

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

**DIPARTIMENTO DI SCIENZE CHIMICHE**

**CORSO DI LAUREA IN CHIMICA INDUSTRIALE**

**BIOGAS: FONTI, PRODUZIONE ED UTILIZZI**

**Relatore: Chiar.mo Prof. Antonella Glisenti**

**Laureando: Folin Enrico**  
**Nr. Matricola: 1226198**

Anno Accademico 2021/2022



## **Indice**

› <b>Abstract</b>	pag.5
› <b>Introduzione</b>	pag.6-8
› <b>Le fonti</b>	pag.9-15
› Biomassa da colture energetiche	
› Biomassa da rifiuti	
› Biomassa acquatica	
› <b>La produzione</b>	pag. 16-23
› Digestione Anaerobica	
› Digestori: tipologie e funzionamento	
› Tecniche per la purificazione	
› <b>L'utilizzo</b>	pag. 24-31
› Principali utilizzi del biogas e di bio-CNG	
› Stoccaggio del biogas	
› Efficienza nell'utilizzo	
› <b>Conclusioni</b>	pag. 32
› <b>Bibliografia</b>	pag. 33



## **Abstract**

La crescente richiesta e il massivo utilizzo di combustibili fossili (fonte energetica non rinnovabile), ha portato ad un progressivo sviluppo di fonti energetiche rinnovabili e quindi non soggette ad esaurimento. Queste possono essere derivanti da processi fisici come avviene per luce solare, vento, ciclo dell'acqua e calore geotermico o chimici come avviene per la biomassa.

Le fonti da cui è possibile ottenere biomassa si dividono in due macro categorie: colture energetiche di prima generazione (come triticale, frumento e mais per le quali viene riportato un confronto) e rifiuti derivanti da settori come l'industria, l'allevamento e scarti alimentari.

Il processo che porta alla produzione di biogas è detto digestione anaerobica, si divide in quattro fasi ed avviene per mezzo di microorganismi. Deve essere condotto in un ambiente di reazione (digestore) all'interno del quale è possibile monitorare parametri chimici e fisici che devono essere mantenuti il quanto più possibile costanti. I digestori possono assumere strutture, dimensioni e modalità di utilizzo diverse a seconda della tipologia di biomassa, dalla collocazione geografica e dalla quantità di prodotto che si desidera ottenere. Il biogas che viene prodotto è composto in percentuale maggioritaria da metano, nonostante ciò sono presenti specie inquinanti che è necessario rimuovere qualora voglia essere utilizzato in maniera analoga, in termini di applicazioni e strutture, al gas naturale di derivazione fossile. La composizione del biogas prodotto varia a seconda della composizione di biomassa utilizzata.

I principali utilizzi sono la produzione di energia elettrica, di calore, carburante per veicoli e produzione di idrogeno. Verrà valutata l'efficienza del biogas nell'utilizzo in diverse applicazioni, considerando un utilizzo diretto e/o indiretto (qualora siano necessari più stadi). Il sottoprodotto della digestione anaerobica prende il nome di digestato ed anch'esso può essere venduto e utilizzato come fertilizzante. Considerando i rapporti costi benefici e la possibile generazione di ricchezza, l'utilizzo di questa tecnologia potrebbe risultare una chiave per la crescita economica di paesi in via di sviluppo.

## Introduzione

Quando si parla di biogas, si fa riferimento ad una miscela di gas, composta in percentuale preponderante da: metano (CH<sub>4</sub>), anidride carbonica (CO<sub>2</sub>) e acido solfidrico (H<sub>2</sub>S). Sono inoltre presenti altre specie in tracce come: azoto (N<sub>2</sub>), ammoniaca (NH<sub>3</sub>), ossigeno (O<sub>2</sub>), monossido di carbonio (CO) e inquinati come specie alogenate, aromatiche e polveri.

Le percentuali delle specie elencate sono variabili a seconda della fonte da cui si ottiene il biogas, vedi Figura 1. [1]

È prodotto dalla fermentazione batterica in anaerobiosi (assenza di ossigeno) di materie prime come: rifiuti dell'agroindustria, dell'industria alimentare, dell'industria zootecnica e dai rifiuti urbani. Tra le fonti si cita anche la possibilità di dedicare appositi spazi a colture, con lo scopo di produrre biomassa (sono esempi coltivazioni di: mais, grano e bietole). [1]

Biogas	CH <sub>4</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)	N <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	H <sub>2</sub> S (ppm)	Benzene (mg m <sup>-3</sup> )	Toluene (mg m <sup>-3</sup> )
Landfills	45-62	24-40	1-17	1-2.6	15-427	0.6-35.6	1.7-287
Sewage digesters	58-65	33-40	1-8	< 1	0-24	0.1-0.3	2.8-11.8
Organic waste digesters	60-70	30-40	1	1-5	10-180	0.1-1.1	3-7

Figura 1. Composizione in percentuale di biogas derivante da tre diverse fonti

Il primo documento pubblicato riguardante la digestione anaerobica risale al 1891 in Francia; nel 1895 fu costruito il primo impianto per la produzione di biogas, con lo scopo di trattare i rifiuti urbani in Inghilterra, quanto prodotto veniva impiegato per la produzione di luce e calore. Le prime applicazioni commerciali di impianti a biogas sono state utilizzate a partire dalla metà del ventesimo secolo. Con l'aumento degli impianti e il miglioramento in termini di efficienza la produzione ha raggiunto la scala industriale, in maniera particolare in Europa. [3]

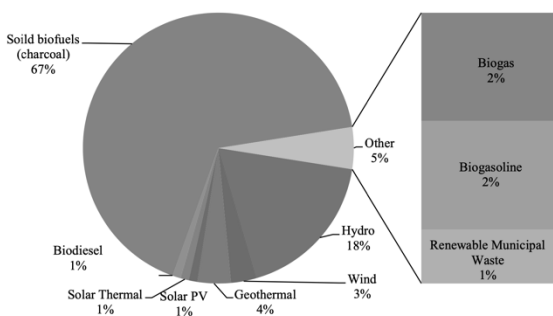


Figura 2. Fonti energetiche a livello globale

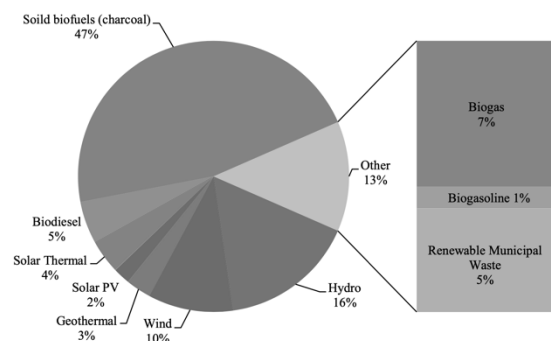


Figura 3. Fonti energetiche paesi EU-28

Il biogas è una fonte di energia rinnovabile e la sua domanda, ad oggi, è in continuo aumento. Le motivazioni principali sono l'inquinamento ambientale causato dai gas serra (High Greenhouse Gases – GHGs) prodotti dall'utilizzo di combustibili fossili e dalla ricerca di indipendenza energetica di ciascuno stato.

La produzione e l'utilizzo di questa energia sostenibile derivante da Biomassa ha numerosi vantaggi dal punto di vista dell'impatto ambientale: riduce le emissioni di metano (CH<sub>4</sub>) nell'ambiente, è utilizzato come sostituto dei combustibili fossili, riduce le emissioni di anidride carbonica (CO<sub>2</sub>) derivante dalla combustione e può essere utilizzato in tutte le apparecchiature a metano dopo opportuni trattamenti volti alla purificazione.

Il metano, così come l'Idrogeno e il monossido di Carbonio, può essere bruciato o ossidato per mezzo di ossigeno. La quantità di energia che viene rilasciata da questa reazione fa sì che il biogas possa essere usato per la produzione di: energia elettrica, carburante per veicoli, impianti di riscaldamento e produzione di Idrogeno (H<sub>2</sub>). Vedi Figura 4.

È stato stimato che l'utilizzo globale di biogas compresso (bio-CNG) all'interno di carburanti per veicoli aumenterà dal 2% (dato rilevato al 2017) al 27% nel 2050. [1]

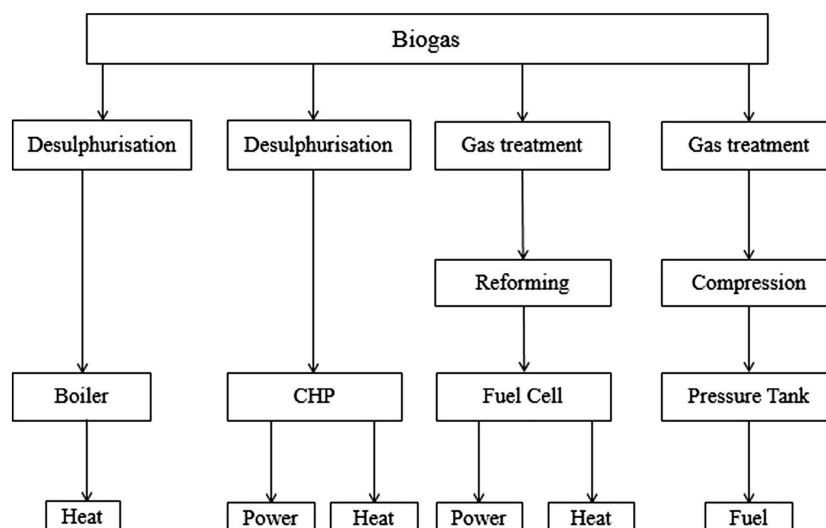


Figura 2. Potenziali applicazioni del biogas

Le tecnologie odierne utilizzate a livello industriale per la purificazione di biogas sono: adsorbimento a pressione oscillante (pressure swing adsorption – PSA), lavaggio con acqua ad alta pressione, lavaggio con solventi organici, lavaggio con ammine, separazione con membrane e separazione criogenica. Figura 5. Nonostante i numerosi metodi, la ricerca si sta ancor'oggi occupando di

risolvere problematiche legate alla purificazione come l'utilizzo di membrane per la rimozione di composti organici volatili (VOC) e la rimozione di silossani dal biogas grezzo. [1]

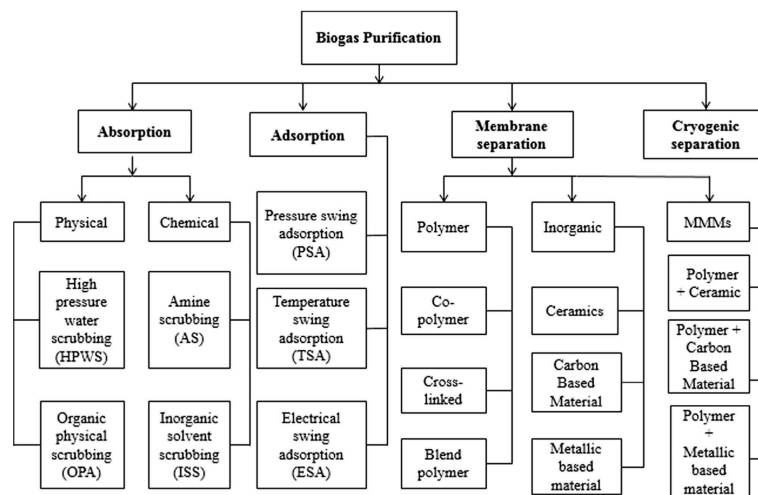


Figura 3. Attuali tecnologie per la purificazione del biogas



## **Le fonti**

Dalla crisi energetica negli anni settanta del millenovecento, l'interesse nella produzione di biomassa per scopi energetici è andata aumentando.

