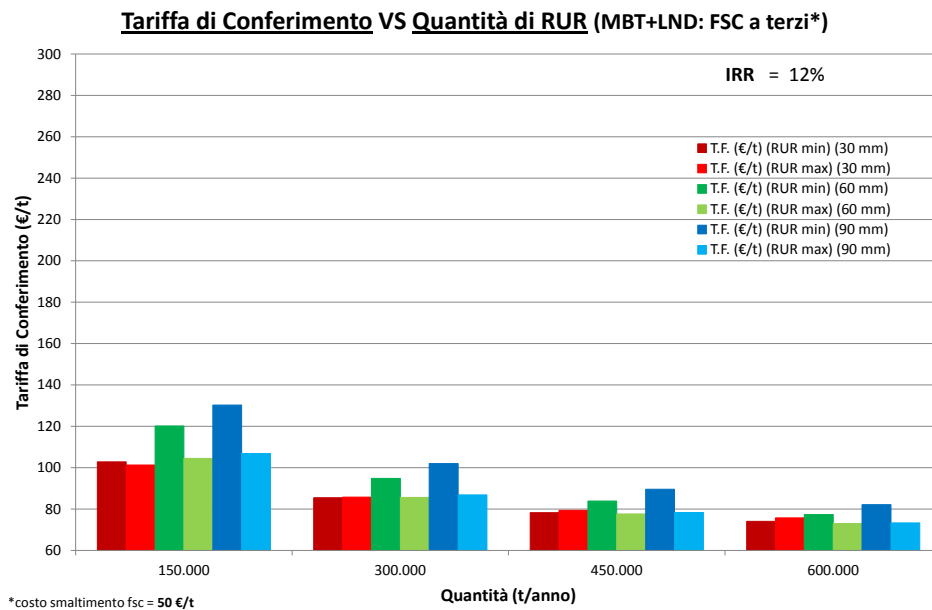


Figura 7.17

Dal grafico in figura 7.17 si osserva un'inversione di tendenza rispetto ai casi precedenti. In questa soluzione, infatti, il trattamento del  $RUR_{max}$  permette di ottenere tariffe di conferimento inferiori rispetto a quelle relative al  $RUR_{min}$  (in particolare per per  $D \geq 60$  mm); tale risultato dipende dal minor costo di smaltimento della FSC rispetto a quello dei residui prodotti dall'impianto MBT (pari sempre a 125 €/t). Gli andamenti ottenuti sono sicuramente interessanti, ma occorre sottolineare che la reale possibilità di dar vita a un "mercato del CSS-combustibile" dipende molto dai risultati della sperimentazione industriale, dalle condizioni di mercato e dalle scelte amministrative.

## 7.4 Conclusioni

Dalle analisi effettuate si può dedurre che non è semplice fornire un quadro completo e generale delle possibili configurazioni applicabili a diversi scenari. D'altra parte, sulla base del contesto tariffario che ne deriva, si possono evidenziare i concetti di seguito esposti.

Le soluzioni preferibili sono quelle in grado di “chiudere” il ciclo dei rifiuti, ovvero di trovare adeguata collocazione del combustibile prodotto; pertanto, in tal senso, sono da escludere soluzioni che prevedano l'invio della fsc a terzi a costi di smaltimento troppo elevati.

Sono riscontrabili ovvie economie di scala; infatti, spostandosi verso le grosse taglie impiantistiche si possono riscontrare tariffe di conferimento molto competitive.

Considerando i tassi di raccolta differenziata europei, si può prevedere un assestarsi dei sistemi descritti su taglie medio-piccole; viceversa, le grosse taglie potrebbero essere impiegate soprattutto per far fronte a scenari extra-europei.

Nell'ambito delle capacità di trattamento prese in esame, si può affermare che le soluzioni più interessanti siano rappresentate dai sistemi che prevedono:

- presenza di discarica di servizio;
- MBT + WtE, in assenza o scarsa applicazione della RD, di taglia medio-grande ( $> 300\,000$  t/a);
- solo WtE, per RUR a valle della RD, di taglia elevata ( $> 200\,000$  t/a, equivalente a circa  $80 \div 85$   $MW_t$ );
- solo MBT, di qualsiasi taglia, ma con particolare riferimento a quelli che presentano un costo di smaltimento della FSC minore di 125 €/t; infatti risulta evidente la convenienza dei casi con costo di smaltimento intorno ai 50 €/t.

L'incidenza economica del MBT aumenta con la componente umida (frazione organica) e la forometria (diametro dei fori del vaglio).

A pari quantità e qualità del combustibile ( $RUR_{med} \div RUR_{max}$ ) si riscontra una maggior convenienza della soluzione WtE “stand-alone” rispetto alla configurazione MBT+WtE.

In ogni caso, per valutare e ottimizzare una soluzione specifica da adottare in un determinato contesto, risulta più opportuno analizzarla singolarmente e, in un secondo tempo, confrontarla con i risultati ottenuti nei grafici esposti in questo capitolo.





