

Ricerca di Sistema elettrico



Studio della compatibilità delle utenze per l'uso di diverse miscele di idrogeno-metano allacciate alla rete gas (LA2.30)

Giorgio Ficco, Fausto Arpino, Gino Cortellessa,
Gianfranco Dell'Agli, Giorgio Grossi, Marco Dell'Isola



Studio della compatibilità delle utenze per l'uso di diverse miscele di idrogeno-metano allacciate alla rete gas

G. Ficco, F. Arpino, G. Cortellessa, G. Dell'Agli, G. Grossi, M. Dell'Isola, UCAS

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: LA2.30

Responsabile del Progetto: Luca TURCHETTI, ENEA

Responsabile del Work Package: Luca TURCHETTI, ENEA

Responsabile Linea di Attività: Giorgio FICCO, Università di Cassino e del Lazio Meridionale

Mese inizio previsto: 1 (gennaio 2022)

Mese inizio effettivo: 1 (gennaio 2022)

Mese fine previsto: 36 (dicembre 2024)

Mese fine effettivo: 36 (dicembre 2024)

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione tra ENEA e Dipartimento di Ingegneria Civile e Meccanica (DICEM) dell'Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale per una attività di ricerca dal titolo: "Studio della compatibilità delle utenze per l'uso di diverse miscele di idrogeno-metano allacciate alla rete gas"

Si ringraziano per la collaborazione alle attività svolte le Società PIETRO Fiorentini Spa di Arcugnano (VI), ICI Caldaie Spa di Campagnola (VR), 2I Rete Gas di Milano, Oil & Gas Institute di Cracovia PL

Indice

| | | |
|-----|--|----|
| 1 | Risultati attesi | 4 |
| 2 | Risultati ottenuti..... | 5 |
| 2.1 | Fase 1..... | 5 |
| 2.2 | Fase 2 | 6 |
| 2.3 | Fase 3 | 8 |
| 3 | Prodotti attesi | 10 |
| 4 | Prodotti sviluppati | 11 |
| 5 | Analisi degli scostamenti su attività e risultati..... | 12 |
| 6 | Sintesi delle attività svolte | 13 |
| 7 | Dettaglio delle attività svolte..... | 14 |
| 7.1 | Fase 1..... | 14 |
| 7.2 | Fase 2 | 15 |
| 7.3 | Fase 3 | 16 |
| 8 | Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte..... | 19 |
| 9 | Pubblicazioni scientifiche..... | 20 |
| 10 | Eventi di disseminazione | 21 |

Indice delle figure

| | |
|---|----|
| Figura 1: Andamento degli errori contatori termo-massici nuovi: a) sensore tradizionale; ii) "H2 ready" | 5 |
| Figura 2 – a) temperatura di fiamma al variare di H ₂ , b) velocità di fiamma al variare di H ₂ | 6 |
| Figura 3 – Confronto dei dati sperimentali e calcolati: a) CO ₂ , b) NO | 7 |
| Figura 4 –Concentrazione H2 a 40 mbar e 30 °C: a) blending 5%; b) blending 23%..... | 8 |
| Figura 4: a) Risultati per bombole certificate, b) Risultati per gas di rete | 9 |
| Figura 6 – Esempio di derivazione di utenza | 17 |
| Figura 7 - a) layout di prova per bombole certificate, b) Hydrogen Innovation Lab di Pietro Fiorentini..... | 18 |

Indice delle tabelle

| | |
|--|----|
| Tabella 1 – Transitorio di ebollizione di 1 litro di acqua con diverse miscele di combustibile | 7 |
| Tabella 2 – Principali caratteristiche dei gas di prova (valori a $t=15^{\circ}\text{C}$ e $p=1.01325\text{ bar}$)..... | 14 |

1 Risultati attesi

Le attività sviluppate nell'ambito della LA 2.30 hanno avuto l'obiettivo generale di valutare la compatibilità delle utenze per l'uso di diverse miscele di idrogeno-metano allacciate alla rete gas. In particolare, gli effetti dell'iniezione di idrogeno nel gas naturale sono stati valutati: i) sugli elementi della catena di misura, ii) sugli usi finali (combustione e produzione di energia termica), iii) sull'efficacia dei sistemi di odorizzazione utilizzati nelle infrastrutture della rete.

Si riportano di seguito, nella forma di elenco puntato sintetico, i risultati attesi dalle attività della LA4.4, distinti per singola fase:

- Fase 1:** analisi sperimentale delle prestazioni di misuratori appartenenti alle principali tipologie presenti nelle reti di trasporto e/o distribuzione del gas naturale (e.g. misuratori a membrana, termo-massici, ad ultrasuoni, etc.), per quanto possibile in applicazione delle corrispondenti norme tecniche di riferimento per l'omologazione e per la verifica in laboratorio ed in campo;
- Fase 2:** analisi teorica e sperimentale su alcune utenze significative, civili e/o industriali (e.g., caldaie e/o bruciatori) dell'efficienza del processo di combustione investigando parametri quali ad esempio: i) la produzione di energia termica, ii) la sicurezza del processo di combustione (e.g., tenuta dei componenti, temperatura di fiamma, stabilità della fiamma, velocità di fiamma, etc.), iii) l'analisi dei fumi (e.g., temperatura dei fumi, presenza di CO, NOx, etc.);
- Fase 3:** i) analisi teorica mediante simulazione numerica della concentrazione dell'odorizzante in un tratto limitato di rete significativo in termini di estensione e di numero di utenze servite; ii) analisi sperimentale delle prestazioni metrologiche dei sistemi di misura della concentrazione di odorizzante.

2 Risultati ottenuti

Di seguito si riporta una sintesi dei principali risultati ottenuti nell'ambito del progetto, descritti per esteso nel deliverable "LA 2.30 Studio della compatibilità delle utenze per l'uso di diverse miscele di idrogeno-metano allacciate alla rete gas" (Report "esteso") richiamato ai successivi §3 e §4.

