

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Energetica e Nucleare

Tesi di Laurea Magistrale

**Dimensionamento di un impianto per la produzione di biometano
dalla digestione anaerobica della paglia di riso**



Relatore/i

Prof. Umberto Lucia

Dr. Giulia Grisolia

Candidato

Luca Carallo

Anno Accademico 2021-2022

Alla mia famiglia

Sommario

1. Abstract	8
2. Introduzione generale	10
3. Da biomassa a Biogas e Biometano	16
4. Crescita e progresso degli impianti Biogas e Biometano in Europa e Italia	18
5. Incentivi Biogas e Biometano su scala nazionale	22
6. Processo di produzione del biogas e del biometano	24
6.1 Substrati per la digestione anaerobica	25
6.2 Codigestione	25
6.3 Pretrattamenti del substrato	26
6.4 Le fasi della digestione anerobica	29
6.5 Parametri di gestione del digestore	32
6.6 Parametri di esercizio del processo	35
6.6.1 Quantità e composizione del substrato	35
6.6.2 Temperatura	35
6.6.3 pH, alcalinità e Acidi grassi volatili	36
6.6.4 Rapporto C/N e ammoniacca	37
6.7 Configurazioni impiantistiche	38
6.7.1 Numero di stadi	38
6.7.2 Contenuto di sostanza secca	39
6.7.3 Sistema di alimentazione	44
6.8 Da biogas a biometano: tecnologie di upgrading	46
6.8.1 Separazione a membrana	46
6.8.2 Processo water scrubbing (PWS)	46
6.8.3 Scrubbing fisico con composti organici	47
6.8.4 Scrubbing chimico con Hot Potassium Carbonate) (HPC)	48
6.8.5 Pressure Swing Adsorption (PSA)	48
6.8.6 Tecnologia criogenica	49
6.8.7 Confronto tra le varie tecnologie di upgrading	50
6.9 Il digestato	51
7. Progettazione della filiera impiantistica	53
7.1 Ricezione e stoccaggio della biomassa	54
7.2 Pre-trattamento del substrato	57
7.3 Digestore anaerobico	59

7.4 Desolfurazione	66
7.5 Deumidificazione	70
7.6 Upgrading del Biogas	71
7.7 Compostaggio	74
7.8 Cogeneratore	76
7.9 Torcia	78
7.10 Impianto di trattamento aria	78
8. Conclusioni	81
9. Bibliografia	82

1. Abstract

Nell'ultimo anno, la crescita della domanda energetica e l'interruzione dell'approvvigionamento delle materie prime ci hanno obbligato ad accelerare la transizione energetica per far fronte alla dipendenza dal gas e alla crisi climatica. A lungo termine, una possibile strategia potrebbe essere rappresentata dalla decarbonizzazione delle fonti energetiche presenti sul territorio Nazionale e dalla produzione di fonti rinnovabili come l'energia solare, idroelettrica, eolica, geotermica e in particolare da biomasse.

Questo elaborato approfondisce un recente studio effettuato sul settore agricolo della provincia di Novara, il quale ha evidenziato i benefici energetici e ambientali che si potrebbero ottenere dall'uso della paglia di riso per la produzione di biogas e biometano come alternativa ai combustibili convenzionali e contribuendo a ridurre l'inquinamento ambientale prevenendo la combustione della paglia a cielo aperto.

Con lo scopo di immettere il biometano prodotto attraverso l'upgrading del biogas ottenuto tramite la digestione anaerobica della paglia di riso, si ci pone come obiettivo la descrizione, il dimensionamento e l'analisi tecnica dell'impianto di digestione anaerobica, avvalendosi dei vari studi condotti in letteratura sulle configurazioni impiantistiche attualmente esistenti e sui parametri di esercizio da usare.

I risultati ottenuti evidenziano un forte potenziale per la ricerca e l'implementazione di strategie innovative legate alla promozione del biometano.

2. Introduzione generale

A livello globale, il ruolo dell'energia è fondamentale per la vita e costituisce un elemento indispensabile per il progresso economico e sociale della collettività, per tale motivo la questione energetica occupa un ruolo centrale per il presente ed il futuro delle attività umane.

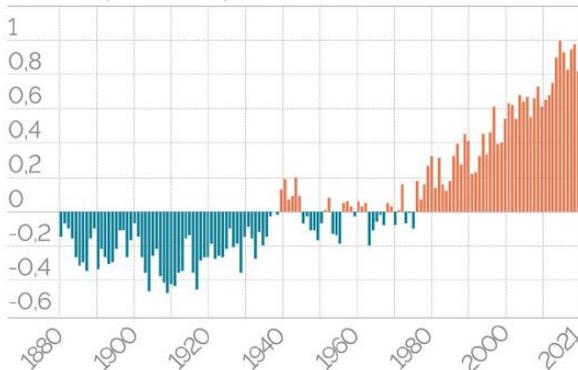
Il controllo dello sfruttamento delle risorse energetiche e la riduzione dell'impatto ambientale, conseguente il loro uso, non sono più questioni contingenti di carattere politico-economico, ma rappresentano soprattutto una sfida ed un'impresa scientifica e tecnica i cui obiettivi strategici possono essere raggiunti con azioni complesse, destinate ad aumentare l'efficienza della produzione, dell'uso dell'energia e l'utilizzo e introduzione delle energie rinnovabili.

Quest'anno l'IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), un'organizzazione internazionale con lo scopo di produrre rapporti di valutazione scientifica sullo stato delle conoscenze nel campo del clima e dei cambiamenti climatici, nel report [1] ha lanciato diversi avvertimenti, scaturiti dalla rilevazione di come gli impatti climatici si trovino nella fascia alta delle stime precedentemente effettuate e che interessano tutti i paesi del mondo.

La finestra per evitare che le temperature globali aumentino di oltre 1.5°C rispetto alle medie preindustriali si sta rapidamente chiudendo. Le decisioni prese quest'anno potrebbero determinare se tale obiettivo sarà raggiunto o se il mondo lo supererà entro la metà di questo secolo e dovrà affrontare gravi problemi climatici prima di tentare di abbassare il termostato nella seconda metà del secolo.

Riscaldamento globale: 1,5 gradi in più nel 2030?

Variazione (in °C) della temperatura media annua della superficie terrestre rispetto ai livelli pre-industriali

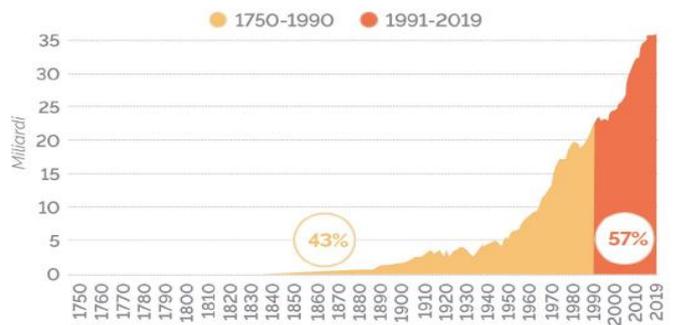


Fonte:
NOAA

ISPI

Ultimi 3 decenni più inquinanti dei 200 anni prima

Emissioni globali di CO₂ in miliardi di tonnellate



Fonte:
OWID

ISPI

Figura 1: A sx: variazioni della temperatura media annua della superficie terrestre rispetto ai livelli pre-industriali [63]; a dx: emissioni globali di CO₂ in miliardi di tonnellate [63]

Per raggiungere gli obiettivi di sviluppo sostenibile è perciò fondamentale un'azione accelerata ed equa nella mitigazione e nell'adattamento agli impatti dei cambiamenti climatici, alcuni modelli di risposta potrebbe risultare l'elettrificazione con energie rinnovabili.

Per il nostro quadro nazionale, nel "*Focal Point IPCC per l'Italia*", vengono identificate dall'IPCC quattro categorie di rischio per l'Europa:

- Rischi delle ondate di calore su popolazioni ed ecosistemi. È previsto che il numero dei decessi e delle persone a rischio di stress da calore raddoppierà o triplicherà con l'innalzamento della temperatura a 3°C, rispetto a 1.5°C.
- Rischi per la produzione agricola. La combinazione di caldo e siccità porterà nel XXI secolo a perdite sostanziali in termini di produzione agricola per la maggior parte delle aree europee.
- Rischi di scarsità di risorse idriche. Nell'Europa meridionale il rischio di scarsità di risorse idriche è già elevato per un riscaldamento globale di 1.5°C e diventa molto alto per un innalzamento di 3°C. Nel caso di un innalzamento di temperatura di 3°C il rischio di scarsità di risorse idriche diventa alto anche nell'Europa centro-occidentale.
- Rischi prodotti da maggiore frequenza e intensità di inondazioni. Con la variazione delle precipitazioni e l'innalzamento del livello del mare, i rischi per le persone e le infrastrutture aumenteranno in molte regioni d'Europa.

Alla luce di queste tematiche il 12 novembre, a Glasgow, si è conclusa la conferenza sul clima organizzata annualmente dalle Nazioni Unite, la COP26.

Gli obiettivi principali della COP26 risultano [2]:

1. Mitigazione: azzerare le emissioni nette entro il 2050 e contenere l'aumento delle temperature non oltre 1.5 gradi, accelerando l'eliminazione del carbone, riducendo la deforestazione ed incrementando l'utilizzo di energie rinnovabili
2. Adattamento: supportare i paesi più vulnerabili per mitigare gli impatti dei cambiamenti climatici, per la salvaguardia delle comunità e degli habitat naturali
3. Finanza per il clima: mobilitare i finanziamenti ai paesi in via di sviluppo, raggiungendo l'obiettivo di 100 miliardi USD annui
4. Finalizzazione del "*Paris Rulebook*: rendere operativo l'Accordo di Parigi, con particolare riferimento a:
 - trasparenza: l'insieme delle modalità per il reporting delle emissioni di gas serra ed il monitoraggio degli impegni assunti dai Paesi attraverso i contributi determinati a livello nazionale (NDC - *Nationally Determined Contributions*);
 - meccanismi (Articolo 6 dell'Accordo di Parigi);
 - *Common timeframes* (orizzonti temporali comuni per definizione NDC).

1. Mitigazione

Per la prima volta viene riconosciuto che l'obiettivo delle politiche climatiche deve essere quello di mantenere la temperatura globale entro un aumento massimo di 1.5°C rispetto all'epoca preindustriale.

Solo 6 anni fa, con l'Accordo di Parigi, ci si era preposti come obiettivo i 2°C: essere riusciti ad inserire un riferimento molto più stringente è uno dei risultati più importanti della COP26, al quale ha contribuito in maniera fondamentale l'ultimo report scientifico dell'IPCC, e le mobilitazioni della società civile.

Aver inserito un tale riferimento implica che le politiche climatiche, messe in atto dai diversi Paesi, dovranno essere aggiornate e rinforzate visto che con quanto previsto ad oggi l'obiettivo di 1.5°C non verrà raggiunto.

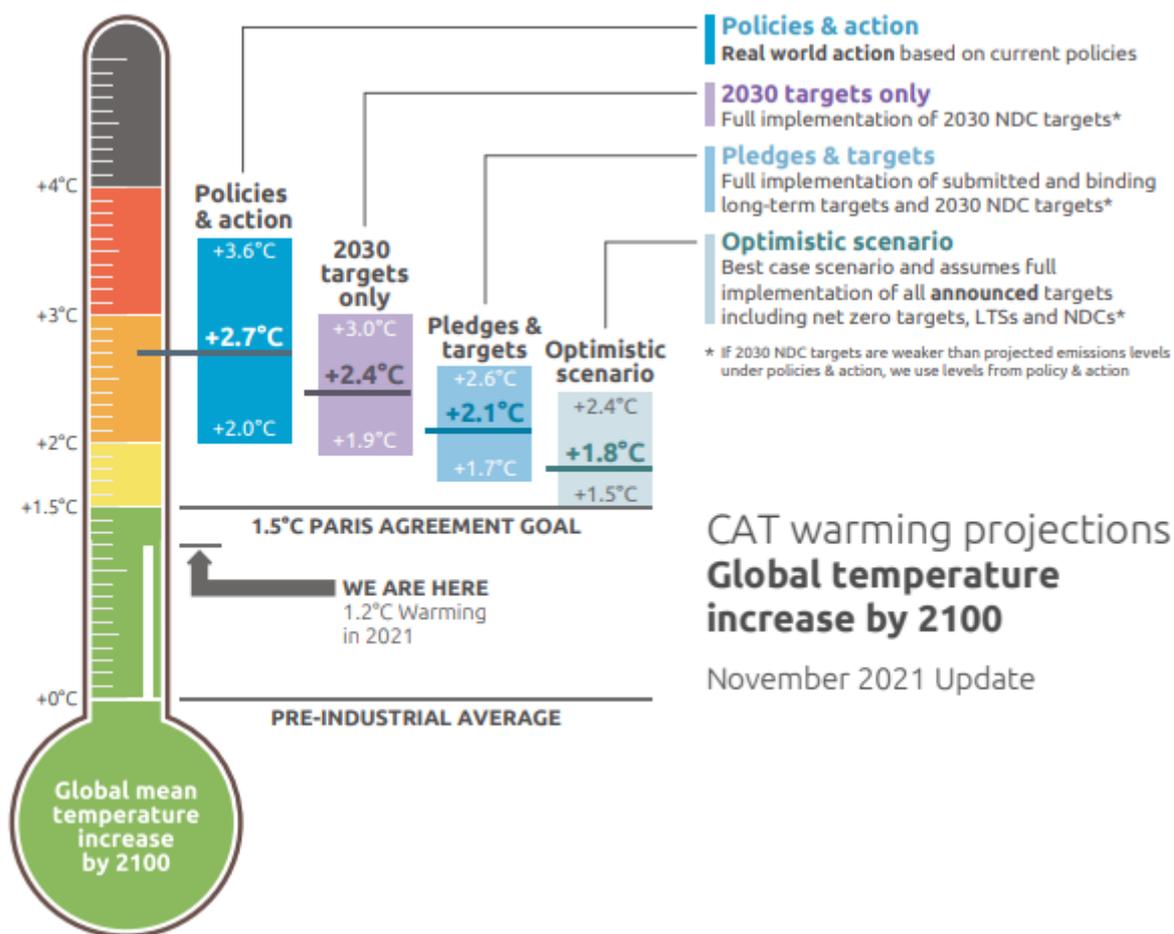


Figura 2: Aumento della temperatura media globale entro il 2100 [3]

2. Adattamento

Si è deciso di raddoppiare i fondi internazionali per le azioni di adattamento, soprattutto nei paesi più vulnerabili agli impatti dei cambiamenti climatici. È stato inoltre approvato un programma di lavoro per definire il “*Global Goal on Adaptation*”, finalizzato a definire gli indicatori per monitorare le azioni di adattamento dei Paesi.

Particolarmente accesa è stata la negoziazione sulle perdite ed i danni subiti in conseguenza dei cambiamenti climatici (“*Loss and Damage*”); forte la spinta negoziale per chiedere strumenti finanziari dedicati per supportare i Paesi per minimizzare le perdite ed i danni. Nelle conclusioni, è previsto l’avvio di un “dialogo” su questo tema, da concludersi entro il 2024, per l’istituzione di un fondo per sistemi di allerta e minimizzazione delle perdite e danni conseguenti ai cambiamenti climatici.

3. Finanza per il clima:

L’obiettivo di raggiungere, entro il 2020, 100 miliardi di dollari annui per supportare i Paesi vulnerabili non è stato ancora raggiunto (nel 2019, si sono sfiorati gli 80 miliardi). Nell’ambito della COP26 sono stati tuttavia molteplici gli impegni da parte di diverse istituzioni finanziarie e dei Paesi per aumentare i propri contributi e far sì che tale obiettivo sia raggiunto il prima possibile. Secondo le stime dell’OCSE, si potrebbe raggiungere quota 100 miliardi annui entro il 2023, con la prospettiva di aumentare l’impegno gli anni seguenti.

4. Finalizzazione Paris Rulebook:

Per rendere pienamente operativo l'Accordo di Parigi, sono stati finalizzati i lavori su tre temi di natura tecnica: trasparenza, meccanismi ("Articolo 6") e tempistiche comuni per gli NDC ("*common timeframes*").

Trasparenza

Sono state finalmente adottate le tabelle e i formati per il reporting ai sensi del nuovo quadro di trasparenza (ETF) dell'Accordo di Parigi, che entrerà in vigore per tutti i Paesi, sviluppati e no, entro il 2024. Tra queste le tabelle comuni (CRT) da utilizzare per la rendicontazione dei dati dell'inventario delle emissioni e degli assorbimenti dei gas serra, i formati tabulari comuni (CTF) per il monitoraggio dei progressi nell'attuazione e nel raggiungimento degli NDC e gli indici di importanti rapporti di trasparenza che i Paesi dovranno redigere e trasmettere periodicamente all'UNFCCC. Per la finalizzazione di questo lavoro, è stato necessario un accordo su come tradurre all'interno delle tabelle e dei formati le specifiche opzioni di "flessibilità" a disposizione dei paesi in via di sviluppo in caso non riescano ad applicare appieno le regole stabilite in virtù di limiti di capacità nazionali.

Meccanismi: Articolo 6

È stato raggiunto, inoltre, l'accordo sui meccanismi di mercato, relativo all'articolo 6 dell'Accordo di Parigi, che riconosce la possibilità per i Paesi di utilizzare il mercato del carbonio internazionale per l'attuazione degli impegni determinati a livello nazionale per la riduzione delle emissioni (NDC). Questo include l'adozione di:

- linee guida per i cosiddetti "approcci cooperativi" che prevedano lo scambio di quote (Articolo 6.2 dell'Accordo di Parigi), incluse le informazioni da includere nell'ambito del nuovo quadro di trasparenza;
- regole, modalità e procedure per i "meccanismi di mercato" (Articolo 6.4);
- un programma di lavoro all'interno del quadro degli approcci "non di mercato" (Articolo 6.8), con avvio nel 2022.

Common timeframes

Infine, è stato raggiunto un accordo per una (breve) decisione che incoraggia (dunque in maniera non vincolante) i Paesi a comunicare gli NDC su base quinquennale e con delle tempistiche comuni per la loro attuazione.

In conformità con i sei pilastri del *Next Generation EU* riguardo le quote d'investimento previste per i progetti green e digitali, tra i progetti approvati dal nostro ministero riscontriamo: il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza [4], il quale prevede un insieme di riforme e investimenti suddiviso in sei missioni:

1. Digitalizzazione, innovazione, competitività cultura e turismo
2. Rivoluzione verde e transizione ecologica
3. Infrastrutture per una mobilità sostenibile
4. Istruzione e ricerca
5. Inclusione e coesione
6. Salute

I goals presenti nella missione "Rivoluzione verde e transizione ecologica" hanno l'obiettivo principale di migliorare la sostenibilità, favorendo la transizione verde del Paese puntando su energia

prodotta da fonti rinnovabili, aumentando la resilienza del sistema economico e assicurare una transizione ambientale equa e inclusiva.



Figura 3: Rivoluzione verde e transizione ecologica [4]

In particolare, nella componente “*Energia Rinnovabile, Idrogeno, Rete e Mobilità Sostenibile*” vengono prefissati determinati obiettivi generali:



Figura 4: Energia rinnovabile, idrogeno, rete e mobilità sostenibile [4]

La prima linea di intervento ha come scopo l'incremento della quota di energie rinnovabili, facendo leva sull'abbondanza di risorsa rinnovabile a disposizione e su tecnologie prevalentemente maturate:

- Sbloccando il potenziale di impianti utility-scale
- Accelerando lo sviluppo di comunità energetiche e sistemi di piccola taglia
- Incoraggiando lo sviluppo di soluzioni innovative
- Rafforzando lo sviluppo del biometano

Quest'ultimo punto, conseguito massimizzando il recupero energetico dei residui organici, è determinante per il rafforzamento di un'economia circolare basata sul riutilizzo ed è un fattore notevole per il conseguimento dei target di decarbonizzazione europei. Se veicolato nella rete gas, il biometano può contribuire al raggiungimento dei target al 2030 con un risparmio complessivo di gas a effetto serra rispetto al ciclo vita del metano fossile tra l'80 e l'85 per cento.

La linea di investimento si pone come traguardo di:

1. riconvertire e migliorare l'efficienza degli impianti biogas agricoli esistenti verso la produzione totale o parziale di biometano da utilizzare sia nel settore del riscaldamento e raffrescamento industriale e residenziale sia nei settori terziario e dei trasporti;
2. supportare la realizzazione di nuovi impianti per la produzione di biometano (attraverso un contributo del 40 per cento dell'investimento), sempre con le stesse destinazioni;
3. promuovere la diffusione di pratiche ecologiche nella fase di produzione del biogas (siti di lavorazione minima del suolo, sistemi innovativi a basse emissioni per la distribuzione del digestato) per ridurre l'uso di fertilizzanti sintetici e aumentare l'approvvigionamento di materia organica nei suoli, e creare poli consortili per il trattamento centralizzato di digestati ed effluenti con produzione di fertilizzanti di origine organica;
4. promuovere la sostituzione di veicoli meccanici obsoleti e a bassa efficienza con veicoli alimentati a metano/biometano;
5. migliorare l'efficienza in termini di utilizzo di calore e riduzione delle emissioni di impianti agricoli di piccola scala esistenti per i quali non è possibile accedere alle misure di riconversione.

Attraverso questo intervento sarà possibile incrementare la potenza di biometano da riconversione da destinare al greening della rete gas pari a circa 2.3-2.5 miliardi di metri cubi.

3. Da biomassa a Biogas e Biometano

Nel corso degli ultimi decenni in risposta alle varie sfide poste dal panorama energetico ed ambientale, si prevede che le biomasse arriveranno ad occupare circa il 13% della domanda di energia primaria totale.

Un recente studio dimostra come il potenziale tecnico per produrre biogas e biometano sia enorme e in gran parte non sfruttato. Queste materie prime sono costituite da: rifiuti solidi urbani, letame animale, residui organici e acque reflue. Nel grafico sottostante si può notare come la produzione di questi tipi di gas nel 2018 sia stata di circa 35 milioni di tonnellate di petrolio equivalente (Mtep), solo una frazione del potenziale complessivo stimato, mentre il pieno utilizzo del potenziale sostenibile potrebbe coprire circa il 20% della domanda mondiale di gas odierna.

Biogas and biomethane production in 2018 against the sustainable potential today

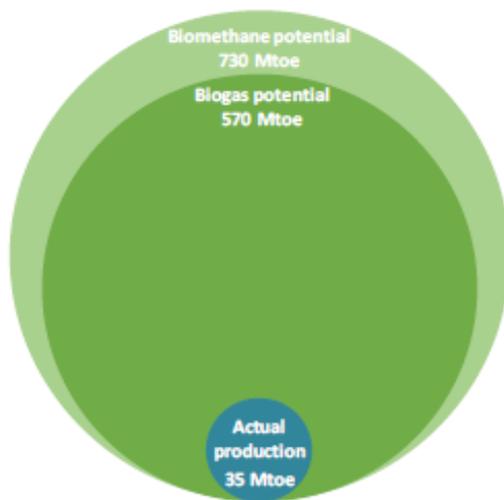
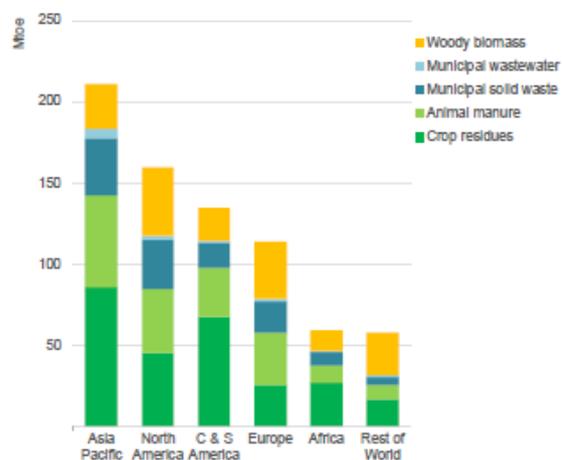


Figura 5: produzione di biogas e biometano nel 2018 contro il potenziale sostenibile di oggi [64]

Production potential for biogas or biomethane by feedstock source, 2018



Notes: C&S America = Central and South America. Woody biomass feedstocks are available only for biomethane production.

Figura 6: Potenziale di produzione di biogas o biometano per fonte di alimentazione, 2018 [64]

Per tale motivo ad oggi l'UE è interessata alla produzione di energia rinnovabile di provenienza agricola, in particolare sull'uso del suolo da parte di colture da energia, con maggiore attenzione sulla possibilità che colture *food* vengano destinate per le produzioni energetiche, per due aspetti: quello legato alla sostenibilità ambientale: riduzione delle emissioni di gas serra, e quello legato al supporto dell'agricoltura, mettendola in grado di fornire beni e servizi utili e remunerativi che le consentano di poter competere sul piano economico.

Con il termine biomassa si designa "la frazione biodegradabile dei prodotti, rifiuti e residui di origine biologica provenienti dall'agricoltura (comprendente sostanze vegetali e animali), dalla silvicoltura e dalle industrie connesse, comprese la pesca e l'acquacoltura, nonché la parte biodegradabile dei rifiuti industriali e urbani".

Per la loro origine, la biomassa è una risorsa distribuita sul territorio: disponibile come prodotto o scarto delle attività primarie e/o secondarie di varia natura, in parte prodotta da specifiche coltivazioni su terreni dedicati.

