



Ricerca di Sistema elettrico

Attività sperimentale di produzione di SNG

C. Bassano, P. Deiana, M. Subrizi, A. Assettati, A. Grasso,
G. Guidarelli

Attività sperimentale di produzione di SNG

C. Bassano, P. Deiana, M. Subrizi, A. Assettati, A. Grasso, G. Guidarelli

Settembre 2018

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2017

Area: Generazione di energia elettrica con basse emissioni di carbonio

Progetto B.2: Polo Tecnologico del Sulcis: Tecnologie e Metodologie 'Low Carbon' e Edifici ad energia quasi zero(nZEB)

Parte A1: Tecnologie per impiantistica energetica 'Low carbon'

Obiettivo d1: Utilizzo di CO₂/H₂ per la produzione di SNG e contemporanea produzione di energia elettrica

Responsabile del Progetto: Dott.ssa Franca Rita Picchia

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 PROTOTIPO DI PRODUZIONE DI SNG.....	6
2.1 MODIFICHE DELL'IMPIANTO.....	9
3 ATTIVITÀ SPERIMENTALE.....	10
3.1 RISULTATI DEI TEST DI METANAZIONE CON H ₂ /CO ₂ DI 4,1.....	11
3.2 RISULTATI IN FUNZIONE DELLA GHSV.....	11
3.3 RISULTATI EMULANDO REATTORI IN SERIE.....	12
3.4 ANALISI DEI PROFILI DI TEMPERATURA.....	12
3.5 RISULTATI DA MISCELA DI BIOGAS IN INPUT.....	13
3.6 ATTIVITÀ FUTURE.....	14
4 CONCLUSIONI.....	14
5 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	15
6 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	16

Sommario

L'attività di quest'annualità, basandosi sulle competenze acquisite nelle annualità precedenti, si è sviluppata attuando una serie di modifiche e migliorie del prototipo sperimentale realizzato nelle annualità precedenti, per lo studio del processo di metanazione. Si sono svolte successivamente i test sperimentali volti ad indagare il processo di metanazione della CO₂. Il prototipo è alloggiato su uno skid, opportunamente allestito per testare, in differenti condizioni operative, il processo di produzione di SNG a partire da CO₂ e H₂, al fine di valutarne le prestazioni anche per una sua implementazione nel settore del "Power to gas".

Il prototipo è composto da un reattore multitubolare in scala pilota da circa 1-2 m³/h di prodotto ed è caratterizzato dal fatto di essere alloggiato su di uno skid mobile, facilmente trasportabile su di un camion. L'impianto è stato equipaggiato di una rampa dei gas di alimentazione al fine di testare il processo con differenti miscele in ingresso al reattore di metanazione e di uno scambiatore a piastre che ha consentito di condensare l'acqua prodotta dal processo.

Sono stati, pertanto, effettuati dei test di produzione di SNG a partire da miscele di H₂ e CO₂ con l'utilizzo di catalizzatori di natura commerciale a base di Ru. Si è testato il reattore utilizzando tutti i sette tubi disponibili. I risultati indicano una resa in metano, espressa come % vol. (su base secca) nei prodotti, pari a 42 % vol. a pressione atmosferica con valori di GHSV di 7600 Ncm³/h/g, rapporti molari H₂/CO₂ pari a 4,1 e temperature nel range di 300-330 °C. Valori ottimali considerando che si è pervenuti a tale percentuale in volume in un solo passaggio, che confermano l'alta selettività dei catalizzatori a base di Ru, con buone prestazioni anche a pressione atmosferica. L'analisi della resa di metano in funzione della GHSV ha fornito valori di concentrazione di metano decrescenti incrementando le portate in ingresso. Le velocità spaziali che hanno consentito di ottenere valori maggiori di metano sono state intorno a 3500 h⁻¹ (7600 Ncm³/h/gcat) e rapporti molari H₂/CO₂=4,1.

L'emulazione del processo su più reattori ha consentito di ottenere all'uscita del terzo reattore un contenuto in CH₄ oltre l'80 % vol.

Relativamente alla gestione termica del processo durante i test i profili di temperatura nei sette tubi si sono mantenuti perlopiù costanti in un range di valori tra i 300-400 °C. L'incremento della GHSV da 7600 Ncm³/h/gcat a 11300 Ncm³/h/gcat ha determinato un incremento di temperatura con valori superiori ai 400°C, causato dall'aumento della portata della miscela reagente, con una parallela diminuzione del metano prodotto che si è attestato sul 32 % vol.

L'attività sperimentale si è sviluppata, ulteriormente, alimentando il reattore con una miscela tipica di un biogas ed aggiungendo idrogeno in rapporto stechiometrico 4:1 rispetto alla CO₂. Il fine è stato quello di studiare la tecnologia di metanazione con idrogeno proveniente da un elettrolizzatore come processo idoneo all'upgrading del biogas a biometano. I test condotti hanno consentito di ottenere in uscita una miscela di metano all'81 % vol.

