



## ISTITUTO NAZIONALE DI RICERCA METROLOGICA Repository Istituzionale

Un'infrastruttura metrologica per la misura dell'acqua in tracce nei gas puri

*Original*

Un'infrastruttura metrologica per la misura dell'acqua in tracce nei gas puri / Fernicola, V.; Beltramino, G.; Cuccaro, R.; Enescu, D.; Nobakht, R.; Rosso, L.; Salerno, R.. - In: TUTTO MISURE. - ISSN 2038-6974. - (2023).

*Availability:*

This version is available at: 11696/79919 since: 2024-02-29T15:06:50Z

*Publisher:*

Augusta Edizioni Mortarino

*Published*

DOI:

*Terms of use:*

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

*Publisher copyright*

(Article begins on next page)

# PROGETTI EUROPEI DI RICERCA METROLOGICA

V. Fericola, G. Beltramino, R. Cuccaro, D. Enescu, R. Nobakht, L. Rosso, R. Salerno

## Un'infrastruttura metrologica per la misura dell'acqua in tracce nei gas puri

Il progetto PROMETH2O

### A METROLOGY INFRASTRUCTURE FOR THE MEASUREMENT OF TRACE WATER IN PURE GASES

PROMETH2O, *Metrology for trace water in ultra-pure process gases*, is a Joint Research Project of the European Metrology Research Programme for Innovation and Research (EMPIR). Its objective is to fill the gap regarding the metrological traceability in the technology area of ultra-high purity process (UHP) gases that underpin semiconductor and photonics fabrication. PROMETH2O is developing traceable and improved methods for measuring trace water in gaseous matrices in the challenging amount fraction range between 5 ppb and 5 ppm while demonstrating the effectiveness of the relevant metrology practices in the industry supply chain.

New primary standards and improved trace water analysers will be available for measuring the water content in UHP gases to enhance the competitiveness of European manufacturers and service providers through traceable methods and techniques to better serve such advanced industrial sectors.

### RIASSUNTO

PROMETH2O, *Metrology for trace water in ultra-pure process gases*, è un progetto di ricerca congiunto del Programma europeo di metrologia per la ricerca e l'innovazione (EMPIR). Il suo obiettivo è colmare il gap di conoscenze e infrastrutture per assicurare la riferibilità metrologica alle misurazioni di acqua in tracce nei gas di processo ultra-puri in settori chiave quali l'industria dei semiconduttori e della fotonica. PROMETH2O sviluppa sistemi di riferimento e metodi di misura per l'intervallo di frazione molare compresa tra 5 parti per miliardo e 5 parti per milione di acqua, con dimostrazioni in campo nell'intera filiera produttiva. La disponibilità di nuovi campioni e il miglioramento delle tecniche di misurazione di acqua in tracce nei gas ad altissima purezza contribuiranno al miglioramento della strumentazione, dei metodi e delle tecniche di misurazione e della qualità dei servizi di taratura a supporto di settori industriali avanzati.

### IL CONTESTO DI RIFERIMENTO

La misurazione di acqua in tracce nei gas, cioè quando la frazione molare è inferiore a 1  $\mu\text{mol/mol}$  (1 ppm), è un fattore chiave nella progettazione e nella gestione degli impianti di produzione in diverse aree tecnologiche. Ad esempio, nella fabbricazione dei semiconduttori e di dispositivi fotonici, il controllo dell'umidità residua è fondamentale per mantenere la purezza elevata dei gas di processo quali azoto, argon, elio, idrogeno e anidride carbonica [1].

Concentrazioni volumetriche di acqua superiori a poche parti per miliardo

(ppb) nei gas di processo possono seriamente compromettere la produttività dei processi di fabbricazione e l'efficienza dei dispositivi. Secondo la International Technology Roadmap for Devices and Systems (ITRS), le tecniche di misura devono consentire la rivelazione di decine di parti per miliardo di vapore acqueo nel punto d'impiego del gas [2]. Negli ultimi anni, i requisiti sono stati ulteriormente inaspriti per alcuni gas usati "a protezione" dei processi (quali azoto e argon), pertanto gli standard industriali recenti richiedono campioni di umidità in tracce a livello di pochi ppb [3]. Ciò presenta grandi sfide per i produttori di gas e per i co-

struttori di strumenti analitici, poiché il controllo e la misura dell'acqua a tali livelli è difficile non solo a causa dei diversi tipi di gas che possono influenzare il processo di misurazione, ma anche per via della natura polare della molecola che viene facilmente adsorbita sulle superfici dei materiali (comprese le superfici metalliche delle tubazioni) [4].

