

CAPITOLO 4

LA PROGETTAZIONE DEGLI IMPIANTI DI DIGESTIONE ANAEROBICA DEI RIFIUTI

4.1 Generalità

L'applicazione della digestione anaerobica al trattamento dei rifiuti consente sia di conseguire un notevole recupero energetico, attraverso l'utilizzo del biogas prodotto, sia di produrre, attraverso il trattamento aerobico del fango digerito, un residuo stabilizzato impiegabile come ammendante organico in agricoltura o per ripristini ambientali.

L'aspetto del recupero energetico è senza dubbio quello più interessante, in quanto il biogas prodotto, costituito per la maggior parte da metano (circa il 50-60%), ha un elevato potere calorifico (4000-5000 kcal/Nm³) e pertanto può essere convenientemente convertito in quasi tutte le forme di energia utili: calore, elettricità e cogenerazione (produzione congiunta di elettricità e calore). Le applicazioni più frequenti prevedono la sua combustione in motori endotermici, che consente la produzione di energia elettrica e termica in quantità sensibilmente superiore agli autoconsumi dell'impianto, utilizzando apparecchiature dotate di elevata semplicità impiantistica e gestionale.

Un altro aspetto di importanza non trascurabile consiste nella possibilità di recuperare materiali riutilizzabili dalle operazioni preliminari di selezione o da quelle successive di raffinazione, ed in particolare metalli (ferrosi e non ferrosi) e frazione combustibile.

Il rinnovato interesse verso questa tecnologia è in parte dovuto allo sviluppo di alcuni brevetti che consentono di operare con concentrazioni di solidi in alimentazione ai digestori, variabili tra il 15 ed il 35%, valori questi decisamente superiori a quelli comunemente utilizzati nei tradizionali reattori impiegati per il trattamento dei fanghi prodotti dagli impianti di depurazione, valutabili nell'ordine del 5-8%. Tali concentrazioni permettono di conseguire rendimenti elevati sia in termini di quantità di rifiuti trattabili e contrazione dei tempi di permanenza, che di produzione di biogas, con conseguente riduzione dei costi di investimento e dei fabbisogni energetici per il riscaldamento dei digestori e per la disidratazione dei fanghi digeriti.

Nei paragrafi successivi verranno illustrati i principali reparti di un impianto di digestione anaerobica dei rifiuti, sia indifferenziati sia provenienti da raccolta selezionata dell'organico, anche eventualmente in codigestione con fanghi da depurazione civile.

Verranno descritte, negli aspetti progettuali e gestionali, le principali operazioni unitarie che costituiscono il processo e le apparecchiature utilizzate. Si illustreranno le possibilità di utilizzo o di smaltimento dei prodotti e dei residui originati dal ciclo di trattamento e le modalità con cui può essere utilizzato, all'interno o all'esterno dell'impianto, il biogas prodotto dalla metanizzazione dei rifiuti. Verranno, inoltre, fornite indicazioni sul dimensionamento di una linea di trattamento e presentati bilanci di massa ed energia.

4.2 Aspetti progettuali

In questo paragrafo sono presentate alcune considerazioni di carattere generale relative alle principali problematiche che devono essere affrontate nella progettazione di un impianto di trattamento dei rifiuti.

Verranno in primo luogo fornite indicazioni relative alle modalità con cui devono essere individuati, nell'ambito delle attività di pianificazione del sistema di gestione integrata dei rifiuti, i dati da utilizzare come input per la progettazione degli impianti. A tale scopo verranno analizzati i principali fattori caratteristici del bacino d'utenza che influenzano le scelte del pianificatore.

Particolare attenzione è stata dedicata ai principali criteri da adottare per la scelta delle aree idonee ad accogliere gli impianti di trattamento dei rifiuti, soffermandosi sui principali fattori escludenti, penalizzanti e preferenziali che devono essere valutati in fase di localizzazione. Infine verranno fornite indicazioni relative alle varie fasi della realizzazione di un progetto, con particolare riferimento ai contenuti ed alle modalità di redazione.

4.2.1 Individuazione dei dati di progetto

I dati di input vengono forniti al progettista dai piani provinciali di gestione dei rifiuti, nei quali vengono definiti:

- tipologia e numero di impianti;
- localizzazione;
- potenzialità;
- caratteristiche dei rifiuti da trattare.

La corretta individuazione dei dati di progetto, eseguita nell'ambito dell'attività di pianificazione, è di importanza fondamentale per il raggiungimento degli obiettivi del sistema integrato di gestione dei rifiuti. E' evidente, infatti, che un'errata valutazione delle esigenze impiantistiche ha come conseguenza la realizzazione di strutture che, anche se correttamente progettate e dimensionate, non saranno in grado di risolvere i problemi connessi alla gestione dei rifiuti nel bacino.

Si ritiene, pertanto, importante fornire alcune indicazioni di carattere generale che possano essere d'aiuto a tutti coloro, tecnici ed amministratori, che, essendo coinvolti nella stesura dei piani d'ambito, si accingano alla ricerca delle informazioni necessarie alla definizione di dati di progetto che siano effettivamente rappresentativi della realtà sulla quale si deve intervenire.

Il punto di partenza fondamentale è l'analisi di tutti quei fattori che caratterizzano il bacino d'utenza (figura 4.1). In particolare si dovranno valutare:

- le caratteristiche del territorio;
- la situazione demografica;
- la quantità e qualità dei rifiuti prodotti;
- lo stato della raccolta e le preesistenze impiantistiche.

Solo da un'analisi approfondita e dettagliata di tali fattori potrà scaturire una corretta pianificazione del sistema di gestione dei rifiuti, finalizzata alla definizione del sistema di raccolta da adottare nel bacino e delle strutture che dovranno essere realizzate per far fronte ai fabbisogni impiantistici di trattamento e smaltimento.

4.2.2 Dimensioni del bacino

La ricerca delle informazioni necessarie alla pianificazione deve essere estesa ad un territorio di dimensioni adeguate. La normativa nazionale (D.Lgs 22/97) ha introdotto l'Ambito Territoriale Ottimale (ATO) come bacino preferenziale in cui attuare la gestione integrata dei rifiuti a livello locale, in quanto caratterizzato da dimensioni tali da consentire il conseguimento delle economie di scala necessarie per una elevata produttività del servizio.

Gli ATO vengono fatti coincidere, di regola, con il territorio provinciale. I loro confini vengono definiti dalle Regioni in modo tale che, all'interno del singolo ambito, sia realizzata l'autosufficienza nello smaltimento dei rifiuti urbani. Tuttavia, in funzione sia del particolare assetto territoriale sia della struttura urbanistica e viaria esistente, sia ancora della eventuale preesistenza di impianti di trattamento o smaltimento dei rifiuti, nonché sulla base di considerazioni di natura economica, gli ATO possono differire dai confini provinciali. Di conseguenza, possono esistere situazioni in cui risulti tecnicamente ed economicamente

conveniente accorpare i territori di più province per la costituzione di un ATO, o di contro, situazioni nelle quali, a causa di particolari configurazioni geografiche e condizioni socio-economiche, risulti necessario suddividere il territorio provinciale in più ambiti territoriali ottimali.

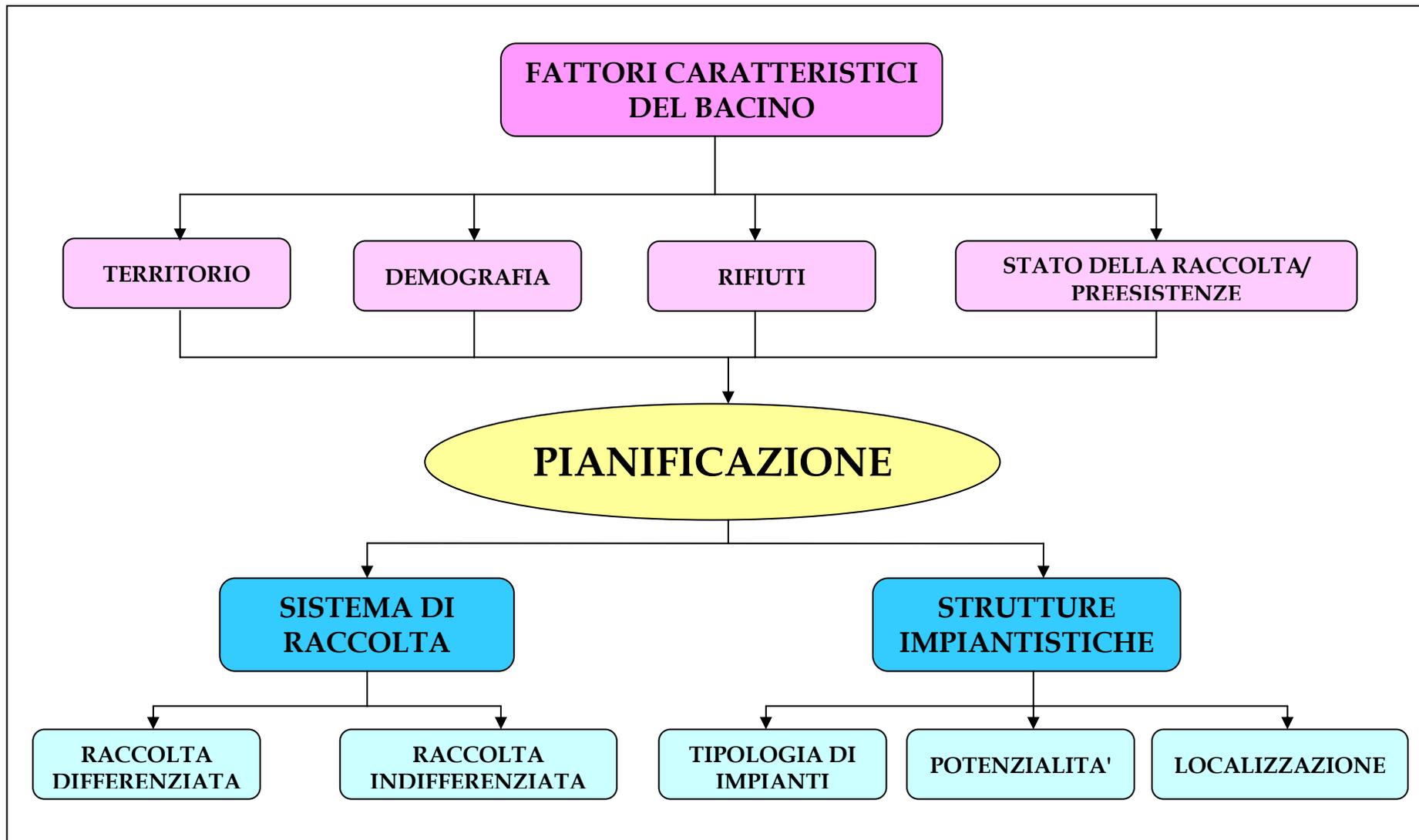


Figura 4.1: fattori che caratterizzano la pianificazione

4.2.3 Fattori caratteristici del bacino

Di seguito sono riportati i principali parametri che è necessario analizzare per avere un quadro rappresentativo della realtà oggetto della pianificazione.

Caratteristiche del territorio

Le caratteristiche del territorio costituiscono il primo aspetto del bacino che deve essere analizzato. Infatti si riscontrano in genere differenze sostanziali nella produzione di rifiuti in relazione al tipo di vita e di attività svolte nel territorio. Anche le caratteristiche qualitative risultano eterogenee, non solo nei diversi ambiti territoriali, ma anche nelle differenti zone di uno stesso ambito.

I principali fattori rappresentativi del territorio che devono essere considerati sono:

- tipologia del territorio;
- fattori climatici;
- densità abitativa;
- tipologie abitative prevalenti (abitazioni unifamiliari, condomini, insediamenti rurali, ecc.);
- attività prevalenti;
- viabilità;
- vincoli artistici.

Situazione demografica

Devono essere acquisite tutte le informazioni relative a:

- popolazione residente;
- popolazione fluttuante.

E'opportuno che i dati relativi alle caratteristiche demografiche del bacino nel periodo di osservazione siano integrati con stime e proiezioni future, in modo da avere un quadro del trend evolutivo almeno nel medio periodo.

Caratteristiche quali-quantitative dei rifiuti

La caratterizzazione dei rifiuti prodotti in un bacino è il punto di partenza fondamentale per la pianificazione dell'intero sistema organizzativo dei servizi di gestione dei rifiuti, in quanto influisce in maniera determinante su tutte le scelte operative ed impiantistiche.

Pertanto è necessario acquisire, con estremo dettaglio, tutti i dati relativi a:

- quantità
- qualità

dei rifiuti prodotti nel bacino.

La produzione di rifiuti urbani è strettamente legata a macro-fattori di natura socio-economica, in particolare alla capacità produttiva, al livello medio di reddito ed ai comportamenti di consumo delle famiglie. Inoltre è fortemente influenzata dalla stagionalità, determinata da vari fattori, quali turismo, clima, festività, ecc.

La quantità di rifiuti prodotti deve essere determinata con riferimento a varie tipologie:

- rifiuti urbani interni (domestici e non);
- rifiuti ingombranti;
- rifiuti assimilabili da attività produttive;
- rifiuti da spazzamento stradale;
- flussi da raccolte differenziate.

Inoltre devono essere attentamente valutate anche le dinamiche della produzione (indicazione delle punte di produzione, produzioni settimanali e produzioni mensili).

Per valutare la quantità di rifiuti prodotti si può ricorrere a stime di tipo *diretto* oppure *indiretto*.

Le stime di tipo *diretto* si basano sull'acquisizione dei dati relativi ai quantitativi di rifiuti conferiti in impianti di trattamento/smaltimento già presenti nell'area considerata.

Le stime di tipo *indiretto* sono invece basate su idonee assunzioni circa la produzione pro capite giornaliera di rifiuti e sul numero di abitanti presenti giornalmente nell'ambito territoriale di interesse.

Per la determinazione delle caratteristiche qualitative dei rifiuti urbani è necessario eseguire una serie di analisi volte ad individuarne:

- la composizione merceologica;
- le caratteristiche chimico-fisiche.

La conoscenza qualitativa di un rifiuto è probabilmente l'informazione più importante che si deve acquisire in quanto è una condizione indispensabile per poter scegliere in modo corretto il sistema di trattamento e/o smaltimento più valido, dimensionarlo in modo opportuno, programmare iniziative di raccolta differenziata e verificare quelle esistenti.

Spesso la composizione merceologica assunta quale dato di input per la progettazione degli impianti di trattamento non è sufficientemente rappresentativa delle caratteristiche dei rifiuti del bacino. A volte risale a periodi molto antecedenti la realizzazione degli impianti, in altri casi, non essendo disponibili dati recenti relativi al bacino in esame, vengono utilizzate informazioni estrapolate da bacini limitrofi aventi caratteristiche non del tutto assimilabili a quello su cui viene eseguita la pianificazione.

Queste situazioni hanno determinato in passato seri problemi in termini di verifica delle rese garantite dagli impianti con evidente ripercussione sulla loro funzionalità.

Pertanto è necessario che le analisi per la determinazione delle caratteristiche qualitative del rifiuto siano eseguite con estrema cura e su campioni statisticamente significativi al fine di cogliere le variazioni dovute a fattori temporali e territoriali.

L'individuazione del campione statisticamente rappresentativo dell'intero territorio deve essere effettuata tenendo conto delle seguenti variabili:

- aspetti demografici;
- morfologia riferita alle caratteristiche degli insediamenti;
- presenza di attività produttive.

Il numero di campionamenti dipende in genere dall'omogeneità del territorio considerato e dalla sua estensione ed il campionamento deve essere effettuato tenendo conto dei seguenti fattori:

- stagionalità;
- presenze turistiche rilevanti;
- esistenza di attività commerciali, di servizio e produttive;
- attività in essere di raccolta differenziata (al fine di quantificare la sottrazione di materiali a monte del conferimento indifferenziato).

