

# Ricerca di Sistema elettrico



Iniezione di idrogeno nelle reti di distribuzione del gas:  
progettazione e definizione della campagna di prove  
sperimentali (LA2.31)

C. Carcasci, M. Francesconi, N. Taddeucci



## Iniezione di idrogeno nelle reti di distribuzione del gas: progettazione e definizione della campagna di prove sperimentali

Iniezione di idrogeno nelle reti di distribuzione del gas: progettazione e definizione della campagna di prove sperimentali (R2.31-1)

Prof. C. Carcasci (Dipartimento di Ingegneria Industriale – Università degli Studi di Firenze),  
PhDs M. Francesconi (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: 1

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	Introduzione .....	5
2	Risultati sperimentali attesi .....	6
2.1	Prestazioni metrologiche dei contatori del gas(G4).....	6
2.2	Stratificazione della miscela nelle colonne montanti .....	6
2.3	Valutazione dell'efficacia dei sistemi di Rilevamento Fughe in presenza di miscela Idrogeno- Gas Naturale .....	6
3	Sintesi delle attività svolte .....	7
4	Definizione e progettazione della campagna sperimentale .....	8
4.1	Prestazioni metrologiche dei contatori gas in verifica .....	8
4.1.1	Strumenti di misura: Contatori in Verifica.....	9
4.2	Stratificazione della miscela nelle colonne montanti .....	10
4.3	Valutazione dell'efficacia dei sistemi di Rilevamento Fughe in presenza di miscela Idrogeno- Gas Naturale .....	12
5	Prodotti attesi e conclusioni .....	14
6	Analisi degli scostamenti su attività e risultati.....	15
6.1	Stratificazione della miscela nelle colonne montanti .....	15
6.2	Prestazioni metrologiche dei misuratori del gas in presenza di miscela idrogeno-gas Naturale.....	16
6.3	Valutazione dell'efficacia dei sistemi di Rilevamento Fughe in presenza di miscela Idrogeno- Gas Naturale .....	17

## Indice delle figure

Figura 1 – Schema del campo prove operativo CENTRIA S.r.l – Arezzo (AR).....	5
Figura 2 – Tipologie di regolazioni applicate alla caldaia.....	8
Figura 3 – Schema dei contatori in fase di verifica, con descrizione del posizionamento e della tecnologia di misurazione corrispondente.....	10
Figura 4 – Schema del setup sperimentale per lo studio della stratificazione del gas, con rappresentazione delle configurazioni impiegate. ....	12
Figura 5 – Configurazione sperimentale per l'indagine sulle fughe di gas, con dettaglio delle apparecchiature di test.....	13
Figura 6 – Variazione della temperatura (T°C) e delle pressioni (mbarg) interne alla colonna montante durante l'intero periodo di rilevamento dati.....	15
Figura 7 – (a): Andamento della portata volumetrica durante la settimana di rilevamento con solo gas naturale; (b) Errori medi relativi associati ai dati acquisiti.....	16
Figura 8 – (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.....	17

## Indice delle tabelle

Tabella 1 – Matrice delle prove sperimentali effettuate, suddivise per ciascuna campagna sperimentale e caratterizzate in base alle principali specifiche tecniche. ....	7
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---

## Nomenclatura

### Simboli

$\rho$	Densità
$E$	Errore
$Q$	Portata volumetrica

### Pedici

<i>MUT</i>	Del contatore
<i>diaphragm</i>	Del diaframma
<i>gas</i>	Del gas
<i>i</i>	i-esimo
<i>m</i>	Medio
<i>max</i>	Massimo
<i>min</i>	Minimo
<i>nom</i>	Nominale
<i>ref</i>	Riferimento
<i>rel</i>	Relativo

### Acronimi e abbreviazioni

BV	Ball Valve - Valvola a sfera
D	Membrana (Dhiapfram)
GN	Gas Naturale
H220	Gas Tecnico Altamente Infiammabile
IQR	Intervallo interquartile
M10	Miscela binaria 10%
M2	Miscela binaria 2%
MPE	Maximum Permissible Error - Errore Massimo Ammesso
MPE*	Errore Massimo Ammesso (riferimento portata media)
MUT	Meter Under Test - Contatore in verifica
TM	Massico Termico
US	Ultrasuoni