È, tuttavia, importante tenere conto del fatto che la produzione di bioenergia su larga scala potrebbe comunque richiedere notevoli quantità di combustibile fossile (per le attrezzature agricole) ed indurre un incremento di fertilizzanti e pesticidi.

Considerando anche gli effetti dannosi sul suolo di determinate coltivazioni protratte nel tempo, è fondamentale far sì che le conseguenze negative, dirette e indirette, non superino l'effetto positivo dato dall'abbandono del combustibile fossile tradizionale a favore della bioenergia.

## **Biomassa da colture energetiche**

Colture di prima generazione per la produzione di biocombustibili e bioenergie (esempio: mais, barbabietola da zucchero, girasole o grano) sono controverse a causa della competizione con la produzione di alimenti/mangimi, perdita di biodiversità e deforestazione. Attualmente tutta la produzione commerciale di biocarburanti utilizza però solo tecnologie di prima generazione. Colture di seconda e terza generazione sono ancora in fase di sviluppo e ciò è dovuto a fattori come i costi derivati e le politiche agricole. [2]

Di seguito viene valutata la coltivazione di tre diverse colture energetiche:

- > Frumento (*Triticum* spp. L.)
- > Triticale (*Triticosecale* Wittmack)
- > Mais (*Zea mays* L.)

Sono state considerate cinque classi diverse di mais (mais 300, 400, 500, 600 e 700).

Tutte le coltivazioni sono situate in Lombardia e nella Pianura Padana. Nel dettaglio tre aziende agricole dedite alla produzione estensiva: azienda agricola Muraro (Maleo, Lodi), azienda agricola Dotti (Lodi) e l'azienda agricola Eurosia (Formigara, Cremona).

Le condizioni atmosferiche di quest'area sono caratteristiche di un clima tipico Mediterraneo soggetto anche all'influenza di un clima centro europeo. Le precipitazioni sono concentrate in autunno e primavera e la temperatura media annua è di 12°C. La precipitazione media annua è di 745mm ed il terreno è composto dal 52% di sabbia, 30% limo e 17% argilla [2].

Si considerano i dati per la produzione di queste colture energetiche quantificando l'effetto ambientale, individuando i migliori sistemi di gestione al fine di ottenere biomasse a fini energetici con il migliore rapporto qualità resa.

I sistemi agricoli analizzati possono essere suddivisi in tre fasi principali: preparazione del terreno, accrescimento delle colture e raccolta della biomassa. Nella Figura 6. è possibile osservare le procedure di lavorazione presenti all'interno delle tre diverse fasi.

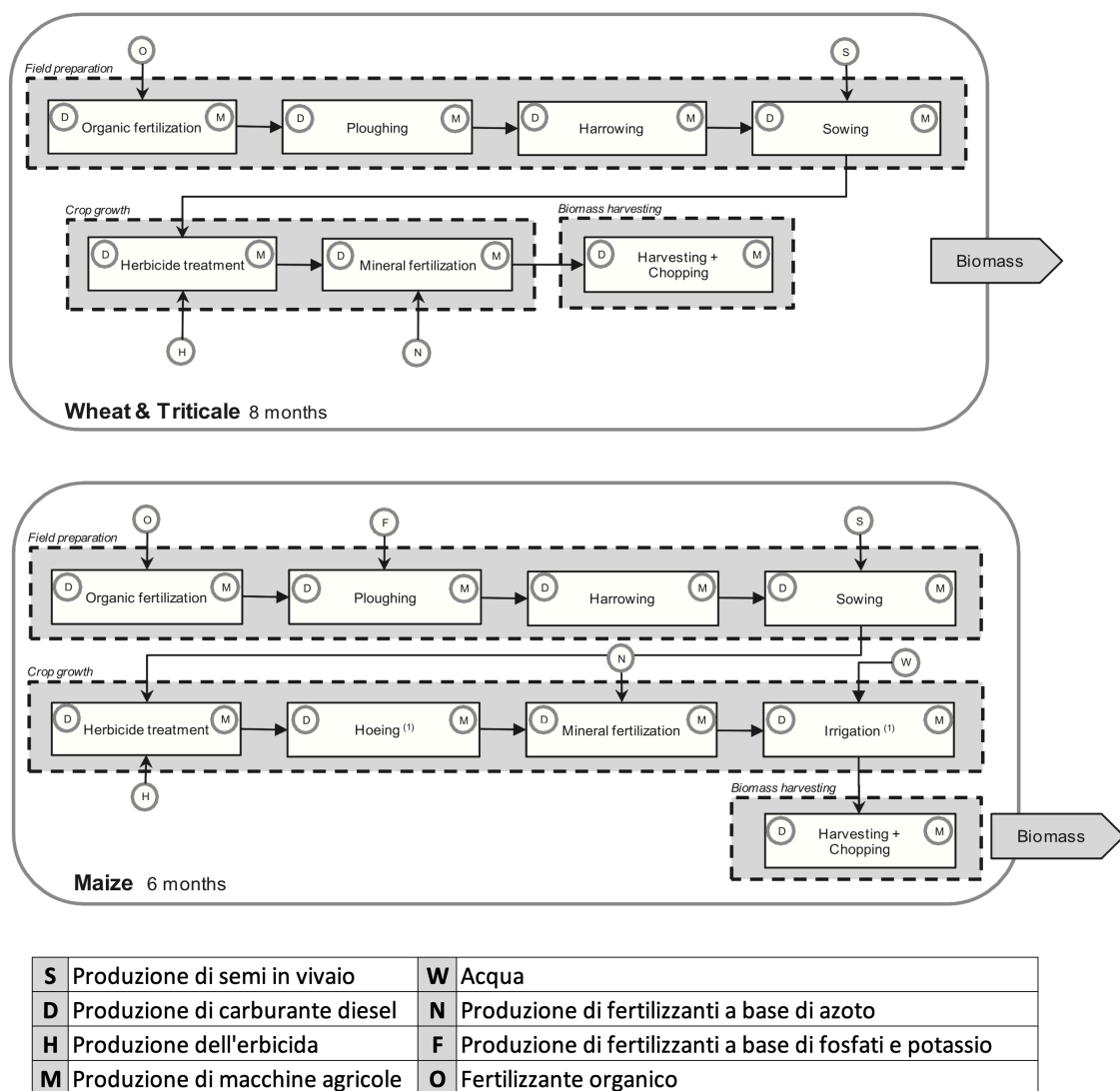


Figura 6. Schema a blocchi delle fasi di coltivazione di frumento mais e triticale per la produzione di biomassa per bioenergia

Frumento e triticale (ibrido di frumento e segale) sono coltivazioni invernali particolarmente adatte all'area della Pianura Padana, il mais è una coltura estiva che produce grano, l'utilizzo è legato in gran parte alla produzione di etanolo e mangimi per animali. Sono state ottenute grandi differenze sulla resa in biomassa e sul contenuto di umidità tra le diverse classi di mais: mais 300 15 t<sub>dry</sub>/ettaro

(66% di umidità), mais 400 17 t<sub>dry</sub>/ettaro (51% di umidità), mais 500 19 t<sub>dry</sub>/ettaro (62% di umidità), mais 600 29,3 t<sub>dry</sub>/ettaro (64% di umidità) e mais 700 26 t<sub>dry</sub>/ettaro (71% di umidità). [2]

I potenziali di impatto (o categorie di impatto) valutati sono:

- › Impoverimento abiotico (ADP)
- › Acidificazione (AP)
- › Eutrofizzazione (EP)
- › Riscaldamento globale (GWP)
- › Competizione terrestre (LC)
- › Impoverimento dello strato di ozono (ODP)
- › Formazione di ossidanti fotochimici (POFP)

Inoltre, è stata effettuata un'analisi energetica basata sulla domanda cumulativa di energia fossile e nucleare (CED).

Sono state analizzate le categorie di impatto tossicologico:

- › Tossicità per l'uomo (HP)
- › Eco-tossicità acquatica in acqua dolce (FEP)
- › Eco-tossicità acquatica marina (MEP)
- › Eco-tossicità terrestre (TEP)

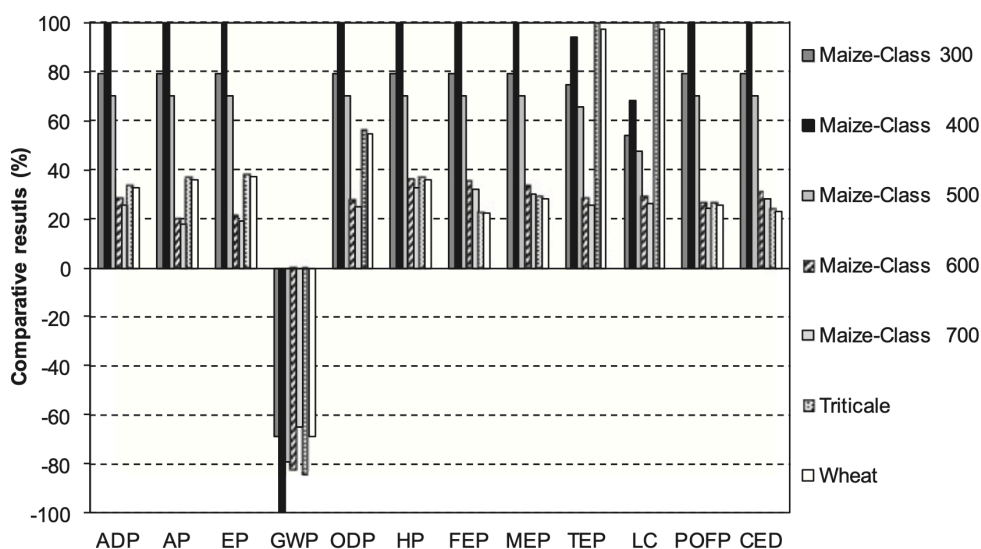


Figura 7. Risultati ambientali comparativi per le colture energetiche oggetto di valutazione

La classe di mais 400 ha mostrato gli impatti più elevati per tonnellata di biomassa umida raccolta tra le diverse colture energetiche valutate nella maggior parte delle categorie, ad eccezione del GWP che

ha mostrato il profilo migliore (dovuto all'elevata quantità di anidride carbonica assorbita e fissata nella biomassa durante la crescita). I parametri TEP ed LC presentano un impatto più significativo per triticale e frumento.