2.1 Fase 1

I risultati ottenuti mostrano che l'uso di una miscela di gas naturale ed idrogeno fino al 23% non influisce in modo significativo sulla accuratezza dei misuratori di gas a membrana e a ultrasuoni (sia nuovi di fabbrica che rimossi dalla rete), essendo gli errori misurati ben entro i limiti a tutte le portate di prova e con tutte le miscele di gas usate. Si segnala unicamente che la sottostima del valore a Q_{min} aumenta all'aumentare del contenuto di idrogeno, probabilmente a causa dell'elevata volatilità dell'idrogeno stesso. L'affidabilità dei misuratori di gas termo-massici di prima generazione è, invece, dimostrata solo con contenuto di idrogeno inferiore al 2% vol, che è l'attuale limite ammesso nella rete nazionale. Per contenuti di idrogeno più elevati sono stati riscontrati errori molto grandi e il superamento dei limiti ammessi (Figura 1). Inoltre, l'errore aumenta all'aumentare del contenuto di H_2 nella miscela. Di contro, i misuratori di gas termo-massici di II generazione cosiddetti "hydrogen ready", capaci cioè di compensare le diverse proprietà della miscela H_2NG rispetto al NG, presentano accuratezza nei limiti ammessi. Tuttavia, per i contatori termo-massici sia di I che di II generazione, sono stati riscontrati errori medi pesati WME sempre positivi e la relazione gas-aria (ovvero la differenza tra errori nel gas e nell'aria) è risultata positiva a tutte le portate, con errori nel gas sempre superiori a quelli nell'aria.

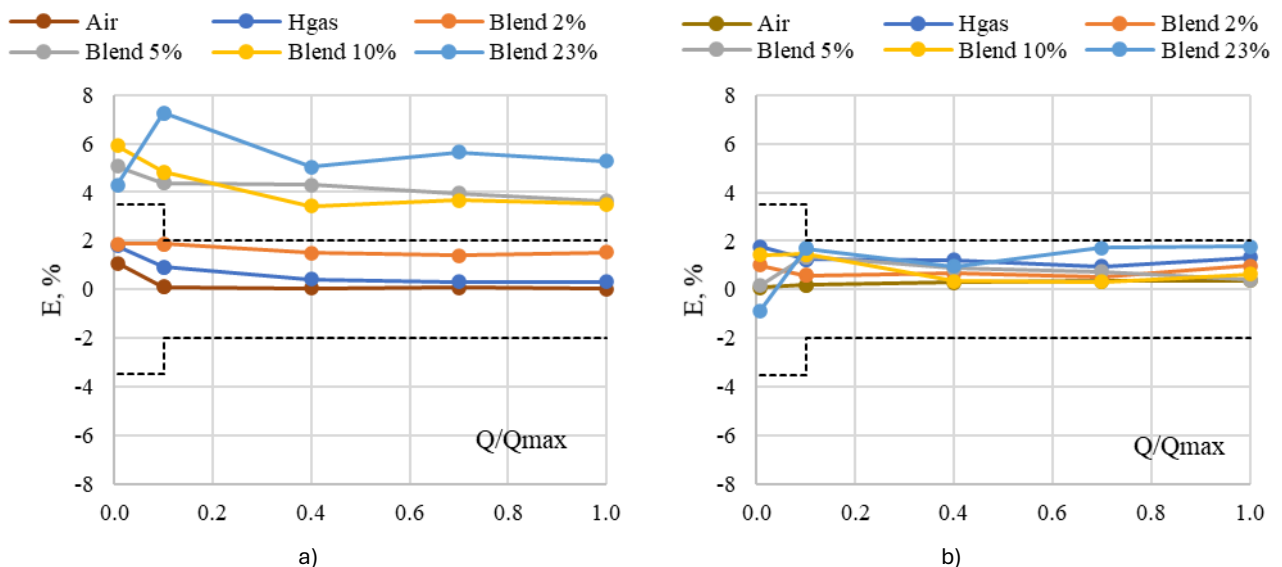


Figura 1: Andamento degli errori contatori termo-massici nuovi: a) sensore tradizionale; ii) "H₂ ready"

2.2 Fase 2

L'iniezione di H_2 nel metano (CH_4) fino al 35% influenza molto poco la temperatura di fiamma T_f (Figura 2a) diversamente dal rapporto di equivalenza ϕ . Di contro, la velocità laminare di fiamma S_L (Figura 2b) aumenta progressivamente con l'aumento di H_2 , mantenendo la stessa dipendenza da ϕ . Il potere calorifico inferiore (per unità di volume) invece diminuisce progressivamente con H_2 risultando inferiore del 24% con $H_2 = 35\%$, come pure si riduce la densità della miscela reagente. Considerando globalmente questi parametri si riscontra che l'interscambiabilità tra miscele CH_4-H_2 e gas naturale è garantita fino a circa il 23% di H_2 (sulla base dell'Indice di Wobbe). Di contro, il limitato aumento di S_L fino al 35% di H_2 garantisce che il regime di combustione è dominato dal CH_4 .

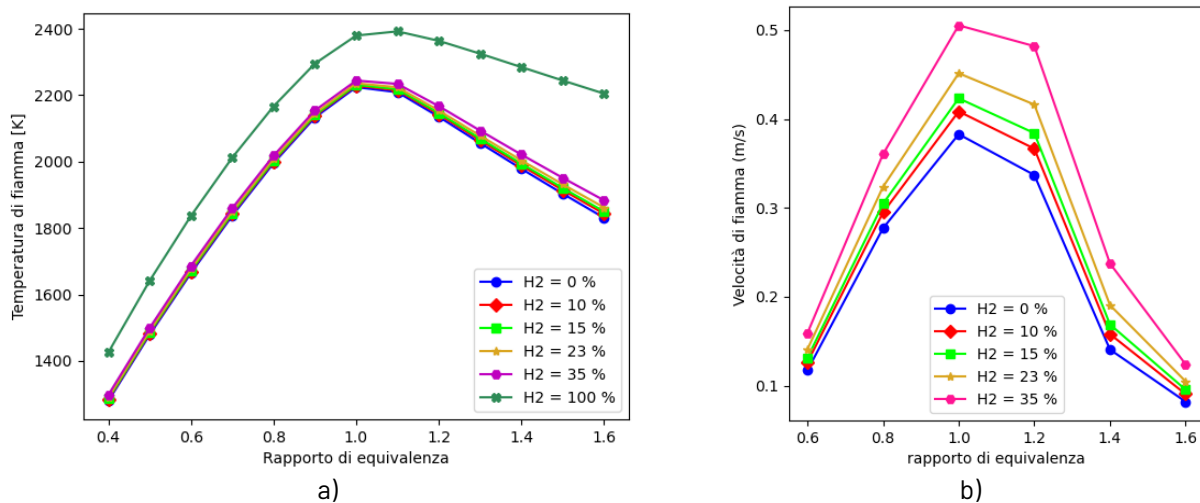


Figura 2 – a) temperatura di fiamma al variare di H_2 , b) velocità di fiamma al variare di H_2

Dall'analisi dei risultati sperimentali delle prove effettuate presso il Laboratorio di ICI Caldaie con gas naturale, metano e miscela CH_4-H_2 con H_2 23% e 35% è stato riscontrato quanto segue:

- in nessun caso è presente CO nei fumi;
- sono presenti modeste quantità di NO_2 ;
- NO è presente in misura variabile, da pochi ppm (prove 12 e 13) fino a oltre 50 ppm (prove 5, 6 e 9);
- non si evidenziano tendenze particolari rispetto alla concentrazione di H_2 nel gas;
- a valle dello scambiatore di calore, la temperatura dei fumi freddi varia tra $60^\circ C$ e $70^\circ C$ nelle prove ad alta potenza termica e tra $50^\circ C$ e $60^\circ C$ in quelle a bassa potenza (in linea con il fatto che la portata di acqua di raffreddamento è stata tenuta costante);
- il rendimento di combustione, determinato in base alla Norma UNI EN 297 è pressoché costante nelle diverse prove e compreso tra 98 e 99 %.

