

# Attualità

## LE ALTERNATIVE AL METANO CHE ARRIVA CON I GASDOTTI DALL'ESTERO. Nota 5 - Produzione di biometano per idrogenazione di bio-CO<sub>2</sub> con H<sub>2</sub> verde

**Carlo Giavarini<sup>a</sup>, Ferruccio Trifirò**

<sup>a</sup>Esperto del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici (LLPP)  
per il gas naturale e gli idrocarburi

*In questa nota si è analizzata la produzione di biometano ottenuto per idrogenazione con idrogeno verde della CO<sub>2</sub> contenuta nel biogas ottenuto da rifiuti organici o legnosi, e quindi coprodotta con il biometano. L'idrogeno verde è prodotto per elettrolisi dell'acqua, utilizzando il surplus di energia rinnovabile oggi disponibile. Nella produzione di biogas per digestione anaerobica l'idrogeno verde è introdotto nel digestore per idrogenare con microrganismi la CO<sub>2</sub> coprodotta con il metano o separandola dal metano nell'impianto di upgrading e idrogenandola per addizione di idrogeno verde con microrganismi o con il processo Sabatier, che usa catalizzatori eterogenei. Negli impianti di produzione di biogas per piro-gassificazione, l'idrogenazione con idrogeno verde della CO<sub>2</sub> coprodotta con il metano è realizzata introducendola a valle utilizzando il processo Sabatier. Un impianto da laboratorio per idrogenare la CO<sub>2</sub> separata dal biometano metano è stato realizzato anche con tecnologia fotonica.*

### Introduzione

In precedenti articoli si sono trattati i seguenti aspetti della produzione di metano e di biometano: l'utilizzo del metano rigassificato che arriva in Italia come GNL via nave [1]; la produzione in Italia di biometano per digestione anaerobica di rifiuti organici, e successiva purificazione del biogas ottenuto [2]; lo stoccaggio di metano in strutture geologiche sotterranee per conservare il metano nei periodi nei quali è meno usato e poi utilizzarlo nei periodi con maggiori esigenze [3]; la produzione di biometano da rifiuti legnosi per piro-gassificazione a gas di sintesi e sua successiva idrogenazione catalitica con l'idrogeno presente nel biogas ad alta temperatura [4].

In questa nota si tratterà la produzione di biometano per idrogenazione, con idrogeno verde, della CO<sub>2</sub> sottoprodotto della produzione di biometano. L'idrogeno definito "verde" è quello ottenuto per elettrolisi dell'acqua, utilizzando energia elettrica da fonti rinnovabili (eolico, fotovoltaico); esso può essere prodotto e/o immagazzinato nei periodi di esubero di energia, per essere poi utilizzato nelle idrogenazioni. Questo ciclo tecnologico di produzione del biometano viene chiamato "Power to gas" a seguito della sua connessione con la rete elettrica, per ottenere l'idrogeno necessario (tramite elettrolisi dell'acqua). Le diverse tecnologie proposte per l'idrogenazione di CO<sub>2</sub> a metano e biometano sono citate nel libro del Prof. Guido Saracco (Politecnico di Torino), dedicato alla Chimica Verde [5]. Inoltre, in alcuni recenti articoli [6-8] sono state trattate le diverse tecnologie per ottimizzare l'idrogenazione di CO<sub>2</sub> a biometano. Va detto che, a livello industriale, queste tecnologie sono ancora in fase di sviluppo. In un contesto, come quello attuale, in cui si vuole ridurre l'uso degli idrocarburi e promuovere l'idrogeno quale vettore energetico del futuro, può sembrare strano che si voglia trasformare la

