



centroappunti.it

CORSO LUIGI EINAUDI, 55/B - TORINO

Appunti universitari

Tesi di laurea

Cartoleria e cancelleria

Stampa file e fotocopie

Print on demand

Rilegature

NUMERO: 2522A

ANNO: 2021

A P P U N T I

STUDENTE: Graziani Chiara

**MATERIA: Processi di Re-impiego e Valorizzazione Energetica -
Prof. Fino**

Il presente lavoro nasce dall'impegno dell'autore ed è distribuito in accordo con il Centro Appunti.

Tutti i diritti sono riservati. È vietata qualsiasi riproduzione, copia totale o parziale, dei contenuti inseriti nel presente volume, ivi inclusa la memorizzazione, rielaborazione, diffusione o distribuzione dei contenuti stessi mediante qualunque supporto magnetico o cartaceo, piattaforma tecnologica o rete telematica, senza previa autorizzazione scritta dell'autore.

ATTENZIONE: QUESTI APPUNTI SONO FATTI DA STUDENTIE NON SONO STATI VISIONATI DAL DOCENTE.
IL NOME DEL PROFESSORE, SERVE SOLO PER IDENTIFICARE IL CORSO.

PROCESSI DI RE-IMPIEGO E VALORIZZAZIONE DELL'ENERGIA

INTRODUZIONE (LEZIONE 0 DELLA PROF.SSA TOMMASI)

Lo scopo di questo corso è lo studio di processi chimici innovativi per un modello di società più sostenibile, i quali devono portare alla produzione di energia e alla protezione dell'ambiente.

I **rifiuti** sono materiali di scarto o avanzo di svariate attività umane. Essi vengono classificati in base all'origine in rifiuti urbani e in rifiuti speciali; in base alle loro caratteristiche di pericolosità, in rifiuti pericolosi e rifiuti non pericolosi (D. Lgs 152/06 art. 184 c.1).

Il **catalogo europeo dei rifiuti (CER)** è la classificazione dei tipi di rifiuti secondo la direttiva 75/442/CEE, la quale definisce il termine rifiuti nel modo seguente: "qualsiasi sostanza od oggetto che rientri nelle categorie riportate nell'allegato I e di cui il detentore si disfi o abbia deciso o abbia l'obbligo di disfarsi". L'allegato I è noto comunemente come Catalogo europeo dei rifiuti e si applica a tutti i rifiuti, siano essi destinati allo smaltimento o al recupero.

I codici CER sono delle sequenze numeriche, composte da 6 cifre riunite in coppie, volte ad identificare un rifiuto, di norma, in base al processo produttivo da cui è originato. I primi due numeri esprimono la categoria o attività che genera i rifiuti; i secondi due numeri identificano il processo produttivo che genera il rifiuto; i terzi numeri identificano il singolo rifiuto. Nei codici CER la presenza dell' <<*>> indica la presenza di sostanze pericolose. Alcuni esempi:

- 0103 : rifiuti prodotti da trattamenti chimici e fisici di minerali metalliferi;
- 010304* : rifiuti sterili che possono generare acido, prodotti dalla lavorazione di minerale solforoso;

I **RIFIUTI URBANI** (art. 184, comma 2 del D.Lgs 152/2006) sono:

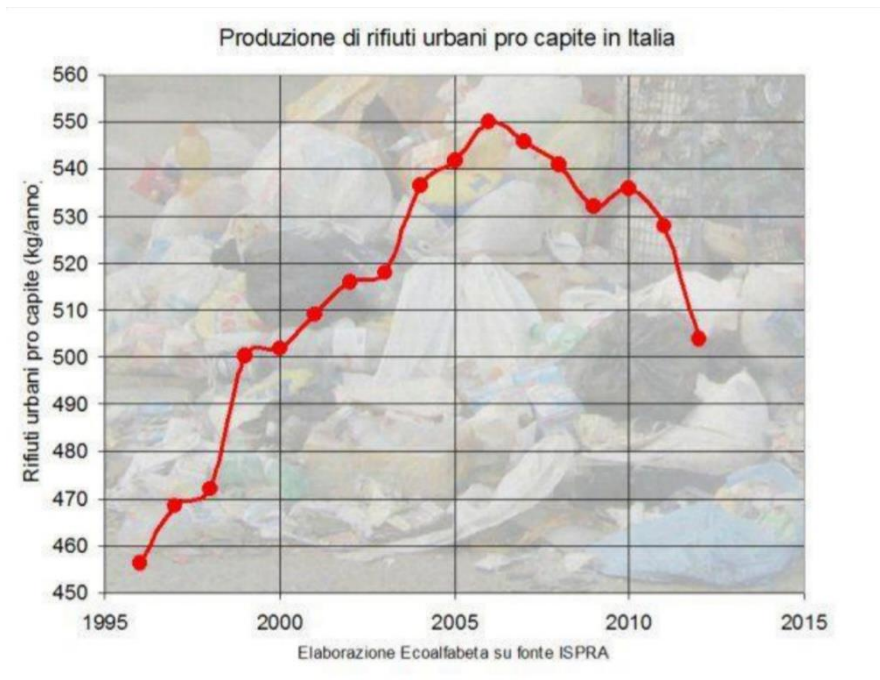
- a. i rifiuti domestici, anche ingombranti, provenienti da locali e luoghi adibiti a civile abitazione;
- b. i rifiuti non pericolosi provenienti da locali e luoghi adibiti ad usi diversi da quelli di cui al primo punto, assimilati ai rifiuti urbani per quantità e qualità; l'assimilazione è disposta dal Comune in base a criteri fissati in sede statale;
- c. i rifiuti provenienti dallo spazzamento delle strade;
- d. i rifiuti di qualunque natura o provenienza, giacente sulle strade ed aree pubbliche o sulle strade ed aree private comunque soggette ad uso pubblico o sulle spiagge marittime e lacuali e sulle rive dei corsi d'acqua;
- e. i rifiuti vegetali provenienti da aree verdi, quali giardini, parchi ed aree cimiteriali;
- f. i rifiuti da esumazioni ed estumulazioni, nonché gli altri rifiuti provenienti da attività cimiteriale diversi da quelli di cui al punto 2),3) e 5).

I **RIFIUTI SPECIALI** (art. 184, comma 3 del D.Lgs 152/2006) sono:

- a. i rifiuti da attività agricole e agro-industriali;
- b. i rifiuti derivanti dalle attività di demolizione, costruzione, nonché i rifiuti pericolosi che derivano dalle attività di scavo, fermo restando che le terre e rocce da scavo non sono rifiuti ove ricorrano determinate condizioni (dettagliatamente stabilite dall'art. 186);
- c. i rifiuti da lavorazioni industriali;
- d. i rifiuti da lavorazioni artigianali;

IL CONTESTO ITALIANO-EUROPEO

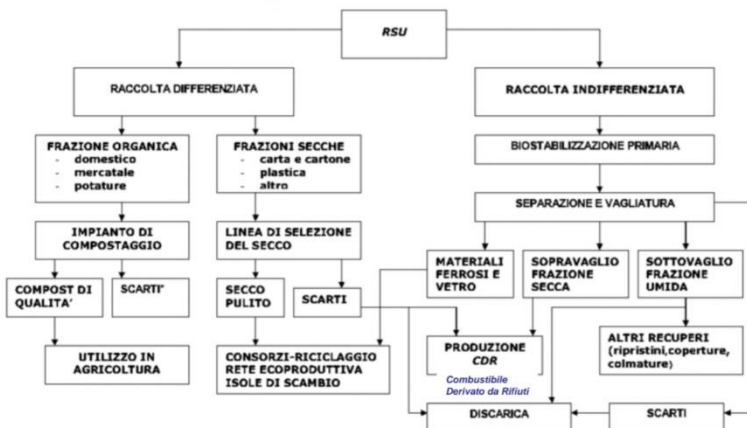
Nel 2017 sono stati prodotti 497 kg/anno di rifiuti urbani pro capite. In Italia, la produzione totale annuale di rifiuti solidi urbani è circa 30 milioni di tonnellate, mentre quella di rifiuti speciali è di circa 132 milioni di tonnellate (fonte ISPRA).



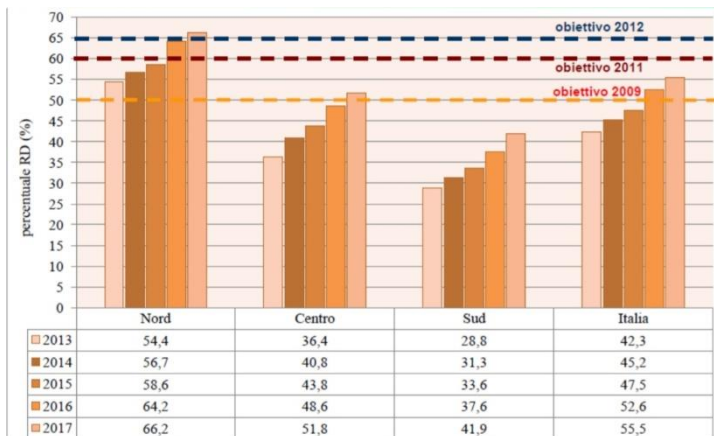
Secondo il D. Lgs. 205/10, il **recupero** è l'insieme di "qualsiasi operazione il cui principale risultato sia di permettere ai rifiuti di svolgere un ruolo utile sostituendo altri materiali che sarebbero stati utilizzati per assolvere una particolare funzione come il recupero di energia o il recupero di materia". Il **riciclo** è "una qualsiasi operazione di recupero attraverso cui i rifiuti 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".

Per **riciclaggio** dei rifiuti si intende l'insieme di strategie e tecnologie volte a recuperare materiali utili dai rifiuti per riutilizzarli anziché smaltirli.

Flusso generale dei rifiuti urbani



Nelle grandi città (popolazione superiore ai 200.000 abitanti), i migliori risultati si riscontrano a Milano, Venezia, Padova, Verona, Firenze e Bologna, mentre agli ultimi cinque posti troviamo Napoli, Genova, Messina, Palermo e Catania, queste ultime tre con valori molto più bassi rispetto i precedenti (8-11%). Torino si trova invece in una fascia intermedia, con una percentuale di raccolta differenziata del 44% contro i 57% di Milano.



Fonte: ISPRA

La raccolta differenziata stessa può essere analizzata osservando quelle che sono le frazioni merceologiche che vengono maggiormente recuperati.

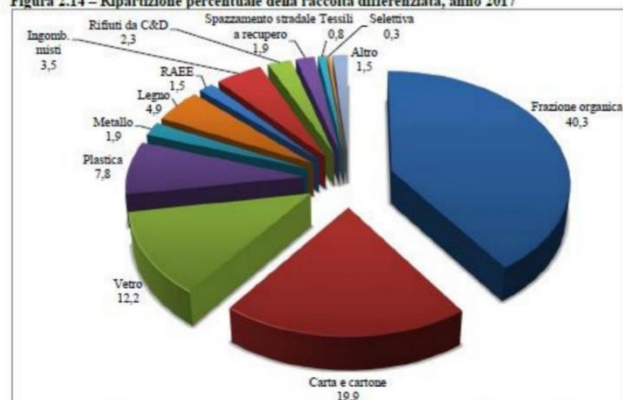
Figura 2.10 – Raccolta differenziata per frazione merceologica, anni 2013 - 2017



Note (1) Frazioni merceologiche incluse a partire dal 2016 sulla base dei criteri stabiliti dal DM 26 maggio 2016. (2) Nella voce "Altro" sono conteggiati, a partire dal 2016, anche gli scarti della raccolta multimateriale. In base ai criteri stabiliti dal DM 26 maggio 2016, quest'ultima deve, infatti, essere integralmente computata (al lordo della quota degli scarti) nel dato della RD. Le quote relative alle frazioni carta e cartone, vetro, plastica, metalli e legno sono date dalla somma dei quantitativi raccolti di imballaggi e di altre tipologie di rifiuti costituiti da tali materiali.

Fonte: ISPRA

Figura 2.14 – Ripartizione percentuale della raccolta differenziata, anno 2017



Note: nella voce "Altro" sono conteggiati, a partire dal 2016, anche gli scarti della raccolta multimateriale. In base ai criteri stabiliti dal DM 26 maggio 2016, quest'ultima deve, infatti, essere integralmente computata (al lordo della quota degli scarti) nel dato della RD.

Fonte: ISPRA

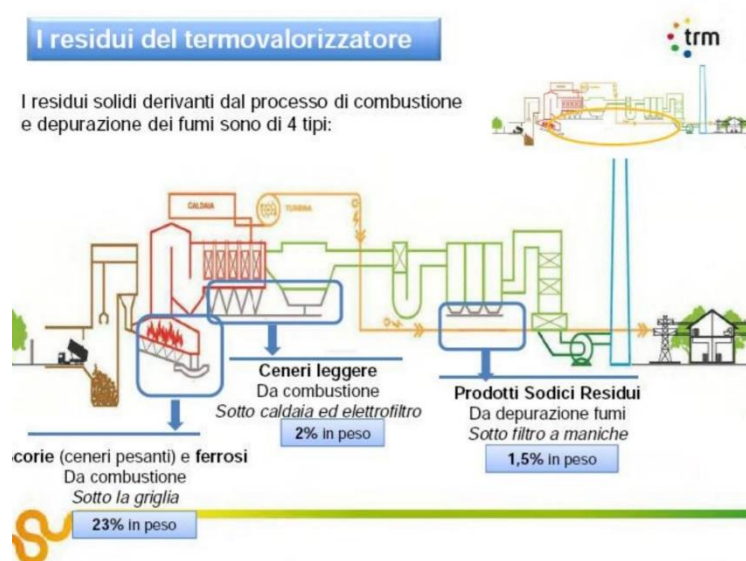
Come si può notare dai grafici, la frazione maggiormente destinata a raccolta differenziata è quella organica. A livello nazionale, questi rifiuti organici derivano principalmente da quattro settori: rifiuti da cucine e mense (66.6%), rifiuti dalla manutenzione di giardini e parchi (28.5%), rifiuti avviati a compostaggio domestico (4.0%), rifiuti da mercati (0.9%). Il recupero di questi scarti è aumentato dal 2010, da 4.186.843 tonnellate, al 2017, con 6.621.886 tonnellate.

In parallelo a questo miglioramento nelle capacità di riciclaggio e recupero dei materiali, si affianca un netto miglioramento anche in ambito socio economico e quindi nel benessere della comunità.

I rifiuti trattati con incenerimento sono definiti CDR (Combustibile Derivato dai Rifiuti) o più comunemente ecoballe.

Il termovalorizzatore può operare in due assetti:

- In assetto solo elettrico, producendo annualmente l'energia corrispondente al fabbisogno di circa 175.000 famiglie di tre persone
- In assetto cogenerativo, cioè fornendo sia energia elettrica sia energia termica per il teleriscaldamento, generando ogni anno l'energia termica in grado di scaldare 17.000 abitazioni da 100 mq e l'elettricità per il fabbisogno di 160.000 famiglie.



Gran parte della massa immessa nei forni viene infatti combusta ottenendo dei fumi che verranno opportunamente pretrattati prima di essere emessi dal camino.

- Le ceneri volanti e le polveri intercettate dall'impianto di depurazione dei fumi sono rifiuti speciali altamente tossici (in quanto concentrano molti degli inquinanti più nocivi), che come tali sono soggetti alle apposite disposizioni di legge e sono poi smaltiti in discariche speciali.
- Le scorie pesanti, formate dal rifiuto incombusto – acciaio, alluminio, vetro e altri materiali ferrosi, inerti o altro –, sono raccolte sotto le griglie di combustione e possono poi essere divise a seconda delle dimensioni e quindi riciclate se non troppo contaminate.

Le scorie sono generalmente smaltite in discarica e costituiscono una grossa voce di spesa. Gli impianti possono però essere costruiti per riciclare le scorie, riducendo il problema del loro smaltimento.

In Italia abbiamo 45 impianti di incenerimento, i quali trattano ognuno mediamente 122.867 tonnellate di rifiuti all'anno.

La materia prima secondaria è la materia, sostanza o prodotto secondario avente le caratteristiche stabilite da un apposito decreto del Ministero dell'ambiente e che rispetti i seguenti criteri, requisiti e condizioni:

- Siano prodotti da un'operazione di riutilizzo, di riciclo o di recupero di rifiuti;
- Siano individuate la provenienza, la tipologia e le caratteristiche dei rifiuti dai quali si possono produrre;
- Siano individuate le operazioni di riutilizzo, di riciclo o di recupero che le producono, con particolare riferimento alle modalità ed alle condizioni di esercizio delle stesse;
- Siano precisati i criteri di qualità ambientale, i requisiti merceologici e le altre condizioni necessarie per l'immissione in commercio, quali norme e standard tecnici richiesti per l'utilizzo, tenendo conto del possibile rischio di danni all'ambiente e alla salute derivanti dall'utilizzo e dal trasporto del materiale, della sostanza o del prodotto secondario;
- Abbiano un effettivo valore economico di scambio sul mercato.

La **raccolta differenziata** è “la raccolta idonea, secondo criteri di economicità, efficacia, trasparenza ed efficienza, a raggruppare i rifiuti urbani in frazioni merceologiche omogenee, al momento della raccolta, o anche al momento del trattamento per la frazione organica, nonché a raggruppare i rifiuti di imballaggio separatamente dagli altri rifiuti urbani, a condizione che tutti i rifiuti sopra indicati siano effettivamente destinati al recupero”. (TU ambientale – art. 183)

Secondo l'articolo 205 del TU ambientale, deve essere assicurata una raccolta differenziata dei rifiuti urbani pari alle seguenti percentuali minime di rifiuti prodotti:

- Almeno il 35% entro fine 2006;
- Almeno il 45% entro fine 2008;
- Almeno il 65% entro fine 2012.

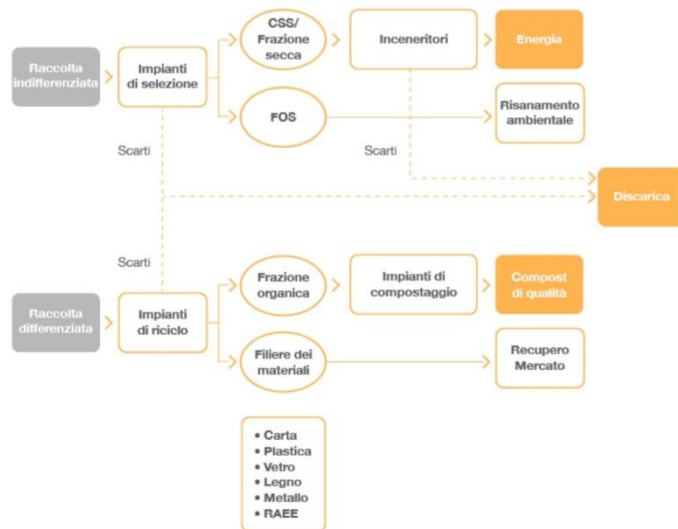
Non abbiamo ancora un Decreto Ministeriale che spieghi le metodologie ed i calcoli che ci portano a queste percentuali minime.

In Italia, la percentuale di raccolta è l'unico parametro di valutazione di un sistema di raccolta differenziata.



