

Ricerca di Sistema elettrico



Definizione e sviluppo del modello in Excel e, per i componenti, stoccaggio idrogeno e suo uso nella mobilità, del modello Matlab/Simulink per lo studio parametrico della variazione del costo dei gas rinnovabili nell'applicazione Power to Gas (LA2.17)

Roberta Caponi, Enrico Bocci, Claudia Bassano,
Alessandro Gennaro



DEFINIZIONE E SVILUPPO DEL MODELLO TECNICO-ECONOMICO IN EXCEL E, PER I COMPONENTI ELETTROLIZZATORE, STOCCAGGIO IDROGENO E SUO NELLA MOBILITA', DEL MODELLO IN MATLAB/SIMULINK PER LO STUDIO PARAMETRICO DELLA VARIAZIONE DEL COSTO DEI GAS RINNOVAVILI NELL'APPLICAZIONE POWER TO GAS (LA2.17)

Roberta Caponi, Enrico Bocci, Alessandro Gennaro (Università degli Studi Guglielmo Marconi); Claudia Bassano (ENEA)

Giugno 2023

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica - ENEA
Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: Decarbonizzazione

Progetto: Tema 1.3 – Progetto Integrato Tecnologie dell'idrogeno

Linea di attività: LA2.17

Responsabile del Progetto: Luca Turchetti, ENEA

Responsabile Linea di Attività: Enrico Bocci, Università degli Studi Guglielmo Marconi

Mese inizio previsto: Gennaio 2022

Mese inizio effettivo: Gennaio 2022

Mese fine previsto: Giugno 2023

Mese fine effettivo: Giugno 2023

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Definizione di casi studio e relative analisi tecnico-economiche per applicazioni power to gas"

Responsabile scientifico ENEA: Claudia, Bassano

Responsabile scientifico Co-beneficiario: Enrico, Bocci

Indice

1	RISULTATI ATTESI	3
2	RISULTATI OTTENUTI.....	4
3	PRODOTTI ATTESI.....	5
4	PRODOTTI SVILUPPATI	5
5	ANALISI DEGLI SCOSTAMENTI SU ATTIVITÀ E RISULTATI	5
6	SINTESI DELLE ATTIVITÀ SVOLTE	5
7	DETTAGLIO DELLE ATTIVITÀ SVOLTE.....	6
8	CONTRIBUTO DELLE EVENTUALI CONSULENZE ALLE ATTIVITÀ SOPRA DESCRITTE.....	9
9	PUBBLICAZIONI SCIENTIFICHE.....	9
10	EVENTI DI DISSEMINAZIONE	9

1 Risultati attesi

I risultati attesi come descritti nel capitolato in merito all'accordo di Programma MASE-ENEA sulla Ricerca di Sistema Elettrico Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024 - Progetto Integrato 1.3 "Tecnologie dell'Idrogeno" per la linea di attività LA 2.17 "Definizione e sviluppo del modello in Excel e, per i componenti elettrolizzatore, stoccaggio idrogeno e suo uso nella mobilità, del modello in Matlab/Simulink per lo studio parametrico della variazione del costo dei gas rinnovabili nell'applicazione Power to Gas" sono i seguenti:

- Sviluppo di un modello preliminare di analisi tecnico economica parametrico per valutare sistemi Power-to-Gas (PtG) in ambiente Excel.
- Definizione dei casi studio PtG ritenuti rilevanti per la realtà del sistema industriale ed energetico italiano e le corrispondenti configurazioni.
- Calcolo dei CAPEX ed OPEX in differenti scenari applicativi, calcolo preliminare del LCOX negli scenari individuati, analisi di sensitività sui principali parametri tecnico-economici, valutazione economica comparata del LCOX rispetto ai prezzi di mercato degli stessi prodotti "fossili".

Il rapporto tecnico-Deliverable da produrre in questa linea di attività è denominato: "Definizione dei casi studio e sviluppo di un modello tecno-economico in Excel per lo studio parametrico della variazione del costo dei gas rinnovabili per applicazioni Power to Gas".