# 1 Introduzione

L'intervento di progetto e la linea di attività hanno previsto una campagna sperimentale finalizzata all'analisi dell'impatto dell'idrogeno (H<sub>2</sub>) in miscela con il gas naturale (GN) su componenti critici dell'infrastruttura di distribuzione gas naturale; in particolare nelle linee gas di servizio clienti. Le attività sperimentali sono state condotte presso il campo prove di CENTRIA S.r.l ad Arezzo (AR). Il sito di test è costituito da tre sezioni modulari e strumentate separatamente, progettate per simulare diversi scenari operativi e consentire un'analisi delle prestazioni dei sistemi di distribuzione gas esistenti (Figura 1). In questo contesto, il presente report si propone di descrivere la progettazione e la definizione della campagna di prove sperimentali, delineando le metodologie adottate e i parametri analizzati. L'attività sperimentale si è articolata in più fasi, con raccolta sistematica di dati e formulazione di analisi in tre sezioni tecnologiche principali:

- Sezione colonne montanti: Sono state utilizzate colonne alte 4 metri per valutare fenomeni di stratificazione e stabilità della miscela idrogeno/gas naturale. Questa analisi è risultata cruciale per comprendere come variazioni nella composizione della miscela possano influire sull'omogeneità del gas distribuito in condotte verticali, con implicazioni dirette sulla qualità del servizio e sulla sicurezza.
- Sezione contatori GN: È stata condotta un'analisi metrologica volta a valutare la deriva di accuratezza dei contatori commerciali progettati per il gas naturale, quando esposti a miscele contenenti idrogeno a concentrazioni variabili. Lo studio ha permesso di identificare potenziali criticità nei sistemi di misurazione, con impatti sia sul lato distributore sia su quello utente. L'analisi è stata condotta inizialmente in campo operativo e successivamente in laboratorio, con test pre e post esposizione alle miscele di GN+H<sub>2</sub>.
- Sezione rilevamento fughe: È stata effettuata una valutazione dell'efficacia dei dispositivi commerciali di rilevamento fughe in presenza di miscele di idrogeno e gas naturale. L'analisi ha riguardato la sensibilità e la capacità di individuare perdite in condizioni operative stazionarie.

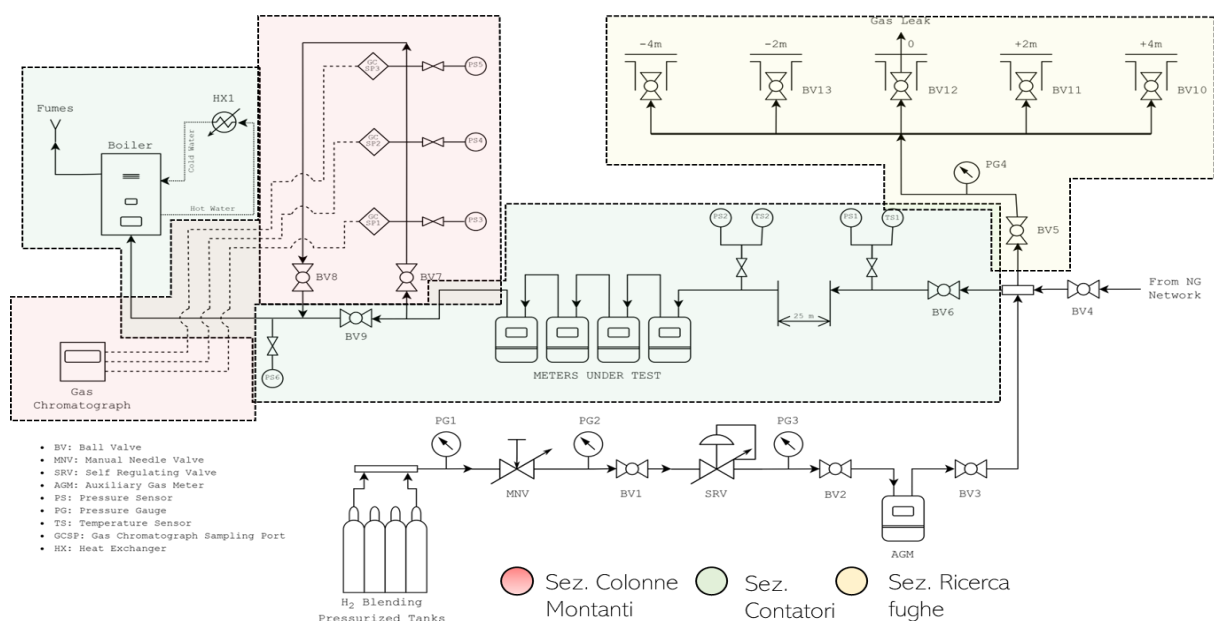


Figura 1 - Schema del campo prove operativo CENTRIA S.r.l - Arezzo (AR).