### IL PROGETTO PROMETH2O: METROLOGY FOR TRACE WATER IN ULTRA-PURE PROCESS GASES

Il progetto PROMETH2O "*Metrology for trace water in ultra-pure process gases*", il cui logo è riportato in Fig. 1, mira a colmare il gap di conoscenze e di infrastrutture per assicurare la riferibilità metrologica alle misurazioni di acqua in tracce nei gas ultra-puri. PROMETH2O è un progetto di ricerca congiunto del Programma europeo di metrologia per la ricerca e l'innovazione (EMPIR), cofinanziato dall'Unione Europea e dagli stati partecipanti, avviato a giugno 2021 e coordinato dall'INRIM.



Figura 1 – Il logo del progetto

Il consorzio di ricerca riunisce esperti provenienti da undici differenti istituti di metrologia, da quattro università europee e da quattro aziende leader nei settori della produzione di gas e dello sviluppo di sistemi di misura di precisione (Fig. 2).

Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRIM)

[v.fericola@inrim.it](mailto:v.fericola@inrim.it)



Dal 1994, il laboratorio a supporto  
dei produttori nel mondo  
elettrico ed elettronico



LAB N° 1180 L

S.p.A.  
DIVISIONE PROVE E MISURE  
TEST AND MEASUREMENT DIVISION



Per garantire un supporto qualificato in ambito prove alle aziende produttrici, e per soddisfare le esigenze provenienti dalla diffusione di norme sempre più numerose e specializzate e l'entrata in vigore cogente delle Direttive Comunitarie, il laboratorio INTEK è in costante rinnovamento e ampliamento.

**Innovazione  
e  
competenza,  
unite**

Il laboratorio INTEK è specializzato in metrologia e nel calcolo dell'incertezza di misura, con un occhio sempre rivolto al miglioramento dei metodi di testing. Ma non è solo semplice esecuzione delle prove: un team di tecnici appassionati segue il cliente fino al raggiungimento del suo obiettivo.

Settori principali e contatti:

Compatibilità elettromagnetica: [luigi.sala@intek.it](mailto:luigi.sala@intek.it) Bassa tensione, vibrazioni e ambientali: [flavio.floriani@intek.it](mailto:flavio.floriani@intek.it)

ATEX: [mirko.martina@intek.it](mailto:mirko.martina@intek.it) Info: [info@intek.it](mailto:info@intek.it) - web: [www.intek.it](http://www.intek.it) - tel. 030 25 91 857

Intek spa - Via Mazzini 75, 25086 Rezzato BS - tel. 030/2591857 - P.I. 03268280173 - REA BS 350460 - Cap. Soc. € 1.050.000,00 - [www.intek.it](http://www.intek.it)



S.p.A.  
DIVISIONE PROVE E MISURE  
TEST AND MEASUREMENT DIVISION

**Innovazione e competenza, unite**

- Compatibilità elettromagnetica
- Prove ambientali
- Prove di resistenza fisica
- Prove di conformità alle Direttive Europee Bassa Tensione, RED ed ATEX.



LAB N° 1180 L

Participant in the  
**UL Inc.**  
TPTDP  
File: DA928



Intek spa - Via Mazzini 75, 25086 Rezzato - P.I. 03268280173 - REA BS 350460 - Cap. Soc. € 1.050.000,00 - [www.intek.it](http://www.intek.it)

