

Ricerca di Sistema elettrico



Iniezione di idrogeno nelle reti di distribuzione del gas:
supporto alla sperimentazione e analisi ed elaborazione dei
dati rilevati (LA2.31)

C. Carcasci, M. Francesconi, M. Calabrese, N. Taddeucci



Iniezione di idrogeno nelle reti di distribuzione del gas: supporto alla sperimentazione e analisi ed elaborazione dei dati rilevati (LA2.31)

Prof. C. Carcasci (Dipartimento di Ingegneria Industriale – Università degli Studi di Firenze),
PhDs M. Francesconi (Dipartimento di Ingegneria Industriale – Università degli Studi di Firenze),
PhDs M. Calabrese (Dipartimento di Ingegneria Industriale – Università degli Studi di Firenze),
N. Taddeucci (Dipartimento di Ingegneria Industriale – Università degli Studi di Firenze)

Dicembre 2024

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: 1.3 – Progetto Integrato Tecnologie dell'Idrogeno

Linea di attività: LA 2.31

Responsabile del Progetto: Luca TURCHETTI, ENEA

Responsabile del Work Package: Luca TURCHETTI, ENEA

Responsabile Linea di Attività: Carlo CARCASCİ, Università degli Studi di Firenze

Mese inizio previsto: 1

Mese inizio effettivo: 12

Mese fine previsto: 36

Mese fine effettivo: 36

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione: *Iniezione di idrogeno nelle reti di distribuzione del gas: supporto alla sperimentazione e analisi ed elaborazione dei dati rilevati*

Indice

1	Risultati attesi	4
1.1	Valutazione impatto operativo di rete tramite simulazioni allo stato stazionario	4
1.2	Prestazioni metrologiche dei contatori del gas (G4)	4
1.3	Stratificazione della miscela nelle colonne montanti	5
1.4	Valutazione dell'efficacia dei sistemi di rilevamento fughe in presenza di miscele Idrogeno - Gas Naturale	5
1.5	Analisi tecno-economica produzione e miscelazione idrogeno in reti gas	5
2	Risultati ottenuti	6
2.1	Valutazione impatto operativo di rete tramite simulazioni allo stato stazionario	6
2.2	Prestazioni metrologiche dei contatori del gas (G4)	6
2.2.1	Contatori: rilevazioni in campo prove	7
2.2.2	Contatori: deriva dell'errore valutata in laboratorio	7
2.3	Stratificazione della miscela nelle colonne montanti	7
2.4	Valutazione dell'efficacia dei sistemi di Rilevamento Fughe in presenza di miscele Idrogeno- Gas Naturale	8
2.5	Analisi tecno-economica produzione e miscelazione idrogeno in reti gas	8
3	Prodotti attesi	9
4	Prodotti sviluppati	10
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati	11
5.1	Stratificazione della miscela nelle colonne montanti	11
5.2	Prestazioni metrologiche dei misuratori del gas in presenza di miscele idrogeno-gas Naturale	12
5.3	Valutazione dell'efficacia dei sistemi di Rilevamento Fughe in presenza di miscele Idrogeno- Gas Naturale	12
6	Sintesi delle attività svolte	14
7	Dettaglio delle attività svolte	15
7.1	Prestazioni metrologiche dei contatori gas in verifica	15
7.1.1	Strumenti di misura: Contatori in Verifica	16
7.2	Stratificazione della miscela nelle colonne montanti	17
7.3	Valutazione dell'efficacia dei sistemi di Rilevamento Fughe in presenza di miscele Idrogeno- Gas Naturale	19
7.4	Simulazioni di scenari parallele e complementari	20
7.4.1	Valutazione impatto operativo di rete tramite simulazioni allo stato stazionario	20
7.4.2	Analisi tecno-economica produzione e miscelazione idrogeno in reti gas	20
8	Pubblicazioni scientifiche	21

8.1	Eventi di disseminazione associati.....	21
-----	---	----

Indice delle figure

Figura 1 – Variazione della temperatura ($T^{\circ}\text{C}$) e delle pressioni (mbarg) interne alla colonna montante durante l'intero periodo di rilevamento dati.....	11
Figura 2 – (a): Andamento della portata volumetrica durante la settimana di rilevamento con solo gas naturale; (b) Errori medi relativi associati ai dati acquisiti.....	12
Figura 3 – (a) Esempio di acquisizione dati della prova di fuga con miscela priva di idrogeno (b) Esempio di acquisizione dati della prova di fuga con miscela contenente il 10% di idrogeno in volume.....	13
Figura 4 – Tipologie di regolazioni applicate alla caldaia.....	15
Figura 5 – Schema dei contatori in fase di verifica, con descrizione del posizionamento e della tecnologia di misurazione corrispondente.	17
Figura 6 – Schema del setup sperimentale per lo studio della stratificazione del gas, con rappresentazione delle configurazioni impiegate.	18
Figura 7 – Configurazione sperimentale per l'indagine sulle fughe di gas, con dettaglio delle apparecchiature di test.....	19
Figura 8: Schema dell'impianto per la produzione di idrogeno.	20

1 Risultati attesi

La presente sezione riassume i risultati attesi della campagna sperimentale e simulativa. In particolare, dalla linea di attività sono attesi:

- Analisi simulativa della rete di distribuzione operante con miscele idrogeno-gas naturale al fine di verificare l'impatto operativo sulla rete per diverse condizioni di esercizio e fissati determinati vincoli normativi.
- Analisi delle prestazioni metrologiche di contatori gas installati in una rete operante con miscele idrogeno-gas naturale a concentrazioni variabili e confronto con prove condotte in laboratorio in gas metano, post-esposizione alle miscele idrogeno-gas naturale.
- Analisi delle concentrazioni di idrogeno in una colonna montante al fine di valutare degli effetti di stratificazione di miscela.
- Valutazione dell'efficacia dei sistemi di rilevamento fughe in presenza di miscele idrogeno-gas naturale.
- Analisi tecno-economica per lo sviluppo di scenari che prevedono l'introduzione dell'idrogeno nella rete locale di Arezzo in termini di produzione e successivo utilizzo per miscelazione sottoforma di blending.

1.1 Valutazione impatto operativo di rete tramite simulazioni allo stato stazionario

L'immissione di idrogeno nella rete di distribuzione introduce modifiche significative ai parametri termo-fluidodinamici del fluido convogliato. La minore densità energetica volumetrica dell'idrogeno ($\text{HHV} \approx 12 \text{ MJ/Sm}^3$) rispetto al gas naturale ($\approx 38 \text{ MJ/Sm}^3$) comporta, a parità di fabbisogno energetico, un aumento dei volumi da trasportare, con conseguente incremento della velocità di flusso e delle perdite di carico distribuite, in particolare nei tratti ad alta portata o con geometrie sfavorevoli. La variazione della composizione induce una riduzione del peso molecolare apparente e della densità della miscela, alterando l'equilibrio tra i termini inerziali e geodetici dell'equazione del moto. In presenza di dislivelli altimetrici, la minore densità accentua gli effetti gravitazionali, influenzando la distribuzione pressoria tra nodi a diversa quota. Un aumento della frazione di idrogeno inciderebbe anche sui principali indici di qualità del gas: la densità specifica (SG) si ridurrebbe, con possibili incompatibilità nei dispositivi di misura e regolazione; il potere calorifico superiore (HHV) calerebbe proporzionalmente alla concentrazione di H_2 ; l'indice di Wobbe (WI), funzione diretta di SG e HHV, subirebbe variazioni in grado di compromettere l'intercambiabilità del combustibile e la compatibilità con le apparecchiature di combustione.