In Figura 3a e Figura 3b si riporta il confronto della concentrazione di CO_2 e NO misurate in una delle prove sperimentali effettuate e quelli calcolati dal modello. Dall'analisi dei risultati si riscontra che il modello sviluppato predice ottimamente la concentrazione di CO_2 (e anche di O_2 e CO) misurata sperimentalmente. Anche la stima del parametro NO è in generale molto buona, ad esclusione delle prime misure effettuate, probabilmente a causa dell'apparato sperimentale non ancora a regime. In conclusione, nel range di H_2 e ϕ studiato, i parametri della combustione sono poco influenzati dall'iniezione di H_2 , la emissione di CO_2 è ridotta, mentre le emissioni di

NO sono influenzate dalla temperatura di fiamma T_f (ossia da ϕ) e molto poco dalla concentrazione di H_2 .

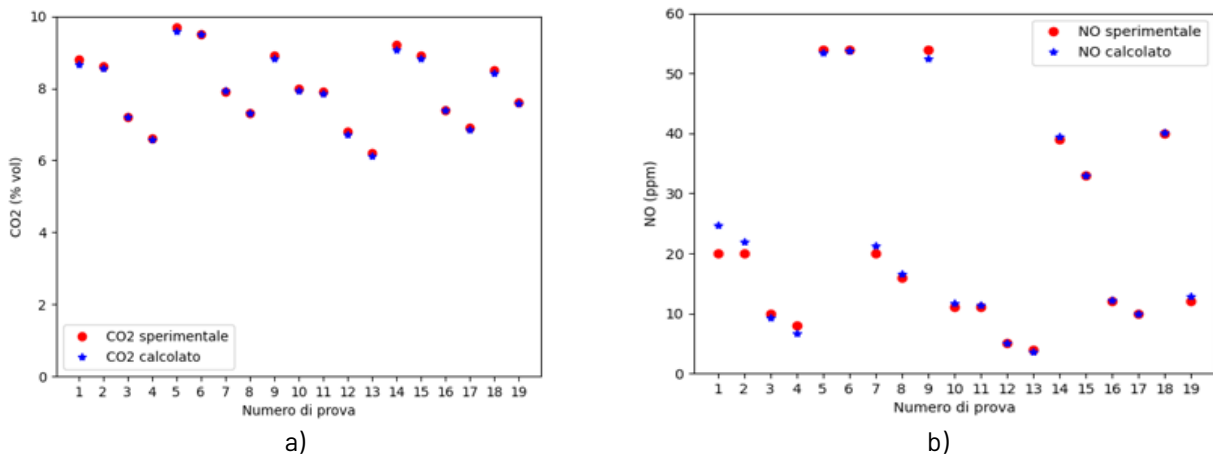


Figura 3 – Confronto dei dati sperimentali e calcolati: a) CO_2 , b) NO

Dal punto di vista della produzione di energia termica di un impianto di riscaldamento e del relativo comfort termico, l'utilizzo di un mix di metano e idrogeno al 23% non altera significativamente comfort e consumi rispetto al metano puro e consente una significativa riduzione dell'impronta ambientale in termini di CO_2 emessa (mediamente circa pari al 10%). Tuttavia, con idrogeno al 100% emergono diverse criticità, ad esempio: riscaldamento più lento, maggiori oscillazioni della temperatura, ridotta potenza termica e necessità di modifiche tecniche alla caldaia. Per migliorare le prestazioni, si può aumentare la potenza nominale della caldaia, ottimizzare la regolazione della potenza e migliorare l'efficienza dello scambio termico.

Analogamente, l'impatto dell'iniezione di idrogeno nel metano sull'uso cottura appare limitato (vedi Tabella 1), con un aumento dei tempi necessari per raggiungere la temperatura di ebollizione di un litro di acqua di circa 30 s e riduzione della CO_2 emessa del 9%. Di contro, nel caso di utilizzo di solo idrogeno il tempo necessario per raggiungere l'ebollizione diventa pari a circa tre volte quello con utilizzo di metano, rendendo di fatto necessarie alcune modifiche progettuali (e.g., ugelli, variazione della portata e/o della potenza del fornello).

Tabella 1 – Transitorio di ebollizione di 1 litro di acqua con diverse miscele di combustibile

| Parametro | CH_4 | Blend 23% | H_2 |
|--|---------|------------|-----------|
| Potere calorifico superiore, MJ/kg | 55.59 | 75.51 | 142.19 |
| Potere calorifico superiore, MJ/m ³ | 37.80 | 31.89 | 12.09 |
| Densità, kg/m ³ | 0.680 | 0.543 | 0.085 |
| Potenza termica del fornello, W | 2000.00 | 1687.08 | 639.46 |
| Tempo necessario per l'ebollizione, s | 189 | 223 | 589 |
| Variazione rispetto al metano, % | - | 18.0 | 212 |
| Consumo di metano, litri | 17.1 | 14.2 | - |
| Consumo di idrogeno, litri | - | 4.2 | 53.5 |
| CO_2 emessa (g) | 33.4 | 30.3 (-9%) | 0 (-100%) |

2.3 Fase 3

Relativamente all'analisi degli effetti della stratificazione, in Figura 4 si riporta l'andamento della concentrazione di H₂ nella miscela in funzione della quota e del tempo in un piccolo condominio con tre appartamenti, in regime estivo e con assenza di prelievi, alimentato con miscela metano-idrogeno con concentrazione iniziale imposta del 5% e del 23%.

