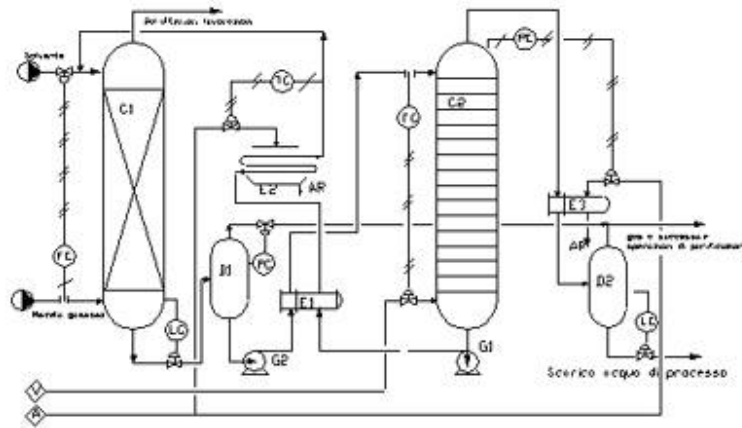


ITI "Giulio Cesare FACCIO" VERCELLI
Dipartimento di Chimica



TECNOLOGIE CHIMICHE E BIOTECNOLOGIE
DEPURAZIONE DELLE ACQUE REFLUE

1 Trattamento delle acque inquinate

Viene definito **inquinamento idrico** "lo scarico effettuato direttamente dall'uomo nell'ambiente idrico di sostanze o di energia le cui conseguenze siano tali da compromettere la salute umana, nuocere alle risorse dei viventi e al sistema ecologico idrico, compromettere le attrattive ambientali od ostacolare qualsiasi uso legittimo delle acque" (da una direttiva CEE).

Le acque di rifiuto o **acque reflue** sono quelle di scarico da impianti industriali e quelle raccolte dagli impianti fognari urbani: esse contengono numerose sostanze inquinanti, come fanghi, sali, grassi, detersivi, batteri, germi patogeni, prodotti del metabolismo umano e anche prodotti chimici derivanti dalle più svariate attività industriali (ad esempio ioni metallici, idrocarburi, fenoli, ecc.).

Le acque reflue in uscita da qualsiasi processo (domestico, industriale, agricolo, zootecnico) dette anche **effluenti**, prima di essere scaricate nei bacini idrici esistenti, chiamati per questo motivo bacini recipienti, devono essere sottoposte a svariati trattamenti di depurazione. Il ciclo di trattamenti ai quali viene sottoposta un'acqua reflua dipende da vari fattori, in primo luogo:

- dalla natura del carico inquinante (BOD e COD)
- dalle caratteristiche che deve avere l'effluente al termine del processo di depurazione

Data la vastità e grande complessità dei processi di depurazione, verranno qui trattati solo i processi di depurazione degli effluenti urbani,

2 Trattamento delle acque reflue urbane

I trattamenti degli effluenti urbani si suddividono usualmente in 3 diverse fasi:

- trattamento primario o pretrattamento: si ottiene la separazione dei solidi sospesi
- trattamento secondario: è l'insieme dei processi biologici che hanno lo scopo di abbattere le sostanze organiche
- trattamento terziario: trattamento chimico-fisico che ha lo scopo di migliorare le caratteristiche dell'effluente depurato prima della sua immissione nei corpi idrici naturali: ad esempio l'eliminazione delle sostanze non biodegradabili, la riduzione degli elementi residui come P e N che possono provocare eutrofizzazione

2.1 Trattamento primario - pretrattamento

E' opportuno che le acque reflue, prima del trattamento di depurazione vero e proprio, vengano alleggerite dalla maggior parte delle sostanze inquinanti presenti, in modo da facilitare le operazioni unitarie successive, riducendo le dimensioni delle apparecchiature e diminuendo i rischi del fuori servizio.

L'alleggerimento del carico inquinante può essere realizzato con operazioni fisiche e meccaniche, dette **operazioni di pretrattamento**. Le principali sono:

1. grigliatura grossolana (diametro particelle 30-100 mm) e fine (3-10 mm)
2. desabbiatura (diametro particelle 0,15-3 mm)
3. rimozione di oli e grassi

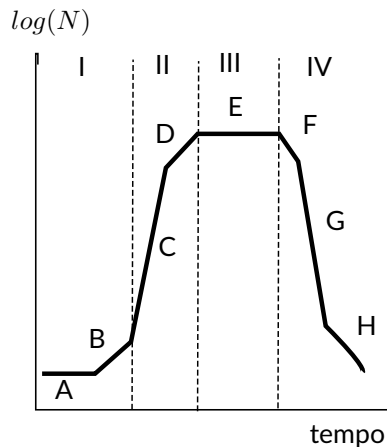


Figura 1: Curva di crescita batterica

Per facilitare questi trattamenti, l'acqua in ingresso all'impianto di depurazione viene sollevata ad una opportuna quota mediante pompe e quindi, per gravità, passa attraverso le diverse fasi, che si svolgono al di sopra del piano di campagna. Dopo il pretrattamento, l'acqua viene inviata al **trattamento primario** vero e proprio, che consiste in una sedimentazione primaria per la rimozione dei materiali in sospensione decantabili o flottanti (schiume) e una parziale riduzione del carico delle sostanze organiche.

2.2 Trattamento secondario

Le operazioni di pretrattamento e trattamento primario, combinate con altre operazioni particolari come precipitazione chimica, ossidoriduzione, neutralizzazione, in molti casi sono sufficienti a rendere le acque reflue scaricabili a norma di legge: ciò avviene specialmente per le acque di scarico industriali di natura inorganica, come per esempio acque da industrie meccaniche, metallurgiche, minerarie.

In altri casi e specialmente per le acque reflue urbane, le operazioni di trattamento primario, pur producendo una certa diminuzione del carico organico, rappresentato dal BOD e dal COD e dovuto a sostanze organiche disciolte e/o a sostanze colloidali disperse non abbattute, non consentono di ottenere una depurazione completa.

Per raggiungere questo scopo è necessario ricorrere a metodi di depurazione che riproducendo, sotto particolari condizioni, i processi naturali di autodepurazione, sono definiti **operazioni di trattamento biologico**. Queste operazioni si basano sull'attività vitale di **microrganismi**, in genere batteri, che utilizzano le sostanze disciolte (o ridotte in forma solubile) sia come sorgente di energia sia per la sintesi di nuove cellule. Questa evoluzione vitale è chiamata **fermentazione** ed è un insieme di reazioni biochimiche catalizzate dagli enzimi secreti dagli stessi microrganismi.