La prevenzione prevede tre principali azioni per poter diminuire la produzione dei rifiuti:

- L'utilizzo di LCA per la valutazione degli impatti della progettazione al fine vita per individuare azioni specifiche:
 - Ridurre inquinanti metallici;
 - Ridurre gli imballaggi favorendone il riciclo ed il riuso;
 - Introdurre tecnologie pulite per la riduzione di emissioni e rifiuti;
 - Aumentare il recupero dei materiali tramite il riciclaggio;
 - Ottimizzare l'uso delle risorse e dell'energia.
- Modificare comportamenti e procedure che possono contribuire a ridurre i consumi:
 - Impiegare di prodotto durevoli riutilizzabili e facilmente riparabili;
 - Limitazione dei prodotti usa e getta sostituendoli con altri riutilizzabili;
 - Sviluppo e utilizzo di nuove tecnologie per il risparmio di energia e risorse;
 - Favorire e l'utilizzo di prodotti con componenti riciclabili.
- Un'efficacia politica di prevenzione deve essere supportata da strumenti normativi, finanziari e negoziali:
 - Limitazione della formazione di alcune tipologie di rifiuti;
 - Imposizione di quote minime di utilizzo di materiali riciclati;
 - Incentivi finanziari per favorire il riutilizzo e recupero;
 - Ecotasse su prodotti non riutilizzabili né recuperabili;
 - Riequilibrio dei costi di smaltimento per favorire forme di recupero ecocompatibili.



I rifiuti sono un bene con prezzo negativo: siamo disposti a pagare per disfarcene (bene di demerito). Da questo concetto deriva il desiderio di ridurre la produzione di rifiuti per unità di costo. Vale la pena di fare la raccolta differenziata se:

$$C^{RD} + C^T + EXT^{RD} < C^{MP} + C^{IND} + C^S + EXT^{IND}$$

I risultati sono invece:

- La valorizzazione delle componenti merceologiche del rifiuto fin dalla raccolta;
- La riduzione di quantità e pericolosità dei rifiuti da avviare allo smaltimento indifferenziato;
- La minimizzazione degli impatti dei processi di trattamento e smaltimento;
- Recupero di materiali ed energia nella fase di trattamento finale;
- Promozione di comportamenti più corretti da parte dei cittadini;
- Cambiamento dei consumi a beneficio della politica di prevenzione.

Il **pretrattamento** è un tassello non essenziale dell'intera filiera di gestione dei rifiuti, la cui necessità va valutata caso per caso sulla base del contesto specifico di ciascuna realtà territoriale (ATO). Esso costituisce un aggravio energetico, economico ed ambientale, la cui necessità deve pertanto trovare adeguata giustificazione sulla base di considerazioni di tipo locale, normativo, logistico.

Il pretrattamento può essere distinto in pretrattamento leggero e in pretrattamento finalizzato alla produzione di **CSS** (combustibile solido secondario). Il CSS è un tipo di combustibile derivato dalla lavorazione dei rifiuti urbani non pericolosi e speciali non pericolosi.

Gli scopi del pretrattamento sono:

- La produzione di CSS a norma di legge, da utilizzare in co-combustione in impianti industriali o per la termovalorizzazione in forni dedicati;
- L'omogeneizzazione (operazione unitaria che rende una miscela eterogenea una miscela omogenea) delle caratteristiche del rifiuto prima della sua termovalorizzazione in un impianto dedicato;
- La riduzione del contenuto di umidità e della putrescibilità (decomposizione) del materiale, ai fini di una migliore gestione successiva (stoccaggio, trasporto).

Il CSS è "il combustibile solido, prodotto da rifiuti, che rispetta le caratteristiche di classificazione e di specificazione individuate dalle norme tecniche UNI CEN/TS 15359 e ss.mm.ii ..." (Art. 183, lettera cc, D.Lsg 152-2006). La norma CEN EN 15359:2001 definisce:

- La classificazione sulla base di tre parametri, ognuno dei quali può assumere cinque valori, per complessive 125 possibili tipologie di CSS.
- Le modalità per la specificazione obbligatoria e facoltativa delle altre proprietà del CSS.
- La metodologia di determinazione delle classi d'appartenenza per una certa produzione di CSS.
- La dichiarazione di conformità associata al CSS.

La produzione di CSS è fatta di due unità di processo:

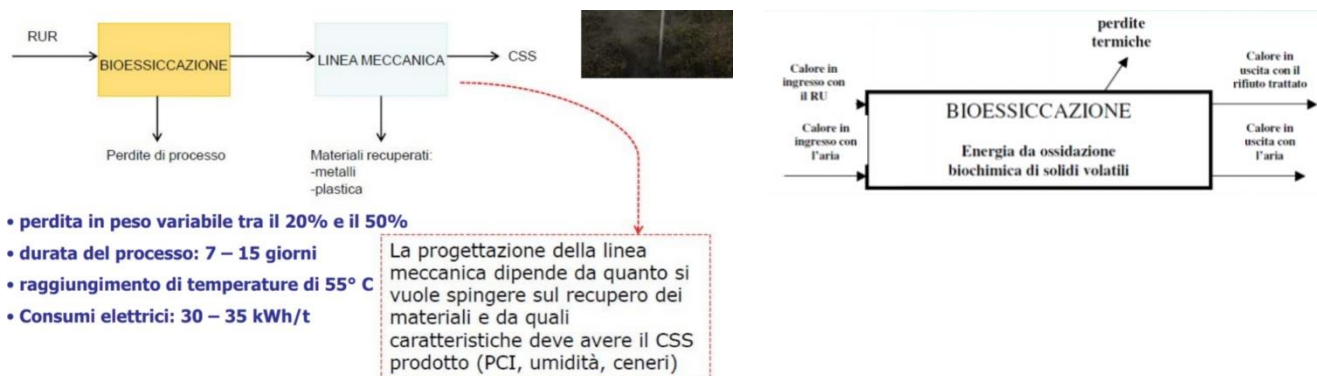
- Operazioni meccaniche:
 - Separare dal flusso principale il materiale fine (< 20 mm) costituito in varia misura da organico putrescibile e da inerti.
 - Produrre una frazione ad alto potere calorifico separando la frazione fine e la frazione organica putrescibile e con successivi trattamenti a norma di legge.
- Operazioni biologiche (trattamenti aerobici):
 - Stabilizzazione della frazione organica putrescibile (FOS, FOP)
 - Bioessiccazione del rifiuto.

Si parla in questo caso di Mechanical-Biological Treatment Plants (MBT)

Gli impianti di trattamento meccanico o meccanico-biologico (TMB) sono finalizzati a:

- Produrre un combustibile solido secondario da avviare a recupero energetico (in forni dedicati o in co-combustione in centrali a carbone o cementifici);
- Stabilizzare (=ritardare/impedire l'alterazione) la componente organica prima dello smaltimento in discarica;
- Recuperare materiali da avviare a riciclo.

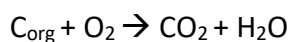
La progettazione dell'impianto è influenzata dalle caratteristiche del RUR, dall'obiettivo principale del trattamento (produzione CSS o recupero del materiale) e dalle peculiarità del sistema di gestione locale dei rifiuti.



Impianto a flusso unico: leggero trattamento meccanico di triturazione e separazione materiali + trattamento biologico

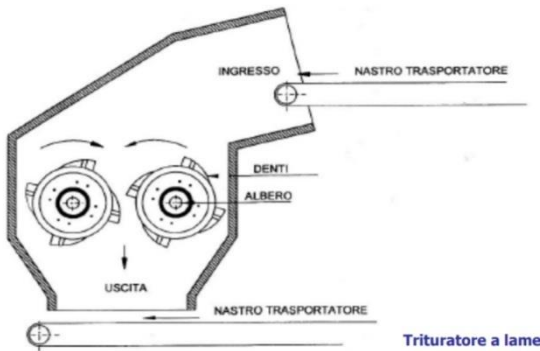
Nella gestione dei rifiuti il trattamento meccanico-biologico (TMB) è una tecnologia di trattamento a freddo dei rifiuti indifferenziati (e/o residui dopo la raccolta differenziata) che sfrutta l'abbinamento di processi meccanici a processi biologici quali la digestione anaerobica e il compostaggio. Appositi macchinari separano la frazione umida (l'organico da bioessicare) dalla frazione secca (carta, plastica, vetro, inerti, ecc.); quest'ultima frazione può essere in parte riciclata oppure usata per produrre combustibile derivato dai rifiuti (CDR) rimuovendo i materiali incombustibili.

La **bioessiccazione** è l'evaporazione di parte dell'umidità del rifiuto sfruttando il calore liberato dai processi di degradazione biologica aerobica:



Per la **triturazione**, che consiste nell'apertura di involucri, lo sminuzzamento, omogeneizzazione e la pezzatura, i macchinari utilizzati possono essere:

- Il mulino a coltelli, che lavora a bassa velocità;
- Il mulino verticale od orizzontale, i quali lavorano ad alta velocità.



Trituratore a lame

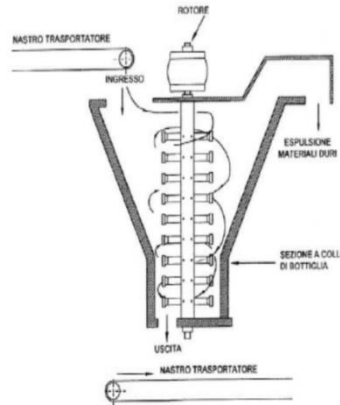
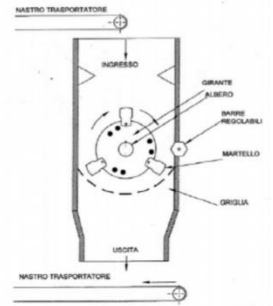
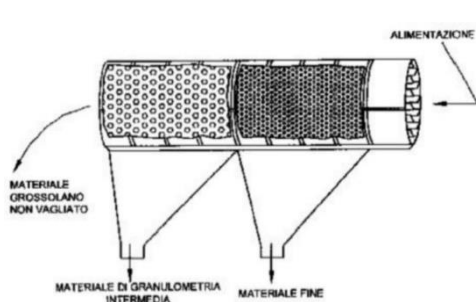


Fig. 50.25 - Frantoio a martelli ad asse orizzontale.

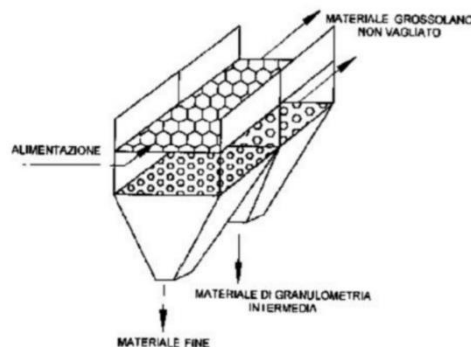


Inizia poi la **miscelazione**, la quale consiste nella diminuzione di densità del materiale in modo da aumentare l'aerazione. Dopodiché, inizia la **vagliatura**: essa consiste nella separazione del materiale in ingresso in flussi omogenei per dimensioni ed attitudine al trattamento (per RU frazione secca e frazione umida). Per questo passaggio, possono essere utilizzati:

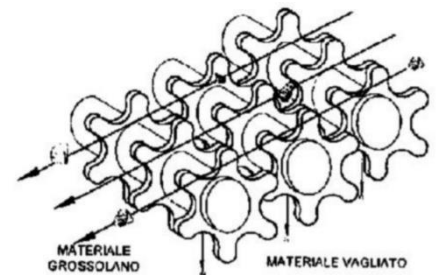
- Vaglio a tamburo rotante a doppia maglia
- Vaglio vibrante
- Vaglio a letto di stelle
- Classificatore aeraulico / ciclone separatore
- Classificatore aeraulico a coltello
- Classificatore aeraulico a letto fluido / separatore a conchlea
- Separatore a piano inclinato
- Separatore elettrostatico a martello
- Separatore balistico per differenza di elasticità
- Separatore balistico per differenza di densità
- Separatore ottico



Vaglio a tamburo rotante



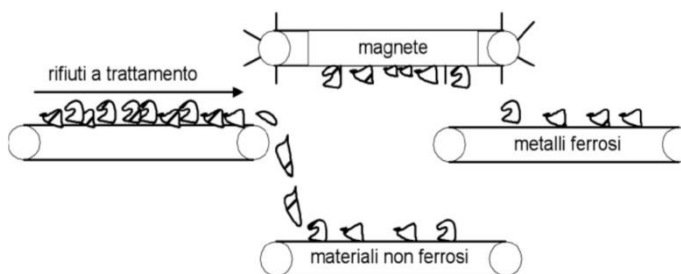
Vaglio vibrante



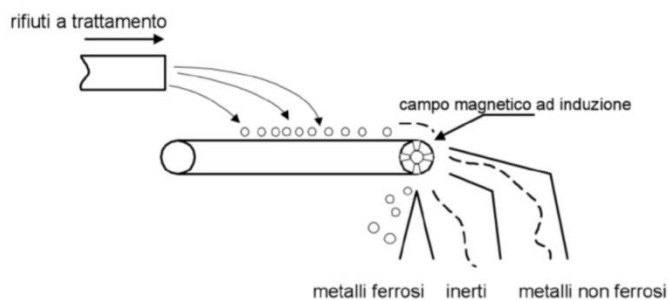
Vaglio a letto di stelle

La vagliatura coinvolge anche la separazione dei metalli, quindi la demetallizzazione/rimozione dei materiali ferrosi e non. Per questa procedura possono essere utilizzati:

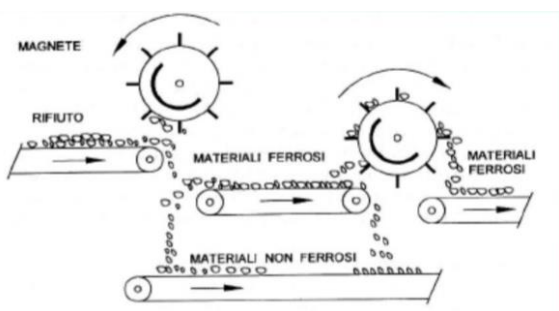
- Separatore magnetico a nastro
- Separatore magnetico a (doppio) tamburo
- Separatore a rullo induttore



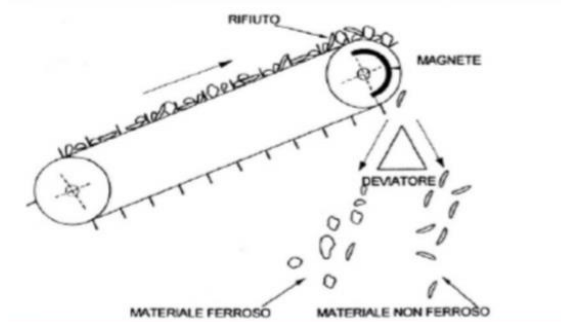
Separatore magnetico a nastro



Separatore a rullo induttore



Separatore magnatico a doppio tamburo



Separatore magnetico a tamburo

VAGLIATURA DEI RIFIUTI

I **vagli a tamburo** sono la tipologia di vagli di più diffuso impiego, per la loro elevata versatilità. Si distinguono in diversi modelli e taglie, a seconda della lunghezza, del diametro del tamburo, dell'inclinazione dell'asse, della velocità di rotazione e dell'apertura delle maglie. Il rifiuto viene immesso all'estremità più alta del cilindro (o tamburo); per effetto della rotazione e dell'inclinazione, il rifiuto viene rivoltato più volte e attraversa il cilindro per tutta la sua lunghezza, venendo più volte in contatto con la maglia del vaglio. Le particelle più minute (le dimensioni variano tra 2 e 10 cm, a seconda del diametro dei fori delle maglie) attraversano la parete del vaglio e vengono raccolte all'interno della tramoggia sottostante, mentre il materiale più grossolano, rimanendo all'interno del vaglio, raggiunge l'altra estremità del tamburo. Disponendo di seguito, lungo l'asse del cilindro, sezioni con maglie con dimensioni progressivamente crescenti, si separano frazioni di materiale a diversa granulometria. All'interno del cilindro possono essere presenti lame metalliche atte a consentire, ad esempio, la rottura dei sacchetti contenenti i rifiuti, migliorando pertanto le prestazioni dell'operazione di vagliatura.

di sega del condotto (la variazione di sezione causa un diverso regime di velocità). Tale variazione agevola la separazione delle particelle del rifiuto in funzione della diversa velocità di sedimentazione specifica di ognuna.

Per estrarre il materiale solido leggero trasportato dall'aria, si abbina solitamente ai classificatori un sistema a ciclone ed eventualmente un trattamento per mezzo di un filtro a maniche.

Il classificatore “**a coltello**” ha una configurazione dei flussi differente e si utilizza nel caso il materiale da trattare costituito da particelle con dimensioni relativamente uniformi. Il flusso di rifiuto entra nel separatore orizzontalmente tramite alimentatore a nastro, e inizia la propria caduta; viene violentemente attraversato da un getto d'aria inclinato verso l'alto che ne trascina con sé le componenti più leggere, spostandole più avanti, rispetto al senso di avanzamento orizzontale del materiale, mentre quelle più pesanti continuano la loro caduta. Due tramogge di raccolta, disposte a differente distanza, raccolgono due flussi di materiale, pesante e leggero, relativamente ben distinte.

Nei separatori aeraulici i flussi d'aria richiesti possono essere elevati, ciò implica consumi energetici non marginali. Sono adatti a flussi medi (inferiori a 15 tonnellate/ora).

I **separatori gravimetrici a letto fluido** del tipo “a secco” consistono in un piano vibrante poroso e leggermente inclinato (circa 5°), attraversato da un flusso d'aria. L'azione combinata di sostentamento data dall'aria e di vibrazione attribuito direttamente dal piano di appoggio, fa sì che si produca un effetto di fluidificazione e di stratificazione del rifiuto, in base alle differenti velocità di sedimentazione dei composti. Il materiale più leggero, tenuto in sospensione dal letto d'aria, si raccoglie nella parte bassa del piano, mentre le parti più pesanti vengono trascinate dalle vibrazioni verso la parte alta.