In questa annualità si è sperimentato una nuova modalità di gestione del calore nel circuito lato mantello, utilizzando come fluido termovettore la CO₂, si sono in questo modo migliorati gli aspetti termici del processo riuscendo ad agire mediante il fluido termovettore sul controllo delle temperature evitando incrementi eccessivi. Il proseguo delle attività prevede la valutazione delle rese del processo con miscele contenenti diverse concentrazioni di CO₂ e idrogeno e metano, la valutazione dell'influenza della diluizione del catalizzatore, nonché test sperimentali su altre tipologie di catalizzatori. Si valuterà inoltre l'accoppiamento dell'impianto con un elettrolizzatore come sorgente di idrogeno.

1 Introduzione

La trasformazione energetica prevista dalle politiche energetiche europee (Energy Roadmap 2050, Clean Energy Package) e nazionali (SEN al 2030) [1] comporta l'adozione di una serie di misure che consentano di raggiungere gli obiettivi in esse definiti. La SEN ha tracciato un percorso di decarbonizzazione del sistema energetico strettamente congiunto con quanto stabilito dalla visione a lungo termine del 2050 dell'Europa che delinea la riduzione di almeno l'80% delle emissioni rispetto al 1990 e il raggiungimento degli obiettivi ambientali al 2030, in accordo con i traguardi stabiliti nella COP21 di Parigi. Tra gli obiettivi previsti dalla SEN al 2030 viene indicato il target di raggiungere il 28% da fonti energetiche rinnovabili sui consumi finali lordi al 2030 (FER elettriche pari al 55% del consumo interno lordo di elettricità). Il Consiglio europeo con il Clean Energy Package 2016 ha aggiornato i nuovi obiettivi clima energia al 2030 introducendo l'obiettivo vincolante al 32% nel 2030 per le energie rinnovabili.

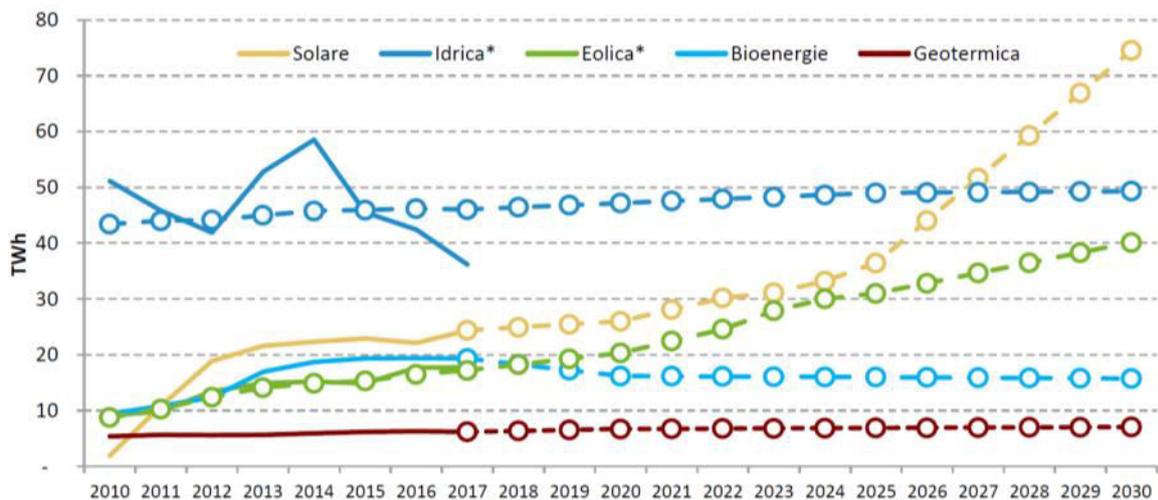


Figura 1. Traiettorie di crescita dell'energia elettrica da fonti rinnovabili al 2030 [Fonte: GSE e RSE]

Secondo quanto definito dalla "Proposta Di Piano Nazionale Integrato per l'energia e il Clima", il parco di generazione elettrica sarà soggetto ad una trasformazione rilevante con il phase-out della generazione da carbone previsto al 2025 e con la promozione dell'ampio ricorso a fonti energetiche rinnovabili.

Il maggiore contributo alla crescita delle rinnovabili deriva proprio dal settore elettrico, che al 2030 raggiunge i 16 Mtep di generazione da FER, pari a 187 TWh.

La decarbonizzazione del sistema energetico implica la necessità di attuare nuove politiche energetiche, ambientali, sociali ed economiche ed un coinvolgimento della R&S per lo sviluppo di tecnologie "low carbon" e per la loro diffusione. Le attività di R&S per consentire una decarbonizzazione profonda del sistema energetico italiano, dovranno pertanto sviluppare soluzioni idonee a promuovere la sostenibilità, la sicurezza, la continuità e l'economicità delle forniture comprese quelle per l'accumulo di lungo periodo dell'energia rinnovabile. Conseguentemente tra le misure che consentono di velocizzare la transizione verso un sistema energetico de-carbonizzato si possono considerare quelle tecnologie che permettono lo Storage Stagionale come il Power to Gas. Tra queste vi sono le tecnologie che attuano la conversione della CO₂ emessa da impianti sia industriali che di generazione di energia elettrica e da impianti di produzione di biogas in combustibili di varia natura o chemicals.