Le principali tipologie di biomasse utilizzate per la produzione di energia sono:

<i>coltivazioni erbacee dedicate</i>	colture da fibra: sorgo da fibra, cardo, canna comune; colture oleaginose: girasole, colza, brassica carinata; colture amilacee: frumento, mais, sorgo zuccherino
<i>coltivazioni arboree dedicate</i>	boschi per la produzione di legname a scopo energetico: conifere, latifoglie; coltivazioni arboree fuori bosco a rapido accrescimento: pioppo, robinia, salice
<i>materiale residuale da coltivazioni agricole erbacee ed arboree</i>	paglia; legno di potatura
<i>materiale residuale da coltivazione boschiva</i>	ramaglia, legname proveniente da pulizia, apertura strade antincendio, derivante da incendi
<i>residui dell'agro-industria</i>	sansa, vinacce esauste, buccette di pomodoro
<i>residui dell'industria del legno</i>	segatura, legno vergine di scarto

Tabella 1: Principali tipologie di biomasse utilizzate per la produzione di energia

In particolare, nel nostro elaborato ci soffermeremo sulle biomasse di origine agro-industriale e attività agricole, riportando di seguito una cartografia effettuata da uno studio dell'anno 2009 che illustra le zone con maggiore concentrazione di paglia.

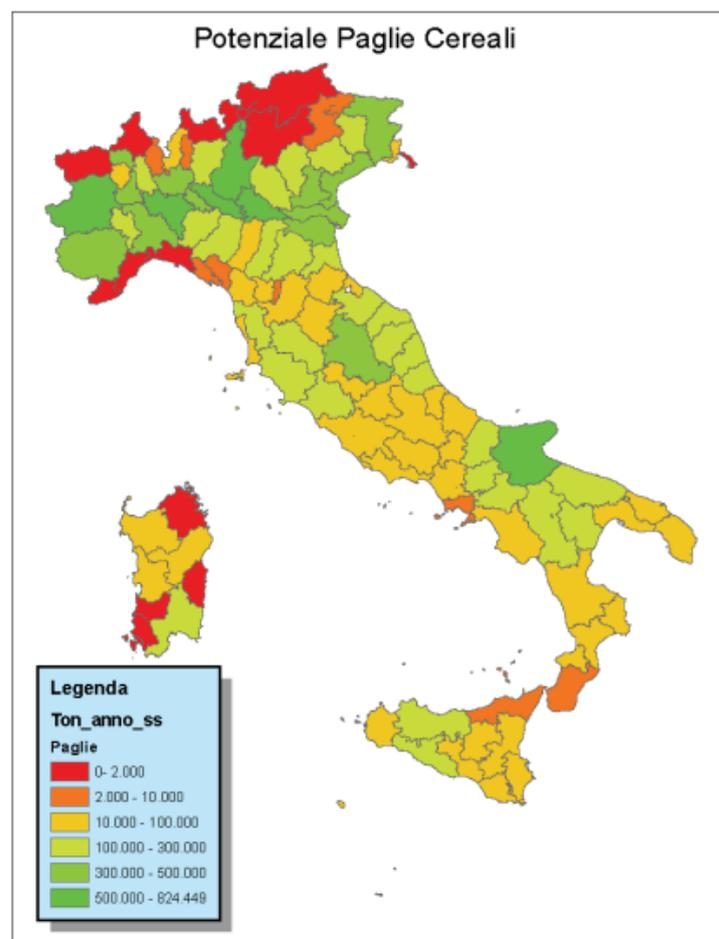


Figura 7 : Potenziale della paglia in Italia [5]

4. Crescita e progresso degli impianti Biogas e Biometano in Europa e Italia

Nella lotta al mutamento climatico il biometano intraprende un ruolo fondamentale per determinare una transizione energetica verso una economia a basso contenuto di carbonio fondata sulla sostenibilità e sulla circolarità nell'utilizzo delle risorse, questo perché la sua filiera di produzione è:

- **sostenibile:** perché le biomasse nel loro ciclo di vita hanno incorporato il carbonio presente nell'atmosfera; il suo consumo avviene quindi evitando di liberare il carbonio sequestrato nei giacimenti di combustibili fossili, quasi senza ulteriori emissioni climalteranti e, a ridurre in modo significativo anche le emissioni del settore agricolo;
- **rinnovabile:** perché prodotta da biomasse di origine agricola che si rinnovano nel tempo e possono essere pressoché inesauribili.

Inoltre, il contributo del biometano alla decarbonizzazione non si limita alla sola fase del soddisfacimento del consumo energetico. Il suo processo produttivo rende infatti disponibili una serie di altri prodotti, sottoprodotti e servizi non energetici il cui sfruttamento comporta una riduzione delle emissioni climalteranti; più in particolare:

- il digestato è utilizzato come materia organica ammendante, migliorando la produttività del terreno agricolo e la sua capacità di trattenere gas climalteranti fungendo da *sink* di carbonio.
- l'utilizzo come substrato di partenza per la produzione di biometano di sottoprodotti e scarti originatisi nei settori agroalimentare e forestale evita l'immissione in atmosfera di gas climalteranti che altrimenti si produrrebbero per fermentazione naturale della materia organica; stessa considerazione vale anche per i rifiuti organici urbani;
- il biogas in quanto tecnologia efficiente anche su piccola scala è in grado di rappresentare una infrastruttura tecnologica nell'ambito di un'azienda agricola, o più aziende tra loro integrate, essenziale per ridurre gli impatti dell'agricoltura in termini di emissioni di gas serra e di altro genere ed aumentare nel contempo la competitività delle aziende agricole nelle loro attività tradizionali della riduzione dei costi di produzione e della riduzione dei costi di gestione degli effluenti zootecnici, ecc.

La filiera del biometano mostra considerevoli potenzialità di integrazione con altre tecnologie che potranno contribuire ulteriormente alla decarbonizzazione del Paese:

- **Power-To-Gas:** l'energia elettrica eccedentaria rispetto al consumo ottenuta da fonti rinnovabili non programmabili quali eolico e fotovoltaico può essere convertita in un bio-syngas del tutto analogo al gas naturale grazie alla CO₂ disponibile naturalmente nel biogas;
- **Carbon Capture and Storage:** la tecnologia della cattura e stoccaggio del carbonio, se applicata al consumo di biometano, equivale ad un prelievo di carbonio dall'atmosfera.

Per questi vantaggi il settore del biogas e del biometano hanno conosciuto una crescita costante:

Classi di potenza	Numero	Potenza (MW)	Produzione (GWh)
P ≤ 1 MW	2.582	1.333	8.172
1 MW < P ≤ 10 MW	296	828	2.642
P > 10 MW	66	1.945	8.820
Totale	2.944	4.106	19.634

Fonte: Terna

Tabella 2: Dati di sintesi sugli impianti alimentati da bioenergie nel 2020 [6]

Come si può notare nel 2020 la potenza degli impianti di produzione di energia elettrica alimentati con bioenergie (biomasse, biogas, bioliquidi) è pari a 4106 MW e corrisponde al 7.3% della potenza elettrica complessiva da fonti rinnovabili in Italia, con una produzione di energia elettrica pari a 19.634 GWh, rappresentando il 16,8% della produzione totale da rinnovabili.

	2019		2020		2020/2019 Variazione %	
	Numero	Potenza (MW)	Numero	Potenza (MW)	Numero	Potenza (MW)
Biomasse solide	470	1.682,0	464	1.688,2	-1,3	0,4
– frazione urbani	60	899,1	61	907,3	1,7	0,9
– altre biomasse	410	782,9	403	780,9	-1,7	-0,3
Biogas	2.177	1.455,4	2.201	1.452,2	1,1	-0,2
– da rifiuti	398	402,0	386	392,7	-3,0	-2,3
– da fanghi	80	44,1	81	44,6	1,3	1,2
– da deiezioni animali	636	241,9	656	245,1	3,1	1,3
– da attività agricole e forestali	1.063	767,3	1.078	769,8	1,4	0,3
Bioliquidi	472	982,3	465	965,5	-1,5	-1,7
– oli vegetali grezzi	380	834,9	371	826,4	-2,4	-1,0
– altri bioliquidi	92	147,5	94	139,2	2,2	-5,6
Totale Bioenergie	2.946	4.119,7	2.944	4.105,9	-0,1	-0,3

Fonte: Terna

(*) Nella tabella, per ogni tipologia di biomassa, vengono indicati il numero e la potenza degli impianti o, nel caso di impianti costituiti da più sezioni alimentate con diverse tipologie di biomasse, il numero e la potenza delle sezioni di impianto per ogni combustibile. La potenza totale disponibile è data dalla somma per righe delle potenze, mentre la numerosità totale indica comunque il numero totale degli impianti esistenti (essendo dunque inferiore alla somma per righe della numerosità degli impianti/sezioni relative a ogni combustibile).

Tabella 3: Numero e potenza degli impianti alimentati da bioenergie [6]

Nel 2020 l'energia termica complessiva ottenuta in Italia dallo sfruttamento dei biogas è stimata in 13.000 TJ:

TJ	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Variazione % 2020/2019
Consumi diretti	1.866	1.842	1.729	1.749	1.519	1.522	0,2%
<i>Industria</i>	<i>828</i>	<i>828</i>	<i>778</i>	<i>786</i>	<i>683</i>	<i>684</i>	<i>0,2%</i>
<i>Commercio e servizi</i>	<i>1.037</i>	<i>1.013</i>	<i>951</i>	<i>963</i>	<i>836</i>	<i>838</i>	<i>0,2%</i>
<i>Altro</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>0,0%</i>
Produzione di calore derivato	8.604	8.709	9.462	8.952	11.486	11.477	-0,1%
<i>– da impianti cogenerativi</i>	<i>8.593</i>	<i>8.699</i>	<i>9.456</i>	<i>8.946</i>	<i>11.480</i>	<i>11.474</i>	<i>-0,1%</i>
<i>– da impianti di sola produzione termica</i>	<i>11</i>	<i>9</i>	<i>6</i>	<i>6</i>	<i>6</i>	<i>3</i>	<i>-44,0%</i>
Totale	10.471	10.551	11.191	10.702	13.005	13.000	0,0%

Fonte: GSE; Terna per gli impianti di cogenerazione

Tabella 4: Impieghi di biogas nel settore Termico [6]

TJ	2017	2018	2019	2020
Consumi diretti	161	529	-	-
Produzione di calore derivato	17	57	-	-
<i>– da impianti cogenerativi</i>	<i>16</i>	<i>53</i>	-	-
<i>– da impianti di sola produzione termica</i>	<i>1</i>	<i>4</i>	-	-
Totale	178	587	-	-

Fonte: GSE; Terna per gli impianti di cogenerazione

Tabella 5: Impieghi di biometano nel settore termico [6]

Nel corso del 2017 e del 2018 è stato prodotto ed immesso in rete biometano senza una specifica destinazione d'uso; le regole contabili Eurostat prevedono, in questi casi, che i consumi di biometano siano attribuiti ai diversi settori proporzionalmente ai consumi di gas naturale. A partire dal 2019, con il dispiegarsi degli effetti del DM 2 marzo 2018, il biometano immesso in rete è sostenibile ed è destinato (e dunque contabilizzato) interamente nel settore Trasporti.

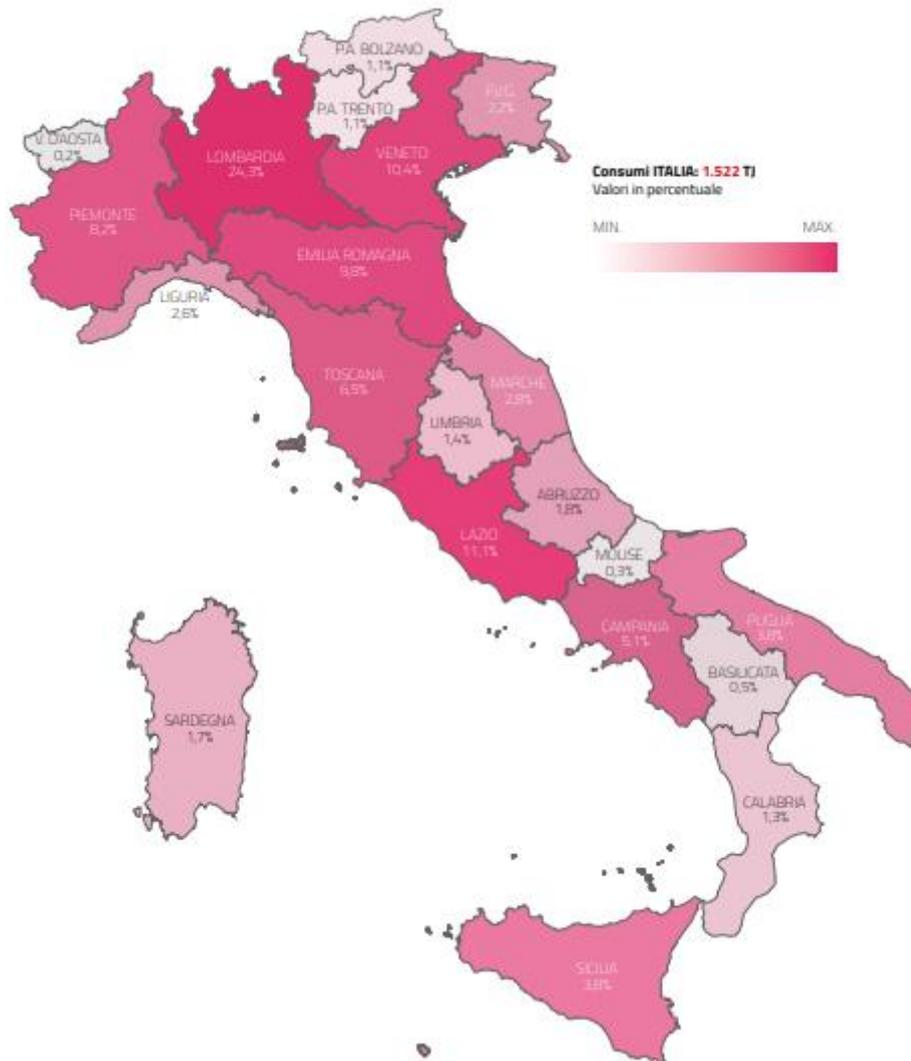


Figura 8: Distribuzione regionale dei consumi diretti di biogas e biometano nel 2020 (%) [6]

5. Incentivi Biogas e Biometano su scala nazionale

Le procedure operative per il rilascio della qualifica e per la determinazione e riconoscimento degli incentivi ai Produttori di biometano e altri biocarburanti avanzati, diversi dal biometano, sono regolamentate dal Decreto Ministeriale 2 marzo 2018.

Il Decreto interministeriale del 2 marzo 2018 promuove l'uso del biometano e degli altri biocarburanti avanzati nel settore dei trasporti e rappresenta un provvedimento strategico che mira a favorire l'utilizzo delle fonti rinnovabili nei trasporti, anche attraverso lo sviluppo di iniziative di economia circolare e di gestione virtuosa dei rifiuti urbani e degli scarti agricoli.

In particolare, il nuovo Decreto ha come obiettivi:

- promuovere maggiormente l'utilizzo del biometano per i trasporti, anche ai fini del raggiungimento degli obiettivi posti all'Italia dalle direttive europee in termini di utilizzo di carburanti rinnovabili nei trasporti. L'onere dell'incentivo è distribuito sui soggetti che hanno l'obbligo di immissione in consumo di biocarburanti (Soggetti Obbligati);
- favorire le riconversioni degli impianti a biogas, con conseguente riduzione dei costi della componente ASOS della bolletta elettrica;
- promuovere l'incentivazione di impianti di produzione di altri biocarburanti avanzati diversi dal biometano.

Per i produttori di biometano immesso in consumo nei trasporti, tramite impianti di distribuzione stradali, autostradali o privati, è previsto il rilascio dei Certificati di Immissione in Consumo (CIC), calcolati secondo le procedure GSE.

Per i produttori di biometano avanzato è previsto:

- a) il riconoscimento di un valore pari a 375€ per ogni CIC riconosciuto, considerando anche le eventuali maggiorazioni previste nella quantificazione dei titoli spettanti. Tale incentivazione ha durata massima di 10 anni; successivamente si ha diritto al solo rilascio dei CIC (che possono essere venduti ad altri operatori);
- b) il ritiro, da parte del GSE, anche per un quantitativo parziale, del biometano avanzato ad un prezzo pari al 95% del prezzo medio mensile registrato sul Mercato a Pronti del gas naturale o, in alternativa, la vendita effettuata autonomamente.

Tabella riassuntiva incentivi e principali ricavi:

Tipologia	Incentivo	Ricavi vendita	Durata
Biometano	CIC + maggiorazione per materie prime	Biometano sul mercato	Vita impianto
Biometano avanzato	375 €/CIC + maggiorazioni per impianti pertinenti	Ritiro Biometano sul mercato GSE, o Biometano sul mercato	Massimo 10 anni*

*Successivamente si ha diritto al rilascio dei CIC e vendita sul mercato del metano

Tabella 6: Incentivi biometano [7]

Le maggiorazioni sono previste:

- per materie prime: nel caso di utilizzo delle materie elencate nella parte A e B dell'allegato 3 del decreto del MiSE 10 ottobre 2014 e s.m.i e nel caso di impianti funzionanti con le citate materie in codigestione con materie di origine biologica non rientranti nel suddetto elenco, fino ad un massimo del 30 % in peso.
- per impianti pertinenti, nel caso di produttori di biometano avanzato che, inoltre, investono in impianti di distribuzione o di liquefazione è previsto un aumento del 20% del valore dei CIC al fine di tenere conto dei costi aggiuntivi sostenuti. Il decreto prevede un limite pari al 70% dei costi di investimento sostenuti e, comunque, non oltre 600 mila euro per un impianto di distribuzione e fino ad 1.2 milioni di euro per un impianto di liquefazione.

Possono accedere agli incentivi anche gli impianti di produzione di biocarburanti avanzati diversi dal biometano che entrano in esercizio entro il 31 dicembre 2022.

Per impianti di produzione di biogas oggetto di riconversione a biometano, già incentivati sulla produzione elettrica, il periodo di diritto è pari a quello spettante per impianti nuovi, ed è possibile:

- mantenere l'incentivo per il periodo residuo di diritto su una quota non superiore al 70% della produzione annua media incentivata, calcolata a partire dalla data di esercizio commerciale;
- se riconvertiti oltre la data di fine diritto all'incentivo elettrico, ottenere il 70% dei CIC (con ritiro per 10 anni e solo il rilascio dei CIC successivamente, nel caso di biometano avanzato).

Il produttore può richiedere la qualifica:

- **in esercizio** (dopo l'entrata in esercizio dell'impianto); oppure
- **a progetto** (in fase di progettazione o realizzazione dell'impianto, effettuando successivamente una richiesta di qualifica in esercizio).

Il rilascio della qualifica avviene entro 120 giorni dalla richiesta, al netto dei periodi necessari per integrare le informazioni fornite.

6. Processo di produzione del biogas e del biometano

In questo capitolo verrà analizzato una delle principali tecnologie che rientra nell'ambito delle rinnovabili per la produzione del metano: la digestione anaerobica di materiale organico.

Si tratta di un processo chimico-biologico in assenza di ossigeno, in cui la sostanza organica viene trasformata in biogas costituito per il 50-70% da metano e per la restante parte da CO₂, ad opera di differenti ceppi di microrganismi, interagenti tra loro: i batteri idrolitici, i batteri acidificanti e, infine, i batteri metanigeni.

La produzione di biogas può oscillare dal 40% ad oltre il 90%, in relazione alla tipologia di substrato¹ e delle condizioni di processo che influenzano la degradazione della materia organica.

Componente	% vol
<i>METANO</i>	40-90
<i>ANIDRIDE CARBONICA</i>	30-40
<i>AZOTO</i>	<1
<i>IDROGENO</i>	<1
<i>AMMONIACA</i>	<1
<i>VAPORE ACQUEO</i>	0.3
<i>IDROSSIDO DI ZOLFO</i>	tracce

Tabella 7: Composizione biogas

¹ il substrato è una sostanza costituita da particelle solide e microrganismi che partecipano alle prime fasi del processo di digestione anaerobica.

6.1 Substrati per la digestione anaerobica

Le tipologie di substrati che possono innescare il processo di digestione anaerobica possono essere tutte le sostanze di natura organica; tuttavia, per motivi legati alla loro resa energetica e ai costi economici, questa tipologia viene sfruttata esclusivamente su tipologie di biomasse che possiedono determinate proprietà:

Biomassa	Solidi Totali (%)	Solidi Volatili (% di S.T.)	Resa in Biogas (m ³ /t di S.V.)	Metano nel biogas (%)	Metano (m ³ /ton tal quale)
Liquami					
<i>Bovini da latte</i>	10-16	75-85	300-450	60-65	14-40
<i>Bovini da carne</i>	7-10	75-85	300-450	60-65	9-25
<i>Vitelli carne bianca</i>	0.6-2.9	60-75	300-450	60-65	1-6
<i>Suini</i>	1.5-6	65-80	450-550	60-65	3-17
<i>Ovaiole</i>	19-25	70-75	300-500	60-65	24-61
Letami					
<i>Bovino</i>	11-25	65-85	200-300	60-65	9-41
<i>Suino</i>	20-28	75-90	450-550	60-65	41-90
<i>Avicolo</i>	60-80	75-85	400-500	60-65	108-221
<i>Pollina pre-essiccata</i>	40-80	60-70	450-550	60-65	65-200
<i>Ovino</i>	22-40	70-75	240-500	60-65	22-98
Colture dedicate					
<i>Insilato di mais</i>	20-35	85-95	350-550	53-55	32-101
<i>Insilato di sorgo</i>	20	95	510	52	50
<i>Insilato di triticale</i>	38	93.2	176.6	52.4	33
<i>Insilato di frumento</i>	30	92	520	52	75
<i>Segale integrale</i>	30-35	92-98	500-600	53-55	73-113
<i>Barbabietola da zucchero</i>	21-25	90-95	450-550	55-60	47-78
<i>Erbasilo</i>	25-35	70-95	300-500	53-55	28-91
<i>Trifoglio</i>	19-21	79-81	300-500	50-55	23-47
<i>Stocchi di mais e foglie del tutolo</i>	65	98	451.3	52.6	151
<i>Scarto di cereali</i>	87.7	97.1	650.6	52.8	293
Sottoprodotti agroindustriali					
<i>Residui della lavorazione dei succhi di frutta</i>	25-45	90-95	500-600	55-60	62-154
<i>Scarti lavorazione ortofrutta</i>	5-20	80-90	350-500	50-60	7-54
<i>Melasso</i>	80-90	85-90	300-450	50-55	102-200
<i>Siero di latte</i>	11	90	700	60	42
<i>Paglia</i>	85-90	85-89	450-550	53-55	172-242
<i>Acque di vegetazione</i>	3.5-3.9	70-75	400-500	50-55	5-8
Rifiuti					
<i>FORSU</i>	40-75	50-70	300-450	50-60	30-142
<i>Contenuto ruminale</i>	18-20	90-94	650-800	60-65	63-98
<i>Scarti in incubatoio</i>	44-48	41-45	600-800	60-65	65-112
<i>Uova rotte</i>	21-25	95-97	600-850	60-65	72-134

Tabella 8: Produzione di biogas e metano in funzione della biomassa [8]

In questo elaborato si analizzerà la fattibilità di un impianto di produzione a partire dalla paglia di riso, un sottoprodotto dell'industria agroalimentare, prodotta in quantità non trascurabili, costituita da parti della stessa materia prima e allontanate durante la raccolta.

6.2 Codigestione

Un'ottimizzazione molto diffusa dei processi di degradazione dei substrati potrebbe essere offerta dalla codigestione di differenti substrati organici in contemporanea, essa ha l'obiettivo di ottimizzare la resa di biogas poiché instaura una sinergia positiva con il co-substrato. Un ulteriore vantaggio della

miscelazione di diversi substrati è la stabilità del processo che essa può permettere, andando a compensare le fluttuazioni di massa stagionali, o evitare eccessivo o insufficiente carico alla capacità stessa del digestore. In particolare, nel nostro caso di utilizzo esclusivo di paglia di riso, il processo di digestione anaerobica potrebbe risultare di scarsa efficienza a causa delle sue proprietà (alto rapporto C/N >40), oltre l'intervallo ottimale 15÷30, per tale motivo potrebbero essere usati alcuni rifiuti biodegradabili e ricchi di azoto come concimi animali, rifiuti alimentari, fanghi di depurazione. La tabella successiva riassume alcuni dei substrati utilizzati con la paglia di riso, presenti in letteratura:

6.3 Pretrattamenti del substrato

Co-substrate (C/N ratio)	C/N ratio of paddy straw	Reactor type	Operating condition	Pretreatment	Paddy straw/ Co-substrate ratio	Inoculum	Methane Yield ($L_{CH_4} kg_{VS}^{-1}$) (CH ₄ , %)
Animal manures							
Swine manure (13.36)	70.24	1 L glass bottles batch reactor	Mesophilic (35 ± 1 °C) TS = 15% HRT = 60 d C/N = 22.12	Chopping	1:4 (VS)	Biogas slurry obtained from a biogas production project in a swine farm.	275.35 (NA)
Goat manure (17.97 ± 0.84)	92.91 ± 3.10	1 L Erlenmeyer flasks Batch reactors	Mesophilic (35 ± 1 °C) TS = 8% HRT = 55 d C/N = 26.23	Chopping (2 –3 cm)	1:1 (TS)	Anaerobic sludge of dairy manure obtained from an anaerobic digester.	216.4 (NA)
Chicken manure (9.6 ± 0.16) & Dairy manure (22.2 ± 0.22)	51.7 ± 1.62	1 L batch reactor	Thermophilic (55 °C) TS = NA (VS = 15 g L ⁻¹) HRT = 15 d C/N = 30.67	Chopping (2 3 cm)	1:1 (VS)	Digested cattle manure from the lab-scale reactor operated at 55 °C with a HRT of 15 days.	309.9 (NA)
Aquatic weeds							
<i>Salvinia molesta</i> (57.39)	29.50	600 ml polyethylene bottles batch laboratory-scale reactor	Mesophilic (-30 °C) TS = 5% HRT = 30 d C/N = 34.80 Total ammonia = 0.331 g NH ₄ -N L ⁻¹	NA	1:1.5 (TS)	Rumen fluid obtained from cow slaughter-house. It contains <i>Clostridium</i> sp., <i>Clostridium sporogenes</i> , <i>Clostridium butyricum</i> and rich Methanogenic bacteria.	69.01 ± 4.18 (60.58%)
Sludges							
Raw sewage sludge (6.31)	40.36	500 mL bottles batch 2-stage reactor	Thermophilic (55 °C) TS = 7.6% HRT = 33 d C/N = 25	Chopping and Grinding (2 mm)	NA	Acclimated sludge, which produced biogas with over 80.0% CH ₄ used for 2nd stage.	266 (75%)
Municipal solid waste (MSW)							
Organic fraction of MSW (52.14)	121.4	175 mL bottles batch reactor	Mesophilic (37 °C) TS = NA HRT = 30 d C/N = 33	Chopping and Grinding	1:2 (VS)	Digested sludge from anaerobic digester of cow dung, located near Nagpur.	403 ± 65.44 (61 ± 0.16)
Co-digestion + Pretreatment							
Food waste (24.47)	40.7	5 L CSTR, 2-phased reactor	Mesophilic (35 ± 1 °C) Mixing = 5 min after every 2 h OLR ≤ 6 kg _{VS} m ⁻³ d ⁻¹ HRT = 30 d C/N = 25.16	Chopping and Grinding (0.5–1 cm); 2% NaOH pretreatment.	1:3.88 (VS)	Anaerobic sludge for both acidogenic and methanogenic phases, collected from anaerobic digester treating swine manure (35 °C)	535 (63%)
Cow manure (NA)	NA	1 m ³ PVC plug-flow semi-continuous reactor	Mesophilic (38 °C) OLR = 3.9 kg _{VS} m ⁻³ d ⁻¹ HRT = 25 d Total ammonia = 3.22 ± 0.6 g NH ₄ -N L ⁻¹ C/N = 25	Chopping (2 –3 cm); Thermal pretreatment with maceration.	1:1 (TS)	Digestate from an industrial biogas plant fed with cow manure and vegetable co-substrates.	455.6 ± 0.11 (67 ± 5%)
Sewage sludge (NA)	75	2.4-L bottles semi-continuous reactors	Mesophilic (36 °C) OLR = 2.14 kg _{VS} m ⁻³ d ⁻¹ TS = 5.31% HRT = 20 d C/N = 30	Grinding (5 mm); Enzymatic pretreatment	0.5:1 (TS)	Digested sewage sludge from full scale mesophilic digester	311 ± 0.021 (61.4 ± 1.6%)

Tabella 9: Co-digestione della paglia di riso con co-substrati azotati [9]

Uno step fondamentale per l'ottimizzazione del processo di digestione anaerobica è il pretrattamento della materia prima che consente numerosi vantaggi: l'incremento della velocità del processo e di conseguenza il grado di degradazione del substrato, mitigare il tempo di ritenzione idraulica e aumentare i tassi di produzione del biogas, l'agevolazione della fase idrolitica; inoltre consente di ottenere concentrazioni minori di impurità contenute nel biogas.