L'evoluzione nel tempo di una coltura batterica è caratterizzata da 4 fasi, la cui velocità e durata dipendono dal tipo di coltura, dal nutrimento che le viene fornito e dalla temperatura. Nella figura 1 è riportata la **curva di crescita batterica**, dove il logaritmo del numero di microrganismi è riportato in funzione del tempo. Si distinguono le fasi:

1. **fase di latenza** (I - tratto A crescita nulla, tratto B accelerazione positiva del ritmo di crescita): i batteri adattano il loro corredo enzimatico al mezzo nutritivo, a crescita nulla o leggermente positiva

2. **fase di crescita esponenziale** (II - tratto C crescita esponenziale, tratto D rallentamento del ritmo di crescita): i batteri, disponendo di abbondante nutrimento, si moltiplicano rapidamente
3. **fase di crescita limitata** (III - tratto E fase stazionaria): a causa della riduzione del nutrimento disponibile, la velocità di crescita diminuisce e rapidamente si annulla, producendo una stazionarietà nel numero di batteri vivi (crescita nulla o idiofase)
4. **fase di respirazione endogena** (IV - tratto F fase iniziale di declino, tratto G fase con ritmo di estinzione costante (o morte logaritmica), tratto H fase di estinzione totale (o fase finale di morte): per mancanza di cibo la biomassa si alimenta con i materiali delle cellule morte autodistruggendosi

Le diverse fasi valgono sia che l'attività biologica avvenga in **condizioni aerobiche**, cioè in presenza di ossigeno o di aria ad opera di **batteri autotrofi o eterotrofi aerobi**, sia che avvenga in **condizioni anaerobiche**, cioè in assenza di ossigeno, ad opera di **batteri eterotrofi anaerobi**. La maggior parte degli impianti di depurazione dei reflui urbani e industriali opera con processi aerobici, data la tipologia di prodotti ottenuti:

- i processi aerobici sono ossidazioni e quindi si hanno le seguenti trasformazioni: il C viene trasformato in CO_2 , l'H in H_2O , l'N in NO_3^- , lo S in SO_4^{2-} , il P in PO_4^{3-}
- i processi anaerobici sono riduzioni e quindi si hanno le seguenti trasformazioni: il C viene trasformato in CH_4 , l'H in H_2 , l'N in NH_3 , lo S in H_2S , il P in PH_3 . Si tratta di prodotti tossici o pericolosi per l'ambiente che quindi devono essere evitati

La depurazione biologica aerobica delle acque reflue è realizzata attraverso due operazioni successive:

1. sviluppo dei microrganismi aerobi, che si nutrono delle sostanze organiche inquinanti e che si raccolgono in films su appositi supporti inerti come **filtri percolatori** e **biodischi**, oppure si presentano come flocchi mantenuti in sospensione nel liquame da trattare sotto forma di **fanghi attivi**
2. separazione dei fanghi biologici così prodotti dall'acqua depurata mediante **sedimentazione**

Naturalmente sono richieste condizioni ambientali favorevoli per lo sviluppo equilibrato della flora batterica. Di particolare importanza sono i seguenti **parametri operativi**:

1. temperatura: influenza sia la velocità delle reazioni biochimiche che la solubilità dell'ossigeno in acqua, nel senso che un aumento della temperatura diminuisce la solubilità e quindi ostacola lo sviluppo della flora batterica. L'intervallo ottimale è tra 10 e 30 gradi centigradi
2. pH: influenza l'attività degli enzimi e quindi la velocità delle reazioni biochimiche da essi catalizzate. Il pH ottimale è compreso tra 6 e 8
3. elementi nutritivi: il processo metabolico, per svolgersi in modo equilibrato, necessita della presenza di elementi nutritivi; i più importanti sono N, P, Ca, Mg, vitamine. La maggior parte di questi elementi, richiesti solo in piccola quantità, sono già presenti nelle acque di scarico civili o domestiche. Molti scarichi industriali invece difettano di N e P e quindi devono essere corretti, aggiungendo composti che li contengono (NH_3 , H_3PO_4 , sali di ammonio, fosfati) in modo da realizzare i seguenti rapporti operativi:
BOD : N : P = 100 : 5,5 : 1

4. apporto di ossigeno: è essenziale per un equilibrato sviluppo dei batteri aerobi, che lo utilizzano per l'ossidazione delle sostanze organiche di cui si nutrono. Una carenza di ossigeno (anossia) può comportare il blocco della crescita degli aerobatteri e il contemporaneo sviluppo dei batteri anaerobi e il conseguente stabilirsi di condizioni di anaerobiosi. L'ossigeno viene fornito mediante un intimo contatto tra aria e la soluzione acquosa; il tenore minimo di ossigeno in un'acqua reflua per evitare le condizioni di anaerobiosi varia da 0,5 e 2 mg/dm³
5. sostanze tossiche: numerose sostanze, specie i metalli pesanti come Cr, Zn, Ni, Cu e Cd hanno effetto tossico sui microrganismi, inibendo parzialmente o totalmente i loro enzimi biochimici ossidativi. Se queste sostanze sono presenti in opportune concentrazioni provocano prima il blocco dello sviluppo batterico (effetto batteriostatico) e quindi la morte dei batteri (effetto battericida).

3 Trattamenti biologici aerobici

3.1 Filtri percolatori o letti batterici

I **filtri percolatori** sono apparecchiature costituite da un letto poroso, formato da materiali in pezzatura grossolana (frammenti di roccia, carbone fossile) disposti alla rinfusa o da materiali di forma prestabilita (fogli di PVC, polistirene, polipropilene) sistemati ad alveare; attraverso il letto poroso viene fatto ruscellare il liquame da trattare. Più propriamente si dovrebbe parlare di **letti batterici** perché il processo che si realizza è più un adsorbimento batterico che una filtrazione.

Dopo un periodo di avviamento variabile da qualche giorno a qualche settimana, sulla superficie del supporto si forma una pellicola gelatinosa, detta **film biologico**, con uno spessore di 1-3 mm, costituita da una associazione di batteri e funghi (negli strati superiori) e da alghe verdi (sulla superficie del letto). La distribuzione del liquido da trattare è affidata ad un braccio meccanico rotante o a un meccanismo di spruzzatori collocati su tutta la sezione del letto percolatore.

Le sostanze organiche disciolte e presenti allo stato colloidale nell'acqua che fluisce sul film biologico sono adsorbite e degradate in modo aerobico dai microrganismi, che le utilizzano sia per la sintesi di nuove cellule che per la produzione di energia, con contemporaneo svolgimento dei prodotti finali del metabolismo, **CO₂** e **H₂O**. La biomassa in crescita è continuamente rinnovata perché si stacca a fiocchi dal film biologico e fuoriesce con l'effluente trattato. Sul fondo del filtro è presente un sistema di drenaggio dell'acqua trattata, che viene inviata ad un sedimentatore per la separazione del fango biologico.

L'ossigeno disciolto nel liquame è continuamente rifornito per assorbimento dell'aria che circola naturalmente o per aerazione artificiale negli spazi vuoti del mezzo filtrante. I filtri percolatori a basso-medio carico sono in genere usati per il trattamento delle acque reflue urbane: con essi si può avere una rimozione fino al **95% del BOD**. I filtri ad alto carico utilizzati per acque industriali, acque da attività agroalimentari, acque urbane consentono una rimozione media del **65% del BOD**.

3.2 Biodischi

I biodischi (dischi biologici, biorulli, contattori biologici rotanti) sono sistemi di filtrazione biologica ad alta efficienza. Sono costituiti da piatti di plastica ondulata (polietilene, polipropilene) con un diametro di 2-4 m, che funzionano da supporto per la crescita batterica e ruotano attorno ad una asse orizzontale (1-6 giri/min) immersi nella vasca dove è presente il liquame da trattare, nel quale si immergono per

circa il 40% della loro superficie. I dischi sono spazati tra di loro (circa 2 cm) in modo che, durante l'immersione, l'acqua inquinata penetra tra gli spazi compresi tra le ondulazioni; quando questi spazi emergono il liquido trattenuto percola attraverso i vuoti fra i piatti ed è sostituito da aria. Un film biologico (spessore 4-5 mm), simile a quello che si forma sui filtri percolatori, aderisce alle superfici rotanti.

