



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

**FACOLTÀ DI INGEGNERIA**

**DIPARTIMENTO DI PRINCIPI E IMPIANTI DI INGEGNERIA  
CHIMICA**

**TESI DI LAUREA IN**

**INGEGNERIA DEI PROCESSI INDUSTRIALI**

**(Laurea triennale DM 270/04 – indirizzo Processi Industriali)**

**CAPTAZIONE DI BIOGAS DA  
DISCARICA:**

**ANALISI DEL BIOGAS E SCELTA  
IMPIANTISTICA OTTIMALE**

*Relatore: Prof. Paolo Canu*

*Laureando: FILIPPO DAL PASTRO*

**ANNO ACCADEMICO 2010-2011**

# Introduzione

Nella mia attività di tirocinio mi è stato proposto lo studio della struttura e della costruzione di una discarica, con particolare attenzione alla problematica del biogas.

Dopo aver esaminato le caratteristiche e la composizione del biogas ho analizzato le diverse scelte impiantistiche possibili e i diversi criteri di scelta che portano a preferire una tipologia rispetto le altre.

Il mio studio poi si è concentrato sulla discarica di Grumolo delle Abbadesse(VI) e sull'impianto ad essa correlato: ho descritto l'impianto e come conclusione ho calcolato il volume di torcia ideale.

# Indice

<i>Capitolo 1</i> .....	4
<i>STRUTTURA DELLA DISCARICA</i> .....	4
1.1 SCELTA DEL SITO .....	5
1.2 IMPERMEABILIZZAZIONE E STRATI DRENANTI .....	5
1.3 DRENAGGIO DEL PERCOLATO .....	6
1.4 CAPTAZIONE DEL BIOGAS .....	9
1.5 COPERTURA FINALE .....	11
<i>Capitolo 2</i> .....	12
<i>IL BIOGAS</i> .....	12
2.1 IL FENOMENO PRODUTTIVO DEL BIOGAS .....	12
2.1.1 FASE AEROBICA .....	12
2.1.2 FASE FACOLTATIVA ANAEROBICA .....	13
2.1.3 FASE METANIGENA ANAEROBICA .....	13
2.2 FATTORI CHE INFLUENZANO LA PRODUZIONE DI BIOGAS .....	14
2.3 CARATTERISTICHE DEL BIOGAS .....	15
2.4 ANALISI DEL BIOGAS .....	16
<i>Capitolo 3</i> .....	19
<i>SCELTE IMPIANTISTICHE POSSIBILI: DESCRIZIONE E CRITERI DI SCELTA</i> ....	19
3.1 BIOFILTRAZIONE .....	19
3.2 COMBUSTIONE IN TORCIA .....	21
3.3 RECUPERO ENERGETICO .....	25
3.4 PRE-TRATTAMENTI DEL BIOGAS .....	26
<i>Capitolo 4</i> .....	29
<i>DISCARICA DI GRUMOLO DELLE ABBADESSE (VI)</i> .....	29
4.1 DESCRIZIONE DELLA DISCARICA .....	29
4.2 DESCRIZIONE DELL'IMPIANTO .....	33
4.3 CALCOLO DEL VOLUME DI TORCIA .....	39
Conclusioni .....	43
Riferimenti bibliografici .....	45

# Capitolo 1

## STRUTTURA DELLA DISCARICA

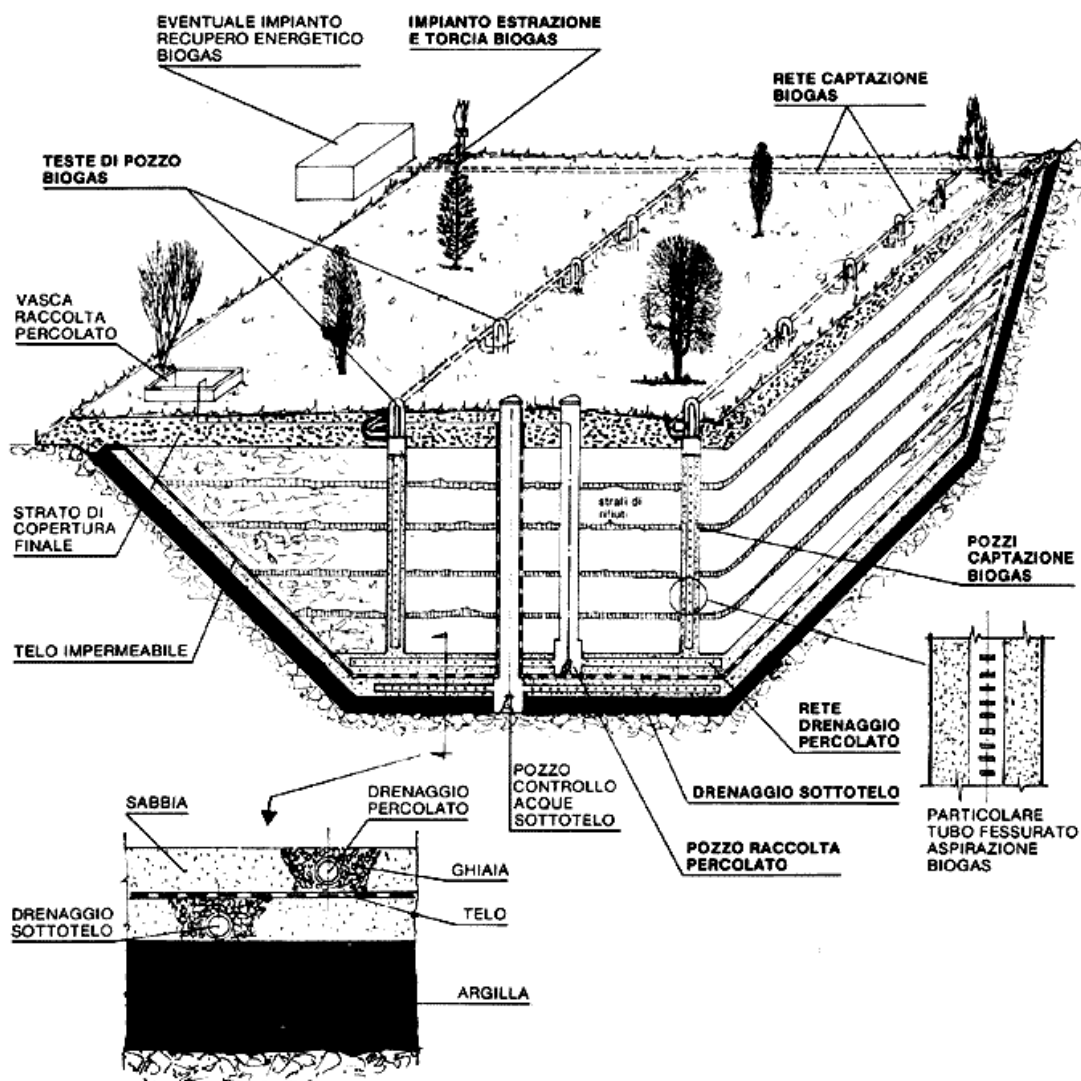


FIG. 1.1 Spaccato tipico di una discarica

All'interno di una qualsiasi discarica è possibile individuare i seguenti elementi costruttivi:

- Terreno di fondazione e sottofondo della discarica
- Barriera di impermeabilizzazione sul fondo e sui fianchi
- Sistema di drenaggio del percolato
- Ammasso dei rifiuti compattati in strati
- Coperture di interstrato

f) Sistema di captazione del biogas

g) Copertura finale

Analizzerò in seguito i principali fattori che concorrono alla costruzione di una discarica.

## **1.1 SCELTA DEL SITO**

La scelta del sito per l'ubicazione di una discarica costituisce una delle fasi più delicate, che richiede un'attenta analisi e la valutazione di aspetti tecnici (di carattere idrologico, geologico, geotecnico e climatico), di aspetti logistici (legati alla vicinanza delle sorgenti di rifiuto, alla rete di trasporti) e infine di aspetti sociali (legati all'impatto ambientale).

In linea puramente teorica comunque un sito si considera ideale per l'ubicazione di una discarica quando soddisfa le seguenti caratteristiche:

- è situato vicino alle sorgenti dei rifiuti che dovrà ospitare;
- è collegato da un'efficiente rete di trasporti;
- non si trova in un'area morfologicamente depressa o in una piana alluvionale;
- è caratterizzato da terreni di fondazione resistenti e impermeabili;
- presenta una situazione idrogeologica e climatica favorevole.

## **1.2 IMPERMEABILIZZAZIONE E STRATI DRENANTI**

Obiettivo principale dell'impermeabilizzazione è l'isolamento della discarica stessa al fine di evitare la contaminazione dell'ambiente circostante e diminuire la produzione di percolato.

I suoli argillosi sono i materiali impermeabilizzanti naturali più comuni, a cui spesso vengono aggiunti additivi come la bentonite (minerale argilloso che si espande se messo in contatto con l'acqua assorbendola nella propria matrice minerale) e altri materiali argillosi.

Durante gli ultimi anni l'utilizzo di materiali sintetici per migliorare le caratteristiche dei suoli è molto aumentata: i principali vantaggi che offrono rispetto ai materiali naturali sono la pronta disponibilità e la bassa occupazione volumetrica (che rende disponibile un maggiore volume per il deposito dei rifiuti). Vengono utilizzate geomembrane realizzate soprattutto in HDPE (HIGH DENSITY POLYETHYLENE).

Principale caratteristica delle geomembrane è la bassissima permeabilità.

Geomembrana	Spessore[mm]	Velocità di trasmissione del vapor d'acqua attraverso la geomembrana [g/m <sup>2</sup> /giorno]
HDPE	0.75	0.02
HDPE	2.45	0.006

Il polietilene ad alta densità offre grande resistenza agli attacchi chimici, biologici e facilità di saldatura; i maggiori problemi sono connessi con i rischi di rottura che si hanno con la trazione e con l'invecchiamento del materiale.

Nella costruzione di una discarica si utilizzano svariati materiali, che svolgono diverse funzioni: filtraggio (ghiaia, geotessili, geocompositi), drenaggio (ghiaia, georeti, geocompositi), separazione (geotessili, geocompositi), protezione (geotessili non tessuti, georeti, geocompositi).

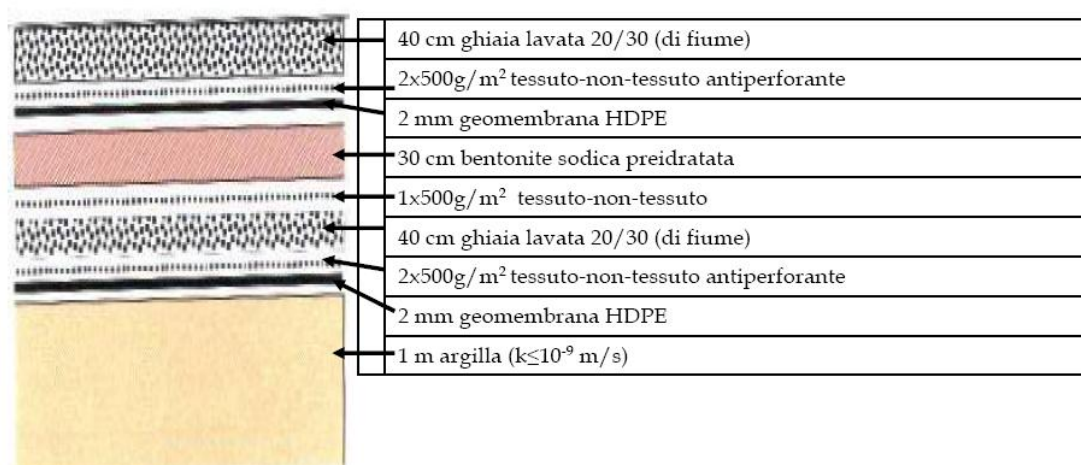


FIG. 1.2 Esempio di impermeabilizzazione tipica fondo/pareti

### 1.3 DRENAGGIO DEL PERCOLATO

L'acqua proveniente da precipitazioni e dall'umidità del rifiuto, una volta raggiunta la saturazione dei rifiuti e che non viene eliminata dall'evapotraspirazione o dal ruscellamento superficiale, inizia a produrre percolato che deve essere smaltito.