## Capitolo 8

# Conclusioni e sviluppi futuri

Nel presente elaborato, dopo una breve introduzione sulle problematiche generali che caratterizzano la gestione dei rifiuti, sono state descritte in dettaglio le tecnologie utilizzate per il trattamento dei Rifiuti Urbani Residui a valle della raccolta differenziata (RUR).

Gli impianti considerati, che costituiscono il cosiddetto “sistema integrato”, sono i seguenti:

- impianto di *Trattamento Meccanico Biologico (MBT)*, che sfrutta la combinazione di processi meccanici e biologici per effettuare un recupero dei materiali riciclabili, produrre un combustibile da utilizzare in impianti specifici e ridurre la quantità dei residui da smaltire in discarica;
- impianto di *Trattamento Termico con Recupero Energetico (Waste to Energy - WtE)*, il cui obiettivo è quello di utilizzare il combustibile prodotto nel MBT per produrre energia elettrica e/o termica;
- *Discarica di servizio (Landfill - LND)*, utilizzata per smaltire i residui finali prodotti da MBT e WtE.

Successivamente è stato sviluppato un modello numerico con Microsoft Excel, per simulare il funzionamento del sistema integrato. Lo scopo principale del programma è quello di: analizzare i flussi di materia e di energia che attraversano i singoli impianti e valutare le possibili configurazioni, applicabili sia tecnicamente che industrialmente.

Il software sviluppato si è rivelato un valido strumento per definire lo scenario impiantistico più conveniente, ossia in grado di costituire il miglior compromesso tecnico-economico su cui basare qualsiasi sistema integrato di gestione dei rifiuti.

## 8.1 Conclusioni

Tramite l'analisi tecnica sono stati individuati i parametri che determinano le prestazioni dell'impianto MBT e del successivo recupero energetico. In generale, sulla base di tutti gli output ricavati, è emerso che non esiste una configurazione ottimale del MBT in senso assoluto. Si può però sostanzialmente affermare, in termini prestazionali, che: nel caso di rifiuti molto umidi e con alto tenore di organico ( $RUR_{min}$ ) sono preferibili soluzioni che contemplano la biostabilizzazione a monte; nel caso di rifiuti piuttosto secchi ed "energetici" ( $RUR_{max} \div RUR_{max}$ ) sono invece più convenienti configurazioni "ridotte" e che prevedono la sola presenza di una biostabilizzazione a valle.

Dall'analisi economico-finanziaria, nell'ambito della configurazione esaminata (a "flusso separato"), sono stati individuati i fattori principali che influenzano lo studio di fattibilità di un sistema MBT + WtE + (LND), in funzione del contesto di riferimento. Dalle alternative valutate si può dedurre che non è semplice fornire un quadro completo e generale delle possibili alternative, applicabili a diversi scenari. D'altra parte, sulla base del contesto tariffario che ne scaturisce, si può affermare che:

- le soluzioni preferibili sono quelle in grado di "chiudere" il ciclo dei rifiuti, ovvero di trovare adeguata collocazione del combustibile prodotto (in impianti dedicati o in centrali/cementifici); pertanto, in tal senso, sono da escludere soluzioni che prevedano l'invio della fsc a terzi (tipicamente paesi esteri), a costi di smaltimento troppo elevati;
- sono riscontrabili ovvie economie di scala; infatti, spostandosi verso le grosse taglie impiantistiche si possono riscontrare tariffe di conferimento molto competitive;
- considerando i tassi di raccolta differenziata europei, si può prevedere un assestarsi dei sistemi descritti su taglie medio-piccole (a meno di non prevedere impianti baricentrici e, talvolta, sconvenienti dal punto di vista della logistica e dei trasporti); viceversa, le grosse taglie potrebbero essere considerate soprattutto per far fronte a scenari extra-europei (ove la RD non viene applicata e le aree/città interessate sono talmente grandi da rendere necessari sistemi integrati di taglia "importante");
- nell'ambito delle capacità di trattamento prese in esame, si può affermare che le soluzioni più interessanti siano rappresentate dai sistemi che prevedono:
  - presenza della discarica di servizio;

- integrazione MBT + WtE, in assenza o scarsa applicazione della RD ( $RUR_{min}$  o  $RUR_{med}$ ), di taglia medio-grande ( $> 300\,000$  t/a);
  - solo WtE, per RUR a valle della RD ( $RUR_{max}$ ), di taglia elevata ( $> 200\,000$  t/a, equivalente a circa  $80 \div 85 MW_t$ );
  - solo MBT, di qualsiasi taglia, ma con particolare riferimento a quelli che presentano un costo di smaltimento della FSC minore di 125 €/t; risulta in tal senso molto conveniente la produzione di CSS, che possano essere trasferiti in impianti già esistenti (dedicati ovvero di co-combustione) ad un costo di smaltimento piuttosto basso, ad esempio intorno ai 50 €/t (per tener conto sia di eventuali implementazioni al MBT, sia di logistica e trasporti).
- l'incidenza economica del MBT aumenta con la componente umida (frazione organica) e la forometria (diametro dei fori del vaglio);
  - a pari quantità e qualità del combustibile ( $RUR_{med} \div RUR_{max}$ ) si riscontra una maggior convenienza della soluzione WtE “stand-alone” rispetto alla configurazione MBT+WtE;