CO<sub>2</sub> in metano usando proprio l'idrogeno. Ci sono almeno tre ragioni per farlo: 1) ancora per almeno tre o quattro decenni non si potrà sostituire del tutto l'uso del metano, che purtroppo siamo costretti ad importare in grandi quantità; 2) il metano è un idrocarburo relativamente "pulito" in quanto la sua molecola contiene 4 atomi di idrogeno contro uno solo di carbonio; 3) per una produzione massiccia e concentrata di idrogeno verde (quale quella che servirà nel futuro per l'industria e per i trasporti), e per lo sviluppo di adatte infrastrutture per il suo uso, occorreranno molti anni. L'attuale produzione di H<sub>2</sub> verde è limitata e spezzettata e, paradossalmente, dà luogo a dei surplus, in quanto non esistono le strutture per convogliarla verso una utenza che ancora non si è formata. È quindi logico utilizzare questi surplus e puntare, in un periodo di transizione che si preannuncia lungo, anche sul metano "autarchico" incrementandone la produzione in tutti i modi possibili. Inoltre, il motivo perché occorre introdurre ulteriore idrogeno per idrogenare la CO<sub>2</sub> negli impianti di produzione di biogas e poi di biometano è che il biogas di partenza, ottenuto in un digestore anaerobico o per pirogassificazione, ha solo circa il 55% di CH<sub>4</sub> e 45% di CO<sub>2</sub> perché le biomasse alimentate non producono abbastanza idrogeno e per questo è necessario introdurre ulteriore idrogeno. Infine, l'idrogeno verde è anche utilizzato per idrogenare la CO<sub>2</sub> prodotta da combustibili fossili e questo sarà l'oggetto di una successiva nota.

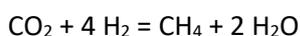
### La produzione di idrogeno verde e di bio-CO<sub>2</sub>

L'idrogeno verde è prodotto per elettrolisi dell'acqua utilizzando energia elettrica derivante dall'attuale *surplus* di energia rinnovabile [9]. L'elettrolita è generalmente una soluzione acquosa di idrossido di sodio (NaOH) o idrossido di potassio (KOH) e gli elettrodi sono costituiti da acciaio rivestito di nichel; le celle lavorano a temperature tra 50 °C e 80 °C e producono idrogeno ad alta purezza (fino a 15 barg). La CO<sub>2</sub> utilizzata per produrre biometano è quella coprodotta (sotto forma di biogas) negli impianti di digestione anaerobica di rifiuti organici e negli impianti di piro-gassificazione di rifiuti legnosi; essa viene in genere immessa nell'atmosfera dopo la separazione del biometano; solo in pochi casi viene recuperata per uso industriale [2]. Dato il prevedibile forte sviluppo degli impianti di biogas e di biometano, la quantità di CO<sub>2</sub> coprodotta aumenterà notevolmente; la sua utilizzazione contribuirà a ridurre le emissioni e ad aumentare il contributo del biogas verso soluzioni sostenibili. Sono necessarie solo poche modifiche al processo per la sua separazione e purificazione (*upgrading*). Va detto che le fonti di CO<sub>2</sub> da biogas sono di varie dimensioni e dislocate in diversi punti della penisola; nel caso di una sua trasformazione a metano, andrebbero, almeno in parte, collegate.

L'idrogenazione della CO<sub>2</sub> può essere fatta, con idrogeno verde, mediante catalisi eterogenea o mediante microrganismi metaniferi; si può ricorrere anche, in misura molto minore, alla foto-riduzione. Un recente articolo pubblicato il 10 ottobre 2022 [10] ha messo in luce, sulla base di considerazioni quantitative e qualitative, il potenziale che deriva dalla valorizzazione della CO<sub>2</sub> contenuta nel biogas in Svezia (simile a questo articolo), in quanto potrebbe aumentare la produzione nazionale di metano per sua idrogenazione.