Il CNR indica come campione su cui eseguire le analisi un quantitativo di circa 200 kg ricavato, tramite il metodo degli inquartamenti, da una massa di 3-4 t scaricata da un automezzo di raccolta scelto come rappresentativo della composizione media dei rifiuti della zona presa in esame.

Per eseguire l'analisi merceologica esistono diverse metodologie, che distinguono il rifiuto urbano in un numero variabile di classi.

Il principale sistema di classificazione utilizzato in Italia distingue il rifiuto in 6 o 7 classi merceologiche (classificazione adottata dal CNR nell'ambito del Progetto Finalizzato Energetica PFE2). L'analisi comporta l'impiego di un vaglio a maglie quadrate di 20 mm di lato, sul quale viene trattata la massa campione di circa 200 kg, opportunamente preparata. Il vagliato viene raccolto sopra un telo o un foglio di plastica preventivamente posato, mentre la rimanente massa, di pezzatura superiore a 20 mm, viene cernita a mano secondo diverse categorie. Il residuo di questa selezione costituisce l'ultima frazione, composta quasi unicamente da sostanze organiche (vegetali ed animali) e da materiale minuto praticamente non cernibile. Subito dopo la cernita si pesa ognuna delle frazioni separate:

- 1) sottovaglio;
- 2) carta e cartone;
- 3) tessili e legno;

- 4) materiale plastico;
- 5) metalli;
- 6) inerti;
- 7) sostanze organiche e varie.

Per avere informazioni complete sulle caratteristiche del rifiuto è necessario eseguire anche una serie di analisi volte ad individuarne le principali proprietà chimico-fisiche, tra cui:

- umidità;
- materie volatili;
- ceneri;
- potere calorifico inferiore;
- densità.

Le informazioni che si devono acquisire sulle caratteristiche del rifiuto e quindi il tipo ed il dettaglio di analisi da effettuare dipenderà generalmente dalla tipologia di trattamento a cui si vuole sottoporre il rifiuto.

In alcuni casi le sette classi merceologiche individuate sono insufficienti agli scopi richiesti e pertanto può essere necessario ricorrere a schemi di classificazione merceologica più articolati e dettagliati.

Stato della raccolta e preesistenze impiantistiche

Per completare il quadro rappresentativo del bacino oggetto della pianificazione è necessario acquisire tutte le informazioni possibili relative allo stato dell'arte della raccolta e dello smaltimento, in quanto da esso dipenderà l'individuazione dei nuovi interventi da programmare per far fronte alle esigenze di gestione dei rifiuti nell'ambito territoriale ottimale.

In particolare sarà necessario fare delle valutazioni riguardanti gli aspetti di seguito riportati.

➤ ***Stato della raccolta nel bacino***

E' utile acquisire informazioni relative a:

- abitanti serviti
- operatori di raccolta
- frequenze di raccolta
- mezzi impiegati
- numero di addetti
- struttura dei servizi di raccolta differenziata (numero di contenitori, frequenze di svuotamento, rese quantitative)

➤ ***Analisi quali-quantitativa delle utenze dei servizi***

In particolare devono essere individuate sia le utenze domestiche che altre utenze potenzialmente coinvolgibili in iniziative dedicate (negozi, esercizi commerciali, ristoranti, mense, alberghi, collegi, comunità, case di riposo, studi professionali ed ambulatori, strutture sanitarie, scuole, uffici pubblici attività di servizio attività industriali ed artigianali).

➤ ***Presenza di operatori del recupero***

E' utile valutare la presenza nel bacino di:

- centri di stoccaggio
- centri di trattamento
- utilizzatori finali
- gruppi del volontariato

➤ ***Stato della raccolta differenziata in bacini limitrofi***

Le informazioni desunte dall'analisi di realtà aventi caratteristiche simili a quella in esame, in cui siano già stati attivati particolari sistemi di raccolta, possono consentire di fare previsioni realistiche

sul raggiungimento degli obiettivi prefissati e sul riflesso che questo avrà sulle caratteristiche del rifiuto e su tutto il sistema di gestione.

➤ **Preesistenze impiantistiche**

E' necessaria un'attenta valutazione degli impianti già esistenti nel bacino ed in particolare degli impianti:

- di trattamento e/o riciclaggio delle frazioni raccolte in modo differenziato;
- di trattamento del rifiuto indifferenziato o residuale;
- di smaltimento dei residui e dei sottoprodotti dei precedenti trattamenti;
- industriali in cui possono essere utilizzate le frazioni raccolte separatamente o alcuni prodotti derivanti dal trattamento del rifiuto indifferenziato o residuale.

Nella valutazione delle preesistenze impiantistiche occorre considerare non solo gli impianti in esercizio, ma anche quelli autorizzati, sia nel caso in cui essi siano già realizzati ma non funzionanti, sia nel caso in cui siano in fase di realizzazione, sia nel caso in cui l'inizio della costruzione sia previsto in una fase successiva.

Un aspetto importante che deve essere considerato nella scelta dello schema di processo da adottare, che condiziona le caratteristiche e i quantitativi dei prodotti finali, è la possibilità di un effettivo impiego di questi ultimi in impianti esistenti. Nel caso in cui, per potenzialità e caratteristiche tecnologiche, gli impianti esistenti non appaiano adeguati a ricevere tali prodotti, dovrà essere valutata la fattibilità tecnico-economica di interventi di adeguamento di tali impianti. Qualora non sia possibile individuare impianti già esistenti o non siano proponibili idonei interventi di up-grading, dovrà essere considerata la necessità di realizzare nuovi impianti di valorizzazione dei materiali prodotti dagli impianti in esame, nonché di eventuale trattamento e smaltimento dei residui di processo.

Tra i vari fattori citati uno che incide in modo determinante sulle scelte da effettuare è lo stato della raccolta differenziata ed in particolare la priorità che viene assegnata all'intercettazione dei vari flussi di rifiuti. Infatti la raccolta delle diverse frazioni incide sulla quantità e sulla composizione del rifiuto indifferenziato o residuale prodotto a valle e di conseguenza sulle sue caratteristiche di trattabilità e sulla qualità dei prodotti ottenibili dal trattamento.

Per esempio la variazione della composizione merceologica determina una sostanziale modifica del comportamento del rifiuto alla separazione per vagliatura, tecnica ormai usuale per la selezione post-raccolta dei rifiuti solidi. L'alterazione della potenzialità di separazione dimensionale del rifiuto indifferenziato incide a sua volta in maniera rilevante su alcuni parametri caratteristici dei trattamenti successivi.

Pertanto a medio termine sarà proprio l'entità e la tipologia di raccolta differenziata attivata nel bacino ad indurre i cambiamenti più significativi sia dal punto di vista qualitativo che quantitativo sul rifiuto da avviare ai sistemi di trattamento.

Le informazioni acquisite dall'analisi dei fattori sopra descritti consentiranno una corretta pianificazione del sistema di gestione dei rifiuti nel bacino, la quale consentirà di definire:

- il sistema di raccolta da adottare, con la definizione degli obiettivi quantitativi e qualitativi di raccolta differenziata e dei flussi di rifiuto indifferenziato;
- la dotazione impiantistica del bacino, con la definizione del numero e della tipologia dei nuovi impianti, della loro potenzialità e della loro collocazione nel territorio.

4.2.4 Indicazioni sui criteri di localizzazione degli impianti

Un aspetto fondamentale da considerare nella pianificazione di un sistema di gestione dei rifiuti è la ricerca di aree idonee all'installazione di impianti di trattamento e/o smaltimento.

Il decreto legislativo 22/97 in materia di localizzazione degli impianti di smaltimento rifiuti, si limita semplicemente a sottolineare le competenze dei differenti Organi dello Stato, rimandando la soluzione del problema a successive norme tecniche. In particolare il decreto stabilisce che spetta alle Regioni la definizione dei criteri per l'individuazione, da parte delle Province, delle aree non idonee alla localizzazione degli impianti di smaltimento e di recupero dei rifiuti; le Province devono anche individuare le zone idonee a tale localizzazione e fornire indicazioni plurime per ogni tipo di impianto.

La procedura per l'individuazione dei siti in cui localizzare gli impianti procede per fasi successive di approssimazione:

- definizione da parte delle Regioni dei criteri per l'individuazione delle aree non idonee alla localizzazione;
- individuazione da parte delle Province delle zone non idonee e delle zone potenzialmente idonee;
- scelta dei siti potenziali.

Nella prima fase vengono fissati sia i criteri che hanno valenza di vincolo assoluto (*fattori escludenti*), determinati sulla base della normativa vigente e delle esperienze in atto, sia quelli che possono condizionare negativamente o positivamente la scelta del sito, cioè i *fattori penalizzanti* e i *fattori preferenziali*.

Nella fase successiva, sulla base dei criteri e dei vincoli fissati, si individuano le aree non idonee, che vengono escluse dalle successive fasi di elaborazione, da quelle potenzialmente idonee, che vengono sottoposte ad un'analisi più dettagliata finalizzata ad individuare quei fattori in grado di condizionare l'effettiva localizzazione degli impianti. Generalmente le aree potenzialmente idonee vengono individuate attraverso la sovrapposizione di carte tematiche a carattere tipicamente ambientale, elaborate per tutto il territorio in esame.

Le zone così selezionate, che costituiscono delle alternative di localizzazione, vengono sottoposte ad una procedura di comparazione finalizzata all'individuazione del sito che presenta la minore vulnerabilità ambientale, durante la quale vengono valutati tutti i fattori penalizzanti e preferenziali che caratterizzano le aree selezionate. A tal fine è utile introdurre delle scale di valutazione che fissino un gerarchia di importanza anche all'interno di ciascuna classe dei criteri considerati e che consentano quindi di procedere ad un ordinamento delle aree in classi di vulnerabilità.

In questo modo si individua un numero ristretto di siti potenzialmente idonei ad accogliere l'impianto, situati in territori con un livello di vulnerabilità analogo.

Il punto di partenza della procedura sopra descritta che conduce all'individuazione delle aree idonee ad accogliere gli impianti di smaltimento dei rifiuti è lo studio del territorio. A tale scopo devono essere acquisite tutte le informazioni bibliografiche e cartografiche relative alle caratteristiche geolitologiche, geomorfologiche, idrogeologiche, vincolistiche, ecc. del territorio in esame, da integrare eventualmente con indagini di campo.

In particolare i principali caratteri fisici di base del territorio che devono essere valutati sono:

- la litologia delle formazioni affioranti;
- l'idrogeologia (in particolare la soggiacenza della falda più superficiale, intesa come profondità rispetto al piano campagna del livello massimo raggiunto dall'acqua sotterranea nel territorio in esame);
- la geomorfologia (in particolare devono essere presi in considerazione tutti quei fattori quali l'instabilità dei versanti e i fenomeni di erosione accelerata che, alterando l'aspetto fisico del paesaggio, possono compromettere la sicurezza degli impianti).

Nei casi in cui il territorio in esame sia stato sottoposto in passato a fenomeni sismici o abbia manifestato fenomeni connessi ad attività endogene, è necessario anche effettuare la classificazione sismica del territorio ed individuare le aree in cui si sono verificate le manifestazioni legate al vulcanismo.

Altri aspetti, di natura territoriale e socioeconomica, che intervengono successivamente nella scelta delle aree selezionate, sono:

- l'uso reale del suolo;
- i caratteri naturalistici del territorio;
- l'idrologia superficiale;
- la distribuzione della popolazione;
- la distribuzione delle industrie sul territorio.

4.2.5 Indicazioni sui livelli di progettazione degli impianti di trattamento rifiuti

Il progetto di un impianto definisce, sulla base di una serie di dati di input, gli elaborati che individuano in maniera compiuta le caratteristiche tecniche delle opere civili, elettromeccaniche e complementari che costituiscono l'opera.

L'obiettivo è di realizzare un intervento di qualità, tecnicamente valido, nel rispetto del rapporto ottimale tra benefici e costi globali, inclusi quelli di manutenzione e gestione.

In ottemperanza a quanto previsto dalla L. 109/94 e dal D.P.R. 554/99 e successive modificazioni si possono individuare tre livelli progressivi di definizione del progetto di un impianto:

- preliminare;
- definitivo;
- esecutivo.

In merito ai requisiti minimali dei tre livelli di progettazione si rimanda al D.P.R. 554/99 e successive modificazioni, mentre di seguito vengono fornite alcune indicazioni più specifiche riguardo al tema in oggetto.

Progetto preliminare.

Il progetto preliminare di un impianto di trattamento rifiuti deve individuare:

- i dati quali-quantitativi sui rifiuti prodotti nel bacino d'interesse;
- il processo di trattamento/smaltimento dei rifiuti in ingresso all'impianto e degli eventuali sottoprodotti;
- un'area le cui caratteristiche siano tali da soddisfare le necessità dell'opera dal punto di vista localizzativo e funzionale;
- i servizi generali;
- le valutazioni economiche ed ambientali dell'intervento.

La raccolta dei dati viene effettuata attraverso l'analisi del catasto dei rifiuti, dei piani regionali e provinciali e di indagini statistiche svolte a livello d'ambito indirizzate ad individuare:

- caratteristiche quali-quantitative dei rifiuti prodotti, corredate da previsione a medio e lungo termine;
- attuali destinazioni dei rifiuti prodotti;
- presenza di impianti e/o discariche e loro caratteristiche;
- possibilità di inserimento nel sistema produttivo dei materiali o dell'energia recuperata.

La scelta del processo deve essere effettuata sulla base delle caratteristiche dei rifiuti prodotti e sul possibile destino dei prodotti finali del ciclo di trattamento.

In merito ai servizi generali si devono individuare i servizi ausiliari al funzionamento dell'impianto, quali ad esempio:

- fornitura elettrica;
- fornitura idrica, potabile ed industriale;
- fornitura metano;
- reti fognarie per collettamento reflui.

Il sito prescelto deve possedere caratteristiche idonee dal punto di vista dimensionale, morfologico ed idrogeologico ed essere servito da una buona viabilità di accesso.

Progetto definitivo e progetto esecutivo.

Il progetto definitivo e quello esecutivo devono individuare, in maniera univoca, a seconda del diverso livello di definizione, le caratteristiche tecniche dell'impianto e le sue prestazioni, con particolare riguardo alle opere ausiliarie di salvaguardia ambientale, ovvero gli impianti e le strutture destinate a minimizzare l'impatto ambientale.

La documentazione prodotta, comprensiva dello studio di impatto ambientale ove previsto, deve contenere tutte le informazioni necessarie all'esame del progetto, al rilascio delle autorizzazioni alla realizzazione ed all'esercizio, nonché alla fase di cantierizzazione dell'opera.

Gli interventi di salvaguardia ambientale possono essere distinti in:

- gestione reflui liquidi;
- gestione emissioni aeriformi;
- gestione emissioni sonore.

All'interno di un impianto di trattamento rifiuti le sorgenti di reflui liquidi che si possono originare sono essenzialmente riconducibili a:

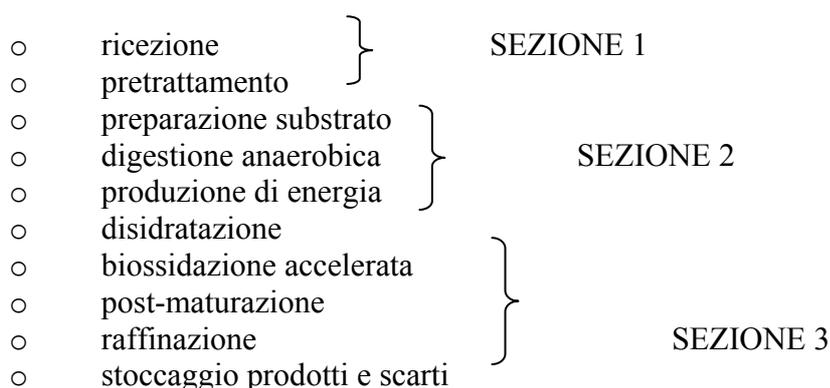
- reflui di processo;
- soluzioni acquose provenienti dal trattamento ad umido delle emissioni gassose;
- acque di lavaggio dei locali di stoccaggio e movimentazione rifiuti;
- reflui da laboratorio;
- reflui da servizi igienici;
- acque meteoriche che interessano strade e piazzali;
- acque meteoriche da superfici coperte.