I sistemi di raccolta del percolato sono generalmente costituiti dai seguenti elementi:

- **Strato drenante disposto sul fondo della discarica:** ha la funzione di captare e convogliare il percolato nei collettori; nella pratica più comune viene utilizzata ghiaia oppure in alternativa al materiale naturale, lo strato drenante può essere

realizzato per mezzo di georeti. Questo strato si trova al di sopra dello strato impermeabilizzante, di solito una geomembrana, con l'interposizione di uno strato di separazione in geotessile, che ha lo scopo di proteggere la geomembrana dalle azioni di taglio e deformazione della ghiaia stessa.

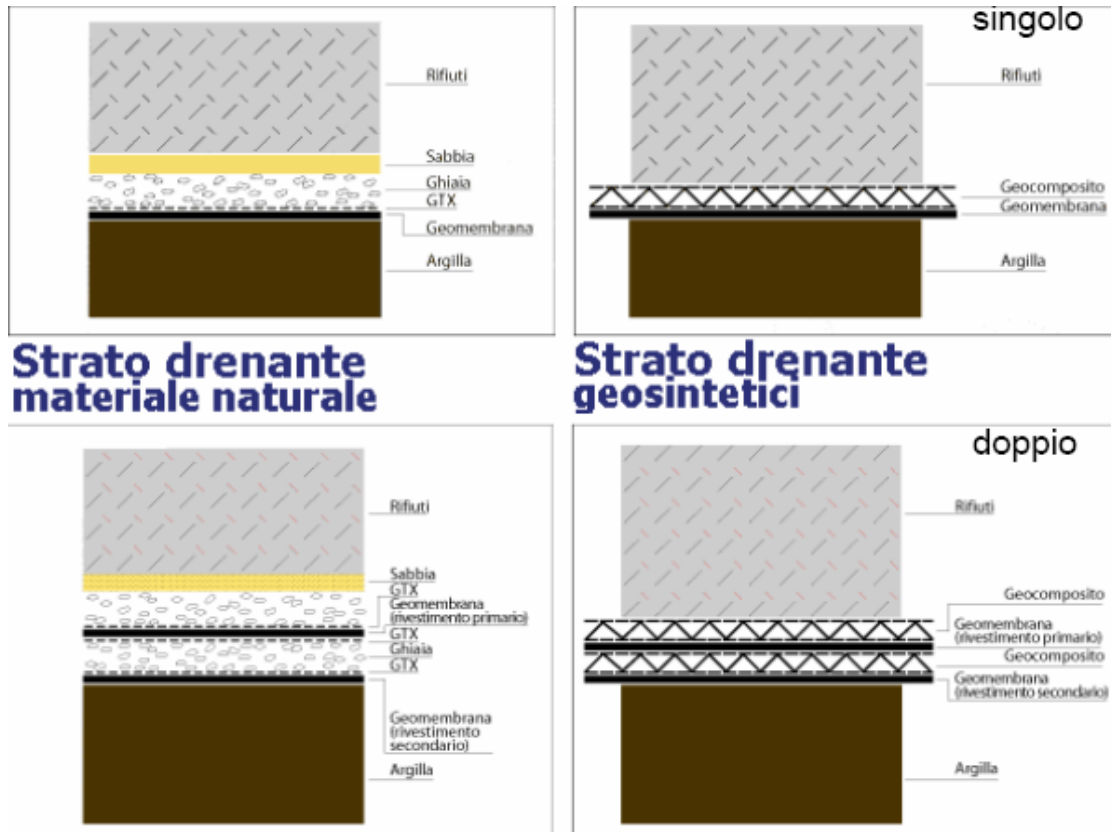


FIG 1.4 Esempi di strati drenanti

- **Rete di tubazioni:** alloggiata all'interno dello strato drenante, permette di raccogliere e allontanare rapidamente il percolato fuori della discarica. I tubi sono tubazioni fessurate in HDPE.
- **Sistema di drenaggi verticali:** si sviluppano per l'intera altezza del deposito e hanno la funzione di costituire delle vie preferenziali per il movimento del percolato dagli strati di rifiuti sovrastanti verso il fondo della discarica. Il sistema di drenaggio viene completato da pozzi verticali costituiti da un rivestimento laterale e riempiti di ghiaia nella quale viene inserito un tubo in polietilene rigido fessurato, allo scopo di captare contemporaneamente anche il biogas.

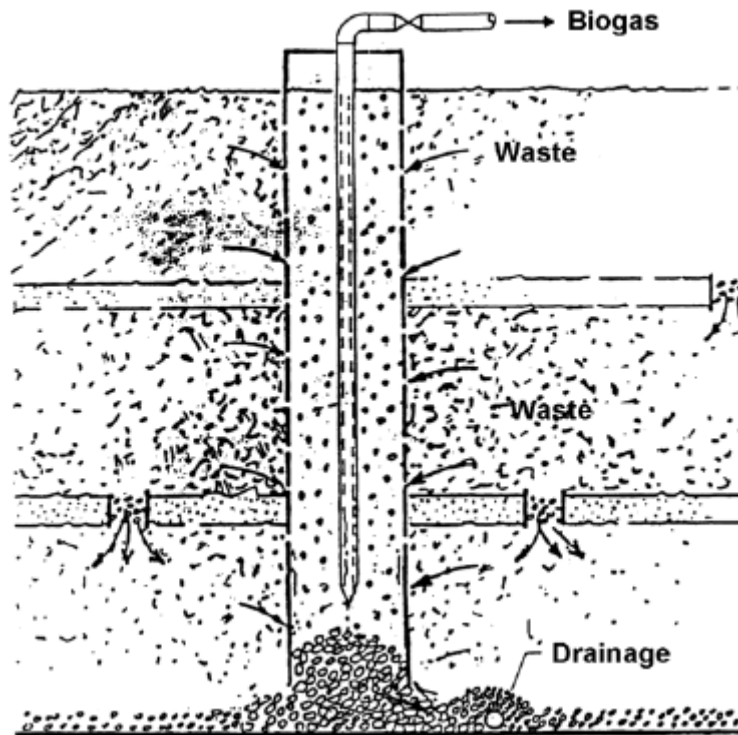


FIG. 1.5 Pozzo di drenaggio verticale con annesso sistema di captazione biogas

- **Pozzetti di raccolta finale:** il percolato in arrivo dagli strati di drenaggio viene recapitato in appositi pozzetti di raccolta, da cui viene allontanato per gravità o pompaggio.

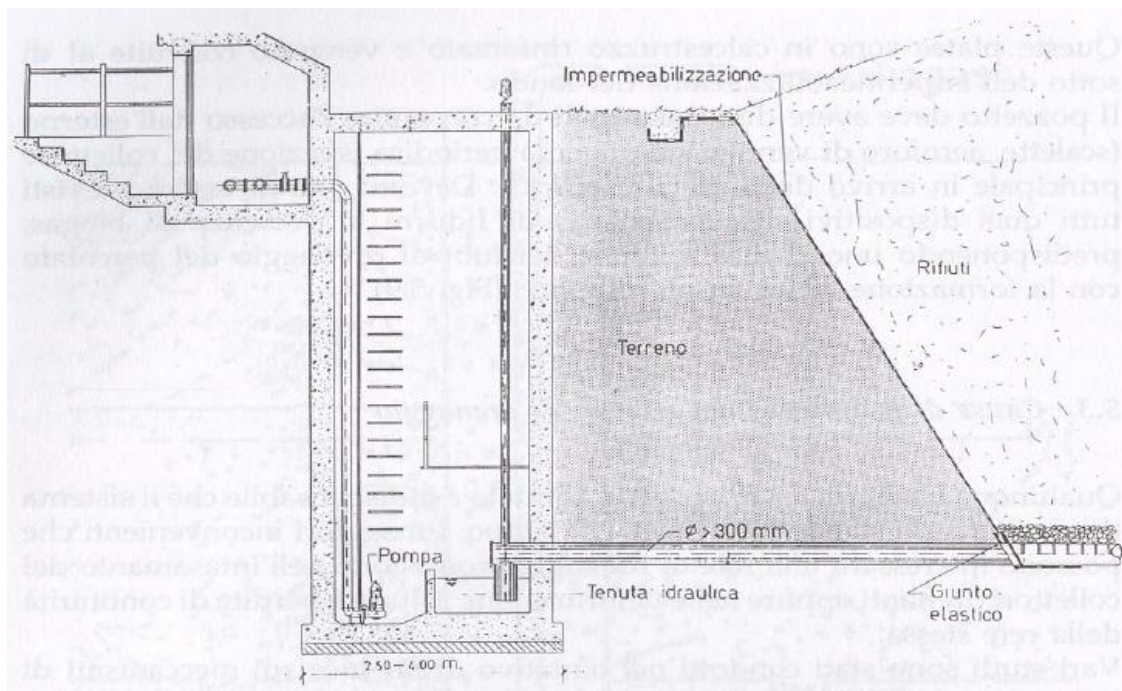


FIG. 1.6 Pozzetto di raccolta finale del percolato



## **1.4 CAPTAZIONE DEL BIOGAS**

Una moderna discarica non può più prescindere dalle problematiche legate alla captazione e gestione del biogas.

Gli obiettivi del sistema di captazione, trattamento e utilizzo del biogas sono:

- garantire la sicurezza all'interno della discarica e nelle aree limitrofe
- minimizzare le emissioni, eventualmente nocive, che possono esercitare un forte impatto sulla popolazione e sull'ambiente
- consentire il recupero di una fonte di energia rinnovabile.

Una corretta gestione del biogas deve innanzitutto garantire le condizioni di sicurezza in discarica, mediante il controllo dell'infiammabilità della miscela costituente il biogas e la prevenzione di meccanismi di migrazione e di accumulo del biogas.

Un sistema completo di captazione, trattamento e utilizzo comprende i seguenti elementi:

- **Sistema di captazione:** può essere posizionato nel corpo della discarica durante la fase operativa o al momento della chiusura.
- **Rete di captazione:** va dimensionata in base alla produzione specifica di biogas e al volume di influenza dei manufatti di captazione. Naturalmente i pozzi di captazione vanno disposti in maniera tale da coprire tutto il volume della discarica (solitamente si assume che i pozzi verticali abbiano raggio di influenza pari a 30m, mentre quelli orizzontali 10m).

I *pozzi di captazione verticale* costituiscono la tipologia più diffusa per motivi legati alla praticità, al rendimento e a fattori economici. Nella maggior parte dei casi i pozzi vengono trivellati a secco dopo la chiusura della discarica, con diametri variabili (in genere da un minimo di 0,3 m fino ad un massimo di 1 m). Il riempimento del pozzo viene effettuato con ghiaia, mentre il tratto terminale superiore viene sigillato con materiale impermeabilizzante (argilla e bentonite). All'interno del pozzo viene collocato il tubo di captazione fessurato; è importante tenere conto della necessità di inserire eiettori per l'estrazione del percolato, con relative conseguenze sul diametro minimo del pozzo. La testa di pozzo deve essere ispezionabile e dotata di un sistema per l'intercettazione del gas in condizioni di emergenza.