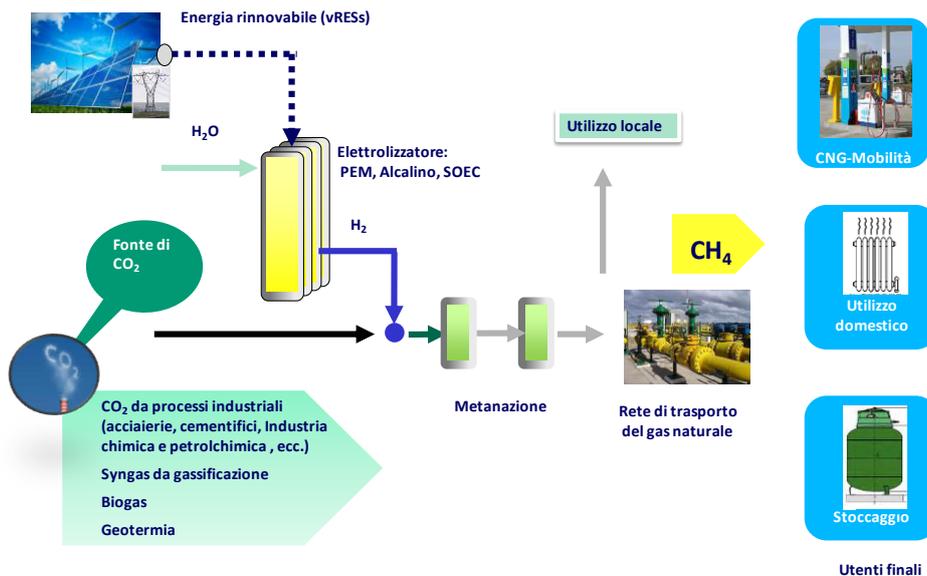


Figura 2. Sistema combinato per la produzione di SNG da rinnovabili attraverso il concetto del Power To Gas

In questo contesto i sistemi di accumulo energetico, “Energy Storage”, sono oggetto di un crescente interesse nel settore elettrico dove le rinnovabili, per definizione poco programmabili, stanno raggiungendo e raggiungeranno percentuali di mercato sempre più alte. In tale ambito si inseriscono i sistemi di accumulo o storage che immagazzinano il surplus di energia elettrica qualora la rete di trasmissione non risulti idonea a smaltire in sicurezza tutta la potenza generata dalle fonti rinnovabili. Tra le tecnologie di Energy Storage il “power to gas” consente di immagazzinare sotto forma chimica il surplus di energia elettrica producendo H₂ mediante un elettrolizzatore ed in SNG (Synthetic Natural Gas) qualora l’H₂ prodotto venga fatto reagire con la CO₂. In particolare, la produzione del gas naturale sintetico presenta il vantaggio di un suo utilizzo con mezzi ampiamente disponibili sul mercato e la possibilità di essere immesso nelle esistenti infrastrutture di trasporto/stoccaggio.

2 Prototipo di produzione di SNG

In questo ambito si è sviluppata l’attività di ricerca sul processo di metanazione il cui obiettivo è stato quello di ingegnerizzare il processo al fine di migliorarne la competitività economica rispetto ai competitors (Gas Naturale e GPL) e ridurre l’utilizzo di “materie prime” ed energia.

L’attività di quest’annualità basandosi sulle competenze acquisite nelle annualità precedenti ha visto un ulteriore perfezionamento dell’impianto prototipo sperimentale, allestito per lo studio del processo di metanazione e la sua implementazione in ambito power to gas. Il prototipo alloggiato su uno skid è stato opportunamente allestito per testare, in differenti condizioni operative, il processo al fine di valutarne le prestazioni. L’impianto è composto da un reattore multitubolare in scala pilota da 1 Nm³/h di prodotto ed è completo di rampe di alimentazione gas, di unità ausiliare di preriscaldamento reagenti, di un sistema di controllo dei principali parametri di processo (temperature, pressioni, portate...), e di un circuito ausiliario di un fluido termovettore che consente la termoregolazione del reattore al fine di testare il processo in condizioni isoterme o adiabatiche.

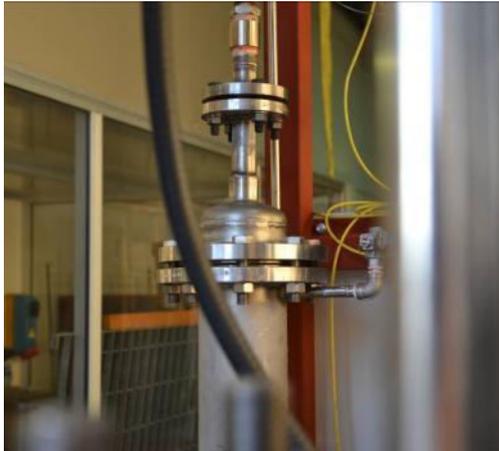


Figura 3. Dettagli del reattore tubolare

Il reattore dove avviene la reazione di metanazione è del tipo multi tubolare costituito da un fascio tubiero alloggiato in un mantello esterno e dotato di attacchi per la sensoristica di controllo del processo sia per le termocoppie che per le misure di pressione. Ciascun tubo del reattore è pertanto equipaggiato con termocoppie di tipo K posizionate all'interno del letto di reagente. Le termocoppie collegate al sistema di acquisizione permettono la conoscenza istantanea dell'andamento del processo fornendo informazioni utili al suo controllo.