### L'idrogenazione catalitica di bio-CO<sub>2</sub>

L'idrogenazione catalitica della CO<sub>2</sub> a CH<sub>4</sub> è chiamata storicamente "reazione di Sabatier", dal nome del suo scopritore; il chimico francese Paul Sabatier, infatti, insieme a Jean-Baptiste Senderens, realizzò la reazione nel 1887, utilizzando catalizzatori a base di nichel e lavorando fra 300-400 °C, a circa 3 Mpa [11-13]:



È interessante ricordare che diversi anni dopo (nel 1912) Sabatier prese il premio Nobel per la chimica con la seguente motivazione: "*For his method of hydrogenating organic compounds in*

*the presence of finely disintegrated metals, whereby the progress of organic chemistry has been greatly advanced in recent years*". Attualmente la metanazione catalitica avviene a temperature tra 200 e 550 °C e a pressioni comprese tra 20 e 100 bar. Il catalizzatore più utilizzato è il nichel supportato su  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ , che presenta elevata attività, buona selettività per il metano ed elevata disponibilità (quindi costi inferiori); esso però richiede una elevata purezza dei gas in ingresso, per evitare il suo avvelenamento. A seguito della forte esotermicità della reazione (165 kJ/mole), il secondo problema della metanazione è la scelta del reattore, che deve garantire una corretta gestione della temperatura, per evitare il danneggiamento del catalizzatore. Altri catalizzatori utilizzabili possono essere a base di Ru, Pd, Fe e Co; anch'essi però sono sensibili all'avvelenamento da parte delle impurezze della  $\text{CO}_2$ . La metanazione catalitica può essere utilizzata a valle negli impianti che producono biogas per piro-gassificazione di rifiuti legnosi o di rifiuti organici solidi, ma anche a valle degli impianti di digestione anaerobica di rifiuti organici, dove dopo l'impianto di *upgrading*, si dovrà introdurre un reattore di idrogenazione, per idrogenare la  $\text{CO}_2$  separata dal metano.

### L'idrogenazione di bio- $\text{CO}_2$ con microrganismi

Per ottenere biometano per idrogenazione di  $\text{CO}_2$ , è possibile utilizzare anche processi di biometanazione tramite batteri metanogeni (tipo archeobatteri), che trasformano la  $\text{CO}_2$  in metano in presenza di idrogeno; questa tecnologia è stata scoperta a Delft nel 1906. L'idrogeno, introdotto nel biodigestore, permette di idrogenare quasi completamente la  $\text{CO}_2$  (Fig. 1).