In merito al problema del controllo delle emissioni le possibili sorgenti possono essere originate dallo stoccaggio e dalla movimentazione dei rifiuti, dalle varie fasi del processo e dal laboratorio di analisi.

Il controllo delle emissioni sonore prodotte dall'impianto deve essere oggetto di specifico studio inteso a minimizzare l'impatto sugli operatori addetti alla conduzione dell'impianto e sull'ambiente ad esso esterno.

4.3 Descrizione dei reparti dell'impianto

Un impianto di digestione anaerobica dei rifiuti può essere schematicamente suddiviso in tre sezioni principali in cui si possono individuare i seguenti reparti:



In figura 4.2 è riportato lo schema a blocchi "tipo" di un impianto di digestione anaerobica.

I rifiuti in ingresso all'impianto vengono trasferiti dai mezzi di raccolta al reparto ricezione, nel quale vengono stoccati all'interno di una fossa interrata oppure su un piazzale di scarico a raso.

Dal reparto ricezione i rifiuti vengono alimentati al reparto pretrattamento, nel quale vengono sottoposti ad una serie di operazioni atte a consentire l'eliminazione delle componenti indesiderate per la successiva fase di digestione anaerobica, quali ad esempio inerti e plastiche. La sequenza e la tipologia delle operazioni di pretrattamento dipenderà sia dalla natura del rifiuto in ingresso sia dalle caratteristiche del processo di digestione che verrà adottato.

I rifiuti così pretrattati sono avviati al reparto preparazione del substrato dove subiscono una omogeneizzazione, viene regolato il loro contenuto di umidità attraverso miscelazione con acqua di ricircolo o fanghi ed eventualmente viene eseguita una correzione della temperatura, in modo da ottenere una miscela con caratteristiche chimico-fisiche ottimali per poter essere alimentata nei digestori.

Il reparto di digestione anaerobica è costituito da una serie di unità di processo (digestori) in cui avviene, in condizioni controllate, la degradazione della sostanza organica e la produzione di biogas.

Il biogas prodotto, contenente circa il 50-60% di metano, viene depurato e avviato al reparto di produzione di energia (elettrica e/o termica), che è in parte utilizzata per gli autoconsumi dell'impianto ed in parte commercializzata all'esterno sotto forma di energia elettrica o termica.

Il fango digerito viene estratto dalle unità di digestione anaerobica ed inviato al reparto di disidratazione dal quale, attraverso una serie di operazioni di pressatura e di filtrazione, si ottiene una corrente di fanghi a basso contenuto di umidità ed una corrente di reflui di processo. Questi ultimi possono essere in parte riciccolati al reparto di preparazione del substrato e per la restante parte avviati all'impianto di depurazione. Il fango digerito e disidratato viene invece avviato alla sezione di stabilizzazione aerobica, che si compone di una prima fase di bioossidazione accelerata e di una successiva post-maturazione.

Il prodotto ottenuto viene avviato al reparto di raffinazione per l'eliminazione di quelle impurezze che potrebbero comprometterne il successivo utilizzo.

Nell'impianto è presente normalmente un reparto per lo stoccaggio sia dei prodotti commercializzabili che degli scarti da inviare allo smaltimento finale.

Nei punti successivi verranno descritti con maggior dettaglio i vari reparti dell'impianto.

4.3.1 Ricezione dei rifiuti

Nel reparto di ricezione di un impianto di digestione anaerobica possono essere conferiti diversi tipi di rifiuti:

- rifiuti indifferenziati e/o residuali;
- frazione organica selezionata da RU;
- fanghi da depurazione civile;
- rifiuti agro industriali;
- rifiuti zootecnici.

Il reparto di ricezione viene generalmente dimensionato in modo da accogliere un volume di rifiuti corrispondente ad una produzione di 2-3 giorni del bacino d'utenza servito. Tale aspetto è particolarmente importante per questo tipo di trattamento in quanto rende compatibile la discontinuità del servizio di raccolta con la continuità di esercizio dell'impianto, che si rende necessaria nel caso in cui si utilizzino digestori con funzionamento continuo.

Lo stoccaggio dei rifiuti può essere realizzato tramite una fossa interrata o tramite un piazzale di scarico a raso. Quest'ultimo può essere utilizzato soltanto per rifiuti con umidità ridotta, quindi è poco adatto per l'accumulo dei fanghi, mentre la fossa di stoccaggio interrata si può adattare a tutti i tipi di rifiuto, anche ad elevato contenuto di umidità.

Nel caso dello stoccaggio in fossa, il dimensionamento può essere condotto adottando il metodo grafico che prevede la costruzione delle curve delle portate influenti ed effluenti ed adottando un opportuno coefficiente di sicurezza che consenta di assorbire eventuali punte nella portata di ingresso. Al fine di prevenire il ristagno dei rifiuti la fossa deve essere priva di spigoli vivi; inoltre le pareti ed il fondo devono essere realizzati con modalità e materiali tali da sostenere i rifiuti stoccati nelle condizioni di massimo riempimento. Il posizionamento della fossa di stoccaggio deve consentire l'avvicinamento e la manovra dei mezzi di movimentazione del rifiuto.

La soluzione dello scarico a raso prevede, invece, la realizzazione di un piazzale in cui il rifiuto scaricato viene posizionato su zone differenziate in base alla sua provenienza; il calcolo della superficie minima richiesta può essere fatto considerando che i rifiuti devono essere disposti in cumuli la cui altezza dipende dalla tipologia di apparecchiatura scelta per la movimentazione. Per i rifiuti indifferenziati o per la frazione residuale della raccolta differenziata può essere scelto un angolo di riposo di circa $20\div 25^\circ$. Nota la quantità di rifiuti da stoccare, definita la massima altezza raggiungibile dai cumuli ed individuato l'angolo di riposo del rifiuto, si calcola la superficie minima richiesta dai cumuli. A tale superficie dovranno poi essere aggiunti ulteriori spazi necessari per la manovra dei mezzi di movimentazione del rifiuto. La pavimentazione dovrà essere realizzata con una pendenza tale da garantire il convogliamento delle acque di lavaggio e dei percolati in appositi pozzetti di raccolta. Il vantaggio principale dello stoccaggio a raso è legato alla semplicità di gestione.

Per quanto riguarda i fanghi, le dimensioni della zona di accumulo e il sistema di ripresa e di movimentazione devono essere tali da evitare fenomeni di intasamento dovuti all'eccessiva solidificazione della miscela. In genere vengono realizzate vasche in cemento armato attrezzate con tramogge in carpenteria metallica munite di fondo di estrazione a coclee che alimenta sistemi di pompaggio volumetrico. L'inclinazione delle falde della tramoggia deve essere tale da garantire lo scivolamento di materiali viscosi e le sue dimensioni non devono eccedere i due giorni di stoccaggio per evitare problemi di impaccamento e solidificazione della miscela.

Il fondo della vasca in cemento armato di contenimento deve essere impermeabilizzato e munito di pendenza per il recapito dei colaticci prodotti ad un pozzetto collegato alla rete acque di processo dell'impianto.

Per l'accumulo dei fanghi, in alternativa allo stoccaggio in fossa, possono essere utilizzati anche altri sistemi quali serbatoi fuori terra.

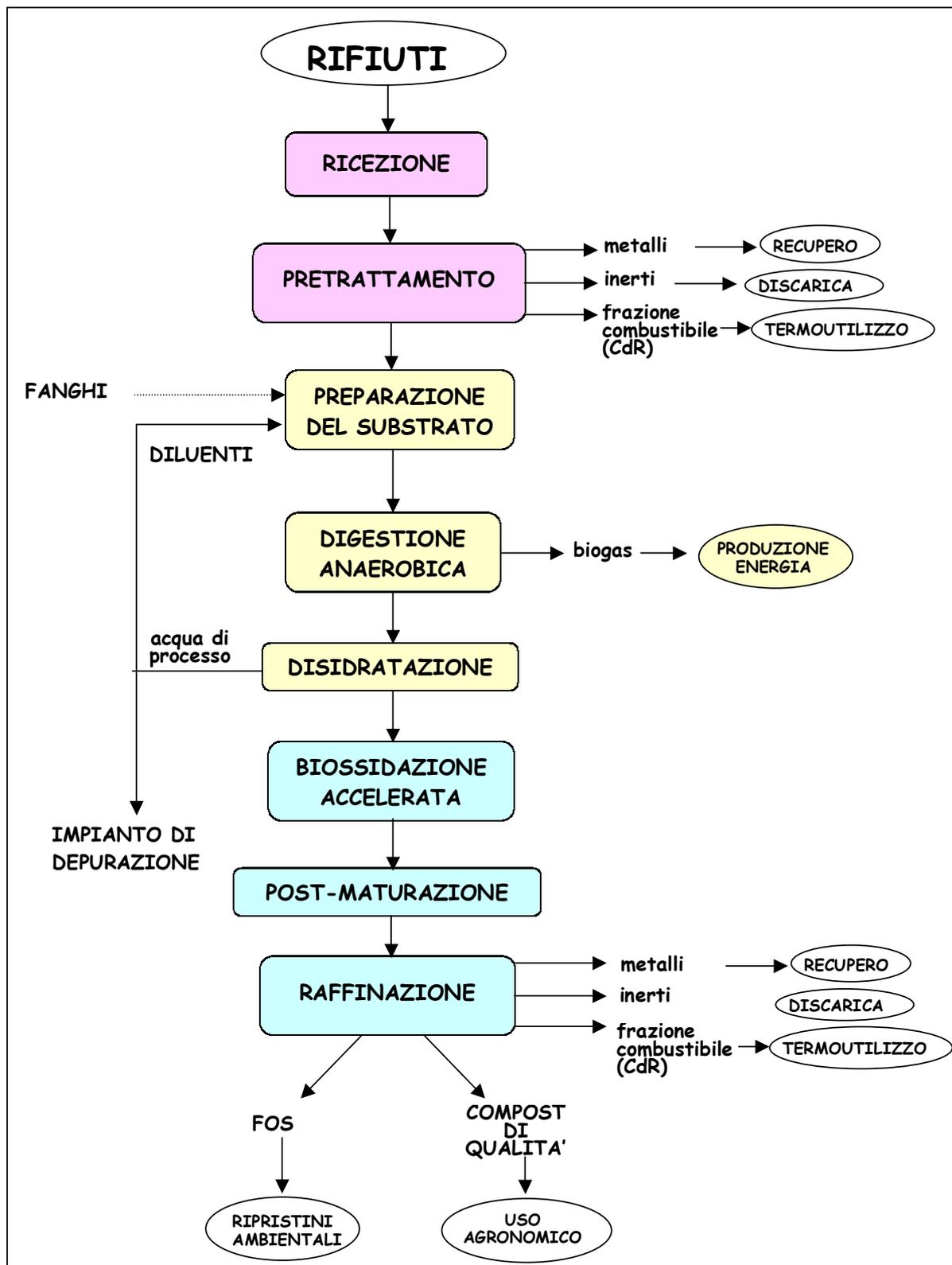


Figura 4.2. Schema a blocchi di un impianto di digestione anaerobica.

4.3.2 Pretrattamento dei rifiuti

Le operazioni di pretrattamento necessarie risultano differenti a seconda che vengano utilizzati processi di digestione anaerobica del tipo *a secco (dry)* oppure *ad umido (wet)*.

Nel primo caso le operazioni sono di tipo tradizionale e non prevedono la diluizione in fase di selezione, mentre nel secondo caso, già in fase di selezione si provvede alla miscelazione con acqua ed alla contemporanea separazione della frazione leggera (plastica) e pesante in particolari apparecchiature (flottatori).

La scelta delle operazioni da eseguire, la loro sequenza ed il tipo di apparecchiature da utilizzare, viene effettuata in relazione a:

- natura e caratteristiche del rifiuto in ingresso all'impianto;
- tipo di processo di digestione anaerobica adottato;
- qualità e destino dei materiali in uscita dall'impianto.

Quest'ultimo aspetto riveste un'importanza particolare, in quanto il destino dei materiali prodotti dall'impianto influenza direttamente le scelte di processo ovvero il grado di raffinazione richiesto.

Ciò vale in particolar modo per la frazione secca, che può essere termovalorizzata in impianti dedicati di trattamento rifiuti o, in alternativa, trasformata in un combustibile ad elevato grado di purezza, avente requisiti tali da poter essere utilizzato in impianti industriali.

Nel reparto di pretrattamento vengono di norma eseguite le seguenti operazioni:

Dilacerazione

Lo scopo della dilacerazione è quello di aprire i contenitori di raccolta nei quali vengono conferiti i rifiuti e di ridurre la pezzatura del materiale più voluminoso per permettere una selezione corretta. Tale operazione viene effettuata attraverso apparecchiature aprisacchi, le quali consentono di raggiungere l'obiettivo fissato senza provocare una frantumazione spinta del rifiuto, che potrebbe compromettere i successivi trattamenti per la commistione di materiali fini inerti triturati alla rimanente parte del rifiuto.

Questa operazione viene di norma eseguita con mulini ad alberi lenti, a dischi o a coltelli, oppure con mulini a coclee o con cilindri rompisacchi.

Separazione metalli

Tale operazione viene condotta con il duplice obiettivo di recuperare materie prime e di proteggere da abrasione ed eccessiva usura le apparecchiature successivamente utilizzate. La separazione dei metalli si ottiene impiegando separatori magnetici per metalli ferrosi e separatori a correnti indotte per metalli non ferrosi.

Separazione inerti e plastiche

Lo scopo della separazione degli inerti e delle materie plastiche è quello di rimuovere dalla massa di rifiuti le frazioni non biodegradabili e di ridurre il rischio di abrasione e di blocchi o intasamenti durante il processo. Tale operazione viene effettuata attraverso l'utilizzo di varie apparecchiature, singolarmente od in sequenza tra loro, quali vagli rotanti, vagli a dischi, vagli vibranti, separatori densimetrici, balistici, aeraulici o separatori ad umido (flottatori e sedimentatori).

Controllo pezzatura

Di norma è necessario sottoporre il flusso di rifiuti organici diretti al reparto di preparazione del substrato ad una riduzione delle dimensioni, allo scopo di rendere la pezzatura compatibile con il processo e con le apparecchiature utilizzate per la movimentazione della miscela. La granulometria del substrato, infatti, influenza direttamente le rese di processo, in quanto da essa dipende la superficie di contatto tra i microrganismi ed il materiale da digerire. In genere vengono ritenute accettabili dimensioni inferiori a 50 mm per la sostanza organica da alimentare alla sezione di digestione. Il controllo della pezzatura viene effettuato tramite fasi di vagliatura e triturazione eseguite prima delle operazioni di miscelazione del substrato.

Oltre ai pre-trattamenti meccanici sopra descritti, la letteratura riporta, principalmente a livello di ricerca scientifica e di impianti dimostrativi (Van Lier et al., 2000; Cecchi et al., 2000; Delgenès et al., 2000), alcuni pre-trattamenti di tipo chimico, fisico e biologico rivolti alla frazione organica prima per poterne migliorare la conversione in biogas. In generale, il principio si basa sulla solubilizzazione delle matrici solide difficilmente o non aggredibili nello stadio di digestione anaerobica. La figura 4.3 riassume i tipi di trattamento, gli obiettivi ed il meccanismo di azione.