1.2 Prestazioni metrologiche dei contatori del gas (G4)

Per quanto noto agli autori, la letteratura scientifica fornisce un quadro ampio ma non esaustivo sull'accuratezza e affidabilità dei contatori gas in presenza di miscele H_2 -GN, evidenziando gap nella generalizzazione dei risultati e nella modellizzazione teorica, in parte limitata dalla natura proprietaria di molte tecnologie. Nei contatori massico-termici, la variazione della densità della miscela e l'elevata conducibilità termica dell'idrogeno influenzano la misura, mentre nei contatori a ultrasuoni, l'aumento della velocità del suono potrebbe comprometterne l'accuratezza. Nei contatori a diaframma, la permeabilità delle membrane potrebbe interagire con l'idrogeno, alterandone la risposta metrologica. I test in campo prove, condotti con miscele H_2 -GN per esposizioni prolungate, permettono di valutare le condizioni operative reali, mentre i test in laboratorio, eseguiti in gas metano, forniscono un riferimento

controllato per l'analisi della deriva metrologica. Le prove di laboratorio, condotte in gas metano, offrono una base più rappresentativa rispetto a test sperimentali di riferimento in aria, ma devono essere considerate con cautela nell'interpretazione dei risultati su miscele contenenti idrogeno.

1.3 Stratificazione della miscela nelle colonne montanti

La stratificazione della miscela idrogeno-gas naturale nelle configurazioni verticali, come le colonne montanti, rappresenta un aspetto critico nella valutazione dell'integrazione dell'idrogeno nelle reti di distribuzione, a causa della marcata differenza di densità tra i due gas che può indurre fenomeni di galleggiamento con accumulo preferenziale di idrogeno nella sezione superiore della condotta. La carenza totale di dati sperimentali costituisce un limite significativo, poiché la formazione di lotti di idrogeno a concentrazioni elevate potrebbe compromettere il corretto funzionamento e la sicurezza delle apparecchiature a valle della distribuzione. L'analisi sperimentale mira a identificare le soglie critiche di concentrazione e le condizioni geometriche che amplificano il fenomeno, valutando i tempi di insorgenza della stratificazione in configurazioni verticali rappresentative delle reti reali.

1.4 Valutazione dell'efficacia dei sistemi di rilevamento fughe in presenza di miscele Idrogeno - Gas Naturale

L'integrazione di idrogeno nelle miscele può influenzare significativamente l'efficacia e l'accuratezza dei dispositivi commerciali per il rilevamento delle fughe di gas, a causa della sua maggiore diffusività e volatilità rispetto al metano. Questo comporta una dispersione più rapida del gas e un possibile rischio di sottostima delle concentrazioni, specialmente in presenza di flussi d'aria o vento, che potrebbero amplificare ulteriormente le incertezze nella rilevazione. Tuttavia, un aspetto critico riguarda il principio di funzionamento degli strumenti, progettati specificamente per il metano: rilevando la presenza di metano immediatamente sopra la fuga artificiale, si rischia di ottenere valori assoluti poco significativi, soprattutto con basse concentrazioni volumetriche di idrogeno. Questo potrebbe compromettere l'affidabilità del rilevamento, rendendo necessaria una revisione delle soglie di sensibilità e un'ottimizzazione delle strategie di misura.

1.5 Analisi tecno-economica produzione e miscelazione idrogeno in reti gas

Dall'analisi tecno-economica ci si attende di stimare con precisione i costi di produzione dell'idrogeno tramite elettrolisi, tenendo conto dell'efficienza dei sistemi e del contributo delle energie rinnovabili. I risultati permetteranno di quantificare il beneficio ambientale attraverso indicatori di emissioni (GHG), identificando il potenziale di decarbonizzazione. Dunque, dal confronto tra un primo scenario in cui non si presuppone la possibilità di attivare l'elettrolizzatore con energia elettrica da rete ed un secondo scenario in cui si integra la possibilità di prelevare elettricità dalla rete ci si attende che le dimensioni dei componenti aumentino in modo sensibile nel primo caso. In particolar modo, ci si attende un incremento marcato delle dimensioni del sistema di stoccaggio. Questo si verifica nonostante la limitazione della quantità di energia elettrica prelevabile dalla rete, che è vincolata al mantenimento di una quota di emissioni di idrogeno conforme alle normative europee per garantire che questo possa essere considerato rinnovabile. Ulteriori risultati includeranno valutazioni sugli investimenti necessari per l'adeguamento tecnologico e sulla fattibilità economica della transizione, in assenza o presenza di incentivi economici.

2 Risultati ottenuti

2.1 Valutazione impatto operativo di rete tramite simulazioni allo stato stazionario

Sono stati esaminati gli effetti fluidodinamici delle miscele GN-H₂ rispetto ai vincoli normativi, valutandone la conformità ai limiti regolatori o l'eventuale superamento delle soglie consentite. L'analisi ha considerato miscele GN-H₂ dal 2% (limite normativo italiano) fino al 20% di idrogeno in volume (cvH₂%). Le simulazioni mostrano un impatto fluidodinamico che aumenta con la concentrazione di H₂; tuttavia, le variazioni rimangono trascurabili in termini assoluti. In particolare, i risultati evidenziano i seguenti effetti fluidodinamici:

- Distribuzione della pressione in media pressione (MP): L'incremento della concentrazione di idrogeno non altera significativamente la distribuzione della pressione nodale nella rete in MP. Le perdite di pressione massime, pari a circa 40 mbar (per condotte a pressione superiori a 3 bar-g), si riducono con l'aumento della frazione di idrogeno, principalmente a causa dell'effetto altimetrico. Questo fenomeno e il valore assoluto della perdita di carico è di entità trascurabile e può essere considerato di second'ordine.
- Distribuzione della pressione in bassa pressione (BP): Le pressioni minime si mantengono sempre al di sopra del limite regolatorio di 19 mbar, con perdite di carico aggiuntive inferiori a 1 mbar, evidenziando un impatto marginale. Tuttavia, il sistema opera con un margine ridotto di pressione ammissibile, con pressioni iniziali alle cabine di riduzione (GDR) in bassa pressione comprese tra 23 e 21 mbar. Queste variazioni quindi, anche se di bassa entità, possono fornire informazioni significative sulla sensibilità della rete reale, in particolare nei nodi o nelle condotte critiche, oltre a influenzare la redistribuzione dei flussi.
- Incremento della velocità del gas trasportato: L'aumento della frazione di idrogeno determina un incremento significativo della velocità del gas sia in MP che in BP. Tale variazione, sebbene rilevante dal punto di vista fluidodinamico, rientra nei limiti operativi della rete e non compromette la funzionalità del sistema di distribuzione.
- Influenza della quota sulla pressione minima: Differenze altimetriche di soli 5 metri tra due nodi risultano sufficienti a determinare il punto di pressione minima nella rete.
- Variazione dei parametri qualitativi del gas: L'aumento della frazione di H₂ modifica i parametri qualitativi del gas, in particolare la densità specifica (SG), che diminuisce progressivamente, superando i limiti di accettabilità già a concentrazioni <5% di idrogeno in miscela. Il potere calorifico superiore (HHV) si riduce con l'incremento di H₂, ma resta entro limiti accettabili fino al 10% di idrogeno. Il vincolo sull'indice di Wobbe (WI), risulta più tollerante e indica che miscele con presenza di H₂ al 20% potrebbero comunque rientrare nei limiti normativi previsti.