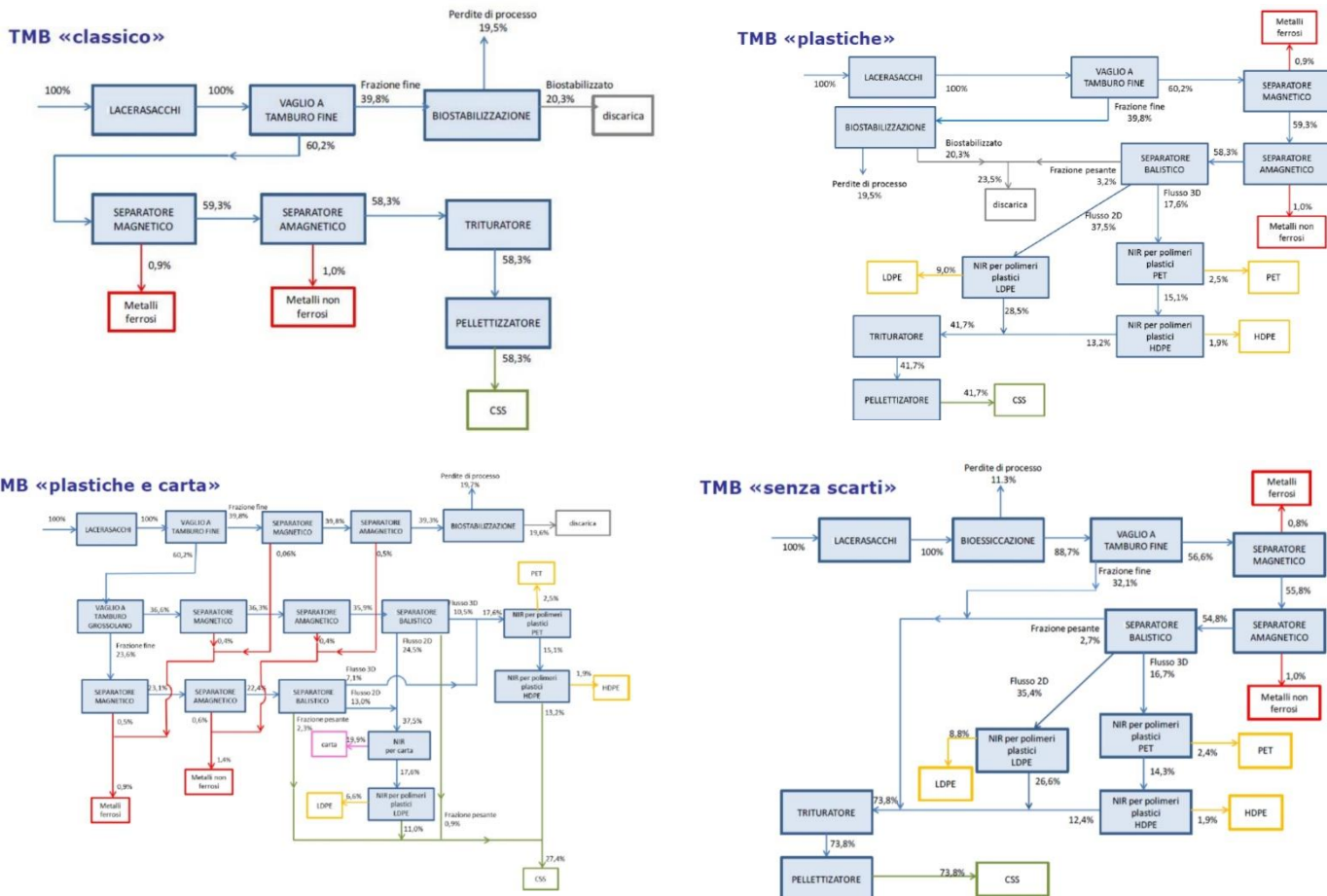
Nei separatori gravimetrici a letto fluido del tipo “ad umido”, oltre all'azione dell'aria e delle vibrazioni, è presente anche un fluido separatore (acqua mescolata a soluzioni saline oppure a polveri i magnesite e ferrosilicati). Il fluido, avendo una propria densità e peso specifico, si insinua tra le componenti del rifiuto determinando un'azione quasi “meccanica” di separazione tra le componenti più leggere del rifiuto stesso (che vengono sospinte verso la superficie) e quelle più pesanti (che invece sono fatte depositare sul piano sottostante).

I **separatori balistici** sono in grado di compiere la separazione delle parti del rifiuto trattato sfruttando le differenze di densità e di elasticità esistenti tra ciascuna di queste. In un separatore balistico che sfrutta le differenze di densità dei materiali il rifiuto da trattare viene caricato in un'apposita tramoggia e quindi prelevato in piccole quantità da un dispositivo rotante che ne impone una forte accelerazione proiettandolo al di sopra delle bocche di diverse tramogge poste alla base di una camera chiusa. La classificazione delle componenti avviene in base alla distanza raggiunta da ciascuna di esse a seguito del lancio: i materiali più leggeri percorrono una distanza minore, mentre quelli più pesanti seguono traiettorie più lunghe.

Un separatore balistico che sfrutta le differenze di elasticità tra i componenti del materiale trattato impiega un nastro trasportatore che, in moto ad alta velocità tra alcune pulegge, lancia il rifiuto contro una parete elastica costituita da un disco ricoperto di gomma e ruotante in un piano ortogonale alla direzione di lancio: a seguito dell'urto con la superficie del disco, le componenti del

LAYOUT DI IMPIANTI

È la simulazione di possibili schemi impiantistici TMB a servizio di una realtà caratterizzata da una raccolta differenziata dell'organico molto spinta (organico del RUR circa 14%). Il sovrvallo viene avviato a termotrattamento in un forno a griglia, mentre il sottovallo viene depositato in discarica in post stabilizzazione.



Analizzando i precedenti schemi, si capisce che:

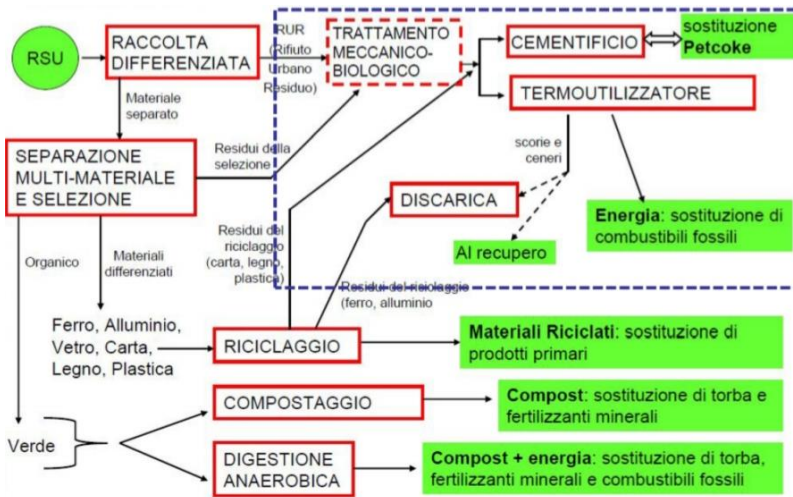
Flussi in uscita (%)	TMB classico	TMB plastiche	TMB plastiche e carta	TMB senza scarti
CSS	58,3	41,7	27,4	73,8
Scarto a discarica	20,3	23,5	19,6	-
metalli ferrosi	0,9	0,9	0,9	0,8
metalli non ferrosi	1,0	1,0	1,4	1,0
PET	-	2,5	2,5	2,4
HDPE	-	1,9	1,9	1,9
LDPE	-	9,0	6,6	8,8
carta	-	-	19,9	-
Totale dei materiali avviati a recupero	1,9	15,3	33,3	14,9
Perdite di processo	19,5	19,5	19,7	11,3
Consumi energetici (kWh/t _{RUR})	50,5	52,6	50,2	70,1

	TMB classico		TMB plastiche		TMB plastiche e carta		TMB senza scarti	
	Eff. di recupero	Purezza	Eff. di recupero	Purezza	Eff. di recupero	Purezza	Eff. di recupero	Purezza
Rottami ferrosi	74,4	80	74,4	80	80	80	73,2	80
Rottami non ferrosi	61,9	90	61,9	90	89,8	90	60,9	90
PET	-	-	53,7	90	53,7	90	52,1	90
HDPE	-	-	55,0	90	55,0	90	53,3	90
LDPE	-	-	59,7	75	43,7	75	57,9	75
Carta	-	-	-	-	56,4	80	-	-

Efficienza di recupero: valutata sul quantitativo di materiale presente nel RUR in ingresso all'impianto

Purezza: indica la percentuale di materiale effettivamente avviabile a riciclo

Scenari impiantistici	Umidità (%)	ceneri (%)	PCI (kJ/kg)
TMB classico	17,4	10,4	17875
TMB plastiche	18,4	8,3	17572
TMB plastiche e carta	19,3	11,1	17190
TMB senza scarti	24,4	16,3	13312

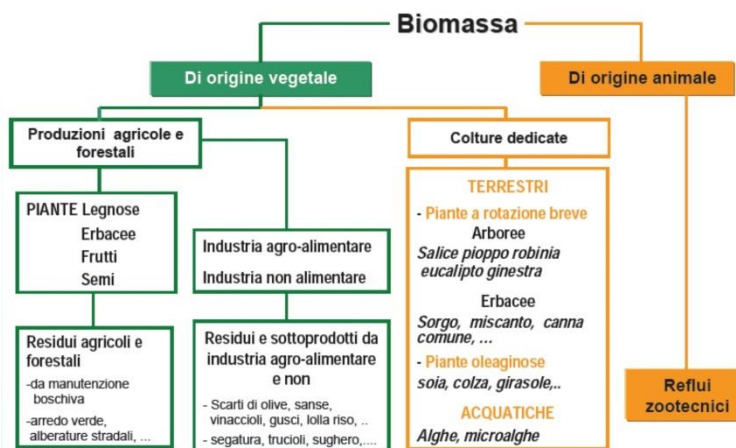


In Italia la situazione è in evoluzione e ancora non ben definita.

La resa di produzione del CSS e il bilancio energetico complessivo variano molto e sono fortemente dipendenti dal processo adottato. L'impatto ambientale è comparabile a quello della termovalorizzazione diretta dei RSU.

I RIFIUTI ORGANICI ED I TRATTAMENTI AEROBICI (LEZIONE 3, PROFESSORESSA FINO)

La biomassa è qualsiasi sostanza di matrice organica, di origine vegetale o animale, destinata a fini energetici o alla produzione di ammendante agricolo. Sono quindi biomasse tutti i prodotti delle coltivazioni agricole e della forestazione, compresi i residui della lavorazione agricola e della silvicoltura, gli scarti dei prodotti agro-alimentari destinati all'alimentazione umana o alla zootecnica, i residui non trattati chimicamente dell'industria della lavorazione del legno e della carta, tutti i prodotti organici derivanti dall'attività biologica dell'uomo e degli animali.

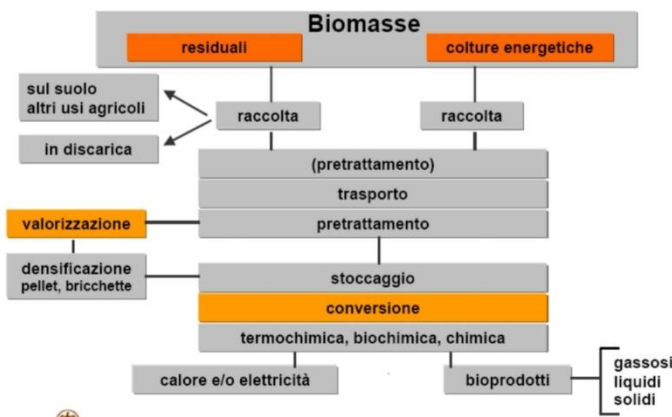


Le biomasse possono avere origine dai residui organici, come scarti industriali o di lavorazione forestale o di agricoltura, o dalle colture energetiche.

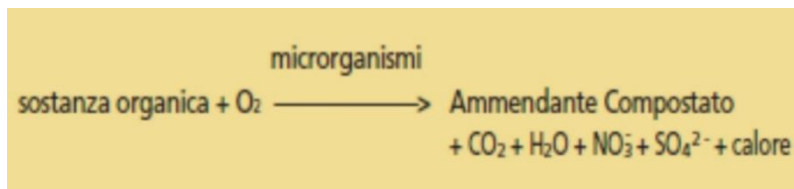


composti organici in composti ad alto peso molecolare. La maturazione secondaria, della durata di 30 giorni, viene condotta su un'area pavimentata e coperta.

5. **Raffinazione del compost:** l'impianto opera l'ultima suddivisione del materiale risultante in: compost raffinato destinato allo stoccaggio in area scoperta; scarti da riciclare; scarti da avviare in discarica.
6. **Stoccaggio finale:** il compost raffinato viene stoccato in un'area scoperta, pavimentata e provvista di rete drenante per la raccolta dell'acqua piovana e dell'eventuale percolato residuo.
7. **Opere di protezione ambientale.**



Il materiale viene quindi sottoposto a trattamenti biologici aerobici, attraverso la seguente reazione:



Il risultato è un materiale stabilizzato/igienizzato/mineralizzato.

Il compostaggio riproduce quindi, in forma accelerata, il processo naturale di decomposizione delle sostanze organiche biodegradabili da parte di macro e microrganismi, che evolve attraverso uno stadio termofilo e porta alla stabilizzazione ed umificazione della sostanza organica.

Il processo deve essere condotto in modo da assicurare:

- Il controllo dei rapporti di miscelazione e delle caratteristiche chimico-fisiche delle matrici organiche di partenza.
- Il controllo della temperatura di processo.
- Un apporto di ossigeno sufficiente a mantenere le condizioni aerobiche della massa.

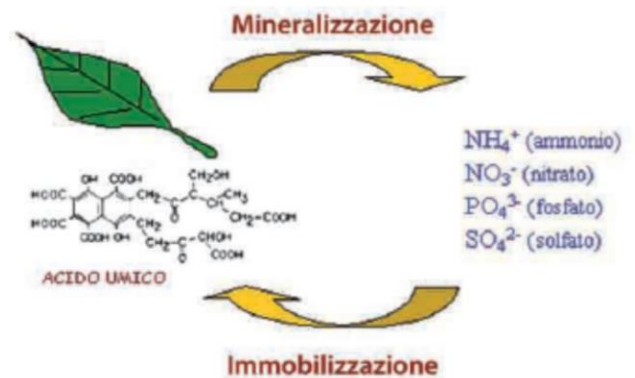
Nell'impianto i rifiuti organici subiscono prima bio-ossidazione accelerata mediante rivoltamento e/o aerazione, cui segue la maturazione. Il materiale grezzo viene sottoposto a vagliatura. Il prodotto finale è il **compost**, una miscela di sostanze umificate. La temperatura deve essere mantenuta per almeno tre giorni oltre i 55°C.

Le caratteristiche di un prodotto stabile sono:

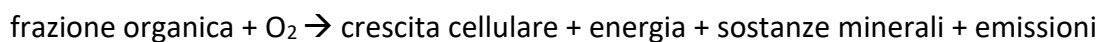
- Nel suolo agricolo, esso non produce più metaboliti (intermedi di degradazione) ad effetto fitotossico, né consuma ossigeno, necessario per la trasformazione delle componenti fresche, sottraendolo alle piante;
- In discarica non comporta massicci processi di degradazione anaerobica a carico delle componenti organiche facilmente biodegradabili di cui la biomassa fresca è invece ricca.

La igienizzazione consente di debellare i fitopatogeni presenti nei residui vegetali, impedendo che il compost ne diventi vettore, nonché i patogeni umani eventualmente presenti nei materiali di scarto. Va notato che la igienizzazione avviene sicuramente, oltre che per pastorizzazione termica, anche per perdita progressiva delle caratteristiche biochimiche 'ospitali' nei confronti della microflora patogena da parte dei vari materiali di scarto.

FASI DEL COMPOSTAGGIO



Il processo di stabilizzazione biologica aerobica può essere così semplificato:



I FASE

L'iniziale decomposizione del substrato è dovuta all'intervento di specie microbiche mesofile (25-35°C) che utilizzano rapidamente i composti solubili e facilmente degradabili. Il calore prodotto dal metabolismo di questi organismi rimane intrappolato nella matrice in trasformazione a causa della scarsa conducibilità di quest'ultima. A seguito del progressivo accumulo di calore, la temperatura del substrato comincia a salire, superando ben presto la soglia della termofilia. Appena la temperatura si porta sopra i 40°C, i microrganismi mesofili divengono meno competitivi e sono perciò progressivamente sostituiti da specie termofile.

II FASE

Dopo un piccolo periodo di ritardo si ha l'inizio della crescita di una popolazione termofila di microrganismi. Il range di temperatura ottimale in cui si sviluppano questi microrganismi è tra i 55 e 65°C. Durante questo stadio, le alte temperature accelerano la degradazione di proteine, grassi e carboidrati complessi quali cellulosa ed emicellulosa, che rappresentano due tra i più importanti

FATTORI CHE INFLUENZANO IL PROCESSO

Una serie di fattori fisico-chimici e le specifiche caratteristiche del substrato condizionano l'andamento delle reazioni biologiche che realizzano la stabilizzazione biologica aerobica.

La concentrazione di ossigeno e l'aerazione

I microrganismi che compiono la degradazione biologica del substrato consumano notevoli quantità di ossigeno. Durante i primi giorni del processo, le componenti più facilmente degradabili del substrato organico sono rapidamente metabolizzate. Il bisogno di ossigeno e, di conseguenza, la produzione di calore sono perciò decisamente maggiori nei primi stadi della biostabilizzazione, mentre decrescono con l'evolversi del processo.

Nel caso in cui l'apporto di ossigeno sia limitato, la stabilizzazione rallenta. Anche se una concentrazione minima di ossigeno del 5% nell'atmosfera circolante tra le particelle della biomassa può consentire la stabilizzazione biologica aerobica, per la gestione ottimale del processo, dovrebbero essere garantite, nella matrice, concentrazioni di O₂ non inferiori al 10%.

Senza una sufficiente ossigenazione la microflora microbica anaerobica prende il sopravvento, portando all'accumulo di composti ridotti (ad esempio acidi grassi volatili, idrogeno solforato, mercaptani, ecc.), caratterizzati da odore decisamente aggressivo e da elevata fitotossicità.

L'aerazione del materiale in biostabilizzazione, per garantire l'apporto di ossigeno necessario al processo, rende inoltre possibili la dissipazione del calore, l'eliminazione del vapor d'acqua e l'allontanamento di altri gas intrappolati nell'atmosfera interna del substrato. In effetti, il tasso di aerazione richiesto per la rimozione del calore può essere anche dieci volte maggiore di quello necessario per l'apporto di ossigeno. Di conseguenza è la temperatura che normalmente determina l'estensione e la frequenza degli interventi di aerazione.

Temperatura

Di solito, nel caso di matrici putrescibili, la fase di stabilizzazione attiva si svolge a temperature comprese tra 45 e 70 °C.

Le temperature termofile sono importanti per la distruzione degli eventuali organismi patogeni associati alla biomassa-substrato di partenza. Il limite fissato per la disattivazione dei patogeni umani è 55 °C. Questa temperatura è in grado di abbattere anche la maggior parte degli organismi fitopatogeni, mentre, per i semi delle erbe infestanti, sono necessarie temperature non inferiori a 60°C.

Il metabolismo microbico durante la stabilizzazione biologica aerobica rilascia una grande quantità di energia sotto forma di calore. Le proprietà auto-coibenti dei materiali avviati a biostabilizzazione favoriscono l'accumulo di calore, il quale, a sua volta, provoca l'innalzamento della temperatura.

Alla stesso tempo, la biomassa in trasformazione perde continuamente calore grazie alla evaporazione dell'acqua ed ai movimenti d'aria che rimuovono il vapore acqueo (ed i gas caldi) dal substrato.

Rapporto Carbonio/Azoto	
Scarti di cibo	15:1
Segatura, carta, legno	400:1
Paglia	80:1
Sfalci d'erba	15:1
Foglie	50:1
Scarti di frutta	35:1
Letame fresco	20:1
Stocchi di mais	60:1
Fieno di medica	12:1

Le proprietà fisico-meccaniche del substrato

La porosità, la struttura e la tessitura sono correlate con le proprietà fisiche dei materiali quali la pezzatura, la forma e la resistenza meccanica, e condizionano il processo di biostabilizzazione attraverso l'influenza esercitata sull'aerazione.

Queste proprietà possono essere corrette per mezzo di operazioni di triturazione e sminuzzamento dei substrati di partenza o mediante la miscelazione di questi con matrici definite agenti di supporto (bulking agents).

La porosità è una misura degli spazi vuoti nel substrato in biostabilizzazione e determina la resistenza alla circolazione dell'aria. Essa dipende dalla dimensione delle particelle, dalla distribuzione granulometrica dei materiali e dalla continuità degli interstizi tra le particelle.

La struttura indica la rigidità delle particelle, vale a dire la resistenza delle stesse a collassare e compattarsi e, pertanto, un buon grado di struttura previene la perdita di porosità del substrato umido, sistemato in quantità critica (in cumulo o in reattore) per il processo.