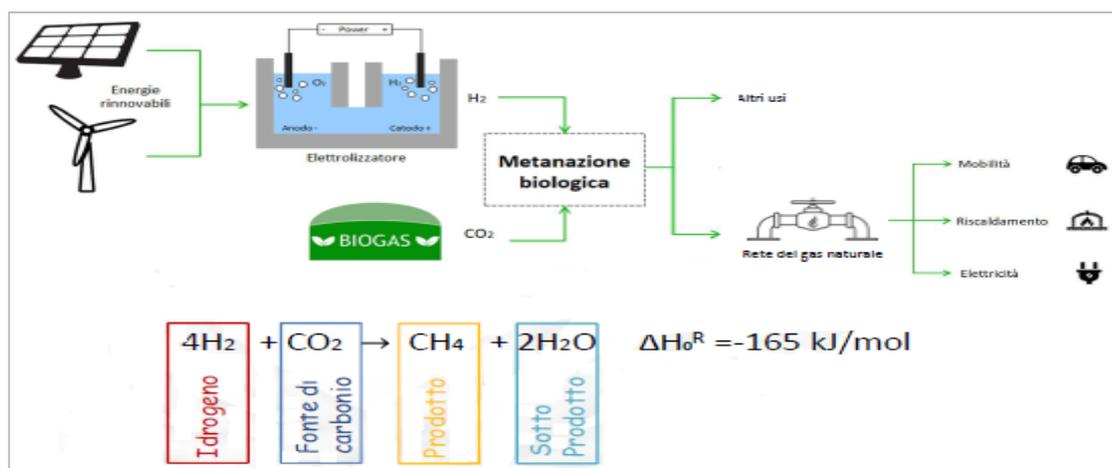


Fig. 1 - Idrogenazione  $\text{CO}_2$  con microrganismi

I principali vantaggi della bio-metanazione rispetto al processo catalitico sono la più bassa temperatura e pressione di reazione, senza che sia necessario purificare la  $\text{CO}_2$  [14, 15]. I batteri metanogeni operano in condizioni di ossigeno molto basso, fra 35-55 °C e a pressione atmosferica, ma con un rapporto  $\text{H}_2/\text{CO}_2$  pari a 7/1 e cioè quasi il doppio rispetto al teorico. Il problema della idrogenazione con batteri è la bassa solubilità dell'idrogeno in acqua, che è 40 volte minore di quella della  $\text{CO}_2$ ; per questo è necessario intervenire per aumentare la solubilizzazione dell'idrogeno. La metanazione del biogas può essere effettuata già all'interno del digestore (*in-situ*), iniettando idrogeno e controllando i parametri operativi (per non compromettere l'intero processo di digestione anaerobica), oppure alimentando il biogas con idrogeno verde in un secondo reattore esterno (*ex-situ*) in cui sono presenti microrganismi metanogeni. Questo secondo reattore di idrogenazione con microrganismi può essere introdotto sia subito dopo il digestore anaerobico, sia dopo l'impianto di *upgrading*.

### I progetti realizzati a Pinerolo (TO) per la idrogenazione di bio-CO<sub>2</sub> a biometano

Presso lo stabilimento di “Acea Pinerolese Industriale” a Pinerolo (TO), dove era stato costruito nel 2014 il primo impianto di produzione di biometano ottenuto dalla frazione organica dei rifiuti solidi urbani (Forsu) in Italia, e nel 2020, un secondo impianto di dimensioni maggiori, nel 2016 è partito un progetto dal nome “ProGeo”, per realizzare un impianto sperimentale di idrogenazione della CO<sub>2</sub> a biometano, con idrogeno verde; la CO<sub>2</sub>, prodotta dalla digestione anaerobica di rifiuti organici, è separata dal biometano nello stadio di *upgrading*, mediante assorbimento in acqua, dopo raffreddamento e compressione del biogas [16, 17]. Il progetto ProGeo (Fig. 2 e Fig. 3) è stato preceduto dal progetto Prometeo, che aveva l’obiettivo di produrre H<sub>2</sub> verde per elettrolisi dell’acqua, utilizzando l’energia in eccedenza prodotta da energie rinnovabili (eolico e fotovoltaico). Il progetto ProGeo è stato finanziato dall’Unione Europea nell’ambito del programma Horizon 2020, ed è stato avviato il 1° giugno 2016 per produrre 25 Nm<sup>3</sup>/h di biometano. L’azienda Hysytech ha realizzato l’impianto sperimentale di metanazione catalitica e il sistema di purificazione. Nel progetto ProGeo l’idrogenazione catalitica della CO<sub>2</sub> avviene in un singolo stadio (inter-raffreddato con ricircolo) con un sistema successivo di purificazione, per aumentare la purezza del metano e per ricircolare i reagenti non convertiti nel reattore di idrogenazione. Questa tecnologia di idrogenazione permette una riduzione dei costi di impianto e un aumento della conversione di H<sub>2</sub>.



Fig. 2 - Interno dell’impianto pilota Progeo



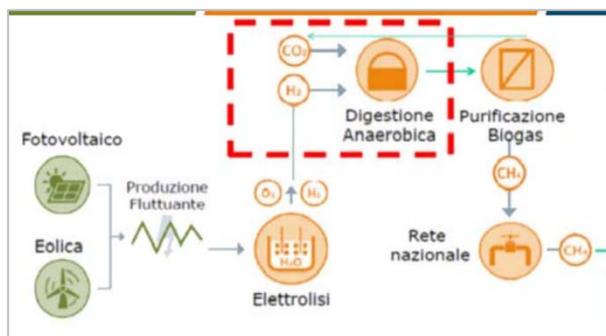
Fig. 3 - Esterno dell’impianto pilota Progeo