2.2 Prestazioni metrologiche dei contatori del gas (G4)

Nei test con i contatori gas (*Meters Under Test*, MUT), i risultati ottenuti in campo operativo e in laboratorio devono essere valutati separatamente, poiché le finalità di prova e i gas utilizzati nei due ambienti sono differenti (Rapporto Tecnico R2.31-4, Sez. 4.1 "Richiamo metodologico alle modalità di prova").

2.2.1 Contatori: rilevazioni in campo prove

- Il MUT massico-termico mostra una tendenza crescente alla sottostima della portata all'aumentare della concentrazione di H_2 nella miscela. L'errore medio passa dal valore di -7.82% per 100% GN ai valori di -12.03% e -17.88% per 2% e 10% di H_2 rispettivamente, indicando una deriva dell'accuratezza. L'errore massimo assoluto commesso è del 22.55%. I valori di errore sono per tutte le prove al di fuori dei limiti di errore massimo ammissibile di servizio ($MPE \pm 6\%$). Si registra anche un incremento degli intervalli interquartili da 2.90 punti percentuali (pp) a 4.75 pp al crescere della concentrazione di H_2 in miscela dal 2% al 10%, indicando una diminuzione di precisione del contatore.
- Il contatore gas a membrana e i due contatori gas a ultrasuoni (MUT-1 e MUT-3) performano sempre ampiamente all'interno dei limiti di MPE, indipendentemente dalla concentrazione di H_2 in miscela. Gli errori sono tutti contenuti entro un intervallo di $\pm 1.5\%$, con differenze trascurabili al variare della miscela.

2.2.2 Contatori: deriva dell'errore valutata in laboratorio

Le derive degli errori sono presenti nella maggior parte dei contatori testati, per diverse portate analizzate; tuttavia, il valore assoluto della deviazione non è significativo e sempre inferiore al massimo errore permesso.

In particolare, si riscontra che:

- Il contatore gas a membrana mostra una deriva dell'accuratezza per Q_{min} , con un errore medio che arriva fino al valore del -3% post-esposizione alla miscela al 10% H_2 .
- Il solo utilizzo del metano porta il contatore massico-termico a non mostrare tendenze apprezzabili e con un errore massimo di -1.6% post esposizione alla miscela al 10% H_2 .
- Il contatore gas a ultrasuoni MUT-1 presenta dei risultati anomali a monte di tutte le prove cui è necessario prestare attenzione per valutazioni. Considerando tutte le prove, mostra una variazione compensativa dell'errore medio per Q_{min} e una deriva dell'errore medio per 10% Q_{max} arrivando fino a un massimo del -3.18% post-esposizione alla miscela al 10% H_2 .
- Il contatore gas a ultrasuoni MUT-3 mostra invece una tendenza alla compensazione dell'errore medio per tutti i valori di portata testati.

2.3 Stratificazione della miscela nelle colonne montanti

Nella prova settimanale, l'escursione della differenza di concentrazione tra Pt.1 e Pt.3 è risultata compresa tra 0.03 e 0.34 pp (media: 0.103 pp). Nella serie giornaliera, la variazione è risultata costantemente entro ± 0.02 pp, con media di 0.009 pp, riconducibile a rumore strumentale. Le tendenze temporali delle due prove mostrano variazioni estremamente contenute, con coefficienti angolari delle regressioni inferiori a 0.04 pp di concentrazione di idrogeno per unità di tempo, confermando una sostanziale stabilità della miscela nei periodi osservati. L'analisi statistica ha incluso i coefficienti di Pearson (r_p), Spearman (ρ_s) e Grey Relational Grade (γ). Per i dati giornalieri, si osservano correlazioni elevate tra i punti ($r_p = 0.9798$ - 0.9861 ; $\rho_s = 0.9316$ - 0.9741 ; $\gamma = 0.6365$ - 0.6841), coerenti con un'evoluzione sincrona e monotona. I dati settimanali, pur mostrando correlazioni lievemente inferiori ($r_p = 0.8560$ - 0.9576 ; $\rho_s = 0.5667$ - 0.9333 ; $\gamma = 0.6167$ - 0.6590), non presentano evidenze di divergenza sistematica tra i profili.

Dal confronto tra le due serie emergono solo alcune considerazioni operative. Nella campagna ad alta risoluzione si osservano misure tendenzialmente più oscillanti e con valori localmente superiori rispetto alla media, mentre la serie settimanale mostra una maggiore aderenza al

valore target della miscela nominale. Questo comportamento potrebbe essere attribuito a una risposta transitoria del sistema di misura (gascromatografo) in condizioni ambientali non ideali, in particolare per quanto riguarda il raggiungimento delle condizioni termiche di stabilizzazione durante le misure condotte in ambiente esterno.

Nel complesso, la coerenza tra i dati acquisiti e l'assenza di scostamenti sistematici apprezzabili nelle tendenze temporali, entro i limiti di sensibilità del sistema strumentale, indicano che non si sono verificati fenomeni di stratificazione verticale della miscela GN-H₂ nella configurazione sperimentale considerata. La metodologia adottata, unita alla buona ripetibilità delle osservazioni, rappresenta un riferimento per l'estensione dell'indagine a scenari operativi più generali.

2.4 Valutazione dell'efficacia dei sistemi di Rilevamento Fughe in presenza di miscele Idrogeno- Gas Naturale

Le prove effettuate mostrano come non sia presente alcuna variazione dell'efficacia degli strumenti di ricerca fughe testati attribuibile alla presenza dell'idrogeno in miscela, con minime variazioni dovute ad una forte componente di natura stocastica attribuibile a velocità e direzione del vento locali.

2.5 Analisi tecno-economica produzione e miscelazione idrogeno in reti gas

Dato che l'idrogeno prodotto viene introdotto in blending nella rete gas, la domanda di idrogeno ha lo stesso andamento della domanda di gas naturale, con maggior richiesta nei mesi invernali, mentre la produzione del fotovoltaico è concentrata nei mesi estivi. Questo disaccoppiamento rende necessario un sistema di stoccaggio di elevate dimensioni. In particolare, nel caso in esame:

- L'auto-produzione completa dell'idrogeno necessario è assicurata da 20 MW di elettrolizzatore e fotovoltaico. Le dimensioni dello stoccaggio in questo caso risulterebbero pari a 250 t, che non sono sostenibili né da un punto di vista tecnico né da un punto di vista economico, risultando in un LCOH di 29.4 €/kg_{H₂}.
- Introducendo la possibilità di prendere energia elettrica dalla rete, l'ottimizzazione porterebbe a un costo di produzione minimo di 7.7 €/kg_{H₂}, con un sistema composto da un elettrolizzatore da 12.6 MW, un impianto fotovoltaico da 14.7 MW_p e un serbatoio di stoccaggio con capacità di 662 kg. Tuttavia, questa configurazione porta a un fattore di emissione dell'idrogeno prodotto di 8.46 kg_{CO₂}/kg_{H₂}, ben superiore al limite di 3 kg_{CO₂}/kg_{H₂} imposto dall'Unione Europea per considerare l'idrogeno prodotto come rinnovabile. Per rispettare questo limite, le taglie dei componenti crescono in modo sensibile, con un elettrolizzatore da 20.4 MW, un impianto fotovoltaico da 55.4 MW_p e un sistema di stoccaggio da 6 t. Il costo di produzione dell'idrogeno corrispondente a questa configurazione è di 10.63 €/kg_{H₂}.