L'alternanza del contatto film-sostanze organiche e film-aria durante la rotazione è simile al funzionamento di un filtro percolatore con distributori rotanti e garantisce una efficiente ossigenazione del sistema. La biomassa in eccesso si stacca dai dischi e fuoriesce con l'effluente trattato, per essere successivamente rimossa mediante sedimentazione. L'impianto a biodischi presenta numerosi **vantaggi**:

- facilità di esercizio
- elevata efficienza nella rimozione del BOD grazie alla continua ossigenazione causata dalla rotazione
- elevato contenuto di solidi secchi (3-4%) e buona sedimentabilità del fango che si forma

Con i sistemi a biodischi si possono trattare liquami provenienti da centrali del latte e caseifici, cartiere, industrie petrolifere, tintorie, concerie, industrie farmaceutiche e alimentari, fognature civili (fino a 100.000 abitanti). L'efficienza della depurazione è in stretta relazione con lo sviluppo superficiale dei biorulli. Nel caso di scarichi urbani, orientativamente si va da una rimozione del BOD₅ dell'80% sfruttando 1 m² di superficie di dischi per abitante fino a rimozioni dell'ordine del 95% del BOD₅ iniziale utilizzando 3 m² di superficie per abitante; un singolo biorullo può avere una superficie interna da 9.500 m² a 15.000 m²

3.3 Fanghi attivi convenzionali

Il processo a fanghi attivi per la depurazione delle acque reflue è una esaltazione artificiale dei processi di autodepurazione naturali che si verificano nei corsi d'acqua superficiali. Nel loro passaggio attraverso il **bacino di aerazione**, le acque inquinate sono aerate così intensamente che i microrganismi aerobi trovano nel liquame condizioni favorevoli al loro sviluppo: si formano così dei fiocchi batterici di massa gelatinosa detti **fanghi attivi**, che funzionano da agenti biologici di depurazione.

I fanghi attivi adsorbono e degradano aerobicamente le sostanze organiche disciolte e presenti allo stato colloidale, utilizzandole per ricavare l'energia necessaria alla sintesi di nuove cellule; i prodotti finali di questo metabolismo sono costituiti da sostanze minerali disciolte e da gas (CO₂). Affinché avvenga tale processo è necessario che i fiocchi batterici nel bacino di aerazione siano agitati in modo da mantenerli in sospensione nel liquame da trattare e che il sistema acqua-fanghi attivi, detto **liquido misto**, riceva l'ossigeno necessario per lo svolgimento delle reazioni di ossidazione del substrato organico presente nell'alimentazione.

L'effluente del bacino di aerazione è poi inviato in un sedimentatore dove avviene la separazione dell'acqua trattata (**effluente chiarificato**) dai fiocchi batterici sospesi (**fanghi secondari**). Parte di questi ultimi (**fanghi di ricircolo**) è riciclata al bacino di aerazione, in quanto ricca di microrganismi molto attivi, per mantenere elevata nel bacino la concentrazione di fanghi attivi, sufficiente alla demolizione del substrato organico inquinante. Un'altra parte (**fanghi di supero**) viene periodicamente estratta e allontanata verso le successive operazioni di trattamento fanghi.

Il processo a fanghi attivi è un'operazione continua, in quanto i fanghi di ricircolo sono continuamente messi in contatto con nuovo influente (l'acqua inquinata da trattare) contenente substrato organico fresco.

I fanghi di ricircolo provengono da un'operazione durante la quale non vengono più

nutriti né ossigenati; si trovano in una condizione di inedia e perciò nella fase di respirazione endogena (o di auto-ossidazione), cioè nelle condizioni ideali affinché essi siano molto "attivi" nella metabolizzazione di sostanze organiche non appena saranno di nuovo opportunamente alimentati con liquame fresco e di nuovo ossigenati. I fanghi attivi convenzionali quindi lavorano nella fase di crescita limitata (III) e respirazione endogena (IV).

I **sistemi di aerazione** più usati sono i seguenti:

- **aeratori superficiali:** detti anche a **turbina**; sono costituiti da giranti con asse verticale i fiocchi batterici. Gli aeratori superficiali possono essere fissi o galleggianti.
- **aeratori ad aria compressa:** iniettano aria compressa nel liquido misto con l'aiuto di appositi dispositivi distributori

L'efficienza di rimozione del BOD₅ con sistema a fanghi attivi oscilla tra il 75% per alti carichi trattati al 95% prolungando l'aerazione oppure, se la fonte di ossigeno è economica, aerando con O₂ tecnico (circa al 95% in O₂).

3.4 Eutrofizzazione

L'eutrofizzazione è l'eccessivo accrescimento e la moltiplicazione disordinata di vegetali acquatici, soprattutto **microalghe verdi e blu-verdi**, per effetto della presenza nelle acque di dosi molto elevate di sostanze nutritive. I principali responsabili dell'eutrofizzazione sono i composti azotati e fosforati, provenienti da scarichi civili o industriali e dal dilavamento dei fertilizzanti in agricoltura.

I laghi con modesto ricambio di acqua e gli stagni in genere sono particolarmente interessati a questo fenomeno che, dopo essersi innescato, rende inospitale l'ambiente per i pesci e gli altri viventi aerobici, anche se si interrompe l'apporto delle sostanze nutritive. L'eccesso di sviluppo di vegetali di breve vita come le microalghe, allo loro morte produce grandi quantità di materiale organico in putrefazione, che richiede un elevato consumo di ossigeno per la sua decomposizione e trasformazione in CO₂ e H₂O. A causa di questa trasformazione si rendono nuovamente disponibili N e P che favoriscono ulteriormente lo sviluppo di vegetali, mantenendo inospitale l'ambiente per i viventi aerobici.

Il **processo di eutrofizzazione** può essere così schematizzato:

1. eccessiva immissione nelle acque di sostanze nutritive → eccessiva crescita di alghe e microrganismi
2. eccessivo consumo dell'ossigeno disciolto → degradazione dell'ambiente naturale e qualità dell'acqua

Le acque sono caratterizzate da diversi **gradi di trofismo**:

1. acque eutrofiche: sono infestate da alghe, torbide, verdastre, maleodoranti e di cattivo sapore
2. acque mesotrofiche: sono non limpide e d'incipiente colore verde
3. acque oligotrofiche: sono limpide e incolori a occhio nudo, praticamente incolori e insapori

3.5 Operazioni di trattamento terziario o avanzato

Sono progettate per rimuovere gli agenti inquinanti che non sono stati adeguatamente eliminati dai trattamenti secondari convenzionali. Questi inquinanti possono includere:

- composti inorganici solubili di N e P, che possono favorire lo sviluppo di alghe nel bacino recipiente (eutrofizzazione)
- sostanze organiche che possono influire sul BOD, COD, colore, gusto e odore (tensioattivi, microinquinanti non biodegradabili)
- solidi sospesi colloidali, che contribuiscono alla torbidità
- sostanze minerali solubili, che possono interferire col successivo eventuale riutilizzo dell'acqua depurata
- batteri e virus

Le operazioni di trattamento terziario possono essere usate successivamente o in congiunzione con i processi secondari tradizionali (da cui il nome "**terziario**", oppure possono sostituirli interamente (da cui il nome più appropriato di "**avanzato**"). La loro applicazione è destinata ad ampliarsi in funzione della richiesta sempre più elevata di acqua da parte delle varie utenze, richiesta che, a fronte di sempre più scarse o costose disponibilità, impone la pratica del reimpiego.