Tipo di trattamento	Obiettivi	Principio d'azione
Trattamenti chimici	L'obiettivo comune di tutti i pretrattamenti del processo di digestione anaerobica è quello di rendere le frazioni di substrato non degradabili (es. frazioni lignocellulosiche)	Processi ossidativi
Trattamenti fisici		Processi termici, meccanici
Trattamenti biologici		Processi enzimatici

Figura 4.3. Trattamenti avanzati di pretrattamento delle matrici organiche prima della digestione anaerobica

Tali tecniche sono sostanzialmente finalizzate ad incrementare l'efficienza della fase idrolitica del processo di digestione, riconosciuta come lo step limitante l'intero processo.

Come accennato, la loro applicazione in impianti operanti su scala reale trova oggi scarsa diffusione, mentre notevole è l'attenzione dedicata a queste problematiche da parte del mondo scientifico.

4.3.3 Preparazione del substrato

I rifiuti organici devono essere sottoposti ai trattamenti necessari all'ottenimento di una miscela avente le caratteristiche chimico-fisiche ottimali per poter essere introdotta nei digestori. Tale preparazione si rende necessaria al fine di garantire il corretto funzionamento del processo e di ottimizzare le rese di metanizzazione. A tale scopo devono essere eseguite le seguenti operazioni:

Omogeneizzazione e regolazione del contenuto di umidità

I rifiuti devono essere diluiti in modo da regolare l'umidità della miscela al valore ottimale, prima dell'invio all'unità di digestione. Tale valore dipende dal tipo di processo utilizzato (ad umido, a secco, semi-secco) e dal materiale da sottoporre al trattamento. L'obiettivo può essere raggiunto tramite l'aggiunta di fanghi oppure di acqua di ricircolo proveniente dalla sezione di disidratazione. Oltre alla regolazione del contenuto d'acqua è anche necessario provvedere all'omogeneizzazione della miscela prima dell'introduzione nel digestore.

I tipi di miscelatori maggiormente utilizzati sono:

- miscelatori a coclee per processi a secco o semi-secco;
- idropolpatori per processi ad umido o semi-secco.

I dispositivi di agitazione o miscelazione devono essere realizzati in materiale resistente all'azione abrasiva o corrosiva dei materiali costituenti i rifiuti.

L'unità di miscelazione deve essere facilmente accessibile ed ispezionabile, al fine di consentire lo svolgimento delle operazioni di pulizia e di manutenzione ordinaria e straordinaria.

Regolazione della temperatura

La miscela da degradare deve essere portata alla temperatura richiesta dal particolare processo utilizzato. La regolazione termica può essere realizzata sia all'esterno che all'interno del digestore.

Nel primo caso viene generalmente riscaldata l'acqua di diluizione o la miscela stessa tramite scambiatori di calore.

Nel caso di riscaldamento interno, invece, è possibile ricorrere, oltre che all'utilizzo di scambiatori di calore, anche all'iniezione diretta di vapore nel digestore. In questo caso occorre effettuare una vivace miscelazione per prevenire il surriscaldamento del fango e lo shock termico dei batteri, che può causare la loro completa inibizione.

4.4 Dimensionamento dei reattori per la digestione anaerobica della frazione organica selezionata.

Il dimensionamento di un digestore può essere condotto a partire da due logiche differenti: o considerando i parametri cinetici, approccio tipicamente utilizzato per il dimensionamento dei reattori per biotecnologie, ovvero basandosi su criteri semplificati, quali i fattori di carico ed i parametri operativi. Nel caso di digestori per substrati complessi come la frazione organica dei rifiuti urbani, l'approccio generalmente utilizzato è il secondo. L'approssimazione legata a questa logica è ampiamente inferiore all'intervallo operativo che l'elasticità del processo consente, quindi i risultati sono normalmente più che accettabili. La discussione che segue comunque presenta il quadro completo, facendo riferimento agli aspetti cinetici, considerando anche un particolare approccio di ricerca sulla cinetica del processo dedicato espressamente al trattamento di substrati complessi come la frazione organica (modello *step diffusional*).

4.4.1 Modelli e costanti cinetiche

Modello del primo ordine

Questo modello si basa sull'assunzione che le cinetiche che regolano la degradazione di tutte le sostanze presenti nel substrato siano riconducibili al primo ordine, definendo quindi una costante globale media (pseudo primo ordine). L'equazione di base è:

$$dS / dt = - K \cdot S$$

dove K è la costante cinetica di primo ordine ed S rappresenta la concentrazione di tutti i composti organici biodegradabili (zuccheri, acidi grassi, aminoacidi) che costituiscono l'influente trattato. Per un reattore di tipo CSTR che operi in condizioni di stato stazionario il bilancio di massa del substrato considera la resa in termini di rimozione di S come una funzione del tempo idraulico di ritenzione HRT:

$$S = S_0 \frac{1}{1 + K \cdot HRT}$$

Dal momento che S risulta un parametro difficilmente misurabile se non con metodi grossolani (per esempio la determinazione del COD), si utilizza la trattazione di Chen e Hashimoto (1978) già richiamata nel capitolo 2, che tiene conto della biodegradabilità a tempo infinito, B_0 . In questo

modo, la produzione specifica di biogas B è ottenuta in funzione dell'HRT imposto al sistema, noti B_0 e K. Nonostante questo non sia un modello particolarmente raffinato è comunque molto utile e permette di definire un valore di K utilizzabile anche per substrati complessi come nel caso della frazione organica di rifiuti urbani o altri rifiuti organici.

Modello di Monod

Un altro tipo di modello, sviluppato inizialmente per la digestione anaerobica di fanghi di supero negli impianti di depurazione, considera la crescita batterica su di un substrato S in condizioni limitanti: la variazione netta di concentrazione dei microrganismi, X, è determinata sulla base dell'equazione:

$$K = K_{MAX} \frac{S}{K_S + S}$$

dove K rappresenta la velocità specifica di utilizzo del substrato S ($\text{kg substrato kg biomassa}^{-1} \text{ tempo}^{-1}$).

Se si imposta il bilancio di massa per i microrganismi e si assume $X_0 = 0$ (substrato sterile) il valore di concentrazione di substrato, S, è dato dalla relazione:

$$S = \frac{K_S \cdot (1 + K_d \cdot \text{HRT})}{\text{HRT} \cdot (Y \cdot K_{\max} - K_d) - 1}$$

Al solito, considerando Chen e Hashimoto (1978) si potrà quindi esprimere la produzione specifica di biogas come una funzione dell'HRT:

$$B = B_0 \left(1 - \frac{S}{S_0} \right)$$

Considerando k_d trascurabile rispetto agli altri termini (molto piccolo) le equazioni sopra riportate possono essere semplificate e si otterrà quindi:

$$S = \frac{K_S}{\text{HRT} \cdot Y \cdot K_{\max} - 1}$$

che, sostituita nella precedente da:

$$B = B_0 \left(1 - \frac{K_S / S_0}{\text{HRT} \cdot Y \cdot K_{\max} - 1} \right)$$

Modello per processi limitati dal trasferimento di massa

In accordo con Chen e Hashimoto (1978), l'equazione di Monod può essere riformulata secondo la forma

$$\mu = \mu_{MAX} \frac{S}{KS_0 + (1-K)S}$$

che include anche la concentrazione iniziale di substrato, S_0 . Questo consente di tener conto della limitazione nel trasferimento di massa.

Anche in questo caso, come nei due precedenti, si considera $K_d \approx 0$ per un digestore di tipo CSTR e si determina quindi il bilancio di massa dei microrganismi. Si otterrà quindi la seguente produzione specifica di metano:

$$B = B_0 \left(1 - \frac{K}{\text{HRT} \cdot Y \cdot K_{\text{max}} - 1 - K} \right)$$

Tutto ciò, come già detto, assume un significato relativo nel caso di substrati complessi come la frazione organica selezionata. Infatti, la modellizzazione del processo di digestione anaerobica applicato a substrati ad alto tenore in secco deve necessariamente tener conto, oltre che dei processi biologici, anche di aspetti legati alla fluidodinamica, e quindi contenere nella trattazione anche gli aspetti legati alla diffusione. Inoltre, l'eterogeneità del substrato, che comprende al proprio interno diverse classi di materiali a biodegradabilità molto diverse, non consente certo una trattazione semplice, come potrebbe essere quella relativa al ricorso ad una cinetica del pseudo primo ordine. Tuttavia, data la semplicità del modello, può essere opportuno richiamare alcuni valori determinati per i diversi tipi di frazione organica selezionata (tabella 4.1). I valori sono stati ottenuti utilizzando un sistema automatico di acquisizione della portata di gas applicato ad un digestore operante in semicontinuo, alimentato 2 o più volte al giorno. In questo modo si sono ottenute delle curve di produzione, la cui pendenza rappresenta proprio la velocità di consumo del substrato. La tabella seguente riporta i valori determinati, confrontati anche con quelli dei fanghi di supero.

Tabella 4.1. Valori di costanti del primo ordine per la frazione organica selezionata e i fanghi di supero (mesofilia) (Cecchi et al., 1991).

Substrato	K (d ⁻¹)	R ²
frazione organica da selezione meccanica	0.40	0.998
Fanghi di supero	0.28	0.983
Fanghi/frazione organica selezionata proveniente dalla grande distribuzione (50/50)	1.50	0.987
Fanghi/frazione organica selezionata proveniente dalla grande distribuzione (20/80)	2.20	0.981
frazione organica selezionata proveniente dalla grande distribuzione	3.00	-
frazione organica selezionata alla fonte	3.11	-

Come si può evincere dalla tabella, i valori dei coefficienti di correlazione sono piuttosto elevati anche utilizzando questo semplice approccio. Tuttavia, gli studi condotti hanno chiaramente dimostrato come esso non abbia valenza generale, giocando le diverse condizioni operative applicate un ruolo fondamentale nella forma e nelle pendenze della curva di produzione.

Si consideri ad esempio la tabella 4.2, che riporta i risultati relativi all'applicazione del modello del primo ordine in 4 differenti condizioni di carico organico in regime termofilo con la frazione organica da selezione meccanica.

Tabella 4.2. Costanti del primo ordine per la frazione organica da selezione meccanica (termofilia)

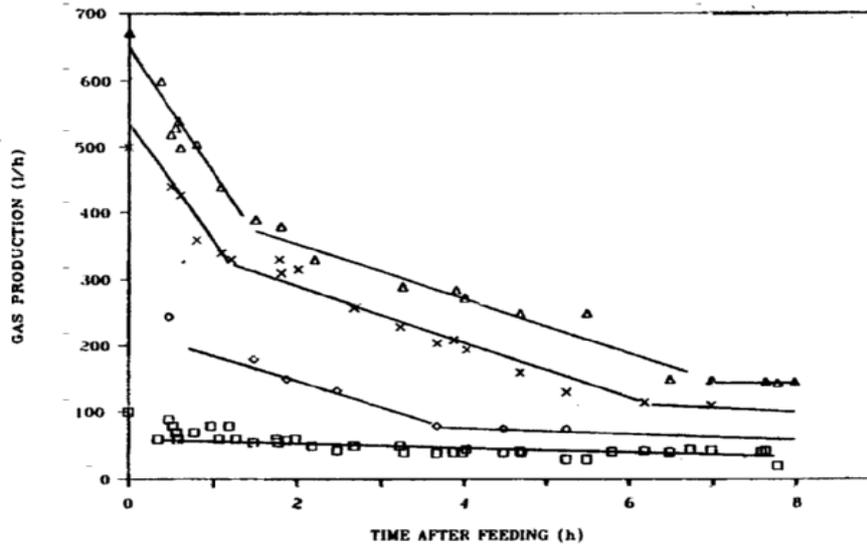
OLR, kgTVS/m³ d	K (d⁻¹)	R²
5.9	1.60	0.911
6.9	1.61	0.914
9.2	1.61	0.914
13.5	0.79	0.993

Si noti come, nella quarta condizione, il valore della costante risulti dimezzato a causa dell'eccesso di substrato, che fa tendere il sistema verso cinetiche di ordine 0. In altre parole, il sistema, all'aumentare della concentrazione di substrato disponibile, è governato dalla diffusione (ordine 0.5) per poi passare, in condizioni di sovraccarico, ad un valore costante della velocità di degradazione, quindi totalmente indipendente dalla concentrazione di substrato.

Un approccio diverso e con valenza più generale è costituito dal modello *step diffusional* (Cecchi et al., 1991). Il modello si basa su una logica di utilizzo del substrato a step successivi. In figura 4.4 è riportato l'andamento della produzione di biogas osservato in un reattore semicontinuo utilizzando diversi substrati. In particolare, nel caso della frazione organica di provenienza domestica si notano chiaramente tre tratti a differente pendenza, corrispondenti a diverse velocità di degradazione del substrato.

L'ipotesi alla base del modello è che ciascuno di questi tratti sia proprio di una classe di composti presenti all'interno del substrato, e che il processo lavori utilizzando dapprima quelli più facilmente biodegradabili, poi quelli mediamente ed infine quelli più difficilmente biodegradabili. Le classi di composti che il modello considera sono le seguenti:

- Composti tipo A: acetato e composti utilizzabili direttamente dai batteri (AcH, MeOH, ecc)
- Composti tipo B: VFA da C₃ e EtOH
- Composti tipo C: Materia organica libera (monosaccaridi, amminoacidi, ecc.)
- Composti tipo D: Materia organica complessa (polisaccaridi, lipidi, proteine)
- Composti tipo E: Materia organica non biodegradabile



Biogas production rates obtained between one feeding operation and the next. (Δ , Source-sorted organic fraction of municipal solid waste (OFMSW); \times , Mixture: 80% separately collected OFMSW and 20% Sewage Sludge (SS); \circ , Mixture: 50% separately collected OFMSW and 50% SS); \square , Sewage Sludge (SS).) Fitted curves using the step-diffusional model are also presented.

Figura 4.4: Andamento della produzione di gas in reattore semicontinuo utilizzando diversi substrati (Cecchi et al., 1990).

Per ciascuno dei primi 4 gruppi il modello prevede una espressione diversa per la velocità di degradazione, e precisamente:

Composti di tipo A: $\frac{dS}{dt} = (v_0^2 - 4a(S_0 - S))^{1/2}$, con $0 < t < t_1$

Composti di tipo B: $\frac{dS}{dt} = (v_1^2 - 4b(S_1 - S))^{1/2}$, con $t_1 < t < t_2$

Composti di tipo C: $\frac{dS}{dt} = (v_2^2 - 4c(S_2 - S))^{1/2}$, con $t_2 < t < t_3$

Composti di tipo D: $\frac{dS}{dt} = v_3$, con $t = t_3$

In queste equazioni, S_0 rappresenta la concentrazione iniziale di substrato disponibile, che verrà inizialmente degradato con velocità v_0 . Una volta rimossi i composti del gruppo A, la degradazione procede con velocità v_1 , e così via, fino ai composti di tipo D. $4a$, $4b$ e $4c$ sono costanti tipiche del modello. Da queste espressioni differenziali, separando le variabili ed integrando, si ottiene una espressione che mette in relazione S rispetto al tempo. Derivando nuovamente rispetto al tempo, si ottengono le seguenti espressioni, di più immediato utilizzo:

Composti di tipo A: $\frac{dS}{dt} = v_0 - 4a \frac{t}{2}$

Composti di tipo B: $-\frac{dS}{dt} = v_1 - 4b \frac{(t-t_1)}{2}$

Composti di tipo C: $-\frac{dS}{dt} = v_2 - 4c \frac{(t-t_2)}{2}$

Dove t_1 è il tempo necessario per il primo step e t_2 il tempo necessario per il secondo. Si noti che le v diventano le velocità iniziali dei tratti e le costanti 4a, 4b e 4c le relative pendenze, essendo queste equazioni di rette. Con riferimento alla precedente tabella, i valori delle costanti determinati nelle stesse condizioni operative secondo questo approccio sono riportati nella tabella 4.3.