La tessitura è la caratteristica che descrive l'area superficiale del substrato disponibile per l'attività microbica aerobica. La decomposizione procede dalla superficie delle particelle del substrato, dato che l'ossigeno diffonde facilmente attraverso gli spazi vuoti delimitati dalle particelle, ma molto più lentamente attraverso la fase liquida o i materiali solidi. Così i microrganismi aerobi si concentrano nel sottile strato acquoso che contorna le particelle del substrato, utilizzando l'ossigeno all'interfaccia tra la fase liquida e la fase gassosa degli interstizi.

Poiché l'estensione dell'area superficiale aumenta con la riduzione della pezzatura il tasso di decomposizione aerobica si innalza in una matrice organica quanto più piccole sono le dimensioni delle particelle. Particelle troppo piccole però rischiano di compromettere la porosità ed è quindi necessario trovare una situazione di compromesso.

Il pH

La stabilizzazione biologica aerobica è relativamente poco sensibile al pH dei substrati di partenza; ciò in ragione dell'ampio spettro di microrganismi associati ai substrati stessi e coinvolti nelle reazioni di processo.

Un prodotto molto utilizzato dagli agricoltori biologici il litotamnio, una polvere finissima costituita dagli scheletri calcarei di alghe marine microscopiche depositatisi in tempi remoti, composto in prevalenza da carbonato di calcio, ma contenente anche altri nutrienti e microelementi di grande utilità.

Farine di roccia

La bentonite è una farina d'argilla. L'apporto di argilla è particolarmente indicato per migliorare la struttura di terreni leggeri e sabbiosi, il suo impiego nel compostaggio risponde a diverse ed importanti esigenze:

- È in grado di trattenere le forme minerali dell'azoto, in particolare l'ammoniaca, impedendone la perdita per lisciviazione o per volatilizzazione;
- Lega i cattivi odori che si possono formare durante la fermentazione;
- Trattiene l'acqua mantenendo umido l'interno del compost;
- Le particelle di argilla, insieme ai composti umici, formano sostanze particolarmente stabili chiamate complessi argillo-umici, le quali posseggono caratteristiche fisiche e strutturali ottimali per il terreno ed hanno grande capacità di trattenere gli elementi nutritivi per le piante.

La bentonite può venire addizionata nella dose di 5 kg per metro cubo di compost.

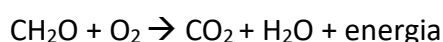
Le fosforiti sono rocce sedimentarie derivanti dal deposito di organismi marini. Il loro interesse consiste nell'elevato tenore in fosforo; questo è presente come fosfato tricalcico insolubile che, se aggiunto in fase di allestimento del cumulo, viene solubilizzato dagli acidi organici prodotti dai microrganismi, che lo rendono infine disponibile per le piante. L'utilizzo dei fosforiti permette quindi di elevare il potere fertilizzante del compost.

ASPETTO METABOLICI DELLE REAZIONI DEI COMPOSTI ORGANICI

Nel corso della stabilizzazione biologica aerobica, i microrganismi degradano le diverse sostanze che compongono la matrice organica di partenza, al fine di ottenere energia per le reazioni cataboliche e materiale per le sintesi cellulari. Di pari passo, nel corso del processo, avvengono anche importanti biotrasformazioni, attraverso le quali alcuni composti intermedi derivanti dalla degradazione di materiali a struttura polimerica (ad esempio la cellulosa e la lignina) sono utilizzati per la sintesi di nuove sostanze complesse ma profondamente diverse da quelle iniziali (ad esempio gli acidi umici).

Affinchè i microrganismi possano sintetizzare nuovo materiale cellulare, deve rendersi disponibile sufficiente energia per i processi biosintetici. Le due possibili vie metaboliche per la produzione di energia a disposizione dei microrganismi eterotrofi sono la respirazione e la fermentazione.

Nella respirazione aerobica, i microrganismi usano ossigeno molecolare (O₂) per liberare la maggior parte dell'energia dal substrato carbonioso, con formazione di anidride carbonica (CO₂) ed acqua:



Pretrattamenti

In base alla tipologia di rifiuti si prevedono una serie di operazioni di pre-trattamento che possono prevedere la triturazione dei rifiuti e la preparazione della miscela per alimentare la linea di processo.

E' ovvio che le macchine destinate alla frantumazione ed allo sminuzzamento di materiali ligno-cellulosici dovranno vincere la resistenza meccanica elevata di queste matrici. In questi casi, si ricorrerà a trituratori a dischi uncinati, a mulini a martelli, a trituratori a tramoggia rotante. E' da notare che queste macchine sono tutte caratterizzate da un elevato numero di giri degli elementi frantumatori o di taglio.

Quando invece una matrice organica presenta scarsa resistenza ed elevato contenuto di umidità, se sottoposta ad energica sollecitazione meccanica, tende inevitabilmente a trasformarsi in poltiglia, addirittura, in una sorta di purea. In tali circostanze è necessario ricorrere a macchine del tipo sminuzzatori a pettini fissi su nastri convogliatori ovvero a dilaceratori a coltelli rotanti a basso numero di giri.

La *miscelazione* si rende necessaria per omogeneizzare le caratteristiche del materiale in ingresso al processo rendendolo il più idoneo possibile all'azione dei microrganismi, assicurando le giuste condizioni di porosità, densità apparente ed umidità. La miscelazione viene effettuata con pala meccanica o con miscelatori e vede protagonisti diversi materiali che conferiscono caratteristiche nutritive (fanghi, deiezioni animali, FORSU, i quali contengono P, K, N e C) con scarti ligno-cellulosi per le caratteristiche strutturali. Prima di essere miscelato, il materiale viene triturato.

N.B. La FORSU è la Frazione Organica del Rifiuto Solido Urbano ed è il materiale raccolto dalla raccolta differenziata dell'organico. Si tratta di residui di cibo o preparazioni alimentari e frazioni assimilabili, come carta per alimenti sporca. La FORSU costituisce il 30-40% in peso dei rifiuti solidi urbani. Il suo compostaggio avviene a 70°C.

Trattamenti biologici

Le due fasi di bioossidazione e maturazione vengono solitamente effettuate in maniera distinta e dunque i sistemi utilizzati sono diversi:

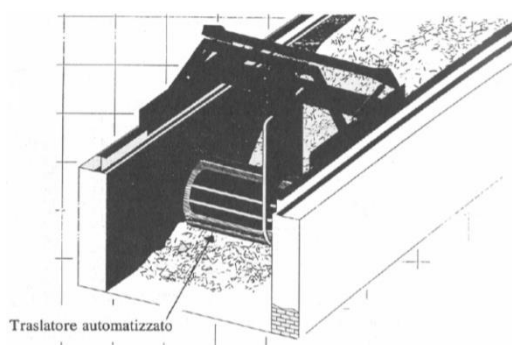
- Bioossidazione: accelera la trasformazione mediante l'ottimizzazione dei principali parametri di processo (ossigeno, temperatura, umidità) e riduce l'impatto ambientale.
- Maturazione: controlla il processo per bilancio ottimale fra contenuto organico e stabilità chimica.

La tecnologia utilizzata per la fase di bioossidazione accelerata è quella che caratterizza l'impianto e dipenderà da:

- Tipologia di rifiuto:
 - Umidità
 - Densità
 - Stabilità strutturale
 - Putrescibilità
- Condizioni locali:

Soni alti, quindi, icosi di investimento e di gestione (rispetto ai sistemi aperti) adottati per dimensioni medio-grandi.

Le **corsie** o **bacini** sono comparti delimitati da muratura, serviti da macchine rivoltatrici automatizzate e da sistemi di aerazione. I **bioreattori** possono essere semplici vasche aperte, moduli orizzontali o verticali chiusi, circolari o parallelepipedi, rotanti o statici, dotati o meno di sistemi di movimentazione o aerazione forzata delle masse. I **biotunnel** sono simili alle corsie, ma chiusi su tutti i lati.



Corsie a ciclo continuo

Il principio è quello del rivoltamento delle masse con trasferimento del materiale, mediante macchine rivoltatrici automatizzate che procedono lungo lo sviluppo di corsie delimitate da pareti in muratura.

Ad ogni passaggio (effettuato sempre nello stesso senso di marcia) tutto il materiale viene trasferito lungo la corsia e in tal modo la miscela, introdotta ad una estremità della stessa, definita zona di alimentazione, dopo un determinato numero di rivoltamenti giunge alla estremità opposta, indicata come zona di scarico, avendo subito una prima stabilizzazione biochimica che ne rende possibile il trattamento in cumulo all'aperto (maturazione).

La lunghezza della corsia è funzione del tempo di permanenza e del numero di rivoltamenti previsti: stabilita la durata della fase accelerata (ad es. 24 giorni) ed il conseguente n° di movimentazioni (ad es. 20 in 24 giorni, domeniche escluse) e nota la lunghezza di traslazione (ad es. 3 m), la corsia misurerà 60 m (3x20 m). La quantità di materie prime in ingresso (dato giornaliero medio) determina il numero di corsie necessarie (100 m³/giorno totale; 20 m³/giorno per corsia -> 5 corsie).

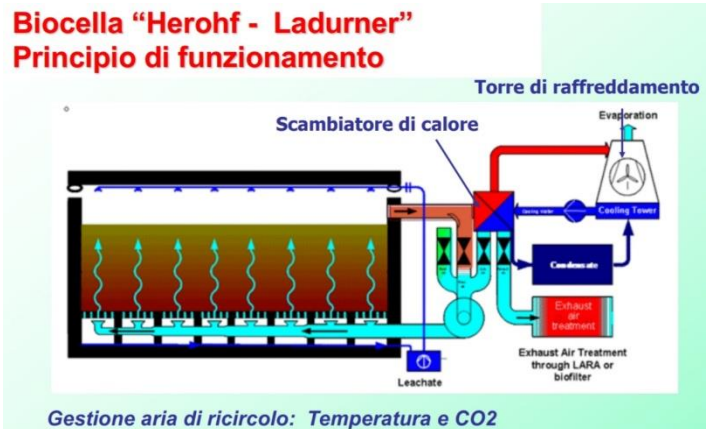
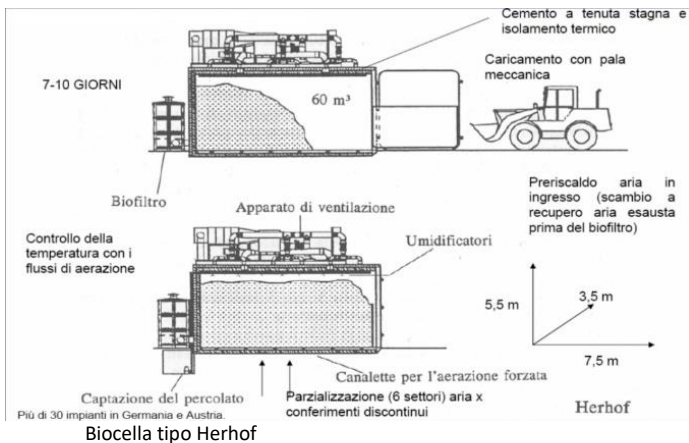
L'ossigenazione delle masse in trasformazione è garantita dai rivoltamenti meccanici e, nella maggior parte dei casi, anche da aerazione forzata attraverso canalette grigliate poste sui fondi delle corsie.

Il capannone che ospita le corsie è dotato di aspirazione dell'aria avviata a trattamento.

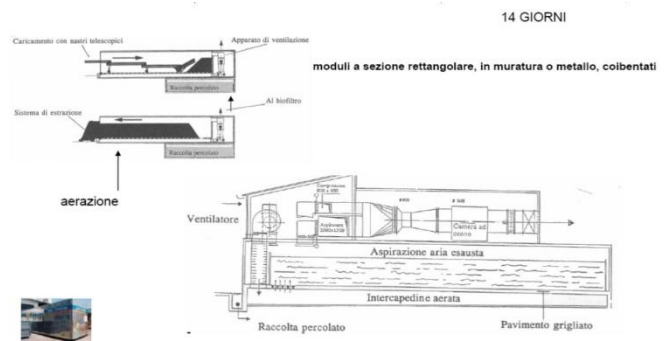
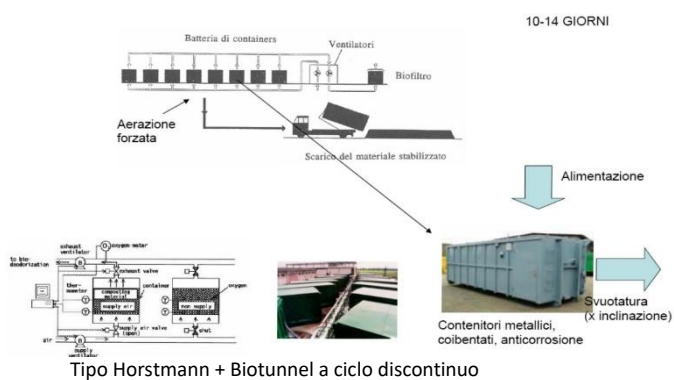
settori che permettono la parzializzazione dell'aerazione ed il funzionamento della cella anche nel caso di conferimenti discontinui;

- l'aria esausta viene prelevata nella parte alta della cella tramite ventilatori e inviata ad uno scambiatore di calore aria-aria, ad uno scambiatore di calore aria-acqua ed infine ad un biofiltro prima di essere immessa in atmosfera. Il flusso gassoso viene monitorato per i parametri sottoposti a limite.

Il raffreddamento dell'aria esausta permette di separare le sostanze odorigene solubili, mentre l'acqua di condensa può essere trattata e reimpiegata per l'umidificazione delle masse. L'acqua riscaldata non ha utilizzo (potrebbe essere usata per riscaldamento degli edifici). Il preriscaldamento dell'aria in ingresso in essere utile soprattutto nei periodi freddi per abbreviare la fase di latenza.



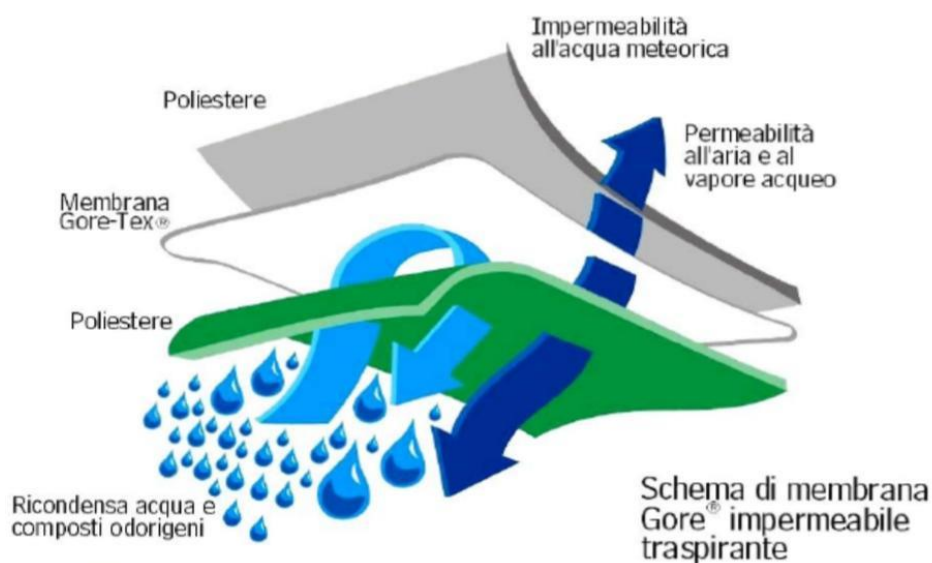
Abbiamo altri tipi di biocelle: tipo Thoni, statiche Ecomaster, tipo Horstmann, biotunnel a ciclo discontinuo ecc.



La tecnologia **Bioe**[®] utilizza un telo in Gore-Tex[®] per la copertura del materiale organico da bio-ossidare. Il telo ha la funzione di mantenere all'interno del cumulo le condizioni ideali per i processi di degradazione aerobica insieme ad un sistema software di controllo e gestione dei parametri di funzionamento (aerazione forzata). Il trattamento avviene in zone autonome, ognuna dotata di muri di contenimento del materiale, che semplificano le operazioni di copertura con il telo.

I diffusori di aria sono posti nel pavimento delle zone di trattamento da dove si asporta anche l'eventuale percolato. Il processo è controllato tramite un computer che registra i principali parametri inviati in continuo da ogni cumulo, rilevati da specifiche sonde (T, O₂, pH, u) a contatto con il materiale.

Nel processo Bioe[®] sono sfruttate le capacità del Gore-Tex[®] di essere impermeabile sia all'acqua meteorica sia a quella condensata sul telo all'interno del cumulo. Nello stesso tempo però il vapore d'acqua può traspirare dall'interno verso l'esterno. Il telo di Gore-Tex[®] ha inoltre la proprietà di filtraggio delle sostanze odorose riducendo l'impatto senza un'ulteriore attrezzatura di abbattimento.



Sistemi impiantistici per la maturazione

Sebbene sia possibile prevedere per i cumuli di maturazione sia il rivoltamento periodico che l'insufflazione forzata di aria, in molti casi si cerca di rendere meno onerosa questa fase operando in cumuli statici ad aerazione passiva, cioè basata sui soli moti convettivi dell'aria dall'esterno all'interno della matrice.

In tali condizioni, l'altezza dei cumuli di finissaggio non dovrebbe mai superare i 2,5 m di altezza, con materiali sufficientemente porosi e 1,8 m con matrici più fini e compatte ovvero quando il compost sia destinato ad impieghi intensivi in ambito orto-floro-vivaistico. La larghezza dei cumuli dovrebbe invece essere compresa tra 4,5 e 6 m.

Il ristagno di umidità alla base dei cumuli costituisce una delle cause principali dell'insorgenza delle condizioni di anaerobiosi non desiderate. Poiché i cumuli di materiale stabilizzato in finissaggio non hanno la capacità di produrre calore sufficiente per consentire l'evaporazione dell'acqua in eccesso derivante dalle precipitazioni atmosferiche, è buona norma sistemare la matrice su piazzali pavimentati, dotati di sistema di drenaggio.

Sebbene l'insorgenza di emissioni maleodoranti sia di solito associata al crearsi di condizioni anossiche all'interno della matrice in compostaggio, anche la corretta evoluzione delle reazioni di stabilizzazione, secondo le vie della degradazione aerobica, genera odori. Ciò è particolarmente vero per quel che riguarda la volatilizzazione dell'ammoniaca.

La decomposizione delle proteine porta infatti alla formazione di ammoniaca o di ammonia attraverso il processo noto come ammonificazione. La tensione di vapore dell'ammoniaca (NH₃) è bassa e, di conseguenza questa volatilizza facilmente anche a basse temperature.