## 2 Risultati sperimentali attesi

Per definire i requisiti di misurazione, è opportuno sintetizzare gli obiettivi principali e i risultati attesi delle campagne sperimentali, chiarendo le variabili di interesse e le condizioni operative da considerare.

### 2.1 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<sub>2</sub>-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 [1], mentre nei contatori a ultrasuoni, l'aumento della velocità del suono potrebbe comprometterne l'accuratezza [2] [3]. Nei contatori a diaframma, la permeabilità delle membrane potrebbe interagire con l'idrogeno, alterandone la risposta metrologica [4]. I test in campo prove, condotti con miscele H<sub>2</sub>-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.

### 2.2 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. Lo stato dell'arte della letteratura si riduce ai seguenti articoli: [5][6][7][8][9] [10] [11]. 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.

### 2.3 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.

### 3 Sintesi delle attività svolte

Sono state definite le caratteristiche tecniche e le metodologie operative di tre distinte prove sperimentali, condotte presso il campo prove di CENTRIA S.r.l., finalizzate all'analisi del comportamento delle reti di distribuzione del gas naturale in presenza di miscele contenenti idrogeno. Per la sezione dedicata alle colonne montanti è stata realizzata una configurazione di prova comprendente una condotta verticale DN40 in acciaio, con altezza pari a 4 metri, dotata di tre punti di acquisizione strumentale per la misura di pressione, temperatura e composizione del gas. Il protocollo sperimentale proposto prevede una campagna giornaliera con risoluzione oraria e test di stabilità a cadenza settimanale, con acquisizioni ogni 12 ore. Nella sezione contatori sono stati installati e testati tre differenti tipologie di dispositivi: a ultrasuoni, termico-massici e a membrana. Tali strumenti sono stati sottoposti a flussi di miscele contenenti il 2% e 10% in volume di idrogeno, in condizioni operative che alternano il regime continuo al funzionamento ciclico di una caldaia. È stata inoltre definita una sequenza procedurale strutturata per la comparazione metrologica con prove di riferimento condotte in laboratorio. Infine, le prove relative alla sezione interrata, focalizzate sulla dispersione e la rilevazione di fughe, sono state eseguite su tratti di condotta posati nel terreno e alimentati con le medesime miscele. Le attività includono il monitoraggio in continuo della pressione e la rilevazione delle condizioni anemometriche, al fine di valutare l'influenza delle variabili ambientali sulla dinamica di dispersione.

La Tabella 1 riassume la matrice delle attività sperimentali, evidenziando il confronto tra le prove riuscite e quelle previste.

Tabella 1 – Matrice delle prove sperimentali effettuate, suddivise per ciascuna campagna sperimentale e caratterizzate in base alle principali specifiche tecniche.

	Contatori del Gas			Colonna montante		Fughe
	Domanda continua	Domanda intermittente	Test Pre/Post Esposizione prolungata**	Alta risoluzione temporale	Bassa risoluzione temporale	
GN	X	X	X	-	-	X
GN + 2% $H_2$	X	X	X			X
GN + 5% $H_2$						
GN + 10% $H_2$	X	X	X	X	X	X

\*\*Le seguenti prove sono state eseguite in gas Metano puro.

## 4 Definizione e progettazione della campagna sperimentale

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.

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,  $Er = \pm 2\%$  e massimo ammissibile  $\pm 10\%$ .
- 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,  $Er = \pm 0.1\%$

### 4.1 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 riportata in Figura 1, 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 3): 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.