Dall'analisi dei risultati si riscontra che la concentrazione di idrogeno nella miscela varia in maniera significativa in assenza di prelievi per periodi prolungati. In particolare, trascorse 72 ore si può ritenere che ai piani più alti (e.g., un secondo piano) siano ovunque riscontrabili concentrazioni di idrogeno superiori del 50% rispetto alla concentrazione alla base della colonna montante. Si riscontra inoltre che l'aumento della temperatura del gas tende ad attenuare l'effetto di stratificazione, anche in maniera significativa (e.g., ad H=9 m e blending iniziale imposto al 23% si riscontra una concentrazione di idrogeno pari a 33.7% e 35.5% alle temperature di 5 °C e 30 °C, rispettivamente). Relativamente all'effetto della pressione, si rileva un aumento molto contenuto della stratificazione all'aumentare della pressione relativa da 20 a 40 mbar con blending iniziale imposto pari a 5% e 23%, soprattutto alle basse temperature. Questa condizione, tuttavia, è valida alle condizioni della distribuzione (i.e., pressioni relative nell'ordine di 20-40 mbar), mentre per le reti di trasporto (i.e., con pressioni fino a 60-70 bar) l'effetto sulla stratificazione è sicuramente significativo, dal momento che gli elementi più leggeri della miscela (e.g., l'idrogeno) sono spinti verso le parti più alte della tubazione.

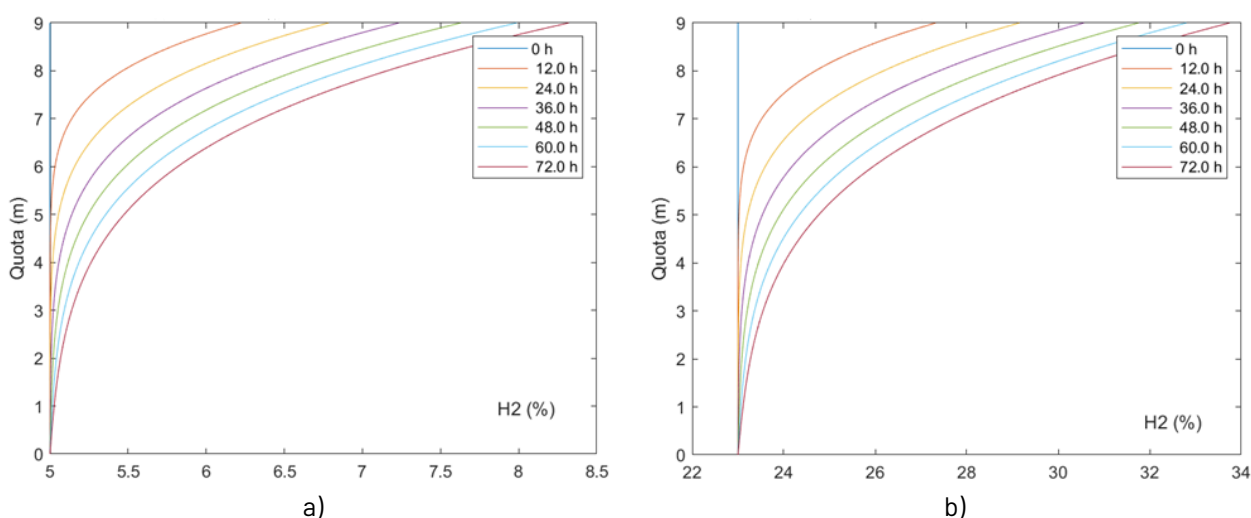


Figura 4 -Concentrazione H₂ a 40 mbar e 30 °C: a) blending 5%; b) blending 23%

Relativamente agli effetti dell'iniezione di idrogeno nel metano sui sistemi di misura dell'odorizzante, i test di calibrazione iniziale su bombole certificate con metano al 100% hanno mostrato errori misurati sia per THT che per TBM entro $\pm 0,1\%$, confermando l'elevata accuratezza delle misurazioni con gascromatografo (GC) di classe 0,5. Per i test su THT con miscela CH₄-H₂ e idrogeno al 20% è stata riscontrata la tendenza a sovrastimare la concentrazione di odorizzante sia a media ($E_{0\%}=2,3\%$) che ad alta concentrazione ($E_{0\%}=1,2\%$), mentre su TBM non sono stati osservati problemi significativi a nessuna delle concentrazioni di prova, così come per THT a basse concentrazioni. Infine, i test con idrogeno al 100% hanno evidenziato tutti errori positivi, ma generalmente entro 0,6%, ad eccezione di TBM a bassa

concentrazione per il quale è stato osservato un errore di $E_{0\%}=-3,4\%$. Nel complesso, gli errori riscontrati sono coerenti con le specifiche della classe 0,5 del GC, ad eccezione di TBM a bassa concentrazione. Inoltre, gli errori normalizzati (E_n) sono molto bassi, variando da 0,3 per TBM a 0,4 per THT, a dimostrazione dell'elevata affidabilità della misura della concentrazione di odorizzante anche con miscele di idrogeno o idrogeno puro. Il tempo di ritenzione (t_R), che è il tempo tra l'iniezione del campione e il picco massimo, è rimasto pressoché invariato per TBM (variazione entro lo 0,02%), mentre per THT è diminuito leggermente (variazione entro lo 0,64%) all'aumentare del contenuto di idrogeno. Ciò suggerisce di effettuare una calibrazione del GC quando si lavora con miscele H2NG.

I risultati dei test sul gas naturale dalla rete di distribuzione hanno confermato la tendenza a sovrastimare la concentrazione di odorizzante sia nelle concentrazioni al 5% ($E_{0\%}=3,2\%$) che al 20% di idrogeno ($E_{0\%}=2,0\%$). Questa sovrastima è coerente con i dati della bombola certificata con miscela di idrogeno al 20%, dimostrando l'affidabilità della metodologia utilizzata. È opportuno sottolineare che la sovrastima della concentrazione di odorizzante può comportare potenziali rischi, come l'inefficace rilevamento delle perdite o costi non necessari dovuti al mantenimento di livelli di odorizzante superiori a quelli richiesti. Questi risultati evidenziano l'importanza di una calibrazione accurata e di un monitoraggio continuo delle strategie di iniezione di odorizzante nei sistemi che utilizzano gas naturale arricchito di idrogeno.

I risultati ottenuti, nel complesso, dimostrano l'elevata affidabilità della misura dell'odorizzante, con problemi minori correlati alla concentrazione di THT quando è presente idrogeno e la necessità di una calibrazione del tempo di ritenzione quando si analizzano miscele di gas contenenti idrogeno. Nella Figura 5 sono stati riportati i risultati dei test in termini di box plot dell'errore relativo misurato.