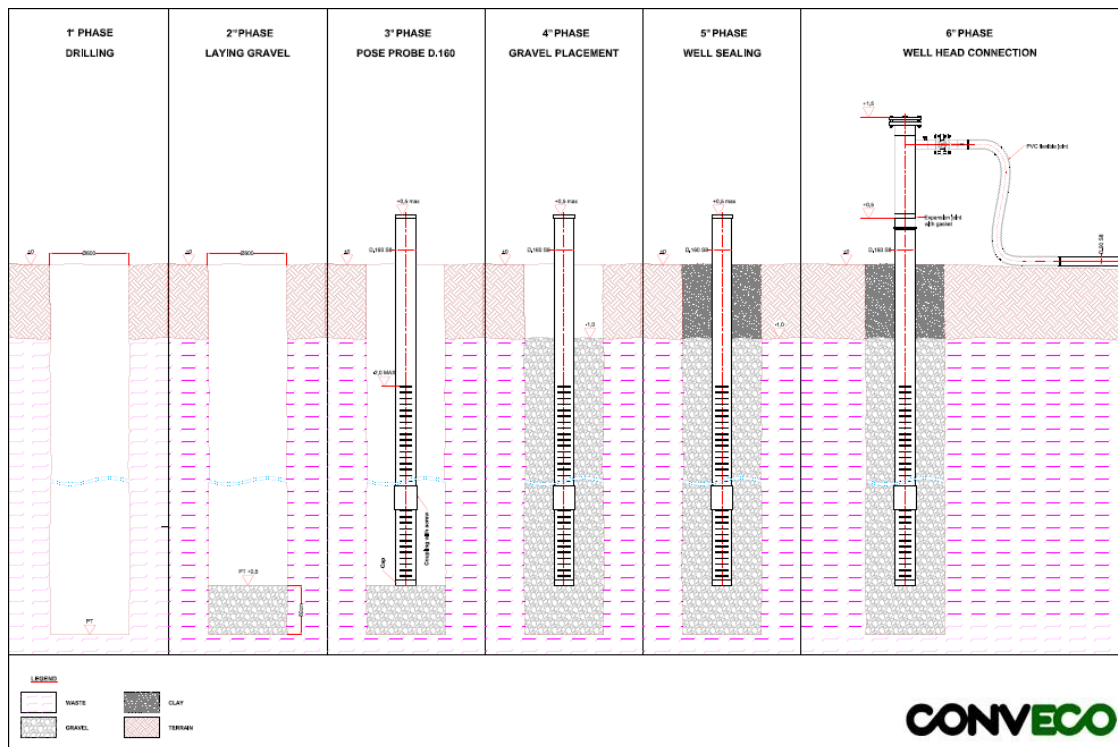
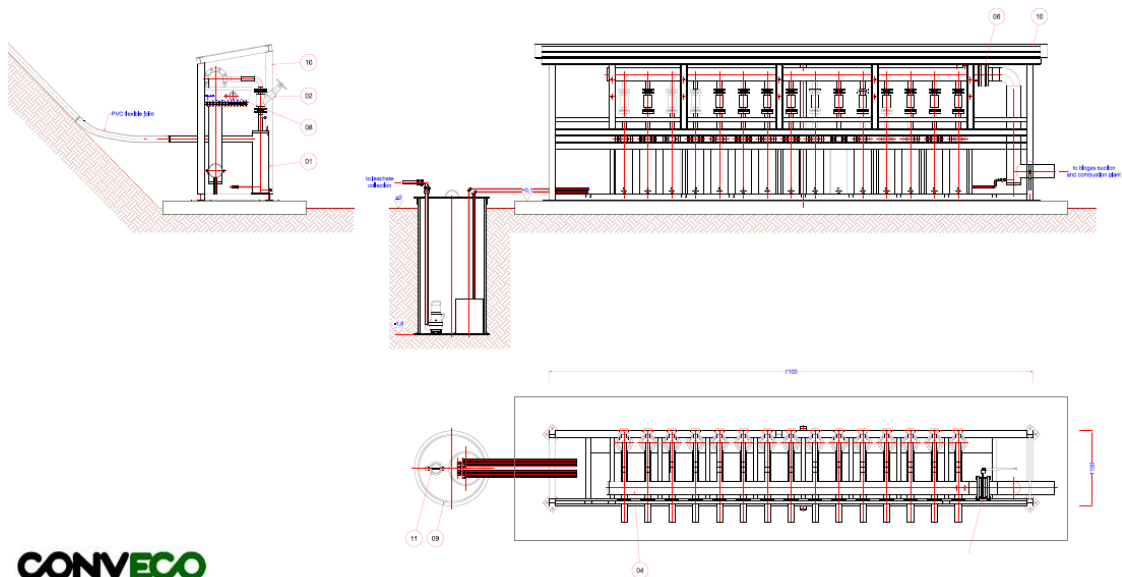


FIG. 1.7 Fasi di trivellazione per un pozzo di captazione

I *sistemi di captazione orizzontali* non costituiscono ostacolo per le operazioni di smaltimento quotidiano dei rifiuti e sono pertanto idonei ad una captazione del biogas effettuata sin dalle prime fasi di vita di una discarica.

Per contro i sistemi orizzontali risentono maggiormente dei fenomeni di assestamento che possono provocare rotture o blocchi della rete di captazione e presentano un'efficienza di captazione minore.

- **Rete di trasporto:** è costituita dai manufatti e dalle tubazioni che collegano i punti di captazione della discarica alla centralina di aspirazione. La configurazione della rete dipende dalle caratteristiche del sito, dalle scelte progettuali e da fattori economici. I criteri progettuali della rete di trasporto possono essere così sintetizzati: in presenza di un impianto di recupero energetico è necessario prevedere due sottoreti di trasporto, una per il biogas di caratteristiche adeguate per la combustione ed un'altra per quello di cattiva qualità; per minimizzare gli effetti degli assestamenti è necessario minimizzare gli attraversamenti della discarica e sistemare la maggior parte della rete sul terreno circostante; devono essere previsti opportuni separatori della condensa formatasi nelle condutture. Sono inoltre previste opportune *sottostazioni* con la funzione di raccogliere il biogas proveniente dalle teste di pozzo e convogliarlo in un'unica linea alla centrale di aspirazione.



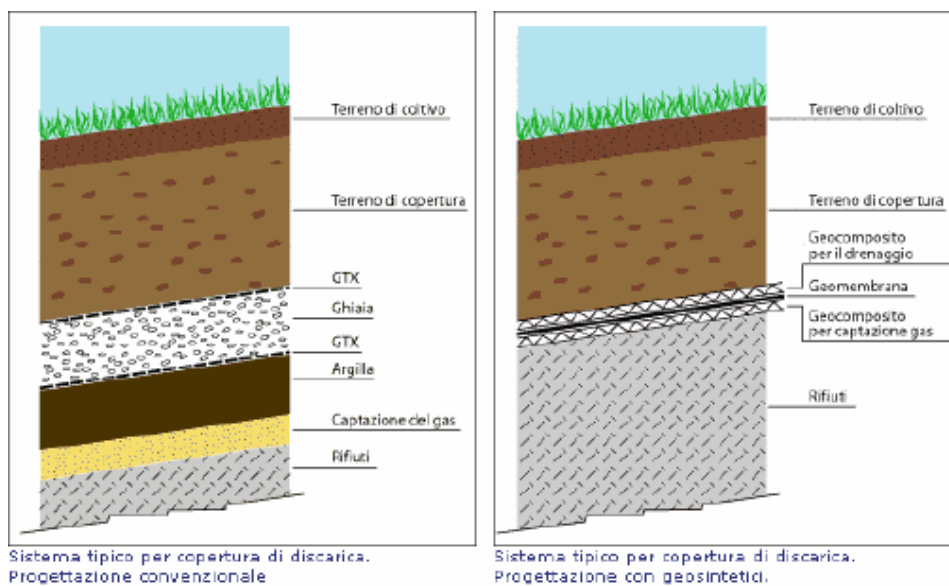
**CONVECO**

**FIG 1.8** Spaccato di una sottostazione

## **1.5 COPERTURA FINALE**

La copertura superficiale finale della discarica deve rispondere ai seguenti criteri:

- isolamento dei rifiuti dall'ambiente esterno;
- minimizzazione delle infiltrazioni d'acqua;
- riduzione al minimo della necessità di manutenzione;
- minimizzazione dei fenomeni di erosione;
- resistenza agli assestamenti ed a fenomeni di subsidenza localizzata.



**FIG. 1.9** Esempi tipici di copertura di discarica

# **Capitolo 2**

## **IL BIOGAS**

### **2.1 IL FENOMENO PRODUTTIVO DEL BIOGAS**

La decomposizione dei rifiuti solidi in uno scarico controllato assume spesso aspetti vari e complessi: principalmente processi fisici, chimici e biologici, che agiscono simultaneamente alla degradazione della componente organica dei rifiuti stessi.

Per degradazione fisica s'intende la trasformazione delle componenti del rifiuto che comporta il mutamento delle caratteristiche fisiche del rifiuto stesso, fra cui la riduzione del volume. Fra i fenomeni fisici si possono inoltre ricordare la precipitazione di sostanze, nonché i fenomeni di assorbimento e di rilascio di sostanze.

Per degradazione chimica s'intende il complesso delle reazioni che avvengono tra le diverse sostanze componenti il rifiuto; ha riflessi anche nella qualità dei percolati, con variazione della solubilità, del potenziale redox e del pH.

Il principale meccanismo di decomposizione dei rifiuti in discarica è però la degradazione biologica, cioè la trasformazione della materia per opera di microrganismi, quali i batteri. La degradazione biologica si svolge in varie fasi, le principali delle quali risultano:

- la fase aerobica
- la fase facoltativa anaerobica
- la fase metanigena anaerobica.

#### **2.1.1 FASE AEROBICA**

La degradazione aerobica avviene subito dopo il deposito dei rifiuti nello scarico controllato a seguito dell'impiego, da parte dei microrganismi, dell'ossigeno libero: questo viene prelevato dall'aria inglobata nella discarica durante la deposizione del rifiuto o penetrata dopo la chiusura. Il processo utilizza anche l'ossigeno disciolto nell'acqua meteorica infiltrata dal capping di chiusura della discarica.

La degradazione aerobica è legata alla disponibilità di ossigeno (ed è quindi normalmente di breve durata, da qualche ora ad alcuni mesi) e alla tipologia di rifiuti.

Nella prima fase il fenomeno è favorito dalla presenza nel rifiuto di sostanze facilmente e rapidamente degradabili.

Questa fase è fortemente esotermica (il calore prodotto può raggiungere temperature di 70°C) ed è caratterizzato da emissioni di anidride carbonica, acqua e sostanze organiche parzialmente degradate.

### **2.1.2 FASE FACOLTATIVA ANAEROBICA**

La decomposizione facoltativa anaerobica avviene quando la disponibilità di ossigeno è ridotta al punto in cui non è più possibile un processo aerobico.

Gli organismi presenti, definiti facoltativi, prediligono l'ossigeno libero ma, se esso è assente, possono utilizzare l'ossigeno "legato".

