

**LA GESTIONE DEL BIOGAS E DEL PERCOLATO
NELLE DISCARICHE RISANATE****4.1. Introduzione**

Quando vengono messi a dimora in una discarica, i rifiuti che contengono sostanza organica (tipicamente i rifiuti urbani) producono una miscela di gas, chiamata **biogas** o gas di discarica (LFG) e un liquido ricco di agenti inquinanti che deriva principalmente dalla percolazione di acqua piovana.

Il gas di discarica viene infatti generato dalla degradazione chimica e biologica della sostanza organica presente nei rifiuti stessi. La composizione chimica di questo gas varia continuamente e dipende da molti fattori, tra i quali:

- la composizione merceologica dei rifiuti;
- le condizioni ambientali del corpo rifiuti;
- il tempo e le condizioni di deposito

Ovviamente, il tipo di rifiuto (organico, plastico, inerte, terroso, ecc.) influenzerà notevolmente il tipo di biogas che viene prodotto. Una massiccia presenza di sostanza organica comporterà un'alta produttività, mentre la presenza di materiale inerte o di sostanze chimiche inibitrici la limiterà fortemente. La **pezzatura** del materiale gioca un ruolo importante; se da un lato una pezzatura ridotta aumenta la superficie bio-reattiva dei materiali con conseguente migliori condizioni di produttività del biogas; dall'altro lato comporterà una maggiore compattazione dei rifiuti, con riduzione dell'indice dei vuoti e l'aumento della densità dell'ammasso, con conseguente riduzione della possibilità diffusione dell'umidità, dei batteri e della trasmissività del biogas stesso. La pezzatura è fortemente influenzata dagli eventuali pre-trattamenti che subiscono i rifiuti prima di essere messi a dimora; l'attività di triturazione ad esempio riduce la pezzatura e miscela il materiale.

Il **percolato** è il *prodotto liquido derivante principalmente dalla percolazione di acqua piovana (e in minima parte biogenica derivante dalla biodegradazione del rifiuto) attraverso l'ammasso di rifiuti abbancati e conseguente lisciviazione dei componenti solubili*. Le discariche di rifiuti

solidi urbani possono causare gravi danni ambientali se non controllate. Il percolato generato in discarica contiene grandi quantità di sostanze contaminanti organiche e inorganiche in grado di disperdersi al di fuori del perimetro di impianto.

Ne deriva che - con riferimento a tale aspetto - la gestione di una Discarica sarà tutta incentrata alla minimizzazione della produzione del percolato stesso, alla sua raccolta ed eventuale trattamento fino allo smaltimento finale.

Il controllo della diffusione di percolato (così come per il biogas) è generalmente affidata a barriere meccaniche a bassa permeabilità associate ad un sistema di drenaggio e allontanamento dei prodotti della biodegradazione: tali barriere sono normalmente costituite da livelli di terreno argilloso disponibile in loco (o appositamente ivi collocato) e compattati in sito. Qualora non fosse disponibile terreno con siffatte qualità, è possibile raggiungere le caratteristiche tecniche richieste dalle disposizioni normative mediante l'impiego di geomembrane sintetiche, utilizzate da sole o in abbinamento al terreno argilloso stesso.

4.2 La gestione del gas di discarica

4.2.1 Origine e composizione dei biogas

Tra le condizioni ambientali l'**umidità** interna al corpo rifiuti gioca un ruolo fondamentale, si è visto infatti che all'aumentare dell'umidità (entro certi limiti) si ha un incremento della produzione di biogas. Una maggiore disponibilità di acqua ha infatti effetti benefici sul processo di degradazione biologica, in quanto:

- incrementa l'attività dei microrganismi;
- migliora l'interfaccia solido-liquido e funge da vettore per diffondere meglio i microrganismi ed i nutrienti

Umidità basse (30-40%) non riescono ad assicurare le adeguate condizioni per le reazioni biochimiche di degradazione della sostanza organica, mentre condizioni di saturazione (o peggio di "allagamento") ostacolano sia la produzione che la capacità di spostamento del biogas. La presenza di acqua nel corpo rifiuti deriva da:

- una componente endogena (ad esempio molto alta è la presenza di acqua negli scarti di cucina e di giardino);
- percolazione di acque meteoriche;
- afflusso di acque superficiali e sotterranee;

- eventuali attività di ricircolo del percolato

Il primo contributo è legato alla composizione del rifiuto e alle modalità di raccolta; normalmente i rifiuti conferiti si trovano in condizioni insature e sono in grado di assorbire acqua fino a raggiungere la saturazione capillare, oltre la quale si ha formazione di percolato.

Gli apporti esterni sono fortemente influenzati dalle modalità di gestione della discarica, come la periodica ricopertura dei rifiuti e soprattutto il corretto allontanamento delle acque di ruscellamento superficiale.

Come accennato, il principale fattore di decomposizione dei rifiuti in discarica è costituito dalla **degradazione biologica**, cioè la trasformazione della materia da solida a liquida e gas ad opera di microrganismi, come i batteri. In genere la degradazione si svolge in tre fasi ben distinte:

- la fase aerobica
- la fase acida
- la fase anaerobica

La fase aerobica è quella iniziale, quando i rifiuti vengono collocati in discarica ed i microrganismi aerobi hanno grande disponibilità di ossigeno; ossigeno che prelevano dall'atmosfera (fino a che non vengono ricoperti), dall'aria inglobata durante il deposito, da quella che penetra dopo la chiusura e da quello disciolto nell'acqua di infiltrazione. Questo processo in realtà inizia già nella fase di raccolta e (eventuale) pre-trattamento dei rifiuti e comunque da e fino a quando vi è disponibilità di ossigeno.

E' lo stesso processo che viene utilizzato per produrre compost sia a livello familiare, a partire dagli scarti di cucina e di giardino, che a livello agricolo/industriale a partire dagli scarti agricoli o dai rifiuti organici. Il processo aerobico è fortemente esotermico, si possono infatti raggiungere anche i 70°C.

Quando il rifiuto viene subito compattato e ricoperto il processo può durare anche solo poche ore/giorni, mentre dove il deposito è incontrollato e l'aria continua a circolare, può durare anche mesi. Questa fase ossidativa è caratterizzata dalla forte produzione (ed emissione) di CO₂.

La fase acida si attiva quando si azzerà la disponibilità di ossigeno libero ed i batteri iniziano ad utilizzare l'ossigeno legato in altre sostanze. L'attività termica si riduce e la sostanza organica subisce una seconda fase di degradazione con forte presenza di acidi organici, che ritroviamo

anche disciolti nel percolato. Anche in questa fase (che può durare alcune settimane/mesi) si ha una forte produzione di CO₂.

Infine, **la fase anaerobica** si attiva quando l'ossigeno è stato completamente consumato e si creano le condizioni favorevole per l'azione dei batteri che lavorano in ambiente anossico, c.d. batteri metanigeni, in quanto proseguono l'azione di degradazione, convertendo la sostanza organica in metano e CO₂.

Quando le condizioni sono idonee la percentuale di metano può raggiungere anche il 60% del biogas. Anche questa fase è esotermica, ma di entità inferiore alla fase aerobica. In genere questa fase si attiva dopo alcuni mesi dalla messa a dimora dei rifiuti e può durare anche decenni, con una produzione massima nei primi anni ed una lenta riduzione fino alla completa degradazione della sostanza organica. Ovviamente questa fase è attiva solo e fino a quando sussistono le condizioni chimico-fisiche che possano garantire i processi biochimici; potendo inibirsi o completamente azzerarsi; non sono rari i casi in cui, anche dopo molti anni dalla deposizione, si trovano rifiuti ancora integri o poco degradati, ad esempio perché secchi (carenza di umidità).

Nella Fig. 4.1, che illustra un rifiuto rimosso dopo circa 30 anni dalla sua messa a dimora, si può ancora riconoscere un tagliando di carta



Figura 4.1. Rifiuti rimossi dopo 30 anni dalla loro messa dimora. Fonte: ASET Spa, Ott.2016

Le varie fasi sono pertanto fortemente influenzate dalle modalità gestionali. Ad esempio, dove i rifiuti vengono stesi su grandi superfici e non sono ricoperti, tipico delle discariche non controllate/ a cielo aperto, non maturano le condizioni per le fasi successive a quella aerobica.

Il grafico di A. Damiani e M. Gandolla, di un articolo del 1992, rimane una pietra miliare per descrivere l'andamento (indicativo) della composizione della miscela di gas prodotti durante le varie fasi di “fermentazione” dei rifiuti di una discarica gestita e controllata.

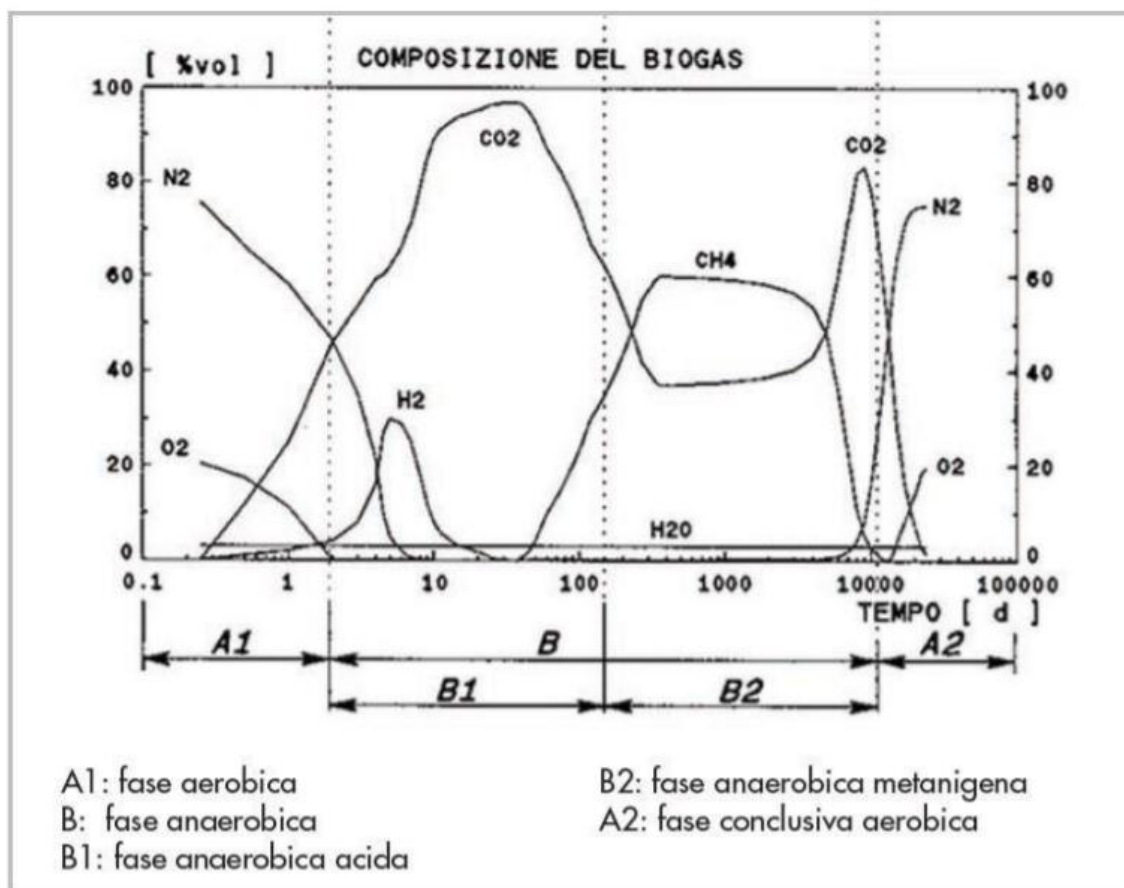


Figura 4.2 Composizione tipo del biogas nel tempo in una Discarica. Fonte: Damiani L., Gandolla M., 1992, Gestione del biogas da discariche controllate, Istituto per l'Ambiente.