La classe di mais 700 ha mostrato il miglior risultato in quasi tutte le categorie di impatto (ADP, AP, EP, ODP, POFP, HP, TEP, LC); con miglioramento rispetto alla classe di mais 400 che vanno dal 68% all'82%. Si nota una riduzione del 72% in termini di fabbisogno energetico (rispetto alla classe di mais 400), principalmente a causa dell'elevata resa in biomassa rispetto alle altre classi di mais. Triticale e grano sono buone alternative in termini di FEP, MEP e CED.

Nonostante il sistema di gestione delle colture frumento e triticale sia stato il medesimo, la resa del triticale è stata di poco inferiore, questo fatto potrebbe essere influenzato da fattori come AP o ODP in cui le due colture differiscono di circa un punto percentuale [2].

### **Biomassa da rifiuti**

Tra le varie tipologie di biomassa utilizzate per la produzione di biogas quella dei rifiuti rappresenta un'ampia fetta; il requisito fondamentale è che i suoi componenti siano carboidrati, proteine e grassi. Il substrato selezionato deve essere adatto al processo di fermentazione ed il digestato deve contenere un alto valore nutritivo oltre ad essere privo di agenti patogeni e metalli pesanti qualora venga utilizzato come fertilizzante.

I substrati utilizzati per la produzione di biogas si dividono in tre categorie principali: rifiuti derivanti dall'agricoltura, rifiuti urbani e rifiuti industriali. Un'ulteriore biomassa detta acquatica è un substrato promettente per la produzione di biogas.

#### › Rifiuti dall'agricoltura

Dai dati rilevati per l'Unione Europea, risulta che l'industria agricola genera 90 milioni di tonnellate di rifiuti ogni anno, questo si traduce nell'emissione in atmosfera di 50/100 m<sup>3</sup> di CO<sub>2</sub> e di 90/140 m<sup>3</sup> di CH<sub>4</sub> per tonnellata di rifiuto solido organico degradato. Il tipo di rifiuti a cui si fa riferimento sono letame animale e fanghi, scarti delle colture (combinati di miscele lignocellulosiche, cellulosa e lignina) e sottoprodotti agricoli. Studi sulle diverse colture energetiche hanno permesso di classificarle nella Figura 8. a seconda del potenziale rendimento di metano [3;7].

Agricultural waste and energy crops	Methane yield (m <sup>3</sup> /kg VS)
Grass	0.298–0.467
Clover grass	0.290–0.390
Hemp	0.355–0.409
Sunflower	0.154–0.400
Oilseed rape	0.240–0.340
Potatoes	0.275–0.400
Sugar beet	0.236–0.381
Fodder beet	0.420–0.500
Barley	0.353–0.658
Triticale	0.337–0.555
Alfalfa	0.340–0.500
Ryegrass	0.390–0.410
Nettle	0.120–0.420
Straw	0.242–0.324
Leaves	0.417–0.453
Cattle manure	0.200
Pig manure	0.300
Poultry manure	0.300

Figura 8. Rendimento nella produzione di metano per alcuni rifiuti dell'industria agricola e coltivazioni energetiche

Lo stoccaggio di rifiuti derivanti dall'agricoltura ne permette il possibile utilizzo tutto l'anno, tuttavia, studi condotti sul letame bovino hanno riportato che il potenziale di metano risulta diminuito del 37% dopo 120 giorni dallo stoccaggio. La percentuale di cellulosa e lignina nella materia prima aumenta con la maturità mentre le proteine, i lipidi e gli zuccheri diminuiscono. Durante il processo di digestione anaerobica, i substrati che contengono materiale altamente lignocellulosico sono difficili da digerire. Per raggiungere una resa elevata la materia prima deve quindi possedere un basso contenuto di lignina e un alto contenuto di carboidrati. I rifiuti agricoli si differenziano dalle colture energetiche, queste vengono coltivate con il solo fine di produrre biogas mentre i rifiuti dell'agricoltura sono veri e propri scarti (prodotti secondari di un secondo processo).

#### > Rifiuti solidi urbani

I rifiuti solidi urbani si riferiscono ai rifiuti domestici organici e ai residui di cibo, in genere, provengono dagli utilizzatori finali dei prodotti e hanno un ricco valore nutritivo organico. A livello globale, ogni anno vengono generati circa 1,3 miliardi di tonnellate di rifiuti solidi urbani. Si prevede che tale importo salirà a 2,2 miliardi di tonnellate all'anno entro il 2025 e ad oggi generano circa il 5% delle emissioni totali di CO<sub>2</sub> e il 9% delle emissioni di CH<sub>4</sub>. Sono costituiti per il 46% da avanzi di cibo, per il 17% da carta, per il 10% da plastica e per il 27% da altri rifiuti. A seconda della tipologia di rifiuto il rapporto carbonio/azoto è variabile, per gli avanzi di cibo è inferiore a 20 mentre per la carta è superiore a 100 [3].

Substrate types	Methane yield (m <sup>3</sup> /kg VS)
Municipal solid waste and activated sludge	0.340
Municipal solid waste and activated sludge	0.376
Municipal solid waste and sewage sludge	0.395
Hydromechanically separated municipal solid waste and sewage sludge	0.333
Municipal solid waste and activated sludge	0.287
Municipal solid waste and biogas plant inoculum (cow manure and food waste)	0.401
Municipal solid waste and pig manure	0.377
Municipal solid waste and cattle manure	0.443
Municipal solid waste and food waste	0.396
Municipal solid waste and agricultural waste (rice straw)	0.403
Municipal solid waste and wastewater (leachate)	0.232

Figura 9. Studi sul processo co-digestione dei rifiuti solidi urbani e sulla resa in metano

Per questa categoria di rifiuti che prevede tipicamente solidi di grandi dimensioni e con una composizione eterogenea la soluzione migliore è l'utilizzo di un co-digestore dove vengono mescolati con fanghi di depurazione, letame e acque reflue.

#### > Rifiuti industriali

Le industrie lavorando materie prime producono enormi quantità di sottoprodotti, rifiuti e residui che possono essere utilizzati per la produzione di biogas. Possono essere suddivisi in due gruppi principali: rifiuti dell'industria alimentare e altri rifiuti industriali come quelli derivati dalla lavorazione della cellulosa e della carta, rifiuti industriali tessili e rifiuti delle raffinerie petrolchimiche [3;7].

Spesso la sfida più complessa è conoscere la composizione di questi rifiuti, possono essere presenti metalli pesanti, agenti patogeni e impurità che potrebbero inibire il processo di digestione. Qualora vengano usati questi rifiuti è concreto anche il rischio di inquinamento di persone e ambiente qualora il digestato venisse usato come fertilizzante.

#### > Rifiuti alimentari

L'industria alimentare comprende: frutta, verdura, olio commestibile, produzione lattiero-casearia, produzione di carne, zucchero, birra e diverse bevande. Il loro contenuto di scarto è ricco di grassi, proteine e carboidrati, in particolare le industrie di produzione che si occupano di prodotti come latte e derivati. In letteratura, i rifiuti alimentari possono essere suddivisi in tre sezioni principali: rifiuti alimentari riferiti ad alberghi, ristoranti, mense e aziende, rifiuti di cucine riferiti a cucine domestiche e commerciali e rifiuti ortofrutticoli riferiti ai mercati.

Questi rifiuti hanno alcuni vantaggi come il basso costo per la raccolta e il trasporto, l'elevata biodegradabilità e l'alto rendimento di metano. La biodegradabilità dipende, tra gli altri parametri,

dal contenuto di derivati di lignocellulosa ed è per questo che in genere la frutta si degrada più lentamente della verdura. Queste due categorie di rifiuti alimentari restano comunque le più redditizie in termini di metano prodotto ed anche le più biodegradabili.

Substrate types	Methane yield (m <sup>3</sup> /kg VS)
Food waste	0.440–0.480
Kitchen waste	0.700
Orange peel	0.230–0.332
Strawberry extrudate	0.285–0.339
Onion skin	0.400
Carrot petioles	0.309
Potato skin	0.267
Cucumber waste	0.143
Fluted pumpkin peel	0.161–0.164
Banana skin	0.277

Figura 10. Rendimento nella produzione di metano per alcuni rifiuti dell'industria alimentare

Rifiuti come la buccia d'arancia o gli scarti di cipolla e di fragole hanno un pH acido (circa 3,50) questo influenza il processo in quanto l'acidificazione inibisce la digestione, devono quindi essere usati in presenza di un co-substrato. Al pari di pH acido anche la presenza di cloruro di sodio (NaCl) all'interno della biomassa funge da inibitore per le reazioni di acidogenesi e metanogenesi. Vedi Figura 10. [3,4].

### **Biomassa acquatica**

La biomassa acquatica è considerata una materia prima di terza generazione, può essere usata in diversi ambiti ed uno di questi è la produzione di biocombustibili come il biogas. Esistono due macrogruppi di biomassa acquatica la prima è una macro-alga nota come alga marina (contenente zuccheri e carboidrati in elevate quantità), il secondo gruppo sono le microalghe, organismi microscopici unicellulari. Le microalghe verdi possono essere considerate un efficiente substrato, poiché contengono lipidi e hanno una ottima capacità di svolgimento della fotosintesi, il loro svantaggio principale è il basso contenuto di sostanza secca. L'aggiunta di Goethite (minerale costituito da idrossido di ferro) in un digestore anaerobico di biomassa algale aumenta la resa di metano fino al 24,1% a causa dell'influenza dei microorganismi metanogeni [3;7].