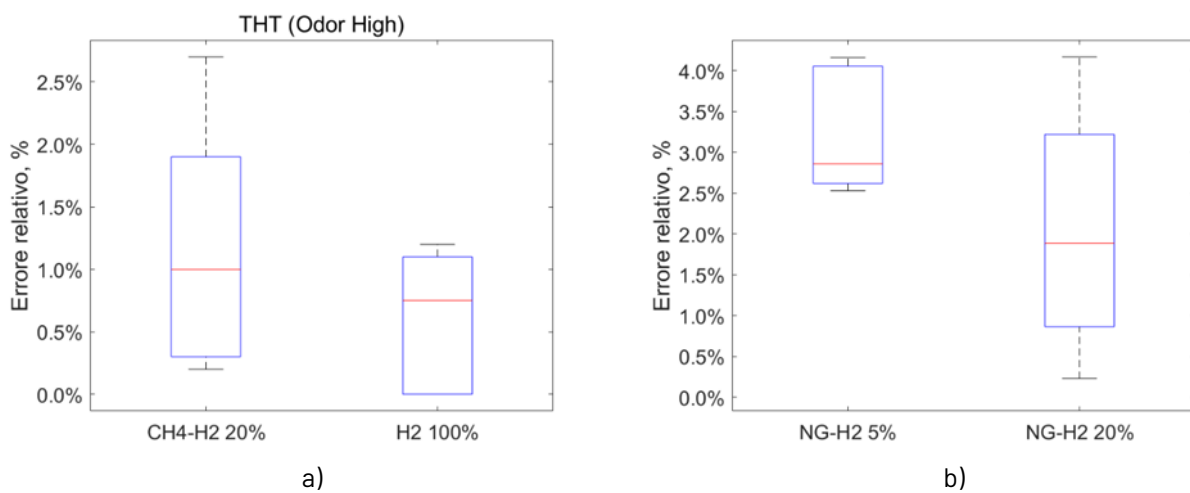


Figura 5: a) Risultati per bombole certificate, b) Risultati per gas di rete

3 Prodotti attesi

Si elencano di seguito i prodotti previsti per la LA 2.30, come da capitolato:

- Rapporto tecnico R2.30-1: Studio della compatibilità delle utenze per l'uso di diverse miscele di idrogeno-metano allacciate alla rete gas.

4 Prodotti sviluppati

Si elencano di seguito i prodotti sviluppati e resi accessibili per la LA 2.30, come da capitolato:

- Report esteso di dettaglio intitolato “Studio della compatibilità delle utenze per l’uso di diverse miscele di idrogeno-metano allacciate alla rete gas”, contenente la descrizione delle attività condotte nella LA 2.30 e dei risultati ottenuti e disponibile al seguente link:

<https://drive.google.com/file/d/1K-qw7NwRoHQq3q6QzeVzNG84GN4XLyl/view>.

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Non sono stati riscontrati scostamenti tecnici/economici rilevanti rispetto al capitolato della presente LA 2.30

6 Sintesi delle attività svolte

Di seguito si riporta la sintesi delle attività svolte nella LA4.4:

- nella **Fase 1** è stata realizzata una campagna sperimentale finalizzata a valutare gli effetti dell'iniezione di H_2 sull'accuratezza di contatori di gas di diverso principio di misura (a membrana, ultrasuoni e termo-massico) classe G4 sia nuovi che rimossi dalla rete;
- nella **Fase 2** è stato sviluppato un modello numerico per simulare la combustione in caldaia con miscele di gas naturale, CH_4 e CH_4-H_2 al 23 e 35%; sono state effettuate prove in laboratorio per la validazione del modello. È stata analizzata l'efficienza della produzione di energia termica di un sistema di riscaldamento e di un bruciatore domestico nell'uso con miscele di CH_4 e H_2 ;
- nella **Fase 3** è stato sviluppato un modello per la simulazione numerica di una derivazione di utenza per analizzare gli effetti della stratificazione dell' H_2 ; sono stati valutati sperimentalmente gli effetti dell'iniezione di H_2 sui sistemi di misura dell'odorizzante.

7 Dettaglio delle attività svolte

Di seguito si riporta il dettaglio delle attività svolte nell'ambito del progetto, descritti per esteso nel deliverable "LA 2.30 Studio della compatibilità delle utenze per l'uso di diverse miscele di idrogeno-metano allacciate alla rete gas" (Report "esteso").

7.1 Fase 1

Nell'ambito della presente ricerca è stata sviluppata una campagna sperimentale finalizzata a valutare gli effetti metrologici dell'iniezione di idrogeno nel gas naturale su cinque contatori di gas domestici nuovi e tre rimossi dalla rete di diversa tecnologia (i.e., a membrana, a ultrasuoni e termo-massica). Le prove sperimentali sono state effettuate (vedi Tabella 2) con: i) aria; ii) gas naturale della famiglia H; iii) gas naturale con iniezione di idrogeno del 2%, 5%, 10% e 23%vol.

Tabella 2 – Principali caratteristiche dei gas di prova (valori a $t=15^{\circ}\text{C}$ e $p=1.01325$ bar)

| | Aria | Hgas | H _{gas} + 2% H ₂ | H _{ga} + 5% H ₂ | H _{ga} + 10% H ₂ | H _{ga} + 23% H ₂ |
|--|-------|--------|---|--|---|---|
| Metano, CH ₄ | - | 0.910 | 0.892 | 0.865 | 0.819 | 0.701 |
| Etano, C ₂ H ₆ | - | 0.050 | 0.049 | 0.048 | 0.045 | 0.039 |
| Azoto, N ₂ | - | 0.040 | 0.039 | 0.038 | 0.036 | 0.031 |
| Idrogeno, H ₂ | - | 0.000 | 0.020 | 0.050 | 0.100 | 0.230 |
| d , Densità relativa (-) | - | 0.596 | 0.585 | 0.569 | 0.543 | 0.474 |
| ρ , Densità (kg m ⁻³) | 1.225 | 0.728 | 0.715 | 0.695 | 0.663 | 0.579 |
| CV , Potere Cal. Sup. (MJ Sm ⁻³) | - | 37.696 | 37.181 | 36.409 | 35.123 | 31.785 |
| W , Indice di Wobbe (MJ Sm ⁻³) | - | 48.841 | 48.607 | 48.257 | 47.671 | 46.155 |
| c_p , Calore specifico (J kg ⁻¹ K ⁻¹) | 1011 | 2142.2 | 2171.1 | 2216.4 | 2297.8 | 2551.8 |
| $\rho \bar{c}_p$, (kJ m ⁻³ K ⁻¹) | 1.238 | 1.559 | 1.552 | 1.541 | 1.524 | 1.478 |
| c_0 , Velocità del suono (m s ⁻¹) | 340 | 436 | 440 | 447 | 458 | 492 |

Le prove sono state eseguite in linea con le corrispondenti norme armonizzate EN 1359 per il contatore a membrana, EN 14236 per i contatori a ultrasuoni ed EN 17526 per i contatori termo-massici. L'errore di indicazione dei contatori, calcolato in termini di volumi alle condizioni standard di riferimento, è stato misurato a cinque valori di portata (Q_{min} , Q_t , $0.4 Q_{max}$, $0.7 Q_{max}$ e Q_{max}). Ciascun ciclo di prova è stato ripetuto tre volte ed è stato considerato l'errore medio. Infine, è stata valutata anche la cosiddetta *gas-air relationship*, cioè la differenza tra l'errore medio di indicazione del contatore sui gas di prova e sull'aria, a ciascuna delle portate.