Tabella - Composti ritenuti maggiormente responsabili delle emissioni di odori presso gli impianti di compostaggio

Composti contenenti zolfo	
Idrogeno solforato Ossisolfuro di carbonio Disolfuro di carbonio Dimetil solfuro	Dimetil disolfuro Dimetil trisolfuro Metantiolo Etantiolo
Composti contenenti azoto	
Ammoniaca Aminometano Dimetilamina	Trimetilamina 3-metilindolo (scatolo)
Acidi grassi volatili	
Acido formico Acido acetico Acido propionico	Acido butirrico Acido valerico Acido iso-valerico
Chetoni	
Propanone (acetone) Butanone	2-pentanone
Altri composti	
Benzothioazolo Etanale (acetaldeide)	Fenolo

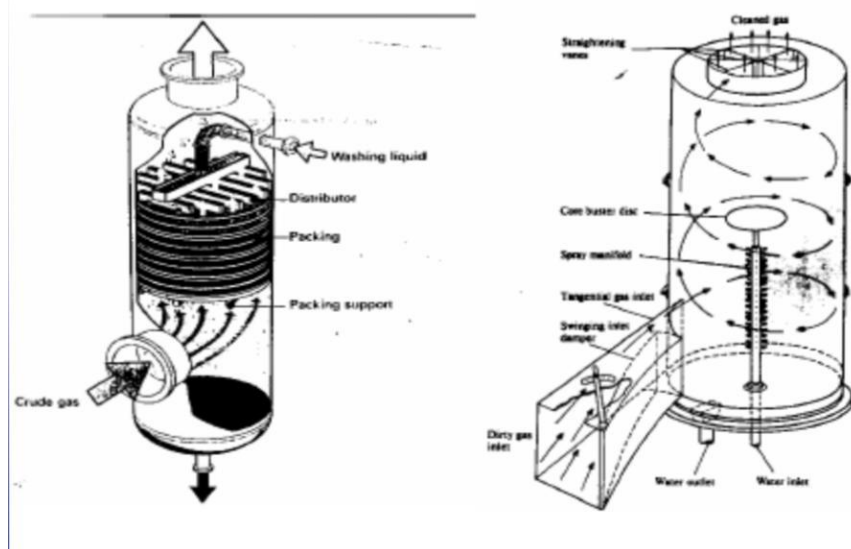
Fonte: Williams & Miller, 1992a.

I sistemi di prevenzione basati sulla gestione della filiera di trasformazione consiste nel/nella:

- riduzione dei tempi di stazionamento delle matrici in ingresso sui piazzali di scarico e di stoccaggio transitorio;
- conferimento del materiale all'impianto senza creare accumuli di matrice fresca che non sia immediatamente preparata per la fase di compostaggio attivo;
- un pronto allestimento dei cumuli ovvero il rapido trasferimento della biomassa substrato nell'eventuale bioreattore;
- la verifica che la matrice in fase di compostaggio attivo sia nelle condizioni ottimali di aerazione, tali da evitare il formarsi di zone anaerobiche;
- l'attuazione degli eventuali turni di rivoltamento della biomassa substrato in coincidenza con venti favorevoli alla rapida diluizione e dispersione delle emissioni odorigene in direzione opposta a quella degli insediamenti civili;
- assicurare, laddove il compostaggio avvenga in cumuli statici, la copertura degli stessi con uno strato superficiale (5-10 cm) di compost maturo;
- evitare la formazione di ristagni di percolato alla base dei cumuli o al fondo del bioreattore;
- il confinamento della fase attiva di compostaggio in strutture chiuse, la cui aria possa essere captata e convogliata in speciali apparati di trattamento dei composti odorigeni.

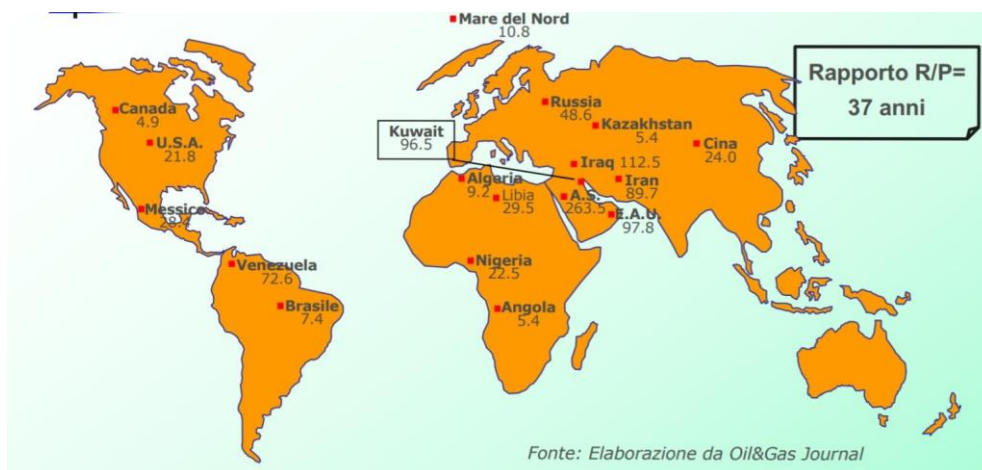
Gli scrubbers ad umido si basano sull'impiego di soluzioni di lavaggio per rimuovere i composti odorigeni presenti nel flusso gassoso, mediante assorbimento e successiva ossidazione di queste sostanze. Esiste una vasta gamma di scrubbers. Nei sistemi costituiti dalle cosiddette torri impaccate, il liquido di lavaggio viene ripartito in film sottile che si muove lentamente sulla superficie del mezzo di riempimento. L'aria da trattare è, di solito, introdotta dal fondo della torre e fluisce verso l'alto attraverso il materiale di riempimento, in controcorrente rispetto alla soluzione di lavaggio. Quest'ultima viene normalmente ricircolata per minimizzarne il consumo.

Negli scrubbers cosiddetti a nebbia, invece, la soluzione di lavaggio è atomizzata in goccioline finissime le quali sono disperse, all'interno di una camera di contatto, attraverso il flusso d'aria oggetto di trattamento. Le goccioline caricate dei composti odorigeni precipitano al fondo della camera, dalla quale il liquido di lavaggio accumulatosi viene continuamente rimosso. In taluni casi, sono stati proposti i cosiddetti scrubbers a stadi multipli, nei quali il flusso gassoso da trattare viene sottoposto a lavaggi con soluzioni diverse, mirate all'abbattimento differenziato dei vari composti odorigeni.

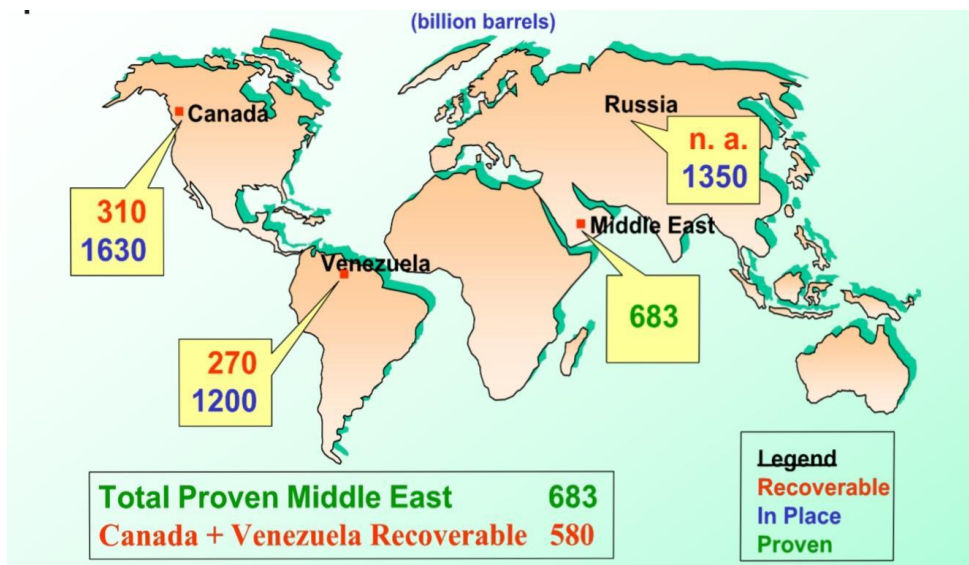


DIPENDENZA E SICUREZZA ENERGETICA (LEZIONE 4 – PROFESSORESSA FINO)

Il “serbatoio energetico” del nostro pianeta consiste in: petrolio, gas naturale, carbone e bitumi.



Petrolio



Bitumi e Tar Sands

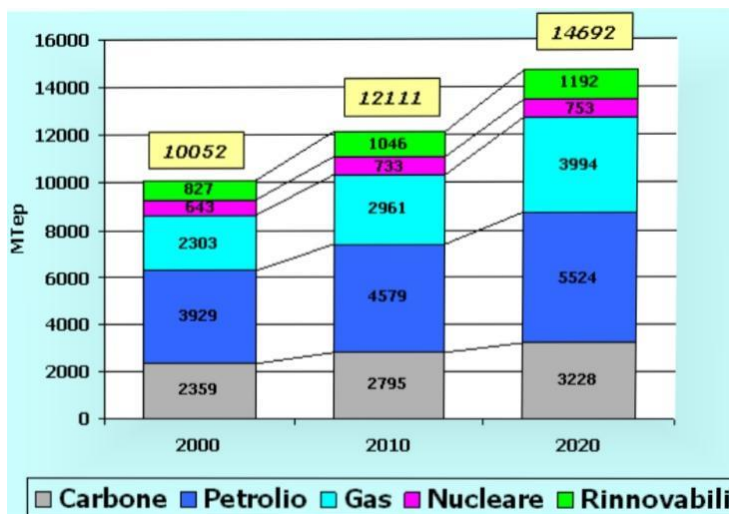
Le riserve individuate di “oli non convenzionali” sono 4 volte superiori rispetto alle riserve provate di petrolio. Fattori geopolitici ed economici sollecitano lo sviluppo di queste fonti.

Il **bitume** è una miscela di idrocarburi naturali o residuati derivanti dalla distillazione o raffinazione del greggio (petrolio).

Il 90% dell'energia prodotta deriva dai combustibili fossili:

- 38% petrolio,
- 26% di gas naturale,
- 27% carbone,
- 2.4% nucleare,
- 2.7% rinnovabile.

Nel mondo odierno si consumano 1000 barili di petrolio al secondo.



La Terra è ricoperta da un sottile strato di ozono e gas serra che permette l'accesso alla propria superficie di alcune radiazioni provenienti dal Sole, ricche di energia. Una volta giunte sulla Terra, queste radiazioni vengono rimesse sotto forma di raggi infrarossi all'atmosfera. Solo una parte di essa ritornerà nello spazio.

Se però il quantitativo di gas serra aumentasse, aumenterebbe al tempo stesso la temperatura sul pianeta, in quanto lo strato di gas serra si inspessirebbe ed impedirebbe il rilascio nello spazio dei raggi infrarossi provenienti dalla superficie terrestre.

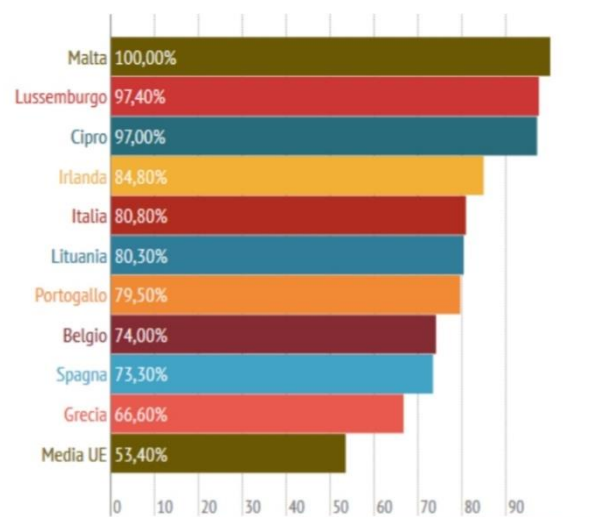
Sono quattro le forze che spingono ed indirizzano la domanda energetica globale, e quindi al consumo energetico:

- La crescita demografica: oggi giorno la Terra conta 7 miliardi di abitanti, con alto tasso di natalità nei paesi in via di sviluppo. Nel 2100 è prevista una crescita del 40%, quindi il raggiungimento dei 10 miliardi di abitanti sul pianeta, con un consumo energetico del 100%.
- La crescita economica, e con essa gli standard di vita di una parte consistente della popolazione.
- L'efficienza energetica, sia per usi civili sia per usi industriali.
- L'innovazione tecnologica, specie in tema di produzione dell'energia.

Occorre operare perché il sistema energetico mondiale evolva in modo sostenibile, dal punto di vista ambientale, delle risorse e socio-economico. Adottare un sistema energetico sostenibile significa implementare delle strategie energetiche attuali senza compromettere la capacità delle generazioni future.

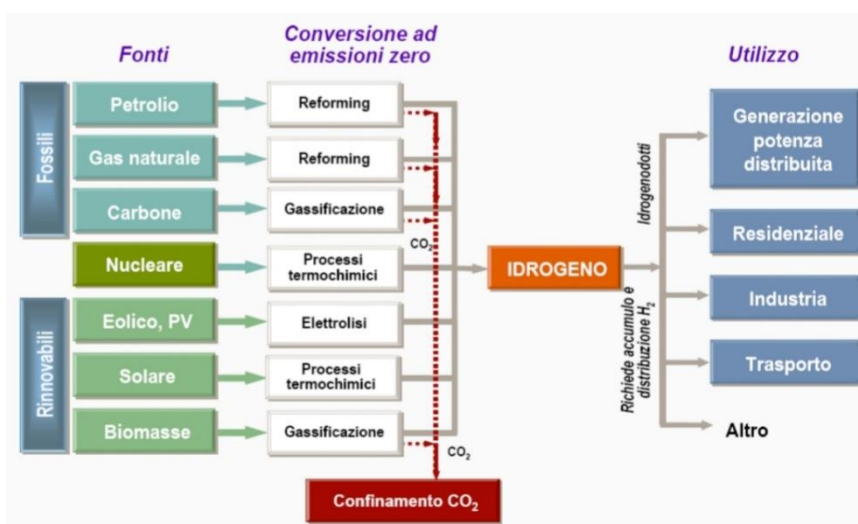
La sostenibilità è resa critica da:

- Esauribilità delle fonti fossili;
- Modifiche del clima globale per effetto serra ed inquinamento generato dalla maggior parte dei cicli energetici;
- Mancanza di equità nell'uso e nella distribuzione delle risorse energetiche.



Nel lungo termine, l'idrogeno può essere prodotto da fonti rinnovabili:

- I processi di produzione a partire dalle biomasse richiedono tutti un impegno notevole di ricerca, sviluppo e dimostrazione;
- La produzione per elettrolisi dell'acqua è un processo maturo, il cui costo può diventare accettabile solo con energia elettrica a basso costo;
- Sono in sviluppo altre tecnologie (solare termodinamico ad alta T mediante cicli termochimici, fotoelettrochimico, produzione biologica).



Quello che è possibile fare oltre al processo produttivo principale lineare è:

- Produrre un prodotto da un sito industriale a zero rifiuti;
- Usare gli scarti per produrre molecole ad alto valore aggiunto;
- Produrre energia per i siti industriali che processano materie prime e materie secondarie.

POWER TO GAS

Nonostante la produzione di energia elettrica da fonti sostenibili stia subendo una forte crescita negli ultimi anni, essa presenta ancora dei problemi riguardanti la regolazione ed il mantenimento della stabilità della rete: il bilanciamento dei carichi, la programmazione del dispacciamento, perdite di energia.

Il **Power To Gas** è una tecnologia che si basa sulla conversione dell'energia elettrica intermittente in carburante gassoso.

Il processo per cui viene più comunemente utilizzata è quello dell'elettrolisi dell'acqua per produrre idrogeno. L'energia elettrica generata dagli impianti e non immediatamente spesa in rete, viene impiegata per rompere i legami delle molecole d'acqua per produrre idrogeno. Questo idrogeno può essere poi utilizzato principalmente per tre scopi: come carburante nell'industria o nei trasporti; se miscelato alla CO₂, per produrre metano; se miscelato al biometano, per migliorarne le qualità.

Svantaggi:

- Sono inquinanti
- Responsabili dell'effetto serra
- Non sono rinnovabili

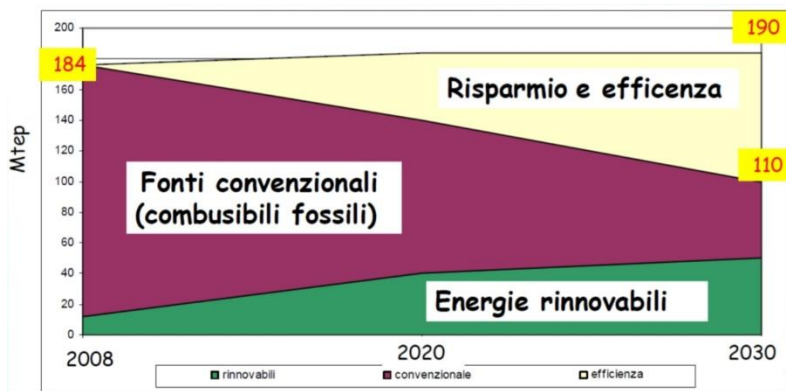
Tra le **fonti rinnovabili** citiamo il fotovoltaico, l'eolico, il geotermico, il moto ondoso del mare, biomasse.

Vantaggi:

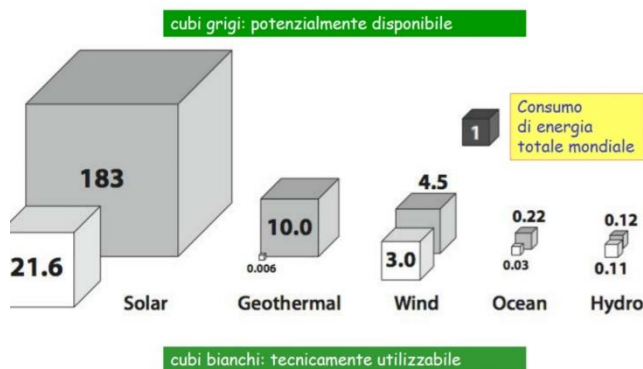
- Si rigenerano e non sono esauribili
- Sono sostenibili
- Non inquinano e non turbano gli ecosistemi
- Indipendenza energetica

Svantaggi:

- Alto costo delle tecnologie disponibili sul mercato
- Bassi rendimenti



Strategia energetica per l'Italia

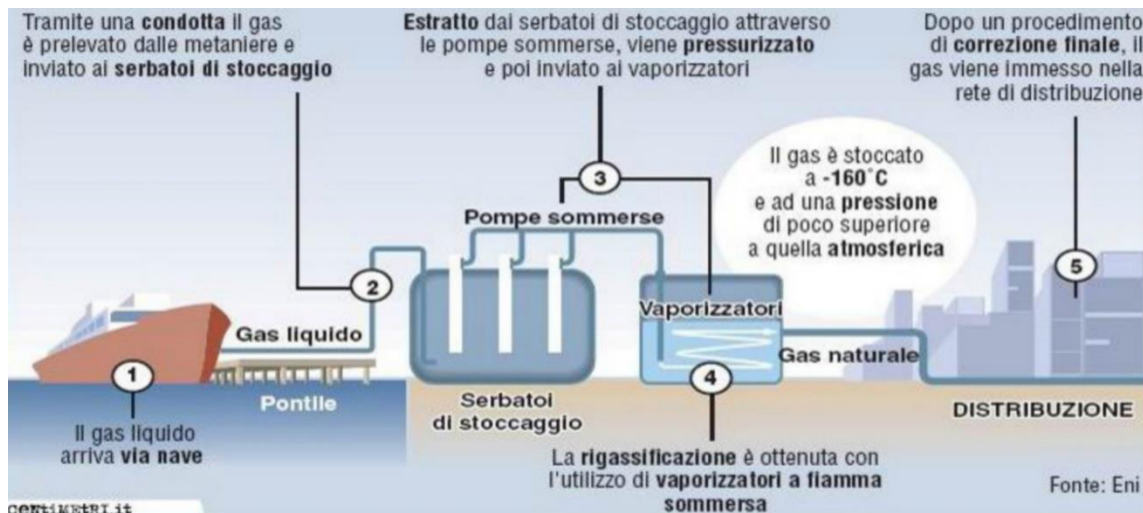


La scelta sul percorso energetico migliore da percorrere deve prendere in considerazione i seguenti punti: precauzione ai danni a medio-lungo termine; responsabilità; compartecipazione di tutti gli interessati; uguaglianza dei cittadini sui benefici economici; buona amministrazione; sostenibilità.