3.6 Denitrificazione

L'N nelle acque reflue urbane deriva da:

- dilavamento dei rifiuti stradali
- scarichi industriali, specialmente dell'industria alimentare
- escrementi umani

Circa il 60% dell'azoto è in **forma ammoniacale** mentre il 35% è in **forma organica** (proteine e aminoacidi, facilmente convertibili in ammoniaca), con piccole percentuali di **nitriti** e **nitriti**. Il contenuto di N totale nei liquami è pari a 10-15 g/abitante giornalieri; i trattamenti primario e secondario ne eliminano al massimo il 35-40%. Le varie forme di azoto sono legate tra loro dalle seguenti reazioni biochimiche:

1. N organico $\xrightarrow[\text{batteri eterotrofi aerobi}]{\text{decomposizione batterica}}$ N ammoniacale (NH_4^+)
2. reazioni di nitrosazione:

$$\text{NH}_4^+ + \frac{3}{2} \text{O}_2 \xrightarrow[\text{batteri autotrofi aerobi}]{\text{Nitrosomonas}} \text{NO}_2^- + \text{H}_2\text{O} + 2 \text{H}^+ + \text{energia}$$
3. reazioni di nitrificazione:

$$\text{NO}_2^- + \frac{1}{2} \text{O}_2 \xrightarrow[\text{batteri autotrofi aerobi}]{\text{Nitrobacter}} \text{NO}_3^- + \text{energia}$$
4. reazioni di denitrificazione:

$$2 \text{NO}_3^- + 6 \text{AH}_2 \xrightarrow[\text{batteri eterotrofi facoltativi}]{\text{denitrificazione aerobica}} \text{N}_2 + 6 \text{H}_2\text{O} + 6 \text{A}$$

L'abbattimento dell'azoto si realizza mediante un **processo nitro/denitro**: prima l'N ammoniacale viene ossidato a nitriti e nitrati, quindi ridotto a N_2 ed infine rilasciato in atmosfera. La nitrificazione (reazioni 2 e 3) avviene in condizioni aerobiche ad opera di batteri autotrofi strettamente aerobi, che utilizzano l'energia prodotta dall'ossidazione dello ione ammonio e il carbonio della CO_2 per la sintesi. La denitrificazione (reazione 4) avviene in condizioni anaerobiche (batteri eterotrofi facoltativi Pseudomonas, Micrococcus), quando la sostanza organica AH_2 (metanolo, acido

acetico, saccarosio) è ossidata e utilizzata come fonte di carbonio, mentre lo ione nitrato è utilizzato come fonte di ossigeno.

I problemi di inquinamento relativi alla presenza di N nelle acque di scarico sono:

- diminuzione di O_2 nei fiumi e nei laghi, conseguente all'ossidazione dell'ammoniaca
- effetti tossici dell'ammoniaca sui pesci e sulla vita acquatica
- limitazione dello ione nitrato nell'acqua potabile per proteggere la salute pubblica
- eutrofizzazione dei laghi e degli estuari, conseguente all'eccesso di N che costituisce un nutrimento delle alghe

La denitrificazione avviene per via biologica. La **denitrificazione biologica** comporta l'ossidazione di NH_4^+ a NO_3^- e quindi la sua riduzione a N_2 gassoso. La nitrificazione avviene durante il trattamento secondario del liquame. La denitrificazione è realizzata mettendo in contatto l'acqua nitrificata con biomassa in assenza di ossigeno. Per accelerare la denitrificazione è necessario aggiungere una sostanza organica biodegradabile (AH_2 : metanolo, acido acetico, saccarosio) che funziona come donatore di H e fornisce il C necessario per la sintesi biologica.

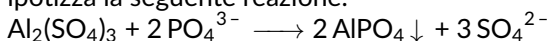
La denitrificazione è realizzata, nei sistemi a crescita sospesa come i fanghi attivi, in bacini agitati meccanicamente, allo scopo di mantenere i solidi in sospensione e minimizzare l'apporto di ossigeno. Spesso prima del sedimentatore finale si fa passare l'effluente di denitrificazione attraverso un canale aerato per strappare l'azoto ancora presente nel liquido, in modo da evitare la formazione di bolle di gas nel sedimentatore, che potrebbero originare del fango galleggiante in superficie, peggiorando la qualità dell'effluente in uscita dal sedimentatore.

Un impianto di nitrificazione/denitrificazione è in grado di ridurre del 90% l'N organico e del 80-95% l'N totale.

3.7 Defosfatazione

Il fosforo presente nei liquami urbani deriva per il 30-50% dagli scarichi sanitari, mentre il restante 70-50% è attribuibile ai fosfati contenuti nei detersivi domestici. La quantità totale di fosforo scaricato è di circa 4-4,5 g/abitante giornalieri (circa 10 mg/dm³). Le più comuni forme di fosforo sono il **fosforo organico**, gli **ortofosfati** (PO_4^{3-}) e i **polifosfati**. L'azione dei batteri negli impianti biologici converte le varie forme di P in ortofosfati. Il fosforo presente nei liquami domestici è comunque in eccesso rispetto alle necessità nutritive della flora batterica, per cui un impianto a fanghi attivi rimuove solo il 20-30% del fosforo, lasciando un effluente contenente mediamente circa 7 mg/dm³ di fosforo. L'eliminazione dei fosfati è molto importante quando lo scarico del liquame avviene in un lago, in un estuario o un corso d'acqua molto lento, perché può ingenerare il fenomeno dell'eutrofizzazione, di cui il **fosforo rappresenta l'elemento condizionante**.

La defosfatazione viene realizzata con l'eliminazione chimica (precipitazione chimica) dei fosfati a mezzo di reattivi di coagulazione (sali di Fe^{3+} , di Al, $Ca(OH)_2$, eventualmente additivati di flocculanti), che producono dei precipitati e dei complessi insolubili. Sebbene le reazioni di coagulazione siano complesse e solo parzialmente individuate, si può considerare che l'azione primaria sia la combinazione dell'ortofosfato con i cationi metallici. Per esempio con un coagulante a base di $Al_2(SO_4)_3$ si ipotizza la seguente reazione:



I polifosfati e i composti organici del P ancora presenti sono probabilmente rimossi

per adsorbimento sui fiocchi del precipitato. A seconda del dosaggio del reattivo (comunque superiore allo stechiometrico) si può avere una **riduzione del fosforo del 75-95%**. La defosfatazione può essere realizzata secondo due tecniche:

- coagulazione in combinazione con l'aerazione a fanghi attivi ("precipitazione simultanea") o coagulazione applicata come pretrattamento del liquame grezzo
- coagulazione applicata come trattamento terziario dopo il trattamento biologico secondario ("precipitazione separata")

Nella **precipitazione simultanea** il coagulante è aggiunto direttamente nel bacino di aerazione o sul suo effluente prima della sedimentazione finale. La coagulazione del liquame grezzo precipita i fosfati, insieme con i materiali sedimentabili, nel decantatore primario.

La **precipitazione separata** richiede un'elevata quantità di flocculante per ottenere una buona sedimentazione. Questo metodo consente di separare i fanghi biologici dai fanghi chimici, permettendo un più economico smaltimento di questi ultimi; inoltre, specie se la defosfatazione è seguita da una filtrazione finale destinata a rimuovere i residui solidi sospesi, migliora la qualità dell'effluente in quanto a TSS (solidi sospesi totali) e BOD₅.

3.8 Disinfezione (clorazione)

La disinfezione delle acque ha lo scopo di eliminare i germi patogeni (batteri, virus) e di controllare la presenza e lo sviluppo dei microrganismi. Si utilizza generalmente il **cloro** Cl₂ allo stato gassoso o alcuni dei suoi derivati come l'**ipoclorito di sodio** NaClO e il **biossido di cloro** ClO₂.