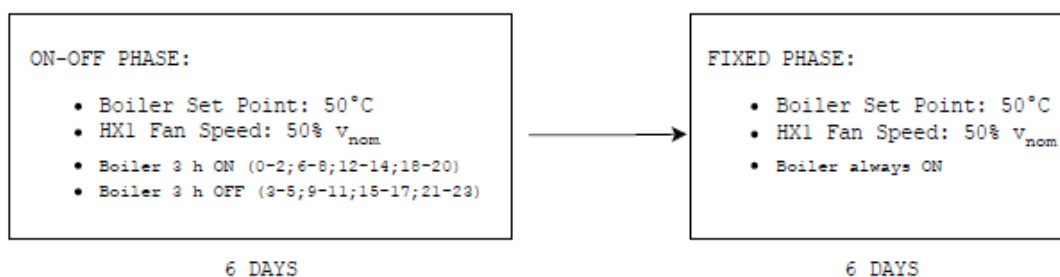


Figura 2 - Tipologie di regolazioni applicate alla caldaia.

In questa fase si definiscono come volumi flussati reali i quantitativi di gas transitati attraverso i misuratori alle condizioni operative effettive di pressione e temperatura. Gli errori relativi operativi rappresentano gli scostamenti percentuali tra la portata misurata e il valore di riferimento durante l'esercizio al campo prove. La deriva operativa è intesa come la variazione del segnale di misura dovuta a fenomeni di invecchiamento e stress funzionale durante il periodo di esposizione sul campo. La deriva metrologica, invece, è quantificata come la variazione della prestazione di misura rilevata tramite prove comparative pre e post esposizione condotte in ambiente controllato (prove di laboratorio). 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. Tutti i dati acquisiti si trovano nel report dedicato della stessa linea di attività: "R.2.31.4".

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 ( $E_{rel,m}$ ) su più misurazioni ( $n$ ) di portata dei contatori ( $Q_{MUT}$ ), permettendo di ottenere quattro valori di errore corrispondenti alle portate analizzate (da normative UNI EN-1359, UNI EN-14236 e UNI EN-17526):

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

Le condizioni sperimentali di laboratorio prevedono il flussaggio di volumi specifici (con doppia riferibilità: Master Meter G4-10 e campana gasometrica in gas) di gas ( $Q_{ref}$ ) per testare la risposta dei contatori in diverse condizioni operative. In particolare, sono stati considerati i seguenti valori di volume flussato: 120 L per  $Q_{max}$  ( $6 \text{ m}^3/\text{h}$ ), 60 L per  $0.4 \cdot Q_{max}$ , 18 L per  $0.1 \cdot Q_{max}$ , e 12 L per una portata  $Q_{min}$  ( $0.04 \text{ m}^3/\text{h}$ ). Tutte le prove in laboratorio sono state eseguite a 10 mbar di pressione di spinta.

#### 4.1.1 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 contatori G4 e G6 sono contatori volumetrici per gas, classificati in base alla loro portata nominale. Il G4 ha una portata tipica fino a circa  $6 \text{ m}^3/\text{h}$ , mentre il G6 arriva fino a  $10 \text{ m}^3/\text{h}$ ; entrambi sono

comunemente usati in ambito residenziale e commerciale leggero per la misura del gas naturale o di miscele.

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 4, 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  $\text{Sm}^3$  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  $\pm 0.5\%$ . I dettagli dell'analisi dei dati sperimentali sono riportati nella parte di report relativa alla linea di attività numero 2.31.4.

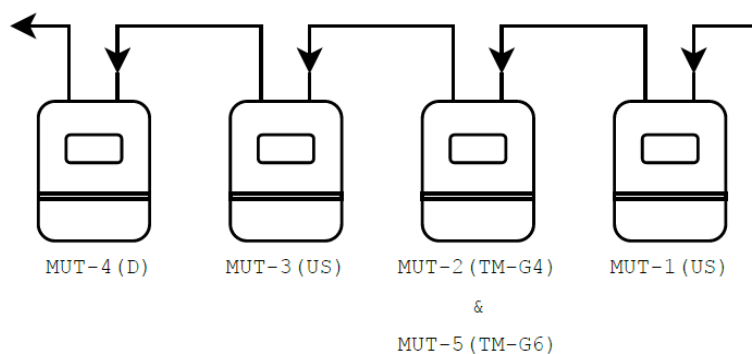


Figura 3 – Schema dei contatori in fase di verifica, con descrizione del posizionamento e della tecnologia di misurazione corrispondente.