I punti principali quando si parla degli aspetti economici delle diverse fonti energetiche sono:

- Approvvigionamento: dove si trova il combustibile? Come si trasporta e quanto costa? Bisogna allora conoscere i costi di estrazione, i rischi politici, le scorte, i rischi e costi di trasporto.
- Gestione delle risorse: come si accumula?
- Generazione di energia: come si produce energia dal combustibile?
- Distribuzione dell'energia prodotta: come si distribuisce l'energia prodotta? Come si accumula?
- Impatto ambientale: quali scorie produce il processo? Possono essere abbattute?
- Impatto sociale: è una fonte socialmente accettabile?

Il gas, ancora liquido, viene trasferito dalla nave ad un serbatoio di stoccaggio all'interno del rigassificatore, dove mantiene le medesime condizioni fisiche di trasporto. Successivamente viene inviato ad un vaporizzatore che agendo sulla temperatura effettua la gassificazione con l'espansione del gas, che torna allo stato naturale. La variazione di temperatura avviene in genere tramite lo scambio termico in fasci tubieri tra gas liquido e acqua di mare, che cede il proprio calore al gas; la pressione invece viene ridotta tramite l'espansione del gas in appositi serbatoi. A questo punto il gas può essere immesso nella rete di distribuzione nazionale.



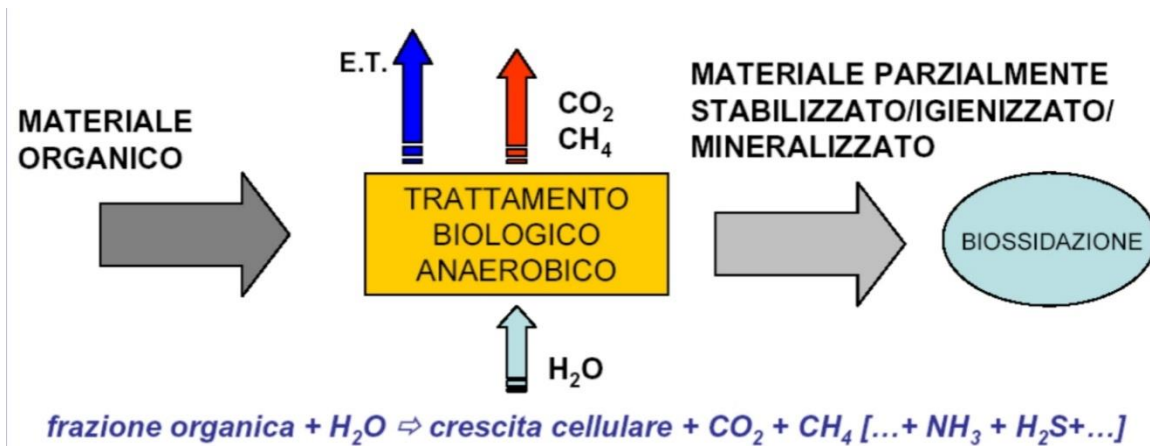
L'Italia è dipendente dal gas naturale, tanto che sono sei le principali nazioni che esportano verso l'Italia la propria fonte, attraverso gasdotti via terra o via mare:

1. **Tenp:** gasdotto lungo 968 km, porta il gas olandese in Svizzera;
2. **Transitgas:** lungo 291 km, porta il gas dalla Svizzera all'Italia;
3. **Ttpc:** lungo 742 km, porta il gas algerino in Tunisia;
4. **Tmpc:** lungo 772 km, è un gasdotto sottomarino che va dalla Tunisia all'Italia;
5. **Greenstream:** lungo 520 km, è un gasdotto sottomarino che porta il gas libico in Italia;
6. **Galsi:** progetto di gasdotto dall'Algeria all'Italia.

Un altro importante progetto di gasdotto era il **South Stream**, abbandonato nel 2014. Esso prevedeva la costruzione di un gasdotto lungo 1018 km, dalla Russia all'Italia, con passaggio attraverso gli stati membri dell'Unione Europea, in modo da non dover coinvolgere gli stati extra-comunitari o non ben visti, come l'Ucraina.

L'abbandono di questo progetto è stato causato principalmente da conflitti politici, a seguito dell'invasione militare russa in Ucraina (annessione della Crimea). La Russia è il primo paese produttore di gas naturale a livello mondiale; l'Ucraina è invece la principale terra di transito, con il passaggio del 70-80% di gas russo esportato verso l'Europa.

TRATTAMENTO BIOLOGICO ANAEROBICO

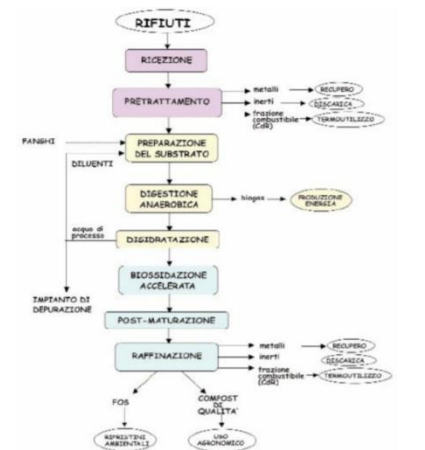
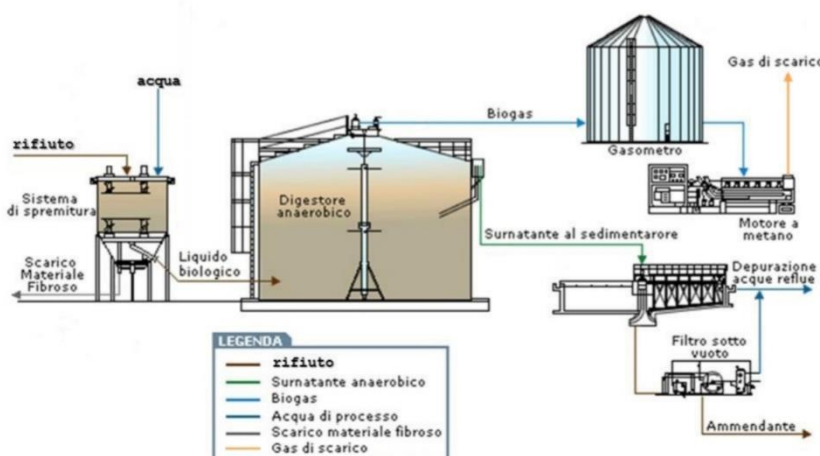


Le reazioni biochimiche di trasformazione della sostanza organica in biogas sono complesse, tuttavia McCarty ne ha proposta una di tipo empirico:



I biogas sono una miscela di vari tipi di gas, composti principalmente da metano, prodotti dalla fermentazione batterica in anaerobiosi (assenza di ossigeno) dei residui organici provenienti da residui vegetali o animali.

Essi possono appunto derivare dalla decomposizione degli esseri vegetali; dall'allevamento di animali in fattoria che, con la decomposizione del loro letame, si ha la produzione di gas metano (una mucca produce circa 300 litri di metano al giorno); dai liquami derivanti dal trattamento dei rifiuti umani in digestori anaerobici; dai rifiuti in discarica.

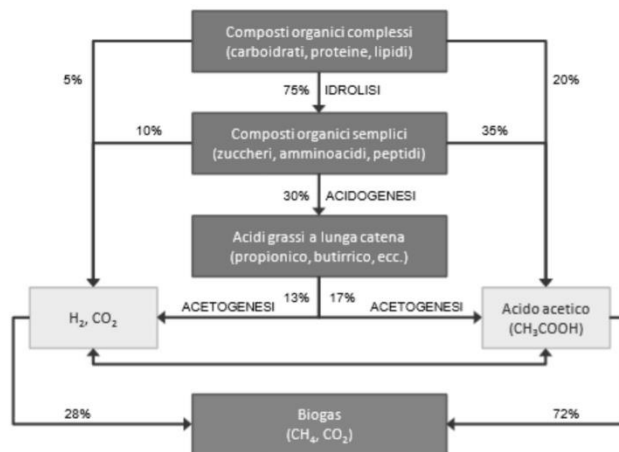
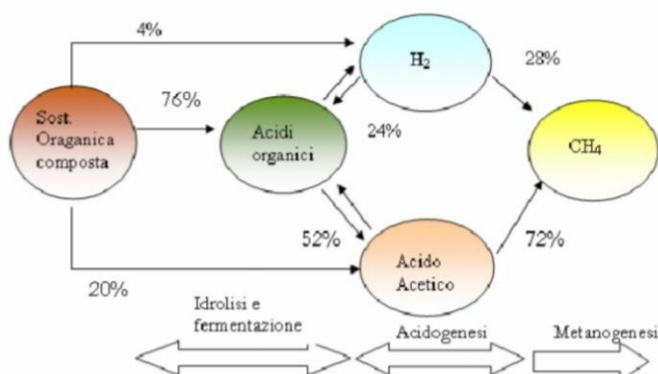


Per digestione anaerobica si intende la degradazione della sostanza organica da parte di microrganismi in condizioni di anaerobiosi. Si tratta di un processo differente rispetto al compostaggio, che invece è strettamente aerobico.

La produzione del metano può avvenire essenzialmente per due differenti vie di reazione:

- Una via prevede la metanogenesi ad opera dei batteri idrogenotrofi, che operano l'ossidazione anaerobica dell'idrogeno;
- La seconda via, detta acetoclastica, prevede la dissociazione anaerobica dell'acido acetico con formazione di metano e biossido di carbonio.

Il secondo meccanismo determina la maggior parte della produzione di metano nel complesso del processo. La figura quantifica percentualmente la distribuzione nei diversi cammini metabolici coinvolti nel processo di digestione.



I principali parametri che permettono di dimensionare, valutare e gestire il processo di digestione anaerobica si possono suddividere in due categorie:

1. **Parametri di operazione del reattore:** definiscono l'esercizio in termini di permanenza della massa alimentata nel reattore, di concentrazione dei microrganismi, di rese di produzione di biogas in relazione al volume del reattore ed alle caratteristiche del substrato trattato.
2. **Parametri di stabilità dei processi biologici:** l'obiettivo è il mantenimento di condizioni operative ottimali e stabili.

Per la digestione anaerobica la fase controllante l'intero processo, cioè la metanogenesi, risulta particolarmente sensibile alle variazioni ambientali del mezzo di reazione. Di particolare importanza risultano parametri quali il pH, la concentrazione di acidi grassi volatili (VFA), l'alcalinità, il rapporto tra acidi grassi volatili ed alcalinità, la produzione e composizione percentuale del biogas, la temperatura.

PARAMETRI DI OPERAZIONE DEL REATTORE

Caratterizzazione del substrato

Il substrato è generalmente definito, nell'ambito dei processi di digestione anaerobica, in termini di solidi totali (TS), di solidi totali volatili (TVS), di domanda chimica di ossigeno (COD) o, in alternativa a quest'ultima, di domanda biologica di ossigeno a 5 giorni (BOD5).

Carico organico volumetrico (OLR)

Il **carico organico volumetrico di substrato** applicato al reattore è definito come la quantità di substrato entrante nel reattore riferita all'unità di volume del reattore stesso ed al tempo.

Analiticamente:

$$OLR = Q * \frac{S}{V}$$

Dove Q è la portata influente ed S è la concentrazione di substrato nella portata influente [kg/m³]. Questo parametro viene di norma calcolato sulla base del volume utile del reattore e può essere riferito a diverse unità di misura utilizzate per esprimere la concentrazione di biomassa (TS, TVS, COD, BOD).

Produzione specifica di gas

Questo parametro rappresenta la quantità di biogas che viene prodotta per quantità di sostanza volatile alimentata al reattore; viene quindi espressa in termini di m³-biogas/kg-substrato-alimentato. Tale parametro, molto utilizzato per definire le rese dei processi di digestione anaerobica, è in realtà strettamente correlato alla biodegradabilità del substrato trattato piuttosto che alle proprietà del processo adottato. Dal punto di vista analitico è espresso come il rapporto:

$$SPG = \frac{Q_{biogas}}{Q * S}$$

Dove Q_{biogas} è la portata di biogas prodotto.

Velocità di produzione del biogas

E' definita come la portata di biogas prodotto rispetto al volume del reattore ed al tempo:

$$GRP = \frac{Q_{biogas}}{V}$$

Efficienza di rimozione dei substrati

Esistono diversi modi di esprimere l'efficienza di rimozione del substrato nel corso del processo di digestione anaerobica non solo legati ai diversi parametri utilizzati per esprimere la sua concentrazione (sostanza solida totale, sostanza solida volatile, COD e BOD). I differenti metodi di valutazione adottati da ricercatori ed operatori del settore sono generalmente imputabili alla difficoltà di chiudere i bilanci di massa. In generale, la più semplice relazione per la conversione del substrato in biogas, viene espressa in termini percentuali tramite la: $\eta\% = (Q * S - Q^+ * S_e) / (Q * S)$

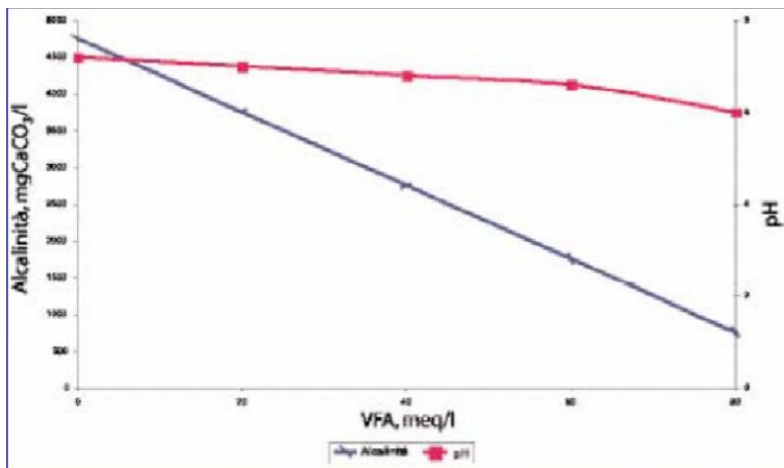
Dove:

- Q, Q⁺, portata influente ed effluente
- S, concentrazione di TVS nella portata influente
- S_e, concentrazione di TVS nella portata effluente calcolata come differenza tra la massa entrante ed il biogas prodotto (flussi di più facile quantificazione)

tampone del mezzo. Infatti la variazione di pH appare evidente quando ormai il bicarbonato ha terminato la sua attività tamponante; quando, cioè, questo è stato completamente consumato secondo le reazioni di equilibrio di seguito riportate:



Dove H-R indica un acido organico.



È evidente la maggior pendenza, e quindi velocità di scomparsa, dell'alcalinità rispetto all'evoluzione del pH.

È quindi necessario associare al pH gli altri parametri di controllo fondamentali quali l'alcalinità del mezzo, la concentrazione di acidi grassi volatili, la composizione del biogas ed in particolare fare riferimento ai loro andamenti.

Alcalinità

L'alcalinità rappresenta la capacità di un sistema di neutralizzare protoni ed è generalmente espressa in termini di concentrazione di carbonato di calcio. Questa viene determinata, analiticamente, sulla fase liquida presente nel reattore, per titolazione con acido cloridrico.

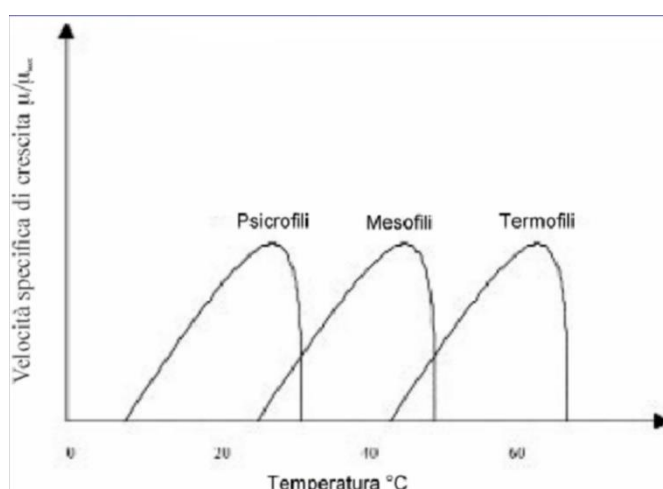
Valori di alcalinità dell'ordine di 3000-5000 mg CaCO₃ per litro sono tipici per idigestori anaerobici operanti in condizioni stabili.

Questo parametro è di fondamentale importanza nei processi anaerobici. Tenendo infatti presente che i tassi di crescita della biomassa metanigena sono estremamente ridotti può capitare che, in occasione di un incremento del carico organico, le aumentate capacità idrolitiche ed acidificanti del sistema determinino uno sbilanciamento della popolazione batterica a favore della componente acidogena e, quindi, a sfavore della componente metanigena. Si avrà, pertanto, una fase transitoria in cui si osserverà un incremento di concentrazione degli acidi grassi volatili. In questi casi risulta fondamentale la capacità tamponante del sistema, che deve essere in grado di neutralizzare l'abbassamento di pH determinato dall'accumulo di acidi organici. L'alcalinità di un digestore anaerobico è determinata essenzialmente dalla presenza di un sistema tampone dovuto alla coesistenza di ammoniaca, originata dalla degradazione di proteine, e di bicarbonato, derivante dalla dissoluzione del biossido di carbonio nel mezzo.

Temperatura

Dato che i processi di degradazione anaerobica sono determinati dall'attività di popolazioni microbiche eterogenee l'effetto delle variazioni di temperatura è particolarmente importante. Variazioni di soli 2-3°C possono influire sulle prestazioni generali del processo, specialmente in prossimità dei limiti dell'intervallo operativo. Ne deriva la necessità di controllare con particolare accuratezza i sistemi di controllo per il funzionamento dei dispositivi di riscaldamento. E' stato riscontrato che i processi di digestione anaerobica in regime mesofilo mostrano le migliori produzioni di biogas in intervalli di temperatura compresi tra i 30 ed i 35°C, mentre nel caso di processi termofili l'intervallo si allarga e varia tra i 40 ed i 60°C.

In generale si può osservare che, all'interno dell'intervallo ottimale, la produzione di biogas e la rimozione di substrato incrementano al crescere della temperatura.



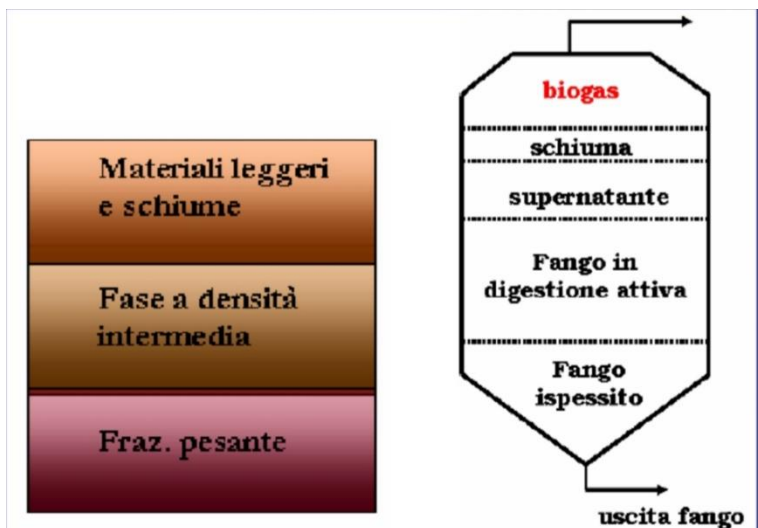
Dal momento che la velocità di reazione è il fenomeno che governa il processo, la temperatura diviene un parametro estremamente importante. Quando si passa da un regime di temperatura ad un altro si osserva un vero e proprio cambiamento nella composizione della comunità batterica. Infatti, come illustrato in figura, gli andamenti di sviluppo delle diverse popolazioni batteriche non sono monotoni ma presentano dei picchi in corrispondenza di ben definiti intervalli di temperatura, differenti per ciascuna specie. Una variazione di temperatura, all'interno di un certo intervallo, e quindi, per una data popolazione, determina una variazione nelle velocità di reazione.