In ogni caso, per valutare e ottimizzare una soluzione specifica da adottare in un determinato contesto, risulta più opportuno analizzarla singolarmente e, in un secondo tempo, confrontarla con i risultati ottenuti nei grafici esposti. Grafici che, in ogni caso, possono e devono costituire un orientamento e un buon riferimento per la definizione della configurazione impiantistica più conveniente; ossia in grado di rappresentare il miglior compromesso tecnico-economico su cui basare la realizzazione di un sistema integrato di gestione dei rifiuti.

## 8.2 Sviluppi futuri

Per migliorare ulteriormente i risultati ottenuti potrebbe essere interessante ottimizzare, a seconda del bacino di riferimento, il numero di linee degli impianti MBT e WtE per valutarne l'impatto sull'investimento e sui costi operativi.

Si evidenzia inoltre che il modello focalizza l'attenzione sul sistema integrato MBT + WtE per il trattamento dei RUR, senza considerare tutti i processi di raccolta differenziata e riciclaggio presenti a monte. Per generalizzare ulteriormente l'analisi, sarebbe quindi opportuno includere gli aspetti tecnici ed economici delle suddette fasi, possibilmente tramite l'utilizzo della metodologia LCA (Life Cycle Assessment) e l'esame di scenari economico-finanziari globali (inclusivi dei costi della RD).

Un'ulteriore sviluppo potrebbe essere quello di considerare anche impianti MBT di tipo avanzato, che abbiano la duplice funzione di valorizzare la frazione secca ai fini del recupero di materia, da un lato, e/o produrre CSS-combustibile per centrali e/o cementifici, dall'altro.

# Bibliografia

- [1] G. Buonanno: Contributo delle emissioni di termoutilizzatori alla dose giornaliera di polveri: il caso italiano. *Convegno MatER: Tecnologie e Tendenze per il Recupero da Rifiuti, Piacenza*, 15-16 maggio 2013.
- [2] Parlamento e Consiglio europeo: Direttiva 2008/98/CE sui rifiuti. 19 novembre 2008.
- [3] MatER, Materia ed Energia da Rifiuti. *www.mater.polimi.it*.
- [4] M. Cerani: Trattamento dei rifiuti urbani residuali a valle di raccolte differenziate spinte finalizzato a recupero di materia. *Studio di fattibilità*, pagine B3–B41, 2009.
- [5] Daneco Impianti - G. Sala: Relazione tecnico descrittiva di un impianto TMB, con linea di selezione e biostabilizzazione. *Comunicazione personale*, 2010.
- [6] S. Zannier, L. Zucchelli, D. Delodovici e D. Marzaro: Energia da rifiuti e biomasse. *Corso di Alta Formazione CTI, Milano*, 19-21 maggio 2008.
- [7] S. Zannier e C. Baggiolini: Innovative solutions implemented in Salerno Waste to Energy project, WtE economical analysis and comparison with the main power technologies. *Convegno SIDISA, Milano*, 26-29 giugno 2012.
- [8] Daneco Impianti - S. Zannier: La discarica di rifiuti. *Comunicazione personale*, 2004.
- [9] F. Viganò, S. Consonni, M. Ragazzi, E. Rada: A model for mass and energy balance of bio-drying. *Annual North American Waste-to-Energy Conference NAWTEC19, Lancaster*, 16-18 maggio 2011.
- [10] S. Consonni, F. Viganò: Waste gasification vs. conventional Waste-To-Energy: A comparative evaluation of two commercial technologies. *Waste Management*, (32):653–666, 2012.

- 
- [11] S. Zannier: Definizione delle efficienze di un sistema MBT+WtE in funzione delle caratteristiche dei RU in ingresso. *Convegno MatER: Tecnologie e Tendenze per il Recupero da Rifiuti*, Piacenza, 15-16 maggio 2013.
- [12] M. Grosso: Inquadramento, filiere di riciclo e recupero, bilanci energetici e ambientali del sistema integrato. *Convegno MatER: Processi di Trattamento e Recupero dei Rifiuti Urbani*, Milano, 22 ottobre 2013.
- [13] S. Speranza: Analisi modellistica del sistema di gestione rifiuti urbani della Calabria Sud. tesi di laurea, Politecnico di Milano, 2011-2012.
- [14] Governo della Repubblica Italiana: Dlgs 205/2010. 3 dicembre 2010.
- [15] Governo della Repubblica Italiana: Dlgs 36/2003. 13 gennaio 2003.
- [16] Parlamento e Consiglio europeo: Direttiva 1999/31/CE. 26 aprile 1999.
- [17] Governo della Repubblica Italiana: DM 06/07/12. 6 luglio 2012.
- [18] Governo della Repubblica Italiana: DM 22/2013. 14 febbraio 2013.