Tipologia fi trattamento	Principio d'azione
Trattamenti fisici	Processi ossidativi
Trattamenti chimici	Processi termici, meccanici
Trattamenti biologici	Processi enzimatici

Tabella 10: Trattamenti avanzati di pretrattamento delle matrici organiche prima della AD

I principali pretrattamenti meccanici utilizzati sono:

- Dilacerazione: consente di aprire i contenitori di raccolta nei quali vengono conferiti i rifiuti e di ridurre la pezzatura del materiale più voluminoso per permettere una corretta selezione.
- Separazione dei metalli: attraverso l'uso di materiali magnetici per materiali ferrosi e separatori a correnti indotte per metalli non ferrosi, ha lo scopo di proteggere da raschiatura e possibile degrado le successive strumentazioni.
- Separazione inerti e plastiche: ha lo scopo di rimuovere la materia non biodegradabile e diminuire il rischio di abrasione ed eventuali blocchi o intasamenti durante il processo.
- Controllo pezzatura: ha l'obiettivo di rendere la pezzatura compatibile con il processo e con le apparecchiature utilizzate per la movimentazione della miscela. La granulometria del substrato, infatti, influenza direttamente le rese di processo, in quanto da essa dipende la superficie di contatto tra i microrganismi ed il materiale da digerire. Il controllo della pezzatura viene effettuato tramite fasi di vagliatura e triturazione eseguite prima delle operazioni di miscelazione del substrato.

In aggiunta possono essere applicati pretrattamenti di tipo fisico, chimico e biologico rivolti al substrato organico per poterne migliorare la resa di biogas, andando a influire sull'efficienza della fase di idrolisi riconosciuta come lo step limitante dell'intero processo.

Ci concentreremo sui pretrattamenti adottati per la paglia di riso studiati in letteratura:

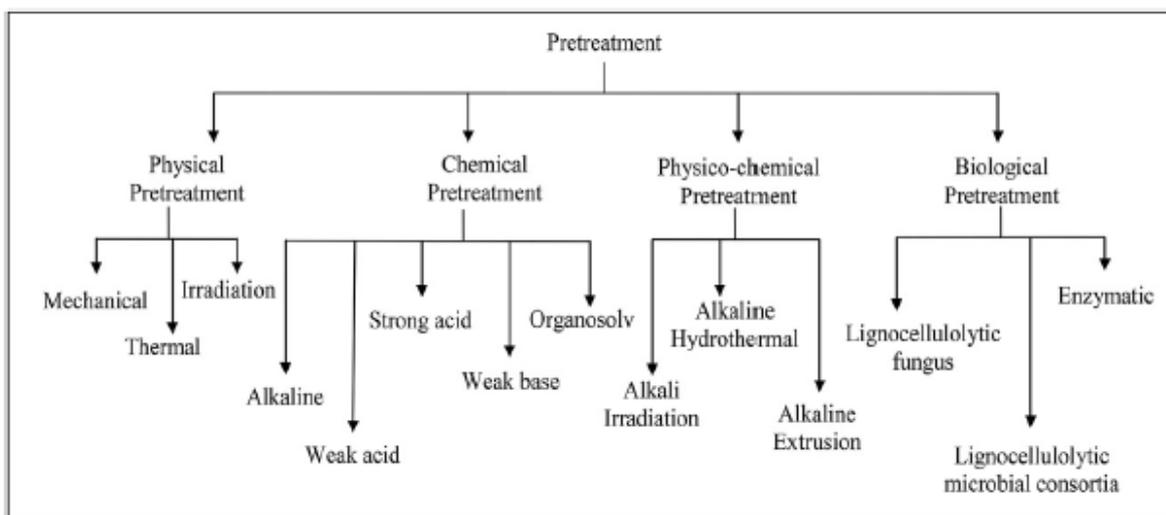


Figura 9: Metodi di pretrattamento adottati per la paglia di riso prima della digestione anaerobica [9]

Il pretrattamento fisico prevedono metodi meccanici per ridurre le dimensioni della particella e metodi idrotermici (temperatura e pressione elevate) per migliorare la digeribilità della paglia di riso e di conseguenza migliorare la produzione di biometano. Nel metodo di riduzione della dimensione delle particelle, la superficie specifica e la densità apparente della biomassa aumentano e il volume diminuisce attraverso apparecchiature di uso comune come tritatore, mulino ed estrusore [10]. Lo studio effettuato da Chen e il suo gruppo di ricerca [11] ha riportato la più alta resa di metano ($227.3 \frac{L}{kgvs}$) con paglia di riso pretrattata per estrusione.

Il pretrattamento idrotermale utilizza acqua ad alta pressione e temperatura che penetra nella biomassa, idrata la cellulosa e rimuove parzialmente l'emicellulosa e la lignina. Il gruppo di ricerca di He [12] ha studiato il pretrattamento idrotermale della paglia di riso a $200^{\circ}C$ e $150^{\circ}C$ per 0-30 minuti, ottenendo un aumento della resa di metano fino a $134 \frac{L}{kgvs}$ quando la paglia di riso era pretrattata a $150^{\circ}C$ per 20 minuti e una diminuzione quando la paglia di riso era pretrattata a $200^{\circ}C$. I pretrattamenti fisici possono aumentare in modo significativo l'efficienza dell'AD ma l'effetto è comunque limitato in quanto modificare le caratteristiche strutturali, richiede un requisito energetico elevato (vapore o elettricità) che provoca un aumento dei costi del trattamento.

I metodi di pretrattamento chimico impongono l'uso di sostanze chimiche, come acidi, alcali, acidi organici e liquidi ionici. Questi metodi alterano le caratteristiche fisiche e chimiche della paglia di riso. Ciò è stato evidenziato dallo studio effettuato da Song e il suo gruppo di ricerca [13] dove l'effetto del pretrattamento alcalino con idrossido di calce, $Ca(OH)_2$ sulla paglia ha evidenziato la riduzione di lignina, cellulosa ed emicellulosa rispettivamente del 24.27% , 53.0% e 64.53% con un aumento della concentrazione di $Ca(OH)_2$ dal 4% al 12% in 11 giorni. La paglia di riso pretrattata con alcalina ha prodotto $225.3 \frac{L}{kgvs}$ di resa in metano, che era del 67.55% superiore a quella della paglia di riso non trattata. Successivamente Gu e il suo gruppo di ricerca [14], ha combinato il pretrattamento chimico con il pretrattamento con estrusione riportando una resa di metano maggiore di $330.9 \frac{L}{kgvs}$.

Pertanto, si potrebbe concludere che i pretrattamenti più efficaci per la paglia di riso sono quelli fisico-chimici.

Tuttavia, i pretrattamenti chimici formano sostanze tossiche, che interferiscono nei processi microbici ed enzimatici e sono anche pericolosi per l'ambiente, se rilasciati prima di essere adeguatamente trattati.

Il pretrattamento biologico è stato utilizzato anche da diversi ricercatori per i suoi vantaggi rispetto ai pretrattamenti fisico/chimici: una maggiore specificità del substrato e della reazione grazie alla capacità di degradazione, minori requisiti energetici, eco-compatibilità e rese più elevate dei prodotti desiderati. Questi metodi coinvolgono funghi, consorzi microbici, degradanti della biomassa lignocellulosici e pretrattamenti enzimatici.

Dagli studi di Phutela e il suo gruppo di ricerca [15] l'utilizzo del fungo *Coriolus versicolor* (MTCC 138) sulla paglia di riso mostra la riduzione delle concentrazioni di cellulosa, lignina e silice rispettivamente del 19.3%, 19.1% e 32.5%, e la resa di biogas risulta superiore del 26.2% a quella della paglia di riso non trattata in 5 giorni.

Inoltre, Mustafa e il suo gruppo di ricerca [16] ha studiato il fungo *Pleurotus ostreatus* (DSM 11191) per il pretrattamento della paglia di riso ottenendo una resa massima di metano di $258 \frac{\text{L}}{\text{kg}_{\text{VS}}}$ che era del 165% superiore a quella non trattata.

Il pretrattamento biologico, però, presenta alcuni inconvenienti rispetto ai pretrattamenti fisici/chimici, tassi di pretrattamento lenti e potenziale perdita di carboidrati insieme alla lignina, che rendono il processo industrialmente poco attraente. A causa dei costi che comportano i processi di pretrattamento, questa fase è stata considerata l'elemento di costo chiave nell'AD della paglia di riso.

Pretreatment		Anaerobic Digestion			
Types	Conditions	% Removal of Lignin; Silica	Conditions: TS (%); Temp (°C); HRT(d)	Observed-biogas yield; methane yield ($\text{L kg}_{\text{VS}}^{-1}$)	Improved-biogas yield; methane yield (%)
Physical					
Extrusion	40-mesh screen, particle size <50 mm	nil	5; 37 ± 1; 60	NA; 227.3	NA; 72.0
Hydrothermal	150 °C, 20 min		NA; 35; 45	289; 134	12.45; 22.93
Chemical					
Alkaline (Sodium hydroxide, NaOH)	6% NaOH, 20 ± 2 °C, 21d	28.4; NA	5; 35; NA	520.0; NA	44.4; NA
Alkaline (Calcium hydroxide, Ca(OH) ₂)	9.81% (w/w, TS) Ca(OH) ₂ , 25 ± 2 °C, 5.89 d	10.0; NA	8; 37; 41	NA; 225.3	NA; 67.55
Hydrogen peroxide (H ₂ O ₂)	2.68% H ₂ O ₂ (w/w TS), 25 ± 2 °C, 6.18 d	12.5; NA	NA; 35 ± 2; 41	NA; 288.0	NA; 88.0
Organosolv	75% ethanol + sulfuric acid (H ₂ SO ₄), 150 °C, 1 h	25.89; NA	NA; 39 ± 1; 55	NA; 152.7	NA; 31.75
Physico-chemical					
Alkaline with Hydrothermal	200 °C, 10 min +5% NaOH	NA; NA	5; 37; 60	315.9; 132.7	132.0; 123.9
Alkali with Microwave	4% NaOH, 10% (w/v) solid loading, 720W microwave for 30 min, 180 °C	65.0; 88.7	7-8; 37 ± 2; 45	371.0; NA	54.7; NA
Extrusion with alkaline	Particle size <0.45 mm, 3% NaOH, 1:6 (w/w) solid loading rate, 35 °C for 48 h	26.15; NA	NA; 35; 40	525.0; 288.0	NA; 54.0
Biological					
Lignocellulolytic fungus	<i>Coriolus versicolor</i> MTCC 138, 5 d + 2% CaSO ₄ + 4% CaCO ₃	19.1; 32.5	NA; 37 ± 2; 45	210.68; NA	26.2; NA
	<i>Pleurotus ostreatus</i> (DSM 11191), 30 d, 28 °C, post milling (dia <2 mm)	30.38; NA	20; 37 ± 2; 30	353.0; 258.0	NA; 165.0
Rumen fluid microbial consortia	3 g raw PS with 60 ml Rumen fluid & 60 ml water at 39 °C for 24 h, pH 7.0	20.6; NA	2.5; 35; 30	495.9; 285.1	66.5; 82.6
Pre-aeration with aerobic sludge	2-cm length PS with aerated aerobic sludge supernatant at 35 °C for 2 d	17.7; NA	16; 35; 55	390.0; 234.0	NA; NA

Note: NA = not available; d = day, h = hour; HRT = hydraulic retention time; PS = paddy straw; TS = total solid; VS = volatile solid.

Tabella 11: Metodi di pretrattamento adottati per la digestione anaerobica della paglia di riso [9]

6.4 Le fasi della digestione anerobica

Il processo di fermentazione anaerobica viene schematizzato nei seguenti stadi:

1. **Idrolisi:** degradazione delle macromolecole organiche in molecole semplici fino a monomeri;
2. **Acidogenesi:** trasformazione delle molecole semplici in etanolo;
3. **Acetogenesi:** trasformazione degli alcoli e degli acidi grassi volatili in acetati, idrogeno e anidride carbonica;
4. **Metanogenesi:** trasformazione degli acetati, idrogeno e anidride carbonica in metano

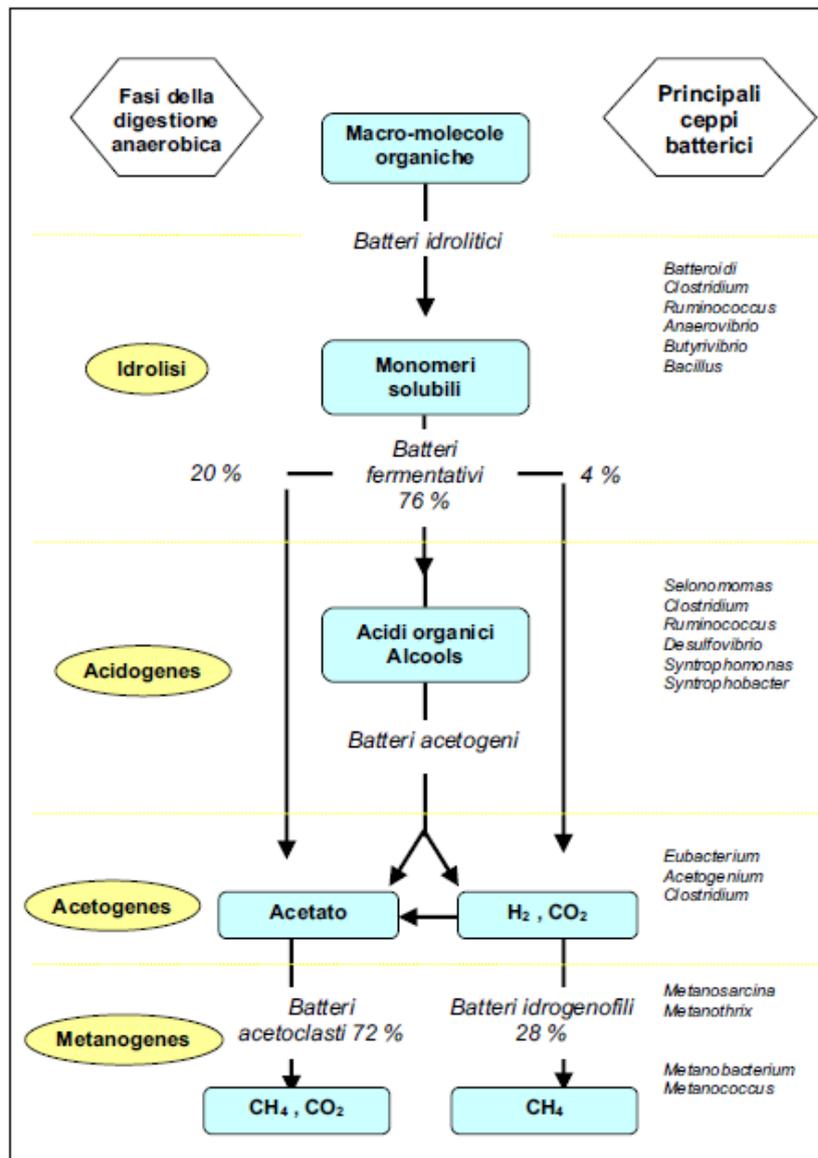


Figura 11: Fasi del processo di AD [17]

Idrolisi:

Nel primo stadio i materiali organici immessi nel digestore, costituiti da proteine, grassi e carboidrati vengono idrolizzati, passando così allo stato di monomeri grazie alla presenza degli enzimi extracellulari prodotti da batteri idrolitici anaerobi facoltativi rilasciati dai batteri presenti nel substrato. Questo stadio rappresenta solitamente lo stadio limitante dell'intero processo di digestione poiché può essere inibita dall'accumulo di aminoacidi e zuccheri.

Questa fase viene espressa con una cinetica del primo ordine:

$$r = K \times X_s$$

r = tasso di idrolisi del substrato $\left[\frac{\text{g}}{\text{m}^3 \text{giorno}} \right]$

X_s = concentrazione di particolato $\left[\frac{\text{g}}{\text{m}^3} \right]$

$$K = \text{costante di idrolisi} \left[\frac{1}{\text{giorno}} \right]$$

Qui di seguito vengono riportate le costanti di idrolisi presenti in letteratura:

Substrato	K (d ⁻¹)	T (°C)
Carboidrati	0,025-0,2	55
Proteine	0,015-0,075	55
Lipidi	0,005-0,010	55
Carboidrati	0,5-2,0	
Lipidi	0,1-0,7	
Proteine	0,25-0,8	
Lipidi	0,63	25
Cellulosa	0,066	35
Scarti di cucina	0,34	35
Scarto organico	0,12	35
Gelatina	0,65	55
Carta	0,036	35
Cartone	0,046	35
Giornale	0,057	35
Scarti di cucina	0,55	37
Fango primario	0,99	35

Tabella 12: Costanti di idrolisi riportate in letteratura per macromolecole e substrati organici composti [18] [19] [20] [21] [22] [23] [24]

Acidogenesi:

Durante la seconda fase i prodotti ottenuti nello stadio precedente (zuccheri, amminoacidi) vengono fermentati in condizioni anaerobiche in acidi grassi volatili, principalmente a catena corta (acetico, propionico, butirrico ed etanolo), ossido di azoto, solfiti di idrogeno, molecole propioniche, alcoli, idrogeno e diossido di carbonio.

REAZIONE ACIDOGENICA	PRODOTTO	CONDIZIONI
$C_6H_{12}O_6 + 2 H_2O \rightarrow 2 CH_3COOH + 2 CO_2 + 4 H_2$	Acido acetico	Basso H ₂
$3 C_6H_{12}O_6 \rightarrow 4 CH_3CH_2COOH + 2 CH_3COOH + 2 CO_2 + 2 H_2O$	Acido propionico, Acido acetico	Qualsiasi H ₂
$C_6H_{12}O_6 \rightarrow CH_3CH_2CH_2COOH + 2 H^+$	Acido butirrico	Basso H ₂
$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2 CH_3CHOHCOOH$	Acido lattico	Qualsiasi H ₂

Tabella 13: Possibili prodotti finali a partire da glucosio in ambiente anaerobico a diverse pressioni parziali di idrogeno

Acetogenesi:

Durante questa fase operano i batteri acetogeni, i quali partono dagli acidi prodotti dalle fasi precedenti producendo idrogeno molecolare, anidride carbonica e acetati (acido acetico, acido formico).

È da sottolineare come questa fase limiti il grado di degradazione dello stadio finale, la composizione del biogas è legata all'azione dei batteri acetogenici.

Qui di seguito vengono riportati alcune principali reazioni per la formazione degli acidi grassi principali:

SUBSTRATO	REAZIONE DI ACETOGENESI
Acido propionico	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH} + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COOH} + 3 \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$
Acido butirrico	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COOH} \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O} (2 \text{CH}_3\text{COOH} + 2 \text{H}_2)$
Acido palmitico	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{COOH} \rightarrow 14 \text{H}_2\text{O} (8 \text{CH}_3\text{COOH} + 14 \text{H}_2)$

Tabella 14: Principali reazioni secondarie di acetogenesi in ambiente anaerobico

Metanogenesi:

Nell'ultima fase della digestione anaerobica i prodotti ottenuti dai batteri acetogeni vengono utilizzati dai batteri metanigeni per la sintetizzazione del metano.

Questo può accadere secondo vie differenti:

- **Acetoclastica:** $\text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{CH}_4$
Prevede la dismutazione anaerobica dell'acido acetico producendo metano e biossido di carboni;
- **Idrogenotrofica:** $\text{CO}_2 + 4 \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$
Ad opera dei batteri idrogenotrofi che operano l'ossidazione anaerobica dell'idrogeno e la riduzione della CO_2 .

6.5 Parametri di gestione del digestore

In questo paragrafo analizzeremo i parametri legati alla gestione del digestore, i quali definiscono l'esercizio in termini di tempi di permanenza della massa in ingresso al digestore.

Vengono qui riportati i parametri essenziali per la definizione dei parametri:

- **Solidi Totali (TS):** rappresentativi del contenuto di sostanza secca (SS) di un campione, i quali possono essere determinati tramite un essiccamento in stufa a 105°C per 24 ore, essi sono ottenuti come somma della frazione organica ed inerte del substrato.
- **Solidi Totali Volatili (TVS):** rappresentativi della frazione di sostanza secca che è volatilizzata a seguito di una combustione di un campione a 550°C fino a peso costante. Essi sono all'incirca ottenuti come differenza tra TS e TFS (Solidi Totali Fissi), i quali sono definiti come la frazione inerte del substrato dopo la combustione.
- **Domanda Chimica di Ossigeno (COD):** quantità di ossigeno necessario per l'ossidazione della sostanza organica, determinata attraverso l'uso di un forte agente chimico ossidante in ambiente acido.
- **BOD₅:** quantità di ossigeno consumata in 5 giorni, in condizioni controllate, per l'ossidazione biologica della sostanza organica presente nel reattore.

Per garantire il corretto funzionamento del processo e il controllo sono necessari i seguenti parametri di gestione:

- Tempo medio di residenza idraulico (HRT): rappresentante il tempo di permanenza di ogni elemento di fluido all'interno di un digestore. Viene definito come il rapporto tra il volume del digestore e la portata di alimentazione al digestore:

$$\text{HRT} = \frac{V}{Q}$$

Dove: HRT: tempo medio di residenza idraulico [giorni]

V: volume del digestore [m³]

Q : portata al reattore $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{giorni}} \right]$

- Tempo medio di residenza dei fanghi (SRT): ossia il tempo medio di residenza dei fanghi nel digestore. È ottenuto come rapporto tra la massa totale dei solidi volatili all'interno del digestore e la portata di sostanza volatile estratta dallo stesso W. Analiticamente:

$$\text{SRT} = \frac{V \cdot X}{W}$$

Dove: SRT: è il tempo medio di residenza dei fanghi [giorni]

V: è il volume del digestore [m³]

X: è la concentrazione dei solidi volatili all'interno del digestore $\left[\frac{\text{kg}_{\text{TVS}}}{\text{m}^3} \right]$

W: è la portata di sostanza volatile estratta dal digestore $\left[\frac{\text{kg}_{\text{TVS}}}{\text{giorno}} \right]$

- Carico Organico Volumetrico (OLR): riferito al substrato, all'unità di volume del digestore e al tempo, viene definito come la quantità di substrato in entrata al digestore riferita all'unità di volume del digestore stesso ed al tempo. Analiticamente:

$$\text{OLR} = \frac{Q \cdot S}{V}$$

Dove: OLR: fattore di carico organico volumetrico in termini di substrato riferito al volume del digestore $\left[\frac{\text{kg}_{\text{substrato}}}{\text{m}^3_{\text{digestore}} \text{giorno}} \right]$

S: concentrazione di substrato nella portata entrante $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$

V: volume del digestore [m³]

Q: portata entrante al digestore $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{giorno}} \right]$

- Carico organico (CF): definito come la quantità di substrato organico entrante al digestore riferita alla quantità di sostanza volatile presente nel digestore nell'unità di tempo. Analiticamente:

$$\text{CF} = \frac{Q \cdot S}{V \cdot X}$$

Dove: CF: fattore di carico organico in termini di substrato $\left[\frac{\text{kg}_{\text{substrato}}}{\text{kg}_{\text{TVS}} \text{ giorno}} \right]$

S: concentrazione di substrato nella portata entrante $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$

V: volume del digestore $[\text{m}^3]$

Q: portata entrante al digestore $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{giorno}} \right]$

X: è la concentrazione dei solidi volatili all'interno del digestore $\left[\frac{\text{kg}_{\text{TVS}}}{\text{m}^3} \right]$

- Produzione specifica del biogas (SGP): rappresenta la quantità di biogas che viene prodotta in funzione della quantità di sostanza organica volatile alimentata al digestore. Questo parametro viene utilizzato per definire le rese della digestione anaerobica e risulta in funzione della biodegradabilità del substrato trattato e dalle caratteristiche del processo. Analiticamente:

$$\text{SGP} = \frac{Q_{\text{biogas}}}{Q \cdot S}$$

Dove: SGP è la produzione specifica di biogas $\left[\frac{\text{m}^3_{\text{biogas}}}{\text{kg}_{\text{substrato}} \text{ alimentato}} \right]$

Q_{biogas} è la portata di biogas prodotto $\left[\frac{\text{m}^3_{\text{biogas}}}{\text{giorno}} \right]$

Q è la portata influente $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{giorno}} \right]$

S è la concentrazione di substrato nella portata influente $\left[\frac{\text{kg}_{\text{substrato}}}{\text{m}^3} \right]$

- velocità di produzione del biogas (GPR): definito come rapporto fra la portata di biogas prodotto e il volume del digestore. Analiticamente:

$$\text{GPR} = \frac{Q_{\text{biogas}}}{V}$$

Dove: GPR velocità di produzione del biogas $\left[\frac{\text{m}^3_{\text{biogas}}}{\text{m}^3_{\text{digestore}} \text{ giorno}} \right]$

Q_{biogas} è la portata di biogas prodotto $\left[\frac{\text{m}^3_{\text{biogas}}}{\text{giorno}} \right]$

V: volume del digestore $[\text{m}^3]$

- Efficienza di rimozione del substrato: la quale esprime un rendimento di rimozione, come differenza tra la quantità di TVS in ingresso e quella in uscita. Analiticamente:

$$\eta = \frac{Q \cdot S - Q \cdot S_e}{Q \cdot S}$$

Dove: η è la percentuale di TVS rimossi [%];

Q è la portata influente ed effluente $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{giorno}} \right]$

S è la concentrazione di TVS nella portata influente $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$

Se è la concentrazione di TVS nella portata effluente calcolata come differenza tra la massa entrante ed il biogas prodotto $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$

6.6 Parametri di esercizio del processo

In questo paragrafo verranno analizzati i principali parametri di controllo che influenzano il processo di digestione anaerobica, in modo da garantire la massima resa di produzione di metano a parità di substrato entrante nel digestore.