Tabella 4.3. Valori relativi alle costanti cinetiche del modello step diffusional applicati alla digestione anaerobica termofila della frazione organica da selezione meccanica.

OLR, kgTVS/m ³ d	V ₁	4b	R ²	V ₂	4c	R ²
5.9	1.45	0.0019	0.982	0.94	0.0037	0.991
6.9	1.79	0.0036	0.995	1.13	0.00056	0.985
9.2	1.69	0.0033	0.986	1.15	0.00071	0.996
13.5	1.81	0.0008	0.984	-	-	-

I valori di v_0 e 4a non sono determinabili, a causa della scarsa presenza di composti di tipo A nel substrato. Tutti i valori sono espressi in gC/m³ min.

Si nota dai valori riportati un generale accordo di quelli relativi alle velocità iniziali, mentre una certa variabilità è riscontrabile nei valori delle costanti. Anche in questo caso, comunque, si evidenzia il problema del trattamento cinetico in condizioni di sovraccarico (vedi quarta riga), in cui prevale, come già detto, un comportamento tendente all'ordine 0.

I valori di R^2 ottenuti in questo modo sono migliori rispetto a quelli ottenuti con il modello del primo ordine, indice di una migliore affinità del modello che, comunque, non può ancora considerarsi esaustivo circa la descrizione del processo in ogni condizione di esercizio.

4.4.2 Dimensionamento di un digestore anaerobico per il trattamento della frazione organica selezionata sulla base dei parametri operativi e dei fattori di carico.

Il dimensionamento di un digestore per il trattamento della frazione organica selezionata può essere condotto a partire da due approcci:

- un approccio che consideri esclusivamente il carico volumetrico alimentato giornalmente (l'unico parametro da considerare in questo caso è il tempo di ritenzione idraulico);
- un approccio che consideri il carico organico applicabile al processo, e che consenta di dimensionare il reattore in modo tale da garantire il giusto apporto di substrato alla biomassa che deve operare la digestione.

Il dimensionamento effettuato sulla base del tempo di residenza volumetrica (HRT [d]) non è sufficiente a garantire il rispetto delle specifiche di esercizio, ma può essere eseguito solo in prima approssimazione e deve servire come verifica della compatibilità tra la geometria del digestore ed il tipo di materia da trattare.

In tabella 4.4 sono riportati i valori di HRT nelle varie condizioni di processo e per diversi substrati in alimentazione.

Substrato	Mesofilia			Termofilia		
	Processo umido	Processo semi-secco	Processo secco	Processo umido	Processo semi-secco	Processo secco
Frazione organica selezionata meccanicamente	14-30	15-20	17-30	10-18	6-15	12-20
Frazione organica da raccolta differenziata o selezionata alla fonte	12-18	12-18	17-25	8-16	10-16	12-16

Tabella 4.4 Valori del tempo di residenza volumetrica (HRT [d]) nei vari processi

Può essere adottata una procedura di calcolo riassumibile nei seguenti punti:

1° fase – Determinazione dei flussi di massa in ingresso

Normalmente, nelle ipotesi di dimensionamento, è noto il bacino di utenza da servire. Si stima allora, sulla base dei dati a disposizione relativi allo stato della produzione rifiuti della zona e dalle raccolte, una produzione pro capite, espressa in g di frazione organica selezionata prodotta per AE per giorno.

Il flusso di massa in ingresso, inteso come rifiuti tal quale, sarà:

Portata pro capite x bacino di utenza = frazione organica selezionata al giorno

A seconda del tipo di raccolta, si avranno differenti caratteristiche in termini di solidi totali e volatili. Il flusso in ingresso, che definisce il carico organico complessivo da inviare giornalmente al digestore, in termini di TS e TVS, può essere calcolato nel seguente modo:

frazione organica selezionata al giorno x %TS = TS al giorno

TS al giorno x TVS/TS = TVS al giorno

2° fase: determinazione del carico organico per m³ di reattore e calcolo del volume utile

Considerando i dati a disposizione, si sceglie un carico organico ottimale da applicare al digestore, in base agli intervalli utili di carico ed HRT per ciascun processo riportati in letteratura. A questo punto, noto il carico che si vuole applicare ed il flusso di massa in TVS in ingresso, il volume del digestore sarà dato da:

TVS al giorno / OLR (kgTVS/m³ d) = m³ di reattore

3° fase: verifica delle condizioni operative

Il volume determinato, anche se corretto in linea di principio, può non soddisfare le condizioni di mantenimento dell'HRT ai valori desiderati. Per condurre questa verifica è necessario conoscere il volume di substrato da alimentare, da calcolare tenendo conto di eventuali diluizioni (es. per portare la concentrazione al 20% nel processo semi-dry).

Nota quindi la densità, avremo:

frazione organica selezionata diluita / densità (t/m^3) = m^3 frazione organica selezionata al giorno

e quindi l'HRT:

volume digestore (m^3) / m^3 frazione organica selezionata al giorno = giorni di ritenzione

Spesso, seguendo questa logica, l'HRT che si viene ad applicare risulta troppo basso. E' opportuno allora ripetere il calcolo diminuendo il carico, fino ad arrivare ad un compromesso ottimale.

La riduzione del carico organico rappresenta sempre un fattore di sicurezza aggiuntivo rispetto ad eventuali situazioni di sovraccarico, in quanto il sistema può lavorare in condizioni meno stressanti.

4° fase: Considerazioni energetiche

La produzione di biogas giornaliera può essere calcolata utilizzando la seguente relazione:

$SGP, m^3/kgTVS \times kgTVS/giorno = m^3$ biogas prodotti al giorno

Stimando un potere calorifico inferiore di $5500 \text{ kcal}/m^3$, avremo la potenzialità energetica giornaliera:

$5500 \text{ kcal}/m^3 \times m^3 \text{ biogas/giorno} = \text{kcal/giorno}$

La spesa energetica per riscaldamento consta di due voci:

- il riscaldamento del rifiuto in ingresso
- le perdite di calore del digestore

Si può dimostrare, con calcoli appropriati, che il calore disperso per le perdite non supera il 5-10% del calore totale necessario a mantenere in temperatura il digestore. La spesa maggiore è quindi quella dovuta al riscaldamento della massa in ingresso. Il calcolo da condurre pertanto sarà essenzialmente quello del calore necessario per riscaldare il flusso di alimentazione dalla temperatura ambiente a quella di esercizio. Ciò si può fare, conoscendo il calore specifico del substrato, da:

portata di alimentazione, $m^3/giorno$ x calore specifico, $kcal/m^3 \text{ } ^\circ C$ giorno x
x (T esercizio – T ambiente), $^\circ C = \text{kcal/giorno}$

a questo vanno aggiunte le perdite pari approssimativamente al 5-10% del totale. In definitiva, quindi, la produzione netta sarà data dalle kcal ottenibili dal biogas meno quelle spese per l'energia di sostentamento del processo. Ciò, ovviamente, al netto dei rendimenti dei sistemi di riscaldamento e dei sistemi di trasferimento del calore.

Occorre considerare che non tutta la sostanza volatile viene completamente convertita in biogas. Infatti, dato che la sostanza organica non è composta solo dalla frazione rapidamente biodegradabile, per permettere una gassificazione quasi completa della sostanza volatile sarebbero necessari tempi di residenza volumetrica lunghissimi, con volumi e costi dei digestori non sostenibili. Nella pratica, perciò, si rinuncia a convertire in biogas tutta la sostanza volatile e si interrompe il trattamento biologico all'incirca quando tutta la frazione rapidamente biodegradabile è stata metabolizzata dai microrganismi. La sostanza volatile rimanente, infatti, viene aggredita dalla

flora batterica con una lentezza tale da poter considerare ormai stabilizzata la sostanza organica alimentata.

Per il calcolo del volume utile del digestore occorre considerare un coefficiente di sicurezza rappresentativo della flessibilità desiderata per l'impianto, generalmente compreso tra 1.1 e 1.3.

Un digestore dimensionato con un carico organico basso, a cui corrisponde un volume del reattore elevato, è caratterizzato da una buona flessibilità di esercizio, in quanto permette di affrontare diverse capacità di trattamento. Inoltre il sovradimensionamento incide in misura limitata sui costi d'impianto. Per contro le rese di processo (m^3 di biogas prodotto/ m^3 di reattore \times giorno) sono minori rispetto ai reattori ad alto carico.

Nella tabella 4.5 sono riportati i valori del carico organico (OLR) applicato nei principali tipi di processi di digestione anaerobica distinguendo, in base al tipo di matrice in alimentazione ai reattori, tra frazione organica selezionata meccanicamente da rifiuti urbani e rifiuti organici da raccolta differenziata.

Substrato	Mesofilia			Termofilia		
	Processo umido	Processo semi-secco	Processo secco	Processo umido	Processo semi-secco	Processo secco
Frazione organica selezionata meccanicamente	2.6-4	6-8	6-9	2-5	6-20	9-15
Frazione organica da raccolta differenziata	2-3	3-4	4-6	2-5	4-10	6-9

Tabella 4.5 Valori del carico organico (OLR [$\text{kgTVS}/\text{m}^3 \times \text{d}$]) nei vari processi

Nella progettazione delle unità di digestione anaerobica è necessario anche prestare particolare attenzione agli aspetti costruttivi legati al sistema di caricamento e scaricamento della miscela dal digestore ed alla movimentazione dei fanghi.

Il sistema di caricamento/scaricamento deve essere realizzato in modo tale che, durante le fasi di introduzione e di estrazione del materiale dal digestore, non si verifichi ingresso d'aria nella massa in fermentazione e fughe di materia o di biogas dal reattore.

Il sistema di scaricamento, nel caso si utilizzi il volume del digestore come polmone, deve permettere il dosaggio del materiale digerito alla fase successiva del processo.

Deve essere previsto inoltre un sistema di controllo allo scarico che impedisca accidentali svuotamenti del digestore.

Per quanto riguarda la movimentazione dei fanghi è necessario utilizzare particolari accorgimenti, tanto più importanti quanto maggiore è il contenuto di solidi nella massa in alimentazione. In particolare si possono fornire le seguenti indicazioni:

- il diametro delle tubazioni deve essere sempre superiore ai 3 pollici, anche nelle movimentazioni di portate ridotte;
- devono esser evitati gomiti stretti e restringimenti di sezioni;
- le pompe utilizzate devono essere di tipo volumetrico e senza restringimenti di diametro rispetto alle tubazioni;
- per il ricircolo dei fanghi possono essere utilizzate anche pompe dilaceratrici;
- devono essere previsti sistemi per il disintasamento, soprattutto in prossimità di pompe ed organi di intercettazione e controllo;
- devono essere previste valvole di sicurezza sulle linee principali.

Qualunque sia il sistema di caricamento/svuotamento e di movimentazione dei fanghi, il digestore deve essere dotato di un sistema di protezione alla pressione ed al vuoto.

4.4.3 Sistemi di agitazione per l'omogeneizzazione del substrato

All'interno del reattore il substrato in fase di digestione deve essere opportunamente miscelato, in modo tale da:

- favorire il contatto tra batteri e substrato;
- evitare la presenza di zone morte;
- garantire una distribuzione omogenea della temperatura;
- ottimizzare il rilascio di biogas;
- evitare la sedimentazione del fango e la formazione di pellicole superficiali.

Nella tabella 4.6 sono riportati i sistemi di agitazione più utilizzati nei digestori anaerobici con i relativi vantaggi e svantaggi.

Nel caso dei processi a secco, esistono in commercio diversi brevetti basati su vari principi di funzionamento (iniezione di biogas in pressione, ricircolo esterno del digerito, fogge particolari del digestore, ecc).

Gli agitatori meccanici sono generalmente soggetti ad abrasione e ad intasamento, a causa della presenza di particelle dure o fibrose, e richiedono pertanto frequenti interventi di manutenzione.

Il ricircolo del fango dall'uscita all'ingresso del digestore non produce una sufficiente miscelazione e pertanto viene utilizzato in combinazione con i sistemi meccanici. Inoltre, nel caso di processi a secco è più difficile da realizzare.

Per quanto riguarda l'iniezione di biogas essa viene generalmente effettuata in zone specifiche per evitare di esporre i batteri ad ambienti sfavorevoli. E' richiesta una pressione più elevata per processi a secco che per processi ad umido.

Tabella 4.6 Sistemi di agitazione (Fonte: documento CITEC 2001)

Tipo di mixer	Vantaggi	Svantaggi
Tutti i sistemi	Aumento della velocità di stabilizzazione	Corrosione e logorio dei materiali ferrosi. Intasamento dovuto a stracci e materiali fibrosi.
Lance montate sulla parte superiore del digestore	Minor manutenzione e minori ostacoli alla pulizia rispetto alle lance montate sul fondo. Efficacia nel controllo delle schiume	Corrosione delle tubazioni. Alti costi di manutenzione per i compressori. Problemi di intasamento. Problemi con i compressori nel caso di risalita delle schiume. Deposito di solidi.
Diffusori di fondo	Miglior movimentazione degli strati bassi del digestore	Corrosione delle tubazioni. Alti costi di manutenzione dei compressori. Problemi di schiume. Possibilità di intasamento. Miscelazione non completa del digestore. Formazione di schiume. Depositi di fondo possono variare il profilo di miscelazione. Rottura dei tubi di fondo. Necessario lo svuotamento per la manutenzione.
Gas-lifter	Migliore miscelazione e produzione di gas rispetto	Corrosione delle tubazioni. Alti costi per la manutenzione dei

	alle lance montate sulla parte superiore. Minor potenza assorbita	ompressori. Corrosione del gas-lifter. Formazione di schiume. Miscelazione di superficie poco efficiente. Necessario lo svuotamento per la manutenzione. Intasamento delle lance.
Agitatori meccanici Turbine a bassa velocità	Buona efficienza di miscelazione	Logorio delle pale. Intasamento a causa di stracci. Possibilità di perdite di gas nel sistema di tenuta dell'albero. Possibilità di lunghi periodi di sovraccarico. Richiedono installazioni di potenza maggiori.
Miscelatori a bassa velocità	Rottura delle croste	Non adatto per la miscelazione di tutto il digestore. Possibilità di perdite dalla tenuta dell'albero. Logorio delle pale. Intasamento da stracci.
Pompaggio meccanico (interno)	Buona miscelazione in senso verticale. Bassa formazione di schiume.	Sensibile al livello del liquame. Corrosione delle parti in movimento delle pompe. Richiedono installazioni di potenza maggiori. Intasamento da stracci.
Pompaggio meccanico (esterno)	Buona miscelazione in senso verticale. Bassa formazione di schiume grazie al continuo pompaggio dello strato superficiale Minori costi di manutenzione rispetto ai compressori	La pulizia completa richiede lo svuotamento. Possibilità di intasamento da stracci. Logorio delle parti in movimento.
Insufflazione di biogas dal fondo	Valida anche nei sistemi ad alto contenuto di solidi Assenza di sistemi meccanici in ambiente di gas	Maggiori costi energetici dovuti alla compressione del biogas

4.5 Produzione, depurazione ed utilizzo del biogas

Produzione di biogas

La produzione di biogas costituisce uno dei principali vantaggi della digestione anaerobica dei rifiuti, grazie al consistente recupero energetico che si riesce a conseguire tramite il suo utilizzo. Pertanto l'intero processo deve essere condotto in maniera tale da massimizzare le rese di metanizzazione.