I risultati possono dunque portare a una duplice conclusione:

- una sostanziale impossibilità dal punto di vista economico di realizzare un impianto di questo tipo senza il collegamento alla rete elettrica;
- l'impatto del fattore di emissione della rete nazionale va a modificare la quantità di elettricità che si può prelevare rimanendo sotto al limite imposto dall'Unione Europea.

In tutto ciò, è importante sottolineare come il caso in esame rappresenti una sorta di "worst-case scenario", poiché il tipo di domanda (prevalentemente concentrata nei mesi invernali) è opposta rispetto alla produzione di energia rinnovabile dell'impianto fotovoltaico (concentrata nei mesi estivi).

3 Prodotti attesi

- Software (S2.31-1): programma acquisizione ed elaborazione dati collegato alle strumentazioni impiegate durante tutta la campagna sperimentale.

4 Prodotti sviluppati

È stata sviluppata una suite dedicata per il supporto alla visualizzazione e all'elaborazione dei dati sperimentali, denominata "Data Processing Suite" (S2.31-1). La suite include i seguenti script:

- "HSA_v3.py": codice per l'analisi di stratificazione in colonna montante;
- "MDA_v2.py": codice per le prove in campo operativo dei contatori gas;
- "tif.py": codice per la valutazione della deriva dell'errore dei contatori gas condotta in laboratorio;
- "GLDA_v2.py": codice per la visualizzazione grafica dei risultati delle prove condotte con gli strumenti di rilevamento fughe;
- "GLWS_v2.py": codice per la comparazione dei dati di concentrazione del gas fugante con le statistiche di vento.

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Lo scostamento principale emerso riguarda l'impossibilità di condurre le prove alla concentrazione del 5% di idrogeno, a causa della mancata disponibilità della fornitura. Oltre a questa criticità, altri fattori hanno influenzato l'andamento della campagna sperimentale, riconducibili a tre categorie principali:

- Meteorologici (condizioni ambientali avverse che hanno influenzato le misurazioni)
- Tecnologici (limitazioni e malfunzionamenti delle apparecchiature)
- Analisi dei dati (difficoltà nell'elaborazione e interpretazione dei risultati)

Gli scostamenti si sono manifestati in momenti e situazioni diverse, coinvolgendo quasi tutte le strumentazioni impiegate. Per una maggiore chiarezza, questa sezione è suddivisa in tre parti, corrispondenti alle tipologie di prove sperimentali condotte.

5.1 Stratificazione della miscela nelle colonne montanti

Le prove sulla stratificazione del gas sono state condotte durante periodi caratterizzati da temperature esterne basse, spesso inferiori a 0°C (Figura 1). Questo ha comportato una riduzione della pressione nella colonna montante, rendendo difficoltoso il prelievo efficace di campioni per l'analisi mediante gascromatografia. In diverse occasioni è stato necessario reintegrare il gas nella linea e ripetere le prove. Attraverso l'esperienza acquisita durante la sperimentazione, è stato possibile mitigare questo problema calcolando in anticipo il numero di prelievi necessari per evitare lo svuotamento della colonna. Parallelamente, sono state riscontrate perdite lungo il sistema di campionamento, che hanno ulteriormente compromesso la stabilità della pressione e la qualità dei dati raccolti. Dal punto di vista tecnologico, un'ulteriore criticità è emersa al termine della campagna sperimentale, quando sono stati riscontrati al GC risultati con concentrazioni non normalizzate, compromettendo l'affidabilità di alcune misure. Inoltre, i tempi di iniezione del campione risultavano non ottimizzati, generando leggere oscillazioni nei valori registrati. Tuttavia, poiché le variazioni sono coerenti tra loro, i dati elaborati in termini di differenze di concentrazione risultano comunque preliminarmente significativi per l'analisi della stratificazione.

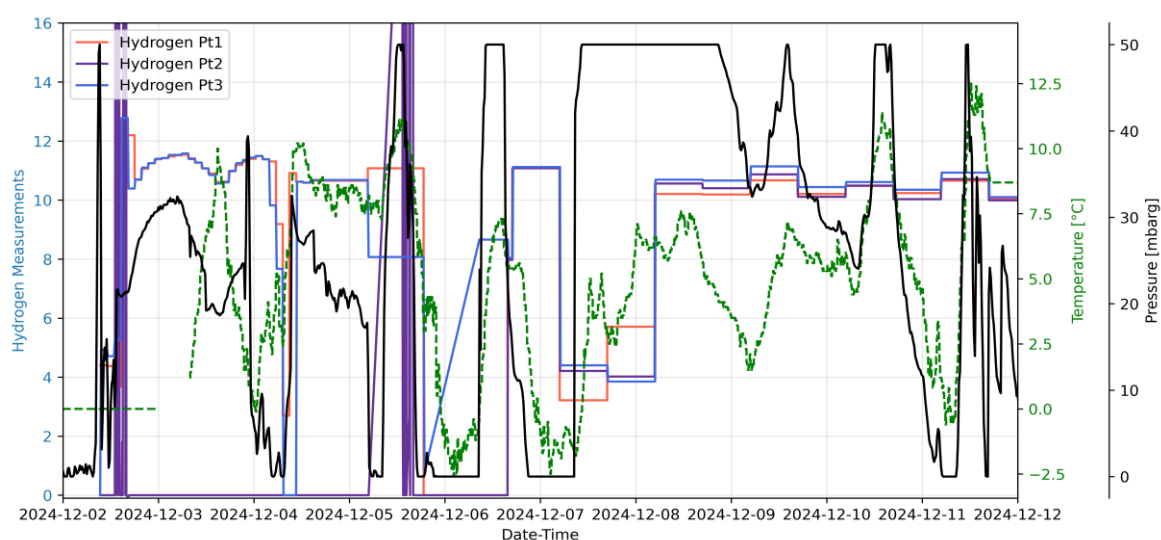


Figura 1 - Variazione della temperatura (T°C) e delle pressioni (mbarg) interne alla colonna montante durante l'intero periodo di rilevamento dati.

5.2 Prestazioni metrologiche dei misuratori del gas in presenza di miscele idrogeno-gas Naturale

Uno dei principali fattori di scostamento atteso, che rappresenta un limite nell'analisi dei risultati, è la mancata installazione di un gas meter master. Di conseguenza, il riferimento per la valutazione dei flussi si è basato esclusivamente sulla media dei flussi registrati dai contatori, introducendo un'incertezza nella stima delle variazioni metrologiche.