Caratteristiche di questa fase sono la produzione di anidride carbonica, una minore generazione di energia termica rispetto al processo aerobico e una notevole produzione di sostanza organica parzialmente degradata, la maggior parte della quale è costituita da acidi organici. Detti acidi, con l'anidride carbonica disciolta, si ritrovano inoltre nel percolato a cui conferiscono un certo livello di acidità.

### **2.1.3 FASE METANIGENA ANAEROBICA**

Lo stadio finale della decomposizione dei rifiuti solidi urbani consiste nella decomposizione metanigena anaerobica. In questa fase gli organismi convertono la sostanza organica, parzialmente degradata dagli organismi aerobici facoltativi, in metano ed anidride carbonica.

Le caratteristiche di questa fase sono sempre la produzione di energia termica (comunque inferiore rispetto alla fase aerobica), l'utilizzazione di materia organica disciolta, la produzione di metano ed anidride carbonica, nonché l'aumento del pH con valori vicini alla neutralità.

Numerosi studi hanno accertato che di norma questa fase si instaura dopo un periodo variabile tra i 3 e i 9 mesi dalla deposizione del rifiuto. Una volta avviata la fase metanigena, la produzione di biogas si manifesta, normalmente, per parecchi anni (anche oltre 40), secondo un andamento che evidenzia la massima produzione nei primi anni e un progressivo esaurimento asintotico fino alla completa degradazione della sostanza organica o fino a quando esistono le condizioni ambientali idonee al processo.

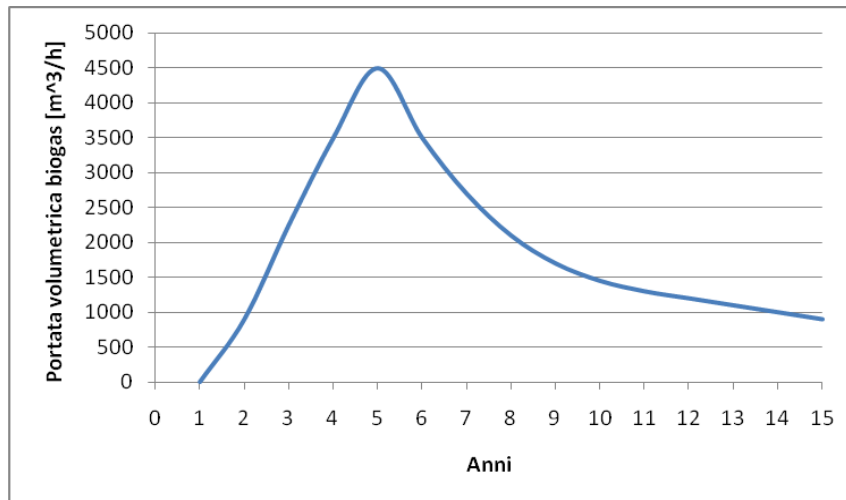


FIG. 2.1 Produzione complessiva del biogas

## **2.2 FATTORI CHE INFLUENZANO LA PRODUZIONE DI BIOGAS**

Numerosi fattori sono in grado di influenzare positivamente o negativamente il fenomeno di produzione di biogas.

- **Caratteristiche dei rifiuti**

- *Composizione*: la tipologia di rifiuti è determinante nel processo, specialmente la presenza di sostanza organica biogassificabile.
- *Pezzatura*: le dimensioni delle particelle dei rifiuti hanno effetti contrastanti sulla metanogenesi. Da una parte la riduzione della pezzatura aumenta sensibilmente la superficie reattiva e di conseguenza il processo di idrolisi, con effetti rilevanti sulla produzione di biogas; dall'altra parte, l'esposizione di un'ampia superficie al processo di idrolisi può condurre alla rapida formazione di acidi grassi volatili (tali acidi possono rendere l'ambiente inadatto ai batteri metanigeni).
- *Densità*: anche la densità ha effetti contrastanti sulla produzione di biogas. Diminuendo la capacità di campo dei rifiuti si tende ad aumentare la diffusione e la distribuzione nella massa dei rifiuti dell'umidità e di tutti gli elementi presenti nella fase acquosa ma allo stesso tempo la superficie totale reattiva diminuisce (facendo diminuire la velocità di idrolisi della sostanza organica).

- **Umidità**: la funzione dell'umidità nel processo di metanogenesi è triplice: consentire l'attività dei microrganismi, creazione di un'interfaccia solido-liquido,

diffusione ottimale nell'ammasso dei microrganismi e dei nutrienti nel substrato idrolizzato. Numerose esperienze hanno mostrato un aumento consistente della produzione di biogas all'aumentare dell'umidità.

- **Temperatura:** la produzione di biogas è influenzata dalle temperature all'interno dello scarico controllato e dalle variazioni di queste nel tempo. In condizioni anaerobiche ed in presenza di un adeguato isolamento termico, le temperature all'interno della massa dei rifiuti possono raggiungere anche i 30-50 °C. E' stato calcolato, sulla base dell'energia di attivazione necessaria alla produzione di metano, che la temperatura ottimale di tale processo è di circa 40 °C. E' importante notare che la temperatura all'interno dello scarico controllato è influenzata sia dalle condizioni termiche dell'ambiente esterno che dalla natura esotermica dei fenomeni di fermentazione dei rifiuti.
- **Caratteristiche ambientali:** le caratteristiche ambientali influiscono sul fenomeno di produzione di biogas in funzione della morfologia della discarica. Infatti tanto più una discarica presenta spessori e volumi consistenti, tanto minore sarà l'influenza ambientale esterna. I principali fattori influenzanti sono: temperatura ambientale, umidità dell'aria, precipitazioni, ventosità e insolazione (evapotraspirazione).
- **Caratteristiche gestionali e costruttive**

## **2.3 CARATTERISTICHE DEL BIOGAS**

I gas macrocomponenti caratteristici del biogas sono il metano ( $\text{CH}_4$ ) e l'anidride carbonica ( $\text{CO}_2$ ). In proporzione dell'incidenza della fase aerobica oppure dell'intrusione di aria durante la captazione è possibile la presenza di aria nella miscela e pertanto tra i macrocomponenti del biogas vanno considerati l'ossigeno ( $\text{O}_2$ ) e l'azoto ( $\text{N}_2$ ). In alcuni casi è riscontrabile la presenza di idrogeno ( $\text{H}_2$ ) gas tipico della fase di transizione acetogenica, tale presenza è comunque limitata nel tempo e nella quantità. La presenza di acqua ( $\text{H}_2\text{O}$ ), allo stato di vapore, è quasi costante mentre la presenza di idrogeno solforato ( $\text{H}_2\text{S}$ ) e ammoniaca ( $\text{NH}_3$ ) pur essendo ricorrente difficilmente raggiunge valori vicino al punto percentuale. Anche la presenza di monossido di carbonio ( $\text{CO}$ ) è poco rilevante.

GAS COMPONENTE	INCIDENZA STANDARD
Metano	0-60 %
Anidride carbonica	0-70 %
Ossigeno	0-21 %
Azoto	0-79 %
Idrogeno	0-1 %
Acqua	0-5 %
Idrogeno solforato	0-2 %
Ammoniaca	0-1 %
Monossido di carbonio	0-0,1%

FIG. 2.2 Incidenze standard dei componenti del biogas

Solo il metano, l'anidride carbonica e l'aria caratterizzano consistentemente il biogas, gli altri gas, pur con incidenze minori forniscono alla miscela particolari caratteristiche di pericolosità, aggressività e odore.

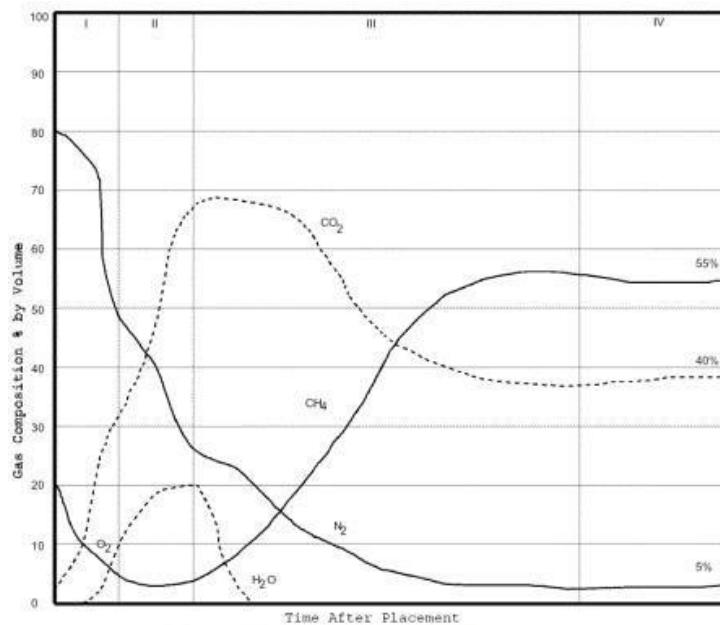


FIG 2.3 Evoluzione tipica della composizione del biogas nel tempo

## **2.4 ANALISI DEL BIOGAS**

L'analisi della qualità del biogas è piuttosto complessa, sia per le procedure di campionamento che per quelle di analisi.

Innanzitutto è necessario definire quale componente chimica occorre analizzare, a seconda dell'utilizzo finale del dato qualitativo.



Nel caso di una regolazione manuale della rete di captazione il dato qualitativo potrebbe essere limitato alla sola concentrazione di metano. Il tenore di ossigeno potrebbe fornire utili indicazioni circa la diluizione del biogas con aria e quindi informazioni sulle infiltrazioni dalla copertura dei rifiuti. La conoscenza della concentrazione di anidride carbonica potrebbe fornire informazioni sul livello della fermentazioni dei rifiuti.

Nel caso di una regolazione automatica per il recupero energetico la percentuale di metano è essenziale.

Nel caso di un monitoraggio orientato alla sicurezza, la valutazione della concentrazione di ossigeno è determinante per il controllo delle perdite della rete.

E' necessario dunque analizzare le seguenti componenti, in ordine di importanza:

- Metano
- Ossigeno
- Anidride carbonica.

Esistono poi altre componenti che possono essere ricercate per valutare l'aggressività del biogas, come ad esempio l'idrogeno solforato ( $H_2S$ ), oppure elementi indicanti situazioni a rischio, quali ad esempio la valutazione del monossido di carbonio per indicare potenziali combustioni interne alla massa di rifiuti.

In funzione del tipo di gas da analizzare esistono diversi sistemi di analisi.

Per il metano il sistema maggiormente utilizzato è quello mediante analizzatore ad infrarosso (IR); tale sistema è utilizzato sia per i portatili che per le dotazioni di processo. Esistono anche analizzatori di tipo catalitico ma tali sistemi richiedono una minima parte di aria per consentire la reazione analizzata e l'aria non sempre è presente nel biogas.

Lo stesso tipo di analizzatore (IR) è comunemente utilizzato anche per la lettura dell'anidride carbonica.

Per l'ossigeno viene normalmente utilizzata una cella elettrochimica per gli strumenti portatili ed un analizzatore paramagnetico per gli strumenti fissi di processo.

I punti di analisi vengono posti prima della centrale di aspirazione per l'analisi in continuo e su ogni testa di pozzo e sottostazione per l'analisi con strumentazione portatile.



**FIG. 2.4** Apparecchiatura di processo per l'analisi in continuo del biogas



**FIG. 2.5** Apparecchio portatile per l'analisi del biogas

# Capitolo 3

## **SCELTE IMPIANTISTICHE POSSIBILI: DESCRIZIONE E CRITERI DI SCELTA**

A seconda della composizione del biogas (si guarda soprattutto la concentrazione di metano) e della disponibilità economica dell'operatore sono possibili diverse scelte impiantistiche.