## La produzione

### Digestione anaerobica

La produzione di metano da digestione anaerobica coinvolge quattro fasi principali: idrolisi, acidogenesi, acetogenesi e metanogenesi. Può avvenire in reattori di dimensioni molto ridotte, come bottiglie di siero da laboratorio di 100 mL fino a grandi digestori da 10.000 m<sup>3</sup> che sono di normale utilizzo a livello industriale.

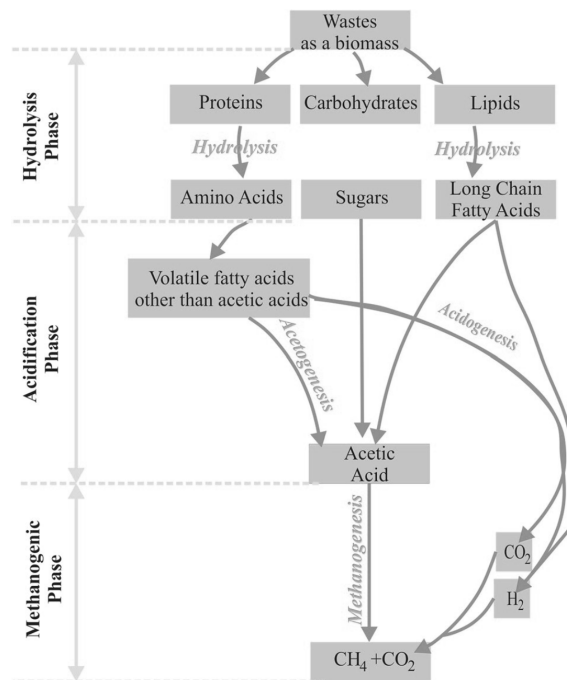


Figura 11. Schema riassuntivo dei diversi step di digestione anaerobica

L'idrolisi prevede che carboidrati complessi, grassi e proteine vengano idrolizzati alla forma monomerica dagli esoenzimi e dalla cellulosa batterica. Per mezzo dell'acidogenesi i monomeri vengono ulteriormente degradati in acidi a catena corta come: acido acetico, acido propionico, acido butirrico, acido valerico, acido capronico, alcoli, idrogeno e anidride carbonica. Durante l'acetogenesi gli acidi a catena corta vengono convertiti in acetato, idrogeno e anidride carbonica. Quasi un terzo della formazione di metano è dovuto alla riduzione della anidride carbonica da parte dell'idrogeno. Vedi Figura. 11. [5;10]

L'ottimizzazione del processo di digestione anaerobica prevede che tutti i microorganismi volti alla produzione di metano siano bilanciati nell'ambiente di reazione. Alcuni dei parametri regolatori di questa condizione sono il pH, la temperatura, il mescolamento, il substrato e il rapporto C/N. La digestione è un processo molto lento, in caso di cambiamenti di substrato o temperatura occorrono almeno tre settimane affinché i microorganismi si adattino al nuovo ambiente di reazione.



Le condizioni di pH neutro (6.5-7.5) favoriscono la produzione di biogas poiché la maggior parte dei metanogeni cresce in questo intervallo. I microorganismi crescono prevalentemente in condizioni mesofile, tuttavia per i metanogeni una temperatura più alta risulta favorevole. Una miscelazione eccessiva stressa i microorganismi ma senza questa si andrebbe incontro ad una formazione incontrollata di schiume. Il substrato, che deve essere equilibrato in termini di carbonio e altri nutrienti, deve essere digerito lentamente altrimenti supporti facilmente degradabili possono causare un improvviso aumento di acidità. La concentrazione di solidi nel digestore dovrebbe variare tra il 7% e il 9%. La dimensione delle particelle non è un fattore particolarmente rilevante rispetto ad altri parametri come il pH e la temperatura. Tuttavia, la dimensione delle particelle utilizzate influisce sulla degradazione e, in definitiva, sul tasso di produzione di biogas. [5]

### Digestori: tipologie e funzionamento

La tipologia di digestore (o fermentatore) dipende dalla collocazione geografica dell'impianto, dalla disponibilità del substrato e dalle condizioni climatiche. La scelta è spesso complessa e frutto di compromessi, soprattutto se l'utilizzo è di tipo domestico. I modelli di maggiore utilizzo sono quelli a cupola fissa sviluppati in Cina, il modello a tamburo galleggiante sviluppato in India e i Plug Flow divenuti di utilizzo comune per la loro versatilità e facilità di operazione.

#### › Digestore a cupola fissa

Può assumere dimensioni variabili da pochi fino a centinaia di m<sup>3</sup> e solitamente si trova sotto terra. Viene riempito attraverso il tubo di ingresso fino a quando il livello raggiunge il limite inferiore della camera di espansione. Il biogas prodotto si accumula nella porzione superiore del digestore (detta porzione di stoccaggio). La differenza di livello tra il liquame all'interno del digestore e la camera di espansione crea una pressione del gas prodotto che esercita una pressione su parte del substrato nella camera di espansione. Il liquame rifluisce nel digestore immediatamente dopo il rilascio del gas. [5]

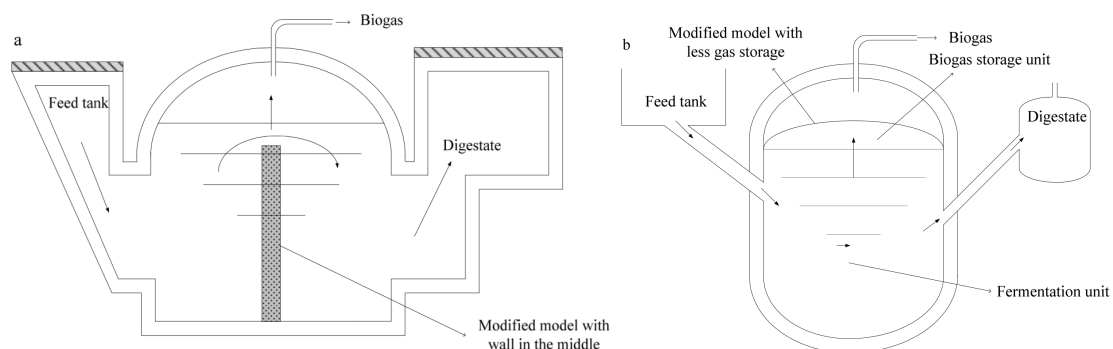


Figura 12. a) Schema di un digestore a cupola fissa modello Janta e b) un digestore a cupola fissa modello Deenbandhu

### › Digestore a tamburo galleggiante

L'ideazione di tale modello è datata, risale al 1962, nonostante ciò è ancora molto utilizzato a scopo domestico in India. Il design include un tamburo mobile capovolto, posizionato su un digestore sagomato. Sul digestore è posizionato un tamburo d'acciaio rovesciato che funge da serbatoio di stoccaggio, questo può muoversi su e giù a seconda della quantità di gas accumulato nella parte superiore del digestore. Il peso di questo tamburo rovesciato applica la pressione necessaria per far fluire il gas attraverso le tubazioni. Viene prodotto biogas a pressione costante e volume variabile, dalla posizione del tamburo sarà facile rilevare la quantità di prodotto presente sotto il tamburo, deve essere verniciato a intervalli costanti per evitare la formazione di ruggine. [5]

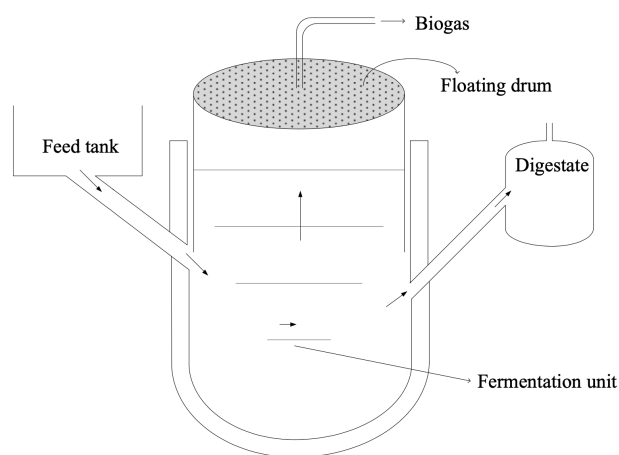


Figura 13. Schema di un digestore a tamburo galleggiante

### › Digestore Plug Flow

Digestori tubolari o Plug Flow, rispondono alla problematica principale dei due modelli precedenti di essere difficili da trasportare a seguito dell'installazione. Sono stati sviluppati in modo da poter essere portatili e costruiti sopra il terreno. Sono costituiti da un serbatoio stretto e lungo con un rapporto lunghezza/larghezza medio di 5:1. Hanno volume costante e producono biogas a pressione variabile, la dimensione varia da 2,4 a 7,5 m<sup>3</sup>. L'ingresso e l'uscita del digestore sono posti alle estremità opposte, posizionati sopra il livello del suolo, mentre le restanti parti del digestore sono interrate in posizione inclinata.

Quando il substrato fresco viene aggiunto, il digestato scorre verso l'uscita all'estremità opposta del serbatoio. La posizione inclinata permette di separare longitudinalmente acidogenesi e metanogenesi, realizzando così un sistema bifasico. Al fine di evitare sbalzi di temperatura durante la notte e mantenere la temperatura di processo, sopra il digestore viene posizionato un tetto per la copertura che funge da isolante sia di giorno che di notte. [5]

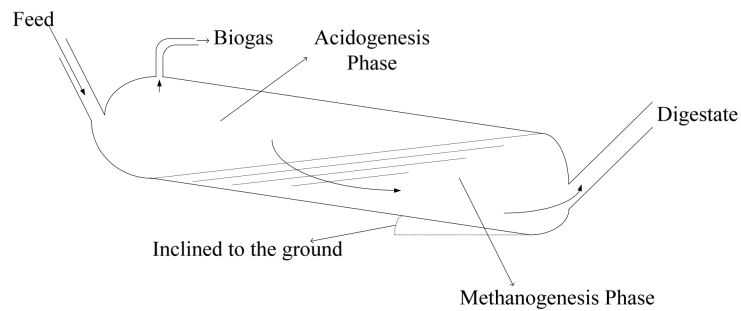


Figura 14. Schema di un digestore Plug Flow

## Tecniche di purificazione

Le diverse tecnologie utilizzate per la purificazione hanno il fine principale di separare la  $\text{CO}_2$  dal biogas prodotto mentre la fase di pre-purificazione è necessaria per ridurre eventuali concentrazioni elevate di contaminanti come  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  e silossani. Le tecniche principali sono riportate in modo schematico nella Figura 5.