Le prove in aria sono state eseguite presso il Laboratorio 2i Rete Gas di Cremona su un banco prova ad ugelli sonici in grado di operare con portate comprese tra 0,04 e 40 m³/h alle condizioni ambientali. Successivamente, gli stessi contatori sono stati sottoposti a prove in gas presso il Flow Metrology Department dell'Oil and Gas Institute di Cracovia (PL), laboratorio accreditato e organismo notificato per contatori del gas. I test sono stati eseguiti sul banco di prova SG-25G dotato di due master meters di riferimento (i.e., un contatore a rotoidi G16 nell'intervallo da 0,6 a 6 m³/h e un wet-drum tipo BSM-1 nell'intervallo da 0,04 a 0,6 m³/h) consentendo l'applicazione del metodo volumetrico.

Le prove sui contatori nuovi di fabbrica hanno riguardato: i) un contatore a membrana, ii) due contatori a ultrasuoni e iii) due contatori termo-massici. Questi ultimi, pur essendo prodotti dallo stesso produttore, presentano un diverso design del sensore di misura: i) uno con sensore tradizionale, ii) un nuovo sensore innovativo che si basa su una routine dinamica di riconoscimento del gas naturale e della percentuale di idrogeno.

I tre contatori del gas domestici G4 rimossi dalla rete e sottoposti a verifica sono un contatore a membrana "ibrido" (i.e., con sistema di elaborazione e trasmissione e sensore di temperatura), un contatore a ultrasuoni e, un contatore termo-massico. Questi contatori sono stati tutti posti in servizio tra il 2016 e il 2017 e successivamente rimossi nel 2023.

7.2 Fase 2

L'idrogeno è un combustibile con proprietà significativamente diverse da quelle del gas naturale e quelle più importanti sul processo di combustione sono la temperatura adiabatica di fiamma T_f , la velocità laminare di fiamma S_L ed il potere calorifico. Per simulare la combustione in caldaia (combustione con fiamma e successivo raffreddamento dei fumi in uno scambiatore di calore ad acqua) è stato sviluppato un modello empirico basato su un approccio di tipo lagrangiano e sviluppato in Python 3.9, utilizzando la suite open-source Cantera 3.0 con il meccanismo cinetico del metano GRIMECH 3.0.

Nel modello sviluppato si segue l'evoluzione dei parametri chimico-fisici (i.e., temperatura e composizione chimica) di un volume di miscela gassosa reagente, a comportamento ideale, che subisce dapprima la combustione nella fiamma, attraversa la camera di combustione e quindi passa nello scambiatore di calore raffreddandosi fino alla temperatura misurata dei fumi. In queste fasi, tutte alla pressione costante di 1 atm, il volume della miscela gassosa reagente subisce una serie di trasformazioni chimico-fisiche che possono essere simulate mediante opportuni pacchetti software in grado di effettuare la modellazione della cinetica di reazioni chimiche e la valutazione degli inquinanti. È stato, infatti, individuato un parametro empirico, l'ampiezza del dominio della fiamma W correlabile alla concentrazione delle specie chimiche misurate (CO_2 , CO , O_2 , NO , NO_2) e a sua volta dipendente dalla T_f della miscela CH_4-H_2 . Ricalcolando W per le miscele analizzate e ripetendo le simulazioni con i valori di W ricalcolati, è possibile ottenere dal modello la composizione dei fumi a partire dalla sola conoscenza della $\%H_2$ e di ϕ della miscela reagente. Per descrivere l'evoluzione del sistema durante il raffreddamento dei fumi nello scambiatore di calore (sempre considerando un approccio lagrangiano) si ipotizza che i fumi si raffreddino progressivamente in un reattore a flusso turbolento (i.e., Plug Flow Reactor, PFR) in cui sono assegnati sia il profilo di temperatura (supposto lineare) che il tempo di residenza.

Per la validazione del modello sono state condotte alcune prove sperimentali di combustione presso il Laboratorio di ICI Caldaie Spa a Carmagnola (VR) utilizzando una caldaia industriale modello Monolite 555 equipaggiata con un bruciatore RX 70. L'aria e il gas combustibile vengono premiscelati per poi alimentare il bruciatore della caldaia. Durante la campagna sperimentale il rapporto di equivalenza è stato mantenuto tra 0.7 e 0.9. I fumi della combustione, dopo aver attraversato in lunghezza la camera di combustione, fuoriescono dal basso per attraversare lo scambiatore di calore ad acqua ed essere espulsi in atmosfera. La misura della temperatura dei fumi e delle concentrazioni delle specie principali in essi presenti è effettuata a valle dello scambiatore di calore. Sono state eseguite 19 prove di combustione con 4 diversi gas combustibili: i) gas naturale di rete; ii) metano puro da bombola certificata;

iii) miscela metano-idrogeno da bombola certificata ($H_2 = 23 \%$); iv) miscela metano-idrogeno da bombola certificata ($H_2 = 35 \%$).

In questa fase della ricerca è stato inoltre analizzato l'effetto dell'iniezione di idrogeno nel gas naturale sulla produzione di energia termica. A tale scopo:

- è stato sviluppato un modello numerico transitorio per simulare il funzionamento di un sistema di riscaldamento domestico con caldaia a metano, analizzandone le prestazioni con iniezione di idrogeno. Il modello integra aspetti impiantistici e costruttivi, offrendo una base per ottimizzazioni future, come algoritmi di controllo avanzati o materiali innovativi per l'involucro edilizio. Il circuito idraulico distribuisce il fluido termovettore ai radiatori, mantenendo una temperatura interna di 20°C , con carichi termici variabili in base alle condizioni climatiche. Il modello è stato applicato al caso di studio di una residenza universitaria di 8 stanze identiche (35 m^2 , 3 m di altezza), con controllo on/off della potenza del bruciatore, che garantisce stabilità termica con variazioni limitate ($\pm 0.5^\circ\text{C}$). Il modello considera anche l'interazione tra impianto e edificio, ottimizzando il bilancio termico senza compromettere la rappresentatività del sistema;
- è stato analizzato il transitorio di riscaldamento a pressione atmosferica di un 1 litro di acqua alla temperatura iniziale di 10°C utilizzando metano, idrogeno e una miscela $\text{CH}_4\text{-H}_2$ al 23%, con portata di alimentazione costante e pari a circa $0.32 \text{ m}^3/\text{h}$. È stato considerato l'utilizzo di un fornello domestico di potenza nominale pari a 2 kW (dato di targa con combustibile metano) e conforme alla UNI CIG 7129.