TIPOLOGIE DI PROCESSI DI DIGESTIONE ANAEROBICA

I processi anaerobici possono essere classificati in base al:

1. Regime termico del reattore;
2. Tenore di solidi nel rifiuto trattenuto;
3. Numero di fasi presenti nel processo.

A causa delle caratteristiche fisiche dei rifiuti trattati non è solitamente possibile ottenere una miscela omogenea e pertanto si osserveranno all'interno del reattore tre fasi separate, caratterizzate da distinte densità. La frazione più pesante tenderà ad accumularsi sul fondo del reattore e può determinare danni nel sistema di miscelazione se il rifiuto trattato non è sufficientemente pulito, mentre materiali leggeri e schiume si accumulano nella parte superiore del reattore. La fase a densità intermedia è quella in cui avvengono per lo più le effettive reazioni di degradazione e produzione del biogas. Nella gestione dell'impianto sono generalmente previste saltuarie rimozioni sia dello strato più pesante, presente sul fondo del reattore, che di quello leggero.



Uno dei problemi che può essere connesso con la digestione anaerobica ad umido, consiste nella corto-circuitazione idraulica del reattore: il flusso di materiale entrante, non perfettamente miscelato con il materiale presente all'interno del reattore, fuoriesce con tempi di ritenzione ridotti rispetto a quelli previsti dal progetto. Ciò, oltre a determinare una minore degradazione del substrato trattato, e quindi una minor produzione di biogas, può determinare problemi di igienizzazione dei fanghi effluenti. Per questo motivo alcuni brevetti prevedono uno step di pastorizzazione dell'effluente dal reattore di digestione.

Criterio	Vantaggi	Svantaggi
Tecnologico	Buona conoscenza ed esperienza nel campo del processo. Applicabilità in co-digestione con rifiuti liquidi ad alto contenuto in sostanza organica	Corto-circuitazione idraulica,
		fasi separate di materiale galleggiante e pesante,
Biologico	Diluizione dei picchi di concentrazione di substrato e/o sostanze tossiche influenti nel reattore	abrasione delle parti meccaniche dovuta alla presenza di sabbie e inerti,
		pre-trattamenti del rifiuto
Economico ed ambientale	Spese ridotte per i sistemi di pompaggio e miscelazione, ampiamente diffusi sul mercato	Forte sensibilità a carichi organici variabili,
		perdita di sostanza volatile biodegradabile nel corso dei pre-trattamenti,
		Elevati costi di investimento a causa dei macchinari per i pre-trattamenti per i volumi dei reattori
		Produzione di elevate quantità di acque di processo

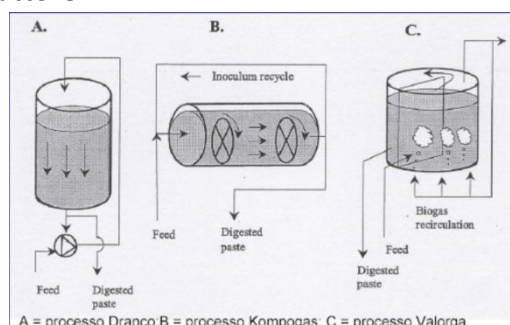
Non è attualmente ancora chiaro quale sia il fenomeno che limita la possibilità di applicare carichi organici maggiori nei processi ad umido. una possibile spiegazione consiste nella concentrazione della biomassa arriva nel reattore, che sarebbe troppo bassa per operare al meglio. Altre

Criterio	Vantaggi	Svantaggi
Tecnologico	Semplicità dei sistemi di pompaggio e miscelazione, Possibilità di trattare il rifiuto da raccolta differenziata senza particolari pre-trattamenti;	Accumulo di materiali inerti sul fondo del reattore e necessità di scaricarli; Abrasiono delle parti meccaniche; Pre-trattamenti complessi per RSU indifferenziato,
	Diluizione dei picchi di concentrazione di substrato o sostanze tossiche;	Sensibilità ad eventuali shock per la presenza di sostanze inibitorie e carichi organici; Perdita di sostanza volatile biodegradabile nel corso dei pre-rattamenti del rifiuto indifferenziato;
Economico ed Ambientale	Spese ridotte per di sistemi di pompaggio e miscelazione.	Elevati costi di investimento a causa degli equipaggiamenti utilizzati per i pre-trattamenti e per i volumi dei reattori; Produzione di elevate quantità di acque di processo.

DRY

Nei processi DRY il tenore in solidi del rifiuto alimentato al digestore è generalmente nell'intervallo del 25-40% e pertanto solamente particolari rifiuti con elevato tenore di solidi (> 50%) necessitano di essere diluiti con acqua per poter essere convenientemente trattati. Ciò non comporta significative variazioni dal punto di vista biochimico e microbiologico nel processo anaerobico ma determina la necessità di una completa revisione dei metodi di trattamento per quanto concerne la tecnologia dei reattori. Sono infatti necessari particolari metodi di pompaggio e miscelazione; a causa delle proprietà dei flussi trattati, il materiale organico viene trasportato con nastri e pompato attraverso l'utilizzo di speciali pompe appositamente progettate per operare con fluidi molto viscosi. Ciò naturalmente incide sui costi di realizzazione di questo tipo di impianti. Questi sistemi sono in grado di operare con flussi di materiale molto concentrati e resistono ai possibili problemi causati da sassi, vetro, o legno che non causano inceppamento o danni. L'unico pre-trattamento richiesto è una preliminare vagliatura al fine di rimuovere il materiale con dimensioni superiori ai 40 mm.

A causa dell'elevata densità e viscosità dei flussi trattati i reattori per il trattamento dry non sono del tipo completamente miscelato (CSTR) ma con flusso parzialmente o totalmente a pistone (plug-flow): ciò rende i reattori più semplici dal punto di vista meccanico ma comporta problemi di miscelazione tra il rifiuto organico fresco e la biomassa fermentante. La risoluzione di questo problema è fondamentale per evitare fenomeni localizzati di sovraccarico organico ed eventuale acidificazione che porterebbe ad inibizione del processo di formazione di biogas. Il fatto di operare con flussi molto densi porta inoltre al superamento del problema della suddivisione di tre fasi distinte all'interno del reattore.



Generalmente la chiave per un buon funzionamento del processo sta nel bilancio di una serie di parametri da analizzare prima di effettuare la miscela dei substrati. Infatti alcune caratteristiche di ogni substrato possono favorire il processo di produzione del biogas, mentre altri possono inibirlo come:

- Alto contenuto di solidi totali, tipicamente 30-50%;
- Alto rapporto C/N;
- Mancanza di micro/macro nutrienti;
- Contenuto di sostanze tossiche.

FORSU		Fanghi
↓	macro e micro nutrienti	↑
↑	rapporto C/N	↓
↑	sostanze biodegradabili	↓
↑	sostanza secca	↓

Visti sia la grande quantità di fanghi prodotti negli impianti di depurazione delle acque reflue che il grande numero di digestori anaerobici presenti sul territorio italiano (atti alla stabilizzazione del fango) è stato osservato come la co-digestione del rifiuto solido urbano e dei fanghi potrebbe essere una via molto vantaggiosa in termini di produzione di energia.

E' stato osservato comunque che l'aggiunta di OFMSW, con un alto contenuto in TS, ad un digestore operante con un substrato a bassa concentrazione di solidi totali ha effetti stabilizzanti sul processo. Effetti di questo tipo sono stati ottenuti introducendo dosi di fango in percentuale tra l'8 ed il 20% dei TVS del substrato.

Uno dei principali problemi analizzati da molti studiosi è stato quello di riuscire a trovare la proporzione ottimale tra i due substrati per ottimizzare la produzione di biogas e la sua composizione.

Utilizzo del biogas

Il biogas prodotto ha una composizione del tipo:

- Metano: 60-70%;
- Anidride carbonica: 23-30%;
- Azoto: 2-5%;
- Resto: idrogeno, solforato, ecc.

La produzione di biogas avviene alla pressione del digestore, generalmente vicina alla pressione atmosferica. Dal momento che lo stoccaggio ed il trasporto richiedono una compressione importante e quindi costi non trascurabili, si cerca in genere di utilizzarlo per la produzione di una forma di energia direttamente utilizzabile sul sito di produzione o con costi di trasporto ridotti. Parte del biogas prodotto viene utilizzato per gli autoconsumi dell'impianto, mentre la restante parte può essere utilizzata per la produzione di energia da cedere all'esterno. In particolare, per quanto riguarda gli usi esterni, una parte (dal 15 al 25% dell'energia prodotta), può essere

Il completamento di entrambe le fasi porta ad una distruzione completa dei solidi volatili e quindi all'inertizzazione del materiale.

L'**inertizzazione dei rifiuti** consiste nell'inglobamento di sostanze inquinanti in una matrice inerte, tramite un processo chimico e/o fisico. L'obiettivo è diminuire il potenziale inquinante e la pericolosità dei rifiuti, rendendoli quindi idonei alle successive fasi: smaltimento in discarica per rifiuti non pericolosi, oppure recupero. I rifiuti vengono convertiti chimicamente nella loro forma meno solubile, meno mobile e meno tossica.

Produzione del percolato

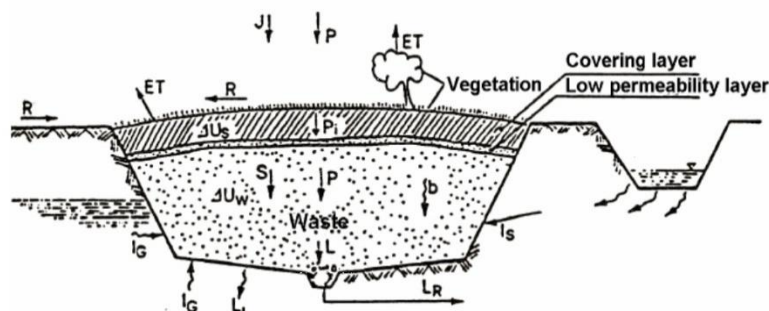
Il **percolato** è il liquido prodotto dal dilavamento dei rifiuti ad opera delle precipitazioni e delle infiltrazioni nel cumulo dei rifiuti. Teoricamente dovrebbe iniziare ad accumularsi sul fondo della discarica solo dopo che i rifiuti hanno raggiunto le condizioni di saturazione. Tuttavia, a causa dell'esistenza di vie preferenziali e della non omogeneità all'interno del cumulo, può accadere che vengono raggiunte condizioni di saturazione localmente, anche se la capacità del cumulo globalmente non è stata ancora saturata.

Di solito, la produzione di percolato viene espressa come percentuale della pioggia. Questa, però, risulta una stima grossolana e poco rappresentativa dei fenomeni che avvengono in discarica. Per una stima più attendibile della produzione di percolato è necessario effettuare un bilancio idrologico della discarica, considerando i contributi di ingresso e di uscita di acqua.

$$L = P - R + R^* - ET + J + I_s + I_g + (\Delta U_s - \Delta U_w) \pm b$$

Dove:

- L: volume del percolato
- P: pioggia
- R: ruscellamento superficiale
- R*: ruscellamento superficiale da aree esterne alla discarica
- ET: evapo-transpirazione
- J: irrigazione e/o ricircolo del percolato
- I_s: infiltrazione di acqua da acque superficiali
- I_g: infiltrazione di acqua da acque sotterranee
- ΔU_s: variazione del contenuto di acqua dei materiali di copertura
- ΔU_w: variazione del contenuto di acqua dei rifiuti
- b: produzione/consumo di acqua dovuto a reazioni di biodegradazione aerobici/anaerobici



- ridurre il volume del percolato effettivamente da trattare

Il ricircolo del percolato può offrire un modo per ridurre la produzione effettiva di percolato e ridurre i costi di trattamento: esso infatti aumenta l'umidità della discarica, promuovendo il processo di biodegradazione.

- si favorisce una fase metanigena stabile e si riducono alcuni composti inquinanti
- alto trasferimento di nutrienti e batteri verso i rifiuti, incremento dell'attività batterica e della produzione di biogas
- diminuzione, a causa della più alta evaporazione, del volume di percolato da smaltire
- tempi più brevi del monitoraggio dopo la chiusura (più veloce stabilizzazione)

PRODUZIONE DEL BIOGAS

Il biogas di discarica è il prodotto gassoso finale della degradazione anaerobica della sostanza organica dei rifiuti. È composto prevalentemente da metano (CH₄) e anidride carbonica (CO₂), e da numerosi composti presenti in piccole quantità.

CO₂ e CH₄ sono i principali gas responsabili dell'incremento dell'effetto serra (GHGs: Greenhouse Gases): hanno infatti un potenziale molto alto di assorbimento della radiazione infrarossa proveniente dal sole e sono capaci di intrappolare il calore fra la superficie terrestre e gli altri strati dell'atmosfera. L'aumento della concentrazione atmosferica di tali gas può causare un incremento della temperatura media dell'atmosfera.

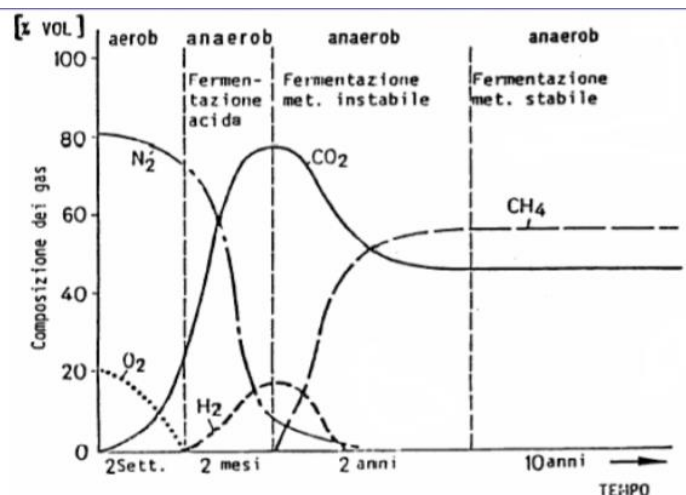
Se la degradazione fosse completamente aerobica, verrebbe prodotta solo CO₂. Questo contribuirebbe comunque all'effetto serra, ma col vantaggio di avere un gas – la CO₂ – con un GWP (Global Warming Potential: la capacità di un composto di intrappolare calore e produrre effetto serra) molto minore rispetto al metano (CO₂, GWP: 1 contro CH₄ GWP: 21). Tuttavia va segnalato che la CO₂ può arrecare danno sanitario se presente in concentrazioni superiori a 1,5% in volume.

Il processo di degradazione anaerobica del materiale organico che porta alla formazione del gas di discarica dura per un periodo fra i 10 e i 50 anni. La maggior parte di CO₂ e CH₄ viene generata entro 20 anni dalla chiusura della discarica, tuttavia le emissioni possono continuare per oltre 100 anni.

Le discariche sono la principale sorgente di emissioni di CH₄ (38% della produzione totale) di origine antropica.

Il biogas può anche essere un pericoloso asfissiante – da solo o in aria – in spazi confinati con un tenore di ossigeno inferiore al 18% in volume. Il biogas contiene gas infiammabili – CH₄ e H₂ – che possono formare miscele esplosive in aria. Infatti, entro un certo intervallo di concentrazione – limite di infiammabilità o esplosività – la miscela risultante può incendiarsi producendo un'esplosione.

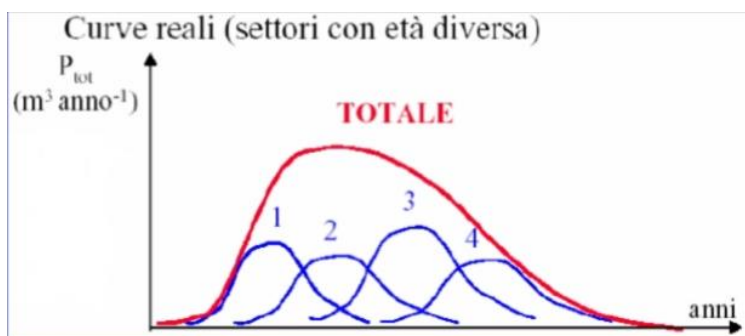
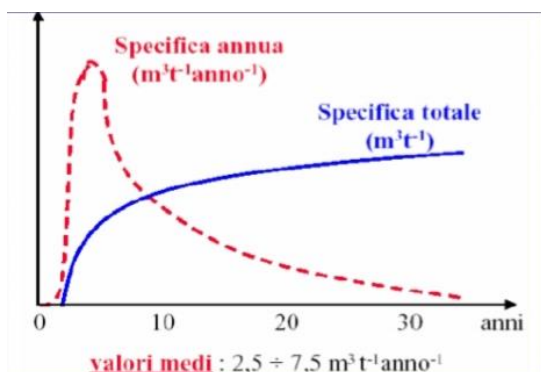
Gli intervalli di infiammabilità di metano e di idrogeno sono rispettivamente 5-15% e 4-74% in volume. Quando la concentrazione di ossigeno scende al di sotto del 13% in volume, in condizioni



La durata delle varie fasi e dell'intera sequenza dipende dalle condizioni presenti in discarica e in funzione delle condizioni climatiche, come la quantità delle precipitazioni atmosferiche e la temperatura ambientale.

La produzione di biogas ha un periodo di latenza di circa un anno a causa della presenza di condizioni aerobiche nel periodo iniziale e dell'attività biologica rivolta alla formazione di acidi volatili nella prima fase del processo anaerobico. Tuttavia la produzione di metano potrebbe avere un periodo di latenza iniziale anche superiore ad un anno.

In condizioni normali la decomposizione della frazione organica dei rifiuti in termini di produzione di biogas raggiunge un picco dopo i primi due anni dalla posa dei rifiuti e successivamente diminuisce continuando a persistere in molti casi per periodi superiori ai 25 anni o più.



FATTORI CHE CONTROLLANO LA PRODUZIONE DI BIOGAS

Dimensioni fisiche del sito: il processo anaerobico di solito predomina a profondità superiori ai 5 m, quindi tende ad avvenire in discariche profonde e con una copertura della cima.