L'impianto è dotato di una valvola di back pressure control che ha permesso di regolare la pressione in modo continuo e di portare il sistema reagente alla pressione desiderata agendo da remoto. La strumentazione consente anche di monitorare le perdite di carico nel letto catalitico. Una valvola relief tarata su 6 bar ha permesso di lavorare in condizioni di sicurezza. Il sistema allestito è in grado di lavorare dalla pressione atmosferica fino a 5 barg.



Figura 4. Valvola di regolazione della pressione

Per favorire l'innesco della reazione catalitica il sistema reagente deve essere portato ad una temperatura superiore ai 250 °C, questo è reso possibile da un fluido termovettore circolante nel mantello del reattore. A tal fine si è alloggiato sullo skid un riscaldatore di tipo industriale a resistenze riscaldanti che consente al fluido termovettore di raggiungere in tempi veloci le temperature di set point desiderata, si è inoltre realizzato un by pass della linea riscaldante per consentire al sistema di agire in modalità raffreddante al fine di asportare il calore prodotto dalla reazione di metanazione



Figura 5. Set up sperimentale durante un test

Un sistema di analisi in continuo dei gas prodotti costituito da analitica modulare consente il monitoraggio della composizione dei prodotti. Il prototipo è dotato di sensoristica e strumentazione in grado di monitorare il processo in tutte le sue fasi ed acquisire in continuo i dati più rilevanti. Il sistema di controllo è stato appositamente progettato e realizzato sia come hardware che come software, consentendo l'acquisizione di 60 canali.

L'alloggiamento su di uno skid carrellato mobile permette una facile trasportabilità dell'impianto..

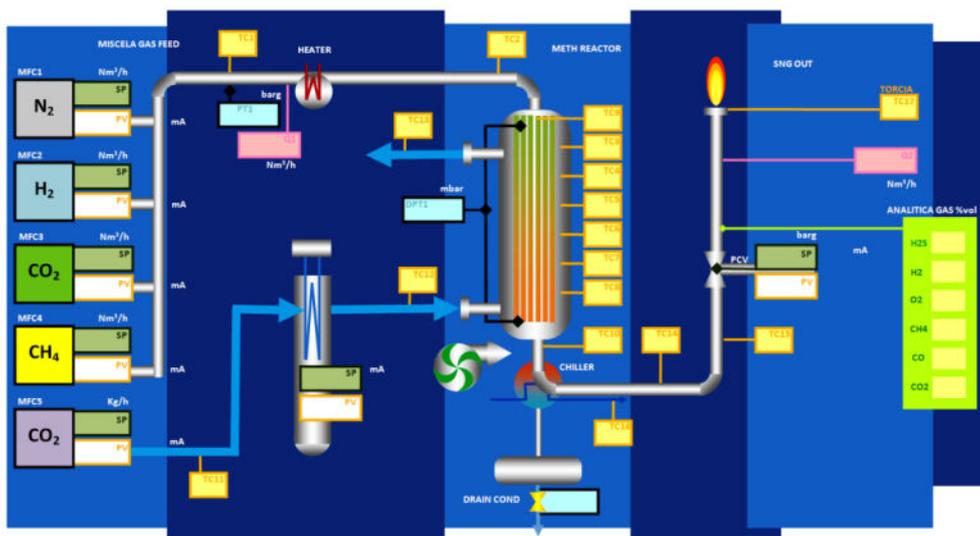


Figura 6. Sinottico aggiornato del nuova configurazione dell'impianto dedicato ai test sul processo di metanazione

Il gas prodotto dalla reazione, a valle della separazione dell'acqua di condensa, viene inviato all'analitica per misurare attraverso l'andamento nel tempo dei composti prodotti l'andamento del processo. L'analitica è composta da un sistema modulare che preleva il campione di gas e lo invia previo raffreddamento ed eliminazione della parte condensata ad un sistema costituito da più moduli in grado di rilevare in continuo i seguenti composti: CO, CO₂, CH₄, H₂, O₂, H₂S.

Per controllare e misurare i principali parametri si è realizzato un sistema di acquisizione e controllo il cui sinottico di interfaccia con l'utente è riportato in Figura 6. Come indicato dallo schema in figura la torcia permette lo smaltimento dei prodotti.

2.1 Modifiche dell'impianto

Le modifiche all'impianto hanno visto l'acquisizione e l'installazione di un sistema di rampe di alimentazione dei gas composta da quattro massici, di uno scambiatore di calore a piastre per la condensazione dell'acqua, di un serbatoio di raccolta della condensa, di una valvola di scarico automatica e del circuito dell'acqua di refrigerazione. Si è inoltre provveduto ad aggiornare il sinottico ed il sistema di controllo e monitoraggio dell'impianto come mostrato in Figura 7.