La portata all'uscita dal digestore può presentare però delle variazioni importanti, dal 60 al 140% della portata media. A ciò corrisponde anche una variazione della qualità del biogas prodotto, il cui tenore in metano può oscillare dal 45 al 65 %.

Queste variazioni sono dovute alla differente velocità di degradazione dei diversi componenti della materia organica degradabile. Infatti, poco dopo l'introduzione del substrato nel digestore, i primi componenti si degradano, producendo un biogas molto ricco di anidride carbonica, mentre gli altri componenti si degradano più tardi con produzione di un biogas più ricco in metano.

I due parametri, portata e concentrazione di CH₄, variano in senso opposto: durante il caricamento del digestore si ha una grande portata di biogas a basso contenuto di metano, mentre lontano del caricamento, durante il week-end per esempio, si ha una portata ridotta ma ricca di metano.

Il rendimento in biogas del processo, espresso in termini di m³/kgTVS alimentati, è molto variabile e dipende dalla frazione biodegradabile del substrato. Infatti non tutta la sostanza organica presente nel digestore viene convertita in biogas, ma solo una sua frazione, come rappresentato nella figura 4.3, che illustra la trasformazione del substrato durante il processo di digestione anaerobica.

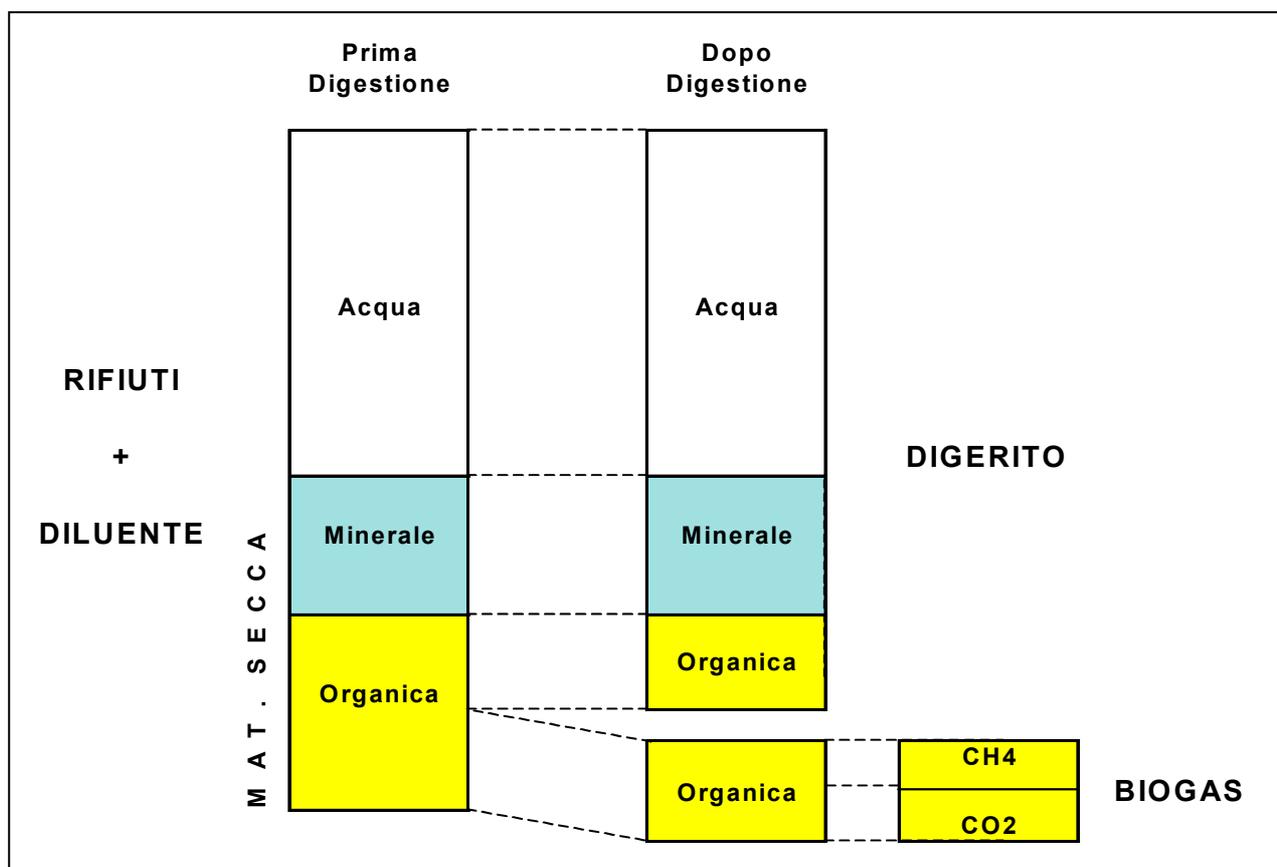


Figura 4.5 Trasformazione del substrato nel digestore

Nella tabella 4.7 sono riportati i dati di rendimento in biogas disponibili in letteratura relativi ai diversi substrati ed ai differenti tipi di processo, distinti in base al contenuto in solidi nel reattore ed al diverso regime termico.

Substrato	Mesofilia			Termofilia		
	Processo umido	Processo semi-secco	Processo secco	Processo umido	Processo semi-secco	Processo secco
Frazione organica selezionata meccanicamente	0.17-0.23	0.23-0.30	0.35-0.45	0.20-0.30	0.30-0.41	0.35-0.45
Frazione organica da raccolta differenziata	0.65-0.85	0.60-0.80	0.50-0.70	0.60-0.85	0.60-0.80	0.50-0.70

Tabella 4.7 Valori del rendimento in biogas [m³/kgTVS al.] nei vari processi

Nella tabella 4.8 sono, invece, riportate le principali caratteristiche del biogas.

Componenti	Percentuale
Metano (CH ₄)	55 – 65 %
Anidride carbonica (CO ₂)	35 – 45 %
Idrogeno solforato (H ₂ S)	0,02 – 0,2 %
Vapore d'acqua	saturazione
Idrogeno, ammoniacca	tracce
Ossigeno, azoto	tracce

Tabella 4.8 Composizione del biogas (concentrazioni su gas secco)

Tutte le tubazioni e le apparecchiature devono essere realizzate con opportuni materiali che tengano conto del carattere corrosivo di alcuni componenti, in particolar modo dell'idrogeno solforato.

All'uscita del digestore deve essere prevista una filtrazione (<10µm) per eliminare le particelle liquide o solide che potrebbero essere trascinate dal biogas. Questo semplice sistema permette di proteggere le soffianti o i compressori che verranno utilizzati per l'alimentazione del gas ai successivi utilizzi.

Depurazione del biogas

Prima dell'utilizzo a fini energetici il biogas deve essere sottoposto ad opportuni trattamenti di depurazione.

Infatti la presenza di anidride carbonica, azoto ed acqua provoca l'abbassamento del potere calorifico della miscela, mentre sostanze come l'idrogeno solforato ed i composti organici alogenati, che possono essere presenti nel biogas, si comportano da agenti corrosivi, causando sensibili danni agli impianti di utilizzazione.

La scelta del trattamento o dei trattamenti più opportuni dipende sia dalle caratteristiche del biogas che dalle modalità di utilizzo previste.

In questa sede non si intende entrare nel merito dei criteri di dimensionamento delle apparecchiature per la depurazione del biogas, ampiamente descritti nella letteratura specializzata, ma si vogliono solo richiamare i principali trattamenti a cui è necessario sottoporre il fluido prima dell'alimentazione ai gruppi di produzione di energia. Tali trattamenti sono finalizzati ad ottenere un sensibile abbassamento dei costi di conduzione e manutenzione delle macchine, un

funzionamento ottimale ed una maggior affidabilità, oltre alla garanzia di rispetto dei limiti di emissione imposti dalla legge.

Deumidificazione

Il trattamento di deumidificazione è necessario in quanto l'umidità, di cui il biogas è saturo, può condensare all'interno delle tubazioni, in seguito a variazioni di temperatura e/o pressione, provocando malfunzionamenti.

Il sistema di deumidificazione è costituito generalmente da un gruppo frigorifero in grado di raffreddare il gas da inviare ai motori. In tal modo si separa dalla miscela gassosa l'umidità che, condensando, viene allontanata precipitando al contempo sostanze nocive e corrosive presenti nel flusso gassoso stesso.

Desolforazione

Quando i livelli di idrogeno solforato sono elevati è necessario prevedere dei sistemi di abbattimento integrativi, ad umido o a secco, della sola deumidificazione.

Per quanto riguarda i *sistemi ad umido*, questi possono essere assimilati alle torri di lavaggio (scrubber) normalmente utilizzate per la depurazione delle emissioni gassose. Tali sistemi devono essere installati prima della sezione di deumidificazione.

Un primo sistema utilizza una reazione chimica, generalmente in condizioni di pressione e temperatura ambiente. Il trattamento consiste nel lavaggio con una soluzione basica, che neutralizza l' H_2SO_4 , composto altamente corrosivo e quindi pericoloso per gli impianti di utilizzazione, formato dall' H_2S . Una successiva fase di lavaggio acido permette di neutralizzare l'eccesso di base prima dello scarico della soluzione. Il principale vantaggio di questo sistema è la semplicità, ma il costo dei reattivi e del trattamento dell'acqua scaricata ne riduce l'impiego industriale.

Un altro sistema, poco diffuso, consiste nel lavaggio con acqua sotto pressione che mette in soluzione l' H_2S insieme alla CO_2 . Tale miscela viene poi rilasciata in una successiva fase di stripping.

Il *sistema* di desolforazione *a secco* prevede un processo di trattamento di tipo chimico e consiste nel far passare il biogas attraverso una sostanza adsorbente.

Una prima opzione consiste in un sistema che utilizza un adsorbente contenente ossidi di ferro in grado di interagire con l'acido solfidrico e captarlo in modo da separarlo dal biogas.

Un'altra opzione prevede l'utilizzo del carbone attivo.

Il volume della massa desolforante dipende dai seguenti parametri:

- concentrazione dell' H_2S nei gas da trattare
- pressione e temperatura (normalmente condizioni ambiente)
- velocità di attraversamento del gas nella massa adsorbente
- tempo di contatto massa – gas
- ciclo di sostituzione dell'adsorbente.

I due sistemi si differenziano in quanto la rigenerazione dell'ossido di ferro è più facile rispetto a quella del carbone attivo. Infatti, l'ossido di ferro si riforma dalla reazione con l'aria e con l'acqua in cui si libera lo zolfo solido che viene trascinato via. Una semplice filtrazione permette la sua eliminazione. La sostituzione della massa di ossido di ferro si deve effettuare solo dopo molti cicli di rigenerazione.

Nel caso del carbone attivo, invece, la rigenerazione richiede l'utilizzo di solventi e, anche se viene condotta a regola d'arte, il carbone rigenerato perde parte della sua efficacia rispetto a quello di partenza, pertanto il costo della rigenerazione e la sostituzione frequente del carbone attivo rendono questa soluzione applicabile solo nei casi in cui si ha una concentrazione molto ridotta in H_2S .

Un terzo sistema consiste nell'utilizzo di un biofiltro nel quale risiedono numerose specie di microrganismi in grado di degradare i composti solforati, in questo caso, la depurazione del gas dipende principalmente da porosità, temperatura, pH, umidità e dalla concentrazione di H_2S nella fase gassosa.

Nonostante i costi di gestione siano contenuti, questo sistema non è ancora molto utilizzato industrialmente.

Processi di rimozione della CO₂

In alcuni casi può essere utile effettuare anche dei trattamenti per la rimozione o riduzione del contenuto di CO₂, finalizzati ad aumentare il tenore in metano del biogas.

I processi più utilizzati, che devono essere installati solo dopo la rimozione dell'H₂S, sono:

- assorbimento della CO₂ in acqua con successivo stripping ed emissione in atmosfera (il più semplice e meno costoso a parte il costo di compressione);
- impiego di membrane semipermeabili, in grado di lasciare passare la CO₂ e di trattenere il CH₄.

Utilizzo del biogas

Essendo la produzione di biogas continua, tutti i sistemi di raccolta ed utilizzo devono essere automatici.

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 interni, una parte (dal 15 al 25% dell'energia prodotta), può essere utilizzata per il riscaldamento dei digestori ed, eventualmente, per coprire il fabbisogno di energia elettrica dell'impianto (cogenerazione di calore ed elettricità). L'utilizzo del biogas per il riscaldamento è variabile in funzione della stagione e del momento nella giornata; il riscaldamento è in genere attivo quando è in corso il caricamento del digestore.

Il biogas in eccesso può essere valorizzato con diverse modalità, alcune delle quali particolarmente sviluppate. Di seguito vengono riportate le principali possibilità di utilizzo.

- Produzione di calore sotto forma d'acqua calda, di vapore o d'aria calda, per il riscaldamento, l'essiccazione e processi industriali (disidratazione di percolati di discariche). Rendimento medio: 80-85%. Questa scelta comporta l'esistenza di un impiego locale (condomini per abitazione collettiva o terziaria, rete di teleriscaldamento, industrie).
- Produzione di elettricità, generalmente con motori a gas, eventualmente con turbine a vapore o turbine a gas per gli impianti di più ampia capacità. Rendimento medio: 30-35%.
- Produzione combinata di calore e di elettricità (cogenerazione). Rendimento medio: 80-85%, 50% per calore e 35% per elettricità.

Esistono anche altre filiere emergenti, quali:

- produzione di carburante per veicoli;
- produzione di gas naturale per iniezione nella rete pubblica di trasporto e distribuzione;
- produzione di freddo, per esempio con macchine ad assorbimento (industrie agro-alimentari);
- utilizzo in forni industriali come combustibile primario o ausiliario.

La soluzione più comunemente adottata è rappresentata dalla produzione combinata di calore e di elettricità.

Tra i vari sistemi utilizzabili per la cogenerazione, che si differenziano tra loro per il tipo di motore termico impiegato per la generazione di potenza meccanica e quindi elettrica, si ricordano:

- turbina a vapore;
- turbina a gas;

- motori alternativi a ciclo Diesel;
- motori alternativi a ciclo Otto;

Per quanto riguarda la scelta tecnica del sistema di cogenerazione possono valere le seguenti considerazioni.

Le taglie degli impianti più frequentemente adottate, in termini di portata di trattamento dei rifiuti e di conseguenza per quanto riguarda le potenze, portano ad escludere l'utilizzo di impianti con turbine a vapore.

Anche le turbine a gas, per quanto riguarda i loro rendimenti elettrici, inferiori nella media di circa 10 punti percentuali rispetto ai motori alternativi, non sembrano costituire la soluzione ottimale. Inoltre il loro utilizzo è stato fino ad oggi limitato dal fatto che non esistono sul mercato turbine di piccola capacità, in grado di accettare ampie variazioni di quantità e qualità del combustibile.

La soluzione più conveniente consiste nella scelta di motori alternativi a ciclo Diesel ed a ciclo Otto.

Il biogas prodotto dal digestore deve essere utilizzato in continuo, pertanto il dimensionamento di tutte le apparecchiature deve essere fatto tenendo conto dei periodi di fermata necessari per l'esecuzione delle operazioni di manutenzione programmata.

Il gruppo di produzione di energia deve essere dimensionato sulla portata totale di produzione, incluse le punte, detratte le quantità di gas destinate all'utilizzo interno dell'impianto.

Una volta definito il dimensionamento teorico dell'impianto di produzione di energia, il numero di gruppi sarà scelto in funzione della flessibilità richiesta e della taglia dei gruppi disponibili sul mercato.

Le apparecchiature in commercio garantiscono rendimenti di conversione dal 30 fino al 45% a seconda della taglia del motore e del gas di alimentazione.