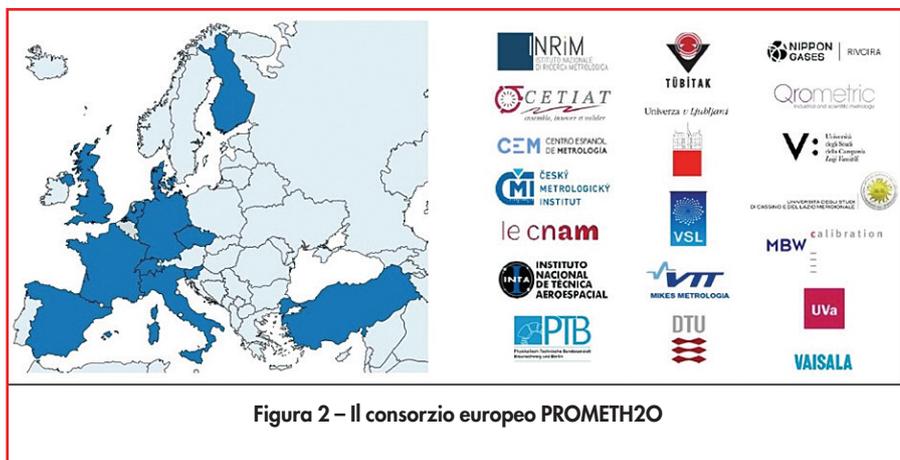


Figura 2 – Il consorzio europeo PROMETH20

PROMETH20 si pone come obiettivi lo sviluppo di sistemi di riferimento e metodi di misurazione per l'intervallo di frazione molare tra 5 parti per miliardo e 5 parti per milione di acqua e la dimostrazione in campo dell'efficacia di tali metodi nel miglioramento dei processi e nelle applicazioni industriali lungo l'intera filiera produttiva dei gas puri. Il progetto intende migliorare lo stato dell'arte dei campioni primari di umidità, con lo sviluppo di generatori campione (primi in Europa e tra i pochi al mondo) in grado di generare gas umidi con frazione molare di vapore acqueo fino a 5 nmol/mol e temperature di brina fino a -105 °C. Inoltre intende contribuire all'avanzamento della conoscenza delle proprietà termodinamiche e termofisiche dei gas umidi, fornendo nuovi dati sperimentali, per il cosiddetto "fattore d'incremento" del vapore acqueo a temperature comprese tra -90 °C e -30 °C a pressioni fino a 1 MPa. Il fattore d'incremento è la principale correzione all'equazione di stato dei gas reali umidi e purtroppo, al momento, non esistono dati nella letteratura scientifica per l'intervallo di misura considerato. La conoscenza precisa e riferibile di tale fattore correttivo è essenziale per la conversione tra le differenti grandezze e unità di misura con cui si esprime l'umidità ed è importante sia per i produttori di miscele di gas, sia per i costruttori di strumentazione, sia infine per i laboratori che forniscono servizi di taratura. Al termine del progetto, i partner di PROMETH20 metteranno a disposizione nuovi campioni metrologici e migliorate capacità di

misura per garantire la riferibilità alle misure di umidità in un intervallo molto esteso in grado di fornire supporto all'industria europea che produce e utilizza i gas puri di processo e ai costruttori di strumentazione di misura e analisi.

**SVILUPPO DI CAMPIONI PRIMARI DI UMIDITÀ PER LA MISURAZIONE DI ACQUA IN TRACCE**

Nell'ambito del progetto, l'INRIM ha

sviluppato un generatore campione di gas umido in grado di coprire l'intervallo di temperatura di brina tra -105 °C e -20 °C, corrispondente all'intervallo di frazione molare tra 5 nmol/mol e 0.5 cmol/mol.

Il campione (denominato INRIM 03 Mk2) è in grado di operare in un ampio campo di pressioni assolute da circa 200 hPa a 6.800 hPa, utilizzando azoto e argon come gas vettori (Fig. 3). La scelta di operare a pressioni sub-atmosferiche è dettata dalla necessità di assicurare la riferibilità alle misure in ambito meteo-climatico ai sensori di umidità per l'alta troposfera (fino a 13 km di quota) [5], mentre la capacità di operare fino a 0.68 MPa serve a soddisfare le necessità dell'industria dei gas. Le prime verifiche sperimentali del generatore campione sono state molto soddisfacenti, dimostrando che il sistema è in grado di generare un gas umido con una frazione molare di 5 ppb di vapore d'acqua con un'incertezza relativa inferiore all'8% (corrispondente a un'incertezza inferiore a 0,35 °C a -105 °C) e di generare una frazione molare di 5 ppm di vapore d'acqua con un'incertezza relativa inferiore all'1% (ovvero un'incertezza