7.3 Fase 3

L'idrogeno presenta una densità inferiore a quella del gas naturale (e del metano) e, pertanto, tende a stratificarsi o segregarsi a causa delle forze gravitazionali e dei fenomeni di diffusione. In questa fase della ricerca è stato sviluppato un modello matematico 1D che tiene conto della diffusione, della convezione e della gravità per descrivere la distribuzione spaziale e temporale dell'idrogeno in una miscela con metano. Il modello proposto consente di descrivere i fenomeni di stratificazione all'interno di condotte verticali, sia in presenza che in assenza di flusso di massa ed è stato applicato al caso della derivazione di utenza in una tipica rete di distribuzione cittadina alimentata con gas naturale arricchito con idrogeno a servizio di un piccolo condominio di tre piani con tre utenti finali (vedi Figura 6).

L'obiettivo della ricerca è stato quello di valutare l'effetto di stratificazione dell'idrogeno in una condizione di regime estivo, quando cioè l'effetto della stratificazione potrebbe risultare amplificato (i.e., bassi consumi o addirittura nulli per diverse ore). Di seguito si riportano i parametri geometrici e operativi considerati per l'analisi della stratificazione:

- Pressione di fornitura (distribuzione al cliente finale) 1020 mbar e 1040 mbar
- Temperatura del gas 5°C (regime invernale) e 30°C (regime estivo)
- Altezza contatore $H=3 \text{ m}$ (piano rialzato), $H=6 \text{ m}$ (I piano), $H=9 \text{ m}$ (II piano)
- Lunghezza tratto orizzontale (allacciamento interrato) 6 metri
- Diametro colonna montante 1,5 pollici

Per semplicità di calcolo, alla base della colonna montante è stata applicata una condizione di flusso a concentrazione di H_2 costante e senza prelievi dai tre utenti serviti (corrisponde ad esempio in regime estivo ad un periodo di assenza contemporanea per ferie dei tre utenti). Per completezza è stato anche simulato lo stesso piccolo condominio in regime invernale (i.e., con

temperatura del gas di 5°C) in una "seconda casa" non abitata per diversi giorni, sempre alle stesse condizioni di flusso alla base della colonna montante.

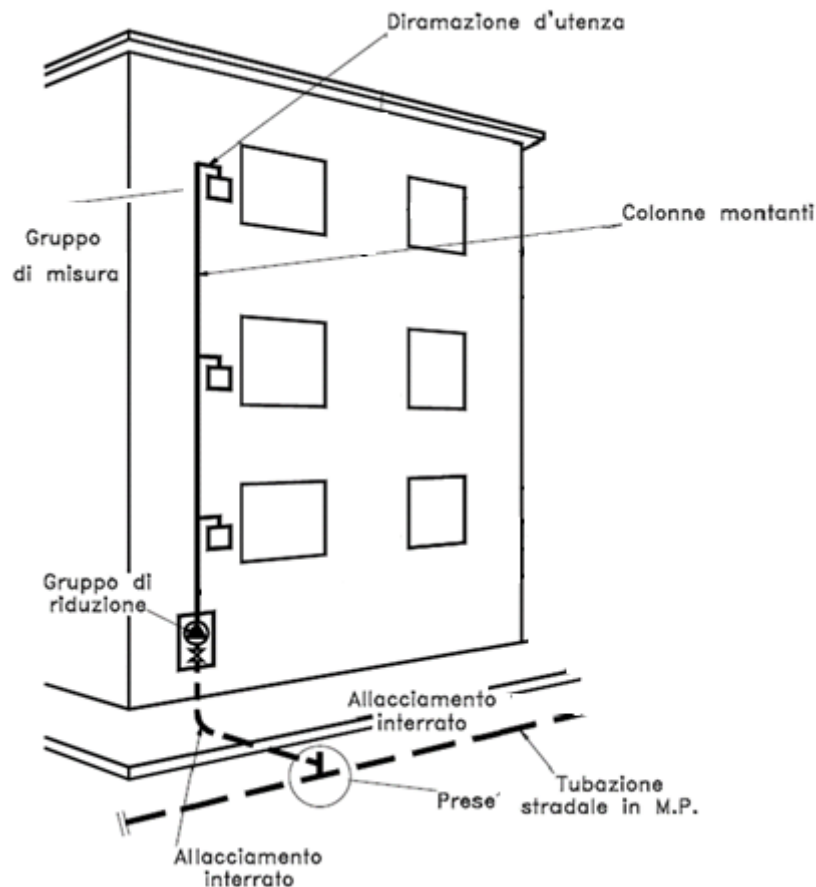
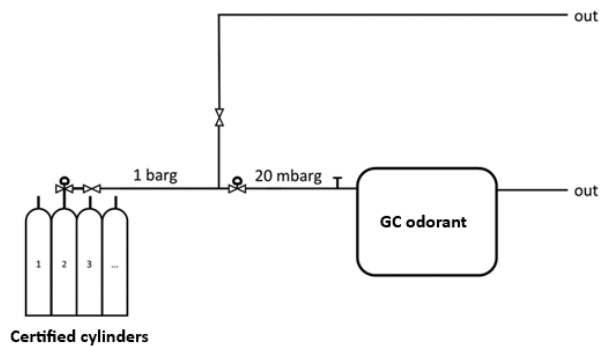


Figura 6 - Esempio di derivazione di utenza

Infine, l'affidabilità dei sistemi di misurazione della concentrazione di odorizzante con miscele di gas naturale ed idrogeno è stata studiata sperimentalmente con tecnica gascromatografica (GC) presso il Laboratorio Pietro Fiorentini di Arcugnano (VI), utilizzando bombole certificate con miscele metano-idrogeno e gas naturale odorizzato dalla rete cittadina. A questo scopo è stata realizzata una campagna sperimentale in due fasi:

- la prima fase ha riguardato prove su bombole certificate a tre livelli di concentrazione dell'odorizzante THT/TBM (5, 30 e 100 mg/Sm³) e in tre miscele di gas (100% metano, 100% idrogeno e una miscela 20% idrogeno e 80% metano). Le prove con 100% metano sono servite a validare il processo di misurazione, con risultati confrontati con i valori di riferimento certificati forniti da SIAD, laboratorio accreditato. In Figura 7a è riportato lo schema del layout di prova.
- la seconda fase è stata svolta presso l'Hydrogen Innovation Lab di Pietro Fiorentini Spa (vedi Figura 7b), dove il gas naturale odorizzato con THT proveniente dalla rete di distribuzione cittadina viene miscelato con idrogeno puro prodotto in loco. Il gas naturale viene pressurizzato a 5 bar e iniettato in un miscelatore di gas insieme a idrogeno puro a 2 bar. La concentrazione di odorizzante delle miscele prodotte con idrogeno al 5% e al 20% è stata misurata a valle dell'unità di miscelazione.