Al fine di ottenere una certa flessibilità, è consigliabile prevedere almeno due gruppi, pertanto la taglia unitaria dei motori scende a livelli in cui il rendimento prevedibile è compreso tra il 32 e il 36%. Per l'alternatore, un rendimento elettrico usuale è del 95%. Il rendimento complessivo dei gruppi può essere considerato normale tra il 30 e il 34% ed è tanto maggiore quanto più grande è la taglia.

Sistemi di accumulo del biogas

Per rendere compatibili le cinetiche di produzione di biogas con quelle di utilizzo è necessario installare un sistema di accumulo.

Il volume e la pressione devono essere determinati in funzione di una valutazione costi-benefici, cercando una soluzione di compromesso tra il costo d'investimento e di gestione, principalmente dovuto alla compressione del biogas, ed il beneficio derivante dalla vendita dell'energia prodotta.

Per non arrivare a volumi e a costi troppo sostenuti, lo stoccaggio deve essere limitato alla quantità necessaria per ammortizzare le punte di produzione (per esempio volume uguale ad un'ora di produzione), e deve essere realizzato a bassa pressione.

Tutte le tubazioni ed i serbatoi di stoccaggio del biogas devono essere realizzati a perfetta tenuta, in modo da evitare possibili infiltrazioni d'aria che potrebbero dar luogo ad esplosioni dovute al suo carattere altamente infiammabile.

Torcia di sicurezza

In tutti gli impianti con produzione di biogas è necessario prevedere la presenza di una torcia di emergenza che garantisca la combustione del biogas prodotto.

Il dimensionamento della torcia deve essere fatto in modo tale da consentire non solo la combustione della portata normale del biogas, ma anche dei quantitativi provenienti dall'eventuale svuotamento rapido di tutti gli stoccaggi.

La torcia di sicurezza deve consentire la combustione del biogas in condizioni di emergenza assicurando:

- il mantenimento di valori di temperatura adeguati a limitare l'emissione di inquinanti e la produzione di fuliggine;
- l'omogeneità della temperatura all'interno della camera di combustione;
- un adeguato tempo di residenza del biogas all'interno della camera di combustione;
- un sufficiente grado di miscelazione tra biogas ed aria di combustione;
- un valore sufficientemente elevato della concentrazione di ossigeno libero nei fumi effluenti.

Al fine di conferire al sistema una maggiore affidabilità la torcia deve essere dotata di sistemi automatici di accensione e controllo della fiamma.

Il tempo di funzionamento deve essere calcolato tenendo conto dei tempi di manutenzione dei gruppi.

4.5 Disidratazione dei fanghi

Durante la fase di digestione anaerobica la materia secca volatile si trasforma in biogas e quindi fuoriesce dal digestore, mentre nella massa rimane un fango, più liquido che all'ingresso, con valori di sostanza secca dell'ordine del 20-25% per i processi a secco e del 5-10% per i processi liquidi, costituito dalla materia non digerita e dalla maggior parte dell'acqua.

Tale fango deve essere sottoposto ad un trattamento di disidratazione, al fine di ottenere un prodotto più concentrato (circa 45% di materia secca), avente caratteristiche fisiche compatibili con la successiva fase di stabilizzazione aerobica.

A seconda della qualità dei rifiuti trattati, del tipo di processo (secco, semi-secco o liquido) e del destino della materia stabilizzata, il sistema di disidratazione dei fanghi digeriti può essere realizzato mediante pressa a vite, centrifuga o nastropressa oppure mediante una opportuna combinazione di queste apparecchiature.

La scelta deve essere fatta in funzione della granulometria delle particelle dure, del tenore in materia secca del materiale da inviare alla stabilizzazione aerobica e del tenore in materia secca dell'acqua di processo in relazione con il suo destino.

In tabella 4.9 sono riportate le caratteristiche delle apparecchiature citate in termini di percentuale di materia secca ottenuta nelle due frazioni separate.

Tipo di macchina	% MS frazione secca	% MS frazione liquida
Pressa a vite	40-55%	10-20%
Centrifuga	25-35%	3-8%
Nastro-pressa	30-40%	1-3%

Tabella 4.9 Caratteristiche delle apparecchiature di disidratazione

Pressa a vite

E' generalmente utilizzata per la disidratazione di fanghi provenienti da processi di digestione a secco. Infatti è l'unica macchina in grado di disidratare un fango derivante dal trattamento di rifiuti urbani con particelle solide aventi dimensioni superiori ai 20-30 mm.

La vite, che gira all'interno di un tubo filtro, deve produrre uno sforzo importante per vincere la resistenza del tappo idraulico che ritiene la materia in uscita. E' proprio questa pressione generata sulla materia tra la vite ed il tappo che spinge l'acqua attraverso i fori del tubo filtro. La robustezza di questi elementi e la loro resistenza all'abrasione sono determinanti nella scelta dell'apparecchiatura.

Nonostante le precauzioni per il rivestimento anti-abrasione, la manutenzione gioca un ruolo molto importante nel funzionamento regolare della pressa.

Le presse a vite devono essere sempre installate almeno in due esemplari con un fattore di sovradimensionamento almeno del 50%.

Il diametro dei fori e la portata richiesta definiscono la lunghezza della zona di pressatura e quindi la potenza richiesta mentre il diametro dei fori e la pressione di servizio definiscono il tenore in materia secca del sugo.

Centrifuga

Questa macchina, più comunemente utilizzata nel trattamento dei fanghi, può essere utilizzata sia direttamente per la disidratazione del materiale in uscita dal digestore, sia come trattamento complementare del sugo proveniente da una pressa a vite.

La potenza installata sarà funzione della portata e della quantità di materia secca da estrarre.

Nastro-pressa

Questo filtro, diffuso anche nel settore del trattamento dei fanghi, può essere utilizzato sia direttamente per la disidratazione del materiale in uscita da un digestore funzionante con un processo di tipo liquido, sia per il trattamento complementare del sugo dopo una pressa a vite o dopo una centrifuga, al fine di ottenere un refluo con caratteristiche migliori.

La potenza installata sarà funzione della portata e della quantità di materia secca da estrarre.

Il flusso liquido separato con le varie apparecchiature contiene ancora particelle fini di materia secca e/o organica e deve essere opportunamente trattato per raggiungere i parametri compatibili con il suo impiego.

Una parte del liquido può essere utilizzata come diluente per preparare la miscela in ingresso ai digestori, importante soprattutto nel caso di trattamento di rifiuti urbani. Per l'utilizzo come diluente, la frazione liquida deve avere un tenore in materia secca generalmente inferiore al 5% per evitare l'aumento continuo del tenore in particelle fini nella massa in fermentazione che sbilancerebbe il processo. La restante parte deve essere opportunamente convogliata ad un impianto di depurazione.

4.7 Stabilizzazione e raffinazione del fango digerito

Il fango digerito prodotto dalla fase di metanizzazione risulta in genere non completamente stabilizzato, a causa del ridotto tempo di residenza dei rifiuti all'interno del reattore. A tale scopo deve essere prevista una successiva fase di stabilizzazione aerobica, finalizzata al completamento della degradazione della materia organica, più difficilmente degradabile, ed all'ottenimento dell'igienizzazione del materiale. Il grado di maturazione richiesto dipende dall'utilizzo finale del prodotto stabilizzato.

Generalmente il fango digerito viene sottoposto ad un trattamento di stabilizzazione che si sviluppa in due fasi:

- bioossidazione accelerata;
- post-maturazione.

Poiché il materiale organico ha già subito una parziale degradazione, i tempi di permanenza nel reparto di stabilizzazione aerobica potranno essere contenuti entro i 30-45 giorni.

A seconda del destino finale del biostabilizzato può essere richiesta una raffinazione del materiale, da realizzare dopo la fase di bioossidazione accelerata o, in alternativa, dopo la postmaturazione.

4.8 Stoccaggio finale dei prodotti

Negli impianti di digestione anaerobica dei rifiuti devono essere previsti reparti per lo stoccaggio differenziato del materiale trattato e dei residui del trattamento. Le zone di stoccaggio devono essere, preferibilmente, coperte per evitare possibili alterazioni e, specialmente nella stagione invernale, il dilavamento a causa delle frequenti precipitazioni. Le dimensioni della sezione di

stoccaggio finale e le distanze dai cumuli devono essere tali da garantire la circolazione ed il movimento degli automezzi adibiti alle operazioni di prelievo e scarico dei materiali stessi.

4.9 Dimensionamento della linea

Il dimensionamento della linea viene di norma effettuato tenendo in considerazione la portata di trattamento giornaliera dei rifiuti in ingresso all'impianto e la loro composizione merceologica.

Di norma si preferisce adottare potenzialità orarie delle linee di trattamento non eccedenti le 30-35 t/h ricorrendo alla realizzazione di più linee o, in alternativa, allo svolgimento di più turni di trattamento.

La portata di ingresso dell'impianto deve tener conto di un fattore di sovraccarico minimo del 20%. In tabella 4.10 vengono riassunti alcuni parametri caratteristici da utilizzare per l'individuazione del numero e per il dimensionamento delle linee di trattamento.

Tabella 4.10: Parametri di dimensionamento delle linee di trattamento

Potenzialità (t/a)	Numero di giorni di funzionamento/anno	Numero di linee	Numero di turni	Portata media della linea (t/h)
<25.000	312	1	1	15÷20
25.000÷100.000	312	1÷2	1÷2	20÷30
>100.000	312	2	1÷2	30÷35

4.10 Bilancio di massa dell'impianto

Il bilancio di massa permette di apprezzare l'evoluzione delle diverse frazioni liquide e solide che costituiscono il substrato nel corso del processo.

Il bilancio varia a seconda del tipo di processo (a secco o ad umido) ma è comunque strettamente correlato alla natura dei rifiuti trattati (rapporto tra rifiuti di cucina, rifiuti verdi, carta/cartone, rifiuti dell'industria agro-alimentare, ecc.), in cui il tenore di inerti, di materia secca e di materia organica degradabile è variabile.

Nelle figure seguenti sono riportati degli esempi indicativi di bilanci di materia validi per impianti di digestione anaerobica a secco e ad umido di rifiuti urbani e di rifiuti organici selezionati.

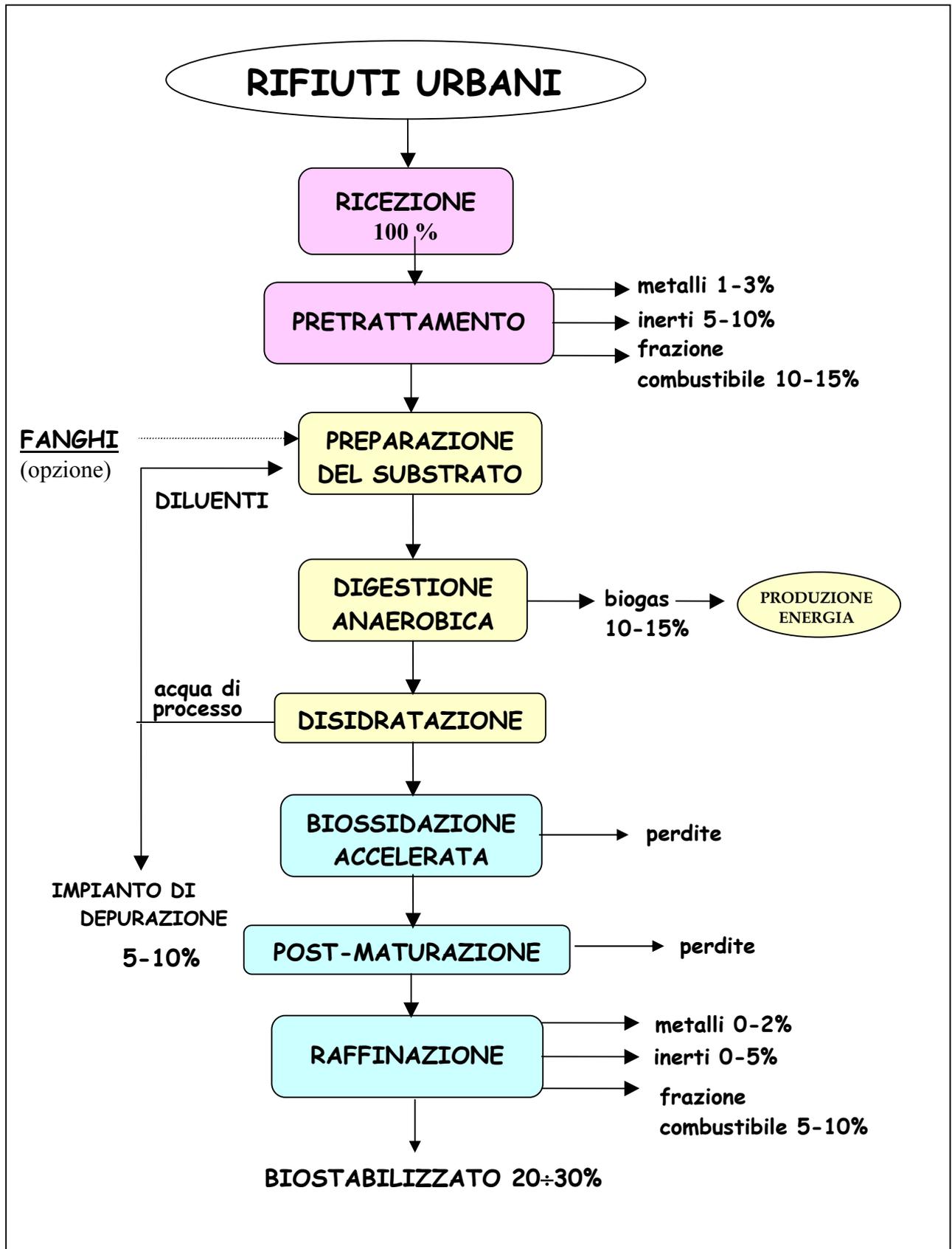


Figura 4.6: Bilancio di massa di un impianto per rifiuti urbani con processo a secco

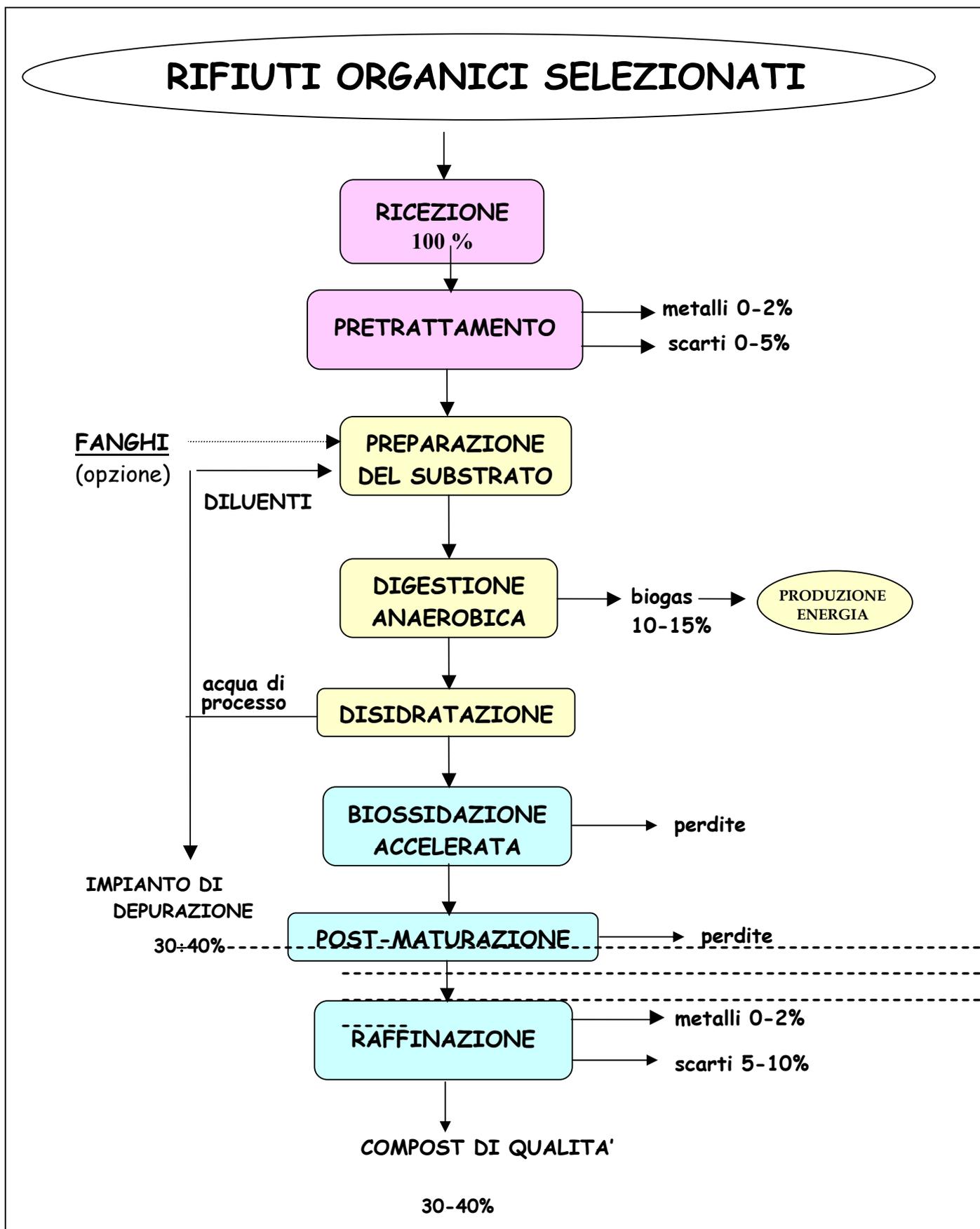


Figura 4.7: Bilancio di massa di un impianto per rifiuti organici selezionati con processo a secco