Le scelte impiantistiche possibili sono 3:

- Biofiltrazione
- Combustione in torcia
- Recupero energetico.

### **3.1 BIOFILTRAZIONE**

Nelle discariche molto vecchie e chiuse da molti anni è frequentemente possibile che la quantità e la qualità del biogas scenda a valori non più compatibili con le dotazioni di trattamento per la combustione.

L'utilizzo dei sistemi di bio-ossidazione risulta essere particolarmente utile quando gli altri sistemi di trattamento sono inefficaci a causa della limitata presenza di metano nel biogas.

Il biofiltro viene utilizzato per l'abbattimento dei composti naturali e di sintesi, inorganici e organici quando il *contenuto di metano nel biogas è inferiore al 25%*.

Questo sistema prevede lo sfruttamento di un largo spettro di microrganismi (batteri, attinomiceti e funghi) in grado di metabolizzare, attraverso una serie di reazioni biologiche (ossidazione, riduzione e idrolisi) i composti naturali di sintesi, inorganici ( $H_2S$  e  $NH_3$ ), organici sia aromatici che alifatici (acidi, alcoli e idrocarburi) presenti nel biogas.

Tutti gli altri sistemi, essendo basati sulla combustione del biogas, necessitano di *concentrazioni di metano elevate, superiori al 25%* per tutti i sistemi di combustione.

Nel caso di recupero energetico la *concentrazione di metano deve essere più elevata (>30% per caldaie, >35% per microturbine e >40% per motori endotermici)*.



### **3.2 COMBUSTIONE IN TORCIA**

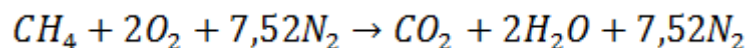
La combustione in torcia risulta essere lo stadio finale per buona parte degli impianti orientati alla sola bonifica ambientale.

Anche negli impianti predisposti per il recupero energetico devono essere dotati di un sistema di combustione di emergenza in grado di trattare i gas nel caso le dotazioni di trasformazione fossero fuori servizio o comunque bruciare le eccedenze di biogas non recuperato.

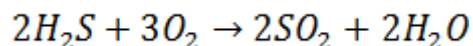
Coinvolgendo la combustione del biogas, richiede **concentrazioni di metano elevate, solitamente superiori al 25%**.

Nella combustione vengono ossidati il metano e le limitate tracce di gas combustibili che vengono trasformati in vapore, anidride carbonica, ossidi di zolfo e ossidi di azoto; il biogas (più precisamente il metano) funge da combustibile e l'ossigeno presente nell'aria da comburente.

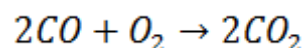
La reazione basilare per la combustione del metano è la seguente:



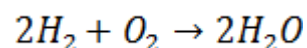
Ossidazione dell'idrogeno solforato:



Ossidazione del monossido di carbonio:



Reazione dell'idrogeno:



Nel caso di combustione incompleta per difetto del comburente, o per bassa turbolenza, è possibile la formazione di alcuni derivati critici quali il monossido di carbonio (CO) ed alcuni composti aromatici.

Se nella miscela del biogas sono inoltre presenti composti clorurati, fluorurati o solforati è inevitabile la formazione di acido cloridrico (HCl), acido fluoridrico (HF) ed anidride solforosa.

La combustione rilascia anche ossidi di azoto (NO<sub>x</sub>).

Una combustione ottimale è garantita da 3 fattori fondamentali: **temperatura, tempo di residenza e turbolenza**. Alte temperature (ma non eccessive per non favorire il rilascio di  $\text{NO}_x$ ), alti tempi di residenza, una forte turbolenza garantita dalle dotazioni della torcia e un forte eccesso d'aria assicurano una combustione completa e l'assenza di gas incombusti.

L'attuale Normativa vigente per la costruzione delle discariche, il D.Lgs. 36 del 2003 prescrive che

*“Nel caso di impraticabilità del recupero energetico la termodistruzione del gas di discarica deve avvenire in idonea camera di combustione a  $T > 850^\circ\text{C}$ , concentrazione di ossigeno  $> 6\%$  in volume e tempo di ritenzione  $> 0,3\text{s}$ ”.*

### **Torcia statica**

Le torce statiche sono utilizzate direttamente sui sistemi di captazione (pozzi) quando non è possibile procedere ad una estrazione forzata biogas e quindi ad un trattamento centralizzato. E' però preferibile, dove possibile, installare dei sistemi di aspirazione e combustione di tipo automatico, per evitare la presenza di fiamme libere sul suolo della discarica. L'accensione è automatica basata su elettrodi e su un trasformatore alimentato da una batteria oppure da un pannello solare.



**FIG. 3.2 Torcia statica**



### ***Torcia a fiamma libera***

La torcia a fiamma libera consiste essenzialmente in un bruciatore, montato in cima ad una struttura portante, con un piccolo frangivento di protezione, un pilota dotato di accenditore ed un sistema di rilevamento termico della fiamma del tipo a termocoppia. Il sistema di accensione è automatico. La mancanza di una camera di combustione con isolamento refrattario e la combustione a fiamma libera fa sì che la miscelazione del biogas con l'aria necessaria alla combustione sia generalmente parziale e che la temperatura di combustione sia difficilmente controllabile.

Tali torce rispettano difficilmente gli standard di emissione che vengono richiesti in quanto i tempi di residenza sono nulli, le temperature di combustione basse e le turbolenze limitate. Per questo motivo il loro utilizzo è caduto in disuso.



**FIG. 3.3 Torcia a fiamma libera**

## ***Torcia ad alta temperatura***

Queste dotazioni sono caratterizzate da un'ampia camera di combustione internamente rivestita con isolamento refrattario e sono dotate di un bruciatore principale e di uno secondario definito pilota di accensione.

Il pilota è normalmente equipaggiato con un accenditore elettrico e con un sistema di rilevamento ottico (sensore UV) della presenza della fiamma.

Questo tipo di torcia è progettata allo scopo di ottenere un'efficienza di combustione elevata e di conseguenza valori di emissione molto contenuti.

La costruzione di questo tipo di combustore consente di bruciare il biogas ad alte temperature grazie alla presenza del materiale refrattario, la dimensione della camera di combustione permette tempi di mantenimento della combustione elevati ed infine il disegno dei bruciatori consente di disporre di una ottimale turbolenza della fiamma: sono dunque soddisfatti tutti i requisiti di alta temperatura, alto tempo di residenza ed elevata turbolenza.

La carburazione dell'aria è resa ideale da un controllo termico (tramite termocoppie) della combustione collegato alle serrande di alimentazione dell'aria.



**FIG. 3.4 Torcia ad alta temperatura e centrale di aspirazione in container**



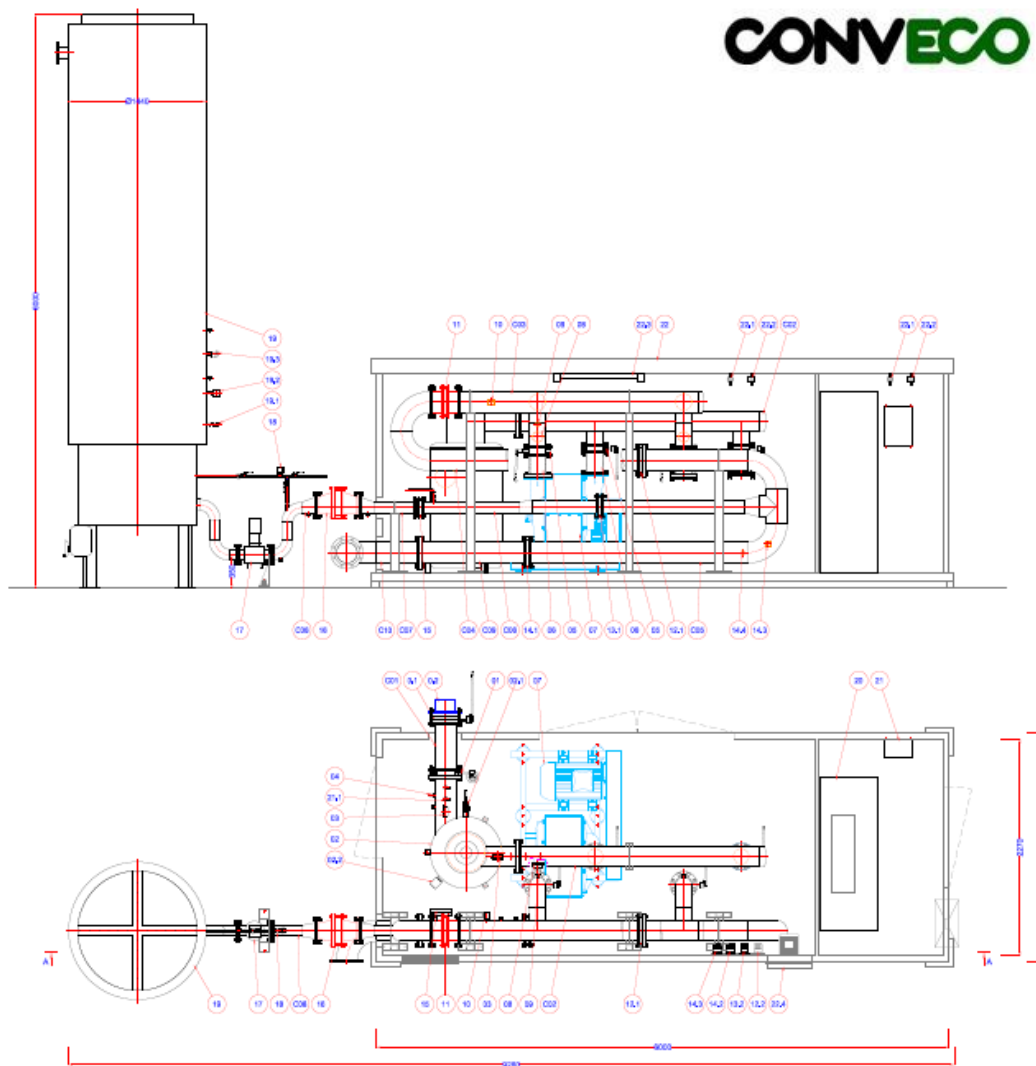


FIG. 3.5 Spaccato di una centrale di aspirazione e di una torcia ad alta temperatura

### **3.3 RECUPERO ENERGETICO**

Dove applicabile è la scelta impiantistica ottimale e preferibile, in quanto consente il raggiungimento di 2 obiettivi: l'abbattimento delle emissioni di CH<sub>4</sub> in atmosfera e la produzione di energia elettrica da una fonte di energia rinnovabile, con il conseguente tornaconto economico.

La *concentrazione di metano richiesta deve essere piuttosto elevata (>30% per caldaie, >35% per microturbine e >40% per motori endotermici).*

La prima fase del recupero energetico è la combustione: la componente combustibile del biogas (metano) adeguatamente miscela all'aria (comburente) brucia all'interno di un volume confinato generando energia termica.

Questa energia può essere trasferita ad altri fluidi mediante adeguati scambiatori ad altri fluidi (acqua, oli ed altri fluidi termici) per la distribuzione di calore a diverse temperature (recupero energetico termico).

Spesso l'energia termica viene trasformata in energia meccanica (ad esempio nei motori endotermici), che a sua volta è convertita in energia elettrica per mezzo di generatori (recupero energetico elettrico).