Successivamente la stessa azienda è stata coinvolta in un secondo progetto, chiamato Spotlight e destinato alla produzione di biometano utilizzando CO<sub>2</sub>, idrogeno verde e un dispositivo fotonico a luce solare per realizzare l’idrogenazione. Il progetto è stato avviato nei primi mesi del 2021, finanziato al 100% da un bando Horizon 2020 dell’UE e guidato da un centro di ricerca olandese [18-21]. Obiettivo del progetto è lo sviluppo di un dispositivo fotonico che utilizza luce solare per convertire CO<sub>2</sub> (prodotta da ACEA nel digestore anaerobico) a biometano, con idrogeno verde; viene anche prodotto, per *reverse water gas shift* anche un syngas che contiene CO (utilizzabile per produrre metanolo). Inoltre, all’interno del progetto, si è anche realizzata la produzione di H<sub>2</sub> dal biogas per trattamento con H<sub>2</sub>O ed O<sub>2</sub>. Il 13/6/2022 è stata diffusa la notizia che a Colonia (Germania) sarà realizzato un impianto “Spotlight” di maggiori dimensioni, da parte della società Fraunhofer [22]. Il dispositivo a fotoni di Spotlight in Germania comprenderà un reattore a flusso trasparente ottimizzato per l’incapsulamento della luce nel letto del catalizzatore; farà uso di ottiche solari ausiliarie per la concentrazione della luce solare e la

proiezione sul reattore, nonché di un diodo a emissione luminosa, efficiente dal punto di vista energetico per il funzionamento continuo.

### Biometano da fonti rinnovabili con il progetto +GAS di Enea

Con il progetto +GAS, Enea ha studiato la possibilità di aumentare la quantità di biometano, prodotto in un impianto di digestione anaerobica di rifiuti organici, introducendo H<sub>2</sub> verde nel



bidigestore per aumentare l'idrogenazione di CO<sub>2</sub>; il processo si basa sull'uso di batteri idrogenofili metanogeni, che già sono usati per la produzione di biometano [23-25]. Con questa tecnologia non solo si aumenta la quantità di CH<sub>4</sub>, ma si evita la emissione di CO<sub>2</sub> in atmosfera e si riducono i costi di separazione della CO<sub>2</sub> dal metano nel processo di *upgrading* del biogas (Fig. 4).

Fig. 4 - Schema impianto simile al progetto +Gas

Per realizzare queste ulteriori idrogenazioni della CO<sub>2</sub> nel digestore anaerobico, Enea ha messo a punto soluzioni tecnologiche in grado di facilitare la solubilizzazione dell'idrogeno aggiunto e di incrementare il suo grado di assimilazione da parte di microrganismi selezionati; in pratica viene impiegato un cavitatore idrodinamico che migliora la dissoluzione dei gas nella fase liquida. In linea teorica, la CO<sub>2</sub> che non venisse idrogenata dai microrganismi in uscita dall'*upgrading*, potrebbe essere utilizzata in un impianto a valle per la metanazione chimica, producendo ulteriore biometano. Il progetto +GAS ha avuto inizio il 1° settembre 2016 ed è terminato il 31 agosto 2018 coordinato dall'ENEA, che ha vinto con questo progetto il Bando della Regione Emilia-Romagna per soluzioni innovative di ricerca industriale strategica in ambito energetico. Le apparecchiature sperimentali sono state realizzate con i fondi POR-FESR (Programma Operativo Regionale - Fondo Europeo di Sviluppo Regionale) e sono state presentate a Ecomondo 2018. In futuro dovranno essere realizzati impianti pilota e dimostrativi per verificare la fattibilità industriale del processo (Fig. 5).



Fig. 5 - Progetto +Gas

### Impianto pilota di biometano realizzato da Enea alla Casaccia (RM)

Enea ha realizzato alla Casaccia, nel 2018, un impianto sperimentale di produzione di biometano per piro-gassificazione di rifiuti legnosi e successiva idrogenazione del biogas, impianto già

analizzato nella nota precedente [4]. Trattasi di un pilota dove la piro-gassificazione è accompagnata da un impianto di produzione di idrogeno, ottenuto per elettrolisi dell'acqua;  $H_2$  viene introdotto nei reattori di idrogenazione, già esistenti a valle del piro-gassificatore, aumentando la quantità di metano, prodotta per idrogenazione di CO e  $CO_2$  non convertiti dall'idrogeno insufficiente del biogas.