La disinfezione è applicata sia all'acqua destinata ad usi civili sia alle acque reflue emergenti dallo stadio finale della depurazione biologica, prima del loro scarico nel bacino recipiente. Quando la disinfezione porta alla completa distruzione di ogni forma di vita nell'acqua sottoposta a trattamento si parla di **sterilizzazione**.

Il **meccanismo di azione del cloro e degli ipocloriti** è rappresentato dalle seguenti reazioni:

1. $\text{Cl}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{HCl} + \text{HClO}$
2. $\text{NaClO} \rightleftharpoons \text{Na}^+ + \text{ClO}^-$
3. $\text{ClO}^- + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{HClO} + \text{OH}^-$
4. $\text{HClO} \longrightarrow \text{HCl} + \text{O}$

Nella reazione 4 si produce O, cioè ossigeno nascente, estremamente attivo e dotato di una elevatissima capacità ossidante. La reazione 1 è spostata verso destra per pH > 5 mentre la reazione 3 è spostata a destra per pH < 7; conviene quindi operare a pH compresi tra 5 e 7. Il cloro presente sotto forma di HClO e ClO⁻ è definito come **cloro libero**.

La dose di cloro necessaria non è stabilibile a priori e la verifica dell'efficacia della clorazione viene effettuata mediante test batteriologici. In alternativa al cloro e agli ipocloriti si usa spesso il biossido di cloro ClO₂, che ha un potere ossidante più forte; si prepara direttamente sul luogo di utilizzo e non produce composti clorurati (clorammine) di odore sgradevole.

3.9 Digestione anaerobica

Per alcuni scarichi industriali con elevato carico organico, con BOD_5 superiore a 4.000 mg/dm^3 , può essere conveniente adottare il processo di **biodepurazione anaerobica**, che presenta i seguenti vantaggi rispetto al normale trattamento aerobico:

1. minore costo di esercizio, dato che non vi è il costo relativo all'aerazione del liquame trattato
2. produzione di un gas ricco di metano, detto **biogas**, utilizzabile come combustibile
3. elevato grado di stabilizzazione dei fanghi
4. limitata produzione di fanghi
5. possibilità di trattamento anche nel caso di alimentazione discontinua

Il processo può essere realizzato in un singolo stadio o in due stadi, con o senza ricircolo dei fanghi, con o senza riscaldamento. Un corretto controllo dei parametri operativi (temperatura, pH, tempo di residenza idraulico, età dei fanghi, condizioni fluidodinamiche) consente di ottenere riduzioni delle sostanze organiche anche del 80-95%; tuttavia, a causa della elevata concentrazione iniziale, l'effluente di un tale trattamento anaerobico deve essere sottoposto ad ulteriori trattamenti depurativi.

3.10 Trattamento dei fanghi

I fanghi di risulta dei processi di depurazione sono delle sospensioni acquose (al 95-99% di acqua) che contengono non soltanto i solidi sospesi, i colloidali, le materie organiche, i sali o gli ioni inquinanti presenti nell'acqua da depurare, ma eventualmente anche altre sostanze aggiunte all'acqua per rendere efficace il processo di depurazione, come ad esempio i flocculanti utilizzati nella defosfatazione. I principali materiali in sospensione presenti in un fango possono essere classificati come segue:

1. **materiali granulari**, generalmente di natura minerale e ad elevata densità (sabbia, limo, scorie)
2. **materiali flocculati**, derivanti soprattutto da sostanze colloidali organiche e/o minerali, inglobanti un elevato volume di acqua legata per capillarità e solvatazione e quindi con una ridotta densità (fanghi attivi, idrossidi metallici)
3. **materiali oleosi e grassi**, a carattere generalmente idrofobo, di densità ancora inferiore.

Si pone quindi il problema della conversione dei fanghi in un prodotto ecologicamente accettabile per lo smaltimento, che deve avvenire nel modo più economico ed igienico possibile. Le operazioni necessarie per il trattamento dei fanghi degli impianti di depurazione, spesso combinate tra loro, si distinguono in:

1. **operazioni di stoccaggio prima del trattamento**, in vasche di accumulo
2. **operazioni di addensamento** (ispessimento), prima della disidratazione o della stabilizzazione: addensamento per decantazione o per flottazione. Si ottiene un fango con una percentuale di acqua variabile, secondo il tipo di fango, tra l'80 e il 96%

3. **operazioni di stabilizzazione**, cioè di riduzione della putrescibilità del fango: stabilizzazione aerobica, digestione anaerobica
4. **operazioni di condizionamento prima della disidratazione**: trattamento di coagulazione e flocculazione chimica, realizzato additivando il fango con i reattivi di coagulazione FeCl_3 o $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, oppure polielettroliti organici fortemente cationici
5. **operazioni di disidratazione**: filtrazione (sotto vuoto, sotto pressione, con nastro pressa), centrifugazione, letti di essiccazione
6. **operazioni di smaltimento finale**: interrimento in discariche controllate, produzione di compost (compostaggio) cioè di un fertilizzante biologico prodotto dalla degradazione batterica dei rifiuti urbani, essiccazione, incenerimento, utilizzi agricoli, condizionamento di terreni

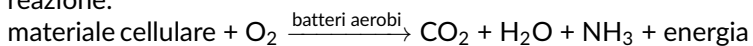
3.11 Trattamenti biologici dei fanghi

3.11.1 Digestione aerobica

La **digestione aerobica** è un processo di stabilizzazione dei fanghi per ossidazione cellulare in difetto di substrato organico. Viene impiegata di solito per la stabilizzazione dei fanghi in supero in impianti di piccola potenzialità, nei quali non sono giustificati i forti costi di investimento richiesti dalla digestione anaerobica.

Il processo consiste nell'ossidazione mediante aerazione prolungata del materiale cellulare in assenza di substrato organico esterno; in questo modo si provoca (nei **fanghi primari**) o si prosegue (nei **fanghi biologici**) lo sviluppo di microrganismi aerobi, fino a oltrepassare la fase di crescita e realizzare la loro propria auto-ossidazione (respirazione endogena - fase IV della curva di crescita batterica).

La digestione aerobica può essere rappresentata in modo schematico dalla seguente reazione:



I vantaggi di questo processo sono i seguenti:

- semplicità di esercizio e costo di impianto limitato
- buona efficaci nella riduzione dei microrganismi patogeni
- produzione di un surnatante con un BOD relativamente basso

Lo svantaggio è l'elevato costo di esercizio, dovuto al consumo di energia elettrica per l'aerazione.

Il processo avviene in vasche aperte e con apparecchiature simili a quelle utilizzate per il processo a fanghi attivi. I tempi di residenza medi sono di 10-20 giorni e dipendono dal tipo di fango trattato. L'energia di miscelazione che bisogna mantenere in vasca è in genere superiore a quella necessaria per il processo a fanghi attivi, in quanto la concentrazione di solidi sospesi è molto più alta (20-40 g/dm³ contro 2-5 g/dm³). Si ottiene un fango omogeneo di colore bruno, privo di odori, facilmente drenabile, biologicamente stabile ed idoneo allo smaltimento finale, nel quale i materiali organici grossolani contenuti nella torbida alimentata sono stati dispersi e si sono ridotti considerevolmente di volume.