## 4.2 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 1, in rosso), 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 (Pt1, Pt2, Pt3) 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 garantisse 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 più indici in grado di determinare se due grandezze mostrano un comportamento monotono, anche in presenza di outliers nei dati o di errori sistematici. Le correlazioni sono state eseguite tra i valori misurati dagli estremi di prelievo in Pt3 e Pt1. A tale scopo, è stato proposto l'utilizzo dei coefficienti di correlazione di Spearman e Grey Relational Grade (GRG) in quanto più significativi nel confronto tra grandezze che devono mantenere una certa monotonicità nella misura, evitando derive opposte, come potrebbe accadere in condizioni di stratificazione. Questi coefficienti, infatti, permettono 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. I dettagli dell'analisi dei dati sono riportati nella parte di report dedicato: "R 2.31.3".

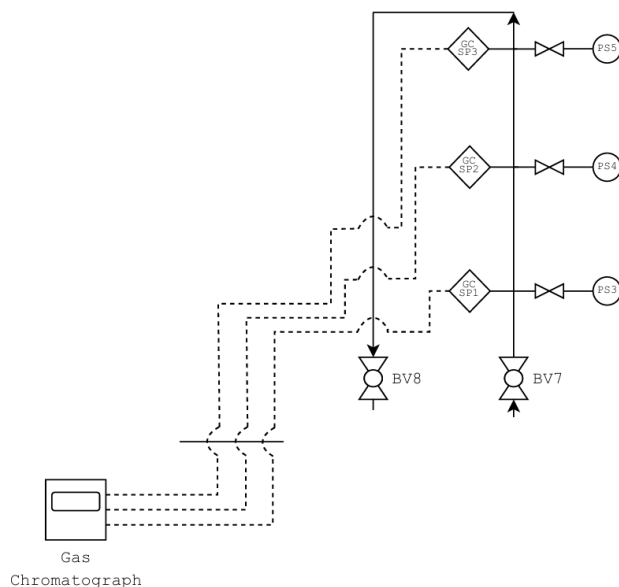


Figura 4 – Schema del setup sperimentale per lo studio della stratificazione del gas, con rappresentazione delle configurazioni impiegate.

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

L'infrastruttura sperimentale dedicata alla ricerca delle fughe (Figura 1, in giallo) 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). Il gas fluisce alla medesima altezza dello strumento di rilevazione, mantenuto a una pressione di riferimento controllata pari a 30 mbar. Considerata la geometria fissa del sistema, il controllo della pressione consente di garantire una portata costante durante ciascuna misurazione. 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 ( $\text{CH}_4$  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. I dettagli del set-up sperimentale e dell'analisi dei dati sperimentali sono riportati nella parte di report relativa alla linea di attività numero 2.31.4.

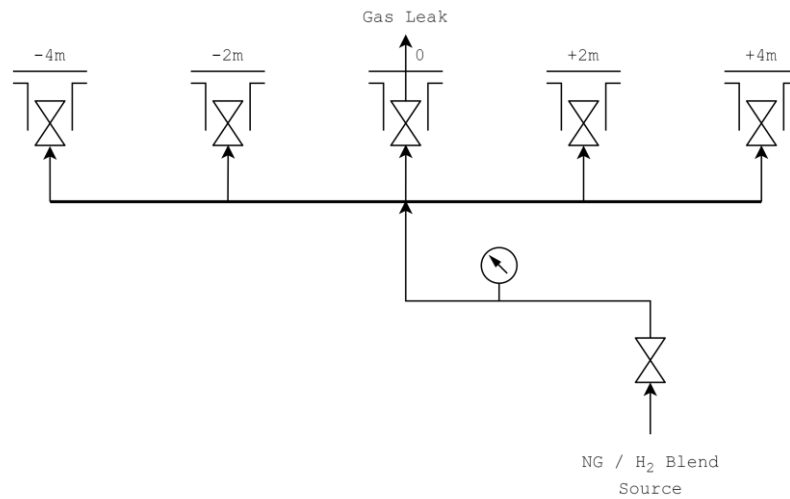


Figura 5 – Configurazione sperimentale per l'indagine sulle fughe di gas, con dettaglio delle apparecchiature di test.