### › Adsorbimento a pressione oscillante (PSA)

Il processo di adsorbimento comporta il trasferimento dal soluto nel flusso di gas, sulla superficie di un materiale adsorbente per mezzo di forze fisiche o di Van der Waals. Gas indesiderati come la  $\text{CO}_2$  vengono separati dal biogas a pressione elevata utilizzando materiali adsorbenti. Successivamente, la pressione viene ridotta per desorbire i gas. La rimozione di  $\text{H}_2\text{S}$  è un passaggio primario perché è considerato tossico per il processo e l'assorbimento di questo gas è irreversibile. In questo processo è possibile raggiungere un'elevata concentrazione di metano (95–99%) a fronte però di elevati costi di gestione e manutenzione.

### › Adsorbimento a temperatura oscillante (TSA)

Il TSA richiede energia termica per rigenerare il materiale adsorbente (Il PSA usa energia di compressione); potrebbe essere un'opzione migliore se fosse disponibile una fonte di energia a basso costo. Microsfere di criogel di carbonio (CCM) e le microsfere di xerogel di carbonio (CXM) sono state identificate come materiali adsorbenti efficienti per il processo TSA grazie alla loro struttura altamente porosa e stabile.

### › Adsorbimento a elettricità oscillante (ESA)

Con l'ESA la rigenerazione avviene facendo passare elettricità attraverso l'adsorbente saturo, il calore generato dall'effetto Joule facilita il rilascio di  $\text{CO}_2$  (per l'adsorbente utilizzato è necessaria la conduttività elettrica, un esempio è il carbone attivo sviluppato come nuovo tipo di adsorbente semiconduttore con ampia area superficiale). [1]

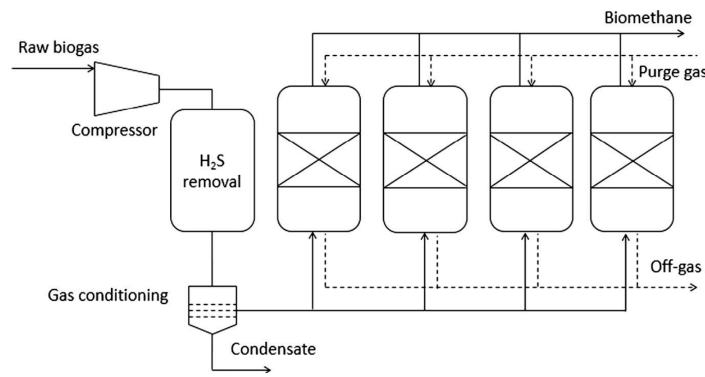


Figura 15. Schema di processo dell'adsorbimento a pressione oscillante

Scegliendo correttamente l'adsorbente, il processo può rimuovere le impurità dal biogas in modo selettivo o simultaneo. Materiali comunemente usati sono carbone attivo e zeoliti, scelti per la possibilità di ottenere diverse dimensioni dei pori che rendono possibile l'ingresso di una molecola a seconda della sua dimensione.

Le caratteristiche richieste affinché un materiale sia un buon adsorbente sono:

1. Superficie basica in modo da poter essere facilmente attratta dal gas acido  $\text{CO}_2$  (grazie alla diversa forza di interazione tra  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$  con la superficie dell'adsorbente).
2. I pori dell'adsorbente devono essere modificati in modo tale che la  $\text{CO}_2$  (diametro cinetico di 3,4 Å) possa penetrare facilmente nella struttura.
3. Il materiale dovrebbe essere facilmente rigenerabile o desorbito con una bassa richiesta di energia e avere una buona capacità di rimozione dell'umidità.

#### > Assorbimento

L'assorbimento dipende dalla solubilità di vari componenti del gas in un solvente liquido. Il biogas grezzo incontra un contro-flusso di liquido in una colonna che viene riempita con materiale inerte per aumentare l'area di contatto tra gas e liquido. Nell'upgrading (purificazione) del biogas, la  $\text{CO}_2$  è più solubile del  $\text{CH}_4$  in liquido, quindi il gas che lascia la colonna ha un'alta concentrazione di  $\text{CH}_4$  mentre il liquido in uscita dalla colonna ha una maggiore concentrazione di  $\text{CO}_2$ . Il lavaggio con acqua ad alta pressione (HPWS) e il lavaggio fisico organico (OPS) sono tipi di assorbimento fisico, mentre il lavaggio con ammine (AS) e il lavaggio con solvente inorganico (ISS) sono tipi di assorbimento chimico. [1]

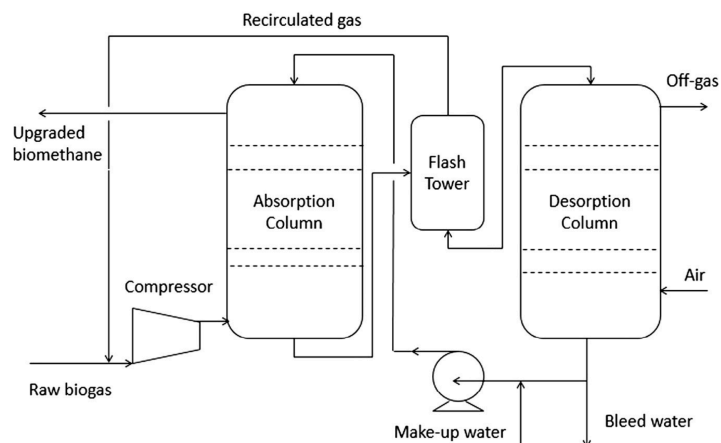


Figura 16. Schema di processo del lavaggio ad alta pressione con acqua (HPWS)

Il lavaggio ad alta pressione con acqua (HPWS) è la tecnologia più comune e consolidata per rimuovere  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{S}$  dal biogas, poiché questi sono più solubili in  $\text{H}_2\text{O}$  rispetto al  $\text{CH}_4$ . La pressione di esercizio dell'HPWS è di 10 bar, il biogas viene immesso sul fondo di una colonna impaccata mentre l'acqua viene alimentata in controcorrente. L'assorbimento fisico dei gas è regolato dalla legge di Henry, che afferma che a temperatura costante, la quantità di ogni gas disciolto è direttamente proporzionale alla sua pressione parziale nel flusso di gas. Si osserva inoltre che la solubilità della  $\text{CO}_2$  può essere aumentata a bassa temperatura.

Le acque reflue che escono dal fondo della colonna di lavaggio sono saturate di  $\text{CO}_2$  o  $\text{H}_2\text{S}$  ed è presente anche una piccola quantità di  $\text{CH}_4$  che può essere recuperata. viene poi rigenerato il solvente e fatto ricircolare alla colonna di assorbimento. La rigenerazione si ottiene riducendo la pressione o mediante stripping con aria in una colonna di desorbimento. Lo stripping con aria non è consigliato quando il livello di concentrazione di  $\text{H}_2\text{S}$  è elevato poiché l'acqua viene rapidamente inquinata da zolfo elementare che provoca corrosione e problemi di funzionamento.

#### Lavaggio fisico con solvente organico (OPS)

Il principio è il medesimo del lavaggio con acqua, ma viene utilizzato un solvente organico (come metanolo o N-metil pirrolidone). Il biogas viene compresso a 6–8 bar e raffreddato prima di essere iniettato nella parte inferiore della colonna di assorbimento. Il solvente organico entra nella porzione alta della colonna per creare un flusso in controcorrente di gas e liquido, anch'esso viene raffreddato prima di essere iniettato per mantenere la temperatura nella colonna di assorbimento intorno ai  $20\text{ }^\circ\text{C}$  (il solvente viene rigenerato a  $40\text{ }^\circ\text{C}$ ). Sebbene questo processo sia caratterizzato da una maggiore efficienza rispetto al lavaggio con acqua in termini di separazione della  $\text{CO}_2$ , è necessaria più energia per la rigenerazione del solvente. Inoltre, il costo dei solventi organici è significativamente superiore a quello dell'acqua.

### Processo di lavaggio chimico (CSP)

L'assorbimento chimico comporta una reazione reversibile tra le sostanze assorbite e il solvente, tipicamente ammine nel caso di assorbimento di gas acidi (dietanolamina (DEA), monoetanolamina (MEA) e metil dietanolamina (MDEA)). La  $\text{CO}_2$  nel biogas reagisce con l'ammina e viene assorbita. Questa è una reazione esotermica, che aumenta la temperatura dell'assorbitore da 20–40 a 45–65 °C (in questo caso la reazione di assorbimento è favorita con l'aumento della temperatura). La parte inferiore della colonna di stripping è dotata di un ribollitore a 120–150 °C dove viene portata ad ebollizione la soluzione di ammina. Il ribollitore fornisce il calore di reazione per il rilascio di  $\text{CO}_2$  dalla soluzione di ammina di scarto e rigenera la soluzione.

Il lavaggio con solvente inorganico (ISS) impiega generalmente una soluzione acquosa di sali alcalini come sodio, potassio, ammonio e idrossido di calcio.

### > Separazione con membrana (MS)

La membrana funge da barriera permeabile che consente il passaggio di composti specifici e il controllo della loro permeabilità in base alle forze motrici applicate (differenza di concentrazione, pressione, temperatura e cariche elettriche di specie diverse). Per la purificazione del biogas, la  $\text{CO}_2$  permea attraverso la membrana mentre il  $\text{CH}_4$  rimane sul lato di ingresso come retentato (Figura 17.). È un processo che prevede una bassa richiesta di energia ed è composto da un'apparecchiatura compatta. La maggior parte delle membrane commerciali sono polimeriche costituite da materiali organici come polisulfone (PSf), poliimmide (PI), policarbonato (PC) e acetato di cellulosa. [1]

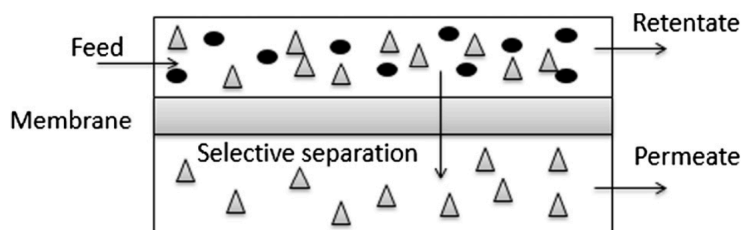


Figura 17. schema di processo di una separazione mediante membrana

Le membrane inorganiche offrono, rispetto alle membrane organiche, maggiore resistenza meccanica, stabilità termica e resistenza ad altre sostanze chimiche. Alcuni esempi sono zeolite, carbone attivo, silice e nanotubi di carbonio (CNT). Gli sviluppi finora si sono concentrati sull'integrazione di membrane sia polimeriche che inorganiche note come membrane a matrice mista (MMM), membrane composite costituite da materiali polimerici come fase continua con particelle inorganiche come fase dispersa.