3.11.2 Digestione anaerobica dei fanghi (produzione di biogas)

La **digestione anaerobica** è un processo biologico impiegato per il trattamento dei fanghi organici negli impianti di depurazione delle acque reflue urbane e, a volte, degli scarichi organici industriali molto concentrati. Si tratta di un **processo di mineralizzazione, gassificazione e umizzazione delle sostanze organiche**, più lento dei processi aerobici ma che diventa economicamente vantaggioso quando devono essere trattati volumi esigui di alta concentrazione.

Il termine **mineralizzazione** indica una condizione per cui il materiale presente non

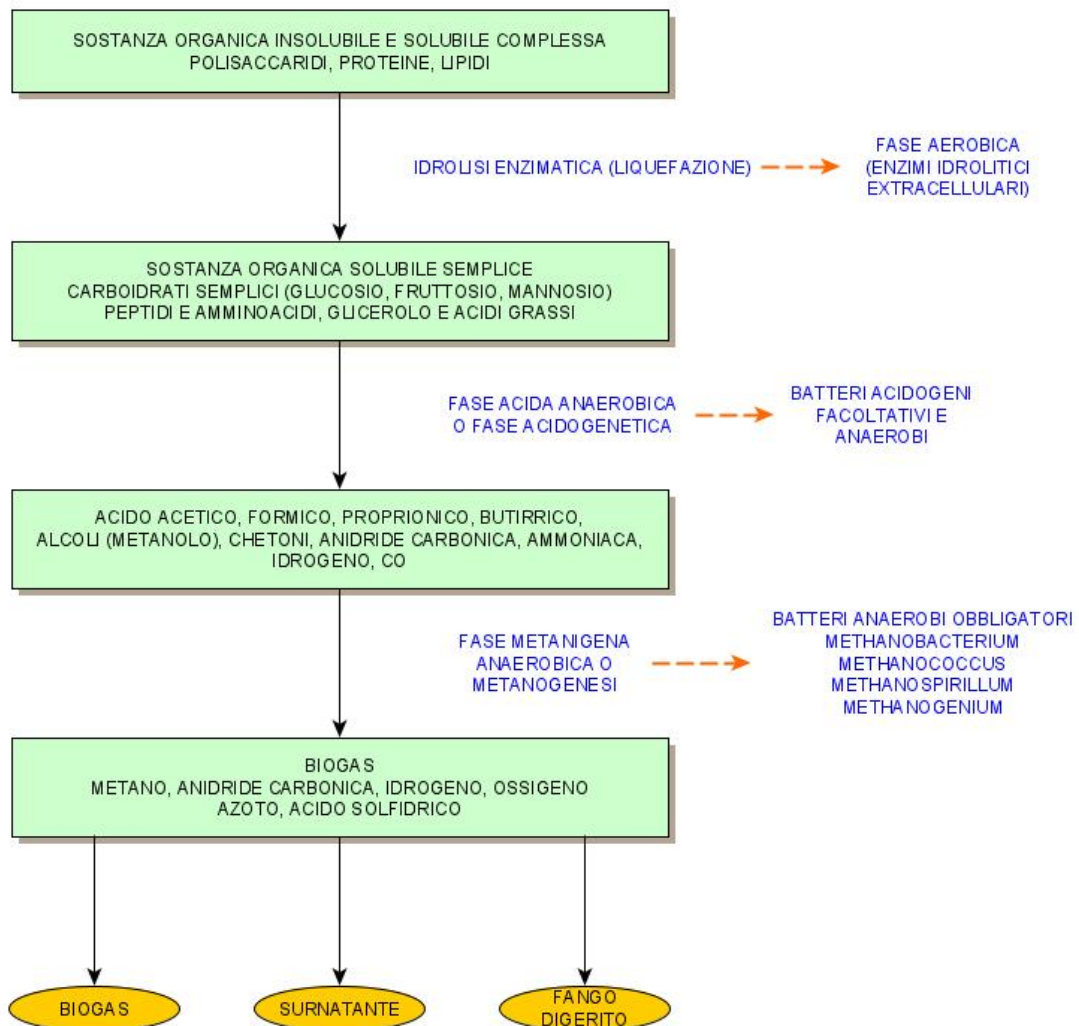


Figura 2: Produzione biogas

può ulteriormente essere degradato, mentre la **gassificazione** è la conversione di prodotti solidi e liquidi in prodotti gassosi. Per **umificazione** si intende la trasformazione del materiale organico originariamente putrescibile in un prodotto metastabile e innocuo, soggetto a decomposizione molto lenta. L'humus (o umus) è un terreno molto fertile contenente sostanze organiche formatesi in seguito alla decomposizione di esseri animali o vegetali. Tutti questi processi sono condotti ad opera di una flora batterica di natura anaerobica che si sviluppa nei liquami e nei fanghi di fognatura: durante il processo di digestione si sfruttano così le reazioni metaboliche dei

microrganismi per ottenere la stabilizzazione delle sostanze organiche. In generale gli obiettivi della digestione anaerobica dei fanghi sono i seguenti:

- stabilizzazione del materiale organico
- distruzione degli eventuali microrganismi patogeni
- riduzione del volume dei fanghi

Durante il processo di digestione il materiale organico volatile è degradato, attraverso successivi stadi, a gas vari e prodotti finali organici; i gas sono costituiti principalmente da CH_4 e CO_2 . Come mostrato nella fig. 2, la degradazione avviene attraverso **3 stadi fondamentali**:

1. liquefazione
2. formazione di acidi
3. gassificazione

La **liquefazione** si compie per mezzo di enzimi idrolitici extracellulari che idrolizzano i carboidrati a zuccheri semplici, le proteine ad amminoacidi, i lipidi a glicerina ed acidi grassi. I prodotti finali del processo di liquefazione vengono trasformati principalmente in acidi organici volatili per azione di colonie di batteri noti come **produttori di acidi**: durante la successiva **gassificazione** parte dei prodotti finali sono trasformati in gas. In un processo di digestione già avviato e ben bilanciato gli stadi di liquefazione, formazione di acidi e gassificazione procedono contemporaneamente. Lo schema di trasformazione è descritto nella figura 3: Il biogas è un miscuglio gassoso

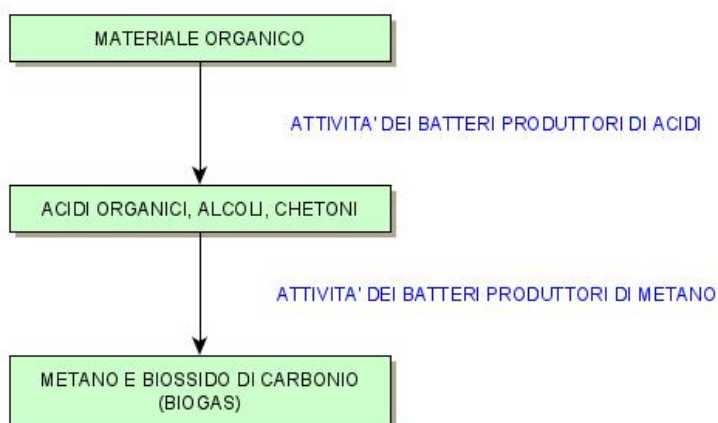


Figura 3: Schema produzione biogas

ottenuto dalla fermentazione anaerobica di residui organici ad opera di numerose specie batteriche. La **composizione media del biogas** è riportata nella tabella seguente:

Componente	Composizione (% in volume)
Metano	65-75
Biossido di carbonio	25-35
Idrogeno	1-3
Ossigeno	0,1-1
Azoto	0,5-3
Altri (H_2S)	0,5-3

La **resa** per ogni kg di sostanza organica demolita è di 0,6-0,7 Nm³ di biogas. Il suo **potere calorifico** inferiore (pci) è compreso tra 23-27 MJ/Nm³ a seconda della sua composizione.