Come si evince dal grafico, i macrocomponenti caratteristici di un **biogas tipico** e le loro concentrazioni in volume sono:

- Metano (**CH₄**) 30÷50 %
- Anidride carbonica (**CO₂**) 35÷70 %
- Ossigeno (**O₂**) 3÷5 %
- Azoto (**N₂**) 10÷15 %
- Vapore acqueo 0÷5 %

Si evidenzia subito che tutti i suddetti gas sono inodore. Componenti minori (si misurano in genere in ppm o mg/m^3) sono l'acido solfidrico (H_2S) e l'ammoniaca (NH_3) che hanno invece ben distinte caratteristiche odorigene.

E' ovvio che le percentuali dei singoli gas nella miscela che costituisce il biogas, sono fortemente dipendenti dalla tipologia dei rifiuti conferiti, dalle modalità di gestione dell'impianto e dell'età della deposizione. Per praticità e per confrontare i dati, nella gestione di una discarica si fa sempre riferimento ad un biogas con un tenore di metano del 50% (**LFG₅₀**).

Nel biogas sono presenti anche (in tracce) numerosi altri gas (tra cui: VOC, IPA, idrocarburi non metanici) che si generano anch'essi dalle reazioni biochimiche che avvengono all'interno del corpo rifiuti o che provengono direttamente dalle sostanze di sintesi contenute nei rifiuti stessi. Alcuni di questi gas sono tossici e pertanto vanno adeguatamente monitorati, sia per la salvaguardia del personale che opera nell'impianto, sia per il loro impatto ambientale e sanitario.

Un'attenzione particolare merita il metano e la sua caratteristica di infiammabilità. Essendo il metano un combustibile infatti, in presenza di un comburente (l'Ossigeno presente nell'aria) e di un innesco, si può generare una combustione. Affinché la combustione avvenga deve però esserci una precisa proporzione tra i gas nella miscela. Nel caso del metano in aria si ha:

- un limite inferiore di esplosività **LEL** (Lower Explosive Limit) pari al 5%;
- ed un limite superiore di esplosività **UEL** (Upper Explosive Limit) pari al 15%

Il “**campo di infiammabilità**” del metano in aria è pertanto compreso tra il 5 ed il 15%. Per concentrazioni inferiori al 5% non si ha sufficiente combustibile; mentre per concentrazioni superiori al 15% non si ha sufficiente comburente.

E' chiaro che per effetto delle diluzioni del biogas (con alte % di metano) si avranno sempre delle zone in cui si rientra nel campo di infiammabilità, occorre quindi fare molta attenzione, specie dove può crearsi un accumulo di biogas (in spazi confinati) dove al rischio incendio si prodotto nel tempo dal corpo rifiuti, è un'attività fondamentale per la progettazione ed il dimensionamento delle varie componenti impiantistiche, ma anche nella programmazione delle fasi di gestione e monitoraggio di un impianto di captazione e trattamento del biogas.

Il campo di infiammabilità del biogas in aria è diverso da quello del metano puro, per effetto della presenza dei gas inerti (come CO₂ e N₂) che possono saturare la miscela; con percentuali di gas inerti maggiori del 20% si entra infatti nel campo di non infiammabilità per eccesso di gas inerti. Per una migliore valutazione di questi aspetti si rimanda ai diagrammi di infiammabilità presenti nei manuali di gestione dei gas infiammabili. (e.g. G. Zebetakis 1959 US *Bureau of mines*).

4.2.2 La produzione ed i rischi

Come si vedrà nei paragrafi successivi, calcolare (o meglio stimare) la quantità di biogas che verrà prodotto nel tempo dal corpo rifiuti, è un'attività fondamentale per la progettazione ed il dimensionamento delle varie componenti impiantistiche, ma anche nella programmazione delle fasi di gestione e monitoraggio di un impianto di captazione e trattamento del biogas.

I modelli di calcolo considerano la discarica come un **bioreattore** dove si sviluppano le varie fasi biochimiche descritte, in particolare quella anaerobica; sommando gli effetti prodotti nel tempo da ogni singola tonnellata di rifiuto, per sovrapposizione dei singoli contributi si ottiene una curva di produzione presunta; spesso vengono proposti due andamenti (*best e worst case*) all'interno del quale si stima possa trovarsi la curva di produzione effettiva. Sono disponibili diversi modelli di calcolo (cui si rimanda per tutti i dettagli), da quelli empirici a quelli teorici che si basano sulle dinamiche biochimiche di trasformazione della sostanza organica. In ogni caso è chiaro che la produzione di biogas è fortemente condizionata dalla tipologia di rifiuti messi a dimora e dalle condizioni chimico-fisiche in cui si viene a trovare nel tempo il corpo rifiuti. E' chiaro infatti che una tonnellata di scarti di cucina avrà una produzione quali-quantitativa diversa da una tonnellata di tessili, vetro e metalli. Tenuto conto che almeno il 50% della sostanza organica può essere convertita in biogas in condizioni anaerobiche, si stima che una tonnellata di materiale organico può produrre nel tempo anche oltre 200 m³ di biogas.

Pertanto ad esempio, una discarica di medie dimensioni che accoglie 30.000 tonnellate di rifiuti urbani (ad alta componente organica) per un periodo di 10 anni, si troverà a dover gestire nel tempo almeno 50 milioni di m³ di biogas.

Qualsiasi sia il modello di calcolo utilizzato, per avere una stima coerente della produzione di biogas nel tempo è quindi fondamentale conoscere:

- la quantità, la composizione e l'andamento nel tempo dei rifiuti conferiti (specie degli ultimi 10 anni); molto utili sono in tal senso le eventuali analisi merceologiche svolte sugli stessi;
- l'eventuale presenza di rifiuti speciali (industriali) che possano contenere sostanze inibenti le reazioni biochimiche;
- gli eventuali pre-trattamenti subiti dai rifiuti (es. biostabilizzazione);
- le modalità (o meno) di gestione dell'impianto nel tempo (compattazione, copertura, eventuale modalità di captazione del biogas, gestione del percolato, ecc.);
- la configurazione della vasca e gli apporti idrici esterni (falde, termo-pluviometria, ecc.) al fine di valutare le condizioni di umidità nel corpo rifiuti.

Come è evidente dalla caratterizzazione quali-quantitativa del biogas, la mancanza di controllo e gestione del biogas prodotto nel tempo comporta una serie di rischi ed impatti che occorre tenere ben presenti. Tra i primi rischi, come precedentemente descritto, si ha sicuramente quello legato al **rischio incendio ed esplosione**. La forte presenza nel biogas di un gas combustibile come il metano, il suo ampio campo di infiammabilità e la sua alta mobilità (sia in aria che nel terreno) possono generare situazioni di rischio molto gravi, anche a centinaia di metri dall'impianto. Non sono rari infatti, specie nelle discariche poco o mal gestite, gli eventi di incendi e di frane generate da esplosioni (per combustione interna o in spazi confinati) che hanno causato danni ingenti a cose e a persone.

Tra gli **impatti ambientali** e sanitari del biogas si possono invece evidenziare: l'impatto olfattivo e di qualità dell'aria, l'emissione di gas serra e la fitotossicità. L'impatto ambientale che notoriamente viene attribuito alle discariche è il disagio olfattivo generata da alcune sostanze (es. mercaptani, H₂S, ammine, IPA, ecc.) presenti nel biogas a volte solo in tracce, ma che hanno una bassa soglia di percezione dal naso umano; mentre le macrocomponenti (metano, CO₂, aria, vapor d'acqua) risultano inodori. In questo il biogas oltre che fonte degli odori costituisce anche il mezzo di trasporto quando (in assenza di depressioni generate dalla captazione) il gas generato dalla fermentazione dei rifiuti nelle zone già da tempo ricoperte risale verso gli strati superficiali, caricandosi ulteriormente di altre sostanze originate dai rifiuti freschi appena deposti e da qui verso l'esterno.

Come accennato il metano è un potente “gas serra”, avendo un potenziale di riscaldamento globale (c.d. GWP100) 28 volte superiore a quello della anidride carbonica; la sua mancata intercettazione e bonifica contribuisce quindi enormemente al surriscaldamento del pianeta. Le discariche di rifiuti costituiscono il secondo/terzo contributo (almeno per il 15%) di emissioni incontrollate di metano (di origine antropica) dopo l’industria del petrolio e la zootecnia.

Risulta quindi evidente che, la presenza di un efficiente sistema di captazione e bonifica del biogas, evitando sovrappressioni nel corpo rifiuti ed emissioni incontrollate dallo stesso, è fondamentale per ridurre i rischi e l’impatto sull’uomo e sull’ambiente.

4.2.3 La captazione e il trasporto

L’attività di captazione del biogas consiste nella realizzazione e gestione di manufatti, posti a diretto contatto con i rifiuti, in grado di intercettare il gas appena prodotto dalla loro fermentazione.

Detti elementi dovranno ovviamente essere collegati al sistema di aspirazione e quindi di trattamento del gas stesso (vd. paragrafi successivi). In assenza di tali elementi, il gas, in leggera sovrappressione nel corpo rifiuti, si disperderebbe in atmosfera in maniera incontrollata, trovando la sua via di fuga attraverso la superficie della discarica o nel terreno circostante attraverso le pareti della vasca (se non adeguatamente impermeabilizzate).