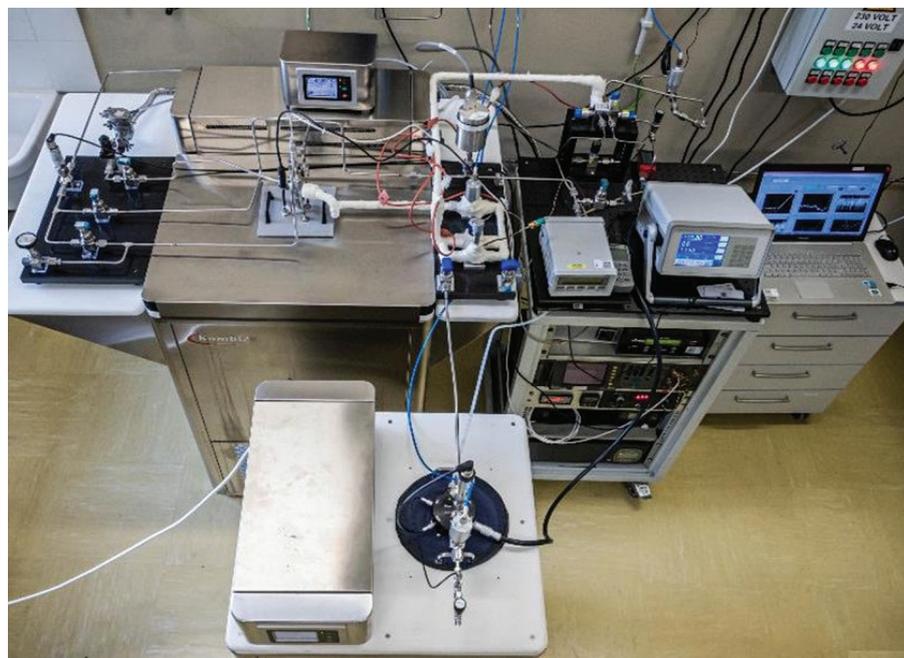


Figura 3 – Generatore primario di umidità INRIM 03 Mk2 per bassi punti di brina operante nel campo tra -105 °C e -20 °C con frazione molare tra 5 nmol/mol e 0.2 cmol/mol

# Più precisione

## Sensori di spostamento



## Banchi dinamometrici digitali

Forze di trazione e compressione fino a 6,7 kN  
Corse fino a 813 mm  
Precisione di posizionamento pari a 0,05 mm  
Compensazione della flessione ad ogni carico e posizione  
Pannello di controllo integrato  
Ampia gamma di sistemi di fissaggio e di aggancio  
Numero virtualmente illimitato di prove

- Peeling
- Trazione cavi
- Compressione e trazione molle
- Piegatura



### ■ Software IntelliMESUR®

Soluzione integrata per tablet e PC Windows.  
Crea ed esegui un'ampia gamma di prove base e multi-step, come:

- Limitare il test a un carico, una rottura o una distanza
- Misurare l'altezza
- Mantenimento del carico
- Prove multi-step, utilizzando qualsiasi combinazione di movimento e raccolta dati



**LUCHSINGER** srl  
www.luchsinger.it

24035 CURNO (BG) - Via Bergamo, 25  
Tel. 035 462 678 - info@luchsinger.it

60  
1963-2023



## GLI ESPERTI DI T\_M



**LUCHSINGER** srl  
sensori e strumenti

Via Bergamo 25 – 24035 Curno (BG)  
Tel. 035/462678 – Fax 035/462790  
E-mail: [info@luchsinger.it](mailto:info@luchsinger.it)  
Web: [www.luchsinger.it](http://www.luchsinger.it)

Persona da contattare: **Fabio Pegurri**

### L'AZIENDA

Luchsinger opera nel campo delle tecnologie di misura per la ricerca e l'industria distribuendo strumenti e soluzioni di importanti aziende internazionali. In supporto alla vendita, offre una consulenza tecnica altamente specializzata e diffonde la propria cultura tecnologica attraverso corsi, webinar e seminari.

L'ampia offerta di tecnologie di misura comprende: **Estensimetri** per l'analisi sperimentale delle sollecitazioni e per la realizzazione di trasduttori, accessori selezionati per garantire installazioni estensimetriche della massima qualità e sistemi di acquisizione dati di **Micro-Measurements**. Sensori laser, induttivi, capacitivi e confocali ad alta precisione. L'azienda partner **Micro-Epsilon** è specializzata nelle tecnologie di **misura dello spostamento, distanza e posizione** senza-contatto.