Le prove sull'invecchiamento dei contatori hanno anche inizialmente incontrato difficoltà a causa della scelta del modello G6 per una delle tecnologie testate. Nelle fasi iniziali, non era chiaro se le anomalie sull'errore medio relativo (Figura 2b) riscontrate dipendessero dalla classe del contatore o dalla tecnologia di misura impiegata. Questo ha reso necessaria la sostituzione del dispositivo più volte, causando ritardi nelle prove e nella raccolta dati. Una volta individuata la causa del problema, le prove sono proseguite con maggiore regolarità, utilizzando il contatore di classe G4 installato.

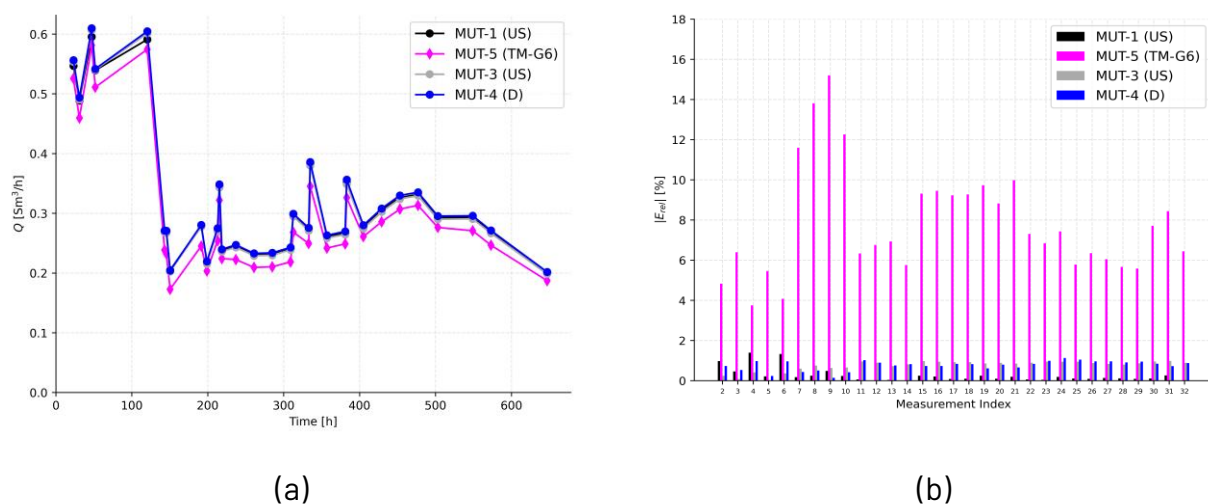


Figura 2 – (a): Andamento della portata volumetrica durante la settimana di rilevamento con solo gas naturale; (b) Errori medi relativi associati ai dati acquisiti.

Un'ulteriore variabilità nei risultati potrebbe derivare dalla difficoltà di replicare esattamente le condizioni energetiche tra i test. Le prove in campo si svolgono in un ambiente non termicamente isolato, soggetto a variazioni di temperatura esterna, e con tempi di esposizione che possono differire tra le diverse miscele testate. L'impatto di queste variabili non è quantificabile con certezza, ma rappresenta un possibile fattore da considerare nell'interpretazione dei risultati.

5.3 Valutazione dell'efficacia dei sistemi di Rilevamento Fughe in presenza di miscele Idrogeno- Gas Naturale

Per quanto riguarda le prove sulla ricerca delle fughe, i risultati ottenuti sono coerenti con le ipotesi iniziali. La sensibilità dei dispositivi utilizzati è risultata elevata, confermando che, alle basse concentrazioni di idrogeno testate, è problematico evidenziare differenze significative nelle prestazioni degli strumenti di rilevamento. Sebbene i risultati possano apparire poco "incisivi", essi forniscono una conferma sperimentale dell'efficacia degli strumenti di rilevamento anche in presenza di miscele contenenti basse percentuali di idrogeno.

Nella Figura 3 è riportato un esempio di rilevamento nelle varie stazioni fuganti, mostrando i valori assoluti delle ppm di CH_4 per le prove con gas naturale e con 10% di H_2 . Gli ordini di grandezza risultano paragonabili, e le fluttuazioni osservate non sono significative. Inoltre, nel Rapporto Tecnico R2.31-4 si evidenzia la scarsa correlazione ottenibile a causa del numero limitato di dati e delle basse variazioni del vento.

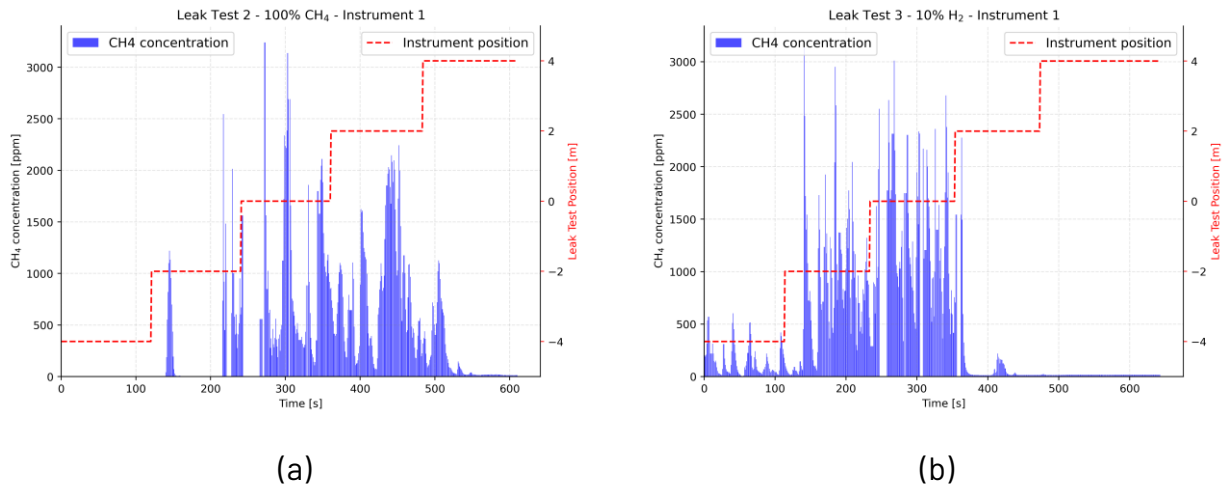


Figura 3 – (a) Esempio di acquisizione dati della prova di fuga con miscela priva di idrogeno (b) Esempio di acquisizione dati della prova di fuga con miscela contenente il 10% di idrogeno in volume.

6 Sintesi delle attività svolte

Sono state condotte attività numeriche e sperimentali per valutare l'iniezione di H_2 in reti GN. Le simulazioni stazionarie su rete reale hanno quantificato gli effetti fluidodinamici e qualitativi delle miscele GN- H_2 , evidenziando variazioni contenute entro i limiti normativi fino al 20% vol. H_2 . Le campagne sperimentali presso il campo prove hanno incluso la caratterizzazione della risposta di contatori (a membrana, ultrasonici, massico-termici) e dispositivi di ricerca fughe, rilevando derive metrologiche moderate e differenze prestazionali tra tecnologie. È stata verificata l'assenza di stratificazione significativa in colonne montanti verticali in condizioni statiche. Infine, è stato sviluppato un modello tecno-economico per scenari di produzione e stoccaggio H_2 , identificando come solo il collegamento alla rete elettrica consenta il rispetto dei limiti emissivi UE a costi sostenibili.