6.6.1 Quantità e composizione del substrato

I principali parametri di controllo del processo di AD sono la quantità e qualità; in particolare, in base alla tipologia di materia prima utilizzata e all'inoculo si avrà a disposizione una resa di metano differente.

Un decremento della produzione di biogas e un aumento della percentuale di CO₂ potrebbero segnalare fenomeni di inibizione del processo, a causa dell'eccessiva presenza di acidi grassi volatili ed inibizione del processo, questo porta a scegliere come parametro di osservazione la concentrazione degli acidi grassi volatili e l'alcalinità del mezzo.

Si possono verificare tre diverse situazioni:

1. Un basso contenuto di VFA, congiuntamente a una elevata produzione di biogas, in cui la concentrazione di CO₂ si rilevi pari a 25-33% indicherebbe che il processo è stabile e si ha una buona capacità di trasferimento dai batteri acidificanti quelli metanigeni.
2. Aumenti della concentrazione nel tempo dei VFA, congiuntamente a una produzione di biogas in cui la concentrazione di CO₂ cresca nel tempo, indicherebbe che le popolazioni acidificanti stanno prendendo il sopravvento sui batteri metanigena e si ha quindi un progressivo accumulo di VFA nel mezzo di reazione.
3. Un aumento crescente delle concentrazioni di VFA congiunta ha una produzione di biogas decrescente potrebbero indicare problemi di inibizione o tossicità.

6.6.2 Temperatura

La temperatura ricopre un parametro fondamentale nelle reazioni cinetiche del processo di AD poiché va a influire sulla degradazione delle particelle del substrato. In letteratura, si possono riconoscere tre regimi di lavoro in funzione della temperatura adoperata in tale processo:

1. Regime psicrofilo tra 4÷20°C
2. Regime mesofilo tra 20÷40°C
3. Regime termofilo tra 45÷70°C

In particolare, secondo la relazione di Vant'Hoff Arrhenius: $v_{max,T} = v_{max,20^{\circ}\text{C}} * \theta^{T-20^{\circ}\text{C}}$ ad un conseguente aumento della temperatura di processo corrisponde un aumento dell'attività batterica, per poi decrescere una volta superato il valore ottimale.

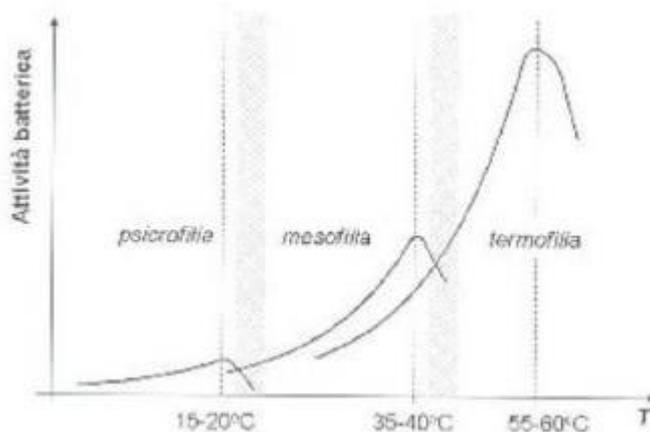


Figura 6: Effetto della temperatura sull'attività batterica. In grigio gli intervalli in cui il processo non è ottimizzato [25]

Si osserva che anche delle piccole variazioni di 2÷3°C possono influenzare l'efficienza del processo soprattutto in vicinanza dei limiti dell'intervallo. Da vari studi emerge che la resa maggiore di biogas nel secondo regime di lavoro è ottenibile in intervalli di temperatura compresi fra i 30÷35°C, mentre nel regime termofilo varia tra 40÷60°C.

6.6.3 pH, alcalinità e Acidi grassi volatili

Ulteriori parametri fondamentali per la stabilità del processo sono: pH, alcalinità e acidi grassi volatili (VFA).

In particolare, il pH segnala un'indicazione sulla stabilità del mezzo di reazione, poiché una sua variazione è collegata sia alla capacità tampone del sistema da parte del mezzo di reazione che alle variazioni dell'equilibrio tra le specie che partecipano alla catena trofica dei microrganismi coinvolti nel processo.

Il suo valore in un digestore è determinato dalla presenza di CO₂ nel mezzo liquido.

Tuttavia, è da segnalare che nel corso dello svolgimento del processo, variazioni di pH si notano in un secondo momento rispetto all'evoluzione dell'effetto tampone del mezzo, poiché risulta evidente quando ormai il bicarbonato ha concluso la sua attività tamponante.

Un parametro che evita cambiamenti smisurati di pH è l'alcalinità dovuta al bicarbonato, poiché la sua concentrazione è direttamente proporzionale alla concentrazione di CO₂ nel gas, di conseguenza un aumento del contenuto di CO₂ blocca una riduzione eccessiva del valore di pH, che distruggerebbe le sostanze che producono il gas metano.

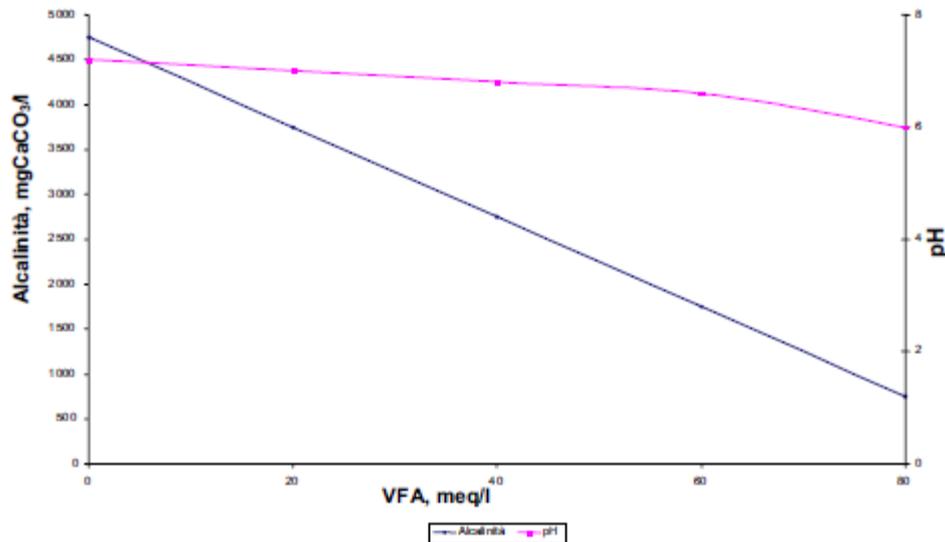


Figura 7: Andamento del pH e della concentrazione del bicarbonato in funzione dell'acidità del mezzo. Fonte: [17]

I valori di pH caratteristici di un processo stabile di AD sono compresi tra 6.5÷7.5 .

Un parametro aggiuntivo da controllare sono gli acidi grassi volatili, essi nel corso del processo vengono degradati dai batteri acetogeni (protoni-riduttori) e dai batteri metanigeni (idrogeno consumatori). Variazioni repentine con incremento della concentrazione indicano che il processo si sta spostando verso processi acidogenici piuttosto che metanigenici, ovvero i metanigeni non sono in grado di rimuovere velocemente l'idrogeno e gli acidi organici, causando l'ammassamento dei VFA, diminuendo il pH fino a inibire le fasi di idrolisi e acetogenesi.

Poiché in presenza di anomalie la concentrazione degli acidi grassi aumenta mentre l'alcalinità diminuisce, è importante monitorare il rapporto tra questi due parametri: valori intorno a 0.3 indicano un processo stabile mentre valori superiori potrebbero causare un problema.

6.6.4 Rapporto C/N e ammoniacale

La concentrazione di azoto ricopre una funzione importante per la crescita microbica. In letteratura vengono riportati valori ideali tra le concentrazioni di carbonio e azoto nelle matrici in ingresso al digestore tra 15÷30, mentre in digestione questo rapporto diminuisce a 5÷10 a causa della fuoriuscita di carbonio sotto forma di metano e CO₂. Il più rilevante azoto inorganico presente in ambiente anaerobico è l'azoto ammoniacale, prodotto dalla degradazione dei composti organici azotati. La concentrazione dell'ammoniaca è direttamente proporzionale all'aumento della temperatura e del pH e può causare l'inibizione ai processi con un regime operativo termofilo e con pH basici.

6.7 Configurazioni impiantistiche

Un processo di digestione anaerobica, oltre a differenziarsi in funzione della temperatura del regime di lavoro come precedentemente anticipato, si può classificare in funzione del numero di stadi, del contenuto di sostanza secca e del sistema di alimentazione.

6.7.1 Numero di stadi

Il processo di digestione anaerobica, in funzione del numero di stadi si suddivide in:

- Mono-stadio: tutte le fasi del processo si svolgono simultaneamente nello stesso digestore;
- Bi-stadio: in questo caso particolare, le fasi di idrolisi/acidogenesi ed acetogenesi si svolgono in un reattore differente rispetto al reattore nel quale si svolge la fase metanigena.

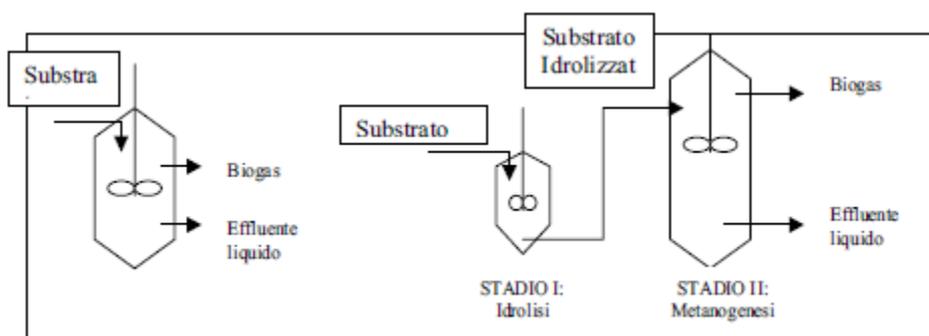


Figura 8: Rappresentazione schematica del processo mono-stadio e del processo bi-stadio [17]

Il vantaggio nell'utilizzare una configurazione bi-stadio consiste nel separare le differenti fasi poiché durante la fase acida si producono sostanze che potrebbero diminuire il valore di pH fino al punto di inibire l'attività dei batteri metanigeni e di conseguenza la resa di produzione di biogas.

Critero	Vantaggi	Svantaggi
Tecnologico	Elasticità del processo	Complessità impiantistica
Biologico	Processo più affidabile anche per rifiuti con basso contenuto in cellulosa	Minori rese in termini di produzione di biogas quando i solidi non vengono metanizzati
Economico ed ambientale	Minor quantità di sostanze tossiche (metalli pesanti) nell'effluente del digestore	Elevati costi di investimento a causa dell'elevata complessità impiantistica

Tabella 15: Vantaggi e svantaggi del processo bi-stadio [17]

Si osserva che nonostante gli sforzi tecnologici, la configurazione bi-stadio non consente di arrivare a rese tali da giustificare i costi di investimento. Uno dei principali vantaggi nell'utilizzo di questa configurazione consiste nella possibilità di utilizzare come materia prima una tipologia di substrato che in genere non viene considerato nella configurazione mono-stadio.

6.7.2 Contenuto di sostanza secca

Un'ulteriore classificazione è in funzione della concentrazione di sostanza secca presente all'interno del digestore:

- Digestore a umido (wet): il tenore di sostanza secca nel substrato è inferiore al 10%;
- Digestore a secco (dry): il tenore di sostanza secca nel substrato è maggiore al 20%;
- Digestore a semisecco (semi-dry): il tenore di sostanza secca nel substrato è compreso fra il 10÷20%.

Digestore a umido (wet):

La caratteristica di un processo di tipo a umido è la diluizione del materiale organico, dopo opportuni processi di pretrattamento, con dell'acqua di rete o dal parziale ricircolo dell'effluente del reattore. Lo scopo è quello di ottenere un contenuto di solidi totali inferiori al 10%, in modo tale da poter impiegare un digestore completamente miscelato; tuttavia, non è sempre possibile ottenere una perfetta miscelazione, in questo caso si possono osservare tre fasi separate, caratterizzate da diverse densità: la porzione più pesante tenderà a posarsi sul fondo, invece quella più leggera tenderanno ad accumularsi nella parte superiore.

Uno dei punti critici di questa tipologia è la corto-circuitazione idraulica, ovvero, la fuoriuscita con tempi di ritenzione ridotti rispetto a quelli progettuali del materiale entrante, non perfettamente miscelato con il materiale già presente nel digestore, causando una minore degradazione del substrato trattato e perciò una minore produzione di biogas.

Per una buona gestione sono programmate rimozioni della frazione più pesante e quella più leggera.

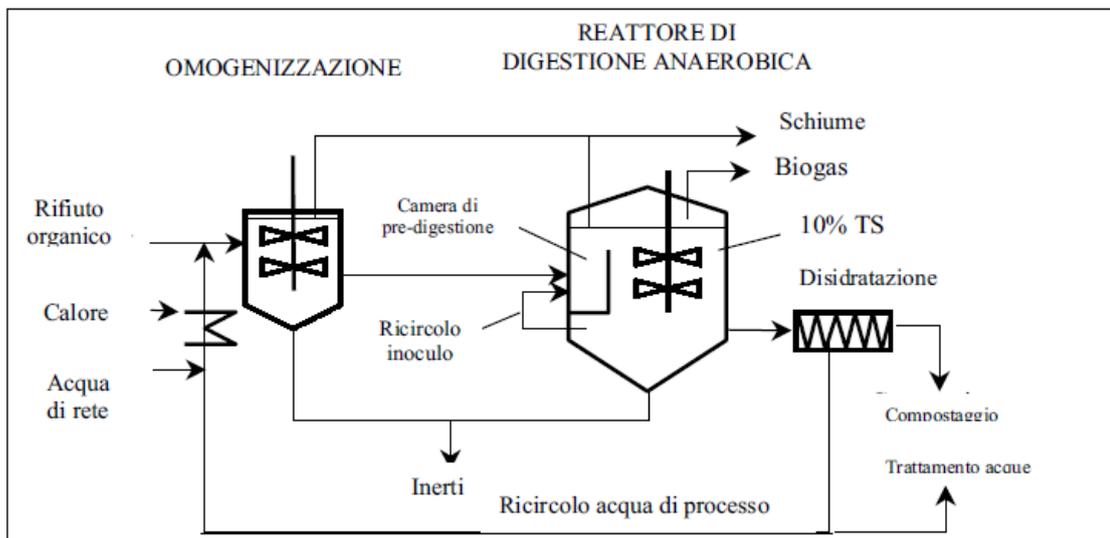


Figura 9: Tipico schema di processo wet a fase singola [17]

La tipologia impiantistica per questa tipologia sono i reattori completamente miscelati (CSTR), nel quale è necessaria una buona miscelazione per assicurare il giusto tempo di contatto dei batteri con il substrato e per evitare cortocircuiti.

Di seguito vengono elencati i principali vantaggi e svantaggi di questa tipologia:

Criterio	Vantaggi	Svantaggi
Tecnologico	Buona conoscenza ed esperienza nel campo del processo; Applicabilità in co-digestione con rifiuti liquidi ad alto contenuto in sostanza organica	Corto-circuitazione idraulica; Fasi separate di materiale galleggiante e pesante; Abrasioni delle parti meccaniche dovuta alla presenza di sabbie e inerti; Pretrattamenti di preparazione del rifiuto complessi
Biologico	Diluizione dei picchi di concentrazione di substrato e/o sostanze tossiche influenti il reattore	Forte sensibilità ad eventuali shock per la presenza di sostanze inibitorie e carichi organici variabili che entrano in contatto intimo con la biomassa; Perdita di sostanza volatile biodegradabile nel corso dei pretrattamenti;
Economico ed ambientale	Spese ridotte per i sistemi di pompaggio e miscelazione, ampiamente diffusi sul mercato	Elevati costi di investimento a causa degli equipaggiamenti utilizzati per i pretrattamenti e per i volumi dei reattori; Produzione di elevate quantità di acque di processo

Tabella 16: Vantaggi e svantaggi del processo wet [17]

Parametro di processo	Intervallo
Concentrazione solidi nel rifiuto [% _{TS}]	10, fino a 15
Carico organico $\left[\frac{\text{kgvs}}{\text{m}^3 \text{giorno}}\right]$	2÷4, fino a 6
Tempo ritenzione idraulica [giorno]	10÷15, fino a 30
Rese di processo	
Produzione Biogas $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{t}_{\text{rifiuto}}}\right]$	100÷150
Produzione specifica Biogas $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{kgvs}}\right]$	0.4÷0.5
Velocità di produzione $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{m}^3 \text{giorno}}\right]$	5÷6
Concentrazione di Metano [%]	50÷70
Riduzione sostanza volatile [%]	50÷60, fino a 75

Tabella 17: Intervalli tipici dei parametri operativi e delle rese del processo wet [17]

Digestore a secco (dry):

La principale caratteristica di questa tipologia di digestore è il trattamento dei materiali organici senza l'utilizzo di una diluizione, ottenendo il vantaggio di lavorare con maggiori carichi volumetrici (fino a $10 \frac{\text{kgvs}}{\text{m}^3 \text{giorno}}$ grazie al minor contenuto d'acqua nel digestore) e di conseguenza

avere una minore incidenza sui costi di realizzazione del componente. Ulteriore vantaggio è la creazione di fasi separate, e quindi la deposizione del materiale organico sul fondo del digestore.

In questa tipologia, il tenore di solidi del substrato trattato è solitamente 25-40%, di conseguenza solo le materie prime con un elevato tenore di solidi (>50%) necessitano di esse diluiti con acqua per poter essere convenientemente trattati.

Per tale motivo sono indispensabili particolari metodi di pompaggio e miscelazione in grado di lavorare con flussi di materiali molto concentrati e resistenti a eventuali problemi che potrebbero causare materiali inorganici; l'unico pretrattamento necessario è una vagliatura introduttiva in modo tale da eliminare materiale con dimensioni superiori ai 40mm, ottenibile con i trituratori nel caso di rifiuto organico raccolto separatamente alla fonte o vagli a tamburo nel caso di rifiuto organico separato meccanicamente.

La tipologia impiantistica per questa tipologia sono i digestori con flusso parzialmente o totalmente a piste (plug-flow).

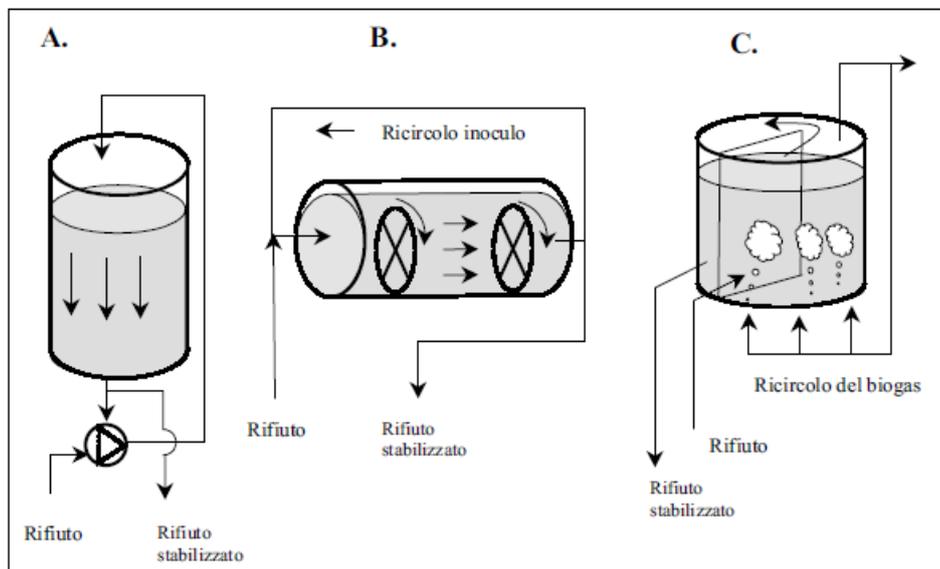


Figura 10: Differenti tipologie di reattore nei sistemi dry: (A=processo Dranco, B: processo Kompogas; C=processo Valorga) [17]

Di seguito vengono elencati i principali vantaggi e svantaggi di questo processo:

Criterio	Vantaggi	Svantaggi
Tecnologico	Nessun bisogno di miscelatori interni al reattore; Robustezza e resistenza ad inerti pesanti e plastiche; Nessuna corto circuitazione idraulica	Rifiuti con basso tenore in sostanza solida (<20% _{TS}) non possono essere trattati da soli
Biologico	Bassa perdita di sostanza organica biodegradabile nei pretrattamenti; Elevati OLR applicabili; Resistenza a picchi di concentrazione di substrato o sostanze tossiche	Minima possibilità di diluire sostanze inibitorie e carichi organici eccessivi con acqua fresca
Economico ed ambientale	Pretrattamenti minimi e più economici; Ridotti volumi dei reattori; Ridotto utilizzo di acqua fresca; Minime richieste di riscaldamento del reattore	Elevati costi di investimento a causa degli equipaggiamenti utilizzati per il trattamento

Tabella 18: Vantaggi e svantaggi del processo dry [17]

Parametro di processo	Intervallo
Concentrazione solidi nel rifiuto [% _{TS}]	25÷40
Carico organico $\left[\frac{\text{kg}_{\text{VS}}}{\text{m}^3 \text{giorno}}\right]$	8÷10
Tempo ritenzione idraulica [giorno]	25÷30
Resa di processo	
Produzione Biogas $\left[\frac{\text{m}^3}{t_{\text{rifiuto}}}\right]$	90÷150
Produzione specifica Biogas $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}_{\text{VS}}}\right]$	0.2÷0.3
Velocità di produzione $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{m}^3 \text{giorno}}\right]$	2÷3
Concentrazione di Metano [%]	50÷60
Riduzione sostanza volatile [%]	50÷70

Tabella 19: Intervalli tipici dei parametri operativi e delle rese del processo dry [17]

Digestore a semi-secco (semi-dry):

In questa tipologia si utilizzano rifiuti con un contenuto di solidi interposto tra 15-20%. Dal lato impiantistico viene utilizzato un reattore miscelato (CSTR) che può lavorare sia in regime mesofilo che termofilo.

Anche in questa tipologia viene previsto lo svuotamento e la pulizia del fondo del digestore a intervalli variabili, poiché si prevedono la formazione di tre fasi distinte, anche se meno evidenti rispetto al digestore a umido.