Pirometri, termocamere, termoscanner e **sensori di temperatura** a infrarossi. **Optris** sviluppa tecnologie di misura della temperatura senza-contatto e offre soluzioni dedicate per diversi settori industriali.

**Accelerometri** per testing e industriali, celle di carico piezoelettriche, vibrometri e martelli strumentati. **Dytran Instruments** è un'azienda americana specializzata nello sviluppo e nella produzione di sensori piezoelettrici e MEMS per misure dinamiche di accelerazione, vibrazioni, forza e pressione.

**Sensori di pressione** e vuoto, barometri, sensori dedicati ai settori del condizionamento e riscaldamento aria (HVAC/R), sensori per il Test&Measurement o dedicati al settore sanitario/farmaceutico.

Dinamometri, banchi dinamometrici e indicatori per sensori intercambiabili di **forza** e **coppia** dell'azienda statunitense **Mark-10**.

### ALCUNE NOVITÀ

– **Laser scanner scanCONTROL 30x2**: un potente sistema senza-contatto per il rilevamento dei profili e delle dimensioni di oggetti o superfici. Il sensore raggiunge una velocità di misura di 5 kHz e una risoluzione sull'asse x di 1.024 punti lungo la linea laser.

– **Termocamera industriale stand-alone Xi 410**: combina la resistenza e le dimensioni compatte di un pirometro con la possibilità di ottenere immagini termografiche di una termocamera. Il campo di misura va da -20 a +900 °C e dispone di una funzione di ricerca automatica dell'hotspot e di un focus motorizzato. Il pacchetto software di analisi e sviluppo (SDK) e il software PIX Connect sono inclusi.



inferiore a  $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Tali capacità di misura dell'umidità sono le migliori in Europa e tra le poche al mondo. Il nuovo campione di umidità si affianca ed estende le capacità di misura consolidate dell'INRIM che comprendono ora la misura della temperatura di rugiada/brina da  $-105\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $+95\text{ }^{\circ}\text{C}$ , dell'umidità relativa dal 10% al 95% e della temperatura dell'aria tra  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $+180\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Risultati molto significativi sono stati ottenuti anche da altri partner del progetto. Il VSL, l'istituto di metrologia olandese, sta sviluppando un metodo a permeazione per generare umidità in tracce nell'intervallo tra  $50\text{ nmol/mol}$  e  $5\text{ }\mu\text{mol/mol}$  (basato sulla norma ISO 6145-10) con diluizione dinamica con regolatori di portata massica (riferita alla ISO 6145-7).

Nei laboratori olandesi è stato installato un sofisticato sistema a permeazione passivo in grado di determinare con estrema precisione la perdita di massa del tubo a permeazione tramite una bilancia a sospensione magnetica (Fig. 4). Il PTB, l'istituto di metrologia tedesco, sta sviluppando un generatore campione basato sul metodo "coulometrico" in cui il numero di moli di acqua generato è pro-

porzionale alla corrente in una cella elettrolitica (secondo la legge di Faraday) e, pertanto, la riferibilità al Sistema Internazionale deriva da grandezze elettriche. La validazione del sistema è in corso ed è già stata fatta una stima preliminare dell'incertezza.

### SVILUPPO E VALIDAZIONE DI NUOVI ANALIZZATORI

L'Università tecnica della Danimarca (DTU) ha sviluppato un analizzatore nell'ultravioletto, adatto alle misurazioni di acqua in tracce in argon e azoto. Il sistema è destinato alle applicazioni industriali e può operare sia in condizioni statiche sia dinamiche, con pressioni fino a  $10\text{ MPa}$ . L'analizzatore include una sorgente luminosa ultravioletta, uno spettrometro compatto e la cella di misura del gas. Il sistema permette l'analisi multicomponente delle impurità presenti nei gas puri, che siano acqua in tracce o altri elementi gassosi (Fig. 5).