Figura 7. Dettagli dello scambiatore a piastre e della nuova rampa dei gas di alimentazione

Lo scambiatore di calore inserito è del tipo a piastre e mantello "Plates & Shell", questo tipo di scambiatore consente di unire in un unico apparecchio le migliori caratteristiche sia degli scambiatori a piastre convenzionali che di quelli a fascio tubiero. Lo scambiatore è costituito da piastre circolari, inserite in un mantello tubolare. Le piastre circolari grazie alla corrugazione delle superficie, permettono di raggiungere alti coefficienti di scambio con condizioni di lavoro in regime turbolento. Tale concezione rende questi scambiatori particolarmente adatti ad operare in condizioni meccaniche e termiche più gravose con ingombri complessivi minimi.

3 Attività sperimentale

L'attività sperimentale condotta ha avuto per scopo l'approfondimento e lo studio del processo di metanazione, individuando differenti condizioni di processo (composizioni della miscela reagente, temperatura e velocità spaziali) per valutare la resa in metano. L'attività si è avvalsa delle competenze, acquisite nel corso degli anni, sul processo di metanazione condotto su scala sia di laboratorio che di prototipo industriale.

I test sperimentali di produzione di SNG sono stati condotti a partire da miscele di H₂, CO₂, e CH₄, con l'utilizzo di catalizzatori di natura commerciale a base di Ru 0,5 % supportato su allumina. Il catalizzatore è stato inserito in tutti i sette tubi del reattore ed è stato diluito con un rapporto 1/1 in inerte, al fine di evitare locali hotspot di temperatura.

Le principali caratteristiche del catalizzatore impiegato nei test sono indicate in tabella 1.

Composizione	Ru 0,5 % peso Al ₂ O ₃
Granulometria	3-6 mm pellets
Densità di bulk	1040 kg/m ³

Tabella 1: Caratteristiche chimico fisiche del catalizzatore adottato



Figura 8. Fase di caricamento del catalizzatore

Come riferimento per l'attività sperimentale è stato preso il lavoro scientifico più rappresentativo relativo alla cinetica della reazione di Sabatier su catalizzatori a base di Ru che è quello di Peter Lunde e Frank Kester [17]. Infatti, gli autori hanno condotto dei test sperimentali a pressione atmosferica ed in condizioni isoterme su un catalizzatore a base di rutenio (0.5% in peso di Ru supportato su γ -allumina) processando diverse miscele di reazione.

La procedura di avviamento della marcia si è strutturata in più fasi. La prima fase è quella di start-up, che ha come obiettivo di portare il reattore nelle condizioni di processo idonee allo sviluppo della reazione di metanazione ($T_{\text{letto di catalizzatore}} > 250 \text{ }^\circ\text{C}$)

Nella seconda fase si opera la riduzione del catalizzatore, ovvero mantenendo la temperatura costante al valore raggiunto si invia un flusso di H₂ per qualche ora. Terminata la fase di avviamento e portato l'impianto in condizioni di marcia si inizia ad inviare la miscela reagente.

L'attività sperimentale condotta ha visto nella fase di test la valutazione della resa in metano in funzione delle condizioni del processo variando le concentrazioni delle specie gassose in ingresso le portate e le temperature in ingresso.

3.1 Risultati dei test di metanazione con H₂/CO₂ di 4,1

I risultati indicano una resa in metano, espressa come % vol. (su base secca) nei prodotti, pari a 42 % vol. a pressione atmosferica con valori di GHSV di 7600 Ncm³/h/g, rapporti molari H₂/CO₂ pari a 4,1 e temperature nel range di 300-330 °C. Valori ottimali considerando che si è pervenuti a tale percentuale in volume in un solo passaggio, che confermano l'alta selettività dei catalizzatori a base di Ru, con buone prestazioni anche a pressione atmosferica.

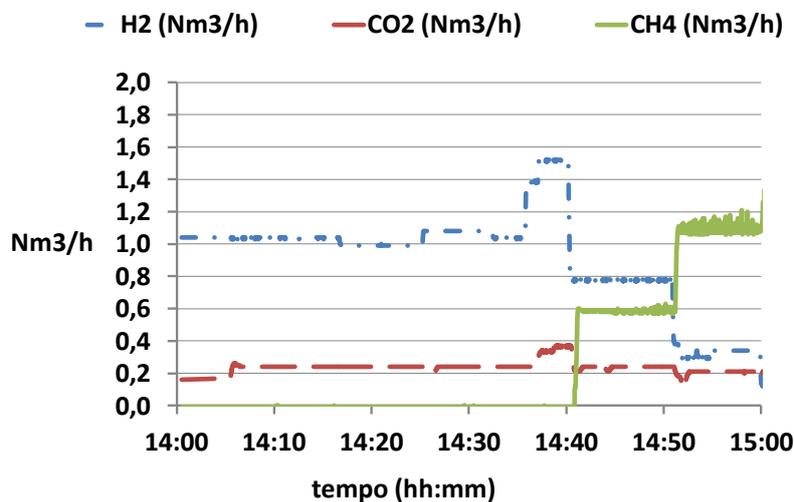


Figura 9. Andamento delle portate alimentate al reattore durante una fase del test