2 Risultati ottenuti

I risultati ottenuti dal conseguimento della linea di attività LA 2.17 “Definizione e sviluppo del modello in Excel e, per i componenti elettrolizzatore, stoccaggio idrogeno e suo uso nella mobilità, del modello in Matlab/Simulink per lo studio parametrico della variazione del costo dei gas rinnovabili nell'applicazione Power to Gas” sono i seguenti:

- Sviluppo di un tool in Excel composto da fogli distinti, che consente la facile e diretta modifica delle ipotesi di lavoro e dei dati di input selezionati. Tali celle sono collegate a singoli fogli di calcolo per ciascun caso studio (4 scenari e 2 modalità di approvvigionamento energetico). Grazie a questa struttura, è possibile ottenere una visualizzazione dinamica dei risultati, organizzati in fogli appositamente dedicati per agevolare il confronto. Tale strumento, in una sua prima definizione, fornisce un modello valido per identificare i parametri più importanti in un progetto, fornendo le informazioni necessarie per avanzare nelle attività di ricerca e implementazione della tecnologia, contribuendo allo sviluppo del settore, offrendo un supporto fondamentale per le future iniziative e promuovendo l'adozione di soluzioni tecnologiche avanzate.
- Studio tecnico-economico finalizzato alla valutazione del costo di produzione di gas rinnovabili, tra cui l'idrogeno, una miscela di idrogeno e gas naturale in diversi rapporti volumetrici ed il bio-metano, attraverso l'investigazione della tecnologia PtG. Tale analisi prescinde dallo studio di molteplici configurazioni impiantistiche, includendo diverse tecnologie per la produzione di idrogeno a bassa temperatura, quali quella alcalina, polimerica ed anionica. Inoltre, sono stati considerati differenti usi finali, tra cui la mobilità, l'industria e la miscelazione di gas rinnovabili nella rete del gas naturale. Infine, sono stati valutati due differenti tipologie di approvvigionamento energetico (“on-grid” con collegamento in rete e “off-grid” o ad isola). Tale studio ha permesso di identificare l'effettiva competitività di tali processi ed individuare i fattori che maggiormente contribuiscono i costi associati.
- Dimensionamento ottimale delle diverse configurazioni impiantistiche con calcolo del gas prodotto, CAPEX, OPEX, LCOX per ciascun componente. Valutazione degli impatti di ciascuna voce di costo e confronto tra i vari scenari e casi studio oggetto dell'analisi. Successiva analisi di sensitività al fine di determinare eventuali margini per la riduzione dei costi contribuendo ad orientare gli investimenti verso soluzioni energetiche più efficienti ed ecologicamente sostenibili e a fornire un quadro chiaro e completo agli stakeholder e alle parti interessate, promuovendo la collaborazione e lo sviluppo di iniziative comuni per una transizione energetica sostenibile.

È stato, inoltre, prodotto il rapporto tecnico di riferimento R2.17-1, dal titolo: “Definizione dei casi studio e sviluppo di un modello tecno-economico in Excel per lo studio parametrico della variazione del costo dei gas rinnovabili per applicazioni Power to Gas”. Questo documento è stato elaborato dal Prof. Enrico Bocci e dall'Ing. Roberta Caponi con la collaborazione della Dott.ssa Claudia Bassano.

3 Prodotti attesi

Il capitolato relativamente a questa linea di attività non riporta prodotti attesi ma solo lo sviluppo dell'analisi tecnico-economica dei sistemi PtG (svolta mediante foglio di calcolo/tool in Excel) da integrare in un deliverable (vedi risultati attesi).

4 Prodotti sviluppati

Durante il periodo di questa linea di attività è stato sviluppata mediante foglio di calcolo/tool in Excel l'analisi tecnico-economica dei sistemi PtG al fine di valutare l'effettiva competitività in termini economici della produzione di gas rinnovabili in condizioni specifiche. Con tale modello è stato possibile calcolare i bilanci globali di massa ed energia dell'impianto PtG in funzione di differenti configurazioni di impianto e applicazioni. Tale analisi è stata integrata in un deliverable (vedi risultati sviluppati).

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Non si sono riscontrati scostamenti e criticità tecniche/economiche rispetto al periodi di tempo preventivato per svolgere le attività.