### Impianto di produzione di biometano in costruzione a Corticella (BO)

Il 6 settembre 2022 è giunta la notizia [26-28] che a Bologna nel 2023 l'azienda Hera con il gruppo Pietro Fiorentini realizzerà un impianto di produzione di biometano per idrogenazione con microrganismi (tecnologia della controllata tedesca MicroPyros) della  $CO_2$  sequestrata dall'impianto di digestione anaerobica dei fanghi di depurazione delle acque reflue (Fig. 6), che



è un grande impianto presente da anni a Corticella (BO). A Corticella si produrrà  $H_2$  per elettrolisi dell'acqua di reflue depurate utilizzando energia elettrica prodotta in eccesso da fonti rinnovabili ed il biometano prodotto sarà utilizzato da 1200 famiglie della zona; l'impianto si chiamerà SynBioS (*Syngas Biological Storage*) con un investimento di 10 milioni di euro.

Fig. 6 - Impianto depurazione acque di Corticella (BO)

### Recenti proposte per la Sardegna

Nel 2021 alcuni docenti della Facoltà di Ingegneria di Cagliari hanno proposto, a seguito del previsto futuro incremento di energia elettrica prodotta nell'isola da fonti rinnovabili, che sarebbe utile produrre in Sardegna idrogeno verde per idrogenare la  $CO_2$  proveniente dagli impianti di biogas [29]. È stato sottolineato nell'articolo che in Sardegna, dove non arriva il metano, sono già attivi 25 impianti di produzione di biogas per digestione anaerobica di rifiuti organici; in futuro potrebbero arrivare a 100 e la  $CO_2$ , coprodotta insieme al metano, potrebbe essere idrogenata per produrre ulteriore biometano.

### Nuovi Impianti di idrogenazione di bio- $CO_2$ a biometano in Europa

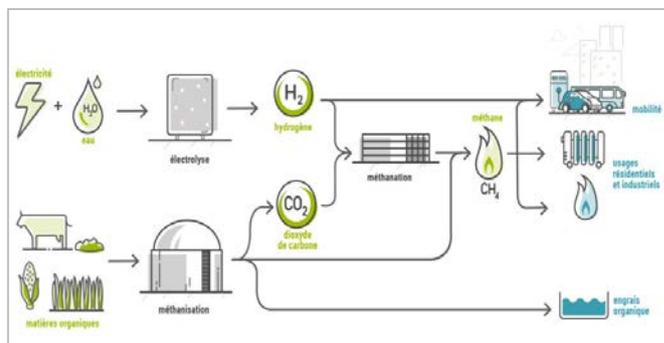


Fig. 7 - Impianto Methycentre

In Francia sono andati in marcia recentemente due impianti di produzione di biometano.

A Indre et Loire è stato realizzato l'impianto *Methycentre* (Fig. 7), dove, con idrogeno verde, viene idrogenata cataliticamente la  $CO_2$  proveniente dal digestore anaerobico e separata dal metano nell'impianto di upgrading [30].

A Duchy, vicino Saint-Florentin, è stato costruito l'impianto *Hyaunais* (Fig. 8) dove la  $CO_2$  coprodotta con il metano [30] nell'impianto di digestione anaerobica di rifiuti organici, dopo separazione dal metano, è idrogenata a biometano con idrogeno verde, in un reattore contenente microrganismi selezionati.