3.2 Risultati in funzione della GHSV

L'analisi della resa di metano in funzione della GHSV ha fornito valori di concentrazione di metano (esprese come % in volume di CH₄ nei prodotti) decrescenti incrementando le portate in ingresso. Le velocità spaziali che hanno consentito di ottenere valori maggiori di metano sono state intorno a 3500 h⁻¹ (7600 Ncm³/h/g_{cat}) e rapporti molari H₂/CO₂=4,1., in conformità con quanto riportato in letteratura [18].

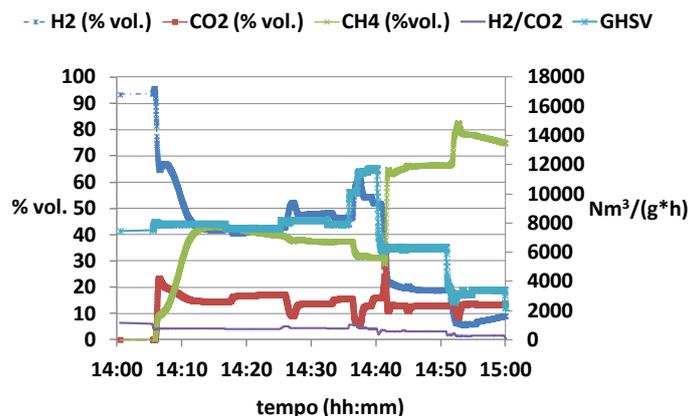


Figura 10. Andamento della composizione durante una fase del test (GHSV 7000-11000 Ncm³/h/g, p=1 bar)

3.3 Risultati emulando reattori in serie

A valle dei test sul set up a singolo reattore è stato testato il processo emulando il funzionamento di tre reattori in serie (Figura 11), ovvero si è alimentato al reattore la composizione in percentuale della miscela ottenuta dal test precedente. Il gas finale ottenuto al terzo passaggio è caratterizzato da un contenuto in CH₄ oltre l'80 % vol..

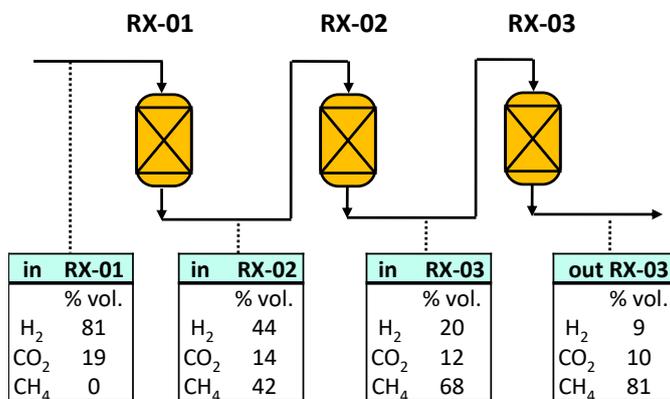


Figura 11. Composizione dei prodotti nella configurazione emulando tre reattori in serie

3.4 Analisi dei profili di temperatura

Durante il test i profili di temperatura nei sette tubi si sono mantenuti perlopiù costanti in un range di valori tra i 300-400 °C (Figura 12). L'incremento della GHSV da 7600 Ncm³/h/g a 11300 Ncm³/h/g ha determinato un incremento di temperatura con valori superiori ai 400°C con una parallela diminuzione del metano prodotto che si è attestato sul 32 % vol.

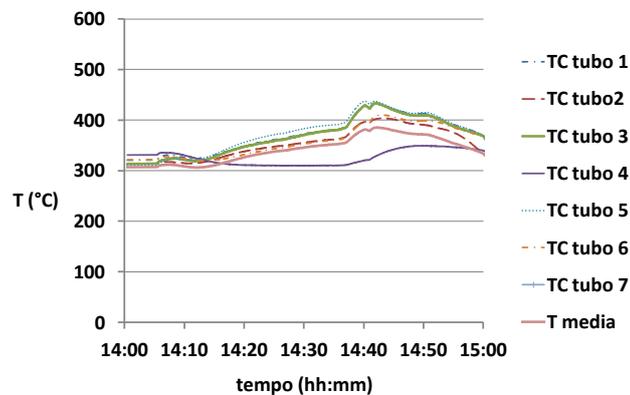


Figura 12. Andamento delle temperature interne ai sette letti catalitici durante una fase del test

Durante il test si è alimentata CO₂ preriscaldata al mantello del reattore per consentire al sistema di mantenersi alla temperatura idonea di reazione. Il test condotto ha consentito di migliorare le modalità di gestione degli aspetti termici del processo riuscendo ad agire mediante il fluido termovettore sul controllo delle temperature evitando incrementi eccessivi.