### > Separazione Criogenica (CS)

La separazione criogenica del biogas si basa sul principio per il quale vari gas come  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{S}$  si liquefanno in diverse condizioni di pressione e temperatura. Il processo richiede temperature molto basse ( $-170\text{ }^\circ\text{C}$ ) e alte pressioni (80 bar), fattore che genera costi di capitale e operativi elevati. Il punto di ebollizione del  $\text{CH}_4$  a 1 atm è  $-161,5\text{ }^\circ\text{C}$ , inferiore al punto di ebollizione della  $\text{CO}_2$  che è  $-78,2\text{ }^\circ\text{C}$  e consente così la separazione mediante liquefazione.

Queste condizioni di funzionamento vengono mantenute utilizzando una serie di compressor e scambiatori di calore.

In generale, in un sistema criogenico sono previsti quattro passaggi:

1. Umidità,  $\text{H}_2\text{S}$ , particelle di polvere, alogeni, silossani e altri componenti indesiderati vengono rimossi dal biogas grezzo.
2. Il biogas viene compresso a 1000 kPa e successivamente raffreddato a  $-25\text{ }^\circ\text{C}$ .
3. Il biogas viene ulteriormente raffreddato fino a  $-55\text{ }^\circ\text{C}$  e la  $\text{CO}_2$  liquefatta viene rimossa dalla miscela di gas.
4. Il flusso di gas rimanente viene ulteriormente raffreddato fino a  $-85\text{ }^\circ\text{C}$ , dove la  $\text{CO}_2$  raggiunge una forma solida e viene rimossa.

La separazione criogenica può essere utile se l'obiettivo è produrre biometano liquefatto (LBM) e gas naturale liquido (GNL). [1]

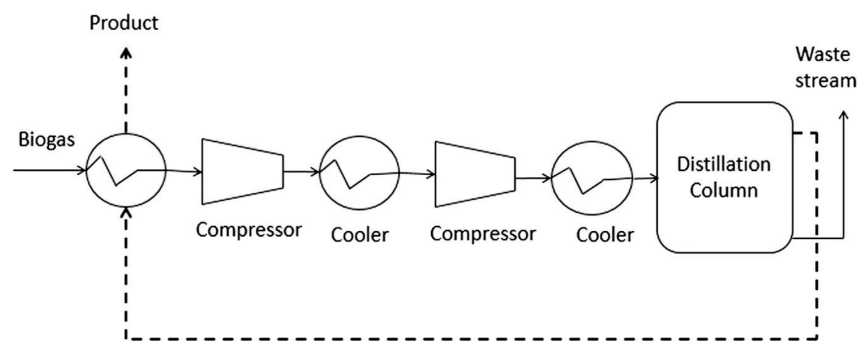


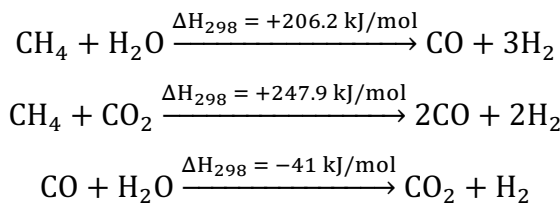
Figura 18. Schema di processo di una separazione criogenica

## Gli utilizzi

### **Principali utilizzi del biogas e di bio-CNG**

#### › Produzione di H<sub>2</sub> da biogas

Il reforming del biogas su catalizzatori supportati è un metodo interessante per produrre Idrogeno con un processo rispettoso dell'ambiente [9]. L'uso del biogas invece del CH<sub>4</sub> di derivazione fossile, è un metodo per ridurre l'emissione di CO<sub>2</sub>, l'H<sub>2</sub>S è però velenoso per il catalizzatore a base Nichel (Ni), quindi deve essere rimosso prima del processo di reforming. Attualmente, l'Idrogeno derivato dal biogas viene utilizzato nel campo delle celle a combustibile che convertono efficacemente l'H<sub>2</sub> in elettricità a livello commerciale. Lo svantaggio principale del processo di reforming per questa applicazione, è la formazione di monossido di carbonio (CO) come sottoprodotto gassoso; bastano, infatti, 50 ppm di CO per avvelenare gli elettrodi: ciò rende necessari trattamenti di purificazione.



#### › Iniezione di biogas nelle reti del gas naturale

L'utilizzo del biogas come sostituto del gas naturale ha acquisito un'importanza significativa negli ultimi anni a causa dell'esaurimento e dello scarso rapporto qualità prezzo delle risorse. La purificazione del biogas volta ad ottenere qualità equivalente a quella del gas naturale è fondamentale per la sua immissione nelle reti del gas naturale esistenti. Svezia, Germania, Svizzera e Francia hanno stabilito i propri standard per l'iniezione di biogas nelle reti del gas naturale per evitare la corrosione delle apparecchiature. Questi standard possono essere mantenuti utilizzando i processi di upgrading del biogas esistenti [Pagina 23-27].

#### › Biogas per la produzione di calore e vapore

Nella maggior parte dei paesi in via di sviluppo, il biogas viene utilizzato per cucinare e per l'illuminazione. Un possibile utilizzo è legato anche alla produzione di vapore in diverse applicazioni industriali, come combustibile all'interno delle caldaie. La combustione in caldaia è una tecnologia affidabile perché il biogas può essere utilizzato con una pressione di circa 8–25 mbar, normalmente può essere utilizzato senza purificazione, tuttavia, è necessario considerare un livello di H<sub>2</sub>S inferiore a 1000 ppm per evitare la corrosione della caldaia.



› Conversione da biogas a Bio-CNG

Dopo la rimozione dei componenti indesiderati dal biogas ed aver ottenuto percentuali prossime a 97% di CH<sub>4</sub>, può essere convertito in gas naturale biocompresso (bio-CNG) a 20-25 MPa. La compressione riduce il volume di accumulo con alta energia e pressione, l'alto potere calorifico e il prodotto altamente prezioso del bio-CNG giustificano il costo elevato causato dalla compressione. La compressione permette la conversione del biogas in bio-CNG mantenendone invariate le proprietà.

› Bio-CNG come carburante per veicoli

Il riscaldamento globale, la crisi energetica e l'aumento del costo dei combustibili fossili sono le forze trainanti per lo sviluppo di combustibili alternativi per veicoli. Il biometano compresso ha le stesse proprietà del CNG in termini di prestazioni del motore, consumo di gas ed efficienza (se utilizzato come carburante).

L'etano e il propano nel CNG hanno energie di attivazione inferiori rispetto al metano, fornendo una migliore combustione rispetto al bio-CNG. Di conseguenza, il bio-CNG fornisce emissioni di CO leggermente superiori se utilizzato come carburante per veicoli rispetto al CNG. non vi è alcuna differenza significativa nel risparmio di carburante tra biogas (24,11 km/kg) e CNG (24,38 km/kg). Il bio-CNG ha un grande potenziale per diventare uno dei combustibili per veicoli più sostenibili, economici ed ecologici nel prossimo futuro. Per i mezzi più pesanti, l'uso del bio-CNG è ancor più vantaggioso perché ha un potere calorifico più elevato e si ha una riduzione del 63% delle emissioni di GHG rispetto a qualsiasi altro combustibile.

Fuel	CO (g/km)	HC (g/km)	NO <sub>x</sub> (g/km)	CO <sub>2</sub> (g/km)	Particulates (g/km)	Calorific value (kJ/kg)
Diesel	0.20	0.40	9.73	1053	0.100	44,800
Natural Gas	0.40	0.60	1.10	524	0.22	50,000
Biogas	0.08	0.35	5.44	223	0.5	35,000
Bio-CNG	0.02	0.12	0.48	100	0.1	52,000

Figura 19. Emissioni di gas da veicoli pesanti usando differenti tipologie di carburanti

Già nel 2015, in Svezia, veniva utilizzato il 73% di biometano nei veicoli alimentati a metano, ad oggi questo stato mira a realizzare un sistema di trasporto su strada indipendente dai combustibili fossili entro il 2030 e un sistema di trasporto completamente a emissioni zero entro il 2050.

## Stoccaggio di bio-CNG

Lo stoccaggio di bio-CNG o del normale CNG, può avvenire in serbatoi ermetici d'acciaio ed il fine è quello di poterlo conservare per un utilizzo futuro. È una fase importante perché influisce sull'efficienza di riempimento delle bombole, sul tempo di riempimento, sulla massa caricata, sulla sicurezza e sui costi di manutenzione del compressore. I dispositivi di stoccaggio più utilizzati sono riportati in Figura 20. [1]

Pressure	Storage device	Material
Low (0.138–0.414 bar)	Water sealed gas holder	Steel
Low	Gas bag	Rubber, plastic, vinyl
Medium (1.05–1.97 bar)	Propane or butane tanks	Steel
High (200 bar)	Commercial gas cylinders	Alloy

Figura 20. Dispositivi di storage comunemente usati a varie pressioni

La compressione avviene per mezzo di compressori multistadio di grandi dimensioni. Generalmente, un sistema di stoccaggio è costituito da diverse grandi bombole ad alta pressione, in modo che il bio-CNG fluisca verso il veicolo a pressioni differenziali. Nella stazione di rifornimento, il gas viene immagazzinato nel sistema di stoccaggio per una distribuzione più efficiente ed economica. Esistono due sistemi comuni per lo stoccaggio del bio-CNG nelle stazioni di servizio: a tampone e a cascata. La Figura. 21 mostra la sequenzialità di fasi per produrre, immagazzinare e distribuire il bio-CNG.