## 5 Prodotti attesi e conclusioni

L'attività svolta ha permesso di sviluppare e testare una nuova procedura sperimentale concepita per valutare la stratificazione del gas all'interno della rete di distribuzione con livelli di affidabilità idonei a un'applicazione su scala industriale. L'obiettivo principale è stato quello di determinare se il fenomeno della stratificazione sia effettivamente rilevabile su una scala temporale settimanale e di analizzare le variazioni di comportamento in funzione di fattori esterni. A oggi, in letteratura scientifica, studi sperimentali simili sono stati condotti esclusivamente per configurazioni geometriche orizzontali, con particolare riferimento alla stabilità di miscele ad alto contenuto di idrogeno.

Un ulteriore risultato atteso riguarda l'analisi dell'invecchiamento dei contatori, condotta su più tecnologie di misura all'interno di un campo prova realistico, rappresentativo di una linea di servizio cittadina. Questo approccio sperimentale consente di confrontare il degrado dei contatori in condizioni operative reali e di valutare il loro comportamento nel tempo. Infine, un aspetto distintivo di questa attività è la possibilità di eseguire i test sia nel campo prove di CENTRIA con miscele in presenza di idrogeno, sia in laboratorio, utilizzando una campana gasometrica tarata in gas, anziché in aria.

Infine, per quanto riguarda la ricerca delle fughe, i risultati preliminari indicano un elevato potenziale di miglioramento nella fase di sviluppo, sebbene le prove sperimentali possano presentare alcune difficoltà nell'elaborazione dei dati. Ciò è dovuto all'elevata sensibilità dei sensori commerciali utilizzati, che richiedono un'accurata calibrazione e una gestione avanzata dell'analisi dei segnali.

In conclusione, questa campagna sperimentale si propone di contribuire alla comprensione del comportamento delle miscele gassose in rete, attraverso la raccolta di una matrice di prove che possa integrare le conoscenze attuali e offrire dati sperimentali utili per il settore industriale della distribuzione del gas.

## 6 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.

### 6.1 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 8). 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.

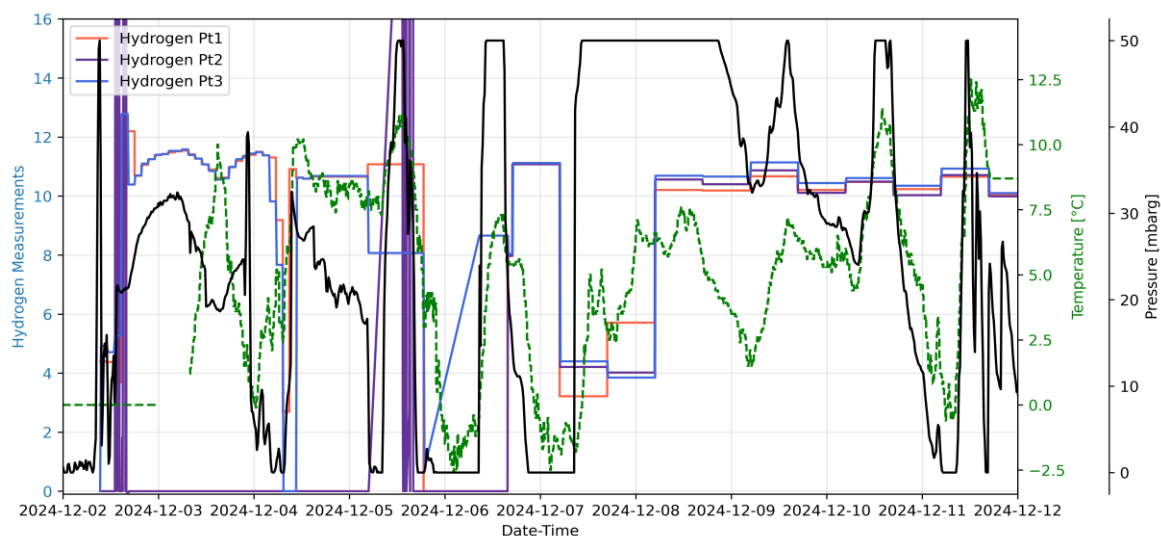


Figura 6 - Variazione della temperatura (T°C) e delle pressioni (mbarg) interne alla colonna montante durante l'intero periodo di rilevamento dati.

In ottica di miglioramento, si propone di spostare la fase di analisi in laboratorio, mediante prelievo con sacche in alluminio dedicate, riducendo l'influenza delle condizioni ambientali esterne e migliorando la qualità del dato. L'adozione di campioni con volumi maggiori e l'estensione della durata delle prove permetterebbero di rafforzare la significatività statistica e la risoluzione temporale dell'indagine. L'integrazione di sistemi automatizzati di campionamento potrebbe inoltre aumentare la ripetibilità e la stabilità del processo di acquisizione.