La produzione di energia elettrica è l'applicazione di recupero energetico più semplice da gestire sia per la facilità di trasporto dell'energia che per la continua richiesta da parte delle utenze.

Anche se i rendimenti elettrici non sono elevati, se confrontati con quelli termici, questo tipo di recupero è quello globalmente più diffuso.

La produzione di energia elettrica avviene generalmente mediante la combustione del biogas all'interno di motori endotermici alternativi a ciclo otto abbinati ad opportuni generatori elettrici.

Il rendimento elettrico dei motori endotermici alternativi a ciclo otto può variare in funzione delle taglie e della qualità del prodotto ma è generalmente compreso tra il 30% e il 40%.

### **3.4 PRE-TRATTAMENTI DEL BIOGAS**

Il pre-trattamento del biogas è volto alla rimozione di sostanze indesiderate che potrebbero ostacolare il trattamento finale.

In particolare vengono perseguiti 3 obiettivi distinti:

- Garantire la funzionalità del sistema di smaltimento;
- Ottimizzare il recupero energetico;
- Contribuire alla riduzione del carico ambientale delle emissioni.

I principali componenti indesiderati sono l'acqua, l'anidride carbonica, composti solforati, composti del cloro e del fluoro e composti organici del silicio.

Il biogas destinato all'alimentazione dei motori per la produzione di energia elettrica viene generalmente deumidificato al fine di rimuovere parte delle sostanze più solubili in acqua quali l'idrogeno solforato, però non sempre tale trattamento può essere sufficiente per garantire un'adeguata protezione del motore.

Tra le componenti più aggressive dei motori si identificano i silossani, composti organici del silicio che tendono a vetrificarsi sui meccanismi del motore causando attriti e consumi notevoli.

Negli impianti si verificano inoltre problemi di corrosione causati dalla presenza nel biogas di acido cloridrico, fluoridrico, solfidrico ed altri composti organici alogenati.

### ***Trattamenti primari***

I trattamenti primari (di tipo fisico) hanno lo scopo di ridurre i contaminanti nel gas di discarica.

I principali contaminanti sono le *condense* e il *particolato*.

L'accumulo di condense nelle tubazioni di aspirazione riduce la sezione dei tubi e aumenta le perdite di carico. Se il biogas non è depurato dalle particelle solide in esso contenute, si ha un sicuro aumento del rischio di usura delle parti metalliche delle varie apparecchiature (solitamente il materiale particolato solido è composto da una miscela di biomassa).

Le condense vengono eliminate sia per semplice gravità che per raffreddamento del biogas (deumidificazione).

I separatori di gravità hanno l'unica funzione di separare le fasi liquide condensatesi precedentemente nelle condotte e solitamente sono costituiti da un recipiente in cui la ridotta velocità del gas permette una separazione per gravità dei fluidi veicolati.

Nella deumidificazione il biogas viene raffreddato fino ai limiti del congelamento (2-3 °C) in modo da condensare le parti di vapore acqueo residue nel gas. Con le condense vengono separate anche le componenti chimiche solubili, quali ad esempio l'idrogeno solforato. La deumidificazione avviene normalmente in uno scambiatore termico a fascio tubiero ad acqua raffreddata. Il repentino raffreddamento produce una condensazione e le condense formate vengono rimosse da un separatore montato subito a monte dello scambiatore.

La rimozione del particolato avviene tramite semplici filtri (ad esempio elettrocycloni) posti dopo le unità di deumidificazione.

## ***Trattamenti secondari***

Sono di tipo chimico e fisico e nella maggior parte delle discariche non vengono applicati per motivi di sostenibilità economica.

I trattamenti secondari in genere tendono a rimuovere o ridurre le concentrazioni di ***idrogeno solforato e silossani***.

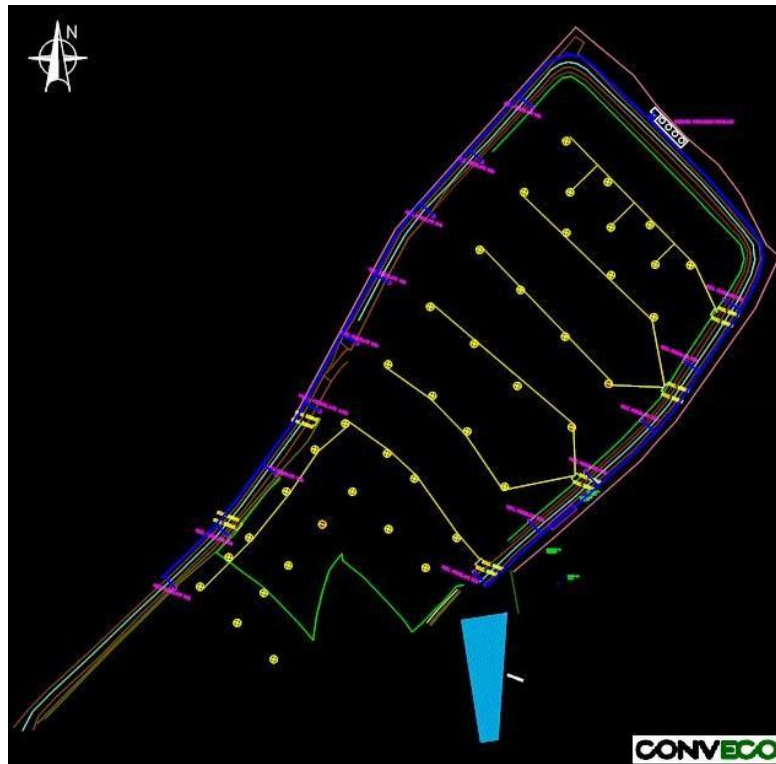
Per la rimozione di idrogeno solforato dal gas di discarica esistono tecnologie a secco e ad umido. La tecnologia a secco prevede l'adsorbimento in supporti detti 'iron sponge' con la produzione di solfuro di ferro. La tecnologia ad umido si basa su processi di assorbimento da parte di soluzioni insufflate in condotte.

Non vi è alcun metodo standard per il trattamento del gas di discarica per eliminare o ridurre al minimo i silossani. La deumidificazione e il raffreddamento risultano insufficienti e l'unica tecnologia che ha fornito riscontri positivi si basa su filtri a carboni attivi, nonostante sia un trattamento molto costoso e con limitati tempi di funzionamento.

# Capitolo 4

## ***DISCARICA DI GRUMOLO DELLE ABBADESSE (VI)***

### **4.1 DESCRIZIONE DELLA DISCARICA**



**FIG 4.1** Planimetria della discarica

La fig. 4.1 rappresenta la planimetria della discarica di Grumolo delle Abbadesse (VI). Sono evidenziate sia le linee di raccolta del percolato che quelle di captazione del biogas, con relative sottostazioni e serbatoi di stoccaggio.

In blu è indicata la rete di drenaggio del percolato: si contano 15 pozzi di raccolta e i pozzetti di immagazzinamento finale situati a nord della discarica.

In giallo è invece segnata la rete di captazione del biogas: è possibile individuare 19 teste di pozzo e 6 collettori di regolazione.



**FIG. 4.2** Fase di costruzione della discarica è già possibile  
*Individuare l'impermeabilizzazione delle pareti*



Queste immagini rappresentano alcune fasi della costruzione della discarica e dell'impermeabilizzazione delle pareti e della preparazione del fondo

**FIG. 4.3**



**FIG. 4.4**





**FIG. 4.5 Particolare di una testa di pozzo**



**FIG. 4.6 Testa di pozzo e scarpata della discarica**





**FIG. 4.7**



Diversi particolari della  
scarpata  
della discarica e della rete di  
captazione

**FIG. 4.8**



**FIG. 4.9**



## 4.2 DESCRIZIONE DELL'IMPIANTO

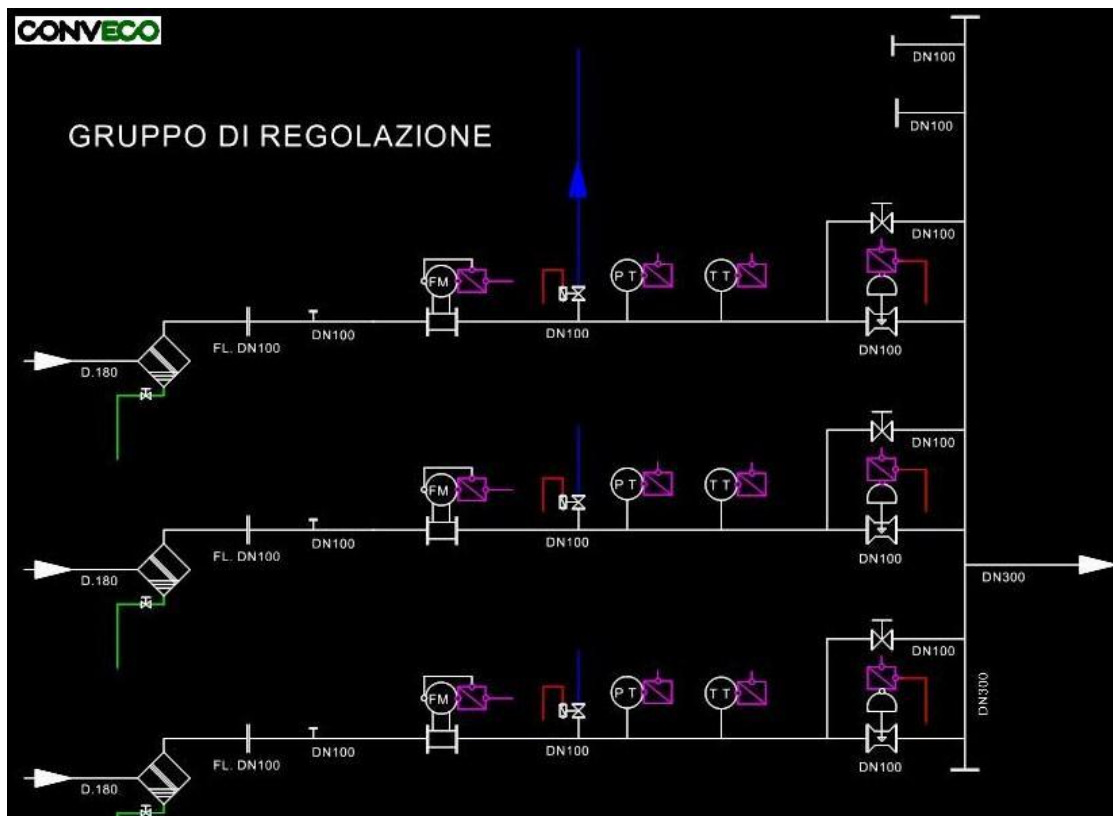


FIG. 4.10 Schema a blocchi dell'impianto

La fig. 4.10 è una schematizzazione a blocchi dell'impianto associato alla discarica di Grumolo delle Abbadesse.

E' possibile individuare 6 blocchi principali distinti:

- Gruppo di regolazione;
- Gruppo di deumidificazione;
- Recupero energetico;
- Torcia ad alta temperatura;
- Gruppo di analisi;
- Gruppo di controllo.



**FIG. 4.11 Particolare del gruppo di regolazione**

Il gruppo di regolazione iniziale è costituito da 3 linee distinte con la possibile predisposizione di una quarta.

Su tutte le linee sono presenti scaricatori di condensa e misuratori di portata, pressione e temperatura.

La particolarità di questo gruppo sta nel fatto che alla fine di ogni linea è stata montata una valvola a globo controllata da un attuatore pneumatico, la cui apertura è regolata dal segnale ricevuto dal misuratore di portata.