6 Sintesi delle attività svolte

Tra i principali vantaggi tecnici della tecnologia Power to Gas (PtG) si possano annoverare la semplicità con cui tale tecnologia può essere integrata con le strutture già esistenti, la grande flessibilità operativa derivante dalla conversione dell'energia elettrica in forma di gas sintetico ed infine, il suo contributo agli sforzi per mitigare i cambiamenti climatici. Tuttavia, vi sono alcune sfide che ancora devono essere affrontate, in particolare al riguardo del miglioramento dell'efficienza dell'intero processo di conversione e a barriere di natura economica. Da queste considerazioni emerge chiaramente che la tecnologia PtG necessita di ulteriori sforzi di ricerca e dimostrazione al fine di conseguire un livello di competitività maggiore e, di conseguenza, il diffondersi in maniera più ampia e consolidata. Il presente documento si propone di illustrare i risultati di uno studio tecnico-economico e di molteplici analisi parametriche finalizzate a valutare il costo di produzione di gas rinnovabili, noto come LCOX, ed il contributo di ciascun parametro, permettendone di quantificare l'impatto e determinarne l'effettiva competitività. Tale analisi è condotta per differenti configurazioni impiantistiche, comprendendo diverse tecnologie per la produzione di idrogeno a bassa temperatura, quali quella alcalina, polimerica ed anionica. Inoltre, sono stati esaminati vari usi finali, tra cui la mobilità, l'industria e la miscelazione di gas rinnovabili nella rete del gas naturale. Per ciascun caso studio sono stati valutati due modalità di approvvigionamento energetico. La prima prevede un collegamento diretto alla rete energetica principale, per il quale è stato assunto un servizio di 8000 ore/anno. Nella seconda, l'elettrolizzatore è stato accoppiato a un impianto fotovoltaico, integrando soluzioni di accumulo elettrico tramite batteria e stoccaggio intermedio di idrogeno per garantire un'operatività continua durante tutto l'anno. I risultati indicano valori di LCOX, in questo caso, inferiori dell'ordine del 30-50%, dimostrando il ruolo significativo del prezzo dell'energia elettrica sulla generazione di gas rinnovabile. Il generale il valore del LCOX ritrovato oscilla tra i 47€/MWh e 300 €/MWh. L'analisi di sensitività suggerisce che un'azione congiunta sul costo capitale dell'elettrolizzatore e sul costo dell'energia elettrica può determinare una riduzione del costo di produzione

del gas rinnovabile fino al 60%. Infine, sebbene fattori così come il prezzo del biogas per la produzione di bio-metano ed il meccanismo ETS concorrano alla diminuzione degli attuali costi specifici, il loro impatto è meno significativo rispetto all'importanza cruciale di contenere i costi di produzione dell'idrogeno. Complessivamente, la tecnologia degli elettrolizzatori non emerge come un elemento determinante nei risultati, sebbene si evidenzia la necessità di un'analisi più approfondita per verificare il corretto accoppiamento tra il componente elettrolizzatore e l'impianto fotovoltaico, al fine di determinare l'effettiva flessibilità delle distinte tecnologie

7 Dettaglio delle attività svolte

Lo studio tecnico-economico relativo a questa linea di attività è finalizzato alla valutazione del costo di produzione di gas rinnovabili, tra cui l'idrogeno, una miscela di idrogeno e gas naturale in diversi rapporti volumetrici ed il bio-metano, attraverso l'investigazione della tecnologia PtG. A tal fine, è stato sviluppato un modello che determina il costo livellato LCOX a partire da alcuni parametri di input tali da poter essere facilmente modificati e adattati ai diversi casi studio. In aggiunta, è stata effettuata una analisi parametrica che ha permesso di valutare dettagliatamente il contributo di ciascun parametro tecnico ed economico sul LCOX, permettendone di quantificare l'impatto. L'obiettivo è quello di individuare i casi studio più promettenti e i margini di miglioramento, mirando a contribuire nell'orientamento degli investimenti verso soluzioni energetiche più efficienti ed ecologicamente sostenibili.