7 Dettaglio delle attività svolte

Questo capitolo descrive l'approccio seguito nella definizione del protocollo sperimentale, la selezione degli strumenti di misura e l'organizzazione delle prove in funzione degli obiettivi della ricerca. Inoltre, vengono anche descritte le procedure seguite per le prove in ambiente simulato.

Lista delle strumentazioni utilizzate ed errori relativi associati:

- Nuovi contatori GN non prelevati da rete (G4), $Er = \pm 1.5 \%$
- Nuovo contatore GN non prelevato da rete (G6), $Er = \pm 1.5 \%$
- Gas cromatografo: Strumentazione per l'analisi della composizione del gas, utilizzata per determinare la percentuale di idrogeno in volume presente nella miscela, $Er = \pm 2 \%$
- Sensori di pressione: Trasduttori di pressione con elevata precisione, impiegati per il monitoraggio delle variazioni pressorie, $Er = \pm 0.1 \%$
- Sensori di temperatura: Strumenti per la rilevazione della temperatura del gas e dell'ambiente circostante, $Er = \pm 0.1 \%$

7.1 Prestazioni metrologiche dei contatori gas in verifica

L'attività sperimentale proposta relativa ai misuratori di gas è stata strutturata in più fasi, combinando verifiche metrologiche sul campo prove con verifiche eseguite in laboratorio.

Prima dell'introduzione delle miscele idrogeno-gas naturale, è stata condotta una fase iniziale di test in gas naturale della durata di 627 ore consecutive, finalizzata alla verifica del funzionamento del sistema e alla raccolta preliminare di dati. Questa fase non ha seguito il pattern operativo successivamente adottato, ma ha permesso di stabilire un riferimento iniziale per l'analisi comparativa. Successivamente, sono state installate le bombole per il blending di idrogeno al 2% molare e l'Impianto di Test è stato mantenuto nella configurazione "Prove Contatori", questa volta alimentato direttamente dalle bombole. Per questa fase e per il successivo test con blending al 10%, è stato adottato un pattern di funzionamento suddiviso in due cicli di 6 giorni ciascuno (Figura 4): la prima fase ha previsto un utilizzo intermittente, con accensione e spegnimento della caldaia ogni 3 ore, mentre la seconda fase ha simulato un funzionamento continuo, lasciando il sistema libero di autoregolarsi in base al set point di temperatura, entrambi rappresentativi di una utenza civile reale. Concluso il test con blending di idrogeno al 2%, i misuratori sono stati disinstallati per una terza verifica in laboratorio. Successivamente, è stata avviata la prova con miscele al 10% di idrogeno, replicando le stesse condizioni operative del test al 2%. Infine, al termine di questa ultima fase sperimentale, è stata eseguita la quarta e ultima sessione di test in laboratorio accreditato.

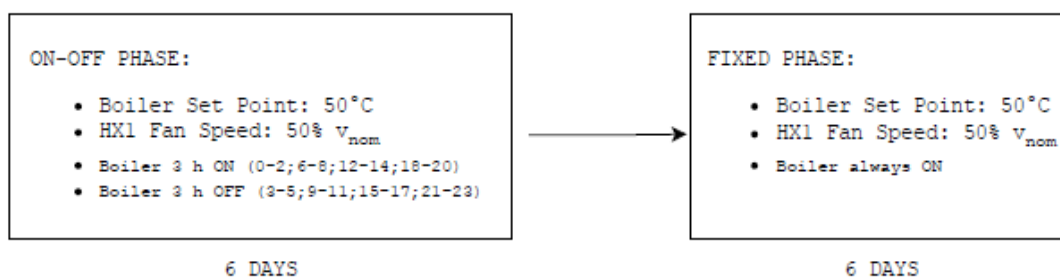


Figura 4 – Tipologie di regolazioni applicate alla caldaia.

I dati relativi al campo prove hanno permesso innanzitutto di monitorare il corretto funzionamento e successivamente di calcolare i volumi flussati totali reali, gli errori relativi operativi e la deriva operativa. Questo ha consentito di effettuare una stima metrologica di tipo applicativo, riflettendo le condizioni di esercizio reali.

Successivamente, per valutare l'evoluzione (deriva) metrologica dei dispositivi, sono state effettuate verifiche in laboratorio pre e post esposizione, permettendo un'analisi controllata delle variazioni nelle misurazioni. Tuttavia, queste prove sono state condotte con metano puro (grado 2.5), introducendo un limite nella comparabilità diretta con i risultati ottenuti nel campo prove, dove sono state impiegate miscele reali. Questo approccio rappresenta un avanzamento rispetto alla letteratura, che generalmente esegue test in aria, permettendo così di ottenere risultati, comunque, più conformi alle condizioni reali di esercizio. La procedura di test in laboratorio ha seguito un protocollo standardizzato: i misuratori sono stati rimossi dall'Impianto di Test, trasportati presso il laboratorio accreditato, acclimatati per 24 ore, sottoposti a test metrologici a quattro portate note (Q_{min} , 10% Q_{max} , 40% Q_{max} e Q_{max}), e infine reinstallati nel sistema sperimentale. Per ciascun misuratore sono stati calcolati gli errori relativi medi su più misurazioni, permettendo di ottenere quattro valori di errore corrispondenti alle portate analizzate (da normativa):

$$E_{rel,m} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{Q_{mix,i} - Q_{ref}}{Q_{ref}}$$

Le condizioni sperimentali di laboratorio prevedono il flussaggio di volumi specifici di gas per testare la risposta dei contatori in diverse condizioni operative. In particolare, sono stati considerati i seguenti valori di volume flussato: 120 L per Q_{max} (6 m³/h), 60 L per 0.4· Q_{max} , 18 L per 0.1· Q_{max} , e 12 L per una portata Q_{min} (0.04 m³/h). Tutte le prove in laboratorio sono state eseguite a 10 mbar di pressione di spinta.

7.1.1 Strumenti di misura: Contatori in Verifica

I misuratori di gas selezionati per la campagna sperimentale sono stati scelti tra dispositivi privi di utilizzo pregresso e appartenenti a quattro costruttori diversi, rappresentando differenti principi di misura. Il set di test include due misuratori a ultrasuoni (US), un misuratore termico-massico (TM) e un misuratore analogico a diaframma (D). Tutti i dispositivi testati appartengono alla classe G4, ad eccezione del misuratore termico-massico di classe G6 (MUT-5), inizialmente impiegato per il flussaggio con solo gas naturale e successivamente sostituito da un modello di classe G4 equivalente per le prove con miscele di idrogeno.

I misuratori sono indicati con la sigla MUT (Meter Under Test), seguita dal numero identificativo e dalla tecnologia di misura:

1. MUT-1(US) – Misuratore a ultrasuoni
2. MUT-2(TM-G4) – Misuratore termico-massico di classe G4
3. MUT-3(US) – Misuratore a ultrasuoni
4. MUT-4(D) – Misuratore a diaframma
5. MUT-5(TM-G6) – Misuratore termico-massico di classe G6 (impiegato solo nella fase iniziale)

I misuratori sono stati installati in configurazione in serie, al fine di garantire che tutti operassero con la medesima portata volumetrica e consentire un'analisi diretta della deriva metrologica, nonché l'individuazione di eventuali discrepanze nelle letture. L'ordine di installazione dei dispositivi, riportato in Figura 5, è stato definito con criteri funzionali per minimizzare le interferenze fluidodinamiche (perdite di carico concentrate e distribuite) e

garantire condizioni di test uniformi. In particolare, il misuratore a diaframma MUT-4 (D) è stato posizionato come ultimo nella serie, in modo da collocare la principale perdita di carico a valle dell'intera linea di misura. Questa scelta progettuale ha permesso di assicurare che i primi tre misuratori (MUT-1, MUT-2/MUT-5 e MUT-3) operassero con la stessa pressione di ingresso, poiché la perdita di carico indotta da questi dispositivi è trascurabile rispetto a quella generata dal misuratore a diaframma.