## 6.2 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 9b) 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.

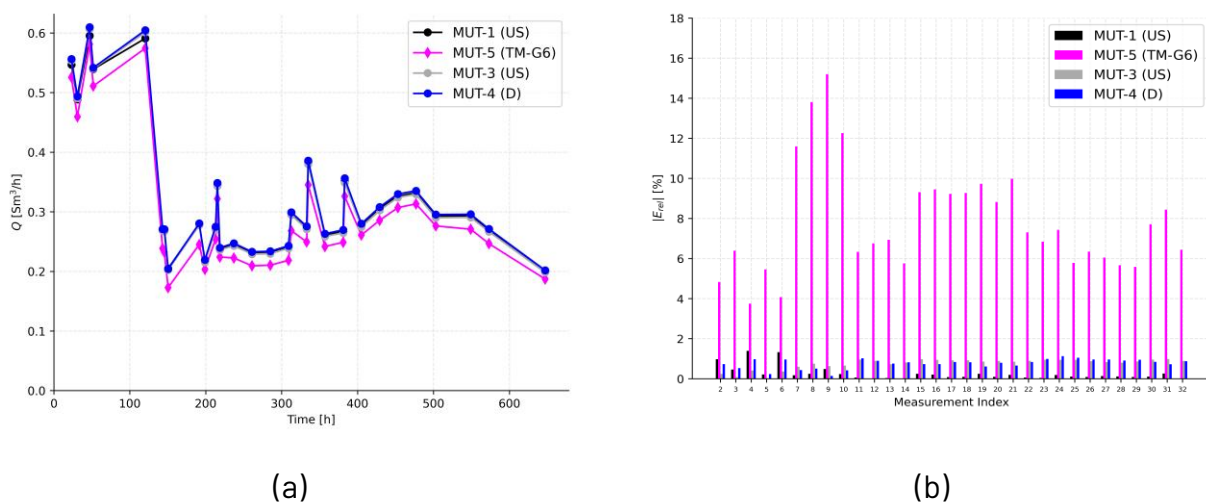


Figura 7 – (a): Andamento della portata volumetrica durante la settimana di rilevamento con solo gas naturale; (b) Errori medi relativi associati ai dati acquisiti.

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.

Per future attività sperimentali, si raccomanda l'impiego sistematico di un contatore master certificato, al fine di disporre di un riferimento indipendente e tracciabile per la validazione

metrologica. Inoltre, la selezione iniziale dei dispositivi dovrebbe includere una fase di pre-screening tecnico per verificare la coerenza tra classe metrologica e tipologia di impiego

### 6.3 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 sottostante è riportato un esempio di rilevamento nelle varie stazioni fuganti, mostrando i valori assoluti delle ppm di CH<sub>4</sub> per le prove con gas naturale e con 10% di H<sub>2</sub>. Gli ordini di grandezza risultano paragonabili, e le fluttuazioni osservate non sono significative. Inoltre, nel report 2.31.4 si evidenzia la scarsa correlazione ottenibile a causa del numero limitato di dati e delle basse variazioni del vento.

In prospettiva, si suggerisce di estendere la campagna sperimentale includendo un maggior numero di cicli di misura in condizioni atmosferiche variabili, al fine di aumentare la robustezza statistica delle correlazioni. Ulteriori sviluppi potrebbero riguardare l'adozione di sensori specificatamente tarati per miscele H<sub>2</sub>-GN.