Il sistema di captazione va dimensionato e predisposto già in fase di progettazione e costruzione della discarica, in quanto, come si è visto, il biogas inizia a formarsi sin da subito (anche se con caratteristiche diverse di quelle a regime).

Gli elementi di captazione saranno tanto più efficienti quanto più sarà ampia la superficie di contatto con i rifiuti; essi sono in genere costituiti da pozzi verticali o da trincee drenanti orizzontali.

Nel caso del risanamento di una discarica non controllata, il sistema di captazione verrà costruito in seguito seguendo gli stessi criteri che si applicano alle discariche controllate.

Un elemento tipico della captazione è il **pozzo (o camino) verticale**, costituito da una colonna circolare di inerti e da una sonda (tubo fessurato) centrale (vd. Fig. 4.3). La colonna di ghiaia garantisce la superficie di drenaggio del gas, mentre la sonda fessurata assicura la possibilità di allaccio in superficie alla rete di aspirazione e trasporto del biogas.

Il pozzo può essere predisposto sin dalla base della vasca che alloggerà i rifiuti (vd. Fig. 4.3) in tal caso la colonna di ghiaia sarà protetta da una gabbia, in genere costituita da un telaio metallico (si utilizzano spesso le armature elicoidali di acciaio dei pali di fondazione in calcestruzzo) e da una rete metallica di contenimento.

Le parti metalliche nel tempo si degradano, ma senza arrecare danno, in quanto ormai sarà il corpo rifiuti stesso a contenere la colonna di ghiaia. La ghiaia (di pezzatura grossolana: 40/70) dovrà preferibilmente essere costituita da materiali silicei o basaltici (tipicamente viene utilizzato il ballast basaltico delle massicciate ferroviarie), evitando l'utilizzo di rocce calcaree che tendono ad essere aggredite e disgregate dagli acidi contenuti nel gas e nel percolato. Per la sonda centrale in genere vengono utilizzati tubi in polietilene ad alta densità (HDPE), appositamente fessurati (cfr. Fig. 4.3).



Figura 4.3. Drenaggi (sub) orizzontali – Pozzi in elevazione e in sponda. Fonte: ASET Spa, April 2019.

I pozzi hanno generalmente diametri di 60/120 cm, mentre la sonda in polietilene ha diametro esterno di 20/60 cm (le sonde più grandi consentono l'alloggiamento di pompe sommerse per il pompaggio del percolato). Con tecniche simili possono essere realizzati anche dei pozzi obliqui sulla sponda delle vasche (cfr. Fig. 4.3) di sezione semicircolare.

In una discarica di rifiuti urbani, il “**raggio di influenza**” di questi pozzi (distanza entro la quale il pozzo esercita la sua azione) è considerato di 25 m. Per una captazione ottimale, in fase di progetto o di gestione è raccomandabile restare attorno ai 15÷20 metri in modo da far sovrapporre gli effetti di una maglia di pozzi.

I pozzi che nascono dal fondo della discarica (c.d. pozzi in elevazione) sono particolarmente utili in quanto possono assolvere alla doppia funzione di captazione del biogas verso l'alto e di drenaggio del percolato verso il basso, dove viene allontanato dal drenaggio del fondo della vasca.

Tuttavia, essendo sempre presenti in tutte le fasi di coltivazione, detti manufatti sono soggetti a molte e ripetute sollecitazioni, quali:

- azione meccanica dei mezzi di trasporto e compattazione dei rifiuti;
- assestamento dei rifiuti (che per attrito tendono a trascinare gli elementi verso il basso);
- spinte differenziali (ad esempio per i pozzi vicino alle sponde);
- degradazione dei materiali (per aggressione degli acidi);
- pressioni e condizioni fisiche (la temperatura nel corpo rifiuti può arrivare anche a 70°C, con conseguente “rammollimento” del polietilene);
- intasamento dei drenaggi; ecc.

Tutte queste azioni portano a perdere progressivamente la funzionalità di questi elementi, fino a renderli inutilizzabili. Nella vita di una discarica occorre quindi prevedere un periodico rinnovo delle dotazioni di captazione, non essendo possibile una manutenzione degli stessi.



Figura 4.4. Trivellazione di un nuovo pozzo – Prospetto dei dati rilevati in una campagna di realizzazione di nuovi pozzi tramite trivellazione. Fonte: ASET Spa, July 2021.

Quando si ravvisa la necessità di introdurre nuovi elementi di captazione è necessario programmare una campagna di nuovi pozzi che devono essere trivellati dall'alto (Figura 4.4). Lo stesso si applica alle discariche non controllate.

Detta operazione deve essere eseguita da ditte specializzate in quanto sussistono diversi rischi nella loro realizzazione: caduta nel foro di perforazione, esalazione di biogas con rischio di entrare nel campo di infiammabilità, errata realizzazione della colonna drenante, ecc. Una campagna di trivellazione però ha anche l'opportunità di raccogliere molte informazioni sulle condizioni chimico-fisiche del corpo rifiuti; durante la perforazione si possono infatti rilevare/osservare: umidità, temperatura, battenti idraulici, stato di mineralizzazione dei rifiuti, ecc.; possono altresì essere raccolti campioni rappresentativi di rifiuti sui quali eseguire prove di laboratorio: indice respirometrico dinamico, contenuto residuo di carbonio, eventuali prove di biometanazione, ecc. che possono fornire ulteriori utili informazioni anche comparando i dati tra i vari pozzi. (cfr. Fig. 4.4).

Durante la fase di coltivazione è sempre utile realizzare dei drenaggi sub orizzontali che fungono da ulteriori elementi di captazione (vd. Fig. 4.3); essi vengono realizzati, a varie quote, mediante

lo scavo di semplici trincee poi riempite di ghiaia; volendo si possono inserire anche delle tubazioni fessurate per incrementare il flusso gassoso.

Collegando queste trincee tra un pozzo e l'altro è possibile realizzare una rete sotterranea di captazione che bypassa eventuali interruzioni che si possono generare; unica accortezza è quella di garantire una adeguata pendenza delle trincee verso i pozzi (in genere si realizza un profilo a “schiena d'asino”) al fine di consentire lo scolo del percolato e delle condense, che potrebbero allagare la trincea stessa, verso i pozzi.

La parte sommitale di un elemento di captazione, detto comunemente “testa di pozzo” ha la funzione di collegare il manufatto alla rete di trasporto del biogas. Senza questo elemento di raccordo il gas si disperderebbe in atmosfera, tra l'altro per una via preferenziale, vanificando gli sforzi fatti per realizzare e gestire il sistema di captazione. Le teste di pozzo possono essere realizzate in due modi:

- la sonda inserita nel pozzo può essere collegata ad un tubo cieco (per una profondità dal piano campagna di almeno 2/3 metri) di stesso diametro della sonda;
- mediante un **manufatto a “campana”** che racchiude tutta la parte sommitale della colonna drenante, generando una sorta di camera sulla quale possono essere collegati i tubi di aspirazione e di pompaggio del percolato; questo metodo è da preferire.

In ogni caso, al fine di evitare che venga aspirata aria dalla superficie della discarica è fondamentale garantire una perfetta sigillatura tra il pozzo e la copertura della discarica stessa.

Considerato che questi elementi spesso si trovano nella zona di lavoro delle macchine operatrici, occorre anche garantire una loro adeguata protezione al fine di evitare danneggiamenti.

Il sistema di tubazioni che congiunge i singoli elementi di captazione con la centrale di estrazione e trattamento costituisce il **sistema di trasporto del biogas**.

Per la sua flessibilità, leggerezza, resistenza alle aggressioni chimiche e praticità gestionale, in genere il sistema di trasporto è realizzato con tubi in polietilene ad alta densità (HDPE) di vari diametri.

Quando sono presenti decine di pozzi, per assicurare una corretta regolazione (vd. oltre), è necessario raggruppare le linee dei singoli pozzi, facendole convergere in stazioni intermedie; in questi punti vengono anche inseriti i dispositivi di regolazione e controllo della captazione, pertanto esse vengono anche definite **Stazioni di Regolazione**.

Il sistema di trasporto può quindi essere suddiviso in:

- **linee primarie** (in genere con diametri 180/250 mm) che collegano le Stazioni di Regolazione con la Centrale di Estrazione;
- **linee secondarie** (in genere è bene non scendere sotto i 90 mm di diametro) che collegano i singoli pozzi con le **Stazioni di Regolazione**.

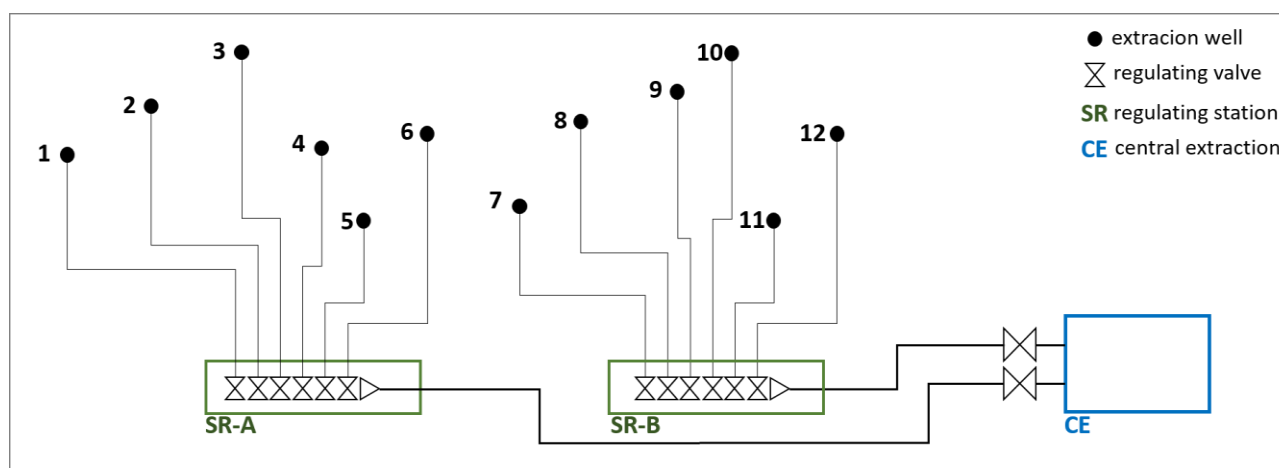


Figura 4.5. Schema tipo di una sistema di trasporto del biogas Fonte: adattato da Magnano E., ed. 2010, Biogas da Discarica, EPC.