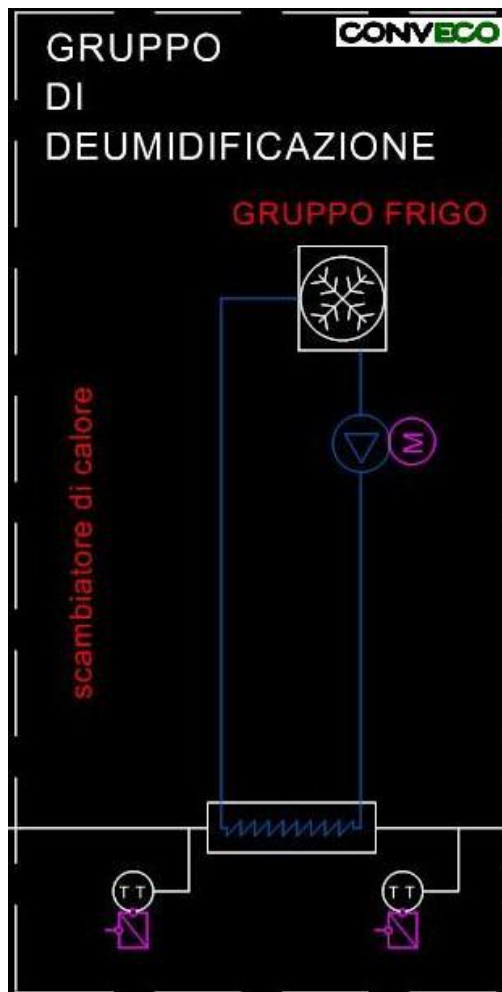
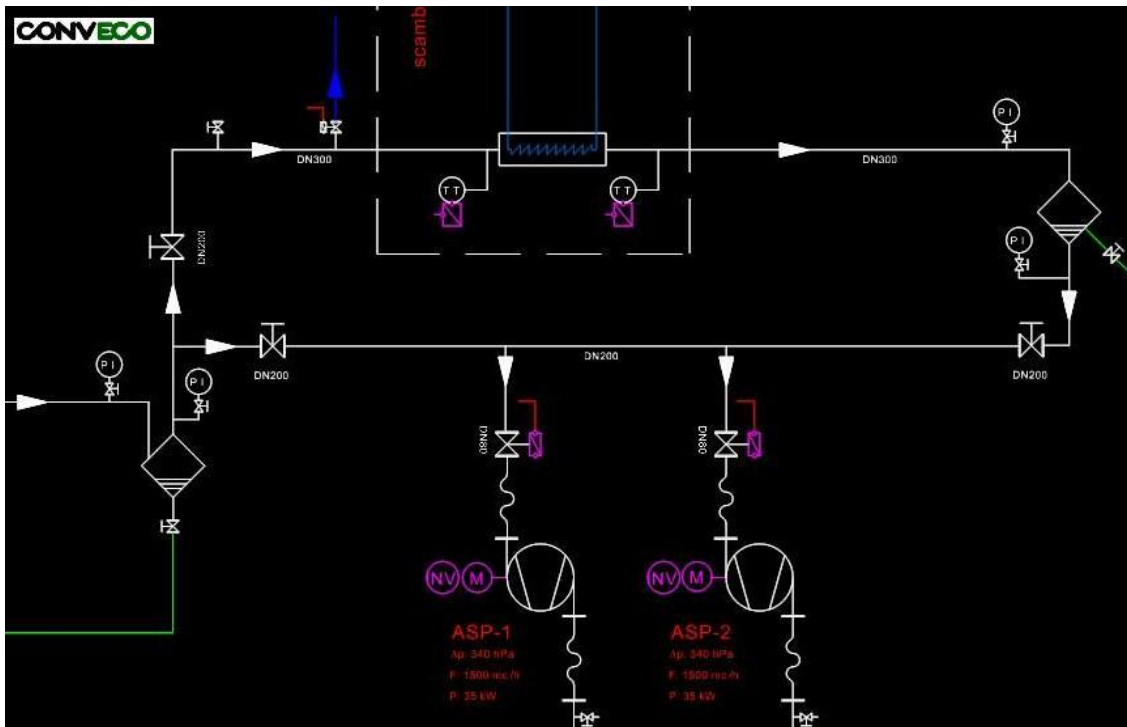


FIG. 4.12 Particolare del gruppo di umidificazione

Il gruppo di deumidificazione è sostanzialmente costituito da uno scambiatore di calore a fascio tubiero raffreddato ad acqua. L'acqua in un uscita dallo scambiatore viene a sua volta refrigerata dal gruppo frigo.

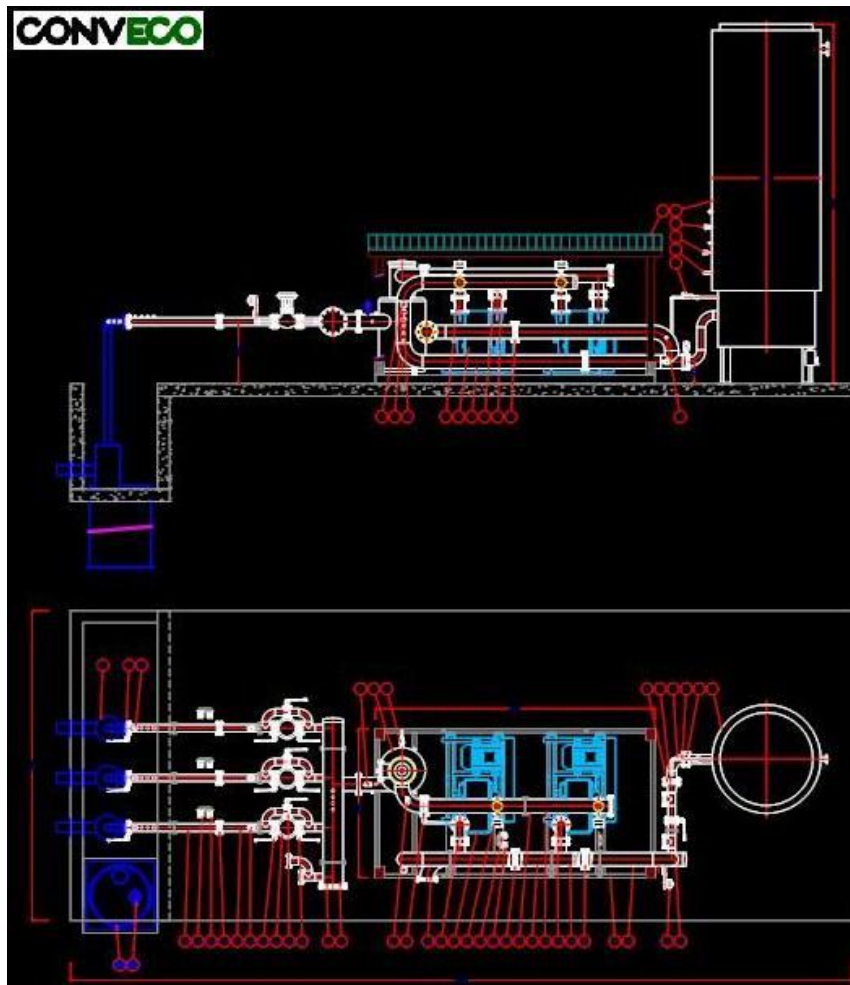
Il biogas è portato in prossimità della temperatura di congelamento (2-3 °C) per permettere la condensazione delle frazioni di vapore acqueo residue e delle componenti più solubili del gas.

E' comunque una pratica piuttosto costosa e viene applicata solo nel caso in si attui il recupero energetico.



**FIG. 4.13** Particolare del by-pass tra il gruppo di deumidificazione e le pompe centrifughe

Il by-pass serve a escludere il gruppo di deumidificazione. Questa pratica viene applicata nel caso in cui per diversi motivi il gruppo di recupero energetico non sia funzionante e sia necessario inviare il biogas alla combustione in torcia. La deumidificazione è un trattamento piuttosto costoso e non è assolutamente necessario per la sola combustione.



**FIG. 4.11** Disegno costruttivo dell'impianto

L'impianto ha lo scopo di:

- aspirare il biogas prodotto dalla discarica garantendo la messa in sicurezza della stessa;
- bruciare lo stesso in conformità alla normative vigenti;
- essere realizzato in modo tale da poter alimentare l'impianto di recupero energetico.

L'impianto è costituito da:

- un sistema di filtrazione in ingresso;
- un sistema di aspirazione con aspiratori centrifughi multistadio;
- un sistema di combustione con torcia a combustione controllata;
- un sistema di analisi del biogas;
- un sistema di controllo e gestione.

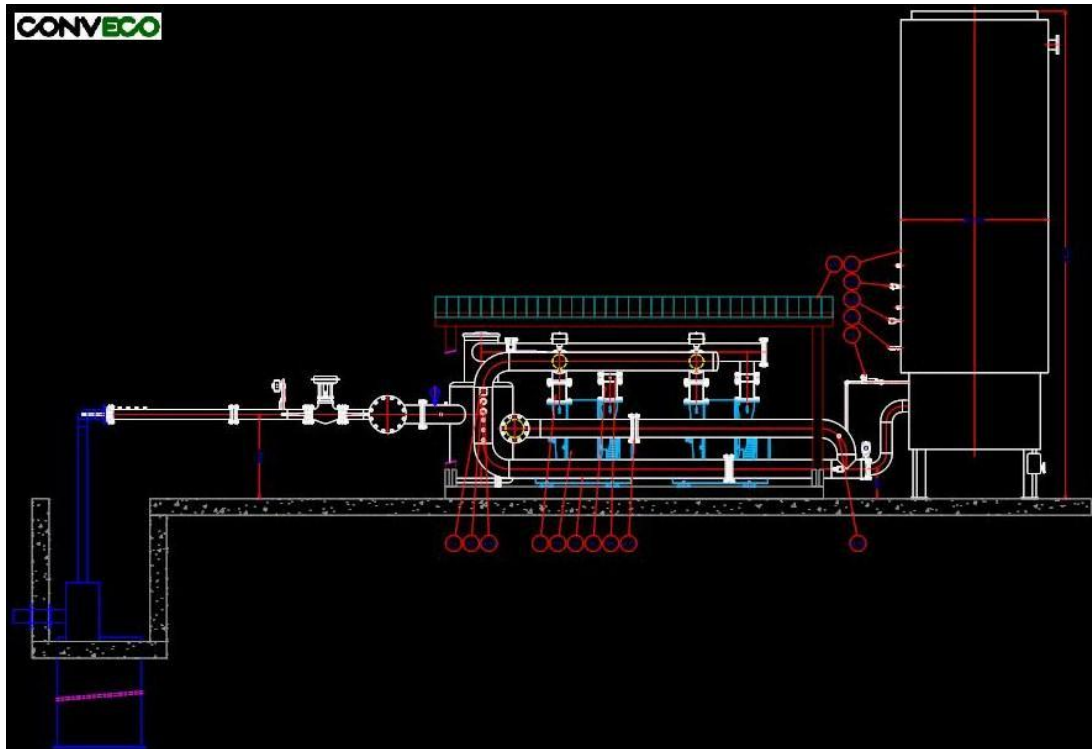


FIG. 4.14 Disegno costruttivo dell'impianto

### ***CARATTERISTICHE DELLA TORCIA***

<b>TEMP. DI COMBUSTIONE</b>	<b>850 °C - 1200 °C</b>
<b>POTENZA DI COMBUSTIONE</b>	<b>1000 - 5000 kW</b>
<b>RANGE DI COMBUSTIONE</b>	<b>300-1500 Nm<sup>3</sup>/h CH<sub>4</sub> 55%</b>
<b>PERCENTUALE MINIMA CH<sub>4</sub></b>	<b>20%</b>

La torcia è costituita da un bruciatore a camera aperta con combustione libera in atmosfera, il camino dimensionato per il completo contenimento della fiamma garantisce un tempo di permanenza maggiore di 0,3 sec.