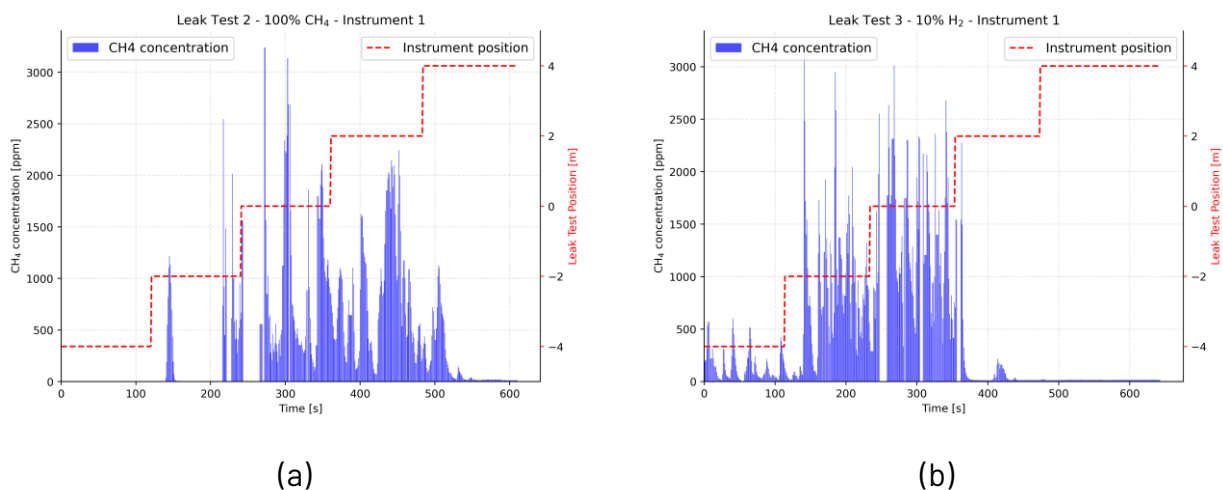


Figura 8 – (a) Esempio di acquisizione dati della prova di fuga con miscela priva di idrogeno (b) Esempio di acquisizione dati della prova di fuga con miscela contenente il 10% di idrogeno in volume.

## Bibliografia

- [1] G. Ficco, M. Dell'Isola, G. Cortellessa, G. Grossi, P. Kulaga, e J. Jaworski, «Effect of hydrogen blending on the accuracy of smart gas meters», *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 62, pp. 892–903, apr. 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.03.101.
- [2] V. K. Vidyarthi, P. Sagar, K. S. Harsha, S. Tripathi, N. Naik, e P. Munshi, «Ultrasonic Transit-time Flowmeters for Pipes: A Short Review».
- [3] G. Ficco *et al.*, «Reliability of Domestic Gas Flow Sensors with Hydrogen Admixtures», *Sensors*, vol. 24, fasc. 5, p. 1455, feb. 2024, doi: 10.3390/s24051455.
- [4] J. Jaworski, P. Kułaga, e T. Blacharski, «Study of the Effect of Addition of Hydrogen to Natural Gas on Diaphragm Gas Meters», *Energies*, vol. 13, fasc. 11, p. 3006, giu. 2020, doi: 10.3390/en13113006.
- [5] S. Peng *et al.*, «Equilibrium distribution and diffusion of mixed hydrogen-methane gas in gravity field».
- [6] P. Kileti, B. Barkwill, V. Spiteri, C. Cavanagh, e D. Mahajan, «Evaluation of Hydrogen Blend Stability in Low-Pressure Gas Distribution», *Hydrogen*, vol. 4, fasc. 2, pp. 210–225, apr. 2023, doi: 10.3390/hydrogen4020015.
- [7] A. Marangon e M. N. Carcassi, «Hydrogen-methane mixtures: Dispersion and stratification studies», *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 39, fasc. 11, pp. 6160–6168, apr. 2014, doi: 10.1016/j.ijhydene.2013.10.159.
- [8] C. Liu *et al.*, «Study on the stratification of the blended gas in the pipeline with hydrogen into natural gas», *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 48, fasc. 13, pp. 5186–5196, feb. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.11.074.
- [9] V. V. Azatyan, V. A. Petukhov, V. M. Prokopenko, e T. R. Timerbulatov, «Possible Gravitational Stratification of Components in Mixtures of Reaction Gases», *Russ. J. Phys. Chem. A*, vol. 93, fasc. 5, pp. 986–987, mag. 2019, doi: 10.1134/S0036024419050030.
- [10] H. Wu e H. Zhao, «Validation of hydrogen gas stratification and mixing models», *Ann. Nucl. Energy*, vol. 85, pp. 137–144, nov. 2015, doi: 10.1016/j.anucene.2015.05.003.
- [11] I. Eames, M. Austin, e A. Wojcik, «Injection of gaseous hydrogen into a natural gas pipeline», *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 47, fasc. 61, pp. 25745–25754, lug. 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.05.300.