Nella Figura 4.5 5 è schematizzato un sistema di trasporto del biogas (liberamente tratto da Biogas da discarica – cfr. bibliografia) con evidenziate i due tipi di linee (in grassetto quelle primarie). Il gas si muove all'interno delle tubazioni per due motivi: la pressione (naturale) esercitata all'interno del corpo rifiuti (a seguito della sua fermentazione) e dalla depressione (artificiale) del sistema di aspirazione; gli effetti delle due azioni sono coesistenti e si sommano, ma l'azione di aspirazione è quella largamente predominante e ha il vantaggio di poter essere regolata.

Si evidenzia quindi che il sistema di trasporto del biogas è in depressione; trattandosi di un gas infiammabile questo aspetto gioca a favore della sicurezza, in quanto in caso di rotture si ha al massimo una aspirazione di aria nella rete e non una fuoriuscita incontrollata di biogas.

Essendo il biogas un fluido caldo e spesso saturo di vapor d'acqua, una delle problematiche principali della gestione delle linee di trasporto biogas è quello della creazione di condense all'interno delle tubazioni, per effetto della variazione di temperatura (raffreddamento) che si ha lungo le linee che corrono esternamente (specie nei periodi freddi).

Le **condense** vanno a ridurre o a bloccare il flusso di biogas all'interno delle tubazioni; non essendo possibile evitare che si creino occorre quindi provvedere al loro spurgo; le depressioni applicate sulla linea infatti in genere non sono in grado di aspirare gli accumuli di liquidi.

L'allontanamento delle condense avviene quindi per gravità, avendo l'accortezza di garantire alle linee sempre dei profili “a schiena d'asino”, cioè in pendenza verso i pozzi o verso le Stazioni di Regolazione; ove ciò non risulta possibile occorre prevedere degli appositi **scaricatori di condensa** che garantiscono (attraverso “guardie idrauliche”) la continuità della depressione (Fig. 4.6)

Le tubazioni, che in genere scorrono sulla superficie della discarica, sono soggette a continui spostamenti generati: dall'assestamento dei rifiuti, dalla dilatazione termica degli stessi tubi, da lavori di sistemazione delle coperture, giardinaggio, ecc.; le linee possono quindi perdere la pendenza necessaria a garantire lo spurgo delle condense. Per un ottimale controllo delle pendenze, e più in generale dell'integrità delle tubazioni, può quindi essere utile posare le stesse su dei “castelletti” costruiti con tubi da ponteggio, dotati di giunti orientabili (Fig. 4.6), quindi facilmente regolabili.



Figura 4.6. Linee secondarie biogas posate su supporti di tubi metallici – in primo piano uno scaricatore di condensa – sullo sfondo una Stazione di regolazione. Fonte: ASET Spa, Nov.2020.

Come accennato nei paragrafi precedenti, il biogas all'interno di un pozzo subisce continue variazioni quali-quantitative, essendo condizionato da diversi fattori: caratteristiche dei rifiuti, condizioni chimico fisiche (a sua volta influenzate dalle precipitazioni e dalla pressione atmosferica), sigillatura, interazione con gli altri pozzi, ecc.

Una efficiente captazione deve quindi tener conto di queste variazioni (che si manifestano anche più volte in una giornata) e deve mettere in campo un frequente **sistema di regolazione** puntuale del tasso di aspirazione; attività che in genere viene svolta manualmente.

Le modalità di regolazione dipenderanno anche dagli obiettivi che si vogliono raggiungere, cioè se si intende massimizzare il recupero energetico o se si vuole aspirare più biogas possibile; è palese quindi che detta attività risulta abbastanza complessa da realizzare; ove possibile è pertanto preferibile affidarla a moderni **sistemi di regolazione automatizzata** (vd.Caso Studio-Italia).

4.2.4 La bonifica del biogas

Come evidenziato nei paragrafi precedenti, il biogas captato non può essere rilasciato in atmosfera, ma deve essere trattato per ridurre il più possibile gli effetti negativi che ha sull'ambiente.

In genere le attività di bonifica del biogas e quelle ad essa propedeutiche, vengono accorpate in unico sito, la **Centrale di Estrazione**.



Figura 4.7. Una centrale di estrazione e recupero energetico del biogas. Fonte: ASET Spa, 2005.

Il convogliamento del biogas a detta centrale è garantito da un sistema di aspirazione e compressione, che ha la doppia funzione di assicurare una sufficiente depressione sull'intera rete di captazione e trasporto e quella di comprimere il gas verso gli organi di trattamento.



Figura 4.8. Un turboaspiratore (soffiante centrifuga). Fonte: ASWM Srl, 2020.

Questo lavoro viene eseguito da delle macchine, c.d. turboaspiratori o turbosoffianti, che hanno quindi il duplice scopo, da un lato di aspirare il gas (garantendo la prevalenza necessaria a vincere le perdite di carico delle linee di trasporto ed una adeguata depressione in testa agli organi di captazione) e dall'altro lato di spingerlo (garantendo una adeguata pressione) verso i sistemi di trattamento.

Per la dinamica dei fluidi in gioco, queste apparecchiature devono garantire (relativamente) basse pressioni di ventilazione ma con alte portate; vanno quindi adeguatamente dimensionate tenendo conto dei picchi di produzione.

In aspirazione bisogna garantire all'organo di captazione più lontano una depressione di almeno 10÷20 mbar; mentre in compressione occorre sostenere una spinta di circa 1 bar (anche di più se si deve alimentare un gruppo elettrogeno). Per quanto riguarda le portate, in genere per le discariche bisogna considerare macchine in grado di aspirare/comprimere da alcune centinaia ad alcune migliaia di Nm³/h di biogas. Considerato che queste macchine sono l'elemento propulsore di tutto il sistema e che lavorano continuamente (h24 365 gg/anno) è importante

dimensionarle bene in modo da soddisfare le esigenze di progetto, tenendo anche conto del fattore tempo, cioè delle possibili variazioni che si manifestano durante tutta la vita della Discarica, o quanto meno per il periodo per il quale si intende farle lavorare.

In genere si preferisce dotare l'impianto di più macchine (magari con portate inferiori a quelle di picco) che possano lavorare in parallelo, in modo da rendere più flessibile la variabilità delle portate e poter garantire che il sistema funzioni anche nel caso di manutenzioni di una di esse. Considerato che i turboaspiratori sono molto energivori e che lavorano h24, è possibile utilizzare delle macchine dotate di inverter che garantiscono una riduzione dei consumi elettrici, in particolare se si lavora a regimi molto inferiori alle potenze nominali.

E' disponibile in commercio un'ampia gamma di macchine con caratteristiche diverse (negli ultimi anni anche con protezione ATEX), a copertura di tutte le esigenze progettuali.

Le **modalità di trattamento del biogas** dipendono molto dalla qualità e dalle portate del biogas stesso. Quando la percentuale di metano è superiore a 25÷30 % è possibile pensare ad un trattamento termico mediante combustione; tenori di metano inferiori non riescono a garantire una adeguato potere calorifico della miscela per la combustione.

Tenori di metano più elevati consentono possibilità di trattamento più evolute ed efficienti fino a garantire il recupero del potenziale energetico contenuto nel biogas; mentre per biogas "poveri" (di metano) l'unica possibilità di trattamento è la biofiltrazione.

Più in dettaglio, in ordine crescente di contenuto di metano (%), sono possibili i seguenti trattamenti del biogas:.

- (0÷25 %) biofiltrazione;
- (> 25%) torce statiche o a fiamma libera;
- (> 30%) torce ad alta temperatura;
- (> 35%) microturbine;
- (> 35÷40 %) motori endotermici.

Nei casi di:

- discariche a cielo aperto/ non controllate con rifiuti poco compattati e/o non ricoperti, dove quindi nel corpo rifiuti non si attiva la fase anaerobica;
- nelle prime fasi di gestione di una discarica;
- nelle discariche chiuse da molti anni;

la “qualità” del biogas non è in grado di garantire il trattamento per combustione. In questi casi può quindi essere utile dotare l'**impianto di biofiltri** che hanno la capacità di ossidare e di biodegradare molte sostanze organiche ed inorganiche contenute nel biogas.



Figura 4.9. Esempi di biofiltri in vasca o in container (dettaglio). Fonte: ASWM Srl, 2021.

I biofiltri sono costituiti da un contenitore fisso (vasche) o mobile (container) riempito di materiale vegetale (tipicamente cortecce legnose) dotato di grande porosità.

Nella massa vegetale, attraversata dal gas, si attivano un'ampia gamma di microrganismi (batteri, funghi, ecc.) in grado di decomporre molte sostanze attraverso una serie di reazioni biologiche.

Le sostanze contenute nel biogas (metano, acido solfidrico, ammoniaca, mercaptani, idrocarburi, ossido di carbonio, ecc.) passando attraverso il biofiltro vengono in gran parte assorbite e quindi metabolizzate dai microrganismi.

L'efficienza di abbattimento di dette sostanze è in genere molto alta, per il metano l'ossidazione può superare l'80%.

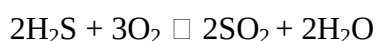
Questa tecnologia è da molti anni utilizzata con successo per il trattamento delle aree esauste degli impianti di compostaggio e di trattamento dei liquami.

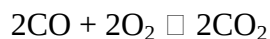
Le reazioni possono avvenire solo se si hanno precise condizioni chimico-fisiche (temperatura, umidità, pH, tempo di contatto del gas, ecc.), che possono però facilmente essere controllate. Unica attenzione va posta al crearsi delle condizioni per le quali la miscela metano/ossigeno entra nel campo della esplosività (metano al 5÷15 % in aria). La portata della miscela di gas da trattare fornirà il dimensionamento delle vasche, che hanno grande modularità; anche i costi e le attività di gestione sono molto contenuti, essendo limitate al mantenimento delle condizioni chimico-fisiche del materiale vegetale, al suo ricambio (in genere dura anni) al controllo dei gas in entrata e alle emissioni.

Quindi con un sistema relativamente semplice ed economico si riescono a trattare efficacemente anche grandi volumi di biogas a basso contenuto energetico.

Quando invece nel biogas è presente metano con percentuale maggiore del 25 %, il trattamento più idoneo diviene la **combustione**, dove il metano ed altre sostanze (ad es. H₂S) vengono ossidate producendo anidride carbonica, meno impattante (vd. paragrafo 1).

La combustione (senza recupero energetico) avviene in genere in torce in cui il metano contenuto nel biogas funge da combustibile e l'ossigeno presente nell'aria da comburente (mentre l'azoto inerte rimane invariato); le reazioni principali sono quindi:





Se nel biogas sono presenti composti fluorurati, clorurati o solforati, si producono inevitabilmente anche (rispettivamente) acido fluoridrico (HF), acido cloridrico (HCl) ed anidride solforosa (SO₂).

La presenza di azoto comporta ovviamente anche un'ampia produzione di ossidi di azoto (NO_x), specie se le temperature di combustione sono elevate (> 1.200 °C).