Tipologia di rifiuti: la composizione dei rifiuti influenza la velocità, la quantità, la qualità del gas generato per unità di massa. Tipi diversi di rifiuti decadono con velocità diverse, anche se la

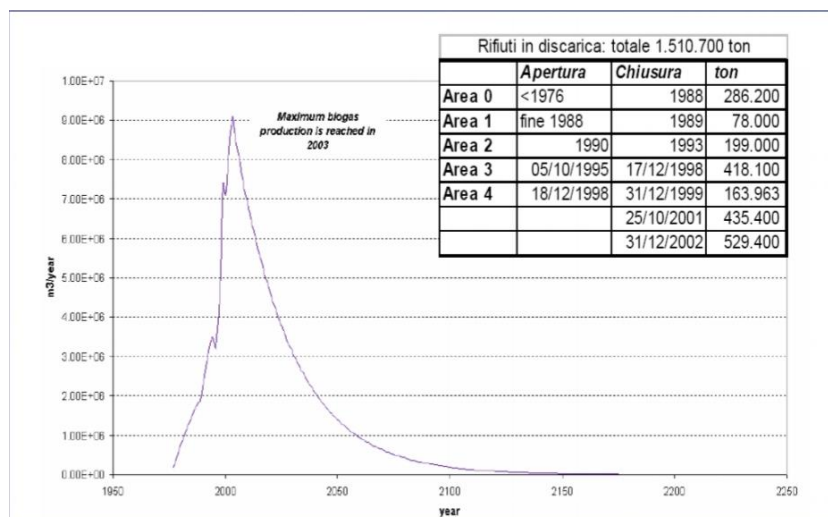
MODELLI DI PRODUZIONE DEL BIOGAS

La modellazione della produzione di biogas è estremamente complessa (formazione e sottrazione dei composti, tasso di crescita dei batteri, presenza di nutrienti, ecc.). In linea di massima, un modello previsionale di produzione di biogas in discarica è costituito da due parti:

- *Sottomodello stechiometrico*: input principale è la composizione merceologica dei rifiuti; l'output è la quantità di carbonio organico gassificabile, dalla quale è possibile poi calcolare la quantità massima di biogas producibile dalla degradazione dell'unità di massa di rifiuto;
- *Sottomodello biochimico*: descrive l'evoluzione temporale del processo di massificazione del COD tramite le costanti di degradabilità (tenendo conto di alcuni parametri quali il contenuto di H₂O, la pezzatura media e la T).

Per una stima generale è possibile utilizzare modelli relativamente semplici, come quello dell'EPA, Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) che fornisce stime sulle emissioni di metano, anidride carbonica e NMVOC. È basato su un'equazione di decadimento del primo ordine. Tale semplificazione è giustificata dalla mancanza (spesso) di dati come la quantità di rifiuti, la composizione, ecc. L'emissione del gas, in questo modello, è basata sull'assunzione di una composizione al 50% di metano e al 50% di anidride carbonica (in volume), con l'aggiunta della presenza in ppm e ppv di altri composti gassosi (NMVOC).

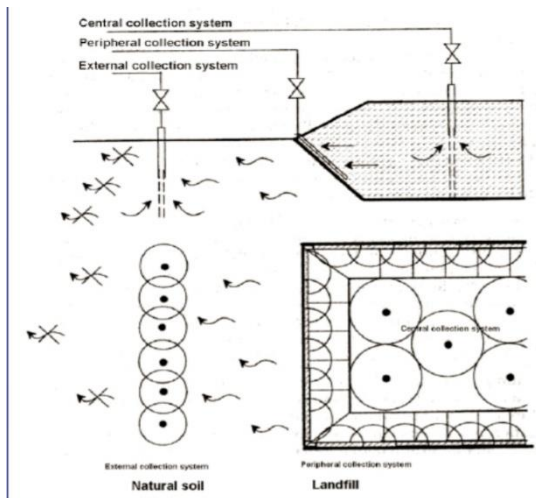
I dati di input sono: la capacità di progetto della discarica; la quantità totale di rifiuti in discarica, o il tasso annuale di deposito; il tasso di generazione di metano (k); la potenziale capacità di generazione di metano (L); la concentrazione totale di NMOC e la loro speciazione nel biogas; gli anni di operatività della discarica; se nella discarica sono stati depositi rifiuti pericolosi.



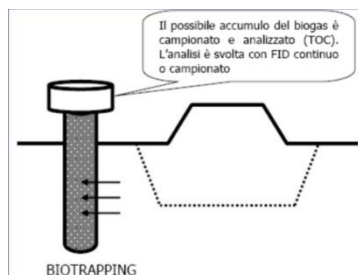
CAPTAZIONE DEL BIOGAS

Il sistema di raccolta del biogas può essere posizionato nel corpo della discarica durante la fase operativa o al momento della chiusura. Viene generalmente raccomandata la realizzazione di due sistemi separati per la zona periferica e la zona centrale della discarica (generalmente migliore qualità delle caratteristiche del biogas nella parte centrale).

Per evitare l'infiltrazione di aria all'interno del corpo della discarica (con possibili conseguenze di esplosione) viene suggerito di non aspirare da profondità non inferiori a 4-6 m al di sotto della superficie: la tubazione posta nel pozzo di captazione del biogas non deve essere forata fino a quella altezza.



Composto	Metodo di analisi	Intervallo	Accuratezza
CH ₄	IR	0-80% vol	2%
CO ₂	IR	0-80% vol	2%
O ₂	paramagnetic	0-21% vol	2%
NO _x	IR or photon emission	0-350 ppm	2%
CO	IR	0-500 ppm	2%



Campionamento e analisi del biogas (mensili e semestrali):

- punti appropriati e significativi, sia interni che esterni
- analisi dei campioni (CO₂, CH₄, O₂, N₂, H₂O e T, P e portata)
- immagazzinamento e presentazione dati
- Parametri ambientali e meteorologici

TRATTAMENTO FINALE DEL BIOGAS

I possibili trattamenti finali per il biogas sono:

- la semplice combustione senza recupero di energia (torcia)
- combustione con recupero di energia

In entrambi i casi può essere necessario un trattamento preliminare del biogas, specialmente nel caso di recupero energetico, a causa della presenza di composti dannosi per i dispositivi di conversione dell'energia, che devono essere rimossi prima della combustione.

Combustione semplice senza recupero energetico

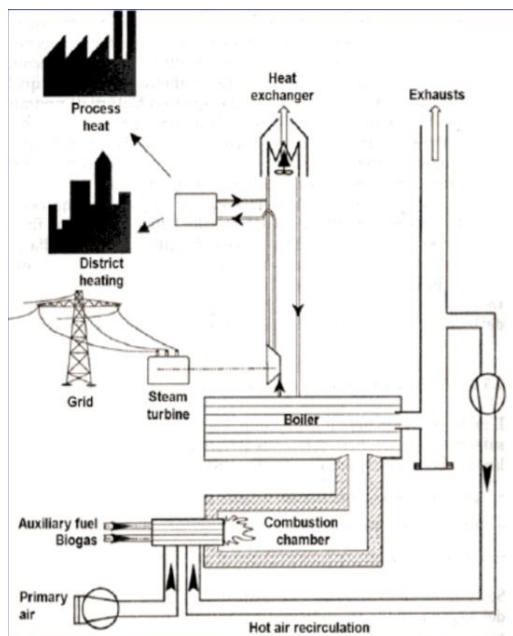
Caratteristiche minime (in termini di concentrazione di metano) ai fini del recupero energetico:

- Nel caso di MCI deve essere almeno 40% in volume;
- nel caso di combustione in caldaie convenzionali, il limite inferiore può essere 20% in volume.

Inoltre, la presenza di CO₂ nel biogas, che riduce fortemente il PCI e deteriora le caratteristiche di combustione, riduce la velocità di propagazione della fiamma. Per avere una combustione corretta il limite inferiore per il rapporto CH₄/CO₂ è circa 1.

L'efficienza di questo tipo di sistemi è piuttosto elevata, a seconda della distanza dell'utenza finale, variando fra 85 – 90%.

I problemi possibili sono connessi alla presenza di SO_2 e SO_3 (se lo zolfo non è stato precedentemente rimosso) per il potenziale corrosivo. Per evitare la loro condensazione la temperatura degli esausti deve essere mantenuta al di sopra di 180 – 200 °C.



I MCI sono piuttosto sensibili alla presenza di sostanze corrosive e alla deposizione di sedimenti.

Si può verificare la presenza nel biogas di composti organici quali i silossani. Durante la combustione, questi composti possono essere convertiti in microcristallini di biossido di silicio, specialmente sulle pareti fredde del cilindro del motore, contribuendo all'abrasione della superficie della camera di combustione fino a causare la rottura del motore.

La loro presenza è originata dalla decomposizione di sostanze contenenti silicio, che possono essere ritrovati nei rifiuti tossici (oli, prodotti per l'igiene, ecc.) e nei RU (prodotti farmaceutici, cosmetici, ecc.). Il diffuso uso di tali prodotti, aumenta il rischio della presenza dei silossani nel biogas, con valori superiori alla soglia generalmente considerata come limite superiore dei costruttori di MCI (15 mg/Nm³). I metodi per l'eliminazione di tali composti sono essenzialmente basati sull'assorbimento o su cicli di raffreddamento del biogas.

Comunque, i metodi di rimozione dei silossani devono tenere conto della presenza nel biogas di altri composti come idrocarburi, zolfo e ammine, con il rischio di alte perdite specifiche di efficienza. L'efficienza di conversione energetica del processo è piuttosto bassa: 30 – 35% (può raggiungere 40%).

L'efficienza di cogenerazione può essere abbastanza elevata, fino a 85%, quando si applica il recupero di calore dal sistema di raffreddamento e lubrificazione.

Devono essere controllate le emissioni di NO_x e CO .

Definizioni tecnico-giuridiche

Energia da fonti rinnovabili (Dlgs 3 marzo 2011, n. 28, Art.2): energia proveniente da fonti rinnovabili non fossili, vale a dire energia eolica, solare, aerotermica, geotermica, idrotermica e oceanica, idraulica, biomassa, gas di discarica, gas residuati dai processi di depurazione e biogas;

Biocarburanti: carburanti liquidi o gassosi per i trasporti ricavati dalla biomassa;

Biometano: gas ottenuto a partire da fonti rinnovabili avente caratteristiche e condizioni di utilizzo corrispondenti a quelle del gas metano e idoneo alla immissione nella rete del gas naturale;

Sottoprodotto (Dlgs 152/2006 Articolo 184-bis):

1. È un sottoprodotto e non un rifiuto ai sensi dell'articolo 183, comma 1, lettera a), qualsiasi sostanza od oggetto che soddisfa tutte le seguenti condizioni:

a) la sostanza o l'oggetto è originato da un processo di produzione, di cui costituisce parte integrante, e il cui scopo primario non è la produzione di tale sostanza od oggetto;

b) è certo che la sostanza o l'oggetto sarà utilizzato, nel corso dello stesso o di un successivo processo di produzione o di utilizzazione, da parte del produttore o di terzi;

c) la sostanza o l'oggetto può essere utilizzato direttamente senza alcun ulteriore trattamento diverso dalla normale pratica industriale;

d) l'ulteriore utilizzo è legale, ossia la sostanza o l'oggetto soddisfa, per l'utilizzo specifico, tutti i requisiti pertinenti riguardanti i prodotti e la protezione della salute e dell'ambiente e non porterà a impatti complessivi negativi sull'ambiente o la salute umana.

2. Sulla base delle condizioni previste al comma 1, possono essere adottate misure per stabilire criteri qualitativi o quantitativi da soddisfare affinché specifiche tipologie di sostanze o oggetti siano considerati sottoprodotti e non rifiuti. All'adozione di tali criteri si provvede con uno o più decreti del Ministro dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare, ai sensi dell'articolo 17, comma 3, della legge 23 agosto 1988, n. 400, in conformità a quanto previsto dalla disciplina comunitaria.

Fanno parte dei sottoprodotti: paglia, sfalci, potature, reflui zootecnici, digestato (non sono rifiuti); scarti di origine animale; scarti di lavorazioni industriali di prodotti agricoli.

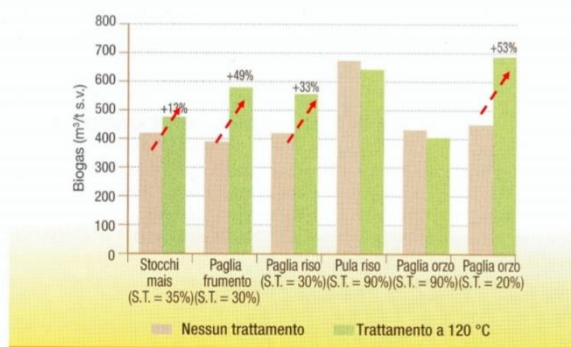
IMPIANTI PER LA PRODUZIONE DI BIOGAS

Le componenti impiantistiche e le fasi del processo sono:

1. Pretrattamento della biomassa,
2. Alimentazione,
3. Difestione,
4. Miscelazione,
5. Riscaldamento,
6. Raccolta in gasometro,

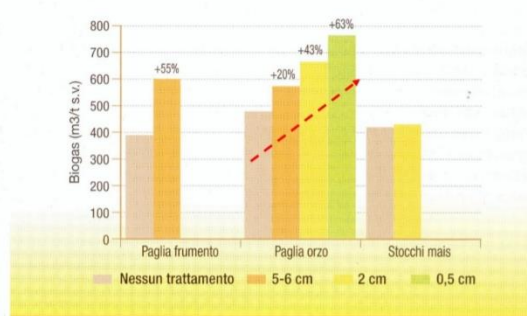
Il trattamento termico a 120 °C dei residui colturali ha permesso incrementi produttivi compresi tra il 13 e il 53%, ma solo per le matrici il cui tenore in solidi totali non era estremamente elevato

Grafico 3 - Confronto tra le rese in biogas di residui colturali non trattati e trattati termicamente a 120 °C per 30 minuti



s.v. = solidi volatili, S.T. = solidi totali.
Fonte: prova condotta dal Deifa dell'Università di Torino.

Grafico 1 - Confronto tra le rese in biogas di biomasse non trattate e biomasse trinciate con diversa pezzatura



S.V. = solidi volatili.
Fonte: prova condotta dal Deifa dell'Università di Torino.

La trinciatura delle biomasse ha aumentato notevolmente la resa in biogas della paglia di frumento (fino al 55% in più) e della paglia di orzo (fino al 63% in più), ma non ha prodotto risultati per gli stocchi di mais

TRATTAMENTI DI RAFFINAZIONE DEL BIOGAS PER L'IMMISSIONE NELLE RETI DI GAS NATURALE

All'inizio abbiamo biogas grezzo, il quale è composto da metano ed anidride carbonica. Sono presenti altri costituenti minori come: acido solfidrico H_2S , ammoniaca NH_3 , azoto N_2 , monossido di carbonio CO , idrogeno H_2 e ossigeno O_2 .

Il trattamento del biogas grezzo ha lo scopo di:

- Rimuovere le componenti indesiderate come H_2S e componenti solforati, ammoniaca, particolato solido e umidità, microinquinanti (biogas di discarica);
- Migliorare le caratteristiche termiche del combustibile (PCS, PCI, Indice di Wobbe) attraverso tecniche di raffinazione del gas, sostanzialmente indirizzate all'incremento del tenore di metano ottenibile tramite la rimozione della CO_2 .

Distinguiamo due tipi di trattamento:

- **Depurazione:** rimozione dell'umidità, del particolato e dell' H_2S .
- **Raffinazione:** rimozione di NH_3 , CO_2 e inquinanti in traccia, questi ultimi derivanti da biogas di discarica o da fanghi di depurazione. Essa può avvenire attraverso diversi processi:
 - Assorbimento fisico con acqua
 - Assorbimento fisico con solventi chimici
 - Assorbimento chimico con soluzioni amminiche
 - Adsorbimento
 - Processi a membrana
 - Processi criogenici

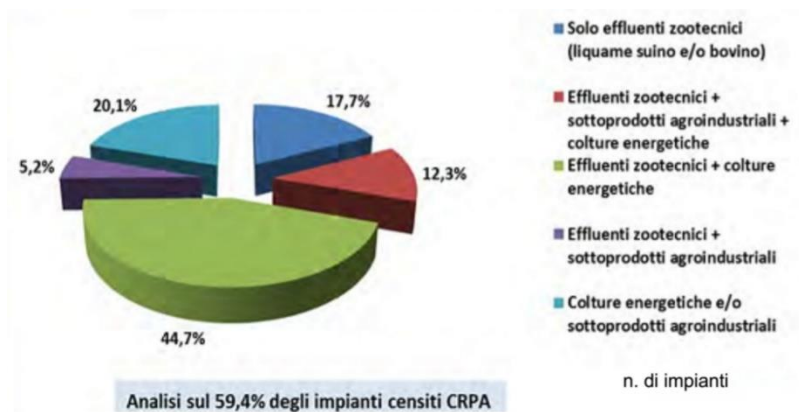
Rimozione di H_2S

La rimozione dell'acido solfidrico si rende necessaria soprattutto perché è un composto corrosivo che può danneggiare le parti vitali di un motore a combustione interna ad esempio. Le tecnologie più innovative nel campo della rimozione dell'acido solfidrico prevedono la sua rimozione attraverso trattamenti biologici. In particolare, microrganismi chemiotrofici, genere Thiobacillus, sono in grado di ossidare l'acido aggiungendo ossigeno attraverso un flusso di aria. L'ossidazione può avvenire all'interno del digestore anaerobico immobilizzando i microrganismi già presenti,

CONDIZIONI OTTIMALI PER LA FATTIBILITÀ DI UNA FILIERA AGROENERGETICA

Condizioni per la fattibilità:

- Il ruolo preferibile è quello dell'imprenditore trasformatore, autonomo dalla produzione della biomassa alla gestione del digestato;
- L'impianto deve essere dimensionata in relazione alla disponibilità di materia prima effettiva per un periodo medio-lungo e non viceversa;
- La dieta del digestore deve valorizzare soprattutto i sottoprodotti organici, in primis i reflui zootecnici, al bisogno integrando con le colture dedicate (insilati vegetali) o altri prodotti;
- La disponibilità dei terreni per lo spandimento finale del digestato deve essere sufficiente per adempiere alle indicazioni applicative della direttiva nitrati (DM 7/4/2006);
- Il tempo di ritorno del capitale sia il più contenuto possibile ed entro il periodo di erogazione degli incentivi;
- L'armonizzazione ed il coordinamento della capacità del territorio rurale di garantire l'approvvigionamento di biomassa al fine di non determinare distorsioni nel mercato dei prodotti agricoli;
- L'obiettivo dell'imprenditore agricolo che entra nella filiera agroenergetica dovrebbe essere quello di procurarsi un'integrazione al reddito agricolo, se non si vuole correre il rischio di perdere di vista il ruolo strategico che tradizionalmente occupa il settore primario.



TRATTAMENTI TERMICI

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

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

Al giorno d'oggi hanno assunto anche la funzione di produzione di energia elettrica e termica grazie all'entrata in vigore del Dlgs. 22/97 (Decreto Ronchi): per i RU, al 1 gennaio 1999 "la realizzazione e la gestione di nuovi impianti di incenerimento possono essere autorizzate solo se il relativo processo di combustione è accompagnato da recupero energetico con una quota minima di trasformazione del potere calorifico dei rifiuti in energia utile"

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

I principali processi termochimici sono:

- Combustione e co-combustione, con aria in eccesso. Producono calore, fumi.
- Gassificazione, con aria in difetto. Produce gas combustibili e gas derivato.
- Pirolisi e carbonizzazione, con assenza di aria. Produce gas derivato, olio (tar).

I fattori generali che influenzano le reazioni e i prodotti desiderati sono:

- Il comportamento del materiale al riscaldamento: riguarda le caratteristiche chimico-fisiche del materiale,
- Le condizioni di riscaldamento:
 - Tecnologia,
 - Condizioni di reazione,
 - Velocità di riscaldamento, tempo di residenza,
 - Mezzo di reazione,
 - Variabili del processo (T,p).

L'energia contenuta nel rifiuto può essere utilizzata per:

- Produzione di solo calore;
- Produzione di sola elettricità;
- Produzione combinata di calore ed elettricità (cogenerazione).

La soluzione ottimale è da ricercarsi nella produzione combinata di energia termica ed elettrica, rispondente ai requisiti delle BAT espressi dal "Bref for Waste Incineration" per il caso specifico dei RU.