Tutti i Gas Meter impiegati effettuano la conversione volumetrica in Sm^3 tramite misura della temperatura, come richiesto dalla Direttiva MID 2014/32/UE, che stabilisce un ampliamento dell'intervallo di tolleranza dell'errore massimo permesso (MPE) di $\pm 0.5\%$.

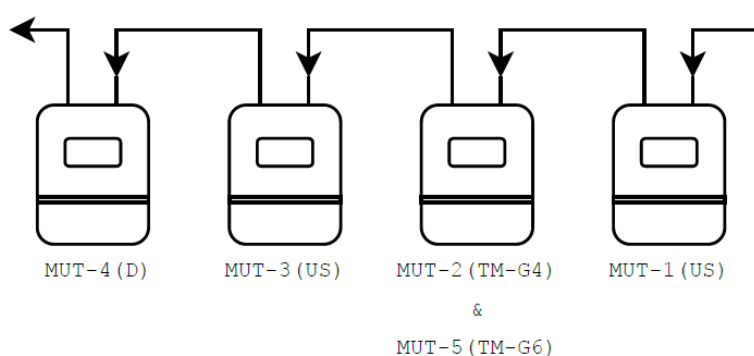


Figura 5 – Schema dei contatori in fase di verifica, con descrizione del posizionamento e della tecnologia di misurazione corrispondente.

7.2 Stratificazione della miscela nelle colonne montanti

Le prove di stabilità della miscela sono state progettate e successivamente condotte nella Sezione “Colonna Montante” dell’Impianto di Test (Figura 6), utilizzando una miscela con il 10% molare di idrogeno. Questa scelta è stata proposta dalla necessità di partire dalla percentuale massima disponibile, in modo da identificare tempestivamente eventuali fenomeni critici prima di estendere le analisi a concentrazioni inferiori. L’obiettivo principale dell’indagine è stato analizzare la formazione di un gradiente di concentrazione lungo la direzione verticale in condizioni statiche, valutando l’eventuale fenomeno di stratificazione del gas. Per garantire un isolamento del sistema durante la sperimentazione, la sezione è stata separata dal resto dell’impianto mediante le valvole a sfera BV7 e BV8, con monitoraggio continuo di pressione e temperatura. Le prove sono state proposte e strutturate su due scale temporali distinte:

- Analisi giornaliera ad alta risoluzione temporale (1 h), per lo studio delle dinamiche a breve termine della miscela
- Analisi settimanale con risoluzione temporale inferiore (12 h), per caratterizzare la stabilità del blending nel lungo periodo

Come nelle altre fasi sperimentali, è stato proposto di impiegare un sistema di monitoraggio meteorologico, posizionato in prossimità della colonna montante per acquisire i dati relativi a vento, temperatura e umidità. Particolare attenzione è stata posta alla parte superiore della colonna, più esposta agli agenti atmosferici e potenzialmente soggetta a fenomeni di interazione con l’ambiente esterno.

L’analisi della composizione del gas è stata eseguita mediante un gascromatografo (GC) on-site, fornito da un ente esterno e installato all’interno del manufatto in muratura che ospita la caldaia dell’Impianto di Test. Il sistema ha permesso di campionare il gas in tre punti distinti della colonna montante, situati rispettivamente al 5%, 50% e 95% della sua altezza. Il prelievo

dei campioni è stato realizzato attraverso micro-condotti in acciaio con diametro interno di 0.062", direttamente collegati alla colonna e interfacciati con un selettore di flusso che ha consentito la selezione automatica dei campioni senza intervento manuale. Il gascromatografo impiegato è dotato di due moduli di analisi paralleli, distinti per le caratteristiche delle colonne di separazione:

- Modulo A: setaccio molecolare di lunghezza 10 m, adatto alla separazione dei gas leggeri.
- Modulo B: colonna Q-Bond, costituita da un materiale polimerico trattato per un'analisi più selettiva e specifica della composizione gassosa.

Per l'iniezione dei campioni nel sistema di analisi è stato utilizzato un carrier gas puro e inerte, scelto in base alla compatibilità con i materiali della colonna. Il Modulo A ha impiegato argon puro al 99.99%, mentre il Modulo B ha utilizzato elio puro al 99.99%. Affinché il sistema garantisca un funzionamento stabile, la pressione di ingresso del carrier gas è stata mantenuta nel range 4.0 – 4.27 bar, mediante un regolatore di pressione a doppio salto, posizionato a valle delle bombole pressurizzate contenenti i gas di trasporto.

L'analisi finale include la valutazione della significatività statistica di un indice in grado di determinare se due grandezze mostrano un comportamento monotono, anche in presenza di outliers nei dati o di errori sistematici. A tale scopo, è stato proposto l'utilizzo del coefficiente di correlazione di Spearman, in quanto più significativo nel confronto tra grandezze che devono mantenere una certa monotonicità nella misura, evitando derive opposte, come potrebbe accadere in condizioni di stratificazione. Questo coefficiente, infatti, permette di analizzare la relazione tra le variabili in modo più robusto rispetto alle metriche basate su correlazioni lineari, risultando particolarmente adatto a sistemi in cui l'andamento relativo delle misure è più rilevante della loro proporzionalità esatta.

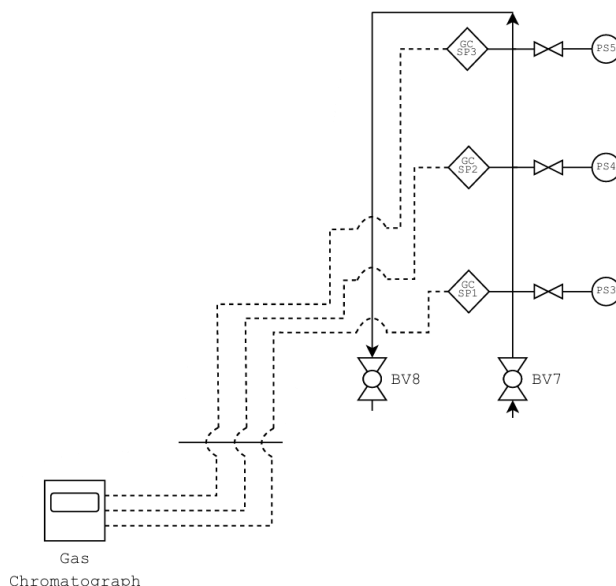


Figura 6 – Schema del setup sperimentale per lo studio della stratificazione del gas, con rappresentazione delle configurazioni impiegate.