Uno dei maggiori accorgimenti per questa tipologia è la linea di pretrattamento del rifiuto, la quale dovrà disporre di un nastro trasportatore dotato di deferrizzatore per l'eliminazione dei materiali ferrosi, un tritratore per diminuire le dimensioni delle particelle e di una vasca di miscelazione. Di seguito vengono elencati i principali vantaggi e svantaggi di questo processo:

Criterio	Vantaggi	Svantaggi
Tecnologico	Semplicità dei sistemi di pompaggio e miscelazione; Possibilità di trattare il rifiuto da raccolta differenziata senza particolari pretrattamenti	Accumulo di materiali inerti sul fondo del rettore e necessità di scaricarli; Abrasiono delle parti meccaniche; Pretrattamenti complessi per RU indifferenziato
Biologico	Diluizione dei picchi di concentrazione di substrato o sostanze tossiche	Sensibilità ad eventuali shock per la presenza di sostanze inibitorie e carichi organici; Perdita di sostanza volatile biodegradabile nel corso dei pretrattamenti del rifiuto indifferenziato
Economico ed ambientale	Spese ridotte per i sistemi di pompaggio e miscelazione	Elevati costi di investimento a causa degli equipaggiamenti utilizzati per i pretrattamenti e per i volumi dei reattori; Produzione di elevate acque di processo

Tabella 20: Vantaggi e svantaggi del processo semi-dry [17]

Parametro di processo	Intervallo
Concentrazione solidi nel rifiuto [% _{TS}]	15÷20, fino 25
Carico organico $\left[\frac{\text{kgvs}}{\text{m}^3 \text{giorno}}\right]$	8÷12, fino 18 in termofilia
Tempo ritenzione idraulica [giorno]	10÷15
Resa di processo	
Produzione Biogas $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{t}_{\text{rifiuto}}}\right]$	100÷150
Produzione specifica Biogas $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{kgvs}}\right]$	0.3÷0.5
Velocità di produzione $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{m}^3 \text{giorno}}\right]$	3÷6
Concentrazione di Metano [%]	55÷60
Riduzione sostanza volatile [%]	40÷50, fino 60

Tabella 21: Intervalli tipici dei parametri operativi e delle rese del processo semi-dry [17]

Viene riportata una tabella riepilogativa degli intervalli tipici dei parametri operativi e delle rese dei vari processi:

Parametro di processo	Secco	Semi-secco	Umido
Concentrazione solidi nel rifiuto [% _{TS}]	10÷15	15÷20, fino 25	25÷40
Carico organico $\left[\frac{\text{kgvs}}{\text{m}^3 \text{giorno}}\right]$	2÷4, fino 6	8÷12, fino 18	8÷10
Tempo ritenzione idraulica [giorno]	10÷15, fino 30	10÷15	25÷30
Resa di processo			
Produzione Biogas $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{t}_{\text{rifiuto}}}\right]$	100÷150	100÷150	90÷150
Produzione specifica Biogas $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{kgvs}}\right]$	0.4÷0.5	0.3÷0.5	0.2÷0.3
Velocità di produzione $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{m}^3 \text{giorno}}\right]$	5÷6	3÷6	2÷3
Concentrazione di Metano [%]	50÷70	55÷60	50÷60
Riduzione sostanza volatile [%]	50÷60, fino 75	40÷50, fino 60	50÷70

Tabella 22: intervalli tipici dei parametri operativi e delle rese dei vari processi [17]

6.7.3 Sistema di alimentazione

L'ultima classificazione da analizzare è quella in funzione della frequenza di alimentazione del substrato all'interno del digestore:

- *Digestore batch*: la caratteristica di questa tipologia di digestori è un sistema di alimentazione discontinuo, ossia il materiale organico viene inserito tutto insieme, dopodiché il digestore viene sigillato e il processo di AD ha inizio. Nel corso del processo ha origine un percolato che viene continuamente ricircolato all'interno del digestore.

Esistono tre tipologie principali:

1. La configurazione a fase singola in cui il percolato originatosi viene continuamente ricircolato in testa al digestore.
2. La configurazione a fasi sequenziali dove viene effettuato un ricircolo in testa al digestore e successivamente il percolato prodotto contenente sostanza organica vecchia viene ricircolato in testa a un secondo reattore che contiene biomassa più fresca. Quest'ultimo a sua volta provvederà a rifornire percolato al digestore contenente biomassa stabilizzata.
3. Nella configurazione Up-flow Anaerobic Sludge Blanket (UASB), detto trattamento anaerobico acqua reflue si realizza nel trattamento delle acque.

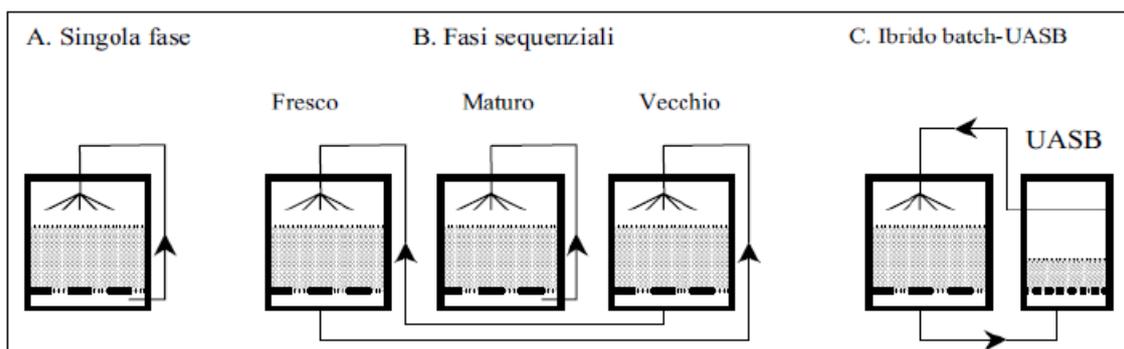


Figura 11: Principali configurazioni dei reattori batch [17]

I vantaggi di queste tipologie si riscontrano nei bassi costi di realizzazione e di esercizio e nella loro semplicità, mentre gli svantaggi sono legati agli elevati consumi energetici seguiti da una bassa resa di produzione di biogas a causa del rischio di ostruzione del digestore e all'enorme richiesta di superficie.

Critério	Vantaggi	Svantaggi
Tecnologico	Tecnologicamente semplice; Robusto	Può subire intasamenti; Necessità di bulking agent; Rischi di esplosività durante la fase di caricamento del digestore
Biologico	Affidabilità di processo	Rese di biogas ridotte a causa dell'incanalamento nel corpo del digestore
Economico ed ambientale	Economico; Applicabile in Paesi in via di sviluppo; Ridotto utilizzo di acqua	Elevata necessità di superficie (confrontabile con il compostaggio)

Tabella 23: Vantaggi e svantaggi dei processi batch [17]

- Digestore in continuo: sono contraddistinti da un'alimentazione continua del materiale organico nel digestore, con conseguente produzione di biogas e digestato in modo continuo.

A loro volta possono essere classificati in:

1. Reattori completamente miscelati (CSTR, Continuous Stirred Tank Reactor)
2. Reattori con flusso a pistone (PFR, Plug Flow Reactor)

Le specifiche di queste tipologie di digestori sono state descritte precedentemente.

6.8 Da biogas a biometano: tecnologie di upgrading

A valle del processo di digestione anaerobica, il biogas viene sottoposto a una valorizzazione rimuovendo parte della concentrazione di CO₂ e di altri gas residui che tendono ad abbassare il potere calorifico medio della miscela.

Le principali tecniche per l'upgrading del biogas sono:

6.8.1 Separazione a membrana

La seguente tecnologia sfrutta la differenza di permeabilità della CO₂ e CH₄ attraverso membrane polimeriche, grazie al gradiente di pressione parziale dei gas tra i due lati della membrana, in particolare CO₂ e O₂ permeano attraverso la membrana, mentre CH₄ e N₂ restano nel retentato.

La configurazione più semplice è composta da una singola unità a membrana, tuttavia, per una maggiore efficienza il processo può avvenire in due o tre stadi.

Anticipatamente al processo, il biogas grezzo viene pretrattato con desolfurazione e deumidificazione per eliminare eventuali componenti dannosi al processo. A valle di ciò il biogas viene compresso fino a pressioni di 10÷16 bar o superiori e successivamente inviato alle membrane selettive, le quali hanno la funzione di raccogliere le molecole di CH₄ che presentano un diametro della particella superiore a quelle della CO₂, mentre le molecole di anidride carbonica vengono imprigionate nel filtro.

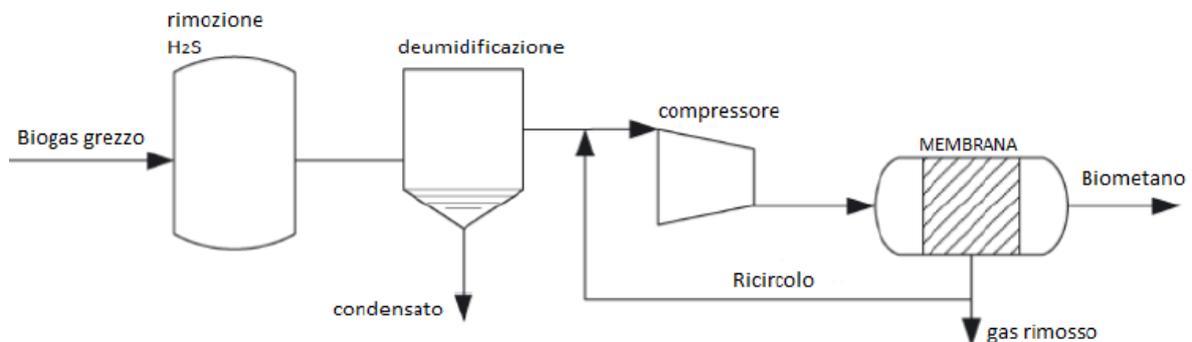


Figura 12: Schema di impianto per upgrading a membrana a singolo stadio con ricircolo [26]

6.8.2 Processo water scrubbing (PWS)

In questa tecnologia viene sfruttata la diversa solubilità della CO₂ rispetto al CH₄ a pressioni tra 6÷10 bar. Il processo ha inizio a valle della desolfurazione del biogas prodotto, successivamente esso viene posto all'interno di uno scrubber e viene fatta precipitare in controcorrente dell'acqua. Mentre in testa al reattore viene estratta la soluzione liquida contenente CO₂, l'acqua del contaminante viene trasportata in un separatore flash liberando una componente gassosa che viene fatta ricircolare per diminuire le perdite di metano assorbite. Successivamente il liquido impiegato viene reimpresso dall'alto della colonna di assorbimento per garantire i costi di processo altrimenti si richiederebbe un continuo smaltimento di portata di acqua/soluzione inquinata e il reintegro di nuovo solvente.

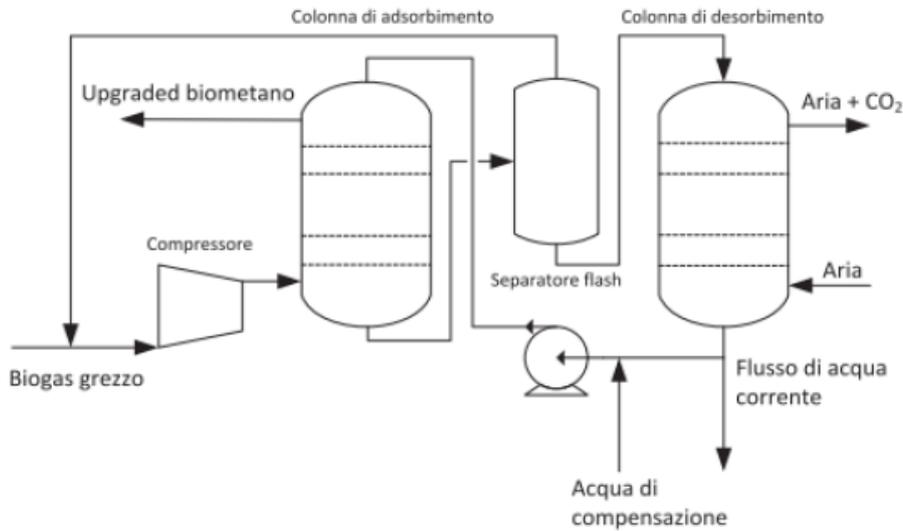


Figura 13: Diagramma di flusso semplificato del processo di upgrading del biogas attraverso lo scrubbing con acqua [26]

6.8.3 Scrubbing fisico con composti organici

Molto simile al PWS, questa tecnologia utilizza una soluzione di solvente organico (es. glicole polietilenico) invece di acqua come liquido di lavaggio. L'anidride carbonica mostra solubilità più elevata in questi solventi che in acqua. Come risultato, con le stesse quantità di biogas grezzo sono necessari meno riciccoli del liquido di lavaggio grazie alla solubilità dell'anidride carbonica, fino a 5 volte più elevata nei solventi, ciò consente la riduzione della portata del liquido di lavaggio e la dimensione delle apparecchiature.

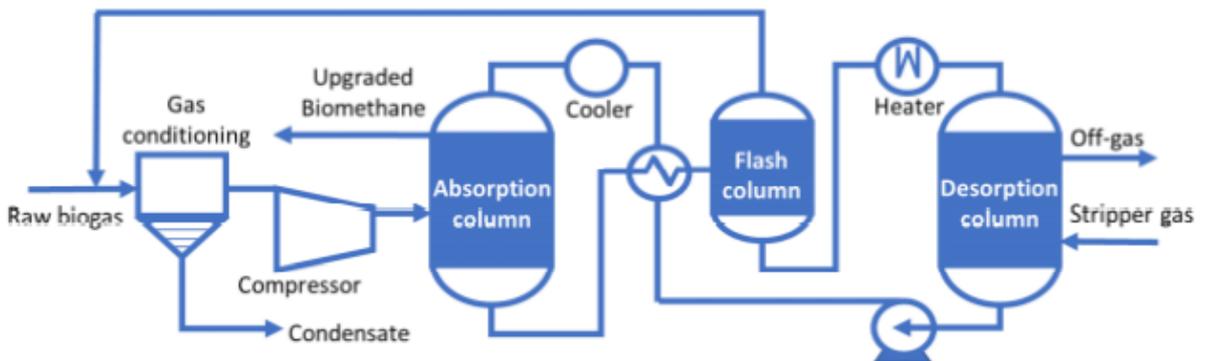


Figura 14: Diagramma di flusso semplificato del processo di upgrading del biogas attraverso lo scrubbing fisico con solventi organici [27]

6.8.4 Scrubbing chimico con Hot Potassium Carbonate) (HPC)

In questa tecnologia viene impiegata una soluzione in cui la CO₂ non solo viene disciolta, ma viene coinvolta in una reazione chimica con i composti amminici contenuti nel solvente liquido, tradizionalmente soluzioni di ammine (MEA, DMEA), molto efficienti ma associati a problemi di tossicità per l'uomo e l'ambiente.

Questa tecnologia è talmente selettiva verso la CO₂ da consentire di assicurarsi una purezza del biometano pari al 99%, con perdite di metano inferiori allo 0.1%.

Un'alternativa ai problemi di tossicità è rappresentata dall'utilizzo di soluzioni saline del carbonato di potassio:

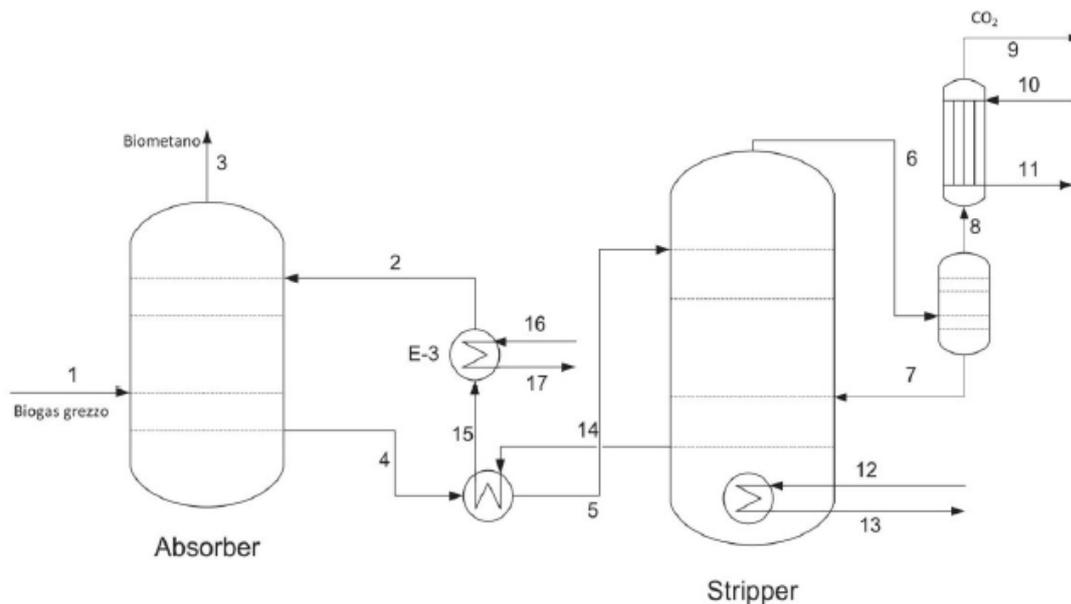
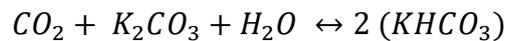


Figura 15: Diagramma di flusso semplificato del processo di upgrading del biogas attraverso lo scrubbing con ammine [26]

6.8.5 Pressure Swing Adsorption (PSA)

L'adsorbimento a pressione oscillante: impiega materiali porosi ad alta superficie specifica in grado di adsorbire selettivamente CO₂, N₂ e O₂ in pressione e di rilasciarli a pressione inferiore.

I materiali principalmente utilizzati sono:

- Adsorbenti di equilibrio (zeoliti): adsorbono quantità più elevate di CO₂ rispetto a CH₄;
- Adsorbenti cinetici (CMS): adsorbono molto più rapidamente la CO₂ rispetto al CH₄.

In questo caso il biogas grezzo dovrà subire un pretrattamento di desolfurazione e deumidificazione.

Successivamente il biogas grezzo viene inviato, a alta pressione, a una colonna di adsorbimento che trattiene la CO₂, vengono chiuse le valvole di ingresso e di uscita lasciando aperta quella di spurgo, si avrà una diminuzione della pressione nella colonna fino alla pressione di desorbimento in modo da avere il rilascio del gas in precedenza adsorbito; in seguito quando la colonna sarà riempita di CO₂, avviene il rilascio della CO₂ e la ripressurizzazione o con flusso parallelo alla corrente del biogas o in controcorrente.

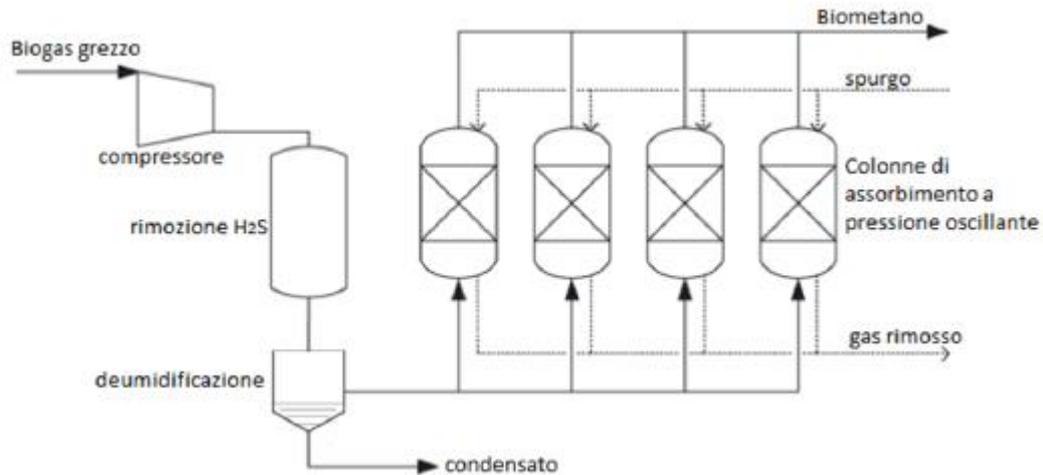


Figura 16: Schema impianto di assorbimento a pressione oscillante [26]

6.8.6 Tecnologia criogenica

Questa tecnologia prevede la separazione della CO₂ tramite separazione criogenica e la produzione di CO₂ liquida e metano liquido. Il principio di funzionamento di questa tecnologia sfrutta i diversi punti di ebollizione della CO₂ e CH₄, rispettivamente -78.2°C e -161.5°C alla pressione atmosferica.

Prima di procedere con questa tecnologia il biogas dovrà subire i trattamenti di desolfurazione e deumidificazione.

Successivamente il biogas viene raffreddato a pressioni di 40 bar e temperatura di circa -90 °C fino al cambiamento di fase della CO₂ così da rendere più semplice la sua separazione.

Anche se attraverso questo processo si ottengono delle rese superiori al 99%, dato l'elevato range di pressione e temperatura, si riscontra un elevato consumo energetico.

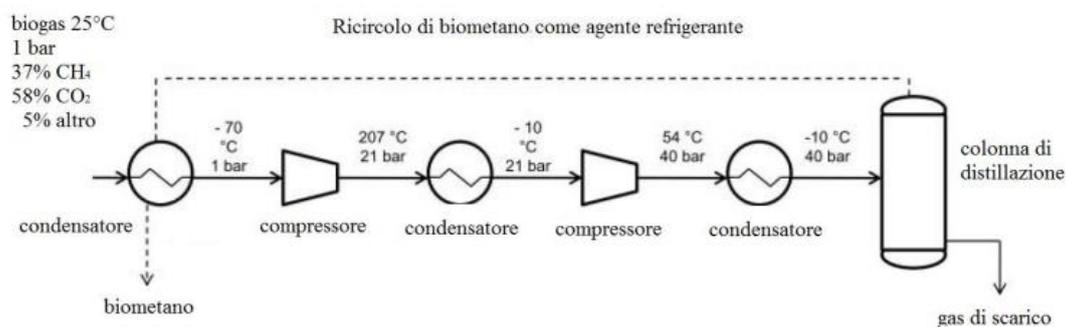


Figura 17: Schema di funzionamento tecnologia criogenica [28]

6.8.7 Confronto tra le varie tecnologie di upgrading

	Membrana	Scrubbing con acqua	Scrubbing fisico con composti organici	Scrubbing chimico	PSA	Separazione criogenica
Necessità pre-cleaning	Si	No	No	No	Si	Si
Pressione di lavoro [bar]	6÷20	4÷7	4÷7	-	4÷7	2 bar (-160°C) 15 bar (-120 °C)
Perdite di metano [%vol]	0.5÷2	0.5÷2	2÷4	<0.1	1.5÷2.5	<0.1
Contenuto in metano del biogas purificato	>97	>97	>96	>99	>96	>99
Consumo elettrico [kWh/Nm³]	0.25÷0.43	<0.25	0.24÷0.33	<0.15	0.25	0.6 (15bar) 0.7 (2bar)
Temperatura a calore richiesto [°C]	No	No	55÷80	120÷150	No	No
Necessità di torcia	Si	No	Si	No	Si	No

Tabella 24: Tecnologie di upgrading a confronto [29]

6.9 Il digestato

Un sottoprodotto addizionale, frutto del processo di digestione anaerobica, è il digestato, una miscela con un tenore di sostanza secca tra il 15÷30% ricco di composti azotati, da cui ne deriva un alto valore agronomico.

Uno dei trattamenti interessanti è il compostaggio, un metodo per valorizzare l'intero digestato per la produzione di compost.

Il compostaggio è il risultato della bio-ossidazione e dell'umidificazione di materie organiche da parte di macro e microrganismi in condizioni particolari: presenza di ossigeno ed equilibrio tra gli elementi chimici della materia coinvolta nella trasformazione.



Nella normativa nazionale il compost è definito come: “compost di qualità: prodotto ottenuto dal compostaggio dei rifiuti organici nel rispetto di apposite norme tecniche, da adottarsi a cura dello Stato, finalizzate a definirne contenuti e usi compatibili con la tutela ambientale e sanitaria e, in particolare, a definirne i gradi di qualità”.

Sul territorio Nazionale la produzione e commercializzazione è regolata dal Decreto Legislativo n. 75/2010, che definisce tre categorie di Ammendante Compostato in base alle componenti utilizzate per produrlo.

1. Ammendante Compostato Verde (ACV)

L'Ammendante Compostato Verde (ACV) si ottiene attraverso un processo controllato di trasformazione e stabilizzazione di rifiuti organici che possono essere costituiti da:

- scarti di manutenzione del verde ornamentale (es. sfalci d'erba, ramaglie, potature),
- sanse vergini (disoleate o meno) o esauste,
- residui delle colture,
- altri rifiuti di origine vegetale.

2. Ammendante Compostato Misto (ACM)

L'Ammendante Compostato Misto (ACM) si ricava mediante un processo controllato di trasformazione e stabilizzazione di rifiuti organici che possono essere costituiti da:

- frazione organica dei rifiuti urbani proveniente da raccolta differenziata (es. rifiuto alimentare di cucine e mense),
- digestato da trattamento anaerobico (con esclusione di quello proveniente dal trattamento di rifiuto indifferenziato),
- rifiuti di origine animale, compresi liquami zootecnici,
- rifiuti di attività agroindustriali,
- rifiuti provenienti da lavorazione del legno non trattato,
- rifiuti provenienti da lavorazione del tessile naturale non trattato,
- matrici previste per l'ACV

3. Ammendante Compostato con Fanghi (ACF)

L'Ammendante Compostato con Fanghi (ACF) è un prodotto ottenuto attraverso un processo controllato di trasformazione e stabilizzazione di:

- reflui,
- fanghi,
- matrici previste per l'ACM.

7. Progettazione della filiera impiantistica

Lo studio di questo elaborato si concentra sulla progettazione di un impianto per la produzione di biometano dalla digestione anaerobica della paglia di riso nella zona della provincia di Novara.

Il primo passo per uno studio di fattibilità di un progetto è la scelta della configurazione impiantistica più conforme a trattare la tipologia di biomassa considerata, e successivamente la determinazione del numero di unità di alimentazione per la produzione di biogas e biometano.