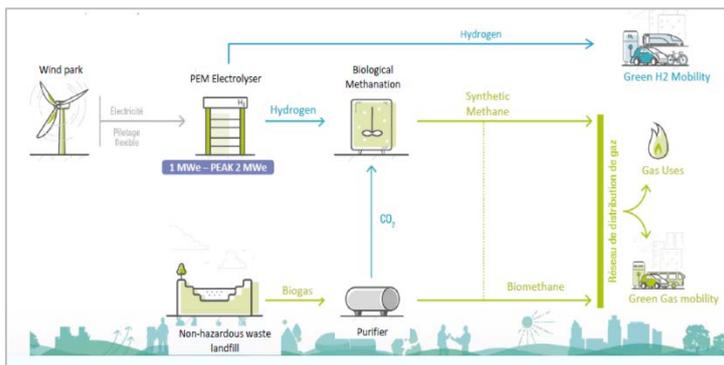


Fig. 8 - Impianto Hycaunais in Francia

Infine, il 7 giugno 2022 è stato pubblicato un articolo [31], dove è stata riportata la notizia che ricercatori del Fraunhofer Institute for Microengineering and Microsystems (Mainz, Germania) hanno trovato un modo efficiente per convertire a metano per idrogenazione la CO<sub>2</sub> contenuta nel biogas.

All'interno del reattore di idrogenazione è stata realizzata una struttura di microcanali, rivestiti con il catalizzatore, in cui fare fluire H<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>; con questo reattore viene aumentata la superficie di contatto tra i gas e il catalizzatore, e quindi anche la resa in biometano e la Fig. 9 riporta uno schema dell'impianto sperimentale. Utilizzando questa tecnologia, in Germania sono stati già costruiti due impianti dimostrativi di diverse dimensioni; un impianto industriale sarà costruito nel 2025. Sembra che la produzione di biometano in Germania sostituirà il metano che proviene dalla Russia[32].



Fig. 9 - Impianto di laboratorio Fraunhofer (Germania)

### Conclusioni

L'interesse ad aumentare la produzione di biometano per idrogenazione della CO<sub>2</sub> co-prodotta negli impianti di biometano, non è dovuto solo alle motivazioni espresse nel titolo di questo articolo, ossia per trovare alternative al metano che arriva con i gasdotti; in futuro è essenziale realizzare questi processi per i seguenti motivi:

- 1) utilizzare i rifiuti organici e i rifiuti legnosi, producendo biogas, per non sprecare materie prime naturali;
- 2) diminuire le emissioni di CO<sub>2</sub>, la cui produzione aumenterà insieme a quella del biogas;
- 3) utilizzare l'eventuale surplus di energia rinnovabile per produrre idrogeno utilizzabile per idrogenare la CO<sub>2</sub>.

Inoltre, l'attuale aumento del prezzo del metano di origine fossile, rende la produzione di biometano con le tecnologie descritte in questa nota competitive. In Italia abbiamo diversi impianti pilota ed è in costruzione il primo impianto industriale. Il 14 settembre 2022 è comparsa la notizia [33] che sono stati approvati dalla Commissione Europea gli incentivi per la produzione di biometano incoraggiando (attraverso il Pnrr, con 1,7 miliardi di euro) la costruzione di impianti di produzione di biometano sostenibile, nuovi o riconvertiti da precedenti produzioni. Questo prevedibile aumento della produzione di biometano aumenterà la coproduzione di CO<sub>2</sub> e quindi ci sarà l'esigenza di costruire ulteriori impianti di idrogenazione della CO<sub>2</sub> a biometano. Il 3 ottobre 2022 è stata pubblicata la notizia [34], che il 20 settembre 2022 la Commissione UE e i

leader del settore impegnati nella transizione verso l'energia verde, hanno lanciato la "Biomethane Industrial Partnership" (BIP) una nuova partnership pubblico-privato già annunciata nel Piano "REPwerEU", che ha l'obiettivo di aumentare la produzione annua e l'uso di biometano a 35 miliardi di metri cubi entro il 2030. Nell'articolo è riportato che questa proposta ridurrà la dipendenza dell'Europa dal gas naturale dalla Russia in un modo conveniente, e, al contempo, contribuirà in modo sostanziale a un sistema integrato di energia netta zero, diversificando i redditi degli agricoltori e garantendo un approccio circolare.