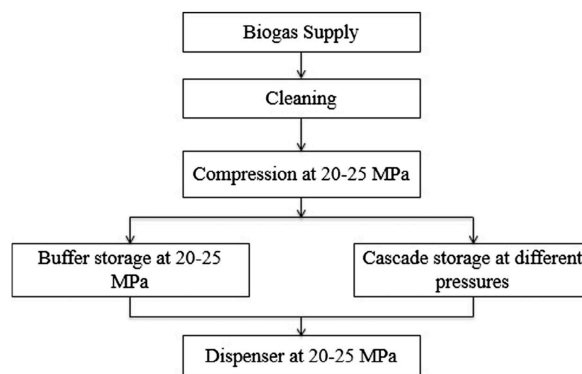


Figura 21. Produzione, stoccaggio e distribuzione di bio-CNG

### > Sistema di stoccaggio a tampone

Nel sistema di stoccaggio a tampone, la pressione del bio-CNG viene mantenuta a 20,7–24,8 MPa (207–248 bar) e fornisce una pressione massima del gas di 20 MPa (200 bar) alla bombola serbatoio del veicolo a 300 K. In questo sistema di stoccaggio, tutti i serbatoi di riempimento delle stazioni di servizio sono collegati e mantenuti alla stessa pressione per tutto il tempo. [1]

### › Sistema di stoccaggio a cascata

Nello stoccaggio a cascata, vengono utilizzati tre serbatoi a pressioni diverse (bassa, media e alta) per riempire le bombole di bio-CNG. Ciascuno di questi serbatoi contiene diversi cilindri di grandi dimensioni che vengono utilizzati in un ordine di pressione crescente. Si inizia con il riempimento del serbatoio a bassa pressione, al raggiungimento del livello prefissato si passa automaticamente al serbatoio di media pressione e infine il serbatoio ad alta pressione per garantire la massima quantità di gas. Nel sistema di stoccaggio a cascata, il riempimento da tre strutture a pressioni diverse richiede più tempo rispetto al sistema di stoccaggio tampone. Pertanto, viene scelto per il riempimento di veicoli di grandi dimensioni che normalmente richiedono un tempo di rifornimento più lungo, mentre il sistema di stoccaggio tampone è preferito per le piccole auto familiari. La Figura. 22 mostra un confronto adimensionale tra parametri importanti per questi sistemi di accumulo. [1]

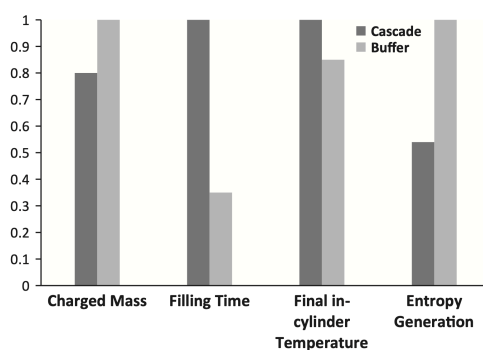


Figura 22. Confronti adimensionali tra parametri importanti nei sistemi di stoccaggio a tampone e a cascata

Il tempo di riempimento richiesto per riempire la bombola del veicolo alla sua pressione finale nel sistema di stoccaggio a tampone è di circa il 66% inferiore rispetto al sistema di stoccaggio a cascata. La massa caricata per il sistema di accumulo tampone è di circa il 20% superiore rispetto al sistema di accumulo a cascata (vantaggio del sistema tampone). Il più grande vantaggio del sistema di accumulo a cascata rispetto al sistema tampone, è il 50% in meno di generazione di entropia, portando a un lavoro di input del compressore inferiore. Il sistema di accumulo a cascata ha una temperatura finale più elevata che si traduce in una massa caricata inferiore rispetto al sistema di accumulo tampone.

### **Efficienza nell'utilizzo**

L'utilizzo del biogas e del biometano è legato a diversi percorsi come:

- 1- Generazione di elettricità e calore tramite unità combinate (CHP)
- 2- Generazione di elettricità tramite celle a combustibile
- 3- Conversione in energia meccanica per il trasporto tramite motori a combustione interna (ICE)

Il biometano può essere immesso nella rete del gas e/o convertito in gas naturale rinnovabile compresso che funge da carburante per trasporti. Il biogas può anche essere convertito in syngas (CO e H<sub>2</sub>) per la produzione di combustibile liquido tramite la sintesi di Fischer Tropsch (FT).

In Italia, il biogas viene utilizzato principalmente per la produzione di energia elettrica, mentre altri percorsi come l'iniezione di rete e la cogenerazione richiedono ulteriori studi. Il bilancio energetico di un sistema è stato valutato in termini di “% di efficienza energetica”, che è definita come la porzione dell'energia totale immessa che è stata trasformata in energia utile. Ciascun percorso di sfruttamento del biogas è costituito da una serie di componenti operanti in sequenza. Vedi Figura 23.

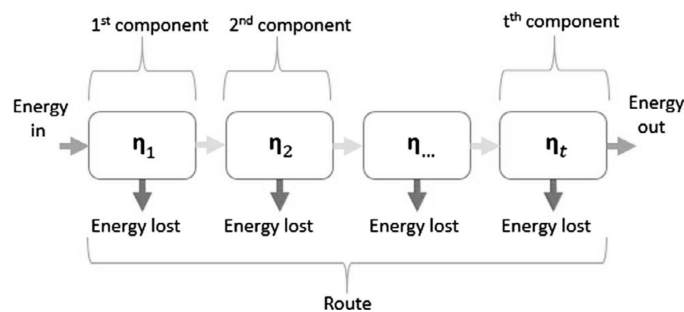


Figura 23. Calcolo dell'efficienza del processo per l'utilizzo di Biogas

Ogni componente introduce la propria efficienza ( $\eta_x$ ), l'efficienza energetica complessiva del percorso ( $\eta_{route}$ ) è stata calcolata moltiplicando le efficienze dei singoli componenti. [8]

$$\eta_{route} = \prod_{x=1}^t \eta_x$$

$$\eta_x = \frac{Energy_{out}(J)}{Energy_{in}(J)} \cdot 100 \quad \eta_x = \frac{\sum LHV_{out,a} m_{out,a}}{\sum LHV_{in,b} m_{in,b} + Q_{supplied}} \cdot 100$$

LHV<sub>out/in</sub>: potere calorifero minore del materiale dell'input (b) o dell'output (a) (J/mol)

M<sub>out/in</sub>: portata molare del materiale in ingresso (a) e di quello in uscita (b)

Q<sub>supplied</sub>: potenza fornita (J/s)

> Generazione di calore

Le caldaie applicano il calore prodotto dalla combustione di un combustibile ad un fluido (ad esempio l'acqua). Le efficienze dei componenti per i percorsi che coinvolgono le caldaie variavano tra il 16% e l'83%. L'efficienza energetica complessiva più alta (82%), si ottiene per l'utilizzo diretto del biogas tramite caldaia. Il valore più basso (16%) e si ottiene quando i combustibili liquidi prodotti da Fischer Tropsch e derivanti da steam reforming (ATR) vengono utilizzati in una caldaia. [8]

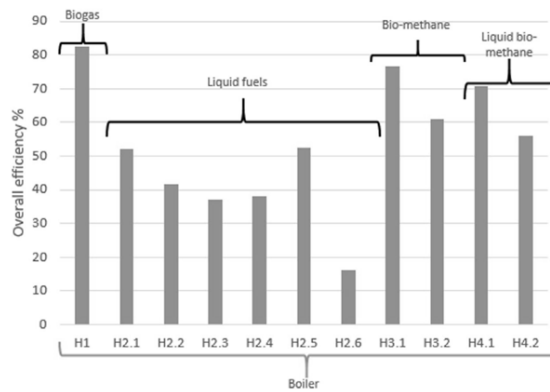


Figura 24. Efficienze energetiche complessive dei percorsi per la produzione di calore

Il calore rilasciato dalla reazione dalla sintesi esotermica di FT è di basso grado ed è generalmente sprecato, in altri processi si è soliti recuperare il calore derivante da scarti. La purificazione del biogas a biometano è stata più efficiente (77%) rispetto al processo Sabatier e all'elettrolisi (61%).

› Generazione di elettricità

Il percorso seguito dal biogas può essere diretto (esempio: utilizzo di biogas grezzo in una centrale elettrica), o indiretto quando viene richiesto un trattamento intermedio. Si è ottenuto un massimo del 54% per la conversione del biogas in biometano successivamente utilizzato in una centrale a gas (GPS – Gas Power Station) e un minimo dell'8% per lo steam reforming del metano (ATR – Auto Thermal) utilizzato per la sintesi di FT.

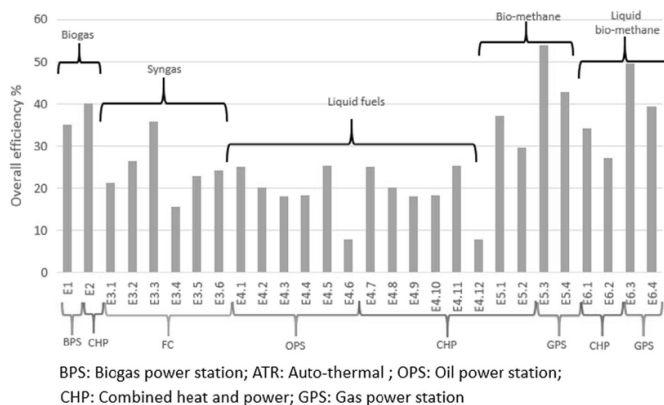


Figura 25. Efficienze energetiche complessive dei percorsi per la generazione di elettricità

L'utilizzo delle celle a combustibile riscontra efficienze comprese tra il 16% e il 25%. La diffusione delle celle a combustibile è in fase avanzata di sviluppo, poiché è associata a basse emissioni ed efficienze relativamente elevate.

La purificazione del biogas in biometano per l'iniezione nella rete del gas e l'utilizzo fuori sede in un'unità di cogenerazione ha raggiunto un'efficienza del 37%. Per l'uso fuori sede in località non collegate alla rete del gas, il biogas purificato è stato liquefatto per la produzione di energia o la

cogenerazione, con efficienze complessive variabili dal 27% al 50%. Il raffreddamento richiesto per mantenere la temperatura di condensazione del metano (-162 °C) è un processo ad alta intensità energetica che ridurrebbe ulteriormente l'efficienza energetica complessiva del percorso. [8]

› Generazione di elettricità e calore

La cogenerazione ha il vantaggio di fornire due prodotti utili, calore (fino a 180 °C) ed elettricità, con perdite minime. Le efficienze dei percorsi che coinvolgono la cogenerazione sono state rivalutate assumendo il pieno utilizzo sia del calore che dell'elettricità, i valori variavano tra il 15% e il 90% (l'uso di biogas grezzo in un'unità di cogenerazione ha aumentato l'efficienza al 90%, il valore per la sola produzione di elettricità valeva 40%).