Basse temperature di combustione, basso “tempo di residenza nella fiamma” e scarsa miscelazione del gas, comportano la formazione di composti pericolosi come diossine e furani.

E' chiaro quindi che la possibilità di controllare le condizioni di combustione influisce molto sulle reazioni chimiche che avvengono e determinano la qualità dei fumi in uscita.

Per garantire una efficace combustione occorrono infatti:

- temperature di combustione comprese tra i 850 e i 1100 °C;
- a un tempo di ritenzione del gas > 0.3 secondi;
- un'adeguata miscelazione del gas;
- evitare il raffreddamento repentino della fiamma.

I dispositivi più semplici sono le **torce** statiche o **a fiamma libera**.

Queste in genere sono alimentate direttamente dalla sovrappressione del gas generata dalla fermentazione dei rifiuti; si attivano mediante accensioni temporizzate; spesso sono costituite da uno o più “torcini” posizionati direttamente sugli elementi di captazione sul corpo rifiuti.

A fronte di una soluzione molto economica di bonifica del biogas, appare chiara la pericolosità di questi dispositivi (si ricorda che sul corpo rifiuti possono crearsi condizioni di infiammabilità), associata all'impossibilità di garantire una corretta combustione e di controllare i fumi di emissione.

Molto più performanti sono invece le **torce ad alta temperatura** c.d. anche adiabatiche (in quanto conservano il calore della fiamma).

La presenza di camere di combustione, di rivestimenti refrattari e di altri accorgimenti, garantiscono ottimali condizioni di combustione ed il rispetto dei limiti di emissione presenti nella normativa di molti paesi.

Sia che la bonifica del biogas prodotto dalla discarica avvenga esclusivamente mediante combustione in torcia, sia che questa venga utilizzata solo quando il dispositivo di sfruttamento energetico (vd. oltre) è in manutenzione, per il dimensionamento occorre far riferimento al picco massimo di produzione del biogas da trattare.

Tuttavia, come detto nei paragrafi precedenti, la produzione del biogas varia molto durante il tempo di vita della discarica, bisogna quindi tener conto anche del livello minimo di produzione di biogas e quindi fare in modo che la torcia possa trattare portate più basse. La taglia della torcia deve quindi tener conto del range di lavoro in cui si troverà ad operare.



Figura 4.10. Una torcia ad alta temperatura. Fonte: CONVECO Srl,2021. All rights reserved.

Ove un singolo dispositivo non riesca a coprire detto range è utile pensare a predisporre due elementi che si attivano singolarmente od i coppia a seconda delle portate in gioco.

Quando si incrementa ulteriormente la percentuale di metano all'interno del biogas (almeno 35%) si può pensare ad un recupero energetico dello stesso; in tal caso si ha un doppio vantaggio ambientale, infatti alla riduzione delle emissioni di metano, si aggiunge la mancata emissione di CO₂ in atmosfera che si sarebbe generata dall'uso di combustibili fossili per produrre la stessa quantità di energia. Per questo motivo il recupero energetico del biogas da discarica può quindi essere considerato come una fonte rinnovabile.

L'energia chimica potenziale contenuta nel biogas può essere facilmente trasformata in **energia termica** (si raggiungono rendimenti fino al 90%), mentre il rendimento per la produzione di **energia elettrica** può arrivare al massimo al 40%, dovendo passare per un lavoro meccanico (motori ed alternatori). Tuttavia, in mancanza di un utilizzatore dell'energia termica posto nei pressi dell'impianto (ad es. una serra), la via preferenziale è la produzione di energia elettrica che risulta facilmente trasportabile ed utilizzabile anche da utenze lontane. Nel caso in cui dal gruppo elettrogeno venga recuperata anche energia termica (con rendimenti complessivi fino al 90%) si parla di cogenerazione. Una soluzione per la produzione di energia elettrica sono le **microturbine a gas**, che hanno alcuni pregi, come le ridotte dimensioni e la modularità (potendo installare /o mettere in uso più macchine di piccola taglia), ma il difetto di avere un costo di investimento iniziale piuttosto alto.

Il sistema comunemente più adottato, ed ormai ampiamente collaudato, per la produzione di energia elettrica da biogas, è l'utilizzo di **motori endotermici** abbinati a generatori elettrici.

Il biogas viene utilizzato come combustibile in motori che adottano diversi accorgimenti per l'utilizzo di combustibile a basso tenore di metano (> 35 %) e presenza di gas inerti (N₂ e CO₂). Le taglie vanno da un minimo di 100 ad un massimo di 1.500 kWe. Essi vanno ovviamente dimensionati in base alla quantità di biogas da trattare ed al tenore di metano della miscela. I rendimenti variano a seconda del combustibile e del carico di lavoro della macchina, variano comunque nel range 30÷40%.

Le pressioni di alimentazione sono compatibili con quelle generate dalle *turbosoffianti* utilizzate per l'aspirazione del biogas, pertanto non servono compressori aggiuntivi. Entro certi limiti è possibile regolare la carburazione del motore in modo da controllare le emissioni dei fumi, che per alcuni parametri (NO_x, CO, particolato, ecc.), a seconda delle normative nazionali, devono rispettare dei limiti; ove ciò non risulta possibile è necessario abbinare un post-combustore che provvede ad ossidare ulteriormente il monossido di carbonio e gli idrocarburi incombusti.

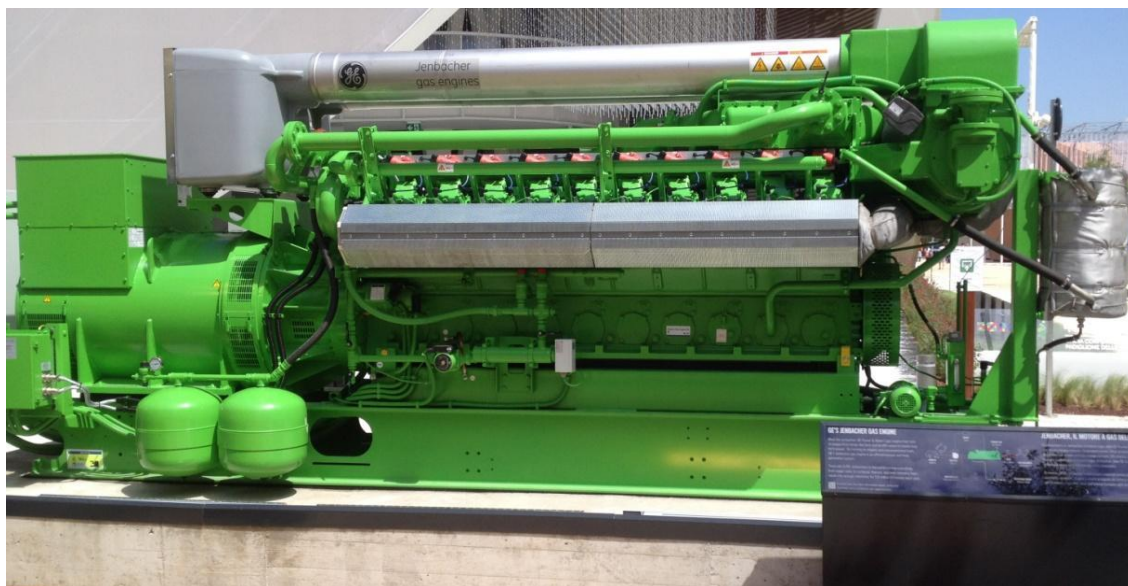


Figura 4.11. GE's Jenbacher gas engine, Padiglione USA, Expo 2015, Milano. Fonte: sbamueller, CC BY-SA 2.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/>>, via Wikimedia Commons.

In genere occorre prevedere anche dei pre-trattamenti del biogas prima dell'ingresso al motore. Il biogas arriva infatti all'impianto spesso saturo di vapor d'acqua, deve pertanto essere deumidificato; detto processo riesce anche a rimuovere altre sostanze (es. H_2S) che vanno in soluzione.

Nel caso sia forte la presenza anche di altri acidi (cloridrico, fluoridrico) o silossani (composti organici del silicio) occorrerà prevedere anche altre forme di pre-trattamento.

In generale comunque, a fronte di un investimento iniziale non eccessivo, l'utilizzo di motori endotermici (e dei relativi accessori) garantisce una lunga durata di funzionamento (anche oltre i 10 anni o le 100.000 h); i costi di manutenzione risultano via via crescenti ma vanno a scomputo dei ricavi della vendita di energia elettrica; come detto infatti, detta produzione è considerata come fonte rinnovabile ed è spesso ceduta a tariffe incentivate.

Nella Figura 4.12 è rappresentato uno schema riassuntivo di un sistema di captazione, trasporto, trattamento e produzione di energia elettrica di biogas da una discarica.

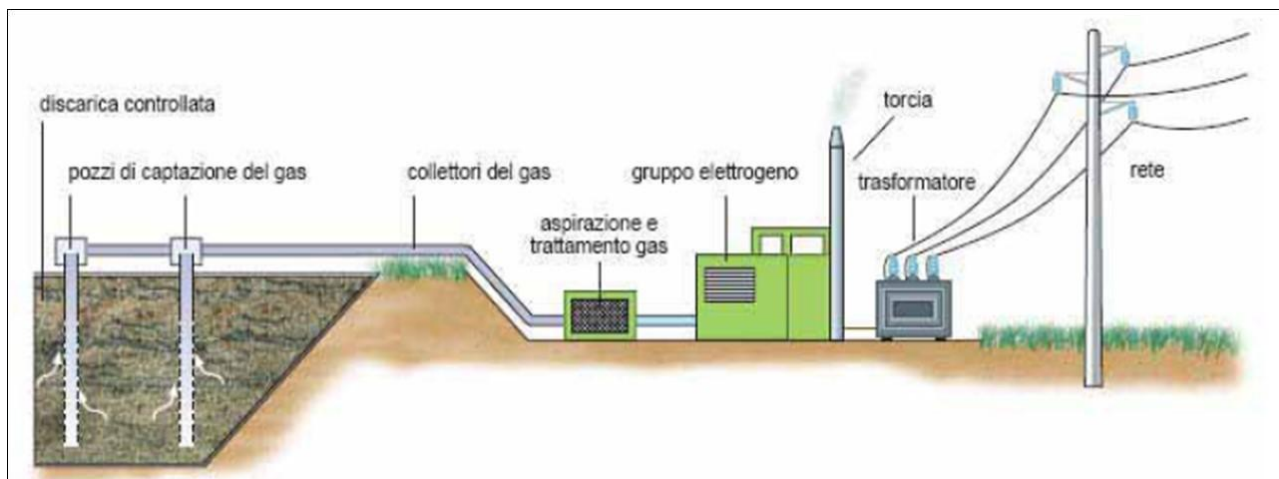


Figura 4.12. Schema riepilogativo di un sistema di captazione ed utilizzo energetico del biogas.