L'impianto può essere suddiviso in 7 aree:

1. Ricezione e stoccaggio
2. Pretrattamento
3. Digestione anaerobica
4. Upgrading del biogas per produzione di biometano
5. Produzione CO₂
6. Compostaggio/digestione aerobica
7. Cogenerazione

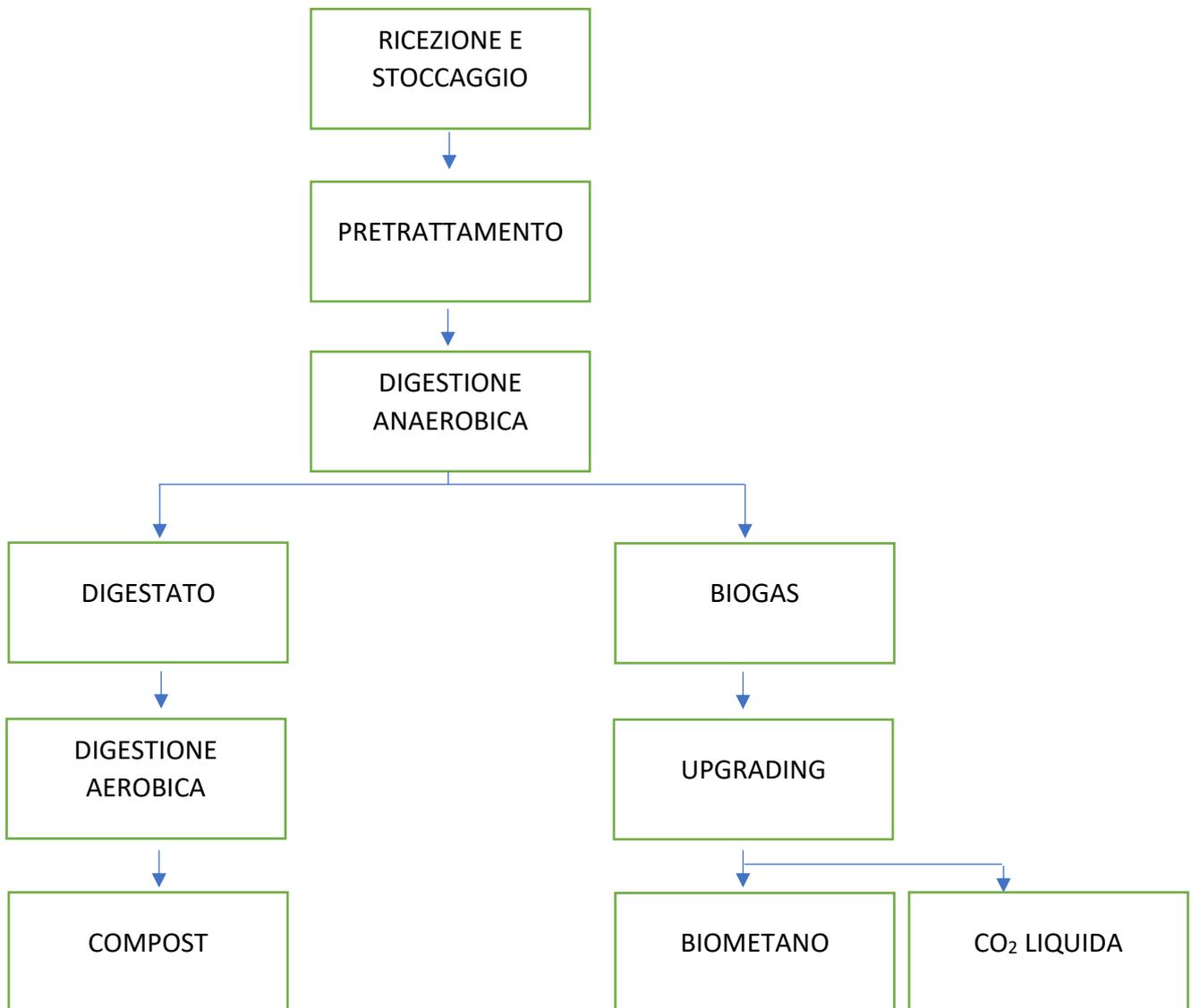


Figura 18: Schema di processo

Il processo di produzione ha inizio con l'invio della paglia di riso al reparto ricezione, nel quale viene stoccata all'interno delle trincee, da qui viene alimentato il reparto pretrattamento, nel quale viene sottoposta ad una serie di operazioni di pretrattamento, dopodiché verrà portata al reparto di preparazione del substrato dove subirà una omogeneizzazione, viene regolato il loro contenuto di umidità attraverso miscelazione con acqua di ricircolo al fine di ottenere una miscela con caratteristiche fisico-chimiche ottimali per poter alimentare il digestore.

Nel digestore si innesca il processo digestivo attraverso l'azione di batteri che agiscono in condizioni anaerobiche e a temperatura costante di circa 55°C.

Il digestore sarà dotato di un sistema di miscelazione, per garantire al suo interno una perfetta omogeneità della biomassa trattata, in modo da evitare depositi nel fondo che potrebbero nel tempo causare l'insabbiamento del digestore.

A valle del digestore, il biogas verrà sottoposto a un trattamento di desolforazione e deumidificazione, e successivamente sarà inviato in parte a un processo di upgrading, dal quale si produrrà biometano, e la restante parte all'unità di cogenerazione, per produrre energia elettrica e termica che sarà usata per gli autoconsumi dell'impianto e per commercializzarla all'esterno. Il digestato, invece, verrà in parte ricircolato e in parte inviato alle biocelle per la formazione del compost.

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



Figura 19: Esempio impianto biometano agricolo [30]

7.1 Ricezione e stoccaggio della biomassa

La portata di biomassa considerata come dato di partenza per il dimensionamento dell'impianto è stata fornita da uno studio [31] ed è corrispondente a 86240 t/anno.

Tipologia di substrato	Disponibilità [t/anno]	Disponibilità [t/giorno]	Solidi totali [% su tq]	Solidi volatili [% su TS]	Resa biogas [Nm ³ /t _{sv}]	Resa metano [Nm ³ /t _q]	Densità [kg/m ³] ¹
Paglia di riso	86240	236.3	87.80	73.86	370	172	141

Tabella 25: Dati di alimentazione dell'impianto

Per garantire un'alimentazione costante al digestore occorrerà stoccare la paglia di riso per sopperire al conferimento periodico-stagionale, a tale scopo verrà realizzato un reparto di ricezione (trincee) in modo da accogliere un volume di biomassa pari a 611632 m³.

La miglior soluzione per lo stoccaggio di biomasse di tipo agricolo è rappresentata dalla trincea tramite insilamento.

Il conferimento della biomassa all'impianto è stato supposto tramite automezzi nell'area di ricezione appositamente destinata e stoccata grazie ai silos orizzontali realizzati mediante elementi prefabbricati autostabili e portanti.

La trincea sarà costituita da muri di calcestruzzo con un'altezza variabile con un fondo concavo percorso da condutture per la raccolta dell'acqua di percolazione.

Il dimensionamento della trincea di stoccaggio è stato eseguito in funzione del carico annuo della biomassa, di conseguenza, stimando un peso specifico della paglia di grano imballata pari a 141 kg/m³ si è ottenuto un volume di stoccaggio minimo necessario pari a:

$$V_{\text{stoc}} = \frac{m_{\text{biomassa}}}{\rho_{\text{biomassa}}} = \frac{86240 \text{ t} \cdot 1000}{141 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 611631.2 \text{ m}^3$$

Ipotizzando un'altezza di riempimento tra un silos e un altro pari a 4-6 m, si è ottenuto una superficie minima di stoccaggio pari a:

$$S_{\text{stoc}} = \frac{V_{\text{stoc}}}{h} = \frac{611632 \text{ m}^3}{5 \text{ m}} = 122326 \text{ m}^2$$

Vengo di seguito elencate le principali caratteristiche tecniche-dimensionali:

Dimensioni delle trincee	
<i>Altezza dei muri</i>	5 m
<i>Superficie totale trincea</i>	122326 m ²
<i>Volume di stoccaggio</i>	611632 m ³

Tabella 26: Dimensioni delle trincee



Figura 20: Silos orizzontali [32]



Figura 21: Stoccaggio della biomassa [65]

La paglia di grano viene scrupolosamente pressata.



Figura 22: Stoccaggio della biomassa [65]

Le trincee complete vengono coperte con i teli mentre prosegue il riempimento di quelle adiacenti.

7.2 Pre-trattamento del substrato

La paglia verrà inizialmente caricata in una tramoggia di carico che consente il trattamento anche di materiali ingombranti senza subire intasamenti o danneggiamenti.

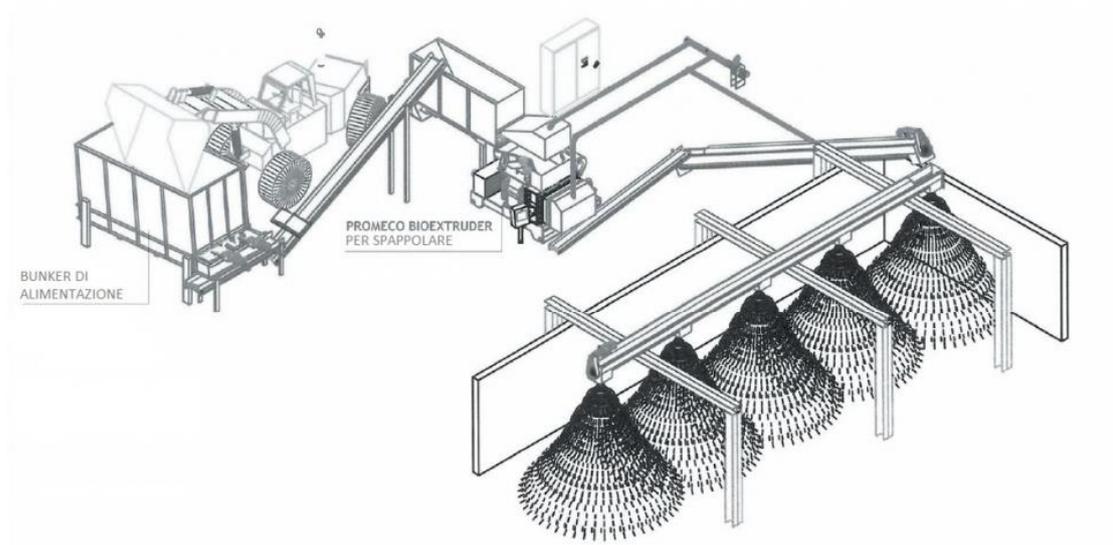


Figura 23: Linea di pretrattamento [33]

Successivamente, la materia prima raggiunge BIOaccelerator^S attraverso un nastro trasportatore trasversale con un metal detector.

Il BIOaccelerator^S è un estrusore costituito da due viti accostate e intrecciate che esercitano una sollecitazione termomeccanica che ottimizza la decomposizione dei substrati d'ingresso tramite la sfibratura per ottenere una maggiore resa in biogas. Grazie a un trattamento termomeccanico del substrato il materiale d'ingresso viene sottoposto a una temperatura già elevata, così da ridurre il consumo elettrico.

Dati tecnici BIOaccelerator ^S	
Portata	70 - 150 kg/min
Potenza	55 – 74 kW (contenitore)
Velocità di rotazione	1.225 giri/min il motore 86 giri/min le viti
Massimo lunghezza	6.058 mm
Massimo larghezza	2.438 mm
Massimo altezza	2.591 mm
Peso (totale)	8.400 kg
Prestazioni del nastro rivelatore	3 kW

Tabella 27: Dati tecnici BIOaccelerator [34]



Figura 24: BIOaccelerator [35]

L'estrusore verrà installato nel sistema di alimentazione del digestore tra i due convogliatori che portano la biomassa dalla tramoggia alla prima vasca di precarico. La biomassa viene caricata dall'alto e, cadendo per gravità nello spazio dove si trovano le coclee, viene estrusa e spinta orizzontalmente verso un foro di uscita, la cui dimensione può essere regolata in modo da controllare l'intensità del trattamento.

Successivamente il composto ottenuto a valle del bioestrusore verrà inviato a una vasca di precarico con lo scopo di:

- Separare eventuali sabbie inerti ancora presenti;
- Miscelazione e omogeneizzazione del substrato;
- Snodo idraulico per la successiva fase di processo

La vasca di precarico sarà dotata di un sistema di de-sabbiatura dedicato, che consentirà di eliminare pressoché la totalità di inerti di più piccole dimensioni.

Inoltre prima dell'invio al digestore, la biomassa verrà diluita in modo da regolare l'umidità ad un valore ottimale, si effettua quindi la miscelazione con acqua di ricircolo proveniente dalla sezione di disidratazione a valle del digestore utilizzando un miscelatore a coclea. L'unità di miscelazione dovrà essere facilmente accessibile ed ispezionabile, al fine di consentire lo svolgimento delle operazioni di pulizia e di manutenzione ordinaria e straordinaria.

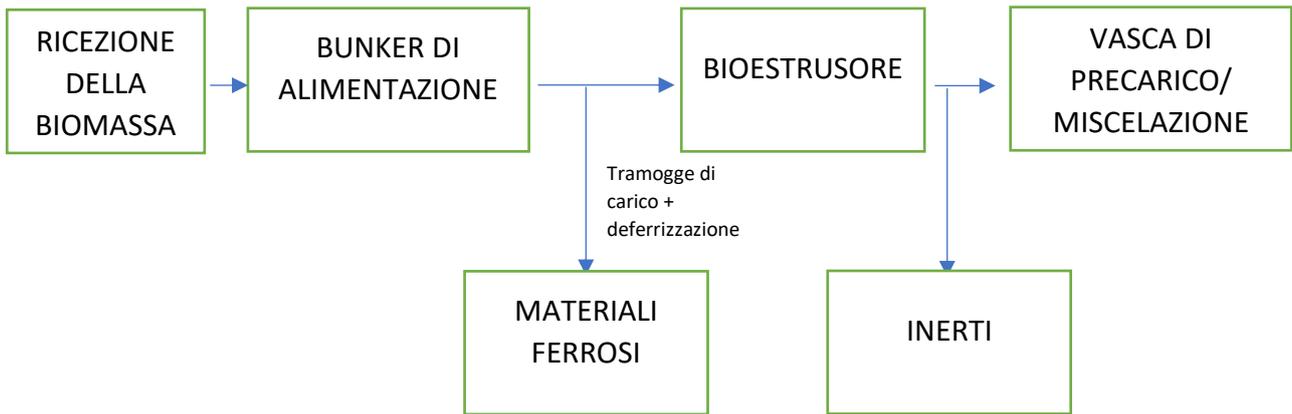


Figura 25: Linea pretrattamento della paglia di riso

7.3 Digestore anaerobico

Il dimensionamento del digestore è stato condotto sulla base dei parametri operativi e dei fattori di carico, attraverso la seguente procedura:

- Determinazione dei flussi massa in ingresso:

$$m_{\text{biomassa,giorn}} = \frac{m_{\text{biomassa,tot,annuale}}}{365} = \frac{86240 \frac{\text{t}}{\text{a}}}{365 \frac{\text{giorno}}{\text{a}}} = 236 \frac{\text{t}}{\text{giorno}}$$

Il flusso di ingresso, che definisce il carico organico complessivo da inviare giornalmente al digestore, in termini di TS e TVS, può essere calcolato nel seguente modo:

$$m_{\text{TS al giorno}} = m_{\text{biomassa,giorn}} \cdot \% \text{TS} = 236 \frac{\text{t}}{\text{giorno}} \cdot 87.8\% = 207.45 \frac{\text{t}}{\text{giorno}}$$

$$m_{\text{TVS al giorno}} = m_{\text{TS al giorno}} \cdot \% \text{TVS} = 207.45 \frac{\text{t}}{\text{giorno}} \cdot 73.8\% = 153.10 \frac{\text{t}}{\text{giorno}}$$

- Determinazione del carico organico per m³ di reattore e calcolo del volume utile:

Viene scelto un carico organico ottimale da applicare al digestore, in base agli intervalli utili di carico ed HRT per ciascun processo riportati in letteratura.

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

Tabella 28: Valori del carico organico nei vari processi [kgTVS/m³ x d] [17]

Per tale elaborato, date le caratteristiche della matrice organica si è scelto di impiegare una digestione anaerobica a secco, tramite l'impiego di un digestore di tipo Kompogas che presenta le seguenti caratteristiche:

- sistema continuo: processo svolto senza condizioni di discontinuità dalla fase di alimentazione alla fase di estrazione del digestato. Ogni situazione di stasi del processo presupporrebbe la rigenerazione della catena trofica, bloccata appunto dall'interruzione. I cicli di carico, processo e scarico si ripetono in continuo garantendo un'alta produttività di biogas dei batteri anaerobi;
- regime di termofilia: si è scelto un regime di termofilia per la digestione anaerobica, poiché i batteri riescono a produrre maggiori quantità di biogas rispetto ai batteri mesofili, ed inoltre la temperatura elevata permette l'igienizzazione del materiale prima della sua uscita, senza doverlo fare in seguito.
- sistema a secco: in virtù dell'elevato contenuto di sostanza secca;
- sistema isolato: per garantire ai batteri di vivere nelle condizioni migliori possibili e con esse, ottenere la massima resa di biogas. Per il funzionamento del digestore non sono previste l'utilizzo di aperture/chiusure;
- plug & flow: grazie a un sistema di piping a valle del digestore e di una coclea a monte per l'alimentazione, la matrice è obbligata a seguire un flusso unidirezionale verso l'uscita, transitando in un tempo pari a quello di ritenzione.

Una parte del substrato estratto sarà ricircolato in testa al digestore con la funzione di inoculare le masse fresche appena introdotte, per massimizzare l'attacco microbico attraverso una popolazione microbica più numerosa.

Per garantire una perfetta omogeneità della biomassa trattata all'interno del digestore, è installato un sistema di miscelazione in modo da evitare depositi che potrebbero nel tempo causare l'insabbiamento del digestore, rompere le eventuali croste superficiali e favorire il contatto tra batteri e substrato tramite l'utilizzo di un agitatore unico ad asse orizzontale.

Inoltre è previsto un sistema di alimentazione continuo per garantirne il funzionamento nell'arco di 24 ore.

L'intero processo viene monitorato in ciascuna sua fase in tempo reale per mezzo di un software evoluto e al contempo user friendly. I diversi parametri di processo vengono misurati e registrati in continuo, garantendo all'operatore di intervenire con tempestività quando necessario.

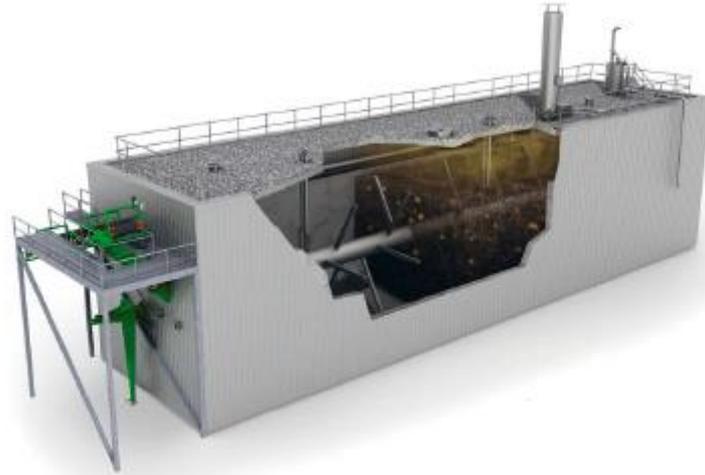


Figura 26: Digestore Kompogas [36]

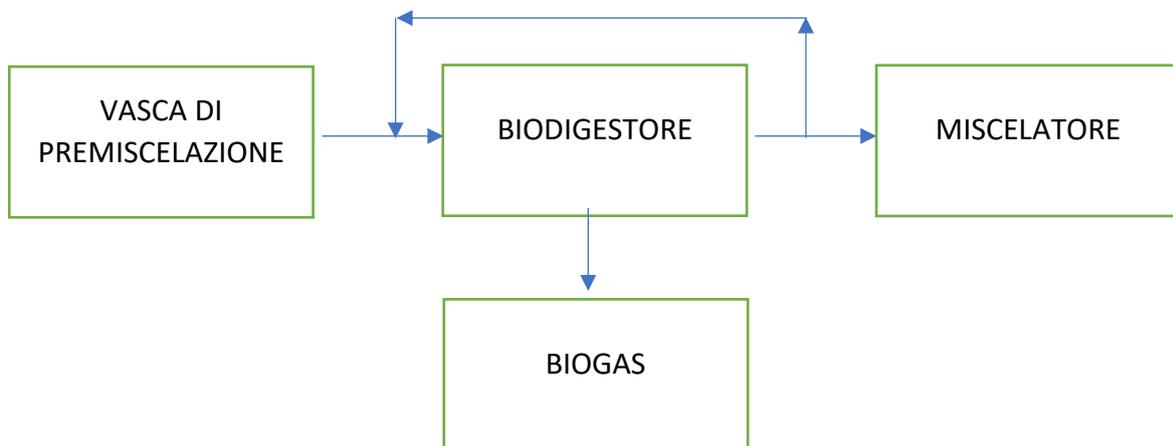


Figura 28: Linea relativo alla digestione anaerobica

Ipotizzando di utilizzare 4 digestori, con una portata di $38.27 \frac{t}{giorno}$, il volume del digestore sarà pari a:

$$V_{DIG} = \frac{m_{TVS \text{ al giorno}}}{OLR \left[\frac{kg_{TVS}}{m^3} \right]} = \frac{38.27 \frac{t}{giorno} \cdot 1000}{9 \frac{kg_{TVS}}{m^3}} = 4252.7 \text{ m}^3$$

- Verifica delle condizioni operative

Il volume determinato può non soddisfare le condizioni di mantenimento del HRT ai valori desiderati. Conoscendo il volume di substrato da alimentare e nota la densità, abbiamo:

$$m_{\text{TVS al giorno}} = \frac{m_{\text{TVS giorn}}}{\rho_{\text{biomassa}} \left[\frac{\text{t}}{\text{m}^3} \right]} = \frac{38.27 \frac{\text{t}}{\text{giorno}} \cdot 1000}{141 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 271.45 \frac{\text{m}^3}{\text{giorno}}$$

$$\text{HRT} = \frac{V_{\text{DIG}}}{m_{\text{TVS al giorno}}} = \frac{4252.7 \text{ m}^3}{271.45 \frac{\text{m}^3}{\text{giorno}}} = 15.66 \text{ giorni}$$

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

Tabella 29: Valori del tempo di residenza volumetrica (HRT: [d]) nei vari processi [17]

Principali caratteristiche tecniche-dimensionali:

Dati tecnici del digestore anaerobico	
Altezza	15 m
Volume	4253 m ³
HRT	16 giorni
Temperatura di regime	55 °C
N° digestori	4

Tabella 30: Dati tecnici del digestore

- **Impianto di riscaldamento:**

Il digestore è dotato di un sistema di riscaldamento con lo scopo di mantenere la corretta temperatura e gradienti di temperatura al suo interno così da garantire una distribuzione di temperatura quanto più possibile omogenea.

L'impianto di riscaldamento è stato supposto costituito da tubi radianti in polietilene ad alta densità fissati sui muri perimetrali del digestore a circa 1m da terra.

Per tale dimensionamento è stato preso come riferimento il caso più critico:

- temperatura esterna pari a 0°C
- temperatura di regime all'interno del digestore pari a 55 °C.

Inoltre è stato considerato il substrato avente una capacità termica specifica pari a 4.2 kJ/kg °C.

Le pareti del bioreattore devono essere isolate con uno strato ($s = 0.1$ m di spessore) di polistirene. Il coefficiente di trasmissione del calore del polistirene è $\lambda_{pol} = 0.05$ W/m·K.

Si è ipotizzato che i coefficienti di trasferimento del calore all'interno della parete del bioreattore siano:

- $\alpha_{interno} = 4000$ W/m² °C coefficiente di trasmissione del calore per convezione tra matrice e muro
- $\alpha_{esterno} = 400$ W/m² °C coefficiente di trasmissione del calore per convezione tra muro e esterno

Quindi è possibile calcolare il coefficiente globale di scambio termico del digestore:

$$U_{DIG} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{s_{pareti}}{\lambda_{polist}} + \frac{1}{\alpha_e}} = \frac{1}{\frac{1}{4000 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}} + \frac{0.1 \text{ m}}{0.05 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}} + \frac{1}{400 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}}} = 0.49 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

Nel seguente calcolo le aree della superficie interna ed esterna del digestore sono state considerate uguali.

La resistenza termica della parete del digestore è stata considerata trascurabile.