L'aria necessaria alla combustione è fornita naturalmente senza alcuna immissione forzata della stessa.

Il bruciatore è realizzato completamente in acciaio inox ed è costituito da:

- camera di combustione in acciaio inossidabile con parete interna rivestita in mattoni refrattari e parete esterna rivestita in fibra ceramica;
- camino in acciaio inossidabile rivestito internamente con fibra ceramica;
- camicia esterna in acciaio inossidabile;
- bruciatore a getti multipli.

L'accenditore è del tipo ad elettrodi con visualizzatore di fiamma ad UV.

### **4.3 CALCOLO DEL VOLUME DI TORCIA**

#### **DATI**

$$\text{Portata volumetrica biogas} = 600 \frac{\text{Nm}^3}{\text{h}}$$

$$T_{\text{COMBUSTIONE}} = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{ESTERNA}} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$$

COMPOSIZIONE BIOGAS % volume	
CH <sub>4</sub>	50%
CO <sub>2</sub>	40%
O <sub>2</sub>	2%
N <sub>2</sub>	8%

PM [g/mol]	
CH <sub>4</sub>	16
CO <sub>2</sub>	44
O <sub>2</sub>	32
N <sub>2</sub>	28
ARIA	28,93

% ARIA (in peso)	
O <sub>2</sub>	23,14 %
N <sub>2</sub>	76,86 %

#### **CALCOLI**

Considerando  $1 \text{ Nm}^3$  di gas ho

$$\frac{500 \text{ Nl}_{\text{CH}_4}}{22,4 \frac{\text{Nl}}{\text{mol}}} = 22,32 \text{ mol}_{\text{CH}_4} \times 16 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 357,14 \text{ g}_{\text{CH}_4}$$

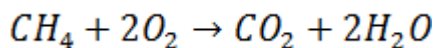
$$17,86 \text{ mol}_{\text{CO}_2} \times 44 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 785,71 \text{ g}_{\text{CO}_2}$$

$$0,89 \text{ mol}_{\text{O}_2} \times 32 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 28,57 \text{ g}_{\text{O}_2}$$

$$3,57 \text{ mol}_{\text{N}_2} \times 28 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 100 \text{ g}_{\text{N}_2}$$

	Moli	Massa [g]
CH <sub>4</sub>	22,32	357,14
CO <sub>2</sub>	17,86	785,71
O <sub>2</sub>	0,89	28,57
N <sub>2</sub>	3,57	100
TOTALE	44,64	1271,43

In torcia ho la combustione del metano, mentre gli altri gas rimangono inalterati



Quindi in  $1 \text{ Nm}^3$  di gas mi servono  $44,64 \frac{\text{mol}_{\text{O}_2}}{\text{Nm}^3 \text{ BIOGAS}}$  per consumare  $22,32 \text{ mol}_{\text{CH}_4}$ .

Questo valore è pari a  $1428,57 \frac{\text{g}_{\text{O}_2}}{\text{Nm}^3 \text{ BIOGAS}}$ , che corrispondono a

$$\frac{1428,57 \frac{\text{g}_{\text{O}_2}}{\text{Nm}^3 \text{ BIOGAS}}}{23,14\%} = 6173,60 \frac{\text{g}_{\text{ARIA}}}{\text{Nm}^3 \text{ BIOGAS}}$$

$$\text{cioè } \frac{6173,60 \frac{\text{g}_{\text{ARIA}}}{\text{Nm}^3 \text{ BIOGAS}}}{28,93 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 213,43 \frac{\text{mol}_{\text{ARIA}}}{\text{Nm}^3 \text{ BIOGAS}}$$

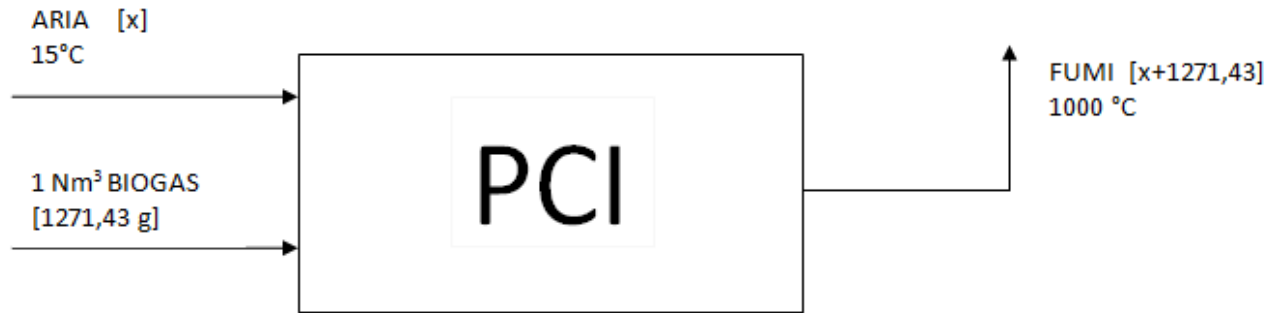
Dunque per ogni 1,2 Kg di biogas mi servono circa 6 Kg d'aria.

Inserendo un fattore di sicurezza di 1,25 ottengo

	mol/Nm <sup>3</sup> BIOGAS	g/ Nm <sup>3</sup> BIOGAS
ARIA	266,79	7717
O <sub>2</sub> ARIA	55,8	1785,71
N <sub>2</sub> ARIA	210,98	5931,29

In realtà l'aria immessa non ha solo la funzione di fornire l'ossigeno necessario alla combustione, ma anche quella di regolare la temperatura della torcia.





$$\begin{aligned} \text{Ipotizzando } PCI_{CH_4} &= 8500 \frac{\text{Kcal}}{\text{Nm}^3} \\ PCI_{BIOGAS} &= \frac{PCI_{CH_4}}{2} = 4250 \frac{\text{Kcal}}{\text{Nm}^3} \\ c_{p \text{ ARIA}} &= 0,241 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg } ^\circ\text{C}} \\ c_{p \text{ FUMI}} &= 0,295 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg } ^\circ\text{C}} \end{aligned}$$

Utilizzando però con buona approssimazione un unico valore medio pari a  $0,25 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg } ^\circ\text{C}}$ .

## BILANCIO ENERGETICO

$$(x + 1271,43)g \times \frac{0,25 \text{ Kcal}}{1000 \text{ g}} \times (1000 - 15)^\circ\text{C} = 4250 \text{ Kcal}$$

Da cui  $x = 15987,47 \frac{\text{g}_{\text{ARIA}}}{\text{Nm}^3 \text{ BIOGAS}}$  (ARIA IMMESSA)

che corrispondono a  $552,71 \frac{\text{mol}_{\text{ARIA}}}{\text{Nm}^3 \text{ BIOGAS}}$

così divise  $115,61 \frac{\text{mol}_{\text{O}_2}}{\text{Nm}^3 \text{ BIOGAS}}$ ;  $437,1 \frac{\text{mol}_{\text{N}_2}}{\text{Nm}^3 \text{ BIOGAS}}$ .

In pratica devo insufflare il doppio dell'aria richiesta dal solo processo di combustione.

ARIA IN ECCESSO per CONTROLLO T

$$552,71 - 266,79 = 285,92 \frac{\text{mol}_{\text{ARIA}}}{\text{Nm}^3 \text{ BIOGAS}}$$

così divise  $59,81 \frac{\text{mol}_{\text{O}_2}}{\text{Nm}^3 \text{ BIOGAS}}$ ;  $226,12 \frac{\text{mol}_{\text{N}_2}}{\text{Nm}^3 \text{ BIOGAS}}$ .

Verifica del bilancio

		INGRESSO [mol]			USCITA [mol]
BIOGAS	CH <sub>4</sub>	22,32	FUMI	CO <sub>2</sub>	17,86
	CO <sub>2</sub>	17,86		O <sub>2</sub>	0,89
	O <sub>2</sub>	0,89		N <sub>2</sub>	3,57
	N <sub>2</sub>	3,57		H <sub>2</sub> O	44,64
ARIA				CO <sub>2</sub>	22,32
	O <sub>2</sub> ARIA	115,61	ARIA	O <sub>2</sub> ARIA	70,97
	N <sub>2</sub> ARIA	437,1		N <sub>2</sub> ARIA	437,1
TOTALE		597,35	TOTALE		597,35

La portata dei fumi vale

$$\begin{aligned}
 Q_{FUMI}(1000^{\circ}C) &= 597,37 \frac{\text{mol}}{\text{Nm}^3 \text{BIOGAS}} \times 22,4 \frac{\text{NL FUMI}}{\text{mol}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ NL}} \\
 &\times 600 \frac{\text{Nm}^3 \text{BIOGAS}}{\text{h}} \times \frac{1 \text{ s}}{3600 \text{ h}} \times \left( \frac{1000 + 273}{273} \right) = 10,40 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}
 \end{aligned}$$

Per calcolare il volume di torcia devo garantire un tempo di residenza minimo di 0,3s

$$V = 0,3s \times 10,40 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 3,12 \text{ m}^3$$

La velocità dei gas deve essere compresa tra i 10 e i 12 m/s (questi valori derivano da criteri pratici di dimensionamento), da cui

$$A = \frac{10,40 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{11 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0,94 \text{ m}^2 \text{ e } h = 3,3 \text{ m}$$

## Conclusioni

Una prima parte di studio generale riguardante la struttura della discarica e il biogas mi ha permesso di capire le problematiche connesse alla costruzione e alla gestione post-chiusura di uno scarico controllato.

Successivamente la mia attività si è concentrata sulla discarica e sull'impianto ad essa associato di Grumolo delle Abbadesse (VI).

Alcune visite all'impianto mi hanno consentito di comprendere appieno l'analisi precedentemente effettuata sia sulla discarica che sull'impianto stesso.

Come conclusione ho calcolato il volume di torcia conoscendo la portata e la composizione del biogas, la temperatura di combustione e quella esterna. I miei calcoli mi hanno portato a questo risultato finale:

$$V = 3,12 \text{ m}^3 ; A = 0,94 \text{ m}^2 ; h = 3,3 \text{ m.}$$

Il risultato è plausibile in quanto la torcia realmente installata nell'impianto presenta un diametro interno del bruciatore di circa 1050 mm a cui vanno aggiunti 25 mm di isolamento e la doppia camicia per arrivare al diametro finale esterno di 1400-1500 mm.



## Riferimenti bibliografici

1. Enrico Magnano (2010). *Biogas da discarica*. EPC libri, Roma, p. 496.
2. Ing. Isabella Pecorini. *Trattamenti del biogas da discarica*. Dipartimento di Energetica, Università degli studi di Firenze.
3. Ing. Isabella Pecorini, Ing. Lidia Lombardi. *Elementi di realizzazione di discariche*. Dipartimento di Energetica, Università degli studi di Firenze.
4. *Convegno su Biogas da discarica Problematiche ed opportunità(2002)*. Dipartimento Georisorse e Territorio, Politecnico di Torino.
5. *Seminario La nuove discarica controllata(2004)*. Università degli studi di Padova.
6. Materiale fornito dall'azienda.