Un altro importante contributo viene dal Dipartimento di Fisica dell'Università della Campania Luigi Vanvitelli, che sta sviluppando uno spettrometro cavity-ring-down (CRDS), in cui la lunghezza d'onda del laser è direttamente riferibile al campione di frequenza e pertanto consentirà di determinare in modo assoluto (primario) la concentrazione di vapore acqueo di una miscela. Il sistema CRDS ha già dimostrato di poter effettuare misure di frazione molare intorno a  $500\text{ ppb}$ , con un'incertezza relativa migliore dell'1%.

### INTERAZIONE CON LA COMUNITÀ SCIENTIFICA, METROLOGICA E INDUSTRIALE

Per facilitare il trasferimento di conoscenza e tecnologie, avere un impatto significativo e interagire efficacemente con gli stakeholder, PROMETH2O ha coinvolto fin dall'inizio la comunità scientifica e l'industria. È stato istituito un Comitato d'indirizzo, a cui hanno già aderito oltre venti membri provenienti da organizzazioni internazionali, costruttori di strumenti di precisione e produttori di gas europei. Grazie a una proficua collaborazione, il Comitato d'indirizzo ha contribuito a rilevare le esigenze e le priorità delle parti interessate e degli utenti in merito alla misurazione della contaminazione dell'acqua nei gas puri e ultra-puri di processo. È stato condiviso un questionario tra 50 organizzazioni, ricevendo risposte da oltre 30 di esse. Come mostrato in Fig. 6, le risposte sono provenute principalmente dai costruttori di strumentazione (20%), dai produttori di gas (17%), dagli utenti industriali (17%), dagli istituti di metrologia (17%) e dagli organismi di valutazione della conformità (13%). I risultati del sondaggio indicano che gli obiettivi del progetto corrispondono largamente alle esigenze dell'industria e, come ci si sarebbe potuto aspettare, hanno dimostrato un notevole interesse per la riferibilità delle misure di acqua in tracce nell'idrogeno.

In ambito metrologico, PROMETH2O è diventato un punto di riferimento per gli



Figura 4 - Sistema a permeazione del VSL basato su una bilancia a sospensione magnetica



Figura 5 - Analizzatore far-UV per misure di acqua in tracce in argon e azoto

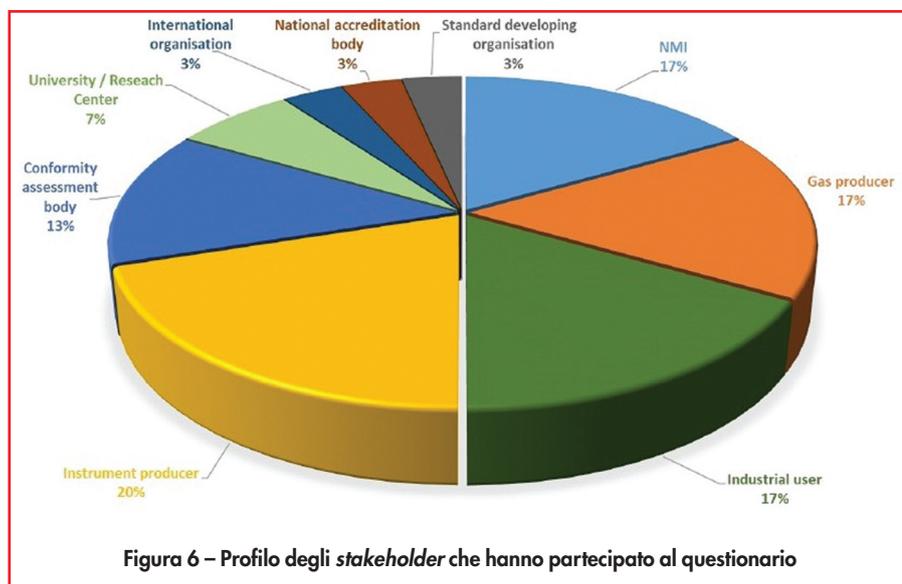


Figura 6 – Profilo degli stakeholder che hanno partecipato al questionario

nismi di valutazione della conformità e quelli regolatori, oltre ai comitati e le reti europee e internazionali di metrologia. Dal punto di vista dell'impatto in ambito industriale, è interessante notare che i produttori di gas coinvolti (in qualità di partner di progetto o di stakeholder nel Comitato d'indirizzo) coprono quasi l'80% della quota di mercato europea. Allo stesso modo, la maggior parte dei principali attori europei nel settore della misurazione e del controllo di processo dell'umidità sono coinvolti sia come partner sia come stakeholder. Tale collaborazione ha accelerato lo sviluppo e la validazione metrologica del primo generatore portatile commerciale di temperatura di brina fino a -90 °C. I test e la validazione delle soluzioni proposte in campo industriale sono stati possibili grazie al miglioramento dei campioni primari di umidità, che assicurano la riferibilità delle misure fino a 5 ppb (o -105 °C di temperatura di brina) con gas diversi e a vari regimi di pressione.