Fonte: adattato da Il Gestore Servizi Energetici (Gse) incontra la Regione Emilia-Romagna, regione.emilia-romagna.it, 2011.

4.3 La gestione del percolato

4.3.1 Caratteristiche quantitative e qualitative del percolato

Le caratteristiche qualitative e quantitative del percolato da Discarica dipendono da molteplici fattori, alcuni dei quali peraltro difficilmente controllabili (meteorologia, idrogeologia del sito, composizione, tipologia ed età del rifiuto, ecc.) il che comporta tutta una serie di criticità gestionali che hanno comportato diversi approcci sistemici non solo a livello europeo (tra diversi Stati) ma anche all'interno dello stesso territorio nazionale.

Dal punto di vista **quantitativo**, la produzione di percolato è attribuibile in larga parte ad apporti esterni (infiltrazione di acque meteoriche, superficiali e/o di falda) ed in frazione residuale ad apporti/consumi interni (umidità del rifiuto conferito e bilanci idrici connessi alle reazioni biochimiche nel corpo rifiuti). Sugli apporti esterni influiscono in particolare:

- Le caratteristiche metereologiche e idrogeologiche del sito, con particolare riferimento all'apporto di *acque da precipitazioni meteoriche, temperatura, grado di esposizione al sole e/o al vento, infiltrazioni da corpi idrici superficiali e/o acque sotterranee*.

- Il modello realizzativo e gestionale della Discarica: presenza di *drenaggi, sistemi di impermeabilizzazione di fondo e pareti, estensione e copertura giornaliera della cd. “cella di coltivazione”* (cioè l’area in cui avviene l’abbancamento giornaliero), eventuali ricircoli del percolato sul corpo rifiuti.
- Le caratteristiche del rifiuto: *merceologia del materiale conferito, grado di umidità, pretrattamenti subìti, pezzatura, grado di compattazione.*

Il raffronto tra dati di produzione del percolato di Discariche situate in diversi Paesi europei permette di evidenziare grande differenza tra i volumi in gioco, che possono variare anche di un ordine di grandezza (da poche decine e diverse centinaia di mm/anno).

E’ utile ricordare altresì che – anche in assenza di apporti esterni (es. sigillatura della Discarica) - l’attività di decomposizione anaerobica dei rifiuti e relativa produzione di percolato, continuano anche dopo l’interruzione dell’attività di smaltimento e dunque al gestore compete l’obbligo di mantenere in funzione il sistema di drenaggio e l’eventuale impianto di trattamento. La durata di tale periodo - stabilità ad oggi dalle varie normative nazionali con valori nell’ordine delle decine di anni – è spesso largamente sottodimensionata rispetto alle più recenti evidenze scientifiche e gestionali che indicano in alcune centinaia di anni il tempo in cui si può considerare esaurita l’attività di degradazione anaerobica e dunque la produzione di percolato.

Dal punto di vista **qualitativo** è difficile stabilire una “composizione-tipo” per il percolato da Discarica, essendo questa influenzata – come per l’aspetto quantitativo - da una molteplicità di fattori che influenzano specificatamente il processo di degradazione biologica del rifiuto e, di conseguenza, anche il passaggio degli inquinanti da questo al liquido lisciviante.

Sul processo di degradazione biologica influiscono:

- *l’umidità dei rifiuti,*
- *la quantità e natura della componente organica (specie se vengono smaltiti fanghi di depurazione, compost fuori specifica, ecc.)*
- *il contenuto di metalli e/o sostanza tossiche (direttamente in relazione con particolari componenti quali pile, farmaci, solventi, ecc. che possono finire in Discarica),*
- *il livello di Raccolta Differenziata nel comprensorio territoriale afferente all’impianto di smaltimento, che può far variare sensibilmente la merceologia del rifiuto abbancato, ecc.*

Anche i *pretrattamenti* e le *modalità di messa a dimora dei rifiuti*, variando la capacità di filtrazione e/o assorbimento di acqua da parte dell'ammasso, modificano in modo non sempre lineare la degradazione, dando origine a percolati più o meno concentrati in termini di inquinanti presenti in fase liquida.

Da studi ormai consolidati, si evince che il percolato risulta avere un carico inquinante più elevato nei primi anni di funzionamento della Discarica, che poi decresce progressivamente in quelli successivi: questo andamento è comune ai principali parametri organici (COD, BOD, TOC) e per i principali sali inorganici (metalli pesanti, solfati, ecc.). In particolare, i parametri organici sono:

- *BOD= domanda biochimica di ossigeno (biochemical oxygen demand)*
- *COD= domanda chimica di ossigeno (chemical oxygen demand)*
- *TOC= carbonio organico totale (total content of organically bound carbon)*

Generalmente, la rimozione di materiale organico basato sui parametri COD, BOD e ammoniaca presenti nel percolato è uno dei prerequisiti principali da rispettare (insieme ai parametri chimici) prima del rilascio nelle acque naturali.

Dal punto di vista microbiologico, la proliferazione di funghi e batteri appare infatti inibita dalle comuni condizioni ambientali (soprattutto in termini di temperatura e pH) che si instaurano all'interno della massa in degradazione.

Un'interessante prospettiva appare quella dell'applicazione di modelli matematici che, a partire dagli anni '70-80, si prefiggono - con diverso grado di complessità e relativa approssimazione - di prevedere la composizione quali-quantitativa del percolato in relazione al bilancio idrico della Discarica, intesa come “**bioreattore**” contenente un mezzo “insaturo” qual è l'ammasso dei rifiuti. Questi modelli – già positivamente verificati su impianti reali – possono essere molto utili sia in fase progettuale che gestionale, rilevando comunque l'importanza di adeguata disponibilità di dati di input locali e di un'accurata analisi di sensibilità dei risultati di output.

4.3.2 La raccolta del percolato in discarica

Come detto nell'introduzione, il controllo di perdite o diffusioni del percolato all'esterno dei siti specificatamente demandati all'abbancamento dei rifiuti è generalmente affidata a barriere impermeabili, associate ad un sistema di drenaggio e allontanamento del percolato stesso. Ovviamente, nel caso del risanamento delle discariche non controllate/ a cielo aperto, è necessario creare dei serbatoi di contenimento rifiuti nelle adiacenze della discarica prima di

utilizzare le barriere impermeabilizzanti. Tali barriere, posizionate sul fondo e pareti delle vasche di contenimento rifiuti, sono normalmente costituite da:

- terre argillose
- miscele sabbia-bentonite
- miscele sabbia-cemento
- membrane geosintetiche

Negli ultimi 20 anni circa, l'uso di componenti fabbricati con materiali polimerici sintetici, chiamati *geosintetici*, è diventato una pratica comune nell'ingegneria geotecnica. I materiali geosintetici più impiegati nei sistemi di contenimento ingegnerizzati includono le geomembrane, i geotessili, le georeti e i rivestimenti in argilla geosintetica.

Ad oggi, l'evoluzione tecnologica ha progressivamente spostato l'interesse dei progettisti di Discariche verso un massiccio utilizzo dei prodotti geosintetici (o geocompositi) – ormai disponibili in varie tipologie e con caratteristiche tali da poter assolvere a diverse funzioni contemporaneamente (impermeabilità, drenaggio, stabilità dei versanti, ecc.)

Queste membrane presentano indubbi vantaggi di economicità dei corrispondenti quantitativi di materiale argilloso necessari a raggiungere le medesime prestazioni tecniche, oltre a quello di non ridurre la capacità utile della vasca di abbancamento rifiuti. A questo aspetto, si aggiungono caratteristiche vantaggiose come:

- *flessibilità*
- *durabilità, diversamente dalle barriere realizzare con materiale naturale*
- *alta resistenza alla trazione e agli attacchi chimici e biologici*
- *economicità ,costano molto meno del loro corrispettivo in materiale naturale*

Sempre più frequente, dunque, risulta oggi l'impiego combinato delle diverse tipologie di prodotti (naturali e sintetici) tale da ottimizzare le peculiarità dei singoli materiali.

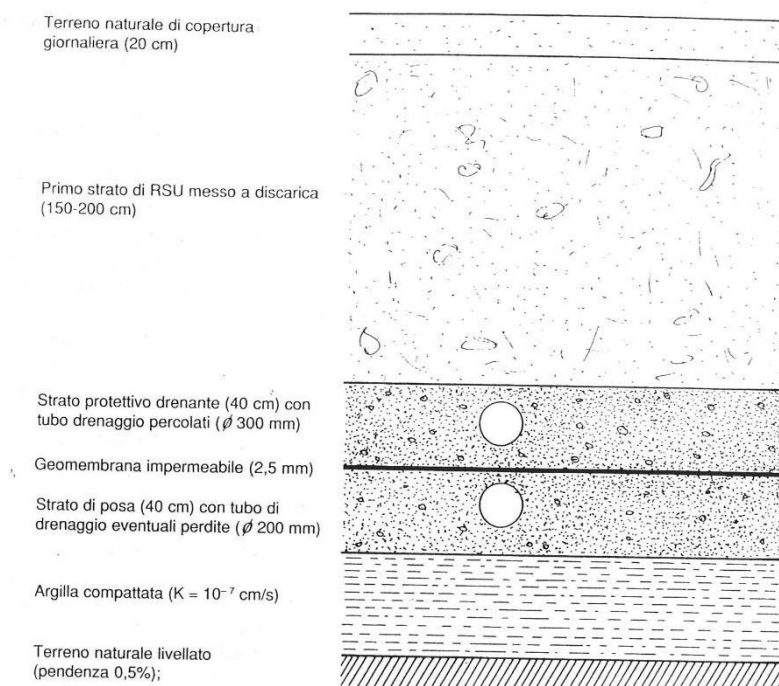


Figura 4.13. Schema tipo di barriera impermeabilizzante di fondo/sponda. Fonte: Gervasoni S., ed 2000, *Le discariche controllate*, HOEPLI

Nella Figura 4.13 mostra una classica sequenza di orizzonti impermeabili largamente proposta e adottata in passato nelle discariche di RSU come barriera di fondo/sponda per siti già caratterizzati dall'esistenza di substrato naturale impermeabile (argille più o meno compatte con $K \leq 10^{-7}$ cm/s) oppure terreno naturale generico semplicemente livellato prima della realizzazione della barriera minerale.