In totale, sono stati individuati quattro scenari di studio distinti: la produzione di idrogeno destinato alla mobilità (Scenario 1), l'unico caso studio che prevede un vettore energetico completamente pulito, la sua produzione e successiva miscelazione nel gas naturale in due differenti proporzioni volumetriche per le utenze termiche (Scenario 2), la combinazione dell'idrogeno nel gas naturale direttamente nella rete (Scenario 3), ed infine la produzione di metano mediante la valorizzazione della CO₂ contenuta nel biogas integrato ad un impianto per la produzione di idrogeno (Scenario 4). Per ciascuno di questi scenari sono stati valutati due differenti tipologie di approvvigionamento energetico. In un primo caso, il gas rinnovabile viene prodotto tramite un collegamento diretto alla rete energetica principale, per il quale è stato assunto un servizio di 8000 ore/anno. Nel secondo caso, è stato esaminato l'approvvigionamento di energia rinnovabile generata da PV, in cui è stata inclusa nel sistema una soluzione di accumulo elettrico tramite batteria e uno stoccaggio intermedio di idrogeno per garantire l'operatività continua durante tutto l'anno.

In particolare, la prima fase dell'attività svolta ha comportato un approfondimento dello stato dell'arte relativamente alla tecnologia PtG, concentrandosi in modo più dettagliato sullo studio e sull'ottimizzazione di modelli per il calcolo del LCOX. In conseguenza di ciò, sono stati esaminati articoli e report di rilevanza nazionale ed internazionale che hanno consentito di evidenziare la carenza di una specifica individuazione di diverse configurazioni di impianto PtG in relazione a varie fonti di input energetico, tipologia di approvvigionamento della CO₂ e, infine, applicazioni finali. Ciò sottolinea l'importanza del lavoro svolto in questa linea di attività, la quale, mediante ulteriori indagini, contribuisce a fornire indicazioni più dettagliate e approfondite per la futura implementazione e diffusione di tali tecnologie.

Successivamente, è stato condotto un puntuale e metodico processo di definizione della configurazione impiantistica di ciascun scenario di applicazione oggetto dello studio ed una quantificazione della domanda

da soddisfare, necessaria per il dimensionamento dei sistemi. Nel contesto dello Scenario 1, si è ipotizzato che l'impianto sia in grado di produrre un quantitativo di idrogeno pari a 500 kg/giorno, una cifra che corrisponde ad una stazione di media capacità, in questo caso volta al rifornimento di una flotta composta da 25 autobus a idrogeno a pressione nominale di 350 bar. Lo Scenario 2 prevede una miscela idrogeno-gas naturale destinata ad alimentare un sistema industriale, quale un forno impiegato nel settore della siderurgia, dei metalli non ferrosi, della ceramica o delle vetrerie, avente una richiesta di potenza termica pari a 10 MWt. Lo scenario 3 ha contemplato l'impiego di una miscela costituita fino al 2 % vol. di idrogeno nel gas naturale in un distretto di medie dimensioni, la Provincia di Siena, il cui consumo di gas naturale secondo il piano energetico della Provincia di Siena (PEP), noto come PEP 2010-2020, è stato di 78 GWh annue. Infine, per lo Scenario 4 la taglia individuata è stata identificata a partire dalla disponibilità di 500 Nm³/h di biogas, la cui costituzione prevede il 40% di CO₂ (~ 120 Nm³/h) ed il 60% di CH₄ (~ 300 Nm³/h).

Di seguito si è proceduto a definire le assunzioni di natura tecnica, comprendente parametri quali pressioni, consumi, efficienze, e limiti operativi. Parallelamente, sono state delineate le considerazioni di natura economica, includendo i costi capitali (CAPEX) e operativi (OPEX) specifici per ciascun componente analizzato nello studio a partire dalle schede tecniche e dalle quotazioni di vari produttori che operano nella tecnologia in questione. In ambito finanziario, sono stati individuati i parametri utilizzati per il calcolo dei costi annualizzati e quelli relativi al prezzo dell'energia e delle altre fonti energetiche (vita utile impianti e tecnologia, tassi di interesse, prezzi dell'energia elettrica, del metano, del biogas, ETS e di vendita dell'idrogeno).