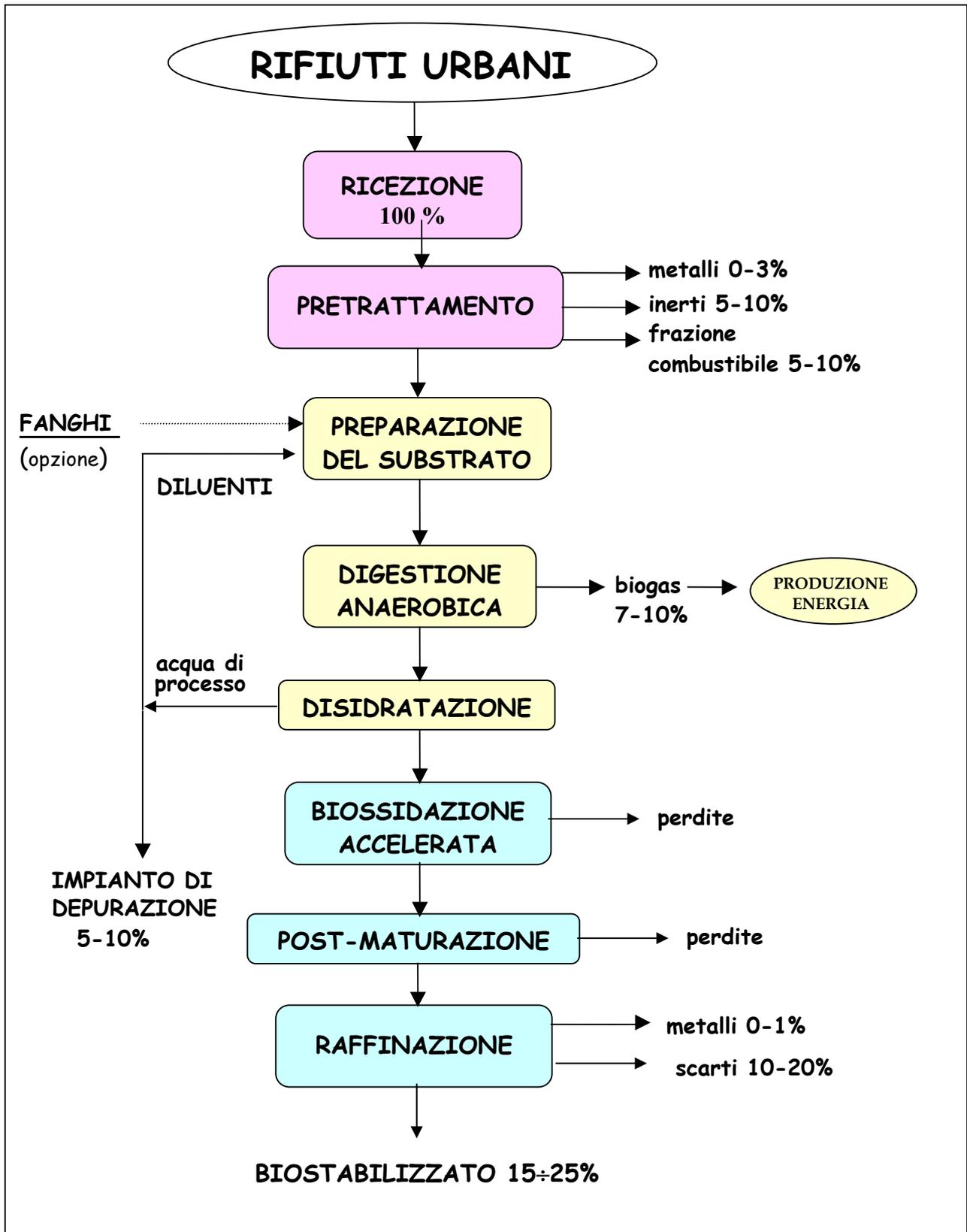


Figura 4.8 Bilancio di massa di un impianto per rifiuti urbani con processo liquido

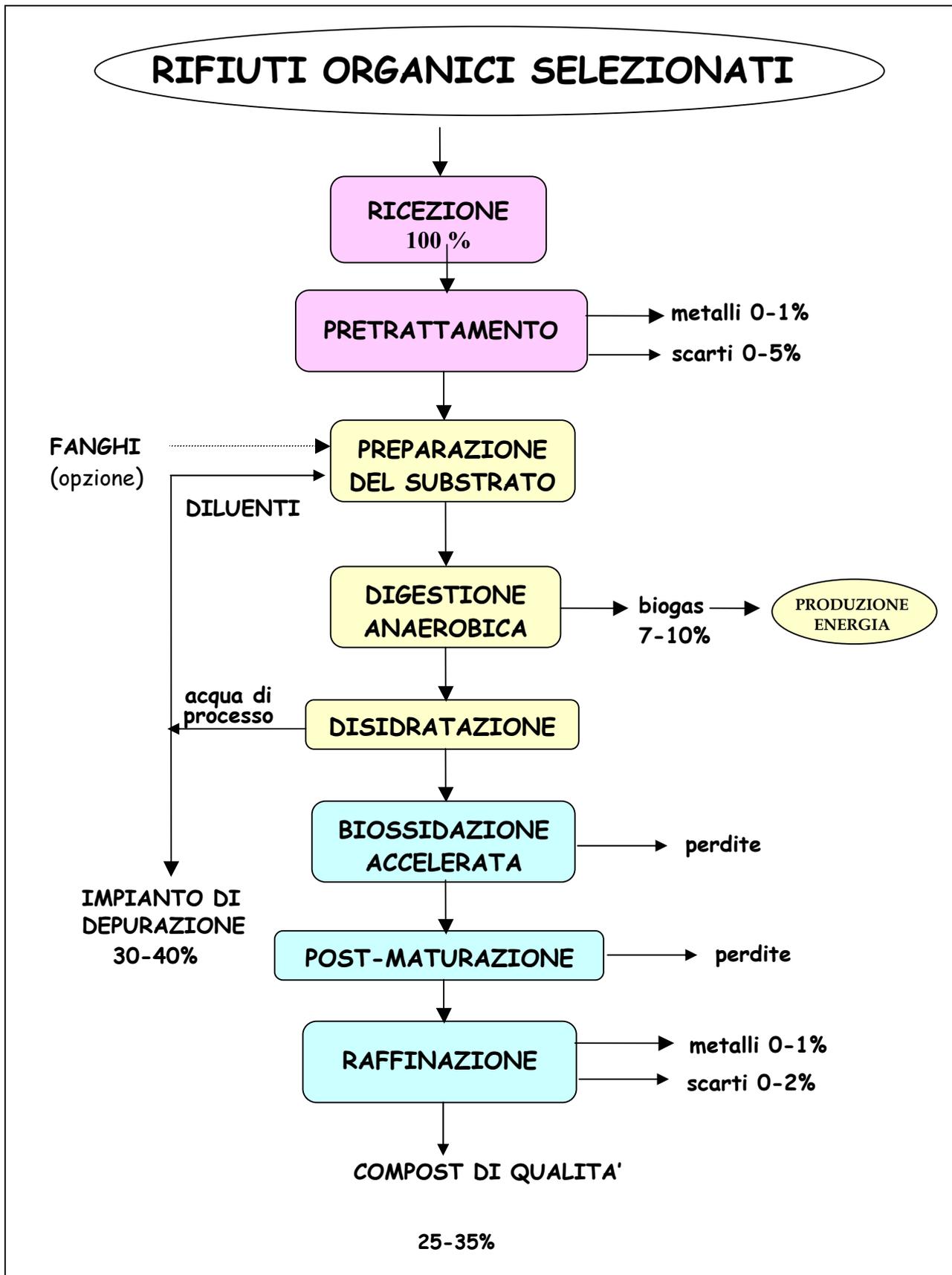


Figura 4.9: Bilancio di massa di un impianto per rifiuti organici selezionati con processo liquido

4.11 Bilancio energetico dell'impianto

Un impianto di media potenzialità utilizza circa un quarto dell'energia prodotta per far fronte agli autoconsumi, costituiti essenzialmente dal riscaldamento delle unità di digestione.

In tabella 4.11 è riportato un esempio di bilancio energetico riferito ad un impianto di 15.000 t/a di rifiuti fermentescibili operante con processo termofilo (popolazione interessata: circa 100.000 abitanti).

Tabella 4.11 Esempio di bilancio energetico

Produzione di biogas	5 700 m ³ /g	139 Nm ³ /t
Energia disponibile	33 000 kWh/g	805 kWh/t
Potenza centrale elettrica	414 kWe	
Produzione elettricità:	10 300 kWh/g	
di cui consumo processo	2 800 kWh/g	8%*
di cui eccesso valorizzabile	7 500 kWh/g	23%
Produzione calore:	18 300 kWh/g	
di cui consumo processo	6 300 kWh/g	18%
di cui eccesso valorizzabile	12 000 kWh/g	26%
Perdite	4 700 kWh/g	14%

*per l'impianto di digestione ad esclusione degli altri reparti dell'impianto.

Fonte: Kompogas, 1999

In tabella 4.12 sono riportati rendimenti di conversione (energia finale utilizzabile/energia primaria consumata) di norma utilizzati.

Tabella 4.12 Rendimenti di conversione

Energia elettrica (motori a gas)	30 – 35 %
Calore	80 – 90 %
Conversione in gas naturale	85 %
Gas carburante	80 %
Cogenerazione	70 – 90 %

In figura 4.10 è riportato un esempio di bilancio di energia per un impianto operante con processo mesofilo:

- un 5% di perdite alla torcia deve essere considerato come valore medio per guasti o per eliminare le punte di produzione che non potrebbero essere assorbite dal motore a gas;
- un 3-5% di consumo deve essere considerato come valore medio per il mantenimento in temperatura del digestore con una caldaia indipendente dal motore;
- l'autoconsumo di elettricità tiene conto del consumo di tutti i reparti dell'impianto, inclusi quelli non direttamente collegati con la digestione (depuratore acque di processo, servizi ausiliari, ecc.);

- il calore disponibile sul motore può essere valorizzato presso utenze locali oppure viene dissipato in atmosfera.

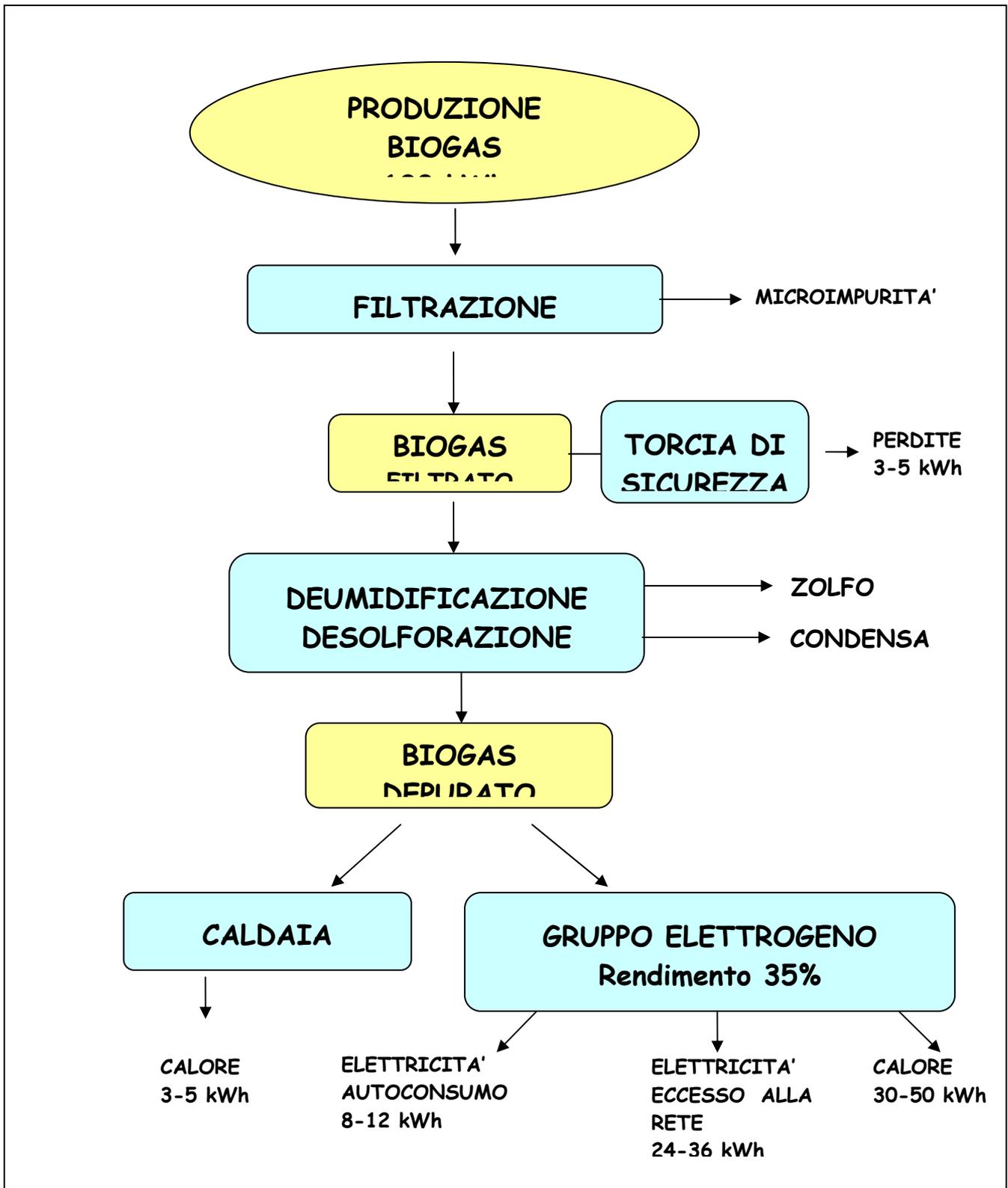


Figura 4.10 Bilancio di energia di un impianto tipo