La fermentazione anaerobica, da cui ha origine il biogas, è **esotermica** ma l'energia prodotta è insufficiente a mantenere la temperatura di reazione. Pertanto una quota di biogas è utilizzata in un sistema a cogenerazione per soddisfare il fabbisogno energetico del processo e per produrre l'energia elettrica necessaria al funzionamento dell'intera azienda.

Nella produzione di biogas si distingue una **fase iniziale aerobica** in cui l'ossigeno presente nell'impianto, introdotto inizialmente con la carica, viene consumato da batteri aerobici con produzione di CO₂ e NH₃ e trasformazione parziale, mediante idrolisi, delle molecole complesse in prodotti più semplici, generalmente solubili in acqua. La massa tende quindi ad assumere una consistenza più fluida (liquefazione). Segue il **processo anaerobico** con una prima fase, detta **acida**, in quanto agiscono batteri (facoltativi o anaerobi) che trasformano la sostanza organica presente (zuccheri, amminoacidi, acidi grassi, ecc.) in acidi semplici (acido acetico e formico) e in molecole semplici (alcoli, chetoni, CO₂, NH₃ e H₂) e una seconda detta **metanigena**, nella quale agiscono i batteri (anaerobi obbligati) che trasformano gli acidi semplici e i loro sali in CH₄ e CO₂, cioè in **biogas**.

I batteri metanigeni, che agiscono molto lentamente e in condizioni di assoluta assenza di ossigeno, realizzano un equilibrio con i batteri acidogeni che provvedono alla fermentazione acida. Infatti il complesso di batteri dà origine a una sorta di simbiosi per cui gli acidogeni forniscono l'azoto necessario allo sviluppo batterico agendo sulle proteine e sugli amminoacidi, mentre i metanigeni eliminano gli acidi, il cui eccesso sarebbe dannoso per lo sviluppo dei batteri acidogeni.

Nella produzione di biogas sono molto importanti le **condizioni operative**.

1. **Temperatura:** influisce in modo notevole sull'andamento dei processi e sulla attività enzimatica, che è debole intorno ai 10°C e cessa del tutto sopra i 65°C. Si distinguono due tipi di fermentazioni metanigene, a seconda della temperatura:

- **processo mesofilo**, eseguito da batteri mesofili, che opera tra 30 e 45°C
- **processo termofilo**, eseguito da batteri termofili, che opera tra 40 e 65°C

I processi mesofili sono più diffusi, specie nei piccoli impianti. Il loro vantaggio deriva dall'economicità nel mantenere basse temperature, dal maggior pregio del fango ottenuto - più ricco di azoto e quindi impiegabile come fertilizzante - e dalla maggiore resistenza dei batteri mesofili agli sbalzi termici. I processi termofili hanno il vantaggio di una maggiore rapidità di azione; i batteri termofili sono però molto sensibili a minime variazioni di temperatura e richiedono maggiori apporti energetici.

Si nota che durante la fermentazione la temperatura nella fase aerobica aumenta fino a 50-60°C consentendo di degradare più facilmente le macromolecole e di abbattere i microrganismi patogeni. Durante la fase anaerobica, leggermente esotermica, a causa delle dispersioni termiche della carica immessa e dell'effluente estratto, la temperatura tende a diminuire e viene mantenuta al valore voluto mediante somministrazione di calore, ottenuto bruciando una parte del biogas prodotto. Per limitare le perdite termiche i digestori devono essere ben coibentati.

2. **Acidità:** ha una notevole influenza sui processi fermentativi, perciò deve essere accuratamente controllata. Per valori di pH < 6,2 l'acidità blocca rapidamente

l'azione batterica e i batteri metanigeni non hanno il tempo di consumare gli acidi prodotti. Per valori di $\text{pH} > 8,5$ aumenta la produzione di H_2S e di H_2 . Pertanto i valori ottimali di pH sono compresi nell'intervallo 6,5-8,0. Il pH può essere corretto aggiungendo calce o, meglio, carbonato acido di sodio, che produce un effetto tampone.

3. **Elementi nutritivi:** poiché nel processo fermentativo la sostanza organica di partenza viene trasformata in biogas, energia e massa cellulare batterica è necessario che alcuni elementi nutritivi siano presenti in particolari rapporti, in quanto un loro squilibrio può determinare un rallentamento del processo; ad esempio un difetto di azoto, necessario per la sintesi proteica, può ritardare la crescita cellulare. I dati più importanti riguardano gli elementi C, N e P. Alcune sostanze - come detergenti, sostanze clorate, antibiotici - hanno un effetto tossico sui batteri e la loro presenza deve essere limitata, mentre i metalli sono tollerati in concentrazioni piuttosto basse.
4. **Tempo di ritenzione o di contatto:** determina il volume del digestore e rappresenta il tempo di permanenza della sostanza organica nel reattore affinché siano soddisfatte le condizioni cinetiche della trasformazione in biogas.

3.11.3 Tipi di impianti

I reattori per la produzione di biogas sono detti **digestori**. Sono costituiti da grossi serbatoi cilindrici realizzati in cemento armato, acciaio, materie plastiche, con fondo a forma conica e sommità a cupola o anche a forma conica. I massimi diametri e le massime altezze realizzate non superano rispettivamente i 50 m e i 20 m. I digestori devono essere coibentati, provvisti di un sistema di riscaldamento per mantenere la temperatura ai valori ottimali e di un sistema di agitazione per mantenere omogenea la massa in fermentazione.

Esistono molti tipi di impianti che si differenziano per la loro potenzialità, per il materiale da costruzione utilizzato, per le modalità di accumulo del biogas prodotto, per la finalità principale che può essere la produzione del biogas o la riduzione del carico inquinante. In ogni caso gli impianti devono soddisfare le seguenti **funzioni**:

1. accumulare l'effluente o la sostanza organica di partenza
2. realizzare la fermentazione anaerobica
3. accumulare il gas prodotto
4. evacuare il fango e l'effluente

I digestori possono essere sia **discontinui** che **continui**. Gli impianti a **ciclo discontinuo** hanno il vantaggio della semplicità costruttiva e la possibilità di poter utilizzare cariche vegetali, ricche di lignina, e fibroso-solidi. L'impianto viene caricato e lasciato a temperatura idonea a produrre biogas per il tempo necessario, da 60 giorni a 6 mesi. Si nota che la produzione di gas non è continua: infatti è massima dopo alcuni giorni (5-6) e decresce lentamente mentre aumenta la percentuale di metano. Terminata la fermentazione l'impianto viene scaricato e un nuovo ciclo viene iniziato.

Gli **impianti continui** sono stati messi a punto principalmente come sistema di depurazione degli scarichi e la produzione di biogas può essere ritenuta un processo secondario. Questi impianti sono adatti nei casi in cui è disponibile una carica costante nel tempo come gli effluenti di grandi allevamenti, le acque di scarico urbane e i fanghi di trattamento delle stesse, gli scarichi industriali non tossici.

I digestori continui possono operare con cariche essenzialmente fluide e non sopportano facilmente l'immissione di sostanze vegetali ricche di lignina che, non essendo metabolizzata dai batteri, resta solida e può dare, durante l'esercizio, gravi inconvenienti come la formazione di incrostazioni e l'ostruzione delle condotte.