a)



b)

Figura 7 - a) layout di prova per bombole certificate, b) Hydrogen Innovation Lab di Pietro Fiorentini

L'errore relativo ($E_{\%}$) è stato calcolato come differenza tra l'indicazione del GC e il valore di riferimento certificato. Per le prove con gas naturale proveniente dalla rete del gas, tuttavia, poiché non era disponibile un valore di riferimento certificato nel punto di prelievo, è stato stimato un valore di riferimento atteso. A questo scopo, i valori medi misurati sono stati utilizzati per derivare una funzione di linearizzazione per ottenere un valore $C_{GN,i}$ interpolato al momento esatto della misurazione sulla miscela H₂NG. Di conseguenza, il valore di riferimento atteso C_{ref} della concentrazione di THT è stimato a partire dal contenuto di idrogeno H₂%vol misurato nella miscela. E' stata inoltre stimata l'incertezza della misurazione della concentrazione dell'odorizzante, U_{odor} , considerando i seguenti contributi: i) incertezza del valore di riferimento ricavato dal certificato della bombola; ii) incertezza del GC, $u_{GC} = \text{accuratezza} / \sqrt{3}$, considerando che il GC utilizzato è conforme alla classe 0,5; iii) incertezza della calibrazione del GC, $u_{cal,GC} = 0,15 \text{ mg/Sm}^3$ come riportato nel certificato di calibrazione; iv) incertezza di ripetibilità u_{rep} , pari alla deviazione standard delle misurazioni ripetute effettuate (> 10 misurazioni).

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Non sono state utilizzate consulenze per l'esecuzione delle attività di ricerca previste dalla presente LA 2.30

9 Pubblicazioni scientifiche

Lavori pubblicati su rivista o in atti di convegno:

1. Ficco, G.; Dell'Isola, M.; Graditi, G.; Monteleone, G.; Gislon, P.; Kulaga, P.; Jaworski, J. Reliability of Domestic Gas Flow Sensors with Hydrogen Admixtures. *Sensors* 2024, 24, 1455. <https://doi.org/10.3390/s24051455>
2. G.Ficco, M.Dell'Isola, G.Cortellessa, G.Grossi, P.Kulaga, J.Jaworski, Effect of hydrogen blending on the accuracy of smart gas meters, *International Journal of Hydrogen Energy* 62 (2024) 892–903, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.03.101>
3. G.Ficco, E.Caracci, M.Dell'Isola, G.Grossi, P.Vigo, G.Betta, A.Bernieri, L.Ferrigno, D.Capriglione, G.Miele, F.Milano. Analisi degli effetti dell'iniezione di idrogeno sui contatori domestici del gas nuovi e rimossi dalla rete, in *Atti del VIII Forum MISURE*, San Vincenzo (LI) 12-14 Settembre 2024

Lavori sottomessi a peer review su rivista o in atti di convegno:

1. Ficco, G.; Dell'Isola, M.; Cortellessa, G.; Monteleone, G., Cigolotti, V. Reliability of odorant concentration measurements in natural gas and hydrogen blends. (Submitted to *Gas Science and Engineering Journal*)
2. G. Cortellessa, F. Arpino, M. Dell'Isola, G. Ficco, G. Grossi, V. Cigolotti, A. De Marco, P. Gislon, G. Monteleone, C. Imboccioli, A. Longato, D. Rossi, EFFECT OF HYDROGEN BLENDING ON ODORANT MEASUREMENT. Submitted to the *European Fuel Cells and Hydrogen Piero Lunghi Conference 2025 (EFCH2 2025)* September 17–19 2025, Capri, Italy
3. P. Gislon, V. Cigolotti, A. De Marco, A. Giaconia, A. Zingone, G. Cortellessa, F. Arpino, M. Dell'Isola, G. Ficco, G. Grossi, J. Jaworski, P. Kulaga, P. Tafani Alunno, EFFECT OF HYDROGEN BLENDING ON GAS METERS ACCURACY. Submitted to the *European Fuel Cells and Hydrogen Piero Lunghi Conference 2025 (EFCH2 2025)* September 17–19 2025, Capri, Italy

10 Eventi di disseminazione

- Seminari e attività di divulgazione svolti nell'ambito del Corso di Master di I Livello in Transizione Energetica nelle Reti, Università di Cassino e del Lazio Meridionale, Anno Accademico 2022/2023, coordinatore Prof. Giorgio Ficco:
 - 30 novembre 2022, Seminario dal titolo *"L'idrogeno come fonte energetica sostenibile nel contesto internazionale, europeo e nazionale"*, a cura dell'Ing. Giorgio Graditi di ENEA, presso l'Università di Cassino, Polo Didattico di Frosinone
 - 20 gennaio 2023, Seminario dal titolo *"Strategie europee e nazionali sull'idrogeno"*, a cura dell'Ing. Giulia Monteleone di ENEA
 - 21 gennaio 2023, Seminario dal titolo *"Applicazioni e tecnologie di integrazione dell'idrogeno nelle reti energetiche"* a cura dell'Ing. Maria Valenti di ENEA
 - 03 febbraio 2023, Seminario dal titolo *"Hydrogen Valleys"*, a cura del Dott. Carmelo Fallone e dell'Ing. Luigi Del Plato di SGI, Società Gasdotti Italia
 - 22 settembre 2023, Visita di Studio presso i Laboratori di ENEA Centro Ricerche Casaccia, a cura dell'Ing. Francesco Vellucci e dell'Ing. Maria Pia Valentini di ENEA
- 23 marzo 2023, Frosinone. Seminario sul tema della Transizione Energetica per le Aziende associate ad Unindustria Frosinone, relazione dal titolo *"Nuove strategie energetiche per un futuro sostenibile"*, a cura del Prof. Giorgio Ficco;
- 12 dicembre 2024, Online Workshop su *"Sicurezza e trasporto in rete gas dell'idrogeno"* organizzato da ENEA nell'ambito del Progetto Integrato 1.3 Tecnologie dell'Idrogeno, intervento dal titolo *"Effetti dell'iniezione di idrogeno nel gas naturale sui sistemi di misura e sull'odorizzazione"*, a cura del Prof. Giorgio Ficco;
- 19-20 dicembre 2024, Roma Progetto Integrato 1.3 Tecnologie dell'Idrogeno, Quarto Workshop di progetto, relazione dal titolo *"Analisi componenti per reti trasporto/distribuzione idrogeno"* a cura del Prof. Giorgio Ficco e Prof. Gianfranco Dell'Agli.