Nel tempo, si è progressivamente abbandonata la realizzazione degli orizzonti drenanti “spia” a causa della loro tendenza a saturarsi, creando un battente idraulico di percolato a diretto contatto con la barriera minerale, foriero di possibili dispersioni nel sottosuolo. Inoltre, il rilevamento di perdite dall'orizzonte “spia” sarebbe comunque un problema di difficile soluzione una volta che l'abbancamento di rifiuti trovasi in avanzato stato di realizzazione.

Ad oggi, tra le geomembrane, risulta pertanto sempre più diffuso l'utilizzo di particolari *geosintetici bentonitici* costituiti da uno strato di bentonite sodica racchiuso tra due geotessili mediante agugliatura meccanica: grazie alla sua particolare natura, la bentonite sodica è in grado di rigonfiare fino a decine di volte il proprio volume iniziale in caso di contatto con il percolato e

dunque procedere ad una “autoriparazione” della eventuale perdita (Fig. 4.14) del tutto compatibile con la sottostante barriera minerale.

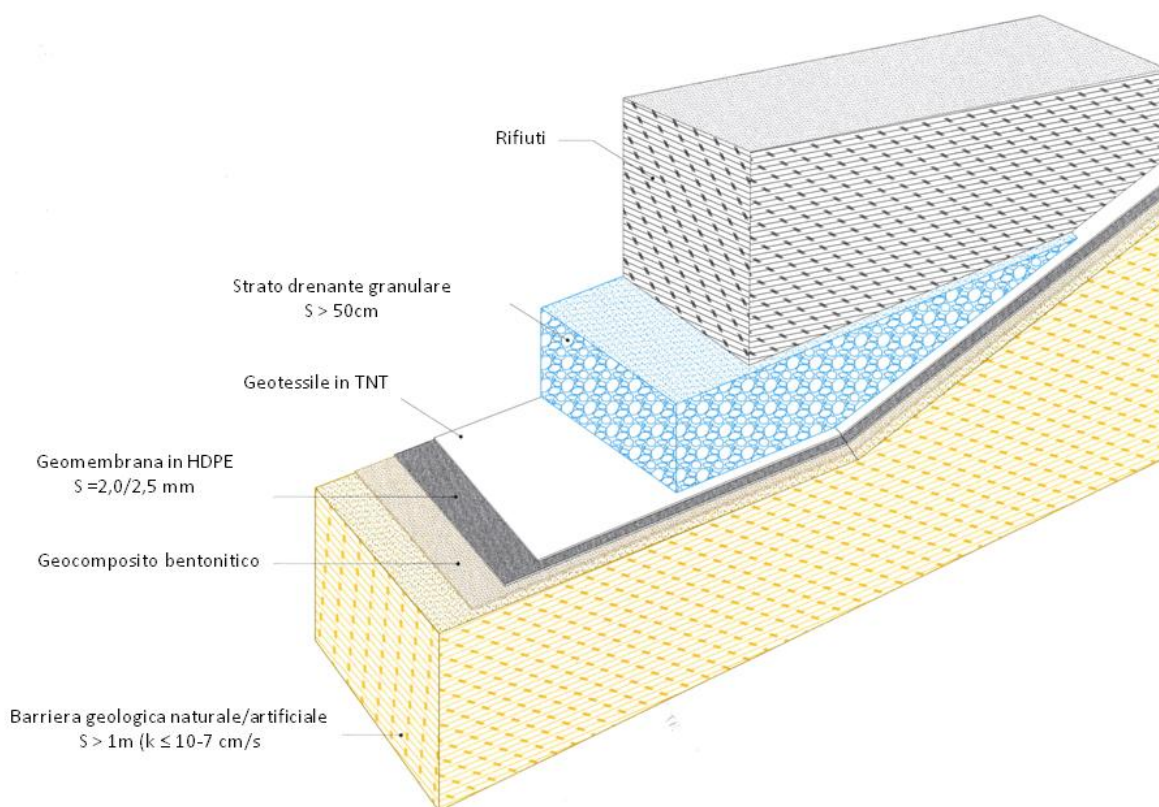


Figura 4.14. Esempio di barriera impermeabilizzante di fondo/sonda con utilizzo di geocomposito bentonitico. Fonte: ASET Spa, 2022.

Il materiale più utilizzato per la fabbricazione delle geomembrane è l’HDPE con uno spessore tra i 2.0 e i 2.5 mm. Queste geomembrane in HDPE sono disponibili in diverse spesso anche finiture superficiali per migliorarne le caratteristiche di aderenza e renderene più difficoltoso lo scivolamento in sponda.

La messa in opera dei teli in HDPE, generalmente fornite in rotoli di grandi dimensioni (anche 10x200 m) avviene mediante stesura, affiancamento con idonea sovrapposizione (minimo 200 mm) e saldatura termica dei bordi previa molatura/riscaldamento delle superfici da unire: ad oggi questa operazione – un tempo manuale – viene sempre più frequentemente realizzata mediante speciali saldatrici automatiche in grado di garantire l’uniformità del cordone di saldatura interposto sul giunto (Fig. 4.15).

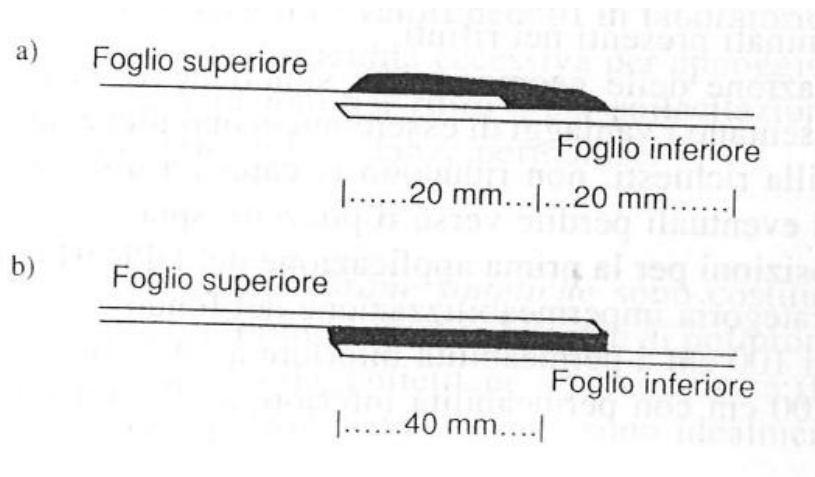


Figura 4.15. Tipologie di saldatura dei teli sintetici: a) a cordone sovrapposto (saldatura manuale); b) a cordone interposto (saldatura automatica), Fonte: *Le discariche controllate*, Gervasoni S., HOEPLI

Proprio le giunzioni in corrispondenza di bordi e spigoli risultano i punti più critici e soggetti a scollamento dei teli con conseguente discontinuità della barriera impermeabile. Ci sono due prove di integrità delle saldature: una in modalità distruttiva e l'altra non distruttiva. La prima viene eseguita direttamente sull'estrusione per tutta la lunghezza, l'altra a sfogliamento su campioni prelevati ad opportuno intervallo.

La raccolta del percolato è affidata alla rete di tubi microfessurati ubicata nello strato di drenaggio posto al di sopra della barriera impermeabile di fondo: tutta la rete di raccolta è caratterizzata da pendenze in grado di addurre il percolato ad un recapito posto a quota geodetica più bassa, in maniera che esso defluisca per gravità (Fig. 4.16). Di qui potrà poi essere sollevato tramite pompaggio verso bacini di raccolta/egualizzazione opportunamente impermeabilizzati per poi essere successivamente avviato a trattamento/smaltimento.

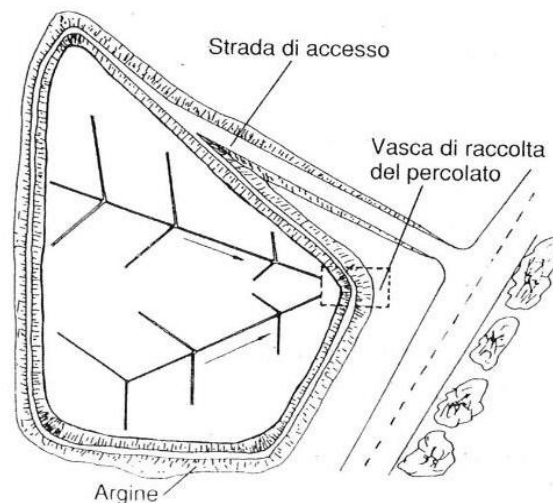


Figura 4.16. Schema tipo per il drenaggio del percolato in una discarica controllata
Fonte: *Le discariche controllate*, Gervasoni S., HOEPLI

Come già evidenziato, nel caso del risanamento delle discariche non controllate dove non si ha la possibilità di spostare i rifiuti all'interno di appositi bacini impermeabili, la raccolta del percolato può essere affidata a dei pozzi perforati direttamente sul corpo rifiuti già coperto.

A tal fine, è possibile utilizzare i pozzi verticali per la captazione del biogas illustrati nella prima parte di questo capitolo (Fig. 4.3). La colonna di ghiaia permette il drenaggio del percolato che - raccolto dalla sonda fessurata e discendente per gravità sul fondo del pozzo- può essere aspirato da apposite pompe assiali idonee all'installazione all'interno della tubazione.

4.3.3 Minimizzare la produzione del percolato di discarica

Come già detto, la produzione di percolato è attribuibile in larga parte ad *apporti esterni* (infiltrazione di acque meteoriche, superficiali e/o di falda) ed in frazione residuale ad *apporti/consumi interni* (umidità del rifiuto conferito e bilanci idrici connessi alle reazioni biochimiche nel corpo rifiuti). Nel caso del risanamento delle discariche non controllate/ a cielo aperto, è estremamente importante pianificare tutte le attività che mirano alla minimizzazione della produzione del percolato nel tempo. Di conseguenza, l'implementazione di processi di estrazione, trattamento e ricircolo del percolato forniscono un contributo sostanziale allo smaltimento sostenibile dei rifiuti perchè permettono di controllare i processi di biodegradazione e rimuovere i contaminanti solubili per ottenere, in un'unica generazione di tempo, uno stato di stoccaggio geologico delle sostanze inorganiche e dei rifiuti organici non degradabili per la discarica.

I modelli predittivi per la generazione del percolato sono necessari per definire, progettare e dimensionare le opere, che sono collegati a tutti gli aspetti sopra menzionati.

Considerando la discarica alla stregua di un bacino idrico chiuso e planimetricamente definito, la quantità di percolato che si forma è legata al bilancio di massa relativo ai flussi in ingresso e uscita dal contorno, nonché agli accumuli e produzioni/consumi interni. Il seguente schema (Fig 4.17) riassume le componenti del bilancio idrico all'interno della discarica.