Il costo specifico di produzione del gas rinnovabile finale (€/kg), o LCOX, è il parametro maggiormente diffuso in letteratura ed utilizzato dagli operatori dei sistemi, nella sua definizione, incorpora tutti i costi associati al ciclo di vita del progetto, fornendo un quadro finanziario accurato del costo unitario netto del gas nel corso della durata del sistema di generazione. Il modello sviluppato ha come obiettivo quello di determinare il minor LCOX per ciascun caso studio in oggetto di esame. A tal fine, è stato impiegato il metodo di risoluzione GRG (gradiente ridotto generalizzato) non lineare, ovvero un algoritmo di ottimizzazione basato sul gradiente che consente di massimizzare o minimizzare una funzione obiettivo non lineare, nel caso specifico di questo studio il costo totale di progetto, definita su una regione ammissibile che rappresenta l'insieme dei punti che soddisfano un sistema di disequazioni, dette vincoli.

Infine, l'ultima attività si è caratterizzata per l'illustrazione, la descrizione e il confronto dei risultati ottenuti per ogni caso studio che hanno portato alla minimizzazione del LCOX e all'individuazione della tecnologia più promettente per la produzione di idrogeno per le taglie analizzate tra quella alcalina, polimerica ed anionica e all'individuazione dei parametri che maggiormente aggravano il LCOX grazie alla scomposizione delle varie voci di costo. In generale, è stato osservato che l'elettrolizzatore rappresenta il componente con il maggiore contributo ai costi di investimento, per una percentuale che oscilla tra il 40-60% a seconda dei diversi scenari analizzati. Tuttavia, nel complesso, la tecnologia degli elettrolizzatori non incide in modo significativo sui risultati, sebbene si sia evidenziata la necessità di una più approfondita analisi per verificare il corretto accoppiamento tra il componente elettrolizzatore e l'impianto fotovoltaico, al fine di determinare l'effettiva flessibilità delle distinte tecnologie. Relativamente ai costi operativi, il costo dell'energia elettrica costituisce la voce principale, seguita dal costo del combustibile nel caso di miscele che includono il gas naturale. Infine, i costi operativi derivanti dallo strumento ETS contribuiscono al LCOX per un totale di circa il 20-30%. In particolare, la tecnologia alcalina risulta meno performante a seguito dei maggiori costi di compressione e

delle efficienze inferiori. L'accoppiamento fotovoltaico-elettrolizzatore comporta una riduzione importante del LCOX, dell'ordine del 30-50% e risulta pertanto più competitivo della generazione di idrogeno ottenuta con un collegamento alla rete energetica principale. Questa diminuzione si verifica perché, nonostante la presenza di una fonte variabile implica necessariamente un sovradimensionamento del sistema al fine di coprire la medesima richiesta, i costi operativi sono notevolmente contratti e indipendenti dal prezzo di acquisto dell'energia. Inoltre, l'ottimizzazione del dimensionamento del sistema include la valorizzazione dell'idrogeno prodotto in eccesso che contribuisce positivamente alla riduzione dell'impatto del LCOX. Infine, fin quando vengano considerati anche i costi aggiuntivi correlati all'utilizzo di un combustibile fossile, la miscela contenente una maggiore percentuale di idrogeno si dimostra essere molto competitiva, rivelando di conseguenza un elevato grado di interesse in questa configurazione.

L'analisi di sensitività sul LCOX indica che un'azione congiunta sul costo capitale dell'elettrolizzatore e sul costo dell'energia elettrica può portare a una riduzione del costo di produzione del gas rinnovabile di circa il 60%. Infine, sebbene fattori così come il prezzo del biogas per la produzione di bio-metano ed il meccanismo ETS partecipino alla diminuzione degli attuali costi specifici, il loro impatto è meno significativo rispetto all'importanza cruciale di contenere i costi di produzione dell'idrogeno. Questo evidenzia l'esigenza di un processo di modellazione e progettazione accurato dei sistemi per favorire la diffusione su larga scala delle tecnologie a più bassa emissione.

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Tutte le attività svolte all'interno di questa linea di attività sono state gestite senza la necessità di consulenze esterne, svolgendo l'intero processo all'interno dell'ambito dell'Università Marconi. L'esecuzione di tali attività ha portato con successo all'ottenimento dei risultati previsti.

9 Pubblicazioni scientifiche

Non sono state prodotte delle pubblicazioni scientifiche per questa linea di attività.

10 Eventi di disseminazione

Non sono stati organizzati eventi di disseminazione per questa linea di attività.