istituti metrologici europei e le altre organizzazioni metrologiche regionali nel campo dell'umidità, facilitando la cooperazione e fornendo opportunità per la diffusione globale delle informazioni.

A livello internazionale, per diffondere le informazioni sono stati promossi numerosi eventi (workshop, seminari e incontri di approfondimento) in cui sono stati coinvolti gli enti normatori, gli orga-

NEWS

**HEXAGON: NUOVA GUIDA ALLA PROGETTAZIONE, PRODUZIONE E CONTROLLO DIMENSIONALE DI MOTORI PER LA MOBILITÀ ELETTRICA**

La filiera automotive è coinvolta in un periodo di radicale cambiamento, accelerato dalle decisioni dell'Unione Europea, che mira a diventare una società a impatto climatico ZERO entro il 2050 e, per raggiungere questo obiettivo, deve ridurre le emissioni di anidride carbonica del 55% entro il 2030, per poi azzerarle del tutto entro il 2050. La mobilità elettrica è uno dei pilastri sui quali si fonda questo ambizioso progetto, che va considerato come la nuova sfida industriale e culturale, una realtà che crescerà negli anni di pari passo alla sua evoluzione tecnologica e

obbligherà tutto il settore automobilistico a una radicale transizione. Gran parte dei costruttori automobilistici hanno già attivato linee produttive dedicate alla realizzazione di modelli totalmente elettrici o ibridi, attivando rapporti di collaborazione con fornitori che a loro volta hanno già attivato la propria gamma di prodotti con soluzioni dedicate all'e-Mobility. Soltanto nel settore meccanico e, in particolare, nelle PMI la transizione si è finora rivelata più lenta e mal digerita, ma anche in questo ambito il processo di cambiamento è ben avviato e avanzato nei fornitori di primo livello, e comunque in fase di progressiva estensione agli altri protagonisti della filiera.

A queste realtà è dedicato **"E-Mobility e la transizione della filiera automotive: la sfida dell'industria della componentistica meccanica"**, un white paper rivolto alle aziende produttrici di motori e componenti della trasmissione per veicoli elettrici, pubblicato da **Electric Motor Engineering – Tecniche Nuove per Hexagon Italia**. Una vera e propria guida alle tecnologie, problematiche e soluzioni proposte dagli esperti di Hexagon: dalla



progettazione alla simulazione, al software di lavorazione meccanica, ai sistemi di controllo dimensionale.



Scarica gratuitamente il whitepaper >>



## SINTESI E PROSPETTIVE

Il progetto PROMETH2O è nato per facilitare l'integrazione dell'infrastruttura metrologica europea nel difficile campo della misura di acqua in tracce nei gas nelle applicazioni industriali e favorire l'interazione con gli attori della comunità scientifica. Queste interazioni sono alla base di ulteriori sviluppi delle capacità metrologiche nel panorama europeo, nelle applicazioni avanzate, nelle capacità di taratura e misura e nei servizi metrologici. La corretta misura di acqua in tracce nei gas puri è già una priorità per i produttori di gas e i consumatori coinvolti in applicazioni medicali, elettroniche ed energetiche che richiedono gas ad alta purezza con caratteristiche ben definite. A lungo termine, i risultati del progetto potranno essere estesi ad altre applicazioni industriali, quali il controllo della qualità dell'idrogeno, del bio-metano e delle miscele d'idrogeno e gas naturale.

## RINGRAZIAMENTI

Il progetto PROMETH2O "Metrology for trace water in ultra-pure process gases" ha ricevuto il finanziamento dell'European Metrology Programme for Innovation and Research (EMPIR) (Grant n. 20IND06) ed è cofinanziato dagli stati partecipanti e dal programma di ricerca e innovazione dell'Unione Europea Horizon 2020.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] M. Amano, I. Kishimoto, and H. Abe, "Trace-moisture generator designed for performance tests of trace-moisture analyzers". *Sens. Actuator A Phys.*, 216.9(2014):19-27.
- [2] The International Roadmap for Devices and Systems (IRDS):2021, available online: [https://irds.ieee.org/images/files/pdf/2021/2021IRDS\\_MET.pdf](https://irds.ieee.org/images/files/pdf/2021/2021IRDS_MET.pdf).
- [3] B.I. Choi, S.W. Lee, J.C. Kim, and S.B. Woo, "Extension of humidity standards to -105°C frost point". *Int. J. Thermophys.*, 36.6(2015):2231-2241.
- [4] M. W. Raynor, K.A. Bertness, K.C. Cossel, F. Adler, and J. Ye, "Chapt.7 Trace

water vapor analysis in specialty gases: sensor and spectroscopic approaches". In *Book: Trace Analysis of Specialty and Electronic Gases*, Edited by W.M. Geiger, M.W. Raynor, 7(2013):195-249.

[5] R. Cuccaro, L. Rosso, D. Smorgon, G. Beltramino, S. Tabandeh, and V. Fericola, "Development of a low frost-point generator operating at sub-atmospheric pressure". *Meas. Sci. Technol.* 29 (2018):054002.



**Vito Fericola** è ricercatore presso l'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica, dove si occupa dello sviluppo di campioni primari di umidità e di strumentazione per applicazioni scientifiche e industriali in termometria e igrometria. È stato responsabile della Divisione Termodinamica e del Dipartimento d'Innovazione e Servizi metrologici dell'INRIM. Attualmente è Consigliere di amministrazione dell'Ente e Consigliere di ACCREDIA. È il coordinatore del progetto europeo PROMETH2O.



**Giulio Beltramino** è tecnologo presso l'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica, dove svolge attività di ricerca nel settore dell'igrometria e della termometria, in particolare nello sviluppo di campioni di umidità nei gas e nella determinazione sperimentale di proprietà termofisiche dell'acqua e di gas refrigeranti. Attualmente collabora alle attività sperimentali previste nel progetto europeo PROMETH2O.



**Rugiada Cuccaro** è ricercatore presso l'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica dove svolge attività di ricerca nel campo della metrologia termica, nello specifico in igrometria con lo sviluppo di tecniche di campioni di umidità nei gas e nel campo delle proprietà termofisiche e termodinamiche con lo studio delle proprietà di materiali e di miscele di gas. Attualmente svolge attività di supporto al coordinamento del progetto europeo PROMETH2O e di leadership di uno dei suoi work package.



**Diana Enescu** è laureata in Energetica Industriale all'Università Politehnica di Bucarest (UPB), Romania. Ha completato il Master in Efficienza energetica ed economia dell'energia all'UPB. Ha ottenuto il titolo di Dottore di ricerca in Ingegneria Meccanica alla Università Tecnica d'Ingegneria Civile di Bucarest, Romania. È ricercatore presso l'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica ed è anche docente esterno presso l'Università Valahia di Targoviste, Romania. La sua attività di ricerca presso INRIM è svolta in buona parte nell'ambito del progetto PROMETH2O.



**Rezvaneh Nobakht** ha completato il Master in Ingegneria Meccanica presso il Politecnico di Torino nel 2021. Attualmente è dottoranda in Metrologia presso il Politecnico di Torino. Collabora con il Gruppo d'Igrometria dell'INRIM al Progetto PROMETH2O. I suoi attuali interessi di ricerca sono focalizzati sullo sviluppo di campioni di umidità per la misurazione di acqua in tracce nei gas industriali.



**Lucia Rosso** è ricercatore presso l'INRIM; ha svolto negli ultimi anni attività di ricerca sia in metrologia termica, nel campo dei campioni di temperatura, delle proprietà termofisiche e della termometria a resistenza e a fluorescenza, sia in igrometria, per lo sviluppo di tecniche di misura di precisione e nuovi generatori campione di umidità. Attualmente collabora alle attività sperimentali nell'ambito del progetto europeo PROMETH2O.



**Riccardo Salerno** è tecnico di laboratorio presso l'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica a supporto dei laboratori d'igrometria per le attività scientifiche e la disseminazione dei campioni e delle unità di misura.