### BIBLIOGRAFIA

- [1] C. Giavarini, F. Trifirò, *La Chimica e l'Industria Newsletter*, 2022, **9**(2), 4.
- [2] C. Giavarini, F. Trifirò, *La Chimica e l'Industria Newsletter*, 2022, **9**(3), 4.
- [3] C. Giavarini, F. Trifirò, *La Chimica e l'Industria Newsletter*, 2022, **9**(4), 4.
- [4] C. Giavarini, M. Livi, F. Trifirò, *La Chimica e l'Industria Newsletter*, 2022, **9**(5), 4.
- [5] G. Saracco, *Chimica verde 2.0: impariamo dalla natura come combattere il riscaldamento globale*, a cura di Stefano Dalla Casa, Zanichelli, Bologna, 2017.
- [6] A.S. Calbry-Muzyka, T.J. Schildhauer, *Frontier Energy Research*, 2020, December, **8**, Article 570887.
- [7] M.F. Torcida, D. Curto, M. Martin, *Chemical Engineering Research and Design*, 2022, **181**, 89.
- [8] G. Varvoutis, A. Lampropoulos *et al.*, *Energies*, 2022, **15**(13), 4790.
- [9] [Biomethane from hydrogen and carbon dioxide](#)
- [10] S. Cordova, M. Gustafsson *et al.*, *Journal of Cleaner production*, 2022, **370**, 133498.
- [11] [\(PDF\) Metanazione della CO2 con H2 \(researchgate.net\)](#)
- [12] S. Pieta, A. Lewalska-Graczyk *et al.*, *Catalysts*, 2021, **11**(4), 433.
- [13] S. Falcinelli, A. Capriccioli *et al.*, *Physchem*, 2021, **1**(1), 82.
- [14] J. Zabranska, D. Pokorna, *Biotechnology Advances*, 2018, **36**(3), 707.
- [15] A.I. Adnan, M.Y. Ong *et al.*, *Bioengineering*, 2019, **6**(4), 92.
- [16] [Biometano dalla metanazione della CO2 - Hi-Tech Ambiente \(hitechambiente.com\)](#)
- [17] Periodic Reporting for period 2 - ProGeo (ProGeo) | H2020 | CORDIS | European Commission (europa.eu)
- [18] <https://www.aceapinerolese.it/acea-pinerolese-industriale-guarda-al-futuro-con-il-progetto-spotlight/>
- [19] <https://spotlight-project.eu/category/news/>
- [20] <https://spotlight-project.eu/2022/05/a-reactor-equipped-with-a-plasmonic-catalyst-to-produce-either-methane-or-carbon-monoxide-is-being-developed-for-operation-under-concentrated-sunlight/>
- [21] The project - SPOTLIGHT (spotlight-project.eu)
- [22] Lab exchange: "transfer of lab-scale syntheses to a larger scale" - SPOTLIGHT (spotlight-project.eu) Fraunhofer
- [23] [Energia: biometano da fonti rinnovabili impianti di piccola taglia con il progetto + GAS](#)
- [24] Progetto +GAS, Dipartimento Sostenibilità dei Sistemi Produttivi e Territoriali (Enea.it)
- [25] [Le nuove frontiere del Power-to-Gas: produrre biometano con idrogeno e CO2 | QualEnergia.it](#)
- [26] [Idrogeno 'verde' e biometano da acque reflue nel nuovo impianto 'power to gas' di Hera a Bologna - DIRE.it](#)
- [27] [SynBioS: impianto Hera per biometano da rinnovabili \(regionieambiente.it\)](#)
- [28] <https://www.bologna24ore.it/notizie/ambiente/2022/09/06/hera-presenta-in-anteprima-il-suo-impianto-power-to-gas/>
- [29] G. Concas, F. Lonis *et al.*, E3S Web of Conferences 312, 08015 (2021), 76° Italian National Congress ATI.
- [30] <https://www.h2it.it/la-valorizzazione-della-co2-attraverso-lidrogeno-i-progetti-in-francia/>
- [31] [Fraunhofer process increases methane yield from biogas plants](#)
- [32] [Germany: replacing Russian gas with biomethane feasible | European Biogas Association](#)
- [33] <https://www.rcinews.it/2022/09/14/incentivi-per-la-produzione-di-biometano/>
- [34] [Biometano: una partnership industriale per 35mil. di m3 annui \(regionieambiente.it\)](#)