3.5 Risultati da miscela di biogas in input

L'attività sperimentale si è sviluppata, ulteriormente, alimentando il reattore con una miscela tipica di un biogas (60 % vol. di CH₄, 40 % vol. di CO₂) ed aggiungendo idrogeno in rapporto stechiometrico 4:1 rispetto alla CO₂. Il fine è stato quello di studiare la tecnologia di metanazione con idrogeno proveniente da un elettrolizzatore come processo idoneo all'upgrading del biogas a biometano. I test condotti hanno consentito di ottenere in uscita una miscela di metano all' 81 % vol ipotizzando tre reattori in serie.

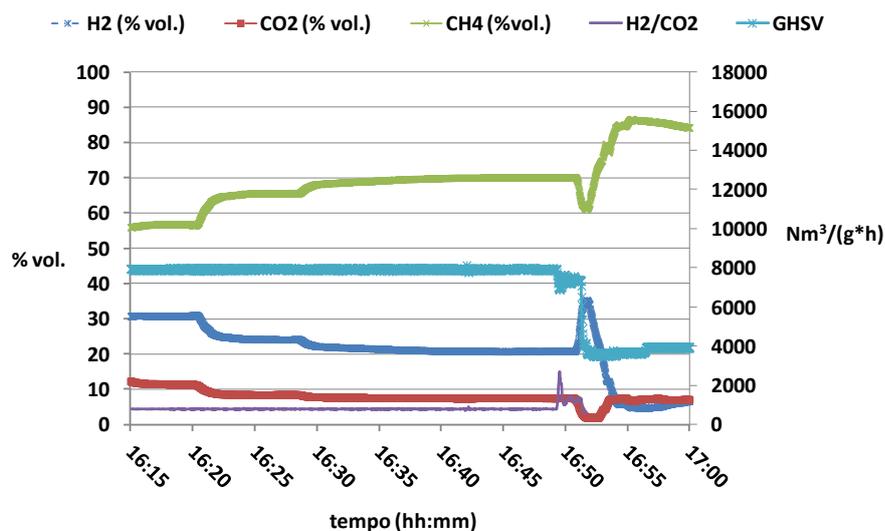


Figura 13. Andamento della composizione durante una fase del test con una miscela in input tipica del biogas



Figura 14: Esempio di visione cumulativa dei trend dei parametri acquisiti durante un test

3.6 Attività future

Il proseguo delle attività prevede la valutazione delle rese del processo con miscele contenenti diverse concentrazioni di CO₂ e idrogeno e metano, la valutazione dell'influenza della diluizione del catalizzatore, nonché test sperimentali su altre tipologie di catalizzatori. Si valuterà inoltre l'accoppiamento dell'impianto con un elettrolizzatore come sorgente di idrogeno.

4 Conclusioni

L'attività di quest'annualità, basandosi sulle competenze acquisite nelle annualità precedenti, si è sviluppata attuando una serie di modifiche e migliorie del prototipo sperimentale realizzato nelle annualità precedenti, per lo studio del processo di metanazione. Si sono svolte successivamente i test sperimentali volti ad indagare il processo di metanazione della CO₂. Il prototipo è alloggiato su uno skid, opportunamente allestito per testare, in differenti condizioni operative, il processo di produzione di SNG a partire da CO₂ e H₂, al fine di valutarne le prestazioni anche per una sua implementazione nel settore del "Power to Gas".

Sono stati, pertanto, effettuati dei test di produzione di SNG a partire da miscele di H₂ e CO₂ con l'utilizzo di catalizzatori di natura commerciale a base di Ru. Si è testato il reattore utilizzando tutti i sette tubi disponibili. I risultati indicano una resa in metano, espressa come % vol. (su base secca) nei prodotti, pari a 42 % vol. a pressione atmosferica con valori di GHSV di 7600 Ncm³/h/g, rapporti molari H₂/CO₂ pari a 4,1 e temperature nel range di 300-330 °C. Valori ottimali considerando che si è pervenuti a tale percentuale in volume in un solo passaggio, che confermano l'alta selettività dei catalizzatori a base di Ru, con buone prestazioni anche a pressione atmosferica. L'analisi della resa di metano in funzione della GHSV ha fornito valori di concentrazione di metano (esprese come % in volume di CH₄ nei prodotti) decrescenti incrementando le portate in ingresso. Le velocità spaziali che hanno consentito di ottenere valori maggiori di metano sono state intorno a 3500 h⁻¹ (7600 Ncm³/h/gcat) e rapporti molari H₂/CO₂=4,1.

L'emulazione del processo su più reattori ha consentito di ottenere all'uscita del terzo reattore un contenuto in CH₄ oltre l'80 % vol.

Relativamente alla gestione termica del processo durante i test i profili di temperatura nei sette tubi si sono mantenuti perlopiù costanti in un range di valori tra i 300-400 °C. L'incremento della GHSV da 7600 Ncm³/h/g a 11300 Ncm³/h/g ha determinato un incremento di temperatura con valori superiori ai 400°C, causato dall'aumento della miscela reagente, con una parallela diminuzione del metano prodotto che si è attestato sul 32 % vol.