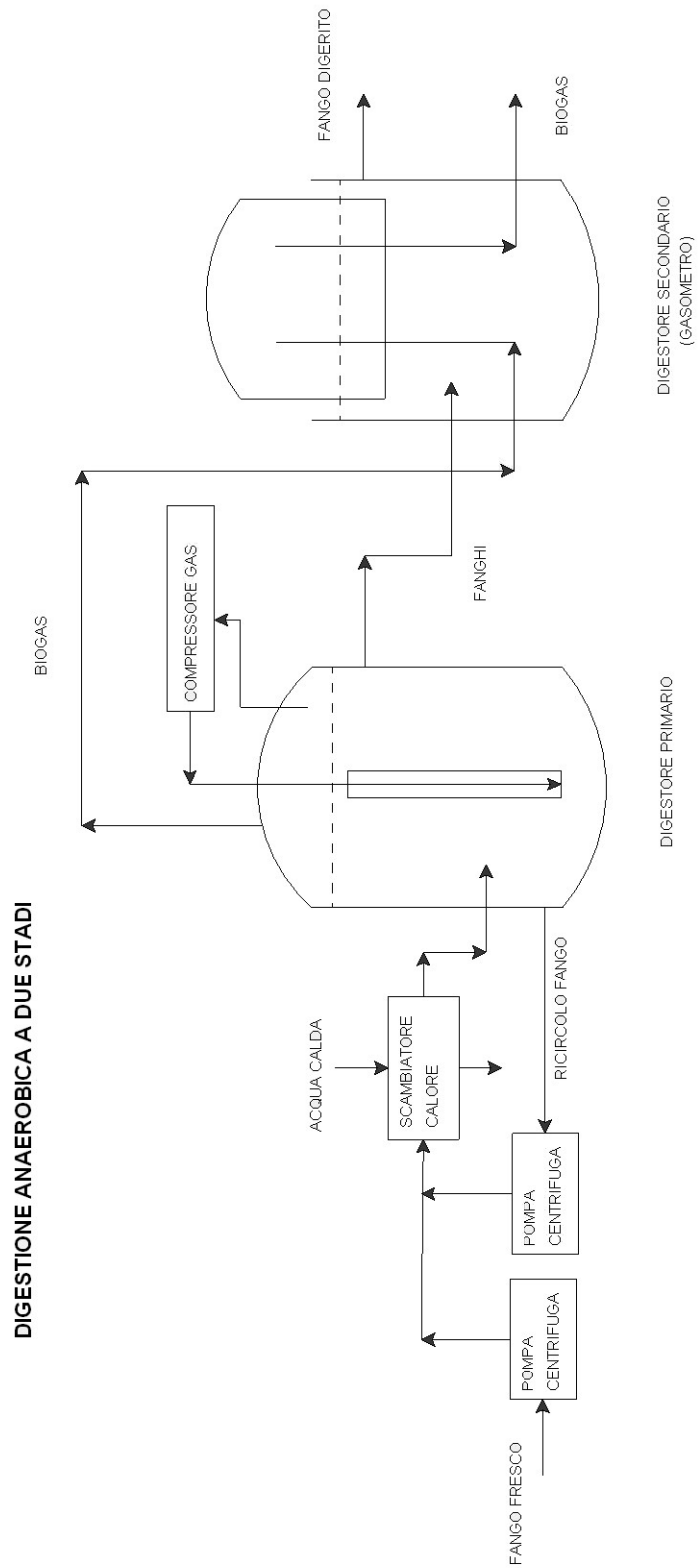


Figura 4: Digestione anaerobica a 2 stadi

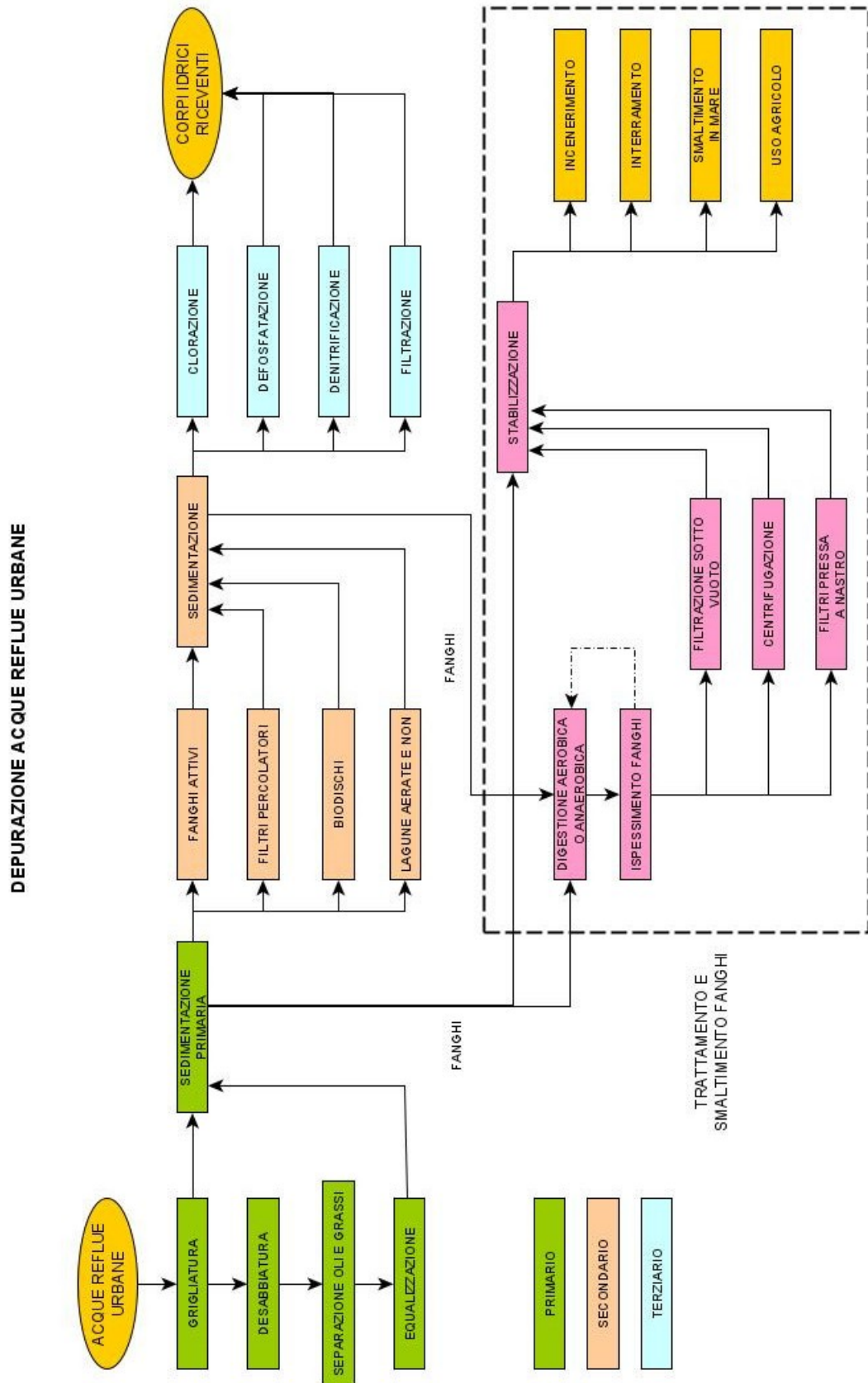


Figura 5: Depurazione acque reflue urbane