7.3 Valutazione dell'efficacia dei sistemi di Rilevamento Fughe in presenza di miscele Idrogeno- Gas Naturale

L'infrastruttura sperimentale dedicata alla ricerca delle fughe (Figura 7) di gas è costituita da un circuito interrato in polietilene DN 50 mm, configurato per simulare dispersioni controllate di gas e valutare le prestazioni dei dispositivi di rilevamento. Il sistema termina con cinque valvole a sfera, installate all'interno di tombini forati e disposte lungo un tratto rettilineo con una distanza di 2 m l'una dall'altra. L'apertura selettiva di una delle valvole consente di generare una fuga controllata, riproducendo condizioni reali di dispersione. Per garantire un'adeguata caratterizzazione della prova, è stato inoltre installato un manometro a monte del circuito, con l'obiettivo di monitorare la pressione del gas rilasciato e valutare eventuali variazioni durante l'esperimento e a parità di specifiche geometriche, garantire la stessa portata volumetrica.

La simulazione della fuga proposta è stata realizzata mediante l'apertura della valvola centrale BV12, mantenendo chiuse le restanti quattro valvole di uscita (BV10, BV11, BV13, BV14). Una volta avviata la fuga di gas, l'apparato di misura è stato progressivamente collocato nelle diverse stazioni di rilevazione, registrando la concentrazione di metano (CH_4 in ppm) con una frequenza di 1 campionamento al secondo. Il protocollo di misurazione sviluppato ha previsto una sosta dello strumento per 2 minuti su ciascuna stazione di rilevamento, partendo dalla posizione a -4 m rispetto alla valvola aperta e procedendo lungo il tratto sperimentale fino alla posizione a +4 m, per una durata complessiva della prova pari a 10 minuti. Per l'acquisizione dei dati sono state impiegate due diverse tipologie di dispositivi di ricerca fughe, attualmente in uso nelle attività di monitoraggio della rete di distribuzione:

- Sistema con sonde fisse installato su automezzo, per un rilevamento dinamico su un'area estesa.
- Strumento pedonale con sonda manuale, per un'analisi dettagliata in punti specifici.

Considerando che l'esperimento è stato condotto in ambiente esterno, è stata proposta l'installazione di un sistema di monitoraggio meteorologico, posizionato in prossimità dell'area sperimentale. Questa configurazione ha permesso di acquisire in continuo le principali variabili atmosferiche, con particolare attenzione alla velocità e direzione del vento, fattori che possono influenzare in modo significativo la dispersione del gas e quindi l'affidabilità delle misurazioni.

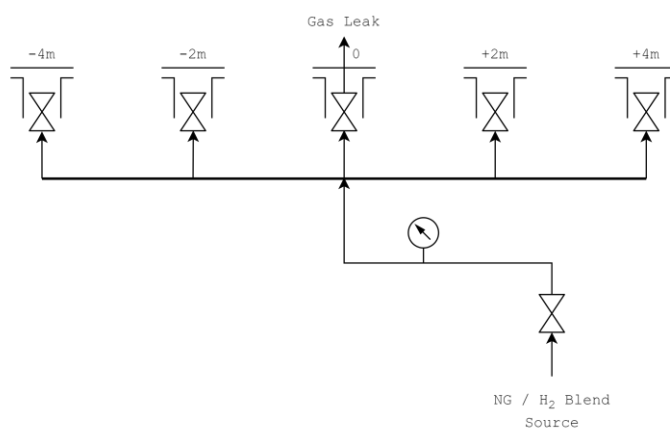


Figura 7 – Configurazione sperimentale per l'indagine sulle fughe di gas, con dettaglio delle apparecchiature di test.

7.4 Simulazioni di scenari paralleli e complementari

7.4.1 Valutazione impatto operativo di rete tramite simulazioni allo stato stazionario

È stata analizzata, tramite simulazioni stazionarie, una rete di distribuzione del gas naturale con profilo altimetrico variabile in provincia di Arezzo (AR), comprendente una tratta in media pressione (>3 bar-g) e 17 sottoreti in bassa pressione (<40 mbar-g), in condizioni operative di una giornata tipica estiva e una invernale. Le simulazioni, eseguite con NetWorkGas.solver (software sviluppato internamente a UNIFI-DIEF), hanno valutato l'impatto delle variazioni di carico sui parametri fluidodinamici. Dopo un'analisi preliminare della rete, è stata effettuata una modellazione numerica in regime stazionario (steady-state), implementando scenari operativi con miscele GN e H_2 dal 2% al 20%. Per ogni scenario, sono state definite condizioni al contorno specifiche, tra cui profili di domanda oraria, pressioni di ingresso alle cabine di riduzione e caratteristiche geometriche della rete.

7.4.2 Analisi tecno-economica produzione e miscelazione idrogeno in reti gas

È stato sviluppato un modello per dimensionare un impianto di produzione dell'idrogeno ottimizzato per minimizzare i costi e rispettare criteri di sostenibilità. Lo studio prevede l'impiego di un impianto fotovoltaico per la generazione dell'energia elettrica necessaria, un elettrolizzatore a membrana a scambio protonico (PEM) per la produzione dell'idrogeno, un sistema di compressione e un sistema di stoccaggio finalizzato a bilanciare le variazioni stagionali tra produzione e domanda (Figura 9). Nel blending dell'idrogeno all'interno della miscela di gas naturale, l'obiettivo è mantenere costante l'energia che si fornisce alle utenze finali. Tutti i componenti della value chain sono stati dimensionati in modo da minimizzare il costo di produzione dell'idrogeno.

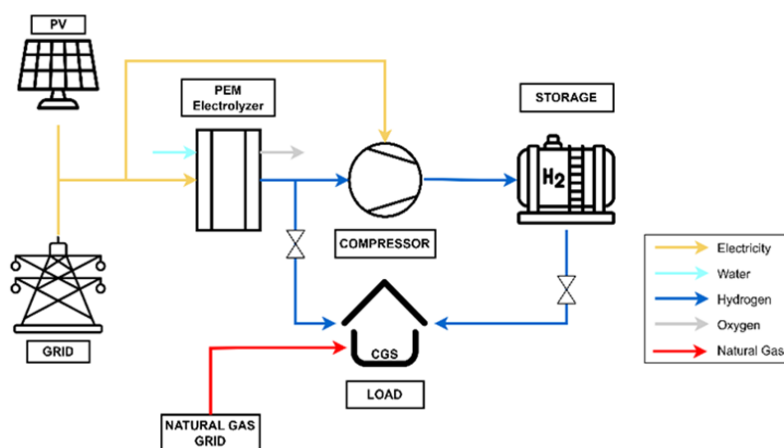


Figura 8: Schema dell'impianto per la produzione di idrogeno.

8 Pubblicazioni scientifiche

- Calabrese M, Ademollo A, Busi L, Meazzini M, Carcaschi C. Techno-economic assessment of Green Hydrogen Production for Blending in the Natural Gas Network. Journal of Physics Conference Series 2024;2893:012066. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2893/1/012066>.
- Francesconi, M., Guzzo, G., Neri, M., Marmorini, M., Carcaschi, C., 2024, Impact of hydrogen blending on a real-world gas distribution network with a non-uniform elevation profile, J. Phys.: Conf. Ser., vol. 2893, no. 1: p. 012067.

8.1 Eventi di disseminazione associati

Partecipazione al 79° Congresso Nazionale ATI "Dare Energia Al Futuro: Innovazione e Sviluppo Sostenibile per l'Industria, le Comunità e lo Sport" – Genova 4-6 Settembre 2024.