Per il calcolo del coefficiente di scambio termico dei tubi (tubi RAUBIO in PE-Xa [37]) è stato presupposto:

- $\alpha_{interno} = 400$ W/m² °C = $\alpha_{esterno}$
- $s_t = 0.0018$ m
- λ_{tubo} [38] = 0.38 W/m·K
- $D_t = 0.025$ m

$$U_t = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{s_t}{\lambda_{tubo}} + \frac{1}{\alpha_e}} = \frac{1}{\frac{1}{400 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}} + \frac{0.0018 \text{ m}}{0.38 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}} + \frac{1}{400 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}}} = 102.70 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

La potenza termica necessaria per il riscaldamento del materiale organico alla temperatura desiderata risulta:

$$Q_{reat} = m_{biomas,day,singolo \text{ rea}} \cdot c_{sub} \cdot \Delta T_{sub} = 59.07 \frac{t}{giorno} \cdot 4.2 \frac{kJ}{kg} \cdot 55^\circ C \cdot 1000 = 157.9 \text{ kW}$$

La superficie del bioreattore che conduce il calore:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} + \pi \cdot D_t \cdot H = \frac{\pi \cdot (19 \text{ m})^2}{4} + \pi \cdot 19 \text{ m} \cdot 15 \text{ m} = 1178.66 \text{ m}^2$$

Le perdite di calore dalle pareti del reattore risultano:

$$Q_{\text{disp}} = U_d \cdot A \cdot \Delta T_{\text{tubi}} = 102.70 \frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ}\text{C}} \cdot 1178.66 \text{ m}^2 \cdot 55^{\circ}\text{C} = 32368 \text{ W} = 32.4 \text{ kW}$$

Si ottiene una potenza termica totale pari a:

$$Q_{\text{TOT}} = Q_{\text{reat}} + Q_{\text{disp}} = 157.9 \text{ kW} + 32.4 \text{ kW} = 190.3 \text{ kW}$$

Supponendo di utilizzare come fluido tecnico acqua che deve raffreddare da $T = 70^{\circ}\text{C}$ a $T = 60^{\circ}\text{C}$, calcoliamo la lunghezza del tubo:

$$L = \frac{Q_{\text{TOT}}}{\pi \cdot D_t \cdot \Delta T \cdot U_t} = \frac{190.3 \text{ kW} \cdot 1000}{\pi \cdot 0.025 \text{ m} \cdot 10^{\circ}\text{C} \cdot 102.70 \frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ}\text{C}}} = 2361$$

$$n_{\text{avvolgimenti}} = \frac{2361 \text{ m}}{\pi \cdot 19 \text{ m}} = 40$$

- **Produzione di biogas**

L'analisi della produzione di biogas è stata effettuata considerando che l'impianto per la produzione di biogas e biometano abbia a disposizione 86240 t/a . Dopo il pretrattamento per estrusione si ha un miglioramento nella resa di biogas e biometano:

Tipologia di substrato	Disponibilità [t/anno]	Disponibilità [t/giorno]	Solidi totali [% su tq]	Solidi volatili [% su TS]	Resa biogas [Nm ³ /tsv]	Resa metano [Nm ³ /t _{tq}]	Densità [kg/m ³]
Paglia di riso	86240	236.3	87.80	73.86	450	227.3	141

Tabella 31: Produzione biogas

$$\begin{aligned} \text{tot biogas annuo producibile} &= m_{\text{TVS annuo}} \cdot \text{resa biogas} \\ &= 55880 \frac{t_{\text{TVS}}}{a} \cdot 450 \frac{\text{m}^3}{t_{\text{TVS}}} = 25146187 \frac{\text{Nm}^3}{a} \end{aligned}$$

tot biometano annuo producibile = $m_{\text{BIOMASSA,annuo}} \cdot \text{resa metano}$

$$= 86240 \frac{\text{t}}{\text{a}} \cdot 227.3 \frac{\text{m}^3}{\text{t}_{\text{TVS}}} = 19602352 \frac{\text{Nm}^3}{\text{a}}$$

Stimando che l'impianto resti in funzione 8000 ore, la produzione oraria nominale sarà pari:

$$\begin{aligned} \text{produzione oraria nominale biogas} &= \frac{\text{tot biogas annuo producibile}}{8000 \text{ h}} \\ &= \frac{25146187 \frac{\text{Nm}^3}{\text{a}}}{8000 \text{ h}} = 3143 \frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{produzione oraria nominale biometano} &= \frac{\text{tot biometano annuo producibile}}{8000} \\ &= \frac{19602352 \frac{\text{Nm}^3}{\text{a}}}{8000 \text{ h}} = 2450 \frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \end{aligned}$$

- **Consumo medio di biogas per riscaldare il digestore**

Avendo precedentemente stimato la potenza media richiesta dal digestore (190.3 kW), si ha:

<i>Dati di progetto</i>	
Densità biogas	1.224 kg/Nm ³
%CH ₄ nel biogas grezzo	56%
Potere calorifico CH ₄ =34535 kJ/Nm ³	8250 kcal/Nm ³
Potere calorifico biogas =4785 kcal/Nm ³	=0.56·8250 (kcal/Nm ³) = 19330 kJ/Nm ³
Ore di funzionamento	8000 h

Tabella 32: Dati di progetto

Fabbisogno medio per digestione anaerobica

Potenza richiesta dal digestore	190.3	kW
190.3 kW·8000 h ÷ 1000	1522.4	MWh/anno
190.3 kW · 8000 h/a · 3600 s/h ÷ 19330 kJ/Nm ³	283522	Nm ³ /anno
283522 Nm ³ /a ÷ 8000 h/a	35.44	Nm ³ /h

Tabella 33: Fabbisogno medio per digestione anaerobica

Consumo medio per AD (rendimento cogeneratore 87%)		
1522.4 MWh/anno ÷ 0.87	1749.8	MWh/anno
283522 Nm ³ /anno ÷ 0.87	325887	Nm ³ /anno
35.44 Nm ³ /h ÷ 0.87	40.7	Nm ³ /h

Tabella 34: Consumo medio per AD

Ipotizzando il calore di recupero dal biometano attraverso un sistema di upgrading, con un recupero termico pari a 0.2 kWh/Nm³ di biogas da trattare e una produzione oraria nominale di biogas pari a 3143 Nm³/h, si ottiene un potenziale di recupero termico pari a:

$$\begin{aligned} \text{potenziale recupero termico} &= \text{produzione oraria nominale biogas} \cdot \text{recupero termico} \\ &= 3143 \frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \cdot 0.2 \frac{\text{kWh}}{\text{Nm}^3} = 628.65 \text{ kW} \end{aligned}$$

Si ipotizza di recuperare in maniera cautelativa il 75% del valore corrispondente a 628.65 kW · 0.75 = 471.49 kW

Il calore recuperabile dall'unità di upgrading, sottoforma di biometano risparmiato in quanto non necessario al cogeneratore risulta:

Calore recuperabile da upgrading		
471.49 kW ÷ 1000 · 8000 h/a ÷ 0.87	4335.5	MWh/anno
4335.5 MWh/anno · 1000 ÷ 3600 s/h ÷ 19330 kJ/Nm ³	807445	Nm ³ /anno
807445 Nm ³ /anno ÷ 8000 h/a	100.93	Nm ³ /h

Tabella 35: Calore recuperabile da upgrading

- **Biogas effettivamente disponibile**

Il bilancio tra il prodotto totale, la quota recuperata dall'upgrading e quella impiegata per i fabbisogni del digestore permette di ricavare il biogas effettivamente disponibile. La produzione di biogas risultava: 25146187 Nm³/a equivalenti a 135021 MWh/a

Biogas disponibile		
135021+4335-1522	137835	MWh/anno
25146187+807445-283522	25670110	Nm ³ /anno
3143+101-35	3209	Nm ³ /h

Tabella 36: Biogas disponibile

7.4 Desolfurazione

Il biogas prodotto dal processo di digestione anaerobica verrà soffiato alla pressione di 200 mbar all'interno della sezione di purificazione, costituita da un filtro biogas (FB ULTRA [39]); poiché saturo di acqua, esso contiene piccole particelle solide in sospensione, pulviscolo di zolfo elementare ed altre sostanze contaminanti, che richiedono un'efficiente filtrazione prima del suo utilizzo.

Il biogas grezzo viene immesso nella parte alta del filtro, tramite una tubazione interna viene inviato alla vasca di raccolta condense posta nella parte inferiore, dove successivamente inizia a diffondersi

e comincia a salire attraverso i tre strati filtranti per poi uscire dalla tubazione predisposta nella parte superiore, pulito e privo di sostanze contaminanti.

Il filtro è attrezzato con una valvola di spurgo con idoneo sistema di sicurezza per evitare la fuoriuscita di biogas.

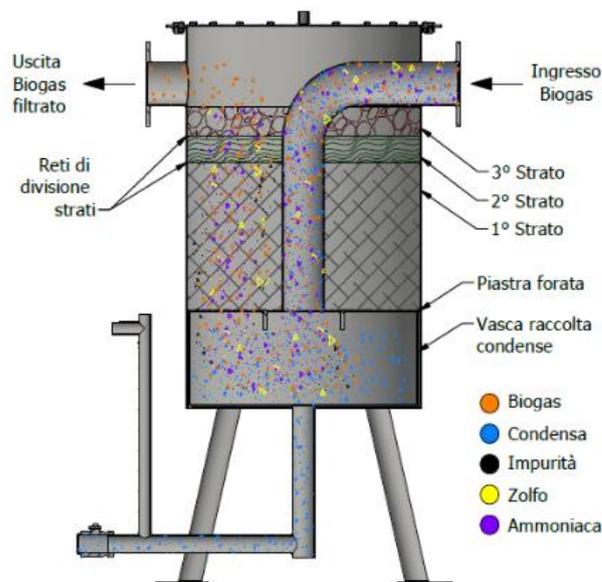


Figura 29: Filtro FB ULTRA [39]

Il filtro FB ULTRA ha un corpo a forma cilindrica sostenuto da tre gambe, il tutto costruito in acciaio inox.

Nella parte inferiore è presente una vasca per la raccolta delle condense del biogas, essa funge anche da guardia idraulica, mentre nella parte centrale sono presenti i tre strati filtranti con le seguenti funzioni:

1. 1° STRATO composto da corpi di riempimento con la funzione di intrappolare l'umidità e fermare le impurità più grossolane.
2. 2° STRATO con la funzione di fermare le impurità passate attraverso i corpi di riempimento e l'eventuale pulviscolo di zolfo elementare dovuto alla desolforazione biologica.
3. 3° STRATO con l'ulteriore funzione di catturare anche i residui di ammoniaca.

Area di applicazione

Filtro standard	Biogas, Gas da discarica e Gas naturale
Max pressione di esercizio	35 mbar
Temperatura di esercizio	5°C fino a 50°C

Accessori

By pass filtro	By pass del biogas in caso di manutenzione del filtro
Kit di regolazione del filtro	Kit per la sostituzione degli strati filtranti

Caratteristiche componenti

Carpenteria e bulloneria	Acciaio inox AISI 304
Rete di divisione strati	PVC
Piastra forata	Acciaio inox AISI 304
Guarnizioni	EPDM

Dati tecnici

Modello	PORTATA	CONNESSIONI		
	Nm ³	Ingresso biogas	Uscita biogas	Attacco condense
FB D63 DN80	25 - 35	DN80 - PN10	DN80 - PN10	1" GAS M
FB D63 DN100	35 - 75	DN100 - PN10	DN100 - PN10	1" GAS M
FB D80 DN100	75 - 150	DN100 - PN10	DN100 - PN10	1" GAS M
FB D80 DN125	150 - 250	DN125 - PN10	DN125 - PN10	1 1/2" GAS M
FB D80 DN150	250 - 500	DN150 - PN10	DN150 - PN10	1 1/2" GAS M

Dimensioni

Modello	DIMENSIONI [mm]					PESO
	A	B	C	D	E	Kg
FB D63 DN80	630	1480	1318	675	845	150
FB D63 DN100	630	1480	1318	675	845	150
FB D80 DN100	800	1726	1565	675	1005	230

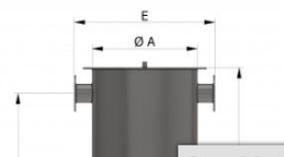


Figura 30: Dati tecnici filtro biogas FB ULTRA [39]

Successivamente il biogas sarà convogliato nel desolfatore, all'interno del quale avverrà il processo di desolfurazione.

Il processo è costituito da uno scrubber [40] di lavaggio del biogas e da una vasca di rigenerazione della soda. Lo scrubber è composto da una colonna con un letto di corpi di riempimento, che favoriscono un intimo contatto tra il liquido di lavaggio ed il biogas, il quale viene privato dell'acido solfidrico (H₂S). Dopo che il liquido ha attraversato il letto di contatto ed assorbito l'idrogeno solforato, raggiunge la vasca, nella quale subisce una ossidazione per mezzo di aria insufflata tramite una soffiante. Nella vasca di ossidazione avviene il recupero della soda consumata nella colonna e la trasformazione dell'H₂S in zolfo elementare. Dalla vasca di ossidazione il liquido passa attraverso una zona di decantazione, dove si deposita lo zolfo elementare, a questo punto la soluzione di lavaggio viene corretta con i reagenti chimici e per mezzo della pompa di ricircolo viene rimandata alla colonna per ripetere il ciclo. Il biogas prima di uscire dallo scrubber attraversa un demister per la separazione delle micro-gocce trascinate durante il suo percorso.



Figura 31: Desolfatore [40]

Costruzione:

Scrubber di lavaggio del biogas costruito in polipropilene completo di corpi di riempimento, demister, ugelli di lavaggio e oblò di ispezione.

Vasca di ossidazione costruita in polipropilene con telaio in acciaio inox AISI 304 nella quale sono inseriti i diffusori d'aria, deflettori, soffiante, pompa di ricircolo, pompe dosatrici, porta sonda, controlli di livello, valvola di scarico automatica e valvola di reintegro acqua.

7.5 Deumidificazione

A valle del desolfatore il biogas subirà un processo di deumidificazione [41], il quale raffredderà il biogas da una temperatura compresa tra 20÷40°C fino a un range di 3÷5°C usando uno scambiatore di calore combinato a un refrigeratore, il quale rimuoverà l'acqua condensata con un separatore. L'acqua estratta verrà poi stoccata e destinata ad impianti di trattamenti esterni.

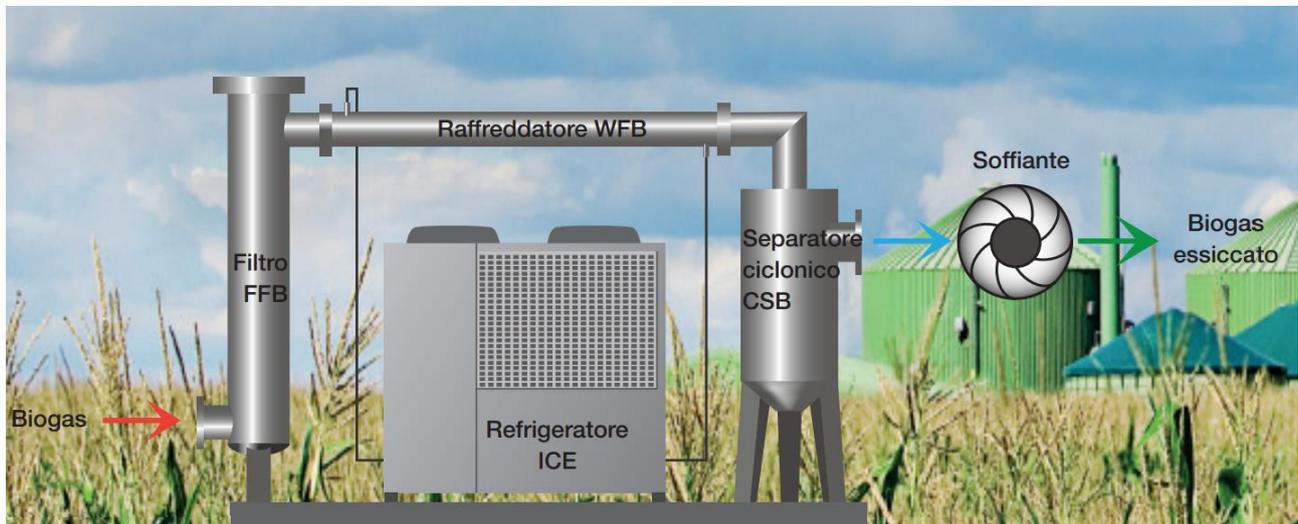


Figura 32: Sistema di deumidificazione per biogas [41]

Questa configurazione è studiata per gli impianti equipaggiati con una soffiante a valle del sistema di deumidificazione, in cui si sfrutta la posizione per aumentare la temperatura del biogas e diminuirne quindi l'umidità relativa.

7.6 Upgrading del Biogas

A valle del processo di deumidificazione, il biogas verrà inviato in parte a gruppo di cogenerazione, costituito da un motore a combustione interna, per soddisfare le richieste di energia elettrica e di calore dell'impianto; la restante parte subirà un processo di compressione per portarlo dalle condizioni di 200 mbar alle condizioni necessarie (pressione di esercizio circa 16 bar) per il processo di upgrading, attraverso l'utilizzo di un compressore rotativo a vite.

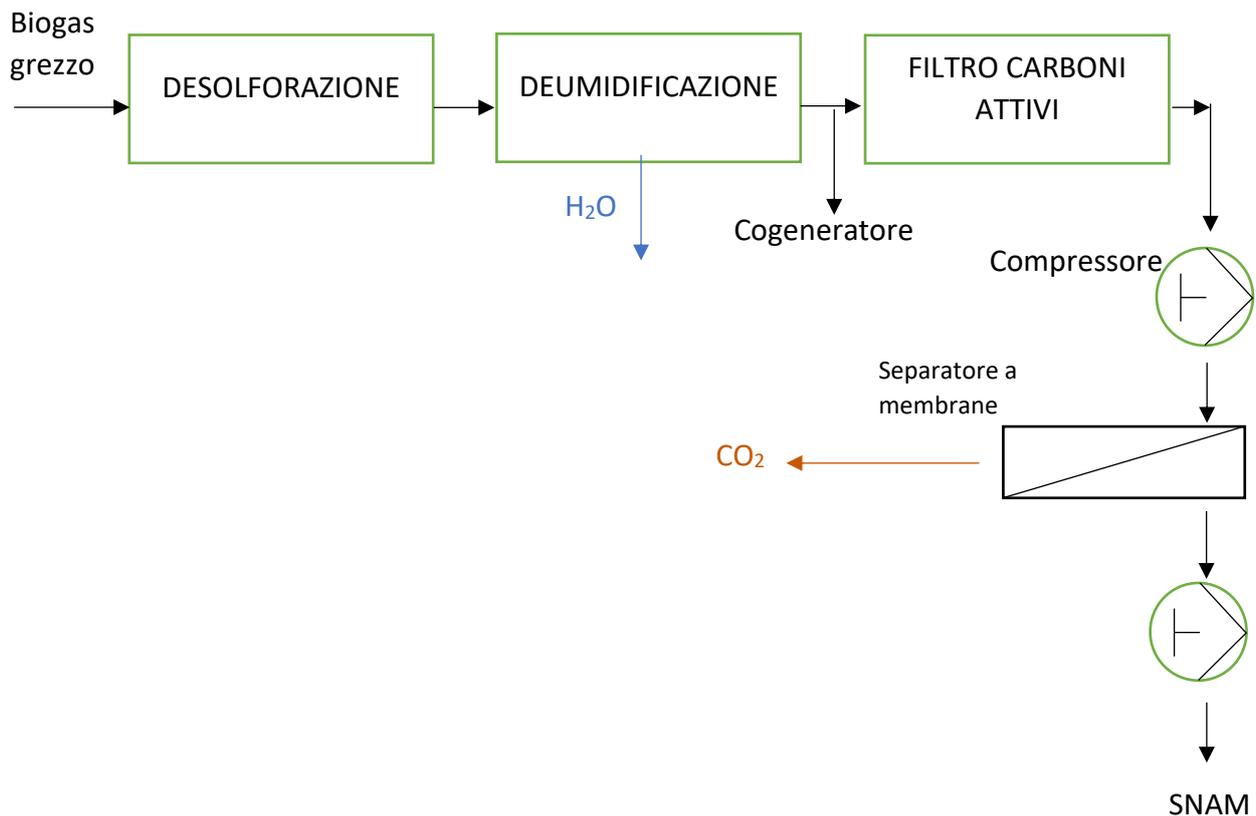


Figura 33: Linea Upgrading del Biogas

Per il processo sono previsti più stadi compressione al termine dei quali il biogas verrà raffreddato attraverso l'utilizzo di un sistema di raffreddamento, costituito da scambiatori di calore di tipo acqua/gas.

Filtro a carboni attivi

Nel nostro caso per aumentare l'efficienza del processo di upgrading, il gas prima di subire la prima compressione, subisce un trattamento di filtrazione allo scopo di eliminare H₂O(g) e contaminanti, quali gocce di olio e aerosols, che svolgono un'azione negativa sulle performances delle membrane. Oltre a ciò, anche l'H₂S è solitamente rimosso mediante carboni attivi prima che il gas entri nelle fibre cave.

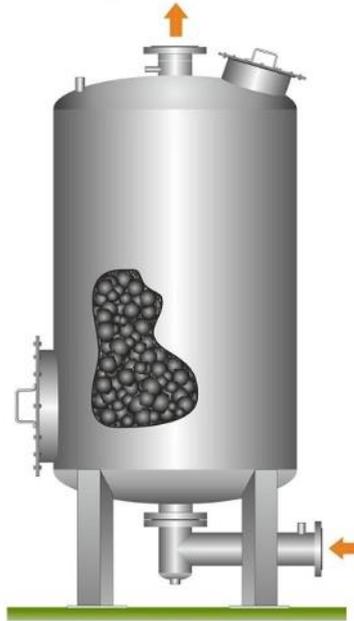


Figura 34: Filtro a carboni attivi [42]

Separazione tramite membrane e criogenia

Il biogas prodotto attraverso il processo di fermentazione anaerobica è costituito principalmente da metano (CH_4) e biossido di carbonio (CO_2). Quando il biogas viene purificato in biometano utilizzando tecniche convenzionali il processo produce CO_2 , un sottoprodotto. La CO_2 , che contiene una quantità considerevole di CH_4 , viene espulsa nell'aria. Questa pericolosa 'perdita di metano' non è solo nociva per l'ambiente, ma è anche una fonte di energia sprecata, per tale motivo è stata scelta come tecnologia di upgrading la separazione a membrana e criogenia, una soluzione avanzata, in cui le membrane separano i due principali componenti del gas: CH_4 e CO_2 . La separazione si compie attraverso la differenza di pressione sulla superficie della membrana. Il biogas ad alta pressione è introdotto nella membrana e la CO_2 passa attraverso la superficie della membrana al permeato - lato bassa pressione - in modo molto più rapido rispetto al CH_4 . Le membrane sono spinte dalla pressione, pertanto più alta è la pressione, più CO_2 passerà attraverso la superficie a membrana. Lo scarico dalla membrana (il retentato) contiene principalmente CH_4 perché la CO_2 è stata spinta attraverso la superficie della membrana. Il gas ricco di CO_2 abbandonerà la membrana sul lato bassa pressione della stessa (permeato).

Questa soluzione si avvale di una tecnologia capace di liquefare la CO_2 per poter essere conservata in serbatoi idonei alla stessa ed essere usati come un valore aggiuntivo.

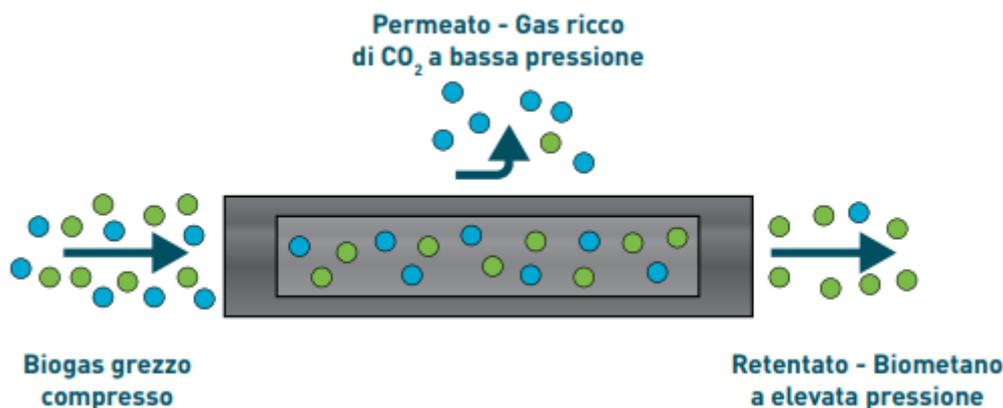


Figura 35: Separazione a membrana e criogenia [43]

Il biometano in uscita se caratterizzato dalle proprietà chimico-fisiche conformi per l'immissione in rete verrà inviato a un secondo gruppo di compressione bi-stadio, allo scopo di portarlo da un valore di pressione di circa 10÷20 bar alla pressione richiesta dalla rete. La pressione per l'immissione in rete SNAM è pari a 64 bar.

- **Analisi della produzione di biometano**

Avendo a disposizione il rendimento dell'impianto di upgrading e la portata di biogas effettivamente disponibile, precedentemente calcolata, si ha:

Biogas disponibile all'upgrading	3209	Biogas grezzo Nm ³ /h
%CH ₄ nel biogas grezzo	56	%
CH ₄ nel biogas grezzo	$3209 \text{ Nm}^3/\text{h} \cdot 0.56 = 1796.91$	Nm ³ /h
Altri componenti del biogas	$3209 - 1796 = 1412$	Nm ³ /h

Tabella 37: Biogas grezzo

		Specifiche tecniche impianto upgrading
Efficienza %CH ₄ recuperata	>99.5	
%CH ₄ persa nel processo	<0.5	
%CH ₄ nel biometano finale	>97	

Tabella 38: Specifiche tecniche impianto upgrading

È possibile stimare la composizione di biometano post upgrading:

CH ₄ (97%)	$1796 \cdot 0.995 =$	1788	Biometano Nm ³ /h
Altro (3%)	$1788 \cdot 3 \div 97 =$	55	Nm ³ /h
Totale (100%)	$1788 - 55 =$	1733	Nm ³ /h

Tabella 39: Biometano

- Analisi della produzione di CO₂

		Off-gas
Biogas effettivamente disponibile dalla digestione	3209	Nm ³ /h
Biometano prodotto	1733	Nm ³ /h
Off-gas	3209-1733=1476	Nm ³ /h

Tabella 40: Off-gas

		Produzione CO₂
Funzionamento impianto	8000	h/a
Densità CO ₂	1.936	kg/Nm ³
%CO ₂ nell'off-gas	0.99	
	1476 Nm ³ /h · 0.99=1461.38	Nm ³ /h
	1461.38 Nm ³ /h · 1.936 kg/Nm ³ ·	t/a
	8000 h/a ÷ 1000 = 22634	
Produzione oraria CO ₂	22634 t/a · 1000 ÷ 8000 h/a =	kg/h
	2829.22	

Tabella 41: Produzione CO₂

7.7 Compostaggio

Trascorso il tempo di ritenzione idraulica, la matrice organica digerita verrà estratta attraverso l'uso di una pompa a pistone e verrà convogliata in parte all'unità di compostaggio [44], la restante ricircolata all'interno del reattore con la funzione di inoculare le masse fresche appena introdotte, per massimizzare l'attacco microbico.