La trasformazione del biogas in combustibili liquidi tramite sintesi FT ha mostrato risultati promettenti con valori che hanno raggiunto il 57%, rispetto al 25% ottenuto quando non si utilizza il calore. La liquefazione del biometano ha mostrato risultati simili, segnalando l'aumento dell'efficienza del percorso dal 34% per l'utilizzo dell'elettricità, raggiungendo il 77% per l'uso sia del calore che dell'elettricità. [8]

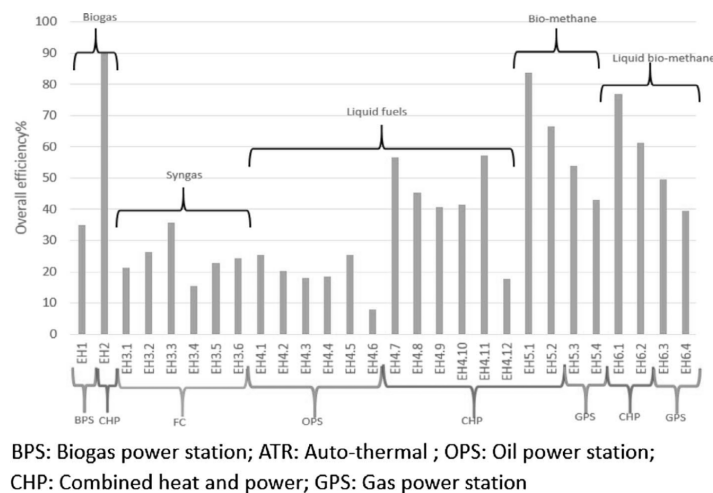


Figura 26. Efficienze energetiche complessive dei percorsi per la generazione di elettricità e calore

› Trasporto

Veicoli a combustione interna (ICE)

Qualora il biometano venga utilizzato per il trasporto, è necessario eseguire la compressione a CNG o la liquefazione a GNL, ciò consente il trasporto di una quantità sufficiente di carburante sul veicolo a combustione interna. Il biometano compresso utilizzato in un ICE è il più efficiente (18%) dei processi volti all'utilizzo per il trasporto, con un'efficienza paragonabile a quella di un veicolo

alimentato a benzina. Tuttavia, il risultato non tiene conto del mantenimento della compressione ad alta pressione (250 bar), che richiede un apporto di energia che diminuirebbe l'efficienza complessiva. Il GNL utilizzato in un ICE ha raggiunto un'efficienza energetica complessiva del 17%, ma è necessario un raffreddamento costante a  $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$  che, se considerato, ridurrebbe l'efficienza. I combustibili liquidi tramite sintesi FT hanno mostrato valori di efficienza inferiori (4–13%), principalmente a causa del fabbisogno energetico del processo di reforming. [8]

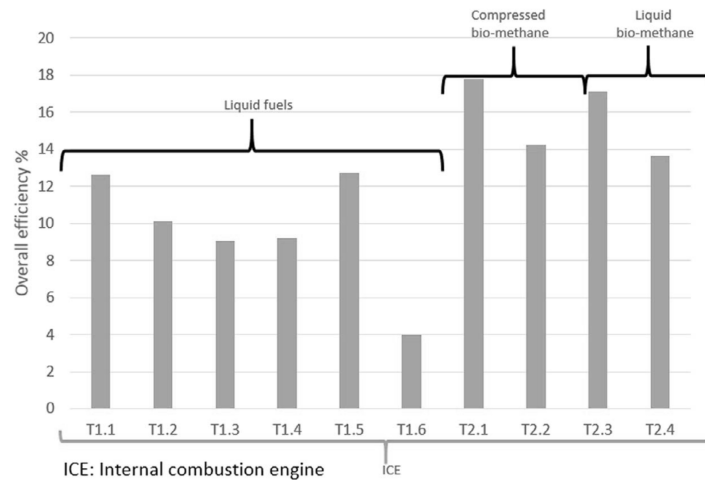


Figura 27. Efficienze energetiche complessive dei processi per i trasporti.

### Veicoli elettrici

I veicoli elettrici possono convertire il 59-62% dell'energia elettrica in energia meccanica (potenza alle ruote), dando loro un'efficienza media del 60,5%. L'efficienza complessiva del biogas nel trasporto elettrico è stata calcolata assumendo l'elettricità proveniente da una centrale alimentata a gas. L'analisi ha mostrato che anche includendo l'efficienza della produzione di carburante e della generazione di elettricità, i veicoli elettrici hanno comunque raggiunto un'efficienza quasi 1,8 volte superiore rispetto ai veicoli ICE standard. L'efficienza complessiva dei veicoli elettrici potrebbe raggiungere fino al doppio di quella di un veicolo ICE. Nonostante ciò, i veicoli elettrici devono affrontare sfide significative per quanto riguarda il tempo di ricarica e l'autonomia di guida. [8]

## **Conclusioni**

La ricerca scientifica degli ultimi anni si è focalizzata molto sul raggiungimento di obiettivi riguardanti l'energia rinnovabile in maniera sostenibile. Cercando di far evolvere di pari passo lo sviluppo tecnologico, la riduzione dei costi e la diminuzione dell'impatto ambientale.

La ricerca condotta per questo documento fornisce la base per un quadro quanto più completo possibile: dalla biomassa di partenza ai possibili utilizzi finali di biogas e biometano.

Per la scelta delle fonti sono state esaminate le principali soluzioni ad oggi conosciute come rifiuti (di diverse provenienze) e colture energetiche, riportandone il rendimento in termini di produzione di metano. Per le colture energetiche esaminate i migliori risultati sono stati ottenuti per le classi di mais 600 e 700 in tutte le categorie valutate, tranne che nel GWP, dove triticale, mais 400 e 500 sono state le migliori opzioni.

La scelta del miglior digestore non è univoca, va contestualizzata a seconda del territorio, della biomassa scelta e di ulteriori parametri chimico-fisici. Se l'utilizzo è di tipo domestico la scelta innovativa sono i digestori Plug Flow, versatili e di dimensioni ridotte. Il maggior numero di impianti installati ad oggi sono il modello a cupola fissa e a tamburo galleggiante.

Sebbene la produzione di biogas sia una tecnologia conosciuta e sviluppata commercialmente, il suo utilizzo a livello mondiale è ancora limitato a causa dei severi requisiti di purificazione prima del suo utilizzo. Sono necessari ulteriori miglioramenti al fine di ridurre la perdita di CH<sub>4</sub>, gli impatti ambientali, i costi di manutenzione e il consumo di energia. La separazione con membrana può sostituire in futuro tutti i tradizionali processi di purificazione considerati i vantaggiosi aspetti economici e ambientali. I futuri sviluppi dei materiali delle membrane dovrebbero concentrarsi sulla maggiore compatibilità con l'elevata varietà di componenti presenti nel biogas piuttosto che sul raggiungimento di una selettività molto elevata.

Il documento espone tutte le opzioni di percorso e quindi le possibili vie di utilizzo ad oggi conosciute confrontandole, evidenziando le aree con margini di miglioramento che meritano un'ulteriore indagine. Tali aree includono la produzione di combustibili liquidi, il miglioramento tecnico dei veicoli a combustione interna e l'uso di altre fonti rinnovabili per i processi ausiliari.

In conclusione, biogas e biometano, si può affermare abbiano ancora un'ampia possibilità di sviluppo in maniera particolare in termini di diversificazione nell'utilizzo e nell'applicazione su piccola e grande scala. Tecnologie come questa, possono e devono fungere da forza trainante per lo sviluppo tecnologico di paesi in via di sviluppo, agevolando la conversione da energia fossile alle bioenergie.



## Bibliografia:

- › [1] Imran Ullah Khan; Mohd Hafiz Dzarfan Othman; Haslenda Hashim; Takeshi Matsuura; Ismail, A.F.; Rezaei-DashtArzhandi, M.; Wan Azelee, I. – *Biogas as a renewable energy fuel – A review of biogas upgrading, utilisation and storage* – **2017**, 277-287.
- › [2] González García, M.; Bacenetti, J.; Negri, M.; Fiala, M.; Arroja, L. – *Comparative environmental performance of three different annual energy crops for biogas production in Northern Italy* – **2012**, 72-75.
- › [3] Atelge, M.R.; Krisa, D.; Kumar, G.; Eskicioglu, C.; Nguyen, D.D.; Chang, S.W.; Atabani, A.E.; Al-Muhtaseb, Alaa H.; Unalan, S. – *Biogas Production from Organic Waste: Recent Progress and Perspectives* – **2018**, 1020-1031.
- › [4] Benato, A.; Macor, A. – *Italian Biogas Plants: Trend, Subsidies, Cost, Biogas Composition and Engine Emissions* – **2019**, 1-6.
- › [5] Rajendran, K.; Aslanzadeh, S.; Taherzadeh, J. – *Household Biogas Digester – A review* – **2012**, 2912-2918.
- › [6] Ur Rehman Afridi, Z.; Wafa Oammar, N. – *Technical Challenges and Optimization of Biogas Plants* – **2020**, 120-126.
- › [7] Al Seadi, T.; Rutz, D.; Jannsen, R.; Drosch, B. – *Biomass resources for biogas production* – **2013**, 19-35.
- › [8] Hakawati, R.; Smyth, M.B.; McCullough, G.; De Rosa, F.; Rooney, D. – *What is the most energy efficient route for biogas utilization: Heat, electricity or transport?* – **2017**, 1077-1084.
- › [9] Papurello, D.; Lanzini, A.; Tognana, L.; Silvestri, S.; Santarelli, M. – *Waste to energy: exploitation of biogas from organic waste in a 500<sub>wel</sub> solid oxide fuel cell (SOFC) stack* – **2015**, 146-157.
- › [10] Kougias, P.G.; Angelidaki, I. – *Biogas and its opportunities – a review* – **2018**, 5-8.