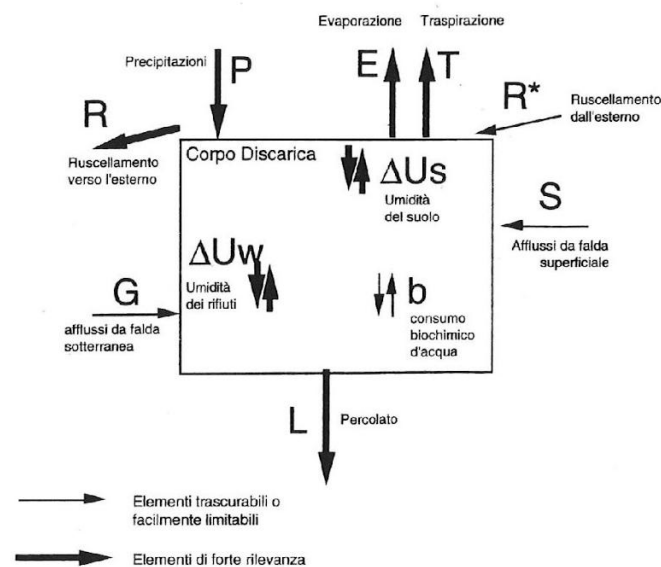


Figura 4.17. Schema del bilancio idrico all'interno di una discarica. Fonte: Collivignarelli C., ed.1996, *Il trattamento del percolato da discarica RSU*, C.I.P.A

Risulta:

$$L_r = L - L_i$$

dove L_r è la *quantità di percolato raccolta* ed è pari a quella complessivamente prodotta (L) detratta la porzione potenzialmente persa per infiltrazione (L_i) al contorno (auspicabilmente pari a 0).

Dalla figura si evince che non tutti gli apporti hanno la stessa rilevanza, stante che alcuni sono decisamente predominanti (P) mentre altri, come il consumo biochimico d'acqua BOD (b), sono trascurabili. Di conseguenza e, in particolare nel caso delle discariche non controllate/ a cielo

aperto, ai fini della minimizzazione della produzione di percolato occorrerà intervenire sui fattori che contribuiscono positivamente a tale processo.

Gli elementi eliminabili attraverso interventi di intercettazione e/o impermeabilizzazione, drenaggio e allontanamento dal corpo rifiuti sono:

- *il ruscellamento superficiale da superfici circostanti*
- *le infiltrazioni da corpi idrici superficiali*
- *le infiltrazioni da falde sotterranee*

Gli elementi controllabili con opportune scelte tecniche e gestionali sono:

- *il materiale di copertura*
- *la pendenza della superficie di ricoprimento*
- *il grado di compattazione*
- *modalità di gestione/ regimazione delle acque*
- *eventuale ricircolo del percolato, ecc.*

Tra gli elementi controllabili mirati alla minimizzazione della produzione del percolato, va sottolineato il ruolo del pacchetto di copertura finale. Il sistema di *capping* è la sequenza di strati a diversa funzione che viene realizzato sopra l'ammasso di rifiuti abbancato al termine del periodo di conferimento utile e che protegge l'uomo e l'ambiente circostante dagli effetti negativi e dannosi delle sostanze inquinanti presenti nei rifiuti. La copertura deve limitare l'infiltrazione d'acqua meteorica all'interno del corpo rifiuti e ridurre la produzione di percolato. Questo intervento ha valenza non solo ambientale ma soprattutto economica, dati gli elevati costi di trattamento e smaltimento del percolato.

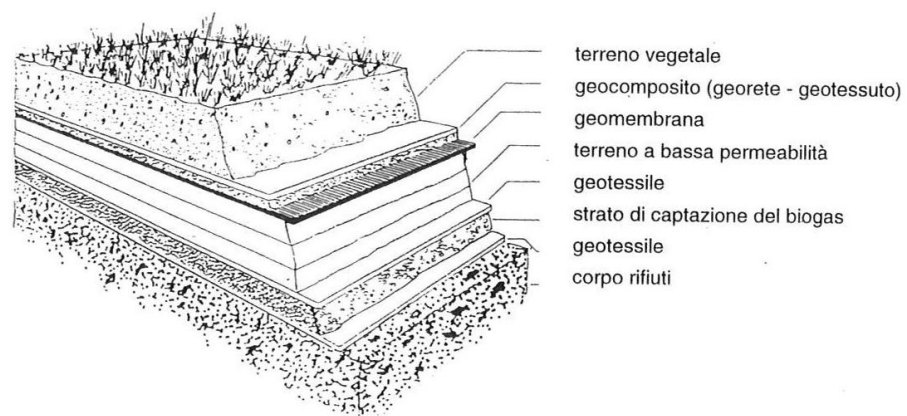


Figura 4.18. Esempio di pacchetto di copertura. Fonte: *Il trattamento del percolato da discarica RSU*, Collivignarelli C., C.I.P.A.

Oltre a minimizzare la produzione del percolato, il pacchetto di copertura finale isola e previene la propagazione di agenti inquinanti in diversi modi:

- *proteggendo il corpo rifiuti dalle folate di vento*
- *intercettando e controllando il biogas e le sue componenti chimiche volatili*
- *impedire ad animali e persone di venire a diretto contatto con materiali pericolosi*
- *servire come strato vegetativo*

In questo senso, le barriere a bassa permeabilità (*Low Permeability Barriers* o LPB) cioè lo strato cui è demandato l'onere di limitare l'infiltrazione d'acqua meteorica all'interno del corpo rifiuti assume una particolare importanza e merita specifiche attenzioni progettuali, al pari delle barriere di fondo e sponda.

Ad oggi, la soluzione più utilizzata per la barriera a bassa permeabilità è l'accoppiamento tra barriere sintetiche in HDPE e strati di terreno argilloso adeguatamente compattato. In particolare, le barriere capillari sono un modo efficace per coprire le discariche, anche quelle da risanare. Queste barriere sono formate da due diversi spessori di materiale granulare (sabbia + ghiaia) in grado di evacuare l'acqua di infiltrazione superiore sfruttando il principio fisico della tensione superficiale all'interfaccia tra i due strati. L'approccio ingegneristico deve caratterizzare anche questa fase di chiusura della Discarica, che rappresenta il termine della sua vita utile, al fine di garantire la massimizzazione dell'efficienza del pacchetto di copertura in termini di minimizzazione delle infiltrazioni, da mantenere nel tempo.

Ulteriori fattori controllabili di minimizzazione della produzione di percolato afferiscono più specificatamente alla gestione ordinaria e sono:

- *limitare al minimo l'estensione della cella di coltivazione cioè l'area in cui avviene l'abbancamento giornaliero; questo intervento può ridurre l'infiltrazione meteorica*
- *l'impiego di materiali con una certa capacità di assorbimento per la copertura giornaliera del rifiuto abbancato, piuttosto che completamente impermeabili; se da una parte consente il rilascio differito nel tempo dell'acqua assorbita, dall'altra consente di evitare l'inibizione delle reazioni di biodegradazione per eccessiva "secchezza" del rifiuto. In tal senso, risultano sempre più comuni le esperienze di utilizzo di "compost fuori specifica" (ovvero prodotti della digestione aerobica del rifiuto organico che non*

assolvono ai limiti imposti per la commercializzazione e dunque tornano in Discarica come rifiuti) o particolari teli semipermeabili efficaci anche nel controllo delle emissioni odorigene.

- *il ricircolo di percolato* mediante idonei sistemi di diffusione - all'interno del corpo rifiuti- ha dimostrato essere in grado di ridurre notevolmente i volumi di percolato da trattare, specie laddove le condizioni meteorologiche del sito, uniti ad un sufficiente sviluppo della copertura vegetale, sono tali da massimizzare l'evapotraspirazione.

4.3.4 Trattamento e smaltimento del percolato di discarica

A causa della estrema variabilità quali-quantitativa del percolato anche all'interno dello stesso impianto – non è realistico pensare ad un unico schema di trattamento diffusamente valido, sono diversi gli approcci finora sperimentati in questo settore, spaziando dai trattamenti chimico-fisici a quelli biologici, sia aerobici che anaerobici. Il loro impiego, singolo o combinato, va valutato in funzione sia delle disposizioni normative vigenti in loco, sia del sistema di smaltimento finale scelto, anche in base alle opportunità disponibili in sito:

- Smaltimento in corpo idrico superficiale
- Conferimento ad impianto di depurazione civile

Resta sempre percorribile la soluzione della raccolta, accumulo e successivo avvio a smaltimento -mediante autobotti - come “rifiuto liquido” in impianti idonei: ad oggi questa soluzione è ampiamente utilizzata, nonostante i costi non certo irrilevanti, soprattutto a causa di diverse interpretazioni giuridiche delle Autorità competenti anche all'interno dello stesso territorio nazionale.

Al riguardo, la stessa pratica del ricircolo del percolato sul corpo rifiuti è addirittura vietata in alcuni contesti, precisamente laddove prevale la connotazione di “rifiuto speciale” per il percolato e dunque di natura diversa dal rifiuto che lo ha generato, cosa che ne impedisce appunto il ricollocamento in Discarica.

Bibliografia

Arecco F., ed. 2012, *Energia da biogas*, Edizioni Ambiente

ASWM Srl, <http://www.aswmsrl.com/>

Collivignarelli C., ed.1996, *Il trattamento del percolato da discarica RSU*, ed. C.I.P.A.

CONVECO Srl, <https://www.conveco.com/en/home.html>

Cossu, R., Grossule, V., Lavagnolo, M.C., 2020, *La Discarica Sostenibile*, ed. CISA

Damiani L., Gandolla M., 1992, *Gestione del biogas da discariche controllate*, ed. Istituto per l'Ambiente

Gervasoni S., ed 2000, *Le discariche controllate*, HOEPLI

Il Gestore Servizi Energetici (Gse) incontra la Regione Emilia-Romagna (2011,Novembre,8th), [regione.emilia-romagna.it](https://energia.regione.emilia-romagna.it/leggi-atti-bandi-1/documenti-e-pubblicazioni/eventi/2010/il-gestore-servizi-energetici-gse-incontra-la-regione-emilia-romagna/CREMONA_GSE.pdf). Retrieved 11:57, March 28th,2022 from https://energia.regione.emilia-romagna.it/leggi-atti-bandi-1/documenti-e-pubblicazioni/eventi/2010/il-gestore-servizi-energetici-gse-incontra-la-regione-emilia-romagna/CREMONA_GSE.pdf.

Magnano E., ed. 2010, *Biogas da Discarica*,ed. EPC

Vismara R., Malpei F., Centemero M., ed. 2008, *Biogas da rifiuti solidi urbani*, ed. Dario Flaccovio