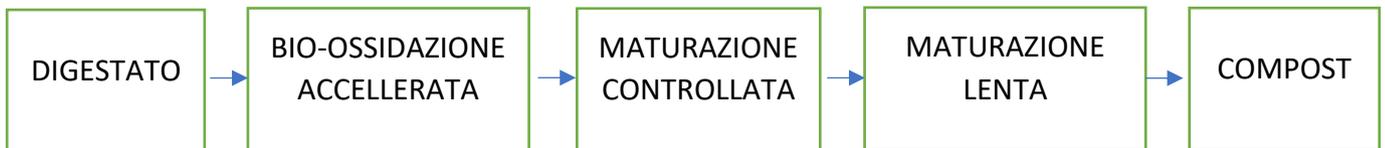


Figura 36: Linea compostaggio

Il processo di compostaggio avrà una durata di 90 giorni e si articola in 3 fasi:

1. Bio-ossidazione accelerata: il digestato viene inviato alla fase di bi-ossidazione tramite biocelle nella quale la frazione organica più facilmente assimilabile subisce un attacco microbico, associato a consumo di ossigeno e liberazione di anidride carbonica, durante il quale si raggiunge una temperatura di circa 55÷60°C;
2. Maturazione controllata: la biomassa viene estratta dalle biocelle e viene posta in cumuli in una zona dedicata per una durata di 45 giorni, durante il quale sarà sottoposta a ventilazione controllata con una richiesta di ossigeno sempre minore;
3. Maturazione lenta: a differenza della fase precedente la matrice organica verrà trasportata in una nuova zona priva di ventilazione controllata e disposta nuovamente in cumuli per una durata di circa 35 giorni.



Figura 38: Impianto di compostaggio [44]

Alla fine del processo la matrice organica verrà sottoposta a vagliatura e successivamente stoccata in una nuova aerea al riparo dagli agenti atmosferici.

La biocella è una costruzione chiusa ed impermeabile fabbricata in cemento armato a tenuta stagna, all'interno della quale, mediante il controllo ed il comando in tempo reale di temperatura, umidità e concentrazione di ossigeno, si accelera il processo di degradazione della sostanza organica o di bioessiccazione.

La fermentazione intensiva nella biocella avviene attraverso l'insufflazione di aria nel pavimento attraverso l'uso di unità ventilanti, le quali consentono di:

- ossigenare omogeneamente la massa;
- mantenere una temperatura ottimale per la fauna microbica in un intervallo in cui è massima l'attività di tali organismi.

L'andamento del processo avviene monitorando e registrando i parametri in tempo reale, garantendo il trattamento ottimale per ciascuna biocella in attività, con regolazione adeguata alle esigenze del materiale da trattare.

7.8 Cogeneratore

A valle del processo di deumidificazione, il biogas viene convogliato in un motore endotermico: il cogeneratore [45].

L'energia elettrica così generata viene in parte ceduta alla rete elettrica di distribuzione e in parte utilizzata per l'alimentazione dell'impianto di digestione anaerobica. L'energia termica prodotta dal motore può essere usata per riscaldare il digestore regolando il processo di produzione del biogas, riscaldare eventuali ambienti, oppure essere immessa in una rete di teleriscaldamento.

La sezione di cogenerazione è costituita da:

- Sistema di trattamento del biogas;
- Scambiatore di calore centralizzato con doppia pompa di circolazione, tubazioni e valvole;
- Sezione di trasformazione ed erogazione dell'energia elettrica.

Il cogeneratore, cuore dell'impianto, è costituito dal motore alimentato a biogas e da un alternatore per la produzione di energia elettrica.



Figura 39: Cogeneratore [45]

BIOPOWER M Modello Model	Potenza introdotta Power introduced	Potenza elettrica Electrical power	Potenza termica Thermal power	Rendim. Elettrico Electrical yield	Rendim. Termico Thermal yield	Rendim. Totale Total yield	Consumo combustib.** Fuel consumption**	Alimentazione Power supply	Dimensioni (LxPxH) Dimension (LxWxH)	Peso Weight
	kW	kW _e	kW _t	%	%	%	Nm ³ /h		mm	kg
BB 104 M	274	104	132	38,0%	48,2%	86,1%	54,1	Turbo intercooler	3610x1200x2100	3410
BB 122 M	341	122	180	35,8%	52,8%	88,6%	67,3	Turbo intercooler	3850x1200x2100	3850
BB 190 M	495	190	245	38,4%	49,5%	87,9%	97,7	Turbo intercooler	3810x1500x2250	4890
BB 210 M	531	210	234	39,5%	44,1%	83,6%	104,8	Turbo intercooler	3810x1500x2250	5150
BB 250 M	657	250	326	38,1%	49,6%	87,7%	129,7	Turbo intercooler	4500x1800x2450	6250
BB 355 M	924	355	433	38,4%	46,9%	85,3%	182,3	Turbo intercooler	4500x1900x2450	7150
BB 403 M	1050	403	528	38,4%	50,3%	88,7%	207,2	Turbo intercooler	5000x1900x2650	7850
BB 529 M	1358	529	654	39,0%	48,2%	87,1%	268,0	Turbo intercooler	5500x2200x2750	8540

** Biogas 53% CH4

BIOPOWER J Modello Model	Potenza introdotta Power introduced	Potenza elettrica Electrical power	Potenza termica Thermal power	Rendim. Elettrico Electrical yield	Rendim. Termico Thermal yield	Rendim. Totale Total yield	Consumo combustib. Fuel consumption**	Alimentazione Power supply	Dimensioni (LxPxH) Dimension (LxWxH)	Peso Weight
	kW	kW _e	kW _t	%	%	%	Nm ³ /h		mm	kg
SIN 300 J	851	330	410	38,8%	48,2%	87,0%	167	Turbo intercooler	4900x1700x2000	6300
SIN 630 J	1601	637	758	39,8%	47,3%	87,1%	315	Turbo intercooler	4700x1800x2300	9100
SIN 890 J	2141	889	939	41,5%	43,9%	85,4%	421	Turbo intercooler	6000x1800x2200	11900
SIN 1000 J	2657	1067	1208	40,2%	45,5%	85,6%	523	Turbo intercooler	5700x1900x2300	14400
SIN 1200 J	2855	1189	1253	41,6%	43,9%	85,5%	562	Turbo intercooler	6700x1800x2200	13900
SIN 1500 J	3569	1487	1567	41,7%	43,9%	85,6%	702	Turbo intercooler	7100x1800x2200	17000

Figura 40: Dati tecnici cogeneratore [45]

7.9 Torcia

La torcia di emergenza entra in funzione quando viene raggiunto l'allarme di altissima pressione. Il suo azionamento consente di smaltire il surplus di biogas a monte dell'impianto di upgrading, il biometano generato a valle del trattamento e di ripristinare il valore prestabilito della sovrappressione. Il modello di torcia selezionata: Torcia Bi Fuel ad Alta Efficienza – Mod. HEB [46] consente la gestione contemporanea di entrambi i flussi di gas, utilizzando un dedicato bruciatore bi-fuel in grado, inoltre, di mantenere stabile la pressione dei gas all'interno del digestore.

La torcia è progettata allo scopo di ottenere una efficienza di combustione elevata e di conseguenza ottenere valori di CO e NO_x a valle della combustione, molto contenuti e tracciabili.

La torcia ad alta temperatura consiste in un bruciatore installato alla base, dotato di un pilota di accensione ad alta energia e un sistema di rilevamento fiamma tramite UV scanner.

L'aria comburente viene convogliata per mezzo di una serranda automatica che, tramite una sonda di temperatura immersa nella zona di combustione, modula automaticamente, la portata garantendo una temperatura costante all'interno della zona di combustione fino ad un massimo di 1200 °C (visibile e registrabile dal quadro di comando).

La struttura portante è composta da una camera di combustione cilindrica verticale, rivestita interamente con fibra ceramica refrattaria e appositamente dimensionata per garantire idoneo tempo di permanenza del gas all'interno della camera di combustione.

L'accensione è di tipo automatico, gestito dal quadro elettrico installato alla base della torcia e prevede inizialmente l'accensione del pilota e successivamente l'apertura della valvola principale di adduzione gas.

7.10 Impianto di trattamento aria

I locali tecnici dell'impianto sono mantenuti in costante depressione, mediante aspirazione verso i punti di ripresa, per contenere la fuoriuscita di odori dall'impianto. L'aria prelevata dai capannoni e l'aria di processo verranno convogliate al sistema di trattamento aria esauste, costituito da scrubber ad umido e biofiltro.

L'aria da trattare viene dapprima immessa in torri di lavaggio (scrubber) e poi inviata in pressione (tramite due ventilatori) sotto il biofiltro, dove si distribuisce uniformemente e attraversa il materiale filtrante. Il pavimento filtrante garantisce anche il drenaggio delle acque di condensa.

La biofiltrazione è un processo biologico di abbattimento degli odori, contenuti nell'aria di processo che sfrutta l'azione di una popolazione microbica eterogenea (composta da batteri, muffe e lieviti) che agisce da agente di rimozione naturale. Questi microrganismi metabolizzano la maggior parte dei composti organici ed inorganici attraverso una molteplice serie di reazioni che trasformano i composti in ingresso in prodotti di reazione non più odoriferi.

I tempi di vita media del materiale filtrante sono lunghi da 2 a 5 anni, a seconda del grado di usura meccanica e dell'impoverimento microbiologico, dopo di che il materiale va sostituito. Il materiale esausto non comporta problemi di smaltimento, essendo compatibile con i criteri di ammissibilità in discarica o (se possibile) può essere utilizzato come combustibile.

Le linee di aspirazione ed espulsione dell'aria verso il biofiltro verranno realizzate con tubi di alluminio a sezione circolare, di spessore e diametro variabile in funzione delle portate d'aria.

- **Scrubber ad umido:**

Il flusso d'aria attraverserà una colonna d'acqua (se necessario con aggiunta di reagenti basici o acidi). Questo sistema di pulizia è adatto soprattutto per la riduzione dei particolati; inoltre, esso elimina anche molteplici inquinanti gassosi per mezzo di processi di dissoluzione nel liquido acquoso.

Alla base dello scrubber verticale è presente una vasca contenente la soluzione acquosa che viene poi immessa nella parte superiore dello scrubber grazie all'utilizzo di pompe di ricircolo e agli ugelli nebulizzatori. Essi spruzzano il liquido all'interno della torre, permettendo l'abbattimento degli inquinanti.

Questa configurazione favorisce il contatto di scambio tra la soluzione acquosa e il flusso aeriforme, che entra in controcorrente dalla parte inferiore dello scrubber.

Per garantire il corretto trattamento delle sostanze inquinanti, la soluzione acquosa deve avere pH e Redox idonei: inquinanti acidi vengono trattati con soluzioni basiche (soda caustica), mentre quelli basici con soluzioni acide (acido solforico). Per ridurre la flora batterica e la potenziale carica patogena dell'inquinante, può inoltre essere aggiunto un serbatoio con soluzioni ossidanti quali ipoclorito di sodio, acqua ossigenata, acido peracetico e simili.

I serbatoi di stoccaggio contenenti le soluzioni acquose saranno dotati di stazioni di dosaggio complete di pompe dosatrici necessarie per compensare i valori dei reagenti per garantire un'adeguata efficienza di abbattimento.

Il flusso aeriforme, dopo essere stato trattato all'interno della torre di lavaggio, passa attraverso il separatore di gocce che recupera il flusso di goccioline residue che altrimenti verrebbero emesse in atmosfera.

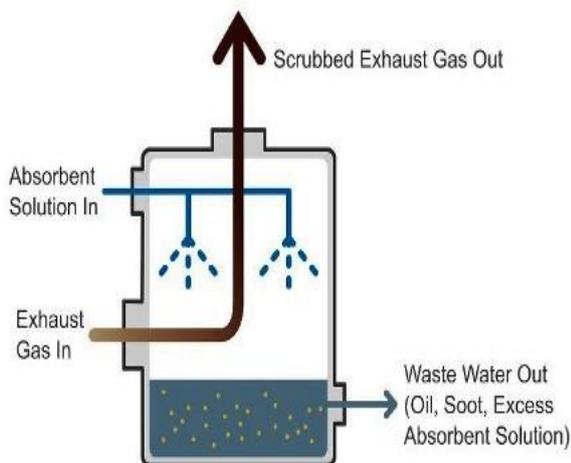


Figura 41: Scrubber ad umido [47] [48]

- **Biofiltro:**

Il biofiltro è costituito da un letto di materiale filtrante collocato in una vasca in cemento armato la cui pavimentazione è realizzata mediante un pavimento flottante grigliato su cui viene poggiato il materiale filtrante. La posa del materiale filtrante avviene mediante una pala meccanica.

La complessità, nonché molteplicità degli aspetti da valutare contemporaneamente per un corretto svolgimento del processo di biofiltrazione, richiedono l'impiego di sistemi informatici e software, da noi appositamente studiati e sviluppati, in modo da consentire un controllo costante ed in tempo reale dell'intero sistema.

Il biofiltro è un bioreattore a letto fisso, costituito da un supporto di materiale organico (torba, argilla, corteccia, ecc.), su cui verrà fatta sviluppare un'opportuna popolazione batterica, la cui funzione è quella di degradare biologicamente le sostanze organiche volatili a composti elementari, anidride carbonica, azoto e acqua. La tecnica in generale mostra un'alta efficienza di abbattimento di circa il 90%.



Figura 42: Biofiltro [67]

La scelta di realizzare il trattamento dell'aria espulsa in due step garantisce un'elevata efficienza della depurazione dell'aria e dell'abbattimento degli odori. Per un efficace controllo degli odori mediante l'impiego di biofiltri, è fondamentale mantenere il substrato di crescita dei microorganismi in condizioni ottimali; ciò si ottiene con:

- ritenzione del particolato: con lo scrubber installato a monte del biofiltro si ottiene il completo abbattimento delle polveri presenti nell'aria espulsa.
- controllo della temperatura: specialmente nel periodo invernale con basse temperature, si utilizzerà il calore di recupero dai cogeneratori per mantenere il substrato del biofiltro in condizioni termiche ottimali.
- umidificazione del substrato: lo scrubber a monte del biofiltro, oltre ad assicurare la depurazione dell'aria, consente anche di mantenere il substrato del biofiltro in condizioni ottimali di umidità, ovvero di evitare un'eccessiva essiccazione del biofiltro negli strati profondi, non raggiunti dall'acqua irrorata dall'alto.

Il flusso d'aria a valle del biofiltro verrà convogliato ad un camino.

8. Conclusioni

La crescita della domanda energetica e la situazione geopolitica più recente, ci obbligano a ricercare nel territorio Nazionale delle soluzioni alternative per la produzione di energia.

Nell'ambito delle biomasse, la filiera italiana del biogas e del biometano in agricoltura è la seconda per grandezza in Europa e tra le principali al mondo, per tale motivo gli impianti di digestione anaerobica rappresentano un elemento di forza nell'ambito delle strategie ambientali a livello europeo e nell'attuazione nazionale degli obiettivi del Next Generation EU (PNRR). Questi offrono una soluzione sostenibile allo smaltimento dei rifiuti provenienti dall'industria agroalimentare, per il trattamento dei rifiuti organici urbani e dei fanghi di depurazione, assicurano dei ritorni economici, permettono la fornitura autonoma dell'approvvigionamento energetico e una diminuzione delle emissioni nocive provocate dall'uso di combustibili fossili.

In questo contesto, questo elaborato nasce con l'idea di proporre una prospettiva sostenibile per la valorizzazione della paglia di riso su tutto il territorio della provincia di Novara, il quale ha una disponibilità annuale pari a 86240 t/a e un sottoprodotto agroindustriale che nella maggior parte dei casi viene lasciato bruciare, consigliando la costruzione di un impianto di digestione anaerobica per la produzione di biogas e biometano.

Esaminando la metodologia di incentivazione del biogas e biometano e avvalendosi dei vari studi condotti in letteratura sulle configurazioni impiantistiche attualmente esistenti e sui parametri di esercizio da usare, si è effettuato un primo dimensionamento di un impianto di digestione anaerobica. In particolare, si sono esaminati i pretrattamenti utili per la diminuzione del grado di impurezza prima dell'immissione nei reattori. Da un primo bilancio tra il prodotto totale, la quota recuperata dall'upgrading e quella impiegata per i fabbisogni del digestore si può ricavare il biogas effettivamente disponibile: la produzione di biogas risulta: 25.670.110 Nm³/a (3.209 Nm³/h) equivalenti a 137.835 MWh/a.

A valle dell'impianto biogas, per poter trasformare il digestato in un ammendante utilizzabile direttamente in agricoltura, si è previsto la costruzione di un impianto di compostaggio. Uno degli enormi vantaggi offerti dalla combinazione tra digestione anaerobica e compostaggio è il minore impatto olfattivo: le fasi degradative che producono la maggior parte degli odori avvengono infatti all'interno dei digestori, che sono ermeticamente chiusi.

Con lo scopo di immettere il biometano è stato dimensionato un sistema di upgrading del biogas, che si avvale di una tecnologia capace di liquefare la CO₂ e poter essere conservata in serbatoi per CO₂ ed essere usati come un valore aggiuntivo, è stata stimata relativamente una produzione di biometano pari a 1733 Nm³/h e una produzione oraria di CO₂ pari a 2829 kg/h.

I risultati ottenuti evidenziano un forte potenziale per la ricerca e l'implementazione di strategie innovative legate alla promozione del biometano, proponendo benefici energetici, ambientali e economici non trascurabili sul territorio Nazionale.

9. Bibliografia

- [1] «Climate Change 2022: Impacts Adaptation and Vulnerability,» 2022. [Online].
- [2] Isprambiente. [Online].
- [3] Glasgow's 2030 credibility gap: net zero's lip ser, «Glasgow's 2030 credibility gap: net zero's lip service to climate action,» 2021. [Online].
- [4] «Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza,» [Online].
- [5] ENEA-Censimento del potenziale energetico nazionale, «Tema di ricerca 5.2.5.5 "Censimento del potenziale energetico nazionale delle biomasse.",» [Online].
- [6] «Rapporto Statistico GSE - FER 2020,» [Online].
- [7] «<https://www.gse.it/>,» [Online].
- [8] S. Mazzeo, «Progettazione ed analisi tecni-economica di un impianto a digestione anaerobica per la produzione di biometano».
- [9] S. K. Richa Singh, «A review on biomethane potential of paddy straw and diverse prospects to enhance its biodigestibility,» [Online].
- [10] L. J. T. Kratky, «Biomass size reduction machines for enhancing biogas,» 2011. [Online].
- [11] X. Z. Y. G. Y. L. Z. S. Z. C. H. Z. X. Chen, «Enhancing methane production from rice straw by extrusion pretreatment,» 2014. [Online].
- [12] L. H. H. Z. Z. L. Z. L. L. B. He, «Energy recovery from rice straw through hydrothermal pretreatment and subsequent biomethane production.,» 2017. [Online].
- [13] Z. Y. G. H. X. F. Y. R. G. Song, «Optimization of the alkaline pretreatment of rice straw for enhanced methane yield,» 2013. [Online].
- [14] Y. Z. Y. Z. X. Gu, «Effect of Ca(OH)₂ pretreatment on extruded rice straw anaerobic digestion,» 2015. [Online].
- [15] U. S. N. Phutela, «Role of Coriolus versicolor MTCC 138 in ligno-silica complex removal of paddy straw and its implication on biogas production,» 2013. [Online].
- [16] A. P. T. X. Y. S. K. Mustafa, «Combinations of fungal and milling pretreatments for enhancing rice straw biogas production during solid anaerobic digestion,» 2016. [Online].
- [17] «Digestione anaerobica della frazione organica dei rifiuti solidi,» APAT- mnuali e linee guida 13/2005. [Online].

- [18] W. P. A. R. F. M. Christ O., «Mathematical modelling of the hydrolysis of anaerobic processes,» 2000. [Online].
- [19] S. S. W. M. L. R. E. G. Ristow N.E., «The effects of hydrolysis retention time and feed COD concentration on the rate of hydrolysis of primary sewage sludge under methanogenic conditions,» 2006. [Online].
- [20] K. E. B. W. Liebetrau J., «The influence of the hydrolysis rate of co-substrates on process behavior,» 2004. [Online].
- [21] F. B. P. J. F. X. Vavilin V.A., «Hydrolysis kinetics in anaerobic degradation of particulate organic material: An overview,» 2008. [Online].
- [22] P. J. A. B. A. I. Flotats X., «Identifiability study of the proteins degradation model, based on ADM1, using simultaneous batch experiments,» 2006. [Online].
- [23] M. D. K. K. Masse L., «Effect of hydrolysis pretreatment on fat degradation during anaerobic digestion of slaughterhouse wastewater,» 2003. [Online].
- [24] G.-H. J.L., «Reactor sizing, process kinetics and modelling of anaerobic digestion of complex wastes,» 2003. [Online].
- [25] R. S. L. G. Van Lier JB, «High-rate anaerobic wastewater treatment under psychrophilic and thermophilic conditions.,» 1997. [Online].
- [26] C. H. T. P. D. T. Fredric Bauer, «Biogas upgrading – Review of commercial TECHNOLOGIES,» [Online].
- [27] D. Banzato, «Biometano sistemi di upgrading e stato dell'arte,» <https://www.venetoagricoltura.org/wp-content/uploads/2020/10/Banzato.pdf>, 2020.
- [28] L. Stenta, «Analisi di sostenibilità energetica di tecnologie per la produzione di biometano,» Politecnico di Torino.
- [29] A. W. Anneli Petersson, «Biogas upgrading technologies –developments and innovations,» [Online].
- [30] «<https://biogasengineering.it/tipologia-impianti/impianto-agricolo-2/>,» [Online].
- [31] D. F. U. L. Giulia Grisolia, «Biomethanation of Rice Straw: A Sustainable Perspective for the Valorisation of a Field Residue in the Energy Sector,» [Online].
- [32] «<https://www.gffattori.it/insilati/silos-cemento-orizzontali.html>,» [Online].
- [33] «<https://www.promeco.it/it/impianti-trattamento-rifiuti/impianti-di-bio-trattamento/pre-trattamento-di-rifiuti-verdi-e-compost.html>,» [Online].
- [34] «<https://www.agriculture-xprt.com/products/model-s-bio-accelerator-519262>,» [Online].

- [35] «<https://bts-biogas.com/sviluppo-impianti/>,» [Online].
- [36] V. Tedesco e P. Urso, «Valutazioni sulla scelta della tecnologia per la riqualificazione dell'impianto di compostaggio di Druento,» ATOR.
- [37] «<https://www.eurothex.it/pe-xa>,» [Online].
- [38] «<https://www.rehau.com/downloads/399772/sistema-rehau-per-impianti-a-biogas.pdf>,» [Online].
- [39] «<https://biogasengineering.it/prodotti/filtro-biogas/>,» [Online].
- [40] «<https://www.airdep.eu/biogas-e-energia/desolfatore-serie-dbc/>,» [Online].
- [41] «
<https://www.parker.com/Literature/Hiross%20Zander%20Division/PDF%20Files/Bulletins/BULBIOSKID-01-IT.pdf>,» [Online].
- [42] «<https://www.conveco.com/it/filtri-a-carboni-attivi.html#:~:text=I%20filtri%20a%20carboni%20attivi,%C3%A8%20a%20cura%20dell'utilizzatore,>» [Online].
- [43] «<https://www.consorziobiogas.it/wp-content/uploads/2017/02/BIOGAS-UPGRADING-IT-4316-LR.pdf>,» [Online].
- [44] « <https://www.mvtplant.com/tipologie-di-impianti/impianto-di-compostaggio/>,» [Online].
- [45] «<https://www.cpl.it/wp-content/uploads/2018/03/CogenerazioneDaBiogas.pdf>,» [Online].
- [46] «<https://tcd-italia.com/wp-content/uploads/2021/09/Torcia-Biometano-Chiusa-HEB-1.pdf>,» [Online].
- [47] «<https://www.certifico.com/ambiente/documenti-ambiente/257-documenti-riservati-ambiente/11605-scrubber-ad-umido-abbattimento-emissioni-in-atmosfera,>» [Online].
- [48] «<https://www.labiotest.it/it/tecnologie-prodotti/scrubber-ad-umido,>» [Online].
- [49] « Conferenza delle parti sul cambiamento,» [Online].
- [50] «Le biomasse lignocellulosiche a cura di Enrico Bonari e Giampiero Maracchi,» [Online].
- [51] «Lo sviluppo del biometano e la strategia di decarbonizzazione in Italia,» <https://www.consorziobiogas.it/>. [Online].
- [52] J. L. D. S. Y. W. G. Y. Z. Z. F. W. Y. Ye, «Improved biogas production from rice straw by co-digestion with kitchen waste and pig manure.,» [Online].
- [53] M. J.A., «Pre-treatment processes for recycling and reuse of sewage sludge,» 2000. [Online].

- [54] V. W. Ghyyoot W, «Anaerobic digestion of primary sludge from chemical pre-precipitation,» 1997. [Online].
- [55] S. P. Demirel B., «The roles of acetotrophic and hydrogenotrophic methanogens during anaerobic conversion of biomass to methane: A review,» 2008. [Online].
- [56] J. A. E. a. J. F. Ferguson, «Solubilization of Particulate Organic Carbon during the Acid Phase of Anaerobic Digestion,» [Online].
- [57] N. V. H. M. G. N. V. H. Martin Gummert, « Sustainable Rice Straw Management,» 2020. [Online].
- [58] J. B. J. D. R. D. Lise Appels, «Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge,» [Online].
- [59] I. o. C. E. Vienna University of Technology (Austria), «Biogas to biomethane technology review,» [Online].
- [60] R. A. S. B. e. P. D. A. J. R. Alok Satlewal, «Rice straw as a feedstock for biofuels: Availability, recalcitrance, and chemical properties,» [Online].
- [61] A. S. Dieter Deublein, «Biogas from Waste and Renewable Resources,» [Online].
- [62] P. P. C. I. B. –. S. –. C. p. C. 2. d. Parigi, «<https://www.consorziobiogas.it/wp-content/uploads/2016/12/Position-Paper-CIB-Snam-confagri-ita.pdf>,» [Online].
- [63] R. David e A. Guidi, «Fact-checking: i cambiamenti climatici in 10 grafici,» 2021. [Online].
- [64] IEA, «Outlook for biogas and biomethane - Prospects for organic growth - World Energy Outlook Special Report,» [Online].
- [65] «<https://www.edilleca.com/it/referenza/trincee-per-impianto-biogas-2mwh/>,» [Online].
- [66] «<https://www.agriculture-xprt.com/products/model-s-bio-accelerator-519262/>,» [Online].
- [67] «<https://www.mvtplant.com/prodotti/biofiltro-fisso-cemento/>,» [Online].