L'attività sperimentale si è sviluppata, ulteriormente, alimentando il reattore con una miscela tipica di un biogas ed aggiungendo idrogeno in rapporto stechiometrico 4:1 rispetto alla CO₂. Il fine è stato quello di studiare la tecnologia di metanazione con idrogeno proveniente da un elettrolizzatore come processo idoneo all'upgrading del biogas a biometano. I test condotti hanno consentito di ottenere in uscita una miscela di metano all' 81 % vol.

In questa annualità si è sperimentato una nuova modalità di gestione del calore nel circuito lato mantello, utilizzando come fluido termovettore la CO₂, si sono in questo modo migliorati gli aspetti termici del processo riuscendo ad agire mediante il fluido termovettore sul controllo delle temperature evitando incrementi eccessivi

Il proseguo delle attività prevede la valutazione delle rese del processo con miscele contenenti diverse concentrazioni di CO₂ e idrogeno e metano, la valutazione dell'influenza della diluizione del catalizzatore, nonché test sperimentali su altre tipologie di catalizzatori. Si valuterà inoltre l'accoppiamento dell'impianto con un elettrolizzatore come sorgente di idrogeno.

5 Riferimenti bibliografici

- [1]. Strategia Energetica Nazionale SEN 2017
- [2]. Kopyscinski, J., et al 2010, "Production of synthetic natural gas (SNG) from coal and dry biomass - A technology review from 1950 to 2009" Fuel 89, 1763-1783
- [3]. C. Bassano, P. Deiana, N. Verdone "Modeling and economic evaluation of carbon capture and storage technologies integrated into sng plants" 7th IEA International Conference on Clean Coal Technologies (CCT2015) 17-21 May 2015 Krakow, Poland
- [4]. J. F. Gagné "Energy Technology Perspectives 2014: Harnessing Electricity's Potential" Report IEA
- [5]. Herib Blanco, André Faaij "A review at the role of storage in energy systems with a focus on Power to Gas and long-term storage" Renewable and Sustainable Energy Reviews 81 (2018) 1049-1086
- [6]. Manuel Gotz et al. "Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review" Renewable Energy 85 (2016) 1371e1390
- [7]. SBC Energy Institute Leading Energy Transition 2014
- [8]. Kimura M, Miyao T, Komori S, Chen A, Higashiyama K, Yamashita H, et al. "Selective methanation of CO in hydrogen-rich gases involving large amounts of CO₂ over Ru-modified Ni-Al mixed oxide catalysts" Appl Catal A 2010;379:182-7.
- [9]. Kopyscinski J, Schildhauer TJ, Vogel F, Biollaz SMA, Wokaun A. "Applying spatially resolved concentration and temperature measurements in a catalytic plate reactor for the kinetic study of CO methanation" J Catal 2010;271:262-79.
- [10]. Roberta Urbano "Modellazione di un impianto di produzione di SNG nell'applicazione Power to Gas" tesi facoltà di Ingegneri Chimica Università di Roma Sapienza A/A 2014/2015
- [11]. Aichernig C.: The GoBiGas Project. in 2nd Nuremberg Workshop: Methanation and Second Generation Fuels, Norimberga, 2014
- [12]. Götz M., McDaniel Koch A., Graf F.: State of the Art and Perspectives of CO₂ Methanation Process Concepts for Power-to-Gas Applications, International Gas Union Research Conference, Copenhagen, 2014
- [13]. Miller W.R. et al.: Great Plains Coal Gasification Plant Start-Up and Modification Report, F.T. Inc., Irvine, CA, 1986
- [14]. Blum D.B., Sherwin M.B., Marshall E.F.: Liquid-Phase Methanation of High Concentration CO Synthesis Gas, in Methanation of Synthesis Gas, American Chemical Society, 1975, pagg. 149-159

- [15]. C. Bassano, P. Deiana, L. Pacetti, N. Verdone “Integration of SNG plants with Carbon Capture and Storage Technologies modeling” Fuel 161 (2015) 355–363; Elsevier 2015
- [16]. H. Topsoe, “From solid fuels to substitute natural gas (SNG) using TREMP” Technical report, 2008, <http://www.topsoe.com>
- [17]. P. J. Lunde e F. L. Kester, “Carbon Dioxide Methanation on a Ruthenium Catalyst”, Ind. Chem. Process. Dev. 13 (1974), pp.27-33.
- [18]. Leonardo Falbo; Michela Martinelli; Carlo Giorgio Visconti, Luca Lietti; Claudia Bassano; Paolo Deiana; “Kinetics of CO2 methanation on a Ru-based catalyst at process conditions relevant for Power-to-Gas applications” Applied Catalysis B: Environmental- Volume 225, 5 June 2018, Pages 354-363,

6 Abbreviazioni ed acronimi

GHSV	Gas Hourly Space Velocity
P2G	Power To Gas
SET Plan	Strategic Energy Technology Plan
SNG	Substitute Natural Gas
SR	Stoichiometry Ratio
TC	Termocoppie
TRL	Technology Readiness Level
WGS	Water Gas Shift