NÚMERO ESPECIAL | 2026

ISSN 2183-0940

REVISTA TMQ

TECHNIQUES, METHODOLOGIES AND QUALITY

NÚMERO ESPECIAL

Metrologia Científica

EDITORES CONVIDADOS:

ISABEL GODINHO
Instituto Português da Qualidade

JOÃO ALVES E SOUSA
Instituto Português da Qualidade

EDITORES:

ANTÓNIO RAMOS PIRES
Instituto Politécnico de Setúbal

MARGARIDA SARAIVA
Universidade de Évora

REDE DE INVESTIGADORES DA QUALIDADE

A **REVISTA TMQ - TECHNIQUES METHODOLOGIES AND QUALITY** é uma marca registada no INPI com o N'°614089 e sujeita os artigos publicados a dupla revisão por pares, estando disponível online em:
https://publicacoes.riqual.org
A TMQ está indexada à Latindex - Sistema regional de informações on-line para revistas de investigação científica nos países da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal.

Responsabilidade: A RIQUAL ou seus representantes e os Editores não são responsáveis por qualquer erro(s), validade de dados / conclusões ou violação de direitos autorais em qualquer artigo publicado nesta revista. Os Autores são os únicos responsáveis por todo o conteúdo dos artigos publicados na revista.

The **JOURNAL TMQ - TECHNIQUES METHODOLOGIES AND QUALITY** is a registered trademark with INPI under Nº 614089 and is a peer-reviewed and publicly available journal, being available online at: https://publicacoes.riqual.org

TMQ is indexed at Latindex - Regional system of online information for scientific research journals in the countries of Latin America, the Caribbean, Spain and Portugal.

Disclaimer: RIQUAL or its representatives and the Editors are not responsible for any error(s), validity of data/conclusions or copyright infringements in any article published in this journal. Authors are solely responsible for the entire contents of the paper published in the journal.

FICHA TÉCNICA:

Título: TMQ – TECHNIQUES, METHODOLOGIES AND QUALITY
Número Especial - Metrologia Científica | 2026
ISSN: 2183-0940
Editora: RIQUAL - Rede de Investigadores da Qualidade
Paginação e produção gráfica: RIQUAL
e-mail: info@riqual.org

TECHNICAL DATA SHEET:

Title: TMQ – TECHNIQUES, METHODOLOGIES AND QUALITY,
Special Issue - Scientific Metrology | 2026
ISSN: 2183-0940
Publisher: RIQUAL - Network of Quality Researchers
Pagination and graphic production: RIQUAL
e-mail: info@riqual.org

EDITORES:

António Ramos Pires, Instituto Politécnico de Setúbal, Portugal (Coordenador)

Margarida Saraiva, Universidade de Évora, Portugal

EDITORES ADJUNTOS:

Ana Rolo, Instituto Politécnico de Setúbal, Portugal

Manuel Matos, Instituto Politécnico de Lisboa, Portugal

Teresa Nogueiro, Instituto Politécnico de Portalegre, Portugal

EDITORES CONVIDADOS:

Isabel Godinho, Instituto Português da Qualidade, Portugal

João Alves e Sousa, Instituto Português da Qualidade, Portugal

LISTA DE REVISORES:

Helena Navas, Universidade Nova de Lisboa, Portugal

Manuel Matos, Instituto Politécnico de Lisboa, Portugal

Igor Renato B. Olivares, Universidade de São Paulo, Brasil

CONSELHO EDITORIAL:

Albano Ferreira, Universidade Katyavala Bwila, Angola

Álvaro Rosa, ISCTE-IUL, Portugal

António Ramos Pires, Instituto Politécnico de Setúbal, Portugal

Elsa Simões, Universidade de Cabo Verde, Cabo Verde

Izabela Simon Rampasso, Universidad Católica del Norte, Chile

João Matias, Universidade de Aveiro, Portugal

José Álvarez-Garcia, Universidad da Extremadura, Espanha

José Sarsfield Cabral, Universidade do Porto, Portugal

Keylor Villalobos, Universidad Nacional de Costa Rica, Costa Rica

Luís Lourenço, Universidade da Beira Interior, Portugal

Manuel Suarez-Barraza, Instituto Tecnológico e de Estudos Superiores de Monterrey, México

Margarida Saraiva, Universidade de Évora, Portugal

Maria da Conceição Barbosa Mendes, Universidade Katyavala Bwila, Angola

Maria de la Cruz del Rio-Rama, Universidad de Vigo, Espanha

Martí Casadesús, Universitat de Girona, Espanha

Nelson António, ISCTE-IUL, Portugal

Osvaldo Quelhas, Universidade Federal Fluminense, Brasil

Patrícia Moura e Sá, Universidade de Coimbra, Portugal

Pedro Saraiva, NOVA IMS, Universidade Nova de Lisboa, Portugal

Stella Regina Reis da Costa, Universidade Federal Fluminense, Brasil

Virgílio Cruz Machado, Universidade Nova de Lisboa, Portugal

Arranjar mais dois nomes Br+Pt + macau +lusofonia área?

LISTA AUTORES:

António Capela, Instituto Português da Qualidade, Portugal
Carlos J. Costa, Instituto Português da Qualidade, Portugal
Carlos Pires, Instituto Português da Qualidade, Portugal
Cristina Palma, Instituto Português da Qualidade, Portugal
Elsa Batista, Instituto Português da Qualidade, Portugal
Fernanda Saraiva, Instituto Português da Qualidade, Portugal
Florbela A. Dias, Instituto Português da Qualidade, Portugal
Gonçalo Carvalhal, Instituto Português da Qualidade, Portugal
Isabel Godinho, Instituto Português da Qualidade, Portugal
João Abrantes, Instituto Português da Qualidade, Portugal
João Alves e Sousa, Instituto Português da Qualidade, Portugal
Liliana Eusébio, Instituto Português da Qualidade, Portugal
Luís Correia de Sá, Instituto Português da Qualidade, Portugal
Luís Ribeiro, Instituto Português da Qualidade, Portugal
Maria do Céu Ferreira, Instituto Português da Qualidade, Portugal
Marta Serra, Instituto Português da Qualidade, Portugal
Olivier Pellegrino, Instituto Português da Qualidade, Portugal
Raquel Quendera, Instituto Português da Qualidade, Portugal
Sara Moura, Instituto Português da Qualidade, Portugal
Vitor Cabral, Instituto Português da Qualidade, Portugal

Índice

EDITORIAL **1**

Investigação e Desenvolvimento em Metrologia: Um Pilar Estratégico para a Competitividade e a Soberania Nacional **3**

Isabel Godinho || João Alves e Sousa

A Importância da Metrologia e da Normalização no Desenvolvimento e Compatibilidade de Órgãos-em-Chip – Projeto MFMET II **14**

Elsa Batista || Sara Moura || Marta Serra || Fernanda Saraiva || António Capela || Maria do Céu Ferreira || Isabel Godinho

Metrologia para a Monitorização Ambiental: do pH Marinho aos Microplásticos **30**

Raquel Quendera || Olivier Pellegrino || João Alves e Sousa

A participação do Laboratório Nacional de Metrologia do IPQ no desenvolvimento da Metrologia Elétrica Europeia **40**

Vitor Cabral || Luís Ribeiro || Carlos Pires || Isabel Godinho

Os novos desafios metrológicos na descarbonização e transição para uma economia de baixas emissões gasosas **56**

Florbela A. Dias || Carlos J. Costa || Cristina Palma

Desenvolvimentos no Laboratório Nacional de Metrologia do IPQ no âmbito da transformação digital **71**

João Alves e Sousa || Carlos Pires || Gonçalo Carvalhal || Liliana Eusébio || João Abrantes

Atualidade da Fotometria e Radiometria **88**

Olivier Pellegrino || Raquel Quendera || Luís Correia de Sá

O Papel das Redes Europeias de Metrologia no Desenvolvimento Sustentável e Tecnológico da Europa **97**

Florbela A. Dias || Fernanda Saraiva || Raquel Quendera || João Alves e Sousa

EDITORIAL

No presente número especial da Revista TMQ reunimos 8 artigos centrados na metrologia científica desenvolvida pelos investigadores do Instituto Português da Qualidade.

As contribuições deste número especial provêm do Laboratório Nacional de Metrologia que é responsável pela gestão dos padrões nacionais.

Esperamos que esta iniciativa possa contribuir para alargar a RIQUAL a esta área científica, de relevância única na rastreabilidade das medições. Embora a linha editorial esteja aberta às línguas inglesa e espanhola, os artigos deste número estão escritos em português.

A revisão científica por pares foi limitada, dada a especificidade dos temas e a consequente inexistência de pares com as adequadas competências. Contudo, o conhecimento dos investigadores e da natureza dos projetos europeus, em que decorrem as investigações, são a garantia da maior confiança para os editores.

Os temas são diversos, tendo em conta a universalidade da metrologia nas áreas da qualidade e afins:

1. Investigação e Desenvolvimento em Metrologia: Um Pilar Estratégico para a Competitividade e a Soberania Nacional.
2. A Importância da Metrologia e da Normalização no Desenvolvimento e Compatibilidade de Órgãos-em-Chip – Projeto MFMET II.
3. Metrologia para a Monitorização Ambiental: do pH Marinho aos Microplásticos.
4. A participação do Laboratório Nacional de Metrologia do IPQ no desenvolvimento da Metrologia Elétrica Europeia.
5. Os novos desafios metrológicos na descarbonização e transição para uma economia de baixas emissões gasosas.
6. Desenvolvimentos no Laboratório Nacional de Metrologia do IPQ no âmbito da transformação digital.
7. Atualidade da Fotometria e Radiometria.
8. O Papel das Redes Europeias de Metrologia no Desenvolvimento Sustentável e Tecnológico da Europa.

No primeiro artigo mostra-se que a Metrologia constitui um pilar essencial da Infraestrutura da Qualidade, assegurando o rigor e a rastreabilidade das medições e garantindo a soberania dos padrões nacionais das unidades de medida. A Metrologia Científica é, por natureza, uma atividade de Investigação e Desenvolvimento (I&D). Este artigo destaca as atividades de Investigação e Desenvolvimento metrológico e o forte envolvimento do IPQ em programas europeus.

No segundo artigo, apresenta-se o projeto MFMET II – *Establishing Metrology Standards in Microfluidic Devices*. que propõe protocolos para a medição de grandezas como caudal, pressão, volume, compatibilidade de materiais e controlo da qualidade, além de contribuir para a avaliação da conformidade de dispositivos médicos.

No terceiro artigo discutem-se os objetivos, metodologias e resultados preliminares de dois projetos europeus (SapHTies & PlasticTrace) e perspetiva-se uma abordagem holística à monitorização ambiental, permitindo, não só avaliar a evolução da acidificação oceânica, mas também identificar poluentes emergentes como os nano-e microplásticos.

No quarto artigo destaca-se a participação recente do IPQ em dois projetos, na área das grandezas elétricas, MEMQuD e True8Digit, focando, respetivamente, o desenvolvimento de um novo padrão quântico de resistência elétrica, e de novas arquiteturas de dispositivos de conversão analógico-digital (ADC).

No quinto artigo abordam-se os novos desafios metrológicos na descarbonização e transição para uma economia de baixas emissões gasosas.

No sexto artigo apresentam-se desenvolvimentos no Laboratório Nacional de Metrologia do IPQ no âmbito da transformação digital.

No sétimo artigo evidenciam-se os resultados do projeto RevStdLED (as correlações espectrais podem ter influência nas estimativas das incertezas de medição das grandezas integrais) e do projeto ETraceAbs (atualização das práticas de medição dos diferentes laboratórios de espectrofotometria de NMI europeus).

No oitavo artigo analisa-se o papel das *European Metrology Networks* (EMN) no fortalecimento do desenvolvimento sustentável, tecnológico e económico da Europa.

Este número especial também visou sublinhar a relevância da área da metrologia científica em geral e divulgar as suas atividades e resultados na comunidade de investigadores da qualidade e outras áreas afins.

Os Editores

António Ramos Pires e *Margarida Saraiva*

https://doi.org/10.48552/edesp1-26-3-13

Investigação e Desenvolvimento em Metrologia: Um Pilar Estratégico para a Competitividade e a Soberania Nacional

Isabel Godinho
igodinho@ipq.pt
Instituto Português da Qualidade, I. P.
ORCID: 0000-0003-1624-4598

João Alves e Sousa
jasousa@ipq.pt
Instituto Português da Qualidade, I. P.
ORCID: 0000-0002-9630-0854

Resumo:
O Instituto Português da Qualidade, I. P. (IPQ), enquanto Instituição Nacional de Metrologia (INM), coordena o Subsistema Nacional da Metrologia, que integra as vertentes Científica, Aplicada e Legal [1]. A Metrologia constitui um pilar essencial da Infraestrutura da Qualidade, assegurando o rigor e a rastreabilidade das medições e garantindo a soberania dos padrões nacionais das unidades de medida - uma função consagrada na Constituição da República Portuguesa (alínea o) do artigo 165.º).
A Metrologia Científica e Aplicada é, por natureza, uma atividade de Investigação e Desenvolvimento (I&D). O desenvolvimento de novas capacidades metrológicas é determinante para que Portugal acompanhe o avanço tecnológico, fortaleça a sua competitividade e promova o desenvolvimento económico e social.
Este artigo destaca as atividades de Investigação e Desenvolvimento metrológico e o forte envolvimento do IPQ em programas europeus, crucial para reforçar a soberania tecnológica e impulsionar a competitividade nacional em setores e áreas estratégicas da sociedade, tais como a indústria, a digitalização, a saúde, o ambiente, a energia e as tecnologias quânticas.

Palavras-chave: Investigação e Desenvolvimento, Metrologia, Padrões Nacionais, Rastreabilidade.

Abstract:
The Portuguese Institute for Quality, I. P. (IPQ), as the National Metrology Institution (INM), coordinates the National Metrology Subsystem, which integrates the Scientific, Applied, and Legal aspects. Metrology constitutes an essential pillar of the Quality Infrastructure, ensuring the accuracy and traceability of measurements and guaranteeing the sovereignty of the national standards of measurement units - a function enshrined in the Constitution of the Portuguese Republic (paragraph o) of article 165). Scientific and Applied Metrology is, by nature, a Research and Development (R&D) activity. The development of new

metrological capabilities is crucial for Portugal to keep pace with technological advances, strengthen its competitiveness, and promote economic and social development. This article highlights metrological Research and Development activities in European programs, crucial for strengthening technological sovereignty and boosting national competitiveness in strategic sectors and areas of society, such as industry, digitalization, health, environment, energy, and quantum technologies.

Keywords: Research and Development, Metrology, National Standards, Traceability

1. O IPQ e a Infraestrutura Nacional de Metrologia

O IPQ, enquanto Instituição Nacional de Metrologia (INM), tem como missão assegurar a soberania dos padrões nacionais das unidades de medida e o controlo metrológico dos instrumentos de medição, necessários à indústria e à sociedade portuguesa em geral. A sua atividade, enquadrada pelas suas atribuições, assenta na visão estratégica da Metrologia em Portugal, considerando a evolução técnico-científica aliada à materialização dos padrões nacionais, ao Sistema Internacional (SI) de unidades, às tecnologias quânticas e à transformação digital da Metrologia em todas as suas vertentes.

Sendo uma das principais atribuições do IPQ realizar e manter os padrões nacionais das unidades de medida ao mais elevado nível de rigor e exatidão, suportando a rastreabilidade metrológica (Figura 1) de toda a infraestrutura nacional de medição, esses objetivos exigem a participação do IPQ em atividades e projetos de investigação e desenvolvimento científico (I&D) com outros institutos congéneres, com a academia e com os centros de investigação, enquadrada pela estratégia global definida pelo IPQ para a Metrologia nacional.

Figura 1 – Pirâmide de Rastreabilidade Metrológica

Por outro lado, as medições fazem parte do nosso quotidiano, ainda que a sua importância seja muitas vezes esquecida ou subestimada. Sustentam, de modo transversal, os principais setores da economia nacional, incluindo a indústria, os reguladores, a academia e as áreas prioritárias, tais como a saúde, a energia, o ambiente e a indústria, sendo o desenvolvimento de novas capacidades metrológicas essencial para que Portugal explore as tecnologias emergentes, aumente a produtividade e a competitividade na indústria e nas empresas, sendo este desígnio mobilizador da Metrologia ao serviço da economia portuguesa.

A Metrologia, enquanto *ciência da medição e das suas aplicações*, desempenha um papel fundamental na economia nacional e nas suas relações com o mundo, nomeadamente, no comércio internacional, garantindo que os produtos estejam em conformidade com as normas internacionais, eliminando dessa forma as barreiras comerciais, e promovendo assim a livre circulação de bens e serviços. É igualmente essencial no apoio à inovação e ao desenvolvimento de novos produtos e tecnologias, bem como no acompanhamento dos avanços científicos e tecnológicos, nomeadamente, no âmbito das tecnologias quânticas, da transição digital, da saúde, da energia e do ambiente. Enquanto instrumento de regulação, é também um fator crucial para a segurança e a proteção do consumidor, já que, através da atividade de controlo metrológico legal se garante que os produtos e os serviços estão em plena conformidade com a legislação e regulamentação do país em todo o território nacional.

As funções desempenhadas pela INM são de natureza muito diversa, nomeadamente de ***medição*** (no que respeita às matérias no âmbito das unidades de medida, métodos e instrumentos de medição e calibração de instrumentos de medição), ***executiva*** (das atribuições legais e atividades decorrentes da legislação metrológica, na realização de padrões nacionais das unidades de medida, de calibrações e de ensaios metrológicos), de ***coordenação*** na realização de comparações interlaboratoriais (a nível nacional ou internacional), de ***investigação e desenvolvimento*** (atividades de I&D considerando a realização dos padrões nacionais e a produção e certificação de materiais de referência) e de ***cooperação externa*** (ao nível das organizações e entidades regionais e internacionais de Metrologia, em particular enquanto Estado-Membro da Convenção do Metro e signatário do Acordo de Reconhecimento Mútuo do Comité Internacional de Pesos e Medidas). No âmbito legal, são permanentemente considerados aspetos que contribuem para melhorar e otimizar a gestão da atual cadeia de controlo metrológico legal, através de um maior acompanhamento das entidades reconhecidas e qualificadas pelo IPQ para este exercício delegado, da disponibilização e da prestação de serviços de calibração, garantindo a rastreabilidade às entidades qualificadas para o controlo metrológico de instrumentos de medição, utilizados nos diversos setores de atividade

económica e que abrange um universo de alguns milhares de empresas e cidadãos em geral, beneficiando dos serviços prestados por aqueles e que tem como propósito último a defesa dos direitos dos cidadãos e dos operadores económicos.

Os desenvolvimentos tecnológicos verificados na Metrologia Científica são acompanhados através da participação nos trabalhos internacionais e europeus, nomeadamente no âmbito da *European Partnership on Metrology* (EPM) da EURAMET (Associação Europeia dos Laboratórios Nacionais de Metrologia).

Estando a evolução do conhecimento associada ao grau de sofisticação tecnológica a nível dos padrões primários, torna-se cada vez mais necessário acompanhar tecnicamente os desafios e os progressos metrológicos, aumentando a capacidade e os meios de medição nacionais, suportados por padrões de elevada exatidão, rastreados, criando competência para as emergentes exigências da sociedade, provendo assim o país dos recursos e dos meios necessários à qualidade de vida e ao desenvolvimento económico nacional.

A participação nacional em projetos europeus de I&D, tem permitido acompanhar os avanços tecnológicos que têm ocorrido na última década, de uma forma muito acentuada. Essa colaboração com outros Institutos congéneres tem permitido a transferência de conhecimento e o desenvolvimento de novas capacidades metrológicas, tais como:

- Metrologia fundamental: no âmbito da materialização das unidades do Sistema Internacional de unidades, na investigação e desenvolvimento de novos padrões e capacidades ao nível dos efeitos quânticos e da nanometrologia.

- Saúde: aplicações de micro caudal e nano volume, e.g., microchips, bombas perfusoras e micropipetas, em particular nos domínios da neonatologia, oncologia e tratamento da dor, rastreabilidade generalizada de toda a instrumentação, no âmbito da medicina personalizada ou tratamento automático de imagem, para além de trabalho em comissões sectoriais de normalização. O IPQ tem sido líder, a nível europeu, em algumas destas áreas, particularmente no que concerne ao desenvolvimento de novas aplicações de micro caudal.

- Ambiente: pH oceânico, economia azul, escala unificada de pH, análise de gases, monitorização ambiental, micro plásticos, e captura, transporte, utilização e armazenamento de carbono.

- Energia: energias limpas, como é o caso das baterias e dos painéis fotovoltaicos, análise do ciclo de vida e utilização de Inteligência Artificial para avaliar a degradação

e o envelhecimento, conforto térmico, qualidade do ar, acústica, rastreabilidade instrumental. O IPQ tem coordenado a Rede Europeia Metrológica (EMN) para Energias Limpas da EURAMET, que tem como principal objetivo o desenvolvimento do quadro metrológico europeu para a geração e a utilização de fontes de energia renováveis, bem como no apoio à tomada de decisão e a projetos no âmbito do Pacto Ecológico Europeu.

- Indústria: Indústria4.0, fábricas do futuro, redes de sensores com calibração em tempo real, *data fusion*, *machine learning.*

- Transformação Digital: evolução integrada dos processos, serviços e modelos de atuação, potenciando a criação de valor para a sociedade. Inclui a adoção de Certificados de Calibração Digitais (*Digital Calibration Certificates*), de Planos de Gestão de Dados (*Data Management Plan*), bem como a utilização de Inteligência Artificial e Aprendizagem Automática, para suporte a novos serviços e metodologias no domínio da metrologia científica, aplicada e legal, nomeadamente na análise, validação, interoperabilidade e gestão de grandes quantidades de dados.

Dos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU, que representam a visão partilhada da humanidade para um futuro baseado na sustentabilidade ambiental e social e de um justo e inclusivo crescimento económico, o objetivo 17 sobre as "Parcerias" reconhece a importância da colaboração entre os estados, entre os setores público e privado, entre a investigação científica e os decisores políticos.

Figura 2 – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)

Imagem adaptada de https://www.undp.org

2. Investigação e Desenvolvimento em Metrologia: Impulsionando a Competitividade Europeia

A atividade de I&D do IPQ, sob tutela conjunta dos Ministérios da Economia e Coesão Territorial e da Ciência, fundamental para posicionar Portugal na vanguarda científica, apoiando as grandes transições digital e verde e reforçando a Infraestrutura Nacional da Qualidade, é reconhecida a nível europeu e internacional, destacando-se pela:

- Participação e Coordenação de projetos em Programas Europeus de Investigação, nomeadamente o *European Partnership on Metrology*, no âmbito do Horizonte Europa, coordenado pela EURAMET, e a *European Quantum Communication Infrastructure* - EuroQCI, coordenado pela União Europeia , no âmbito da *Quantum Technologies Flagship*. O IPQ integra atualmente 14 projetos de I&D do programa EPM, em áreas estratégicas como a Digitalização e a Indústria 4.0, a Saúde, o Ambiente, a Energia e as Tecnologias Quânticas.
- Integração em Redes Europeias de Metrologia, participando atualmente em sete redes EMN: *Climate and Ocean Observation, Advanced Manufacturing, Energy Gases, Mathmet, Pollution Monitoring, Quantum Technologies* e *Clean Energy*.
- Produção científica relevante, com múltiplas publicações em revistas e conferências internacionais *peer-reviewed*, e contributos para a elaboração de guias e normas técnicas, evidenciando o rigor e a excelência científica nacional na Metrologia.

A participação do IPQ em programas de I&D em Metrologia é fundamental para assegurar medições fiáveis, que constituem a base invisível, mas essencial, da inovação, da regulação e do comércio justo. O investimento em Metrologia assume-se como um imperativo estratégico para a Europa, uma vez que a capacidade de desenvolver, validar e regular tecnologias de forma autónoma depende diretamente da disponibilidade de métodos de medição de elevada exatidão e com rastreabilidade.

Salienta-se a participação nacional em projetos de cooperação multidisciplinares, no desenvolvimento de ferramentas para gestão de grandes volumes de dados e em programas europeus de I&D, abordando temáticas estratégicas para a Metrologia e para a economia nacionais. Esta participação apoia a disponibilização de soluções metrológicas integradas e adequadas aos *stakeholders*, incluindo, entre outros, os seguintes projetos nas referidas áreas:

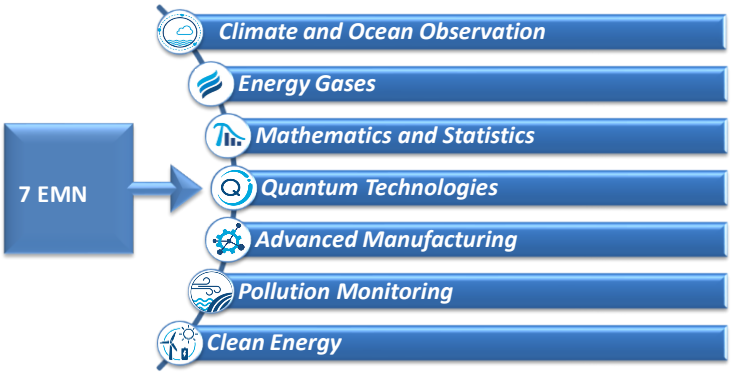
- Saúde*: Harmonisation, update and implementation of standards related to radiation protection dosimeters for photon radiation; Establishing European traceability for medical measuring devices through optical absorbance liquid filters digitizer; Establishing metrology standards in microfluidic devices.*
- Ambiente: *Metrology support for carbon capture utilisation and storage, Metrological traceability of measurement data from nano to small-micro plastics for a greener environment and food safety; Metrology to Support Ammonia Use in Emerging Applications; Support for standardized seawater pHT measurements in support of international and European climate strategies.*
- Digitalização: *Fundamental principles of sensor network metrology; Developing a metrological framework for assessment of image based artificial intelligence systems for disease detection; Uncertainty quantification for machine learning models applied to photoplethysmography signals; Development of Digital Calibration Certificates.*
- Indústria: *Towards a True 8-Digit Digitiser*, promovendo o desenvolvimento de padrões de elevada exatidão em digitalização industrial.
- Energia: através da participação nos projetos *New calibration standards and methods for radiometry and photometry after phaseout of incandescent lamps* e *Support for a European Metrology Network for Clean Energy.*
- Tecnologias Quânticas: desenvolvimento de padrões quânticos para nanometrologia no âmbito do projeto *Memristive Devices as Quantum Standards for Nanometrology* [2] e no PTQCI (Portuguese Quantum Communicaton Infrastructure - https://ptqci.pt/) para a implementação de uma infraestrutura de comunicação quântica ultra segura, através de ligações terrestres, utilizando tecnologias de encriptação quânticas do tipo *Quantum Key Distribution*.

A relevância estratégica destes programas de investigação é evidenciada pelo seu elevado retorno económico. Estudos independentes demonstram que, nos programas de I&D antecessores, cada milhão de euros de financiamento da União Europeia gerou mais de quatro milhões de euros em faturação para a economia, resultantes da comercialização de produtos e serviços novos ou significativamente melhorados.

O IPQ integra atualmente 7 Redes Europeias de Metrologia (Figura 3), nomeadamente: *Climate and Ocean Observation*, *Energy Gases*, *Mathematics and Statistics*, *Quantum Technologies*, *Advanced Manufacturing*, *Pollution Monitoring* e *Clean Energy*

(https://www.euramet.org/european-metrology-networks/clean-energy) esta última coordenada pelo IPQ, que atuam como plataformas estruturadas para o alinhamento e a colaboração no desenvolvimento de serviços metrológicos coordenados, incluem uma base mais alargada de partes interessadas e maior participação da academia e da indústria, bem como a coordenação de atividades relacionadas com os serviços de calibração e com a Infraestrutura da Qualidade a nível europeu.

Figura 3 – Participação Nacional nas *European Metrology Networks* da EURAMET.



A participação ativa nestas redes e projetos possibilita a transferência de conhecimento científico, o acesso a formação especializada, incluindo iniciativas como o *Research Mobility Support*, o *Mentoring Scheme Award* e os *Training Events*, no âmbito projeto CABUCO (https://cabuco.cmi.gov.cz/) da EURAMET, e o fortalecimento das capacidades nacionais, em estreita consonância com as prioridades estratégicas da Europa.

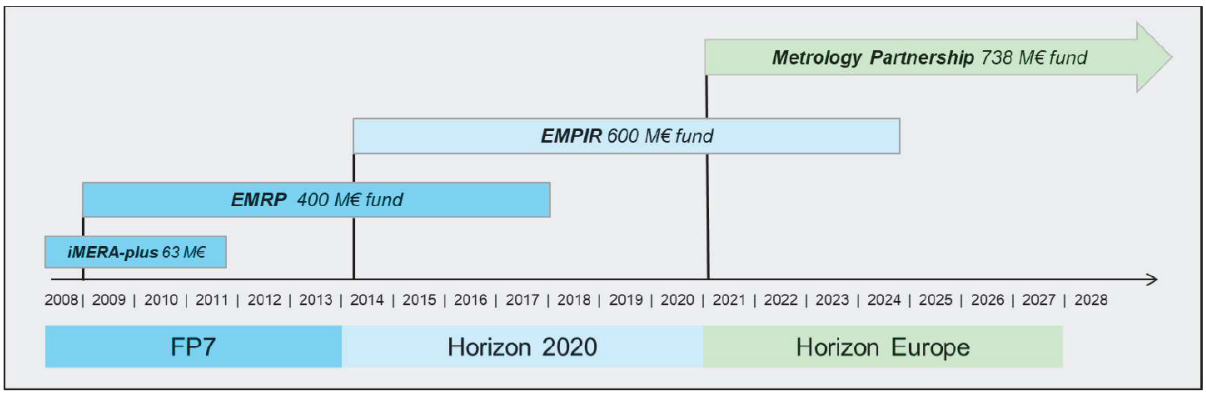
3. Articulação com a Estratégia da EURAMET e a I&D Europeia

A colaboração europeia em Metrologia é vital para a competitividade e resiliência, estando o IPQ envolvido em programas europeus de colaboração em Metrologia desde a 2007, incluindo iniciativas como o i-MERA-Plus, o *European Metrology Research Programme* - EMRP e *European Metrology Research Programme* – EMPIR (Figura 4). Atualmente, esta participação ocorre no âmbito da Parceria Europeia em Metrologia, integrada no programa Horizonte Europa, uma iniciativa estabelecida ao abrigo do Artigo 185.º do Tratado sobre o Funcionamento da União Europeia (TFUE) e coordenada pela EURAMET. A EPM é um programa de investigação e inovação de 738 milhões de euros, promovendo soluções metrológicas integradas, financiado pelo *Horizon Europe* em cerca de 300 milhões de euros e pelos Estados-Membros da EURAMET no valor restante. Reúne especialistas da comunidade

metrológica e partes interessadas de diversas áreas e visa promover a excelência científica e fortalecer a inovação e a competitividade europeia, através de projetos e de ações de coordenação, com foco em temas como a saúde, energia, o ambiente e a transformação digital.

De acordo com um estudo recentemente apresentado [3], a EPM tem como objetivo potenciar pelo menos 50 milhões de euros de faturação anual, a nível europeu, considerando a fabricação de novos e melhorados produtos e serviços. Os programas antecessores EMRP e EMPIR, já demonstraram um impacto económico significativo, com uma média anual de 179 milhões de euros de retorno.

Figura 4 – Programas de I&D da EURAMET, financiados pela UE



A agenda estratégia da EURAMET para 2030-2040 [4, 5] articula as necessidades da Metrologia em quatro áreas principais, alinhadas com o *European Competitiveness Compass* e o *Green Deal*:

- Indústria Competitiva e Soberana: com foco na disponibilização de soluções para as tecnologias habilitadoras essenciais, como a IA, tecnologias quânticas, e materiais avançados, visando a soberania tecnológica.
- Transição para uma Europa Sustentável e Resiliente: prioriza medições rastreáveis para a descarbonização, a transição energética (gases neutros em carbono, *smart grids*), a economia circular (*life cycle analysis*) e a monitorização ambiental (poluentes, variáveis climáticas).
- Saúde: visa o reforço dos sistemas de saúde considerando a aplicação da metrologia em diagnósticos, terapias e dispositivos médicos, garantindo rastreabilidade metrológica, a qualidade e a integridade dos dados utilizados em sistemas e aplicações

de IA de alto risco, em conformidade com o EU AI Act e com os regulamentos MDR e IVDR.

- Infraestruturas e Coesão: visa promover o desenvolvimento coordenado de infraestruturas, o reforço da capacitação dos Institutos Nacionais de Metrologia e o aprofundamento da cooperação a integração com outras entidades da Infraestrutura da Qualidade (Normalização, Metrologia Legal, Acreditação).

4. Conclusões e Perspetivas Futuras

A Metrologia constitui um pilar essencial da Infraestrutura da Qualidade, enquanto garante da soberania dos padrões nacionais, tendo um papel insubstituível para o desenvolvimento técnico-científico do país, e dinamizador da economia e da competitividade nacional, vital para enfrentar desafios globais, como as alterações climáticas e a concorrência internacional.

O forte envolvimento do IPQ em I&D, através da Parceria Europeia em Metrologia, das Redes Europeias de Metrologia e de programas europeus, não só cumpre o mandato de soberania nacional, mas assegura também que Portugal permaneça na vanguarda tecnológica e competitiva, disponibilizando soluções para uma indústria mais resiliente, apoiando a transição verde e digital, fortalecendo os sistemas de saúde e promovendo a coesão entre os Institutos Nacionais de Metrologia.

Como visão estratégica para enfrentar desafios futuros e em plena articulação com a Agenda Europeia da Metrologia para 2030-2040, é essencial ter como foco o desenvolvimento de áreas cruciais, tais como: indústria competitiva, transição sustentável, saúde e coesão de infraestruturas. A Metrologia é fundamental para a competitividade e a inovação da indústria europeia, permitindo enfrentar os desafios globais, fortalecer ecossistemas industriais e promover a coesão e a competitividade da Europa, sendo a excelência científica, a cooperação entre INM, academia, reguladores e decisores políticos essencial para enfrentar os desafios e alcançar estes objetivos.

A Metrologia, disciplina transversal que serve múltiplos domínios da ciência e tecnologia, é um agente dinamizador insubstituível da economia, da competitividade e da soberania nacional. A atividade de I&D do IPQ é um fator decisivo para consolidar a infraestrutura tecnológica e científica do país e assegurar que se mantenha na vanguarda da medição global e garantir a sustentabilidade das capacidades nacionais e ser um agente dinamizador da economia nacional, alinhado com a visão de uma Europa mais forte, soberana e resiliente.

Referências

[1] Decreto-Lei n.º 71/2012, de 21 de março, Diário da República, 1.ª série - N.º 58 - 21 de março de 2012

[2] Gianluca Milano, Xin Zheng, Fabio Michieletti, Giuseppe Leonetti, Gabriel Caballero, Ilker Oztoprak, Luca Boarino, Özgür Bozat, Luca Callegaro, Natascia De Leo, Isabel Godinho, Daniel Granados, Itir Koymen, Mariela Menghini, Enrique Miranda, Luís Ribeiro, Carlo Ricciardi, Jordi Suñe, Vitor Cabral, Ilia Valov, (2025). *A quantum resistance memristor for an intrinsically traceable International System of Units standard, Nature Nanotechnology* volume 20, pages1884–1890 (2025), DOI: 10.1038/s41565-025-02037-5.

[3] Katherine Stacey, Juliette Smillie and Gary Morley, (2025). *Quantify the economic benefit* resulting from EURAMET's metrology research programes. ISBN 978-3-942992-99-2.

[4] EURAMET e.V. (2026-01-26).). *EURAMET 2030 STRATEGY*. ISBN 978-3-942992-67-1, Retrieved from https://www.euramet.org/about-euramet/strategy-2030

[5] Jörn Stenger, Maguelonne Chambon, Miruna Dobre, Hans Arne Frøystein, Robert Gunn, Maros Kamensky, Dolores del Campo, Anne Trumpfheller, Mikko Merimaa (2026-01-26). *Metrology for a stronger Europe – A European Metrology Agenda for the next decade*. ISBN 978-3-942992-87-9. Retrieved from https://www.euramet.org/about-euramet/metrology-for-a-stronger-europe-white-paper

Authors Profiles

Isabel Godinho has a degree in Physics from the Faculty of Sciences of the University of Lisbon and a PhD in Physics from the same University. She is presently Director of the Metrology Department of IPQ and responsible for the national metrology system, in scientific, applied and legal metrology. She is currently EURAMET delegate and European Partnership on Metrology representative and national representative on the OIML and BIPM. Her research interest is in metrology, mainly in the fields of electrical, quantum metrology and acceleration.

João Alves e Sousa is a Principal Researcher and Director of the National Metrology Laboratory of Instituto Português da Qualidade. He has a PhD in Mechanical Engineering related to Energy Conservation in High Temperature Systems, and he is presently the Chair of the European Metrology Network for Clean Energy. He has more than 100 publications on peer review journals and international conferences and is currently the Chair of the IMEKO Technical Committee TC7 – Measurement Science.

https://doi.org/10.48552/edesp1-26-14-29

A Importância da Metrologia e da Normalização no Desenvolvimento e Compatibilidade de Órgãos-em-Chip – Projeto MFMET II

Elsa Batista
ebatista@ipq.pt
Instituto Português da Qualidade
https://orcid.org/0000-0002-2239-4907

Sara Moura
smoura@ipq.pt
Instituto Português da Qualidade

Marta Serra
mserra@ipq.pt
Instituto Português da Qualidade

Fernanda Saraiva
fsaraiva@ipq.pt
Instituto Português da Qualidade
https://orcid.org/0009-0008-2068-5680

António Capela
acapela@ipq.pt
Instituto Português da Qualidade

Maria do Céu Ferreira
mcferreira@ipq.pt
Instituto Português da Qualidade
https://orcid.org/0000-0002-6651-3058

Isabel Godinho
igodinho@ipq.pt
Instituto Português da Qualidade
https://orcid.org/0000-0003-1624-4598

Resumo:

A crescente utilização de órgãos-em-chip na biomedicina, indústria farmacêutica e química exige padrões de medição rigorosos. Estes dispositivos simulam funções de órgãos humanos em ambientes controlados, sendo essenciais para testes de medicamentos, estudos toxicológicos e investigação biomédica. Contudo, a falta de normas específicas limita a fiabilidade e a rastreabilidade dos resultados.

O projeto MFMET II – *Establishing Metrology Standards in Microfluidic Devices*, financiado pela Comissão Europeia através do programa *European Partnership on Metrology* (EPM) do Horizonte Europa, visa desenvolver normas e metodologias

metrológicas para dispositivos microfluídicos, com foco na tecnologia de órgãos-em-chip. Coordenado pelo Instituto Português da Qualidade (IPQ), reúne 19 parceiros, incluindo Institutos Nacionais de Metrologia (INM), Universidades, Centros de Investigação e Indústria.
O projeto propõe protocolos para a medição de grandezas como caudal, pressão, volume, compatibilidade de materiais e controlo da qualidade, além de contribuir para a avaliação da conformidade de dispositivos médicos. Também prevê padrões de transferência microfluídicos para a calibração e validação. Os resultados apoiarão normas internacionais, como as do comité ISO/TC 48/WG 3, garantindo precisão, reprodutibilidade e segurança. Ao promover a Normalização e a Metrologia, o MFMET II reforça a confiança nos órgãos-em-chip e acelera a sua integração em aplicações clínicas e industriais.

Palavras-chave: Metrologia, microfluídica, normalização, órgãos-em-chip

Abstract:
The growing use of organ-on-chip technology in biomedicine, the pharmaceutical and chemical industries demand rigorous and high-quality measurement standards. These devices simulate human organ functions in controlled environments, making them essential for drug testing, toxicological studies, and biomedical research. However, the lack of specific standards limits their reliability and traceability.
The MFMET II – Establishing Metrology Standards in Microfluidic Devices project, funded by the European Commission through the European Partnership on Metrology (EPM) under Horizon Europe, aims to develop standards and metrological methodologies for microfluidic devices, with a special focus on organ-on-chip technology. Coordinated by the Portuguese Institute for Quality (IPQ), the project brings together 19 partners, including National Metrology Institutes, Universities, Research Centers, and Industry.
The project proposes protocols to measure parameters such as flow rate, pressure, volume, material compatibility, and quality control, while also contributing to the conformity assessment of medical devices. It also foresees the creation of integrated microfluidic transfer standards to serve as references for calibration and validation. The results will support international standards, such as those of the ISO/TC 48/WG 3 committee, ensuring accuracy, reproducibility, and safety. By promoting standardization and metrology, MFMET II strengthens confidence in organ-on-chip technology and accelerates its integration into clinical and industrial applications.

Keywords: Metrology, microfluidics, organs-on-chip, standardization

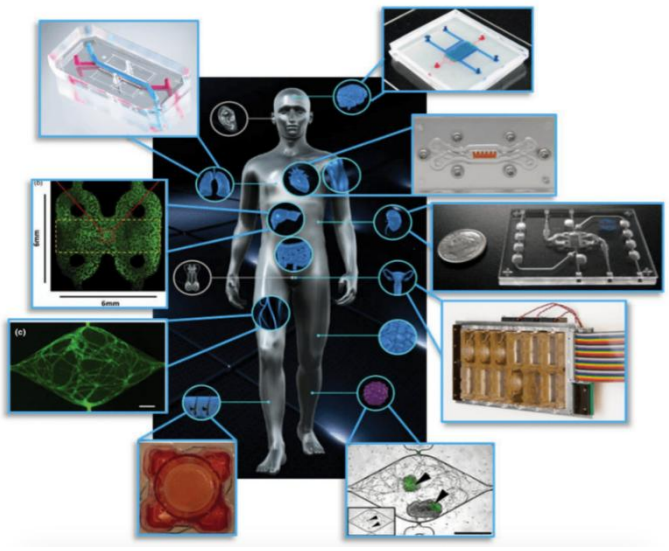
1. Introdução

A tecnologia microfluídica é utilizada para criar uma grande variedade de produtos miniaturizados, desde microreatores para a indústria química até dispositivos Orgãos-em-Chip (OoC) e de diagnóstico médico. Um dispositivo microfluídico contém microcanais, câmaras, bombas, válvulas, sensores e atuadores para manipular pequenos volumes de fluido. Os recentes

avanços nas técnicas de microfabricação e a relação custo-benefício da microfluídica permitiram um crescimento rápido desta área nas últimas duas décadas. Como resultado, a microfluídica está a tornar-se uma tecnologia amplamente utilizada para melhorar a qualidade e a sensibilidade de processos críticos em microssistemas.

Inicialmente, foi concebida como tecnologia central para sistemas completos de análise química, incluindo preparação, separação e análise de amostras, tudo integrado no mesmo microdispositivo. Atualmente, encontra aplicações significativas na área da saúde, incluindo alternativas aos testes em animais (sistemas microfisiológicos ou OoC) [1] e diagnóstico médico. As aplicações diagnósticas vão desde testes *Point-of-Care* (POC) até diagnósticos laboratoriais centrais [2]. O desenvolvimento de OoC é impulsionado pela necessidade de substituir testes em animais (3R: Redução, Refinamento, Substituição) e fortemente apoiado pela decisão da FDA (*Food and Drug Administration*), em 2022, de permitir o uso destes dispositivos para testes de medicamentos comerciais. Um OoC (figura 1) é um sistema microfisiológico que reproduz um ou mais aspetos da dinâmica, funcionalidade, e resposta fisiológica de um órgão *in vivo*, com vários tipos de células integradas numa plataforma não biológica. A tecnologia dos OoC pode ser redimensionada para aplicações industriais facilitando os processos de fabrico de fármacos em larga escala. Esta escalabilidade apoia a transição da atividade de investigação para aplicações práticas no desenvolvimento de fármacos. Proporciona um modelo humano mais preciso, reduzindo a dependência de testes em animais, o que melhora a relevância dos testes pré-clínicos para a fisiologia humana.

Figura 1 – Exemplos de Órgãos-em-Chip



Fonte: D. Huh, H. Kim, J. Fraser, et al. Microfabrication of human organs-on-chips. Nature Protocols, 2135–2157 2013.

O principal mercado para modelos comerciais de OoC é a modelação de doenças e o desenvolvimento de fármacos, tendo as grandes empresas farmacêuticas como principais utilizadores. A investigação nesta área cresceu rapidamente, com uma taxa de crescimento anual composta (CAGR) de 70 % entre 2015 e 2020, prevendo-se que continue a crescer a uma CAGR de 31 % entre 2020 e 2030, atingindo vendas totais de 1,6 mil milhões de euros [3]. No entanto, as empresas estão a comercializar modelos OoC e a desenvolver sistemas microfluídicos, culturas celulares e métodos de leitura sem normas de teste para validar etapas básicas de fabrico, desempenho, compatibilidade de materiais e segurança [4]. Este problema está a ser abordado no âmbito do ISO/TC 276 - Biotecnologia, com vários documentos em preparação. A normalização pode ajudar a definir terminologia comum, especificações, protocolos e critérios para conceção, fabrico, caracterização, validação, operação, análise e reporte de sistemas microfluídicos. Pode também permitir o desenvolvimento de materiais de referência, procedimentos de controlo da qualidade, boas práticas, diretrizes e enquadramentos regulamentares. É necessária harmonização das características de desempenho para diferentes classes de componentes microfluídicos, incluindo condições de teste e protocolos de medição de grandezas.

Até agora, cada produto microfluídico é testado e validado pelo fabricante segundo o seu próprio protocolo, dificultando a utilização dessas informações para futuras iterações de design e tornando-as muitas vezes não reprodutíveis. Ao estabelecer uma base comum para o desenvolvimento da microfluídica, a normalização pode estimular a criação de novos modelos e plataformas. Esta normalização está atualmente a ser efetuada no ISO/TC 48/WG 3 – Dispositivos microfluídicos, com a publicação recente das normas ISO 22916:2022 - *Microfluidic devices — Interoperability requirements for dimensions, connections and initial device classification,* ISO 10991:2023 - *Microfluidics — Vocabulary* e ISO/TS 6417:2025 - *Microfluidic pumps — Symbols and performance communication*. No entanto, este grupo de trabalho necessita do apoio da comunidade metrológica para desenvolver normas mais específicas para medições de grandezas, controlo da qualidade e qualificação de dispositivos/sistemas microfluídicos.

À medida que a área da microfluídica continua a crescer, torna-se cada vez mais evidente que a relativa falta de normas está a impedir tanto a implementação como a inovação, atrasando o desenvolvimento industrial. A ausência de normas afeta negativamente a reprodutibilidade, a compatibilidade e a comparabilidade dos resultados, dificultando a promoção do uso ativo destes dados por empresas e entidades reguladoras. Além disso, a falta de normas também

prejudica a interoperabilidade entre diferentes componentes e sistemas microfluídicos, atrasando a inovação, a produção em escala e a democratização dos sistemas microfluídicos. No domínio dos Órgãos-em-Chip, a Normalização e a Metrologia são fundamentais para aumentar a fiabilidade, validação e reprodutibilidade dos dispositivos recentemente desenvolvidos [5].

A comunidade microfluídica está a trabalhar arduamente para desenvolver normas que visam: reduzir o tempo de transição para o mercado, diminuir custos, melhorar a qualidade dos dispositivos miniaturizados e aperfeiçoar métodos de fabrico. No entanto, ainda não foram estabelecidos métodos de ensaio normalizados para validar etapas básicas de fabrico, desempenho e segurança dos dispositivos microfluídicos [6].

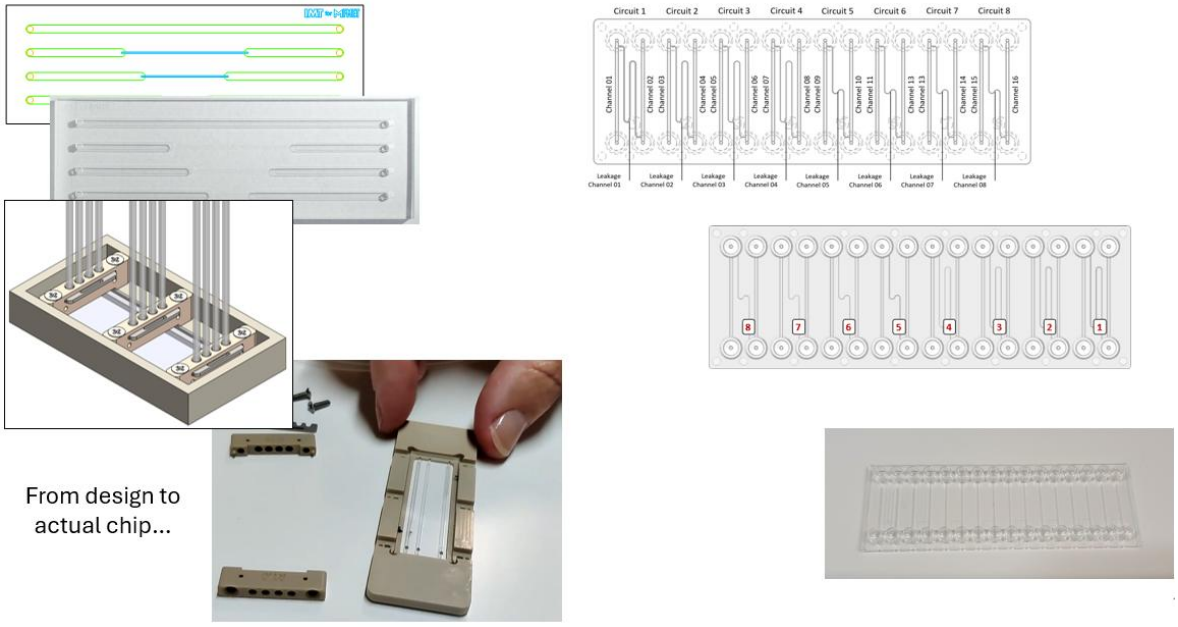
2. Projeto MFMET

O projeto EMPIR 20NRM02 MFMET – *Establishing Metrology Standards in Microfluidic Devices* foi criado para definir os desafios iniciais da Metrologia e Normalização na área microfluídica e tomar medidas para os superar. Foram definidas especificações e diretrizes metrológicas dedicadas para garantir medições precisas e reprodutíveis de diferentes grandezas [7]. O projeto MFMET terminou em maio de 2024, com uma duração de 3 anos e coordenado pelo IPQ. Participaram 8 Institutos Nacionais de Metrologia, 1 Universidade e 7 parceiros Industriais, sendo a Associação Microfluídica (MFA), o principal *stakeholder*. Nos primeiros dois anos e meio, os valiosos conteúdos *online* deste projeto foram visualizados 1350 vezes por mês e os documentos produzidos foram descarregados mais de 2000 vezes. Este projeto foi financiado pela EURAMET, associação europeia de INM no âmbito do EMPIR - *European Metrology Programme for Innovation and Research*.

O trabalho desenvolvido neste projeto permitiu criar protocolos para a medição de caudal, resistência ao caudal e volume em dispositivos microfluídicos. Estes protocolos foram implementados em vários INM que participaram no projeto. O projeto EMPIR 20NRM02 MFMET também resultou na publicação de numa nova Capacidade de Medição e de Calibração (CMC) em 2024 pelo IPQ na caracterização do volume de canais microfluídicos (estudo piloto EURAMET 1613). O estado da arte das metodologias e intervalos de medição para várias grandezas de caudal foi investigado no referido projeto, abrangendo nano/micro/meso/macrofluídica, tendo sido identificadas condições operacionais, protocolos e necessidades existentes. A informação foi disponibilizada ao público sob a forma de diretrizes, nomeadamente o guia de calibração EURAMET n.º 27 [8] e o guia técnico 4 [9].

Foram concebidos e fabricados dois tipos de padrões de transferência microfluídicos para testar os protocolos desenvolvidos no projeto EMPIR 20NRM02 MFMET**,** um feito de vidro e outro de TOPAS® COC – *Cyclic Olefin Copolymer* (Copolímero Olefínico Cíclico), é um É um material plástico avançado produzido pela TOPAS Advanced Polymers. Trata-se de um copolímero de norborneno com etileno, altamente puro, transparente e com propriedades únicas, muito utilizado em microfluidica.

Figura 2 – Chips desenvolvidos no projeto MFMET



Estes padrões de transferência estão agora a ser utilizados por fabricantes de dispositivos microfluídicos e laboratórios acreditados em todo o mundo para validar instrumentação/protocolos de medição de propriedades de dispositivos microfluídicos, como dimensões dos canais, resistência ao fluxo e deteção de fugas.

Um dos estudos efetuados no chip de vidro pelo IPQ foi a medição da rugosidade da superfície e de ondulação da textura da superfície que possuía laminas com áreas de ligação separadas por dois canais com profundidades de 100 µm entre o fundo dos canais e o topo da área de ligação, utilizando um rugosímetro Mahr MarSurf GD 140, que por contacto, através da varredura da superfície, a uma velocidade e força constantes, forneceu informações quantitativas. Como as lâminas foram produzidas no âmbito de investigação, não existiam indicações das suas especificações, consequentemente, as definições para avaliação da textura da superfície do perfil basearam-se na norma ISO 21920-3:2021 - *Geometrical product*

specifications (GPS) — Surface texture: Profile, definindo-se como parâmetros de rugosidade de interesse o:

Ra – Altura média aritmética

Rt – Altura total

Rz – Altura máxima

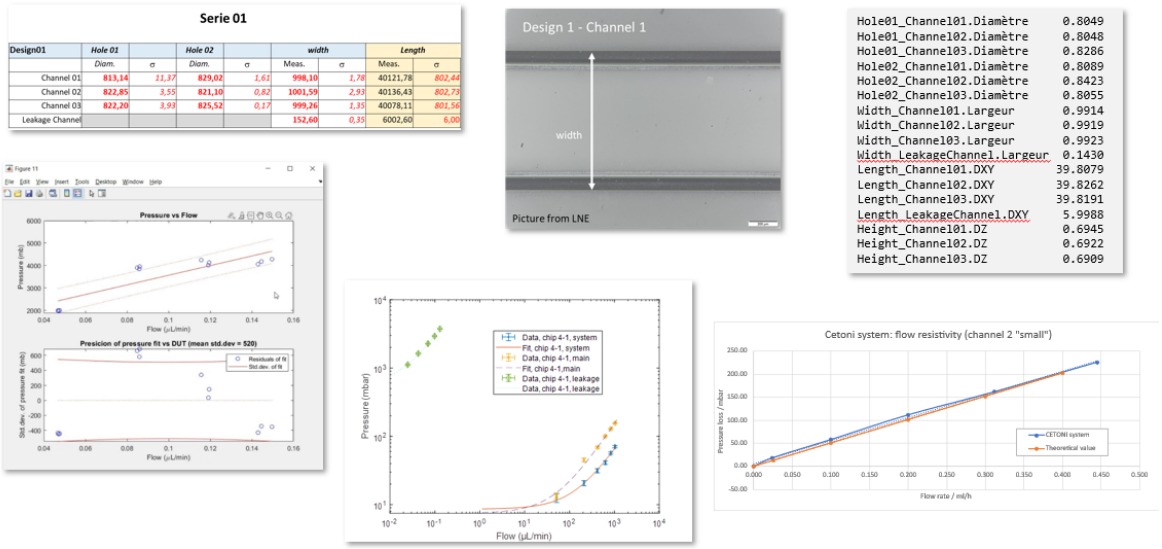
Rp – Altura média dos picos

Rv – Profundidade média dos vales.

Dos resultados dos parâmetros de rugosidade avaliados nas lâminas com áreas de canais e nas lâminas sem canais (apenas com área de ligação), não foram identificadas variações significativas entre os resultados dos parâmetros de rugosidade *Ra, Rz, Rt, Rq, Rv* e *Rp* medidos, permitindo concluir que o processo de fabrico foi o mesmo, quer nos canais quer na área de ligação. Os resultados de medição do parâmetro *Rsk* - assimetria da curva de densidade de amplitude, permitiram concluir que as superfícies testadas apresentam boas propriedades de suporte e uma superfície lisa.

Foram também efetuados ensaios de resistividade, caudal, dimensão e volume dos canais microfluidicos dos dois tipos de chip. Alguns dos resultados obtidos podem ser visualizados na figura 3, [10,11]. Todos os resultados estão descritos em artigos científicos e relatórios do projeto disponíveis em [7].

Figura 3 – Resultados dos Chips desenvolvidos no projeto MFMET



Normas como ISO 22916:2022, ISO 10991:2023 e ISO/TS 6417 foram desenvolvidas com contribuições do projeto 20NRM02 MFMET para facilitar a fabricação, teste e utilização de

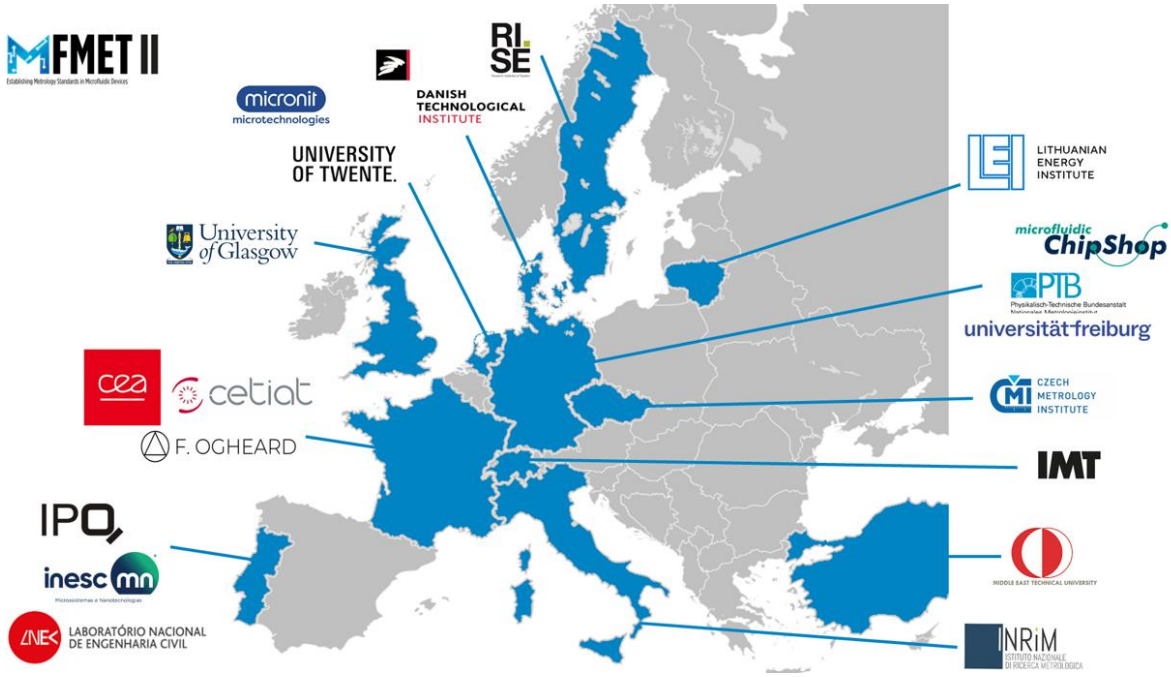
dispositivos microfluídicos. No entanto, de acordo com a planificação a 5 anos do ISO/TC 48/WG 3 e do grupo CEN/CENELEC sobre *Organ-on-Chip*, ainda é necessário desenvolver várias normas metrológicas para levar a microfluídica ao mesmo nível de maturidade de outras áreas (por exemplo, eletrónica). Inquéritos realizados a utilizadores finais e à indústria durante o projeto EMPIR 20NRM02 MFMET identificaram necessidades específicas de normas harmonizadas que melhorem a medição de grandezas físicas relacionadas com a medição de fugas, caudal com partículas, caracterização de materiais, entre outras. O estado da arte carece ainda de diretrizes e protocolos metrológicos para medição e ensaios destas grandezas, muitas das quais são essenciais para garantir a qualidade e a exatidão dos dispositivos microfluídicos. Em particular, os *stakeholders* destacam a necessidade de normas para garantir comparabilidade e compatibilidade entre componentes de diferentes fornecedores e, consequentemente, aumentar a reprodutibilidade comum [12]. De forma semelhante, as empresas de semicondutores enfrentam o desafio de combinar sensores de silício com dispositivos microfluídicos, agravado pela falta de opções simples para adaptar processos de fabrico de silício [13]. Para aplicações *Organ-on-Chip*, a comunidade identificou a necessidade de fiabilidade dos sistemas, especialmente porque estes frequentemente necessitam de operar continuamente durante longos períodos. Além disso, existe atualmente compatibilidade limitada entre sistemas microfluídicos comerciais e fluxos de trabalho existentes de cultura celular (por exemplo, automação e robótica) [14]. Satisfazer estas necessidades da indústria da microfluídica aumentaria a adoção da tecnologia, ao mesmo tempo que reduziria custos de fabrico e tempo de produção [15].

3. Projeto MFMET II

Para enfrentar os desafios identificados acima, que não foram abordados no projeto EMPIR 20NRM02 MFMET, foi submetido para financiamento um novo projeto MFMET II no âmbito da *call* 2024 do EPM, no tema associado à normalização. Este projeto foi um dos selecionados pela EURAMET, teve início em junho de 2025, e é coordenado pelo IPQ. Participam neste projeto 9 Institutos Nacionais de Metrologia,7 Universidades e Centros de investigação e 3 Parceiros Industriais (figura 4), e tem como objetivo desenvolver normas harmonizadas para a medição de diversas grandezas em dispositivos microfluídicos, incluindo OoC. Estas grandezas incluem a resistência ao caudal, fugas e caudal com partículas (por exemplo, gotículas, bolhas, partículas ou células em caudais líquidos). O trabalho incluirá a partilha de informação com o ISO/TC 48/WG3. Os resultados do projeto terão uma ampla aplicabilidade no domínio da

microfluídica, incluindo os fabricantes de chips microfluídicos. O projeto irá fornecer especificações, diretrizes, protocolos e metodologias normalizadas que até agora não existiam.

Figura 4 – Participantes do projeto MFMET II [7]



Fonte: mfmet.eu

O projeto também desenvolverá protocolos de ensaio para a grandeza velocidade, tensão de cisalhamento, contagem de partículas, perda de carga, volume total e volume morto em dispositivos microfluídicos, incluindo exemplos experimentais da aplicação destes protocolos. Para aumentar a relevância dos resultados, os ensaios serão realizados em chips comuns, amplamente utilizados ou comercialmente disponíveis. Este novo projeto irá além da investigação realizada no projeto EMPIR 20NRM02 MFMET, desenvolvendo normas melhoradas e harmonizadas para grandezas físicas relacionadas com o caudal. Será dada especial atenção às condições de medição, que incluem: diferentes líquidos, diferentes temperaturas, caudal com partículas e outras condições que respondem a necessidades específicas do setor (por exemplo, OoC) e dos fabricantes. Este trabalho incluirá a melhoria do guia técnico EURAMET n.º 4 [9], desenvolvido no âmbito do EMPIR 20NRM02 MFMET, evoluindo para um Guia de Calibração com técnicas de medição estabilizadas.

3.1. Objetivos do projeto MFMET II

O objetivo global do projeto MFMET II é avançar a investigação metrológica para a normalização nas indústrias biomédica, farmacêutica e química, com foco na microfluídica. O projeto visa desenvolver protocolos e diretrizes para dispositivos microfluídicos, incluindo OoC. Os objetivos destes protocolos incluem: medição de várias grandezas (por exemplo, caudal, pressão, volume), integração mais fácil dos sistemas, determinação da compatibilidade de materiais, melhoria do controlo da qualidade e qualificação dos dispositivos. Alguns destes protocolos serão desenvolvidos com base num novo padrão de transferência integrado. Os resultados deste projeto beneficiarão diretamente normas preparadas ou revistas pelo ISO/TC 48/WG 3 e outros comités específicos da ISO e CEN.

Os objetivos específicos do projeto são:

1 - Estabelecer procedimentos normalizados para avaliar e caracterizar metrologicamente fluxos com partículas em termos de grandezas relacionadas com o fluxo (por exemplo, velocidade, contagem de partículas e tensão de cisalhamento na presença de gotículas, bolhas, partículas, células), perda de carga, resistência ao caudal, volume morto e volume total em dispositivos microfluídicos, incluindo Órgãos-em-Chip. (*Work Package* 1 - WP1)

2- Desenvolver um guia técnico para a integração de sensores, atuadores e componentes fluidos em dispositivos microfluídicos utilizando estratégias de fabrico escaláveis, económicas e sustentáveis (por exemplo, materiais biodegradáveis), incluindo etapas de esterilização (para Órgãos-em-Chip), caracterização da interface entre material e meio (absorção, adsorção, qualidade do revestimento biocompatível: homogeneidade, durabilidade e eficiência da modificação da molhabilidade da superfície) e prevenção de contaminação, bem como diretrizes sobre integração de diferentes materiais e como essa integração altera a forma do material (por exemplo, deformação devido a fatores ambientais como calor, eletricidade ou pressão). (WP2)

3 - Definir diretrizes para controlo da qualidade, validação e caracterização da fiabilidade/falha dos dispositivos microfluídicos, com foco em testes hidrostáticos vs. pneumáticos: deteção de fugas (utilizando líquidos e gases a temperaturas elevadas e diferentes meios), pressão de rutura, resistência da ligação, fiabilidade dos conectores e precauções gerais de segurança. (WP3)

4 - Desenvolver e caracterizar pelo menos uma nova configuração de um sistema microfluídico integrado com vários sensores e atuadores para avaliar a influência de diferentes

grandezas no desempenho do sistema, de modo a qualificá-lo e validá-lo. Este sistema microfluídico funcionará como um padrão de transferência metrológico. (WP4)

5 - Facilitar a adoção da tecnologia e da infraestrutura de medição desenvolvidas no projeto pela cadeia de fornecimento metrológica (metrologistas, desenvolvedores de dispositivos microfluídicos, reguladores e outros decisores), organizações de normalização (CEN/CENELEC e ISO) e utilizadores finais (atores globais da indústria da microfluídica). (WP5)

3.2. Progresso para além do estado da arte

Este novo projeto pretende garantir o controlo da qualidade e a validação independentes de dispositivos microfluídicos, facilitando a implementação e adoção generalizada das normas desenvolvidas. A informação harmonizada recolhida neste projeto será prontamente submetida e disseminada junto dos organismos de normalização relevantes, como o ISO/TC 48/WG 3.

O projeto MFMET II irá fornecer novas diretrizes, protocolos normalizados e metodologias para avaliar a fiabilidade/falha dos sistemas utilizando líquidos e gases. Isto será alcançado através do desenvolvimento de critérios metrológicos harmonizados e baseados em consenso para: ensaios hidrostáticos *versus* pneumáticos, pressão de rutura, resistência da ligação, fugas [16], fiabilidade dos conectores e precauções gerais de segurança, inexistentes até à data. Estes critérios harmonizados serão aplicáveis em toda a cadeia de fornecimento da microfluídica, desde o fabricante até ao utilizador final, garantindo a rastreabilidade às unidades SI.

O projeto MFMET II irá definir normas gerais e protocolos para a caracterização de: propriedades dos materiais (homogeneidade, durabilidade, molhabilidade, revestimentos), forma do material, interações material/meio e prevenção de contaminação. O projeto irá também desenvolver normas e protocolos para a integração de sensores/atuadores e interconexão de componentes microfluídicos. Serão identificadas e desenvolvidas normas de medição correspondentes, traduzidas da escala macro para a micro sempre que possível. Serão desenvolvidas especificações metrológicas harmonizadas para a integração de sensores, atuadores, componentes fluidos e diferentes materiais em microfluídica, especificamente para a caracterização da interface entre material e meio, esterilização e prevenção de contaminação.

Estratégias de fabrico sustentável são essenciais para reduzir o impacto ambiental dos processos e produtos. A utilização de materiais sustentáveis para componentes descartáveis e a sua relação custo-benefício será estudada e incluída nos protocolos relevantes.

Este projeto irá estabelecer um conjunto abrangente de especificações metrológicas harmonizadas para a conceção, fabrico e qualificação de sistemas microfluídicos integrados. Para enfrentar este desafio, o projeto pretende definir diretrizes normalizadas para a integração de sensores/atuadores e componentes fluidos. Esta informação representará um avanço significativo no desenvolvimento de um novo protótipo microfluídico, que será caracterizado utilizando os protocolos e diretrizes desenvolvidos nos WP1-3. A qualificação e validação do protótipo serão realizadas para avaliar a influência de diferentes grandezas no desempenho do sistema. Espera-se que os resultados contribuam para o cálculo da integridade, funcionalidade e conformidade metrológica dos dispositivos.

As medições de dimensões, resistência ao caudal e deteção de fugas obtidas no projeto EMPIR 20NRM02 MFMET serão analisadas em profundidade e transpostas como investigação preliminar para apoiar a elaboração da metodologia de teste existente do MFMET, necessária para qualificar este protótipo microfluídico.

O objetivo final é fornecer uma estrutura normalizada para o desenvolvimento de sistemas microfluídicos integrados que possa ser aplicada numa ampla gama de utilizações, desde a investigação até à indústria, garantindo elevados níveis de precisão, fiabilidade e reprodutibilidade. Esta abordagem permitirá acelerar a adoção da tecnologia, melhorar a interoperabilidade entre componentes e reforçar a confiança na utilização de dispositivos microfluídicos em aplicações críticas, como Órgãos-em-Chip, diagnóstico médico e processos farmacêuticos.

3.3. Resultados e impacto esperado

A produção de dispositivos microfluídicos, em particular dispositivos e plataformas Órgãos-em-Chip, tem dependido fortemente da experiência dos fabricantes. Isto deve-se, em grande parte, ao facto de as diretrizes e normas existentes serem insuficientes para agilizar e acelerar a industrialização. Este projeto pretende colmatar essa lacuna, estabelecendo novas diretrizes e normas para conceção, materiais, qualificação e testes de validação de dispositivos microfluídicos. Os objetivos do projeto incluem: desenvolver medidas robustas de controlo da qualidade para garantir dispositivos e plataformas microfluídicas fiáveis; fornecer documentação normalizada para facilitar a comparação de métodos e produtos e aumentar a confiança na cadeia de fornecimento da microfluídica; estabelecer diretrizes para áreas relevantes, como medição de caudal com partículas, tensão de cisalhamento, perda de carga e propriedades dos materiais; testar padrões de transferência microfluídicos para validar

instrumentação e protocolos; definir especificações harmonizadas para controlo da qualidade independente; e, finalmente, conceber (simulação, fabrico, montagem e caracterização) um protótipo microfluídico integrado com vários sensores e atuadores.

O projeto terá um impacto significativo ao estabelecer novas normas em colaboração com os Comités Técnicos de Normalização relevantes (por exemplo, ISO/TC 48/WG 3), o que irá melhorar o desempenho físico e químico dos dispositivos microfluídicos. Os resultados do projeto permitirão comparar características dos produtos utilizando diretrizes harmonizadas para: esterilização, caracterização de interfaces de materiais e controlo de contaminação. Além disso, a comparação dos resultados e a rastreabilidade às normas nacionais e internacionais aumentarão a compatibilidade dos dispositivos entre fabricantes.

Este projeto irá responder à necessidade de desenvolver nova documentação normalizada para testes *in vitro* e *in silico* (ou seja, OoC), impulsionada pela crescente pressão para substituir testes em animais na modelação de doenças e no desenvolvimento de fármacos, como ilustrado pelo FDA Modernisation Act 2.0. Isto garantirá a segurança e eficácia dos novos tratamentos. Estes documentos serão divulgados ao ISO/TC 276/WG 4 - Bioprocessing e poderão servir de base para nova regulamentação da UE sobre sistemas microfisiológicos (incluindo OoC) e microfluídica.

Os resultados do projeto serão disseminados junto da *Microfluidic Association* (MFA) para acelerar a adoção e impulsionar a inovação na indústria da microfluídica. Ao estabelecer normas uniformes para o controlo da qualidade, o projeto contribuirá para a proteção do consumidor e para o crescimento económico. As ligações estabelecidas com especialistas da *Food and Drug Administration* (FDA), do *American Institute of Standards and Technology* (NIST), do *Japanese bio Measurement & Analysis Consortium* (JMAC) e do *National Metrology Institute of Japan* (NMIJ) garantirão colaboração e possíveis testes futuros de dispositivos e plataformas microfluídicas do projeto a nível internacional.

Em suma, este projeto pretende melhorar os dispositivos/sistemas microfluídicos, fornecendo um caminho claro para maior precisão e qualidade, promovendo a harmonização, a inovação e o avanço da indústria da microfluídica.

4. Conclusões

A base da investigação científica e do progresso tecnológico depende fortemente do estabelecimento de infraestruturas de medição precisas. Existe uma necessidade urgente de desenvolver e manter esta infraestrutura de medição para dispositivos microfluídicos e OoC,

bem como melhorar a exatidão e a precisão das medições de várias grandezas (fugas, pressão de rutura, volume, velocidade, resistência ao fluxo, entre outras) frequentemente reportadas neste campo em rápida evolução. Para enfrentar este desafio, o projeto MFMET II reunirá especialistas da academia, indústria, Institutos Nacionais de Metrologia, Institutos Designados e utilizadores de microfluídica para atualizar o guia técnico EURAMET n.º 4 [9]. Os resultados permitirão aos INM expandir as suas capacidades de medição e calibração para incluir dispositivos/instrumentos microfluídicos, suporte que atualmente não existe.

Este projeto pretende aumentar a consciencialização sobre a importância da precisão e das normas, que atualmente são negligenciadas na área da microfluídica devido à falta de normas e métodos de calibração. Isto será alcançado através da criação de padrões de transferência microfluídicos e da partilha dos resultados por meio de publicações, *e-learning* e *workshops*. O projeto visa dotar a comunidade técnico-científica de ferramentas essenciais para validar as suas medições e garantir a consistência, fiabilidade e comparabilidade dos resultados.

Espera-se que os novos protocolos e métodos de medição facilitem novas Capacidades de Medição e Calibração para aplicações e dispositivos microfluídicos em todos os INM participantes, as quais serão publicadas na base de dados do BIPM.

Serão desenvolvidas novas normas de calibração para microfluídica, incluindo grandezas descritas no plano de trabalhos do ISO/TC 48/WG 3, como: fugas, qualificação de produtos e testes relacionados com materiais. Estes documentos poderão ser utilizados por laboratórios acreditados, fabricantes de dispositivos microfluídicos e pela comunidade científica.

Este projeto permitirá aos INM disseminar a cadeia de rastreabilidade para fabricantes e utilizadores finais através do desenvolvimento de um protótipo microfluídico.

Referências

[1] D. Huh, H. Kim, J. Fraser, et al. Microfabrication of human organs-on-chips. Nature Protocols, 2135–2157 2013. DOI: 10.1038/nprot.2013.137

[2] E. K. Sackmann, A. L. Fulton, D. J. Beebe. The present and future role of microfluidics in biomedical research. Nature, 507, 181–189, 2014. DOI: 10.1038/nature13118

[3] Global Organ-on-Chip Market Growth of 70 % CAGR by 2020 - Analysis, Technologies & Forecasts Report 2010-2020 -Key Vendors: Nortis, Emulate, Mimetas - Research and Markets | Business Wire https://www.businesswire.com/news/home/20160602005715/en/Global-Organ-on-Chip-Market-Growth-of-70-CAGR-by-2020---Analysis-Technologies-Forecasts-Report-2010-2020---Key-Vendors-Nortis-Emulate-Mimetas---Research-and-Markets, consultado a 2026-02-24.

[4] L. Gervais, N. D. Rooij, E. Delamarche. Microfluidic chips for point-of-care immunodiagnostics, Advanced Materials, 2011. DOI: 10.1002/adma.201100464

[5] D. G. Ingber. Human organs-on-chips for disease modelling, drug development and personalised medicine, Nat Rev Genet, 467–49, 2022. DOI:10.1038/s41576-022-00466-9

[6] V. Silverio, S. Guha, A. Keiser, et al. Overcoming technological barriers in microfluidics: Leakage testing. Front Bioeng Biotechnol; 10:958582, 2022. DOI: 10.3389/fbioe.2022.958582

[7] MFMET, http://mfmet.eu, consultado a 2026-02-24

[8] EURAMET calibration guide 27 (2024) - Guidelines for the Calibration of Drug Delivery Devices and Infusion Device Analysers

[9] EURAMET tecnical Guide 4 (2024) - Evaluation of flow-related quantities in microfluidic devices

[10] E. Batista, R. F. Martins, V. Silverio, I. Godinho, Advancing Calibration Techniques for Accurate Micro and Nanoflow Measurements, Front. Nanotechnol., 11 June 2025,

[10] O. Büker, K. Stolt, E. Batista, J. Sepulveda, C. Giuliano, A. Morin, D. Nobre, H. Navas, Investigations on the performance of a newly developed pressure-driven flow controller used in microfluidic applications, Measurement: Sensors, 2024,101645

[11] MFMET, H. van Heeren, V. Silverio, E. Batista, D. Reyes. On the road to standardisation in Microfluidics and Organ-on-Chip, MFA & MFMET, 2024, https://zenodo.org/records/10559956, consultado a 2026-02-26.

[12] M. A Buttkewitz, C. Heuer, J. Bahnemann. Sensor integration into microfluidic systems: trends and challenges, Current Opinion in Biotechnology, Volume 83, 102978, ISSN 0958-1669, 2023. DOI: 10.1016/j.copbio.2023.102978

[13] H Cong, N. Zhang. Perspectives in translating microfluidic devices from laboratory prototyping into scale-up production. Biomicrofluidics.;16(2):021301, 2022. DOI: 10.1063/5.0079045

[14] D. Reyes, H. van Heeren. Proceedings of the First Workshop on Standards for Microfluidics, J Res Natl Inst Stan, 124 :124001, DOI: 10.6028/jres.124.001; 2019

[15] P.G. Spazzini, G. La Piana, A, Piccato, V. Delnegro, M. Viola, Flow Leaks Normalisation, Measurement, 221:113429, doi: DOI: 10.1016/j.measurement.2023.113429

Authors Profiles

Elsa Batista has received a PhD from the Faculty of Sciences and Technology - Nova University of Lisbon – Portugal. Since 1999, she has worked at the Laboratório de Volume of Instituto Português da Qualidade as a superior technician and laboratory manager. She is the contact person and head of the volume subgroup of the EURAMET flow technical committee. She is the coordinator of project MFMET II.

Sara Moura has received a postgraduate degree in Management in Quality and Food Safety in 2004 from the Higher Institute of Health Sciences – South; Egas Moniz C.R.L. – Portugal. She is laboratory

manager in Properties of Liquids Laboratory of Portuguese Institute for Quality (IPQ), where she works since 2021. Her research interests are in the areas of density, viscosity, surface tension and reology.

Marta Serra has received a MSc in BioChemistry in 2017 from the Faculty of Sciences and Technology - Nova University of Lisbon – Portugal. She is senior technician in Properties of Liquids Laboratory of Portuguese Institute for Quality (IPQ), where she works since 2023. Her research interests are in the areas of density, viscosity, surface tension and reology.

Fernanda Saraiva is M.Sc. in Physics Engineering from the Faculty of Sciences and Technology - Nova University of Lisbon – Portugal since 2019. She is the head of the Metrology Length Laboratory, at the Portuguese Institute for Quality, in Almada, Portugal. The main research interest is measuring techniques, quality assessment, metrological compatibility, and calibration of metrological standards of length.

Maria do Céu Ferreira has a PhD and master's degree in Industrial Engineering from FCT/UNL and has worked in the metrology department at IPQ as an engineer and metrologist in the scientific, applied, and legal fields. She is also a university lecturer in Industrial Engineering and Management, as well as being the national coordinator of the Metrology Specialisation Committee of the Portuguese Order of Engineers. Maria participates in international research projects in the field of metrology and represents Portugal in ISO, OIML and WELMEC working groups.

Antonio Capela has a degree in science of information and documentation and works in the volume and flow laboratory of IPQ since 2022.

Isabel Godinho has a degree in Physics from the Faculty of Sciences of the University of Lisbon and a PhD in Physics from the same University. She is presently Director of the Metrology Department of IPQ and responsible for the national metrology system, in scientific, applied and legal metrology. She is currently EURAMET delegate and European Partnership on Metrology representative and national representative on the OIML and BIPM. Her research interest is in metrology, mainly in the fields of electrical, quantum metrology and acceleration.

Acknowledgments

The project 24NRM03 MFMET II has received funding from the European Partnership on Metrology, co-financed from the European Union’s Horizon Europe Research and Innovation Programme and by the Participating States

Special Issue - Scientific Metrology, 2026
https://doi.org/10.48552/edesp1-26-30-39

Metrologia para a Monitorização Ambiental: do pH Marinho aos Microplásticos

Raquel Quendera
rquendera@ipq.pt
Instituto Português da Qualidade, I. P.
ORCID: 0000-0001-6827-1550

Olivier Pellegrino
opellegrino@ipq.pt
Instituto Português da Qualidade, I. P.
ORCID: 0000-0003-4167-1647

João Alves e Sousa
jasousa@ipq.pt
Instituto Português da Qualidade, I. P.
ORCID: 0000-0002-9630-0854

Resumo:

A monitorização da qualidade ambiental marinha é um dos pilares da proteção dos ecossistemas e da mitigação das alterações climáticas. O projeto *Metrology for standardised seawater* pH_T *measurements in support of international and European climate strategies* - SapHTies, no âmbito do *European Metrology Programme for Innovation and Research* (EMPIR) da *European Association of National Metrology Institutes* (EURAMET) teve como objetivo desenvolver métodos primários de medição de pH em águas marinhas, assegurando rastreabilidade metrológica e comparabilidade internacional de forma a melhorar a norma internacional ISO 18191:2015 – *Water quality — Determination of pH in seawater — Method using the indicator dye m-cresol purple*. Este esforço foi essencial para monitorizar e quantificar a acidificação dos oceanos, fenómeno diretamente associado ao aumento das emissões de dióxido de carbono e às suas consequências na biodiversidade marinha. Paralelamente, o projeto europeu *Metrological traceability of measurement data from nano to small-microplastics for a greener environment and food safety* - PlasticTrace, no âmbito da *European Partnership on Metrology* (EPM) e no contexto do Green Deal, visou criar materiais de referência e metodologias robustas para a identificação e quantificação de microplásticos em diferentes matrizes ambientais. A integração destes dois projetos representou uma abordagem holística à monitorização ambiental, permitindo não só avaliar a evolução da acidificação oceânica, mas também identificar poluentes emergentes como os nano- e microplásticos. Este artigo discute os objetivos, metodologias e resultados preliminares dos projetos, sublinhando a sua relevância para a proteção do meio ambiente e para a implementação de políticas sustentáveis.

Palavras-chave: Acidificação; Medição de pH; Nanoplásticos; Microplásticos; Monitorização do oceano

Abstract:

Marine environmental quality monitoring is one of the pillars of ecosystem protection and climate change mitigation. The project "Metrology for standardised seawater pH_T measurements in support of international and European climate strategies – SapHTies", within the European Metrology Programme for Innovation and Research (EMPIR) of the European Association of National Metrology Institutes (EURAMET), aimed to develop primary methods for pH measurement in seawater, ensuring metrological traceability and international comparability in order to improve the international standard "ISO 18191:2015 – Water quality — Determination of pH in seawater — Method using the indicator dye m-cresol purple". This effort was essential to monitor and quantify ocean acidification, a phenomenon directly associated with increasing carbon dioxide emissions and their consequences on marine biodiversity. In parallel, the European project "Metrological traceability of measurement data from nano to small-microplastics for a greener environment and food safety – PlasticTrace", under the European Partnership on Metrology (EPM) and in the context of the Green Deal, aimed to create reference materials and robust methodologies for the identification and quantification of nano- and microplastics in different environmental matrices. The integration of these two projects represented a holistic approach to environmental monitoring, enabling not only the assessment of ocean acidification trends but also the identification of emerging pollutants such as microplastics. This article discusses the objectives, methodologies, and preliminary results of the projects, highlighting their relevance for environmental protection and the implementation of sustainable policies.

Keywords: Acidification; Nanoplastics; Microplastics; Ocean monitoring; pH measurement

1. Introdução

A preocupação crescente com as alterações climáticas e a poluição marinha tem impulsionado o desenvolvimento de projetos científicos e tecnológicos que visam melhorar a monitorização ambiental e fornecer dados robustos para a tomada de decisão política. A comunidade científica internacional tem sublinhado que os oceanos desempenham um papel central na regulação do clima global, funcionando como sumidouros de dióxido de carbono (CO_2) e como reservatórios de biodiversidade (Capitaine *et al.*, 2025; Schäfer *et al.*,2025). No entanto, estes ecossistemas encontram-se ameaçados por pressões antropogénicas crescentes. Entre os desafios mais relevantes destacam-se:

- A acidificação dos oceanos, resultante da absorção de CO_2 atmosférico de origem antropogénica, que altera o equilíbrio químico da água do mar e compromete

organismos calcificadores como corais, moluscos e algumas espécies de fitoplâncton. Este fenómeno tem implicações diretas na cadeia alimentar marinha e, por consequência, na segurança alimentar humana (Riebesell *et al.*, 2011).

- A contaminação por microplásticos, que se acumulam em diferentes sistemas ambientais e entram nos ciclos hidrobiológicos, representando riscos para a biodiversidade e potenciais impactos na saúde humana. A presença e potencial tóxico dos plásticos, desde águas superficiais até sedimentos profundos, exige metodologias de medição fiáveis e comparáveis entre laboratórios nacionais e internacionais (Fernandes *et al.*, 2025).

Neste contexto, a União Europeia tem financiado projetos de investigação que visam reforçar a infraestrutura metrológica e científica necessária para enfrentar estes desafios. Dois exemplos são (European Commission, 2008):

• EMPIR SapHTies (EURAMET) – focado na metrologia do pH de água do mar, com o objetivo de desenvolver métodos primários rastreáveis e melhorar a norma internacional ISO 18191:2015 (ISO, 2015), assegurando compatibilidade internacional dos dados de pH. Este projeto contou com um consórcio formado por sete parceiros europeus, nomeadamente cinco instituições nacionais de metrologia (EURAMET, 2024):

IPQ – Instituto Português da Qualidade (Portugal);

LNE – Laboratoire National de Métrologie et d'Essais (França);

PTB – Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Alemanha);

DFM – Danish Fundamental Metrology (Dinamarca);

SYKE – Finnish Environment Institute (Finlândia).

E dois institutos de investigação oceanográfica:

GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research (Alemanha);

IFREMER – Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (França).

Este consórcio reuniu metrologia e oceanografia, garantindo que os métodos de medição de pH marinho fossem rastreáveis e aplicáveis em programas internacionais.

Este projeto teve um orçamento total de cerca de 1,1 milhões de euros e a duração de 36 meses (maio 2021 a abril de 2024) (EURAMET, 2024).

• PlasticTrace (EPM, Green Deal) – dedicado à rastreabilidade e quantificação de microplásticos e nanoplásticos em diferentes matrizes ambientais e alimentares, criando materiais de referência certificados e metodologias harmonizadas.

Este projeto envolveu um consórcio muito mais alargado, com 23 parceiros entre instituições nacionais de metrologia, institutos designados, universidades, centros de investigação e empresas ligadas ao setor alimentar e de instrumentação (EURAMET,2022).

O projeto PlasticTrace teve um orçamento total de cerca de 2,3 milhões de euros e a duração de 36 meses (de outubro 2022 a setembro 2025).

Estes projetos não só respondem a necessidades científicas imediatas, como também se inserem em estratégias políticas mais amplas, incluindo o *European Green Deal*, a *Marine Strategy Framework Directive* (European Comission, 2020; European Comission, 2008) e os compromissos internacionais de monitorização climática. A sua integração representa uma abordagem holística à monitorização ambiental, combinando química fundamental com análise de poluentes emergentes, e reforçando o papel da metrologia como base para políticas sustentáveis e de mitigação de impactos nos ecossistemas e para a proteção dos ecossistemas marinhos.

1.1. Objetivos dos projetos de investigação

Para cada projeto de investigação, os objetivos estão resumidos a seguir.

SapHTies:

- Desenvolver métodos primários de medição de pH em águas marinhas com rastreabilidade dos resultados de medição ao Sistema Internacional de Unidades (SI);
- Desenvolver materiais de referência primários para medição de pH em água do mar;
- Harmonizar protocolos de medição entre laboratórios nacionais e internacionais;
- Melhorar a norma internacional ISO 18191:2015, garantindo maior e melhor comparabilidade metrológica dos resultados (Capitaine et al., 2025; Schäfer et al., 2025);
- Apoiar redes internacionais como a GOA-ON (*Global Ocean Acidification Observing Network*).

PlasticTrace:

- Criar materiais de referência certificados para micro- e nanoplásticos.
- Estabelecer metodologias normalizadas de identificação e quantificação.
- Validar protocolos através de ensaios interlaboratoriais.
- Apoiar políticas ambientais europeias no âmbito do *European Green Deal* e da Economia Circular.

1.2. O papel do IPQ nos projetos de investigação

O Instituto Português da Qualidade (IPQ) desempenhou um papel ativo e estratégico em ambos os projetos nomeadamente: no SapHTies, contribuiu para o desenvolvimento de métodos primários de medição de pH por célula de Harned, para a preparação e certificação de materiais de referência primários tris(hidroximetil) aminometano (TRIS) para medição de pH_T em água do mar, participou na validação experimental de protocolos e na produção de dados comparáveis para diferentes salinidades, contribui com a integração dos resultados na melhoria da norma ISO 18191:2015 (ISO, 2015) e permitiu expandir as suas capacidades de medição e a sua experiência em metrologia química marinha.

A participação no projeto PlasticTrace permitiu colaborar na caracterização de microplásticos em matrizes ambientais, aplicando técnicas espectroscópicas e de microscopia, contribuiu para a criação de materiais de referência certificados, assegurando rastreabilidade metrológica, e participou em ensaios interlaboratoriais e na harmonização de metodologias de medição.

A participação do IPQ reforçou a visibilidade da ciência portuguesa no contexto europeu, demonstrando a capacidade nacional de contribuir para desafios globais como a acidificação dos oceanos e a poluição por plásticos.

No que concerne à produção científica, o IPQ foi coautor em três artigos científicos em revistas científicas de prestígio internacional como a Marine Chemistry, no âmbito do projeto SapHTies:

- Capitaine, G., Schäfer, R., Bastkowski, F., Stoica, D., **Pellegrino, O**., **Quendera, R**., ... & Fisicaro, P. (2025). pHT measurements of TRIS buffer solutions in an artificial seawater matrix in the salinity range 5–40 and temperature range 5–40° C. Part 1: Measurements and data fitting. Marine Chemistry, 104551.
- Schäfer, R., Capitaine, G., Bastkowski, F., Stoica, D., **Pellegrino, O**., **Quendera, R**., ... & Seitz, S. (2025). pHT measurements of TRIS buffer solutions in artificial seawater matrix in the salinity range 5–40 and temperature range 5–40° C, Part 2: Uncertainty of pHT values. Marine Chemistry, 104573.

E na revista Talanta da Elsevier no âmbito do projeto PlasticTrace:

- Fernandes, R., Miclea, P. T., Fadda, M., Putzu, M., Sacco, A., Rossi, A. M., Giovannozzi, A., Barbaresi, M. Masino, M., Mattarozzi, M., Careri, M., Palma, C., Almeida. J., Drago, C., **Pellegrino, O., Quendera, R.**, Braun, R., Bettencourt da Silva, R. J. N. (2025). Inter-instrument definition of valid criteria for the automatic identification of microplastics by micro-Raman spectroscopy. Talanta, 128834.

2. Desenvolvimento e validação de metodologias metrológicas e Materiais de Referência

2.1. Projeto SapHTies

Neste projeto, o método de referência usado para medição de pH foi a potenciometria primária (célula de Harned) em que são usadas células de vidro com elétrodos padrão de Pt/H_2 e elétrodos de referência de Ag/AgCl. Estas células, de acordo com a IUPAC – International Union of Pure and Applied Chemistry, são células eletroquímicas sem junção líquida, o que permite a medição de pH ao mais elevado nível metrológico, com as incertezas de medição mais baixas e na ordem de 0,004. Este tipo de medição permite rastreabilidade direta dos resultados de medição ao SI, eliminando dependências de calibrações secundárias e assegurando maior rigor nos resultados.

Foram desenvolvidos e testados pela primeira vez por três instituições nacionais de metrologia (IPQ, LNE e PTB) materiais de referência certificados (MRC) para uso em medição de pH em água do mar (soluções tampão TRIS) com salinidade prática de referência, $S = 35$, típica do oceano, para três níveis de molalidade, de forma a cobrir a pequena faixa de variação do pH oceânico (entre 7,8 e 8,4). Estes tampões TRIS, antes produzidos apenas pelo *Scripps Institution of Oceanography* (Universidade da Califórnia, San Diego) – um dos mais antigos e prestigiados centros de investigação oceanográfica mundiais, são a referência metrológica mundial para a calibração de equipamentos de medição de pH de águas marinhas. Estes MRC foram alvo de uma intercomparação entre os institutos nacionais de metrologia participantes do projeto (IPQ, LNE e PTB) de forma a validar as metodologias analíticas de medição de pH ao nível primário e a temperaturas desde 5 °C a 45 °C, assegurando assim a consistência metrológica (Capitaine et al., 2025).

Foram também desenvolvidos MRC para medição de pH de águas de salinidade prática diferente da salinidade de referência oceânica ($S = 35$) cobrindo a gama de $5 \leq S \leq 40$: como exemplo nos extremos, desde águas salobras (*brackish waters*) com $S \leq 5$, típicas de zonas de transição como estuários, deltas e lagoas costeiras até águas com salinidade acima da típica salinidade oceânica ($S = 35$) como as de regiões subtropicais áridas, lagoas costeiras e estuários com forte evaporação ($S \leq 40$).

A variabilidade da S nos oceanos e zonas costeiras exige que os métodos de medição sejam robustos em diferentes condições. O projeto SapHTies produziu MRC que permitem validar medições em águas costeiras, oceânicas e de estuário, aumentando a aplicabilidade dos resultados.

Foi também desenvolvida uma análise das componentes das incertezas de medição de pH devidas à temperatura, salinidade, concentração de TRIS, calibração, etc., integrando modelos empíricos, baseados em dados experimentais obtidos por métodos primários de medição potenciométrica com elétrodos de hidrogénio. Esta análise veio responder diretamente a uma necessidade prática que permite aos laboratórios calcular de forma normalizada e transparente a incerteza associada às medições de pH em águas marinhas e permitiu melhorar a norma ISO 18191:2015, antes omissa quanto ao cálculo de incertezas (EURAMET, 2024; Capitaine *et al.*, 2025; Schäfer *et al.*,2025).

2.2. Projeto PlasticTrace

No projeto PlasticTrace, foram desenvolvidas e validadas metodologias metrológicas inovadoras para a quantificação de micro- e nanoplásticos em diferentes matrizes ambientais e alimentares. O foco esteve na criação de MRC para identificação e quantificação de nano- e microplásticos e na harmonização de protocolos de medição, assegurando rastreabilidade dos resultados de medição ao SI. Foram preparadas e produzidas partículas de polímeros com dimensões controladas (polietileno, polipropileno, poliestireno, etc.), cobrindo a gama de nanoplásticos (1 nm – 100 nm) e microplásticos (0,1 µm – 5 mm). Estas partículas foram caracterizadas por técnicas espectroscópicas (µFTIR e µRaman) e microscópicas (SEM), permitindo identificar a composição química e morfologia com elevada precisão (Fernandes et al., 2025)

Foi organizada uma intercomparação interlaboratorial em que os MRC preparados foram distribuídos entre os 23 parceiros do consórcio incluindo o IPQ, para validar protocolos de medição em diferentes contextos laboratoriais. Esta abordagem assegurou que os métodos desenvolvidos fossem robustos, harmonizados e aplicáveis em laboratórios ambientais, institutos de investigação e entidades reguladoras.

Foram criados MRC para diferentes matrizes ambientais tais como: água potável (partículas de PET e PP), águas marinhas e costeiras (partículas de PE e PP) e sedimentos marinhos (misturas de polímeros para simular bioacumulação), aumentando a aplicabilidade dos resultados e assegurando comparabilidade internacional.

A variabilidade das matrizes ambientais exigiu que os métodos de medição fossem robustos em condições muito distintas.

Por fim, foi criada uma infraestrutura metrológica para apoiar políticas ambientais europeias no âmbito do *European Green Deal* (European Comission, 2020).

3. Discussão e perspetivas

A integração dos projetos SapHTies e PlasticTrace demonstra como a metrologia pode ser aplicada de forma transversal a problemas ambientais globais. No caso da acidificação dos oceanos, o desenvolvimento de métodos primários de medição de pH e de materiais de referência certificados (MRC) representa um avanço significativo em termos de rastreabilidade metrológica. Estes resultados permitem que diferentes laboratórios, em distintos contextos geográficos e oceanográficos, obtenham dados comparáveis e com incertezas bem caracterizadas. Tal comparabilidade é essencial para redes internacionais como a GOA-ON, que dependem de medições consistentes para avaliar tendências globais de acidificação e desenvolver e melhorar modelos climáticos.

Do lado da poluição por plásticos, o projeto PlasticTrace responde a uma lacuna crítica: a ausência de metodologias harmonizadas e de MRC para micro- e nanoplásticos. A criação de partículas de nano- e microplásticos calibradas e caracterizadas por técnicas espectroscópicas e microscópicas não só fortalece a confiança nos resultados laboratoriais, como também abre caminho para a regulação internacional. A harmonização de protocolos e a validação através de ensaios de comparação interlaboratorial garantem que os dados produzidos possam ser usados em políticas ambientais e de saúde pública, reduzindo a fragmentação metodológica que até agora dificultava comparações entre estudos.

Do ponto de vista científico, ambos os projetos reforçam a importância da infraestrutura metrológica como base para a investigação aplicada. A calculadora de incertezas desenvolvida no SapHTies é um exemplo de transferência direta de conhecimento para a prática laboratorial, permitindo que investigadores e técnicos calculem de forma transparente e normalizada a incerteza das suas medições. Já no PlasticTrace, a preparação de MRC para diferentes matrizes ambientais (água potável, águas marinhas, sedimentos) amplia a aplicabilidade dos resultados e assegura que os métodos sejam relevantes para contextos diversos, desde a monitorização costeira até à segurança alimentar.

Do ponto de vista político e social, estes projetos alinham-se com *o European Green Deal* e com a *Marine Strategy Framework Directive*, fornecendo dados robustos que podem sustentar decisões regulatórias e estratégias de mitigação. A acidificação dos oceanos e a poluição por plásticos são fenómenos que transcendem fronteiras nacionais; por isso, a existência de metodologias rastreáveis e comparáveis é um pré-requisito para a cooperação internacional. Além disso, a participação ativa do IPQ nestes consórcios reforça a visibilidade da ciência

portuguesa e demonstra a capacidade nacional de contribuir para desafios globais, consolidando o papel de Portugal no meio científico e na política europeia.

Finalmente, em termos de perspetivas futuras, será crucial expandir estas metodologias para novas áreas:

Integração digital: uso de inteligência artificial para análise automática de espectros e imagens de microplásticos.

Novas matrizes ambientais: aplicação dos métodos a solos agrícolas, águas residuais e alimentos processados.

Transferência internacional: disseminação de metodologias para países em desenvolvimento, assegurando uma resposta global coordenada.

Interdisciplinaridade: ligação entre metrologia, ecotoxicologia, oceanografia e modelação climática, criando uma visão integrada dos impactos ambientais.

4. Conclusões

Os projetos SapHTies e PlasticTrace demonstraram o papel central da metrologia na monitorização ambiental e na resposta a desafios globais como a acidificação dos oceanos e a poluição por microplásticos. O SapHTies permitiu desenvolver métodos primários de medição de pH marinho, materiais de referência certificados e uma calculadora de incertezas (Capitaine et al., 2025; Schäfer et al., 2025; EURAMET, 2024). O PlasticTrace criou materiais de referência certificados para micro e nanoplásticos e harmonizou metodologias analíticas de identificação e quantificação dos mesmos (Fernandes et al., 2025; EURAMET, 2022).

Referências

Capitaine, G., Schäfer, R., Bastkowski, F., Stoica, D., Pellegrino, O., Quendera, R., ... & Fisicaro, P. (2025). pH_T measurements of TRIS buffer solutions in an artificial seawater matrix in the salinity range 5–40 and temperature range 5–40° C. Part 1: Measurements and data fitting. Marine Chemistry, 104551.

EURAMET/EMPIR. (2025-12-17). European Metrology Programme for Innovation and Research (EMPIR). https://www.euramet.org/research-innovation/research-empir

EURAMET. (2024). Final Publishable Report – Project 20NRM06 SapHTies: Metrology for standardised seawater pH_T measurements in support of international and European climate strategies. EURAMET

EURAMET. (2022). PlasticTrace – Metrological traceability of measurement data from nano to small-microplastics for a greener environment and food safety (21GRD07). EURAMET.

European Commission. (2008). Marine Strategy Framework Directive (2008/56/EC). Brussels: European Commission.

European Commission. (2020). European Green Deal. Brussels: European Commission.

Fernandes, R., Miclea, P. T., Fadda, M., Putzu, M., Sacco, A., Rossi, A. M., Giovannozzi, A., Barbaresi, M. Masino, M., Mattarozzi, M., Careri, M., Palma, C., Almeida. J., Drago, C., Pellegrino, O., Quendera, R., Braun, R. Bettencourt da Silva, R. J. N. (2025). Inter-instrument definition of valid criteria for the automatic identification of microplastics by micro-Raman spectroscopy. Talanta, 128834.

Global Ocean Acidification Observing Network (GOA-ON). (2025). International framework for ocean acidification monitoring

International Organization for Standardization. (2015). ISO 18191:2015 – Water quality — Determination of pH in seawater — Method using the indicator dye m-cresol purple. Geneva: ISO.

Schäfer, R., Capitaine, G., Bastkowski, F., Stoica, D., Pellegrino, O., Quendera, R., ... & Seitz, S. (2025). pHT measurements of TRIS buffer solutions in artificial seawater matrix in the salinity range 5–40 and temperature range 5–40° C, Part 2: Uncertainty of pH_T values. Marine Chemistry, 104573

Riebesell, U., Fabry, V. J., Hansson, L., & Gattuso, J. P. (2011). Guide to best practices for ocean acidification research and data reporting. Office for Official Publications of the European Communities.

Authors Profiles

Raquel Quendera is a chemist engineer with more than 10 years of experience in pH metrology and the Head of Electrochemistry Laboratory, representative of CCQM Electrochemistry WG and Chair of BIPM/CCQM/EAWG TG on seawater pH. Main research areas are metrology in chemistry, mainly in primary and secondary pH, preparation and certification of TRIS CRMs for measurement of pH in seawater for ocean acidification monitoring.

Olivier Pellegrino is a chemist engineer with PhD in Physics, Université de Pierre et Marie Curie (France) and Head of Photometry, Radiometry, Refractometry and Speed Laboratories, at the Portuguese Institute for Quality (IPQ), the Portuguese National Metrology Institute, IPQ contact person in EURAMET Photometry Radiometry, member of national IEC TC 1 "Terminology", national ISO/IEC/TC25 “Quantities and Units”, and Chair of the /IEC/TC25 “Quantities and Units”. Main research areas are metrology in photometry-radiometry, uncertainty measurement calculations.

João Alves e Sousa is a Principal Researcher and Director of the National Metrology Laboratory of IPQ. He has a PhD on Mechanical Engineering related to Energy Conservation in High Temperature Systems, and he is presently the Chair of the European Metrology Network for Clean Energy. He has more than 100 publications on peer review journals and international conferences and is currently the Chair of the IMEKO Technical Committee TC7 – Measurement Science.

https://doi.org/10.48552/edesp1-26-40-55

A participação do Laboratório Nacional de Metrologia do IPQ no desenvolvimento da Metrologia Elétrica Europeia

Vitor Cabral
vcabral@ipq.pt
Instituto Português da Qualidade, I. P.
0009-0009-1466-2113

Luís Ribeiro
lribeiro@ipq.pt
Instituto Português da Qualidade, I. P.

Carlos Pires
carlosp@ipq.pt
Instituto Português da Qualidade, I. P.
ORCID: 0000-0001-9650-1763

Isabel Godinho
igodinho@ipq.pt
Instituto Português da Qualidade, I. P.
ORCID: 0000-0003-1624-4598

Resumo:
O Laboratório Nacional de Metrologia do IPQ, enquanto membro da EURAMET - The European Association of National Metrology Institutes, tem participado ativamente em projetos de investigação internacionais, com vista ao desenvolvimento da metrologia europeia, nos diferentes domínios técnico-científicos e de forma a responder às prioridades estabelecidas pelas agendas estratégicas europeia e nacional relativamente ao suporte da metrologia na competitividade da economia, na proteção ambiental, no desenvolvimento dos serviços de saúde e no bem estar da sociedade. Neste artigo, destaca-se a participação recente do IPQ em dois desses projetos, na área das grandezas elétricas, MEMQuD e True8Digit, focando, respetivamente, o desenvolvimento de um novo padrão quântico de resistência elétrica, baseado em dispositivos do tipo memristors e de novas arquiteturas de dispositivos de conversão analógico-digital (ADC) que permita dar um salto significativo na exatidão destes dispositivos na amostragem digital de sinais elétricos (“digitiser”).

Palavras-chave: Padrão quântico resistência elétrica, Memristor, Conversor analógico-digital, Amostragem digital de sinal.

Abstract:
The National Metrology Laboratory of IPQ, as a member of EURAMET - The European Association of National Metrology Institutes, has actively participated in international research projects aimed at developing European metrology in various technical and scientific fields. This aims to address the priorities established by European and national strategic agendas regarding metrology's support for economic competitiveness, environmental protection, the development of health services, and societal well-being. This article highlights IPQ's recent participation in two such projects in the field of electrical quantities: MEMQuD and True8Digit. These projects focus on the development of a new quantum standard for electrical resistance, based on memristor-type devices, and on new analog-to-digital converters (ADC) architectures that allow for a significant leap in the accuracy of these devices in the digital sampling of electrical signals ("digitiser").

Keywords: Quantum standard of electrical resistance, Memristor, Analog-to-digital converter, digital signal sampling

1. Padrão intrínseco de resistência elétrica baseado em dispositivos do tipo memristor

A revisão do Sistema Internacional de Unidades (SI) pela Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM), em 2019 [1], redefiniu as unidades de base através de valores fixos e exatos de constantes fundamentais da natureza, representando um passo significativo e histórico ao estabelecer, pela primeira vez, que todas as 7 unidades de base do SI não dependem de nenhum artefacto, propriedade material ou descrição de medição. Por outro lado, qualquer sistema experimental capaz de correlacionar grandezas físicas mensuráveis com uma constante fundamental da natureza ou a um conjunto de constantes fixadas pelo SI, torna-se uma realização direta da unidade SI correspondente.

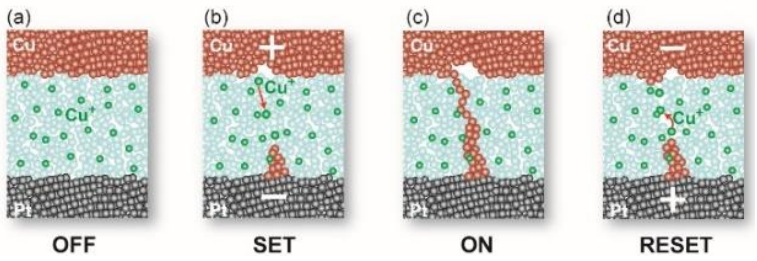
Relativamente às unidades elétricas, a redefinição da unidade de base ampere (A) em termos dos valores exatos da carga elementar ***e*** e da constante de Planck ***h***, permitiram a harmonização da realização das unidades elétricas com as realizações já estabelecidas das unidades convencionais do ohm e do volt, realizadas e disseminadas por meio do Padrão de Resistência de Hall Quântico (QHRS) e do Padrão de Tensão Josephson [2]. Os sistemas necessários para a implementação destes efeitos são bastante complexos e demorados para operar, exigindo, no caso do QHRS, altos campos magnéticos e baixas temperaturas, próximas de 1 K.

Os dispositivos memristivos, ou memristor (da contração de memória + resistor), são um tipo de dispositivos à nano escala cujas funcionalidades dependem de efeitos nano-iónicos. Inicialmente teorizado em 1971 pelo Prof. Chua [3], o conceito de memristor foi associado aos chamados dispositivos de comutação resistiva em 2008 pelo grupo de Stanley Williams nos

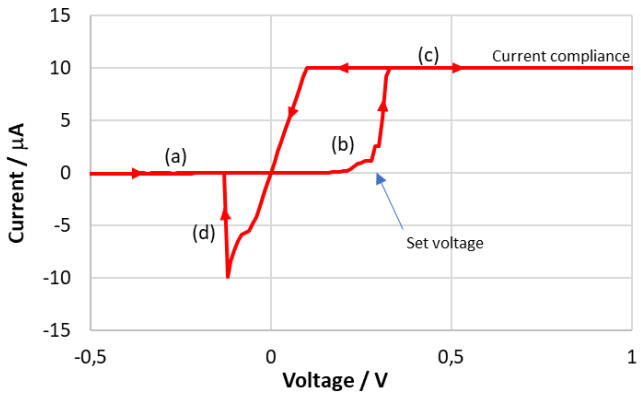
laboratórios da HP [4]. Estes dispositivos de dois terminais são constituídos por uma camada de material isolador (geralmente um óxido metálico) intercalada entre dois elétrodos metálicos formando uma estrutura metal-isolador-metal (Figura 1.I) [5]. O princípio de funcionamento de dispositivo memristor é baseado em catiões com um elétrodo ativo de Cu e um elétrodo coletor de Pt: **(a)** representa o estado inicial ou desligado, OFF; **(b)** mostra a dissolução de átomos de Cu do elétrodo metálico em iões Cu^+ e a sua migração através da camada isoladora, formando um filamento metálico durante a operação de 'programação' ou SET; **(c)** é o estado ligado, ON, em curto-circuito; **(d)** mostra a dissolução do filamento na etapa de RESET sob polarização reversa e o retorno ao estado desligado**.** Nesta estrutura, o estado de resistência (ou condutância) interno depende do histórico da tensão e corrente aplicada entre os elétrodos conforme observado na curva típica I-V da Figura 1.II para um dispositivo baseado numa estrutura de Pt/Cu/SiO_2/Pt (30 nm/30 nm/50 nm/30 nm) obtida para um sinal de tensão variável aplicado entre os elétrodos e uma corrente com limitação a 10 µA. Dispositivo fabricado e dados experimentais obtidos pelo IPQ em medições realizadas no âmbito do projeto MEMQuD – *Memristive devices as quantum standard for nanometrology*, da EURAMET

Figura 1 (I) - Apresentação esquemática do princípio de funcionamento de dispositivo memristor. (II) Curva característica I-V de um dispositivo baseado numa estrutura de Pt/Cu/SiO_2/Pt.

I)



II)



Fonte: 25th IMEKO TC4 Int. Symp. on Measurement of Electrical Quantities [5]

Esta característica fundamental tem sido explorada para aplicações de uma nova geração de memórias não-voláteis, assim como de arquiteturas de computação-em-memória e circuitos de simulação neuromórfica.

A operação destes dispositivos sob condições específicas, de modo a gerar filamentos condutores entre os elétrodos com dimensão ao nível atómico, formando um ou vários "quantum point contact" (QPC), permite a obtenção de estados de baixa resistência elétrica, correspondentes a valores múltiplos (ou múltiplos semi-inteiros) do valor fundamental da condutância, $G_0 = 2e^2/h$. Isso significa que estes dispositivos oferecem uma plataforma promissora para gerar valores de resistência elétrica quânticos, funcionando no ar, à temperatura ambiente, e sem a necessidade de qualquer campo magnético aplicado, como é necessário para o QHRS. Esses valores quânticos de resistência estão, portanto, de acordo com a característica fundamental da revisão das unidades do SI, dependendo apenas dos valores fixos das constantes fundamentais ***e*** e ***h***.

O projeto Euramet MEMQuD - *Memristive devices as quantum standard for nanometrology* [6] que decorreu entre 2022 a 2024, contando com a participação de 5 Laboratórios Nacionais de Metrologia e 10 Institutos de Investigação Europeus, teve como objetivo principal estudar em detalhe os efeitos quânticos nestes dispositivos memristors e explorar, pela primeira vez, a sua aplicação metrológica, no desenvolvimento de um novo padrão intrínseco de resistência elétrica, com a capacidade de funcionar à temperatura ambiente e integráveis em circuitos eletrónicos, de forma a suportarem processos de auto-ajuste e auto-calibração de instrumentos de medição. Os resultados alcançados e apresentados na secção seguinte lançam as bases para a realização do conceito conhecido como "NMI-on-chip" – isto é, os serviços de um Instituto Nacional de Metrologia integrados diretamente num microchip - representando uma realidade disruptiva em relação ao estado-da-arte onde a integração de padrões intrínsecos em instrumentação de medida se torna possível, assegurando a sua rastreabilidade direta ao SI e deixando de serem necessárias longas cadeias de rastreabilidade desde o utilizador final até aos Laboratórios Nacionais de Metrologia.

O Laboratório Nacional de Metrologia do IPQ liderou um dos grupos de atividades do projeto que produziu os resultados experimentais apresentados de seguida.

1.1. Os resultados do projeto MEMQuD

Os principais resultados do projeto foram recentemente publicados na revista *Nature Nanotechnology* [7] e demonstraram a possibilidade de programar estados de condutância elétrica de $1G_0$ e $2G_0$ - em memristors de estrutura Pt/Ag/SiO_2/Pt, onde os filamentos são

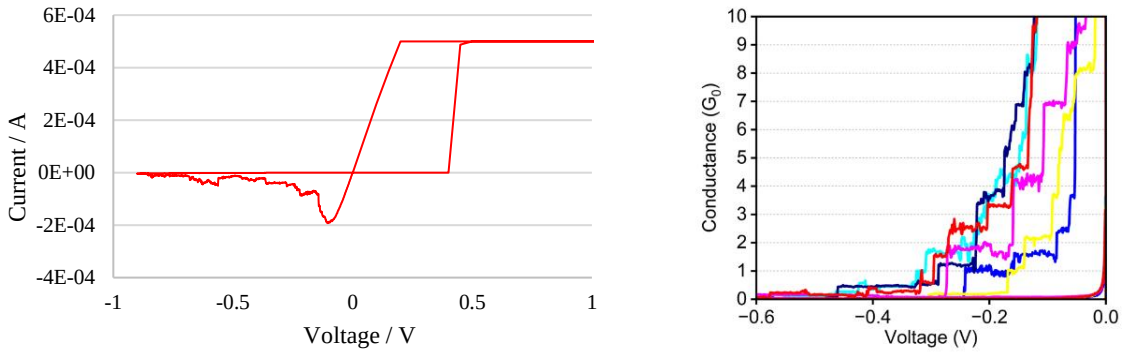
formados por átomos de prata – com desvios de $(0.962 \pm 0.043)\ G_0$ and $(2.012 \pm 0.051)\ G_0$ em relação aos valores SI da condutância fundamental, respetivamente.

Estes resultados decorreram de uma intercomparação envolvendo 5 participantes do projeto e da aplicação de um protocolo de programação desenvolvido para ativar os estados quânticos de condutância baseado num processo de "polimento eletroquímico". Esse processo consistiu na adoção de uma abordagem em que um filamento de condução formado por átomos de prata entre os elétrodos do dispositivo é inicialmente formado, por aplicação de uma tensão elétrica (SET), e depois reduzido progressivamente, por aplicação de uma tensão de polaridade negativa (RESET), até à obtenção de filamentos formados (na sua zona mais estreita) por ***n*** átomos, correspondendo a nG_0. Consegue-se, assim, controlar a morfologia dos nanocanais responsáveis pelos efeitos de condutância quântica com precisão atómica.

Na Figura 2.I pode-se observar a curva I-V de um desses ciclos de SET/RESET. Na Figura 2.II são representados os valores de condutância obtidos em diversos ciclos consecutivos de SET/RESET.

Figura 2 (I) - Curva I-V de um memristor Pt/Ag/SiO₂/Pt, resultante de um ciclo SET/RESET. **(II) - Valores de condutância obtidos durante a fase RESET**, para vários ciclos SET/RESET consecutivos.

I **II**

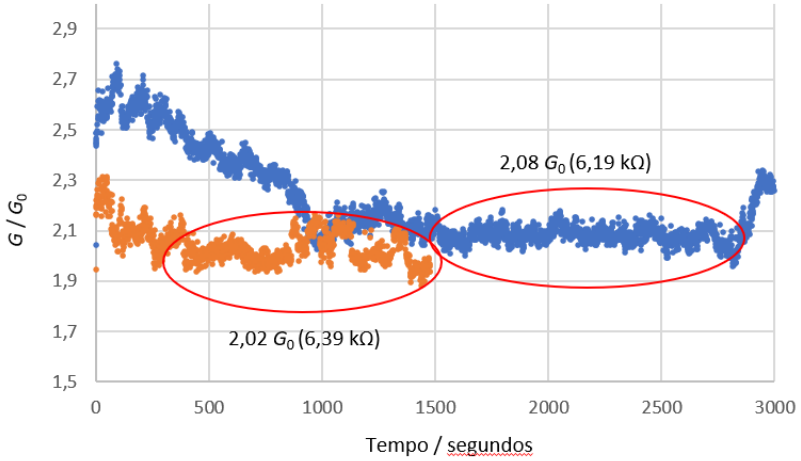


O protocolo usado na intercomparação atrás referida estabeleceu a seleção dos valores de $1G_0$ e $2G_0$. Assim, na fase RESET de cada ciclo e na deteção da ocorrência desses estados de condutância, a variação de tensão aplicada é interrompida e aplicado um valor de tensão constante suficiente para estabilizar o filamento no estado de condutância pretendido. Na figura 3 são apresentados 2 ciclos consecutivos na programação do valor $2G_0$. Estes estados

foram obtidos após programação e estabilização do valor de 2 G_0, em 2 ciclos consecutivos de SET/RESET num memristor Pt/Ag/SiO_2/Pt, com o protocolo desenvolvido no projeto MEMQuD. Os valores apresentados na figura para G são os valores médios calculados para os conjuntos de valores limitados pelas curvas a vermelho.

Os valores obtidos de desvios de -3,8 % e 0,6 % em relação aos valores respetivos da condutância fundamental 1 G_0 e 2 G_0 resultam predominantemente da característica estocástica do processo de formação dos filamentos de condutância neste tipo de dispositivos. Essa variabilidade elevada, não permite, no imediato, a aplicação prática destes dispositivos como padrão intrínseco de resistência. No entanto, o trabalho realizado lançou as bases para um desenvolvimento futuro, com a experimentação de novos materiais, processos de engenharia e novos protocolos de controlo para melhorar a reprodutibilidade da programação dos estados quânticos, encontrando-se em preparação um novo projeto de investigação internacional com a participação do Laboratório Nacional de Metrologia do IPQ.

Figura 3 - Estados de condutância ao longo do tempo.



2. Projeto Tru8Digit - desenvolvimento de um novo "Digitiser"

O estado-da-arte para a medição de tensão elétrica pode ser identificado através dos dispositivos mostrados na Figura 4. Ao nível primário, temos o sistema usualmente denominado "AC Quantum Voltmeter" baseado num padrão quântico de tensão Josephon que permite obter uma incerteza relativa na ordem dos 10^{-9}, mas com custo elevado de aquisição e de operação (exigência de sistema criogénico para temperaturas de alguns kelvin). Num segundo nível de exatidão, na cadeia de rastreabilidade, temos os multímetros digitais de elevada resolução (8,5 dígitos) inicialmente desenvolvidos para aplicação metrológica, com capacidade de amostragem digital de sinal (atuais Keysight 3458A e Fluke 8588A) com incertezas relativas

na ordem de 10^{-6}, à temperatura ambiente, para sinais em regime contínuo (DC – direct current). Para sinais em regime alternado (AC – alternate current), o valor da incerteza aumenta com a frequência do sinal amostrado. De notar que a arquiteturas destes multímetros, foram desenvolvidas há várias décadas, não se tendo registado, desde então, desenvolvimentos significativos na sua exatidão.

A necessidade de preencher a lacuna de exatidão entre estes 2 níveis, com um instrumento de medição de sinais AC – "digitiser", com uma incerteza relativa na ordem 10^{-8} (ruído e linearidade) encontra justificação do ponto de vista de aplicação em diversas áreas da medição onde a análise de sinais AC é relevante (e.g. indústria automóvel, telecomunicações, área aeroespacial, electromedicina, potência e energia elétrica, etc.). Como esse objetivo, foi iniciado em 2023 o projeto True8DIGIT – "Towards a true 8-digit digitiser" [8], com a duração de 3 anos e com um consórcio de 15 entidades formado por Laboratórios Nacionais de Metrologia, Universidades, Institutos de Investigação e parceiros da Indústria. O projeto foi planeado para duas etapas. A primeira etapa (True8DIGIT) consiste em estabelecer as bases para o desenvolvimento de um "digitiser" desse tipo. A produção de um protótipo será objeto de um projeto subsequente, partindo das bases previamente estabelecidas.

Figura 4 (I) - Sistema padrão primário "AC Quantum Voltmeter" baseado num padrão de tensão Josephson**. (II) - Multímetros digitais de elevada resolução (8,5 dígitos)**.

I II

Fonte: [I] Supracon AG. [II] Keysight, Fluke

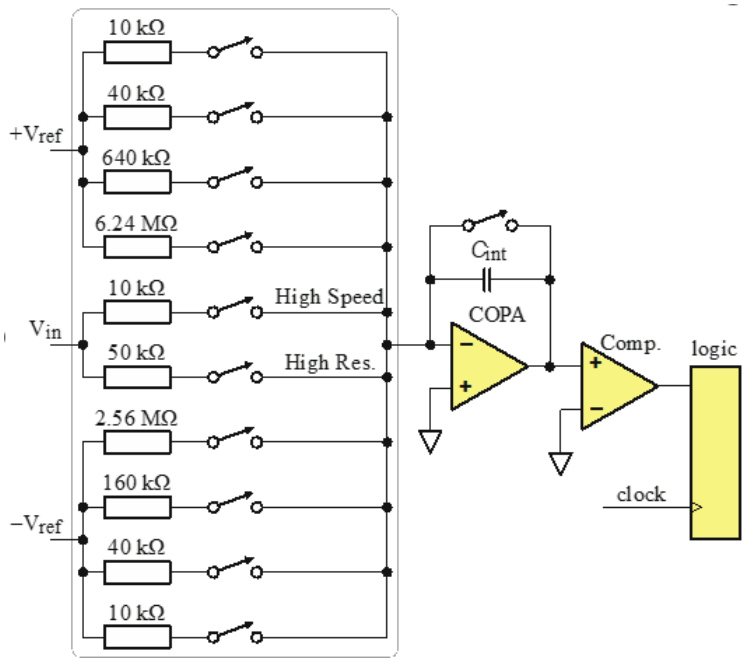
Um sistema "digitiser" envolve diversas componentes: um circuito de condicionamento do sinal de entrada, um ADC (analogue to digital converter), uma referência de tensão, uma fonte de energia e um circuito base-de-tempo. Todas estas componentes contêm imperfeições que contribuem para a exatidão global do sistema de medição, introduzindo erros de "offset", ruído, não-linearidade, deriva no tempo e dependência das condições ambientais (temperatura e humidade). A melhoria do atual nível de exatidão exige a melhoria do desempenho de cada

uma destas componentes, tendo o projeto True8DIGIT sido estruturado em grupos de atividades de acordo com separação destas componentes principais.

Um dos diversos tipos de desenho de ADC explorado no projeto, com melhor exatidão para sinas DC e de baixas frequências (até 200 Hz), é o "multi-slope integrating ADC" (IADC) com esquema simplificado de operação representado na Figura 5, onde a um sinal de entrada de tensão é medido ao longo de um intervalo de tempo fixo. Alguns dos fatores chave que afetam a linearidade deste tipo de ADC são: deriva da tensão de "offset", ganho finito e largura de banda do amplificador operacional; absorção dielétrica, correntes de fuga e não-linearidade da capacitância do condensador; deriva e ruído da tensão de referência, deriva e não-linearidade das resistências de entrada; "jitter" e "injection charge" na operação dos interruptores que provocam desvios no comportamento ideal de rampa do sinal de tensão de saída do amplificador operacional.

Um dos principais objetivos do projeto consiste na identificação da influência destes parâmetros, através do desenvolvimento de um modelo específico em MATLAB e simulação com *Simulink* e *LTspice*), bem como na avaliação da possibilidade da sua mitigação, de forma a melhorar o desempenho global em termos de ruído e de linearidade num novo desenho de um IADC. Para o efeito, a medição dos parâmetros referidos com elevada exatidão é essencial.

Figura 5 – Esquema simplificado do "Integral ADC" do multímetro Keysight 3458A



Fonte: Hewlett-Packard Journal, Vol. 40, Nr. 1, April 1989

2.1. Caracterização de componentes pelo IPQ

A contribuição do IPQ para atividades do projeto True8DIGIT até ao momento, incluiu, entre outras, a caracterização de alguns dos componentes que integram os IADC e identificados atrás. Nos pontos seguintes destacam-se a caracterização do "jitter" de um potencial circuito para ser usado como base-de-tempo e a variação da razão de resistências (tipo "metal-foil") com a temperatura e humidade.

2.2. Caracterização do jitter de sinais de base de tempo

Os sinais de tempo definem os instantes de amostragem de um sinal de tensão por um IADC, pelo que os erros de deriva e de "jitter" dos sinais de tempo afetarão a medição da amplitude do sinal de entrada pelo ADC. A deriva de um sinal de tempo é o resultado do erro de frequência do oscilador ("clock" ou "base de tempo") e o jitter é a consequência do ruído de frequência do oscilador. O "jitter" de um sinal de tempo é definido como "o desvio padrão do tempo de amostragem aparente" [9], assumindo uma natureza aleatória que introduz um ruído de amplitude no sinal amostrado proporcional à taxa de variação do sinal. Para um sinal de onda sinusoidal, o ruído de amplitude é máximo na passagem pelo zero e mínimo na amplitude de pico do sinal [10].

A deriva do sinal de tempo produz um erro cumulativo no instante de amostragem ao longo das amostras consecutivas, enquanto o "jitter" introduz um ruído de amplitude no sinal amostrado proporcional à taxa de variação do sinal. O ruído de amplitude de um sinal de onda sinusoidal devido ao "jitter" pode ser expresso em termos de SNR (relação sinal-ruído) pela seguinte expressão [9], [10]:

$$SNR_j = -20\log_{10}(2\pi f t_j)$$

Onde $\boldsymbol{f}$ é a frequência do sinal em Hz e $\boldsymbol{t_j}$ é o valor do "jitter" em segundos.

Com os multímetros digitais atuais, um "jitter" de 50 ps é um valor suficientemente baixo para não influenciar o desempenho do "digitiser" para sinais até 100 kHz. No entanto, com a melhoria da relação sinal-ruído (SNR) do "digitiser", esse requisito torna-se mais rigoroso e uma especificação de "jitter" de 10 ps, para todos os sinais de tempo internos é estabelecida como meta a atingir no desenho de um novo IADC com desempenho melhorado.

Nas medições realizadas pelo IPQ, foi testada uma placa comercial EVM-LMK05318B, Texas Instruments (Figura 6) como circuito de base-de-tempo a usar num IADC e para saídas de frequências programadas para 10 MHz e 100 MHz. O "jitter" desses sinais foi medido com um osciloscópio Tektronix MSO64B (1 GHz, 50 GS/s) referenciado a um sinal de 10 MHz de

um relógio atómico de césio do Laboratório de Tempo e Frequência do IPQ de forma a assegurar a rastreabilidade e exatidão das medições. O mesmo sinal de 10 MHz foi usado como referência externa da placa EVM-LMK05318B que atua, dessa forma, como um distribuidor de sinais de tempo referenciados a uma referência externa, com "jitter" reduzido e sincronizados em fase.

A Figura 7 mostra o histograma da medição do "Time Interval Error" (TIE) - diferença no tempo entre o instante de deteção do sinal de tempo real e o instante correspondente de um sinal de tempo de referência [11] - obtido para o sinal de saída de 100 MHz da placa EVM-LMK05318B e correspondendo a um valor de "jitter" (desvio-padrão) de 2,2 ps. Para o sinal de 10 MHz foi obtido um valor ligeiramente superior de 3,6 ps. Ambos os sinais superaram a meta estabelecida de um valor máximo de "jitter" de 10 ps, provando que o oscilador e circuito da placa testada é uma solução viável como componente de um novo desenho de IADC.

Figura 6. Placa EVM-LMK05318B da Texas Instruments

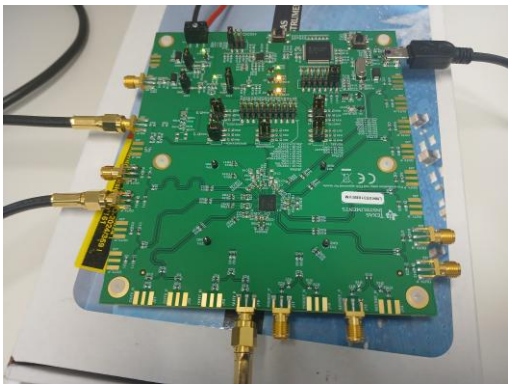
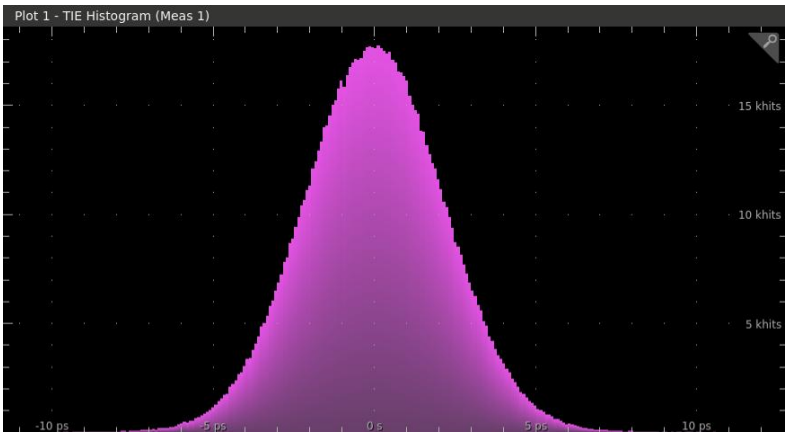


Figura 7. Histograma das medições do TIE obtido para sinal de saída programado de 100 MHz da Placa EVM-LMK05318B, com um "jitter" de 2,2 ps



2.2.1. Caracterização de variação de resistência com temperatura e humidade ambiente

Para melhorar o desempeno de IADC, a caracterização precisa de componentes passivos (resistências e condensadores) é essencial. Os fabricantes destes componentes fornecem geralmente especificações para intervalos alargados de temperatura – tendo em vista a sua aplicação em âmbito comercial, industrial ou militar – e no caso da humidade, a informação disponível restringe-se a testes climáticos para conhecer o efeito da exposição prolongada a altos níveis de humidade e não a coeficientes de variação. No entanto, para aplicações metrológicas e de maior exatidão, em ambientes controlados, importa conhecer as especificações para intervalos de variação mais reduzidos de temperatura e humidade. Nesse regime, o desempenho real dos componentes passivos pode exceder as especificações de fabricante.

Para o efeito, o IPQ testou diferentes pares de resistências para quantificar os coeficientes térmico e de humidade da sua razão. Foram testados os seguintes tipos de resistências com o mesmo valor de ratio nominal (1:1):

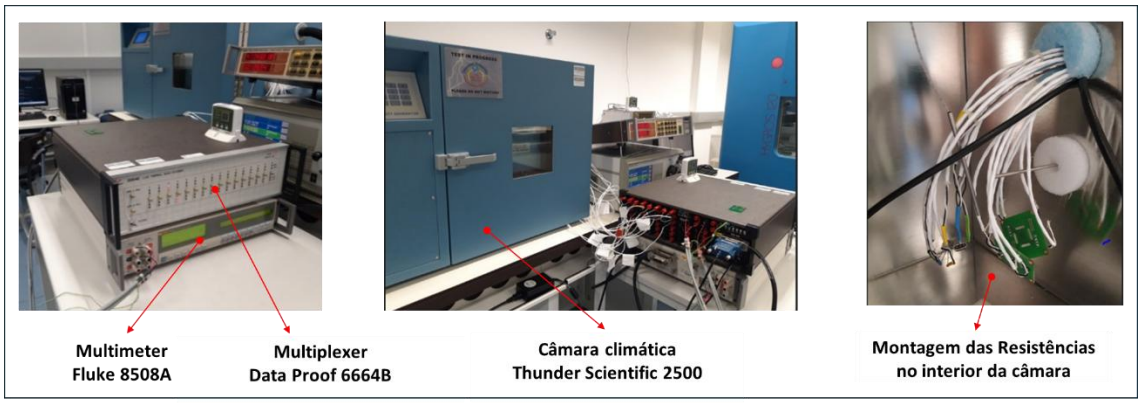
R_1 10 kΩ / 10 kΩ, encapsulamento metálico (3 terminais)

R_2 4 x 10 kΩ, encapsulamento de plástico (8 terminais)

R_3 10 kΩ / 10 kΩ, encapsulamento de plástico (3 terminais)

A Figura 8 mostra o sistema de teste usado, onde uma câmara climática forneceu as condições de variação de temperatura e humidade pretendidas, um multiplexer permitiu o teste em simultâneo dos vários pares de resistência e um multímetro de alta resolução mediu o seu ratio.

Figura 8. Sistema de teste usado.



As resistências foram submetidas a patamares de variação da temperatura entre 15 °C e 45 °C, em ambos os sentidos, com incrementos de 10 °C e a 50 % de humidade relativa fixa, com um período de estabilização entre 12 e 14 horas em cada patamar. Um pré-

condicionamento a 15 °C e 50 % de humidade relativa por aproximadamente 2,5 dias garantiu o equilíbrio térmico e de humidade inicial. Em cada etapa de temperatura, foram realizadas cerca de 40 medições consecutivas após a estabilização do patamar. Essa abordagem excluiu efeitos transitórios e garantiu valores representativas para cada condição. A Figura 9 mostra a variação do ratio de resistência (desvio em relação ao valor nominal) com a temperatura, para R_1 e R_2. Observou-se uma ligeira histerese entre os ciclos ascendentes e descendentes, atribuída ao atraso térmico ou relaxamento do material. Os valores médios dos erros relativos da razão (δr) e seus desvios padrão (σ) estão resumidos na Tabela 1.

Figura 9. Variação do ratio de resistência (desvio em relação valor nominal) com a temperatura para dois pares de resistências distintos e com a relação nominal de 1:1.

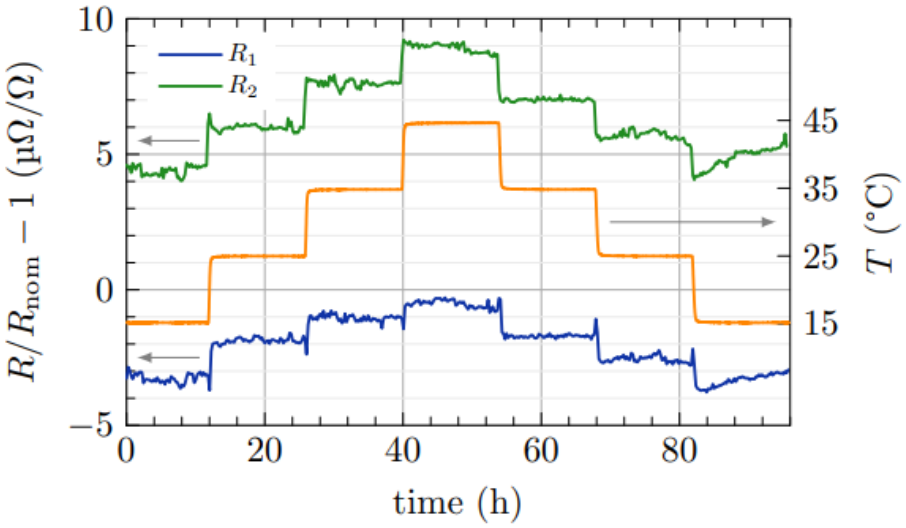


Tabela 1. Valor médio e desvio padrão dos valores do ratio (desvio em relação ao valor nominal) medido em cada patamar de temperatura, para os 3 tipos de resistências sujeitos a teste.

T (ºC)	$\delta r(R_1)$ (μΩ/Ω)	σ (μΩ/Ω)	$\delta r(R_2)$ (μΩ/Ω)	σ (μΩ/Ω)	$\delta r(R_3)$ (μΩ/Ω)	σ (μΩ/Ω)
15	–3.31	0.02	4.36	0.03	–27.22	0.04
25	–1.85	0.02	5.99	0.02	–27.25	0.03
35	–1.06	0.02	7.59	0.02	–28.01	0.03
45	–0.48	0.02	8.95	0.02	–28.47	0.03
35	–1.71	0.01	7.02	0.01	–28.60	0.01
25	–2.53	0.02	5.75	0.02	–27.80	0.03
15	–3.30	0.02	4.96	0.03	–26.81	0.03

Os coeficientes térmicos relativos (TC) calculados para os ratios de resistência, obtidos por regressão linear, foram os seguintes:

R_1: TC = $+0{,}09\times10^{-6}$ K^{-1}

R_2: TC = $+0{,}14\times10^{-6}$ K^{-1}

R_3: TC = $-0{,}05\times10^{-6}$ K^{-1}

Esta caracterização indica que, embora todos as resistências apresentem uma deriva previsível com a temperatura, a resistência R_2 exibe maior sensibilidade térmica em comparação com R_1 e R_3.

Uma caracterização análoga foi realizada para uma variação da humidade relativa entre 10 %hr e 80 %hr. Para R_1 e R_2, a sensibilidade da variação do ratio da resistência com a humidade foi de uma ordem de grandeza inferior relativamente aos valores obtidos para os correspondentes coeficientes de temperatura: $0.3\times10^{-}8$ $\%rh^{-1}$ e 3×10^{-8} $\%rh^{-1}$, respetivamente. Para R_3, obteve-se o mesmo valor de sensibilidade (-5×10^{-8} $\%rh^{-1}$), significado que para este tipo de resistência, a variação da humidade ambiente é igualmente relevante.

3. Conclusões

Os Institutos Nacionais de Metrologia procuram implementar e desenvolver continuadamente sistemas de medição capazes de atingir níveis de exatidão superiores e de operacionalização mais eficiente. Regionalmente, os Institutos Nacionais de Metrologia agrupam-se em associações para coordenar e desenvolver trabalho em conjunto, sendo, na Europa, esse papel assegurado pela EURAMET. Nos últimos anos, muitos dos projetos de investigação conjuntos a nível europeu, e em que Portugal tem participado ativamente desde 2014 (projetos ACQ-PRO, DIG-AC, VersICaL), têm-se focado no desenvolvimento de aplicações dos padrões quânticos de tensão Josephson, para substituir os sistemas de rastreabilidade clássicos de tensão AC, baseados em termo-conversores AC-DC; na amostragem digital de sinais elétricos AC, com multímetros rastreados diretamente aos padrões Josephson e no desenvolvimento de novos padrões quânticos de resistência elétrica baseados em novos materiais semicondutores operando segundo o efeito Hall, mas a temperaturas mais elevadas ou sem a necessidade de campos magnéticos elevados.

Com os exemplos apresentados neste artigo procurou-se exemplificar o trabalho que tem sido realizado a nível Europeu;a participação do IPQ que tem sido assegurada em resposta à estratégia nacional identificada de contribuição ativa para o desenvolvimento da metrologia e os impactos na sociedade que estes projetos procuram produzir.

No caso do projeto MEMQuD, a possibilidade de realização do novo tipo de padrão quântico de resistência terá um impacto de enorme relevo na eficiência dos custos atualmente despendidos na manutenção das cadeias de rastreabilidade e na possibilidade de assegurar essa rastreabilidade direta de instrumentos usados em ambientes extremos, como o espaço ou as profundezas do oceano. A investigação associada a este tópico terá igualmente aplicação no desenvolvimento de outras aplicações dos dispositivos memristors na área da computação e da inteligência artificial, potenciando novas arquiteturas de "hardware" com menor consumo energético e maior velocidade de processamento, contribuindo significativamente para a redução da pegada de carbono associada à computação. Por outro lado, as ferramentas e abordagens metrológicas, usadas neste projeto à nanoescala e aplicáveis na nanotecnologia, terão aplicação na capacidade de caracterização da indústria de semicondutores, suportando redução de escala, assim como a integração e novos conceitos e arquiteturas de dispositivos nanoeletrónicos.

No caso do projeto True8DIGIT, os "digitisers" desempenham um papel vital em praticamente todas as áreas da metrologia. A conversão de sinais analógicos do mundo real em números que podem ser exibidos, armazenados e processados é fundamental para quase todos os processos de medição. Com o avanço da ciência e da tecnologia, há uma necessidade crescente de "digitisers" cada vez mais exatos. O projeto visa ser o primeiro passo para responder a essa necessidade, sendo concebido como um esforço de pesquisa preliminar para fundamentar e estabelecer as bases de um projeto subsequente de desenvolvimento de "digitisers" de próxima geração, operando do DC aos 100 kHz. Melhorar o desempenho dos "digitisers" para além do estado da arte atual, de modo a fornecer níveis de exatidão inferiores a 10^{-6}, ampliará a gama de sinais acessíveis para medições rastreáveis, confiáveis e exatas. Este desenvolvimento visa áreas de aplicação que incluem, entre outras: áudio, sismologia (conversão de sinais de sensores sísmicos), levantamentos geográficos, instrumentação industrial, metrologia (sensores de pressão, células de carga, termómetros resistivos e termopares), interferómetros supercondutores (SQUIDs), controlo de corrente de alta precisão para aceleradores magnéticos, etc.

Agradecimentos

O projeto MEMQuD, código 20FUN06, recebeu financiamento do programa "European Metrology Programme for Innovation and Research" (EMPIRE), cofinanciado pelo programa da União Europeia Horizonte 2020 para Investigação e Inovação e pelos Estados Participantes.

O projeto True8DIGIT, código 22RPT02, recebeu financiamento do programa "European Partnership on Metrology" (EPM), cofinanciado pelo programa da União Europeia Horizonte 2020 para Investigação e Inovação e pelos Estados Participantes. O participante do Reino Unido é apoiado pela subvenção UKRI número 10.084.012 (Signal Conversion Ltd).

Referências

[1] Bureau International des Poids et Mesures (2019). (2026-01-26). *The International System of Units (SI Brochure)*. Retrieved from https://www.bipm.org/en/publications/si-brochure/

[2] Bureau International des Poids et Mesures (2019). (2026-01-26). In SI Brochure. *Mise en pratique for the definition of the ampere and other electric units in the SI* (Appendix 2). Retrieved from https://www.bipm.org/en/publications/mises-en-pratique.

[3] Chua, L. (1971). Citation: Memristor - the missing circuit element. *IEEE Transactions on circuit theory*, 18(5), 517-518.

[4] Strukov, D. B; Snyder, G. S.; Stewart, D. R.; Williams, R. S. (2008). Citation: The missing memristor found. *Nature*, 453(7191), 80-83.

[5] Cabral, V. et al (2022). Citation: Memristive devices as a potential resistance standard. Proc. of the 25th IMEKO TC4 Int. Symp. on Measurement of Electrical Quantities,13-17.

[6] 20FUN06 MEMQUD, Memristive devices as quantum standard for nanometrology. Retrieved from https://memqud.inrim.it/.

[7] Milano, G. et al (2025). Citation: A quantum resistance memristor for an intrinsically traceable International System of Units standard. *Nature Nanotechnology*, 20, 1884–1890. Retrieved from https://www.nature.com/articles/s41565-025-02037-5

[8] 22RPT02 Towards a true 8-digit digitiser. (2026-01-26). Retrieved from https://true8digit.eu/

[9] IEEE Std 1241 (2010). *IEEE Standard for Terminology and Test Methods for Analog-to-Digital Converters*.

[10] Lapuh, R. (2018) *Sampling with 3458A*. Left Right.

[11] TEKTRONIX (V1.8x). (2026-01-26). *TEKTRONIX 5 Series MSO and 6 Series MSO (MSO54, MSO56, MSO58, MSO58LP, MSO64) Printable Help - Supports Product Firmware*

Authors Profiles

Vitor Cabral has received a university degree on Physics Engineering from the Faculty of Sciences and Technology – University of Coimbra – Portugal. He is currently Technical Responsible for the Electricity Laboratory of the Instituto Português da Qualidade (IPQ) – Portugal. His research interests are in the areas of metrology, nanotechnology and quality management systems applied to Laboratory activities.

Luís Ribeiro is a graduate of the Electrical Engineering course at Instituto Superior Técnico – University of Lisbon – Portugal and was part of the Electricity Laboratory of the Instituto Português da

Qualidade (IPQ) – Portugal staff between 2009 and 2025, assuming responsibility for the metrological domains of direct and alternating voltage and current, as well as acceleration and vibrations.

Carlos Pires has graduated in Physical Engineering from the Faculty of Sciences of the University of Lisbon and, by the same university, he did a master's degree in Physical Engineering. In 2007, he started his duties at the Speed Laboratory of the National Metrology Laboratory, of the Portuguese Institute for Quality. In 2015, assumes the functions of head for the Time and Frequency domain. He currently serves as Chair of the Time and Frequency Technical Committee (TC-TF) of EURAMET

Isabel Godinho has a degree in Physics from the Faculty of Sciences of the University of Lisbon and a PhD in Physics from the same University. She is presently Director of the Metrology Department of IPQ and responsible for the national metrology system, in scientific, applied and legal metrology. She is currently EURAMET delegate and European Partnership on Metrology representative and national representative on the OIML and BIPM. Her research interest is in metrology, mainly in the fields of electrical, quantum metrology and acceleration.

Special Issue - Scientific Metrology, 2026
https://doi.org/10.48552/edesp1-26-56-70

Os novos desafios metrológicos na descarbonização e transição para uma economia de baixas emissões gasosas

Florbela A. Dias
florbelad@ipq.pt
Instituto Português da Qualidade
0009-0002-9425-146X

Carlos J. Costa
ccosta@ipq.pt
Instituto Português da Qualidade
0009-0000-4802-064X

Cristina Palma
cpalma@ipq.pt
Instituto Português da Qualidade
0009-0001-0385-0487

Resumo:

A descarbonização profunda das economias europeias e mundiais implica um conjunto de transformações estruturais que vão muito além da adoção de tecnologias verdes. Requer, acima de tudo, confiança nas medições, fundamento essencial para avaliar, validar e otimizar qualquer processo tecnológico que envolva emissões de gases com efeito de estufa, produção e utilização de hidrogénio, ou síntese e decomposição de amoníaco como vetor energético. Como afirma o Pacto Ecológico Europeu (Green Deal), "*a UE será transformada numa economia moderna, eficiente na utilização de recursos e competitiva.*" Este artigo explora, em detalhe, dois domínios estratégicos do setor do Clima e Energia: as tecnologias de captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS) e o papel emergente do amoníaco (NH_3) como veículo do hidrogénio renovável no contexto da transição energética. A análise centra-se nos desafios metrológicos associados a estas áreas e na forma como os projetos europeus MetCCUS e MetNH3Energy, com participação ativa do Instituto Português da Qualidade (IPQ) e do seu Laboratório de Gases de Referência (LGR), fortalecem a harmonização técnica, promovem inovação e garantem resultados comparáveis entre países, apoiando decisões científicas fundamentadas. O IPQ desempenha assim um papel central em ambos os projetos, produzindo misturas gasosas certificadas e contribuindo decisivamente para a infraestrutura metrológica que permitirá a adoção segura e eficaz destas tecnologias emergentes em larga escala.

Palavras-chave: Amoníaco, Captura de Carbono, *Green Deal*, Hidrogénio.

Abstract:
The deep decarbonisation of European and global economies entails a set of structural transformations that go far beyond the adoption of green technologies. Above all, it requires trust in measurements, a fundamental basis for assessing, validating, and optimising any technological process involving greenhouse gas emissions, the production and use of hydrogen, or the synthesis and decomposition of ammonia as an energy vector. As stated in the European Green Deal, "*the EU will be transformed into a modern, resource-efficient, and competitive economy.*" This article explores, in detail, two strategic domains within the Climate and Energy sector: carbon capture, utilisation and storage (CCUS) technologies, and the emerging role of ammonia (NH_3) as a carrier of renewable hydrogen in the context of the energy transition. The analysis focuses on the metrological challenges associated with these areas and on how the European projects MetCCUS and MetNH3Energy, with the active participation of the Portuguese Institute for Quality (IPQ) and its Reference Gas Laboratory (LGR), strengthen technical harmonisation, foster innovation, and ensure comparable results across countries, supporting evidence-based scientific decisions. The IPQ thus plays a central role in both projects, producing certified gas mixtures and contributing decisively to the metrological infrastructure that will enable the safe and effective large-scale adoption of these emerging technologies.

Keywords: Ammonia, Carbon Capture, Green Deal, Hydrogen.

1. Introdução

A crescente preocupação com as alterações climáticas e a necessidade de reduzir as emissões globais de gases com efeito de estufa têm impulsionado o desenvolvimento de tecnologias inovadoras de mitigação. É neste contexto que se inscrevem duas vertentes tecnológicas que têm vindo a ganhar uma importância crescente: por um lado, a captura, utilização e armazenamento de carbono, conhecido internacionalmente sob a sigla CCUS (*Carbon Capture Utilization and Storage*); por outro, o desenvolvimento do amoníaco como vetor energético associado à economia do hidrogénio. Ambas, pela sua complexidade química e pela exigência técnica dos processos que as sustentam, dependem de forma crítica de medições de elevada exatidão e de padrões de referência rigorosos. Ambas estão também no centro da atenção da metrologia europeia, através de iniciativas como os projetos MetCCUS [1] e MetNH3Energy [2].

A transição energética global é frequentemente apresentada ao público como um desafio tecnológico e económico: energias renováveis mais eficientes, eletrificação dos transportes, sistemas de armazenamento avançados, reconfiguração das cadeias de valor industriais e novas soluções para reduzir ou capturar emissões. No entanto, independentemente da inovação

envolvida, existe um elemento transversal que determina o sucesso de todas estas iniciativas: a qualidade das medições.

A metrologia, enquanto ciência da medição, é assim um requisito estrutural para todas as políticas climáticas, embora frequentemente permaneça invisível nos debates públicos. No caso da captura de carbono e do hidrogénio renovável, esta importância é ainda mais evidente. As tecnologias envolvem misturas gasosas complexas, processos sensíveis a impurezas em níveis muito baixos, requisitos de pureza extremamente exigentes e necessidade de padrões de referência rasteáveis ao Sistema Internacional de Unidade, SI.

O presente artigo desenvolve esta problemática nos seguintes âmbitos:

1. Captura e gestão de CO_2, onde a medição exata da composição gasosa e das quantidades capturadas é absolutamente determinante.
2. Amoníaco como vetor energético, um dos desenvolvimentos mais promissores da economia do hidrogénio, mas também dos mais exigentes do ponto de vista metrológico.

O Instituto Português da Qualidade (IPQ), particularmente através do seu Laboratório de Gases de Referência, participa ativamente em projetos nestes âmbitos, contribuindo para o desenvolvimento de padrões gasosos, metodologias laboratoriais e materiais de referência gasosos que dão suporte a tecnologias emergentes. A contribuição é de grande relevância nacional e internacional, uma vez que permite que Portugal se encontre alinhado com a infraestrutura metrológica necessária para a implementação e suporte de novos modelos energéticos que surgem em resposta aos atuais desafios ambientais.

2. Captura de Carbono, Utilização e Armazenamento (CCUS)

Apesar do crescimento das energias renováveis e de novos esforços de descarbonização, alguns setores industriais - como a produção de cimento, aço, refinação, petroquímica e cerâmica - continuam a emitir CO_2 em quantidades consideráveis e de difícil redução. Para estes setores, a captura, utilização e armazenamento de carbono é amplamente reconhecida como uma das poucas soluções tecnológicas capazes de reduzir emissões de forma significativa. No entanto, as soluções tecnológicas de CCUS apresentam desafios com elevados custos de investimento, consumo energético adicional e questões de segurança a longo prazo na vertente do armazenamento geológico. Políticas de incentivo, créditos de carbono e parcerias público-privadas são essenciais para a viabilidade económica dos vários projetos desenvolvidos neste âmbito.

A captura de carbono tornou-se, nos últimos anos, um dos pilares das estratégias de mitigação climática. Embora se trate de uma tecnologia por vezes controversa, do ponto de vista científico e industrial ela revela-se crucial em setores onde as emissões são estruturais.

Os processos de captura variam amplamente, desde a absorção química em minas até tecnologias de membranas, adsorção física ou combustão em atmosfera enriquecida em oxigénio. Cada um destes métodos gera correntes gasosas com composições muito diferentes, que podem incluir altas concentrações de dióxido de carbono, vapor de água em quantidades significativas, oxigénio residual, nitrogénio, óxidos de nitrogénio e de enxofre, hidrocarbonetos, e outros compostos minoritários que, apesar de presentes em concentrações reduzidas, condicionam fortemente o comportamento dos sistemas de captura e de transporte e podem colocar sérias questões relativamente à durabilidade das estruturas físicas envolvidas.

A presença simultânea de tantas espécies químicas, muitas delas reativas, coloca a medição num patamar de exigência particularmente elevado. Não basta conhecer a concentração aproximada de CO_2. É fundamental saber, com as incertezas associadas, qual a composição real da mistura, sob diferentes condições de pressão e temperatura. Pequenas variações na composição gasosa podem ter grandes implicações na segurança do transporte por gasodutos, ou na integridade de reservatórios geológicos onde o CO_2 é posteriormente armazenado.

O transporte e armazenamento geológico elevam ainda mais esta complexidade, já que o dióxido de carbono capturado não é um produto químico puro, mas sim uma corrente industrial variável. Conhecer com exatidão a quantidade que é injetada no subsolo, a evolução da composição ao longo do tempo e o comportamento químico no reservatório implica medições contínuas com equipamentos calibrados com rastreabilidade.

A rastreabilidade metrológica é um requisito transversal em todos os subsetores da CCUS. Na prática, significa que as medições industriais devem estar ligadas a padrões nacionais e internacionais, através de cadeias metrológicas robustas. O papel dos Laboratórios Nacionais de Metrologia (NMI) é, portanto, fundamental na disponibilização de:

- Misturas gasosas primárias certificadas (CRM);
- Serviços de calibração de alto rigor;
- Métodos analíticos validados;
- Estudos de incerteza e comparações interlaboratoriais.

Uma medição incorreta tem impacto não apenas ambiental, mas também regulatório e económico: a contabilização de emissões evitadas, e respetivos créditos de carbono, depende totalmente da exatidão metrológica associada.

Sem padrões de referência adequados - misturas gasosas certificadas de CO_2 com impurezas controladas - não existe forma robusta de validar sensores industriais, instrumentos de monitorização contínua ou sistemas laboratoriais de análise. A metrologia gasosa torna-se, portanto, um componente essencial da própria cadeia CCUS. É precisamente neste contexto que surgiu o projeto MetCCUS [1], que procurou precisamente fortalecer estas capacidades a nível europeu.

2.1. O MetCCUS e a construção de uma base metrológica para o carbono industrial

O projeto *Metrology Support for Carbon Capture Utilisation and Storage* (MetCCUS) teve como propósito fortalecer a infraestrutura metrológica europeia associada ao ciclo completo do carbono capturado. Mais do que um projeto de investigação científica, tratou-se de um esforço coordenado para harmonizar metodologias, criar materiais de referência adequados a condições industriais e reduzir discrepâncias entre laboratórios europeus.

O projeto MetCCUS [1] foi uma iniciativa colaborativa europeia que visou desenvolver técnicas metrológicas avançadas para apoiar a medição e monitorização precisas das emissões de dióxido de carbono (CO_2) nos seus processos de captura, utilização e armazenamento. Teve início em 1 de outubro de 2022, com a participação de 21 parceiros, e durou 36 meses. Este projeto resultou da crescente necessidade e ter dados de confiança e exatos para garantir a eficácia e a segurança das tecnologias de gestão do carbono, que são cruciais para a mitigação das alterações climáticas. Os principais objetivos do projeto MetCCUS incluíram o desenvolvimento de técnicas de medição exatas, melhoria de padrões e calibração, apoio a tecnologias de captura e armazenamento de carbono e utilização de CO_2. O projeto abrangeu diversas atividades-chave, como a investigação e desenvolvimento, testes e validação no terreno, normalização e harmonização, e envolvimento e formação das partes interessadas. O MetCCUS representou um esforço crítico para o avanço da metrologia da medição de CO_2, com implicações significativas para a eficácia das tecnologias de captura, utilização e armazenamento de carbono. Ao melhorar a exatidão e a confiança das medições de CO_2, o MetCCUS apoiou o objetivo mais amplo de reduzir as emissões de gases com efeito de estufa e combater as alterações climáticas.

O trabalho não se limitou à construção dos materiais de referência. Incluiu também validações interlaboratoriais, comparações internacionais de resultados, a participação em comités técnicos europeus e o apoio a novos métodos de monitorização industrial. Tudo isto contribui para que, no futuro, a captura de carbono seja acompanhada por medições

suficientemente sólidas para serem aceites pelos reguladores, pelas empresas, pelos mercados de carbono e pela sociedade em geral.

3. Hidrogénio e Amoníaco: Vetores Energéticos Emergentes e os Desafios Metrológicos Associados

Paralelamente à captura de carbono, o setor energético assiste ao aumento do interesse pelo amoníaco enquanto meio de transporte e armazenamento de hidrogénio. O hidrogénio é apontado como vetor essencial para a descarbonização de setores como mobilidade pesada, indústria química e metalúrgica. No entanto, enfrenta desafios logísticos significativos: é difícil armazenar, transportar e manusear. A escolha do amoníaco não é arbitrária: trata-se de uma molécula que contém 17,6 % de hidrogénio por massa, é relativamente fácil de liquefazer e possui já uma infraestrutura global estabelecida para produção, transporte e armazenamento. Mais importante ainda, pode ser sintetizado a partir de hidrogénio verde, produzido por via de energia renovável, e permite o transporte de energia em grandes quantidades e a longa distância.

No entanto, quando o amoníaco é utilizado como vetor, o objetivo final continua a ser o hidrogénio. Para tal, é necessário, no final do processo, decompor a molécula através de processos termoquímicos - o chamado *cracking* do amoníaco - que produzem uma mistura gasosa contendo hidrogénio, nitrogénio, água e pequenas quantidades de amoníaco residual.

A pureza das matérias envolvidas é uma questão crítica nestes processos. O hidrogénio destinado a aplicações de mobilidade ou a células a combustível exige níveis de pureza extremamente elevados, onde impurezas na ordem das partes por milhão (ppm), ou mesmo partes por bilião (ppb), podem comprometer o desempenho e degradar catalisadores, ou outras estruturas. Medir tais impurezas com exatidão não é trivial e depende de padrões gasosos de composição altamente controlada. Tal como acontece no contexto da captura de carbono, também aqui a metrologia determina se uma tecnologia é viável ou não para uso comercial.

3.1. MetNH3Energy: garantir medições fiáveis na economia do amoníaco renovável

É precisamente para apoiar esta nova cadeia de valor que surge o projeto *Metrology to support ammonia use in emerging applications* (MetNH3Energy) [2], dedicado ao desenvolvimento metrológico para o amoníaco e hidrogénio associado. O projeto procura responder a problemas que vão desde a medição da qualidade do amoníaco até ao controlo das impurezas no hidrogénio produzido por *cracking*.

Uma das contribuições mais relevantes é a criação de padrões gasosos que contenham concentrações muito baixas de NH_3, NO_2, H_2O, CO, CO_2 e outras impurezas relevantes. Estes

padrões são indispensáveis para calibrar instrumentos que operam em gamas ultrabaixas, permitindo que fabricantes, laboratórios e operadores industriais disponham de meios confiáveis para verificar a conformidade com normas como a ISO 14687 [3].

O projeto MetNH3Energy [2] teve início a 1 de agosto de 2025, tem a duração de 36 meses e conta com 26 participantes, sendo um deles o IPQ.

A UE, através do seu Pacto Ecológico, pretende atingir a neutralidade carbónica até 2050, substituindo a utilização de combustíveis fósseis por fontes de energia renováveis. O hidrogénio (H_2) é um "combustível limpo", produzido por eletrólise da água ou por conversão do metano.

O transporte e o armazenamento de hidrogénio são, no entanto, problemáticos; trata-se de um gás explosivo que apenas se torna líquido a temperaturas muito baixas (-253 °C). Uma alternativa atrativa é o transporte de hidrogénio sob a forma de amoníaco (NH_3), que não é explosivo e se encontra no estado líquido a temperaturas muito mais elevadas (-33 °C). Para utilizar plenamente o amoníaco como vetor energético do hidrogénio, existem ainda muitas lacunas críticas na infraestrutura atual. A conversão do amoníaco para gerar hidrogénio pode produzir várias impurezas, incluindo monóxido de carbono, dióxido de carbono, sulfureto de hidrogénio e dióxido de enxofre. Estas impurezas podem degradar o desempenho do combustível de hidrogénio e "envenenar" as células de combustível de hidrogénio ou podem escapar para a atmosfera, representando riscos ambientais.

Este projeto abordará estas questões, fornecendo novos materiais de referência para poluentes prioritários e determinando métodos de monitorização rastreáveis para quantificar com exatidão fugas de amoníaco. Serão desenvolvidas técnicas de monitorização de emissões rastreáveis e em tempo real, de forma a compreender o efeito das impurezas na formação de poluentes.

Espera-se que este trabalho apoie toda a cadeia de valor do hidrogénio, melhorando o comércio de amoníaco, a monitorização de emissões e a deteção de fugas, beneficiando as empresas e contribuindo para os objetivos de sustentabilidade da UE. A contribuição do IPQ vai ser no âmbito da produção de materiais de referência primários, com análise de diferentes grupos de impurezas (por exemplo, CO_2, CH_4 e H_2S), com rastreabilidade às unidades do Sistema Internacional (SI). É também objetivo do IPQ desenvolver materiais de referência gasosos estáticos para poluentes atmosféricos prioritários, nomeadamente o NH_3.

O objetivo geral do projeto é desenvolver uma estrutura metrológica abrangente que apoie a utilização do amoníaco como vetor energético em vários sectores, incluindo a energia, os transportes e a indústria. Isto envolve o estabelecimento de técnicas e normas de medição de

confiança ao longo de toda a cadeia de valor do amoníaco, colmatando lacunas na infraestrutura existente e facilitando a sua adoção em aplicações atuais e emergentes.

Destacam-se, no âmbito do projeto MetNH3Energy, vários objetivos específicos diretamente orientados para o reforço da infraestrutura metrológica necessária ao amoníaco enquanto vetor energético. Entre eles inclui-se o desenvolvimento de novos materiais de referência primários e de métodos avançados de análise de gases, capazes de assegurar medições rigorosas e rastreáveis de amoníaco em diferentes fases da cadeia energética. Paralelamente, prevê-se o desenvolvimento de procedimentos de calibração e validação destinados a medidores de caudal utilizados na medição de fluxos gasosos e líquidos de amoníaco, garantindo desempenho metrológico adequado às condições operacionais exigentes associadas ao seu transporte e utilização.

O projeto contempla ainda o desenvolvimento de métodos rastreáveis de monitorização para a quantificação exata de fugas de amoníaco, bem como a criação de uma infraestrutura metrológica dedicada que suporte a sua deteção ao longo de toda a cadeia de valor. De igual modo, serão desenvolvidas técnicas de medição rastreáveis e validadas, em tempo real e online, de emissões em chaminé, incluindo NH_3, N_2O, NO e NO_2, e de caudal, acompanhadas de estimativas rigorosas de incerteza. Este trabalho integra uma avaliação sistemática dos efeitos das impurezas do amoníaco na formação de poluentes, como SO_2, CO e CO_2, durante a sua conversão termoquímica, contribuindo para melhorar a modelação das emissões e apoiar processos industriais mais seguros e eficientes.

Finalmente, o projeto visa facilitar a adoção precoce dos novos serviços de calibração, materiais de referência, métodos, boas práticas e resultados por parte de utilizadores finais, incluindo setores industriais consumidores de hidrogénio e amoníaco, navegação, produção de energia, fabricantes de sensores e responsáveis por políticas públicas, bem como por organismos de normalização, entidades internacionais de metrologia, institutos de calibração secundária e pela comunidade académica.

4. Desafios Tecnológicos e Ambientais

As principais barreiras incluem eficiência energética na produção e conversão de NH_3, emissões indiretas de NO_x durante o uso e regulamentação internacional de transporte. Soluções inovadoras em catálise, design de reatores e normativos de segurança são necessárias.

O *Green Deal* estabelece a neutralidade carbónica até 2050, com redução significativa de emissões até 2030. O CCUS e hidrogénio/NH_3 são componentes estratégicos para alcançar estes

objetivos. A integração das tecnologias que lhes estão subjacentes maximizam a redução de emissões e promovem a segurança energética.

Os investimentos em CCUS e hidrogénio/NH_3 estimulam inovação tecnológica, criação de empregos verdes e competitividade industrial. Políticas de financiamento público e incentivos fiscais são cruciais para acelerar uma adoção global.

A política europeia de apoio ao CCUS e ao hidrogénio/amoníaco assenta num conjunto articulado de instrumentos financeiros, regulatórios e estratégicos destinados a acelerar a descarbonização da indústria, a segurança energética e o desenvolvimento de tecnologias consideradas essenciais para cumprir as metas climáticas. No caso do CCUS, a União Europeia reconhece esta tecnologia como um pilar-chave para setores industriais difíceis de descarbonizar e estrutura os incentivos em torno de três grandes eixos: financiamento direto, enquadramento regulatório e sinal económico através do preço do carbono.

No domínio do hidrogénio e do amoníaco, a política europeia está fortemente orientada para o hidrogénio renovável, mas contempla também o hidrogénio de baixo carbono como solução de transição. A Comissão Europeia procura acelerar a criação de um mercado interno à escala industrial e apoiar importações estratégicas.

Em conjunto, estas políticas formam uma estratégia integrada que combina financiamento, regulamentação e planeamento de infraestruturas para criar condições de mercado, reduzir custos e acelerar a adoção de tecnologias de CCUS e hidrogénio/amoníaco em toda a União Europeia, contribuindo para os objetivos de neutralidade carbónica e competitividade industrial

5. O Laboratório de Gases de Referência do IPQ

O Laboratório de Gases de Referência tem vindo a assumir um papel crescente no apoio às políticas públicas e ao desenvolvimento tecnológico em Portugal. A sua função não se limita à produção de materiais de referência. Inclui também a participação em comparações internacionais, a melhoria contínua dos métodos de medição, a formação técnica e o apoio direto a indústrias que necessitam de realizar medições complexas em contextos regulados.

Ao integrar projetos como o MetCCUS [1] e o MetNH3Energy [2], o IPQ contribui para que Portugal esteja alinhado com as necessidades emergentes da transição energética. A qualidade das medições, mais do que um requisito técnico, torna-se um elemento estratégico para que o país possa competir tecnologicamente, acompanhar padrões europeus e desenvolver indústrias associadas à captura de carbono, ao hidrogénio e ao amoníaco verde.

O IPQ, enquanto parceiro nacional, é responsável pela preparação e certificação de misturas gasosas de referência e pela avaliação da sua estabilidade ao longo do tempo, assegurando a rastreabilidade ao SI.

5.1. Preparação de misturas gasosas

As misturas gasosas de referência são preparadas com base num procedimento interno - método gravimétrico- de acordo com a norma internacional ISO 6142-1 [4]. Estas são preparadas pela adição gravimétrica de cada componente. As frações molares dos componentes nas misturas finais foram calculadas usando a equação (1):

$$x_i = \frac{\sum_{A=1}^{P}\left(\frac{x_{i,A}\cdot m_A}{\sum_{i=1}^{n} x_{i,A}\cdot M_i}\right)}{\sum_{A=1}^{P}\left(\frac{m_A}{\sum_{i=1}^{n} x_{i,A}\cdot M_i}\right)} \qquad (1)$$

onde:

x_i é a fração molar do componente i na mistura final, i = 1,….,n

P é o número total de gases originais

n é o número total de componentes na mistura final

m_A é a massa do gás original A determinada pela pesagem, A= 1,……, P

M_i é a massa molar do componente i

$x_{i,A}$ é a fração molar do componente i.

O método de preparação, de acordo com a parte 1 desta norma é aplicável a misturas de componentes gasosos ou totalmente vaporizados, que podem ser introduzidos no cilindro no estado gasoso ou líquido. O cálculo de incerteza associada à fração molar obtida para os vários componentes requer a avaliação das contribuições devidas a fatores como o processo de pesagem, a pureza dos componentes, a estabilidade da mistura e a verificação da mistura final.

Na preparação das misturas gasosas são usados cilindros de alumínio, com revestimento especial, para prevenir a adsorção dos componentes da mistura nas paredes internas.

Após a escolha do cilindro é feita uma limpeza rigorosa de forma a garantir que quaisquer eventuais resíduos existentes no seu interior não tenham impacto na incerteza da composição da mistura final. Este é um passo especialmente importante quando se preparam misturas de concentração muito baixa.

O processo de enchimento é um passo crítico e é a transferência dos gases do cilindro mãe, de cada componente, para o cilindro onde se está a preparar a mistura. A adição de cada gás é

realizada numa estação de enchimento constituída por tubos polidos eletronicamente, válvulas, medidores de vácuo e de pressão e bombas de vácuo turbo molecular isentas de óleo.

Figura 1 – Instalação de enchimento e comparador de massa

A massa exata de cada componente gasoso adicionado ao cilindro, é determinada por um comparador mássico, figura 1, usando massas calibradas e rastreadas ao padrão nacional.

Usando os resultados dos certificados de análise da pureza dos gases iniciais e os dados encontrados através do processo de pesagem, pode ser calculada a composição exata da mistura e as incertezas associadas, relativas às várias frações molares obtidas.

Após o enchimento, as misturas são homogeneizadas por rotação controlada.

5.2. Certificação de misturas gasosas

A composição da mistura gasosa é determinada por uma análise individual da fração molar de cada componente. O procedimento de determinação da fração molar é descrito na norma internacional ISO 6143 [5]. O método analítico é um método comparativo pois usa os padrões primários de referência para estabelecer a curva de calibração. Os métodos analíticos utilizados foram a espectroscopia de infravermelho não dispersivo (NDIR), a espectroscopia de ultravioleta não dispersivo (NDUV) e o sensor paramagnético. Os resultados finais são expressos, em conjunto com as respetivas incertezas, de acordo com o *Guide to the expression of uncertainty of Measurement* [6].

As misturas gasosas produzidas são certificadas recorrendo a analisadores específicos para cada tipo de mistura. Em cada certificação, a fração molar de cada componente na mistura preparada é determinada através da comparação da resposta do equipamento face aos padrões utilizados, em conformidade com o gás em análise, nos intervalos de medição apropriados.

O processo de certificação decorre com a utilização de um sistema de amostragem automático multicanal, ao qual estão ligados todos os cilindros a analisar (Figura 2).

Figura 2 – Instalação de certificação de misturas gasosas

Durante a análise, os cilindros são selecionados automaticamente, permitindo a circulação do gás individualmente pelo analisador. Este sistema controla a amostragem e regista todas as medições realizadas no analisador. No final, os registos das análises dos padrões e das amostras, são recolhidos e é determinada uma função de calibração polinomial de baixo grau (1, 2, 3 ou 4) mais adequada para um conjunto de dados de medição (X, Y), levando em consideração as incertezas e covariâncias associadas aos dados. Assim, a função de calibração determinada é usada para obter estimativas dos valores das frações molares das amostras em análise e das correspondentes incertezas associadas.

O LGR desempenha assim um papel fundamental neste domínio, sendo responsável pela produção, manutenção e desenvolvimento de misturas gasosas padrão primárias nacionais de acordo com a ISO 17034 [7].

5.3. Contribuição do IPQ

O maior contributo do IPQ nos projetos europeus MetCCUS [1] e MetNH3Energy [2], decorre da capacidade instituída no âmbito da metrologia de gases, o qual tem larga experiência, contribuindo, assim, para o desenvolvimento de soluções metrológicas fundamentais para a transição energética. A sua intervenção inclui também a participação regular em reuniões de trabalho, onde são definidas prioridades técnicas e estratégicas, bem como a colaboração na organização de *workshops* e *webinares* destinados à partilha de conhecimento entre especialistas e partes interessadas.

5.3.1. Projeto MetCCUS

No domínio da investigação associada ao projeto, o IPQ desempenhou um papel relevante, tendo produzido duas publicações científicas no âmbito do projeto MetCCUS [1]: "Preparation of Multicomponent Mixtures to Support Carbon Metrology" [8] e "Multicomponent Mixtures – Stability Study to Support Carbon Metrology" [9].

A participação portuguesa teve maior expressão no desenvolvimento de padrões gasosos multicomponente que tentaram reproduzir, o melhor possível, as condições reais encontradas em correntes de exaustão e fluxos de CO_2 capturado. Tais padrões são essenciais tanto para fabricantes de sensores como para laboratórios que realizam calibrações, auditorias e verificações em instalações industriais.

No IPQ foram preparadas oito misturas gasosas: quatro misturas bicomponente (SO_2/CO_2 e H_2S/CO_2); quatro misturas multicomponente, combinando impurezas como SO_2, CO, O_2, H_2S e CH_4 numa matriz de CO_2. Estas misturas foram caracterizadas, relativamente à sua composição e estabilidade, sendo utilizadas em comparações interlaboratoriais com outros parceiros do projeto.

5.3.2. Projeto MetNH3Energy

Relativamente ao projeto MetNH3Energy [2], o IPQ contribuirá com a produção de materiais de referência e o desenvolvimento de métodos de análise de gases rastreáveis para impurezas numa matriz de amoníaco. Paralelamente, irá desenvolver métodos de análise e materiais de referência para poluentes atmosféricos prioritários, bem como estabelecer ferramentas metrológicas para o controlo da qualidade do amoníaco e para a monitorização das suas emissões. As misturas a preparar são de NH_3 em ar ou em nitrogénio, com as impurezas NO_2 e SO_2 no intervalo de medição das partes por milhão (ppm).

O IPQ contribuiu e irá contribuir ainda, para ambos os projetos, na elaboração de conteúdos técnicos e de comunicação destinados às *newsletters* do projeto, reforçando a sua visibilidade e impacto. Desempenha igualmente funções na gestão dos projetos, assegurando a preparação de relatórios técnicos e administrativos necessários ao acompanhamento e cumprimento das atividades planeadas.

Os resultados estão a ser e serão amplamente divulgados através de páginas web, plataformas digitais, publicações e apresentações em conferências internacionais. Foram organizados e estão previstos vários *workshops* temáticos promovidos pelos consórcios.

Mais uma vez, o IPQ desempenha um papel de primeira linha, permitindo que Portugal acompanhe de perto a evolução de requisitos internacionais, que serão decisivos para o comércio global de hidrogénio e derivados. Quando o hidrogénio se tornar um produto transacionado internacionalmente, a existência de medições equivalentes entre países será absolutamente indispensável e é a metrologia que suportará essa equivalência.

6. Considerações finais

A transição climática não depende apenas de inovação ou ambição política. Depende, antes de tudo, de confiança, confiança nos dados, nas medições e nos sistemas que validam o desempenho das tecnologias que pretendem reduzir emissões. A metrologia, embora raramente destacada, é o alicerce silencioso de todas as estratégias energéticas modernas.

Tanto a captura de carbono como a economia baseada no amoníaco e no hidrogénio representam fronteiras tecnológicas onde a necessidade de padrões de referência, métodos analíticos rigorosos e harmonização metrológica é particularmente evidente. Os projetos MetCCUS e MetNH3Energy são, assim, exemplos de colaboração científica que procuram assegurar que a Europa dispõe das ferramentas necessárias para medir, verificar e regular estas novas soluções energéticas com rigor e transparência.

O contributo do IPQ, através do seu Laboratório de Gases de Referência, constitui uma peça fundamental deste esforço coletivo. Ao garantir que as medições associadas ao carbono e ao hidrogénio são realizadas com qualidade e rastreabilidade, o IPQ reforça o papel da metrologia como um dos pilares da transição energética, discreto, mas absolutamente indispensável para que o futuro energético seja credível, sustentável e tecnicamente sólido.

O impacto gerado pelo trabalho desenvolvido beneficiará um vasto conjunto de partes interessadas, incluindo indústria, fabricantes, comités de normalização, institutos de metrologia e comunidade científica, promovendo o avanço das bases metrológicas necessárias para a adoção de tecnologias energeticamente sustentáveis.

Agradecimentos

Os projetos *21GRD06 MetCCUS* e *24GRD01 METNH3Energy* receberam financiamento do programa EPM, cofinanciado pelos Estados participantes, e do programa de investigação e inovação Horizonte 2020 da União Europeia.

Referências

[1] MetCCUS Project (14 de novembro de 2025). retrieved from https://metccus.eu/about-the-project/

[2] METNH3Energy (14 de novembro de 2025). Retrieved from https://www.metnh3energy.ptb.de/workpackage

[3] ISO 14687:2025 - Hydrogen fuel quality — Product specification, Published (Edition 2, 2025)

[4] ISO 6142-1:2015 – Gas analysis — Preparation of calibration gas mixtures — Part 1: Gravimetric method for Class I mixtures.

[5] ISO 6143:2001 – Gas analysis — Comparison methods for determining and checking the composition of calibration gas mixtures.

[6] JCGM 100:2008 – Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM).

[7] ISO 17034:2016 – General requirements for the competence of reference material producers.

[8] Dias, F. A., Palma, C., Costa, C. J. (2025) Preparation of Multicomponent Mixtures to Support Carbon Metrology. *Measurement - Elsevier.*, 239, 115453.

[9] Dias, F. A., Palma, C., Costa, C. J. (2025) Multicomponent Mixtures - Stability Study to Support Carbon Metrology. *J Electrical Electron Eng*, 4(4), 01-09.

Authors Profiles

Florbela A. Dias completed her PhD in Chemistry at Faculty of Sciences and Technology of the New University of Lisbon. Since 2002, Florbela Dias has been working full-time at the Portuguese Institute for Quality as the Head of the Reference Gas Laboratory. Additionally, since 2002, she has served as the Contact Person at EURAMET Gas Working Group and the Consultative Committee for Amount of Substance - BIPM. Since 2012, she has held the position of GLP Inspector in the scope of GLP principles of OECD.

Carlos Costa holds a degree in Physics and Chemistry from the University of Trás-os-Montes and Alto Douro and a postgraduate degree in Physical Engineering, specializing in Applied Nuclear Physics, from the University of Lisbon. He has been working in the Metrology Department of IPQ since 2017 and Head of Alcohol Breath Analyser Laboratory since 2019.

Cristina Palma holds a degree in Chemical Engineering at Faculty of Sciences and Technology of the New University of Lisbon. She is a scientist doing research in the field of metrology in chemistry in the Metrology Department of IPQ since 2021. She is currently developing activities in the Reference Gas Laboratory of IPQ.

Special Issue - Scientific Metrology, 2026
https://doi.org/10.48552/edesp1-26-71-87

Desenvolvimentos no Laboratório Nacional de Metrologia do IPQ no âmbito da transformação digital

João Alves e Sousa
jasousa@ipq.pt
Instituto Português da Qualidade
ORCID: 0000-0002-9630-0854

Carlos Pires
carlosp@ipq.pt
Instituto Português da Qualidade
ORCID: 0000-0001-9650-1763

Gonçalo Carvalhal
gcarvalhal@ipq.pt
Instituto Português da Qualidade
ORCID: 0000-0001-7828-2827

Liliana Eusébio
lilianae@ipq.pt
Instituto Português da Qualidade
ORCID: 0000-0002-881-7371

João Abrantes
jabrantes@ipq.pt
Instituto Português da Qualidade
ORCID: 0000-0003-4585-9831

Resumo:

Nos últimos anos, a transformação digital passou a ser impulsionada também pela revolução de tecnologias como a Inteligência Artificial (IA). Em metrologia, a IA tem tido um papel de relevo, não apenas na simplificação e automatização de processos, mas sobretudo na capacidade de análise de dados complexos, por meio do uso de algoritmos de aprendizagem automática, por exemplo, para a previsão de tendências e estimativa do desempenho de instrumentos e sistemas de medição.

No Laboratório Nacional de Metrologia do Instituto Português da Qualidade (IPQ), estão a ser utilizados algoritmos de aprendizagem automática para prever a deriva da escala de tempo de referência UTC(IPQ), e para estimar a qualidade metrológica de cinemómetros-radar sujeitos ao controlo metrológico legal. Mais recentemente, desenvolveu-se também um *digital twin* para um misturador de frequência com algoritmos de aprendizagem automática para medir variações de fase induzidas por flutuações de temperatura; e implementou-se o certificado digital

de calibração, compatível com o referencial normativo ISO/IEC 17025, para o processamento automático máquina-máquina dos resultados de calibração. Em termos de investigação científica, o IPQ tem participado em vários consórcios de projetos em que a IA tem tido particular protagonismo como são os casos dos projetos MAIBAI, o QUMPHY e o FunSNM.

Palavras-chave: aprendizagem automática, certificado digital de calibração, *digital twins*, redes de sensores, transformação digital.

Abstract:

In recent years, digital transformation has also been driven by the revolution of technologies such as Artificial Intelligence (AI). In metrology, AI has played a prominent role, not only in the simplification and automation of processes, but above all in the ability to analyze complex data, through the use of machine learning algorithms, for example, for trend forecasting and for estimating the performance of instruments and measurement systems.

At the National Metrology Laboratory of Portuguese Institute for Quality (IPQ), machine learning algorithms are being used to predict the drift of the reference time scale UTC(IPQ), and to estimate the metrological quality of radar speedmeters subject to legal metrological control. More recently, a digital twin was also developed for a frequency mixer with machine learning algorithms to quantify phase variations induced by temperature fluctuations; and, in addition, a digital calibration certificate has been implemented, fully compliant with the ISO/IEC 17025, for the automatic machine-to-machine processing of calibration results. Regarding scientific research, IPQ has participated in several project consortia in which AI has played a central role, such as the MAIBAI, QUMPHY and FunSNM projects.

Keywords: digital calibration certificates, digital transformation, digital twins, machine learning, sensors network.

1. Introdução

O Dia Mundial da Metrologia é celebrado anualmente a 20 de maio, tendo sido o tema de 2022 a "Metrologia na Era Digital". Este tema constituiu um momento importante pois veio evidenciar o papel transversal da transformação digital na sociedade atual, e, consequentemente, também na metrologia. A esse propósito, foi sublinhado pelos diretores do *Bureau International des Poids et Mesures* (BIPM) e da *Organisation Internationale de Métrologie Légale* (OIML) numa mensagem conjunta: *"A transformação digital na metrologia pode trazer muitos benefícios para a comunidade. Pode acelerar o tempo de entrada no mercado de produtos e serviços de medição e reduzir atrasos associados aos processos de aprovação. Isso, por sua vez, contribui para a inovação, agilidade dos produtos e sustentabilidade."* (ISO, 2022). Nos últimos tempos, a revolução de tecnologias como a

Inteligência Artificial (IA) impulsionou ainda mais a transformação digital, e com um impacto muito significativo na metrologia.

No Laboratório Nacional de Metrologia do Instituto Português da Qualidade (IPQ), há já bons exemplos da transformação digital, quer ao nível da utilização de novas tecnologias e ferramentas digitais – para a simplificação e a automatização de processos (processos administrativos e de medição) –, mas também ao nível da utilização de IA para análise de dados complexos (dados multidimensionais, sinais elétricos e imagens, dados provenientes de redes de sensores, etc.) com o objetivo, por exemplo, de previsão de tendências e estimativa da resposta e do desempenho de instrumentos e sistemas de medição. Na metrologia científica, o IPQ está ativamente envolvido em projetos multidisciplinares de investigação, de modo a responder às crescentes exigências de maior rigor e exatidão da medição, bem como no que se refere às simulações e aos instrumentos de medição virtuais. Na metrologia aplicada, o IPQ suporta a calibração através do desenvolvimento, internacionalmente reconhecido, de certificados digitais de calibração e da respetiva infraestrutura para o reconhecimento da sua autenticidade.

Muitos destes tópicos estão incluídos em subtemas de uma infraestrutura da qualidade que será completamente digitalizada no futuro. Neste sistema, os processos são trabalhados de forma totalmente digital, os objetos estão distribuídos em redes, e os algoritmos são utilizados de forma intensiva. Esta transformação digital está já em andamento e será fortemente acelerada pelos mais recentes desenvolvimentos tecnológicos. A implementação de um sistema que vise a utilização de certificados digitais de calibração não é apenas a transformação de um formato físico para um formato digital, mas principalmente a aplicação do conceito real de digitalização, ou seja, do uso de tecnologias digitais para alterar um modelo de negócios e fornecer novas oportunidades com valor acrescentado de forma agregada. Além da facilidade na troca de resultados de calibração, o desenvolvimento futuro de um sistema para troca de certificados digitais de calibração permitirá que os clientes recebam e analisem certificados mais rapidamente, reduzindo os tempos de execução e os custos associados ao processo de confirmação metrológica, evitando erros humanos e respetivas consequências (J. A. Sousa, 2019).

No âmbito de investigação e desenvolvimento, o IPQ tem estado envolvido em diversos projetos de investigação científica em que a IA passou a ter um maior protagonismo. Estes projetos têm sido promovidos principalmente pela EURAMET (Associação Europeia de Instituições Nacionais de Metrologia), há já vários anos, através dos programas iMERA, EMRP e EMPIR, e atualmente o programa EPM, que serão descritos em maior detalhe neste trabalho.

2. Exemplos de desenvolvimentos

2.1. Utilização de técnicas de aprendizagem automática

2.1.1. Previsão da deriva do UTC(IPQ)

No domínio metrológico do Tempo e Frequência, estão a ser utilizados algoritmos de aprendizagem automática para prever a deriva da escala de tempo de referência nacional, UTC(IPQ). Estas previsões revelam-se de particular interesse e importância pois permitem automatizar a correção que é necessário fazer à deriva da escala UTC(IPQ), por forma a esta se manter constante em relação ao UTC.

A implementação realizada foi a seguinte: os dados da geração do UTC(IPQ) foram transformados em *datasets* cujas variáveis foram selecionadas a partir de um conjunto de valores provenientes de ficheiros CGGTTS (ficheiros utilizados na transferência dos dados de tempo entre o IPQ e o BIPM), obtidos a partir dos relógios atómicos do IPQ. Com estes *datasets*, treinaram-se vários modelos de aprendizagem automática para prever o comportamento futuro da escala UTC(IPQ). Os ficheiros CGGTTS são gerados diariamente pelo recetor GNSS instalado no IPQ e são depois enviados para o BIPM para comparação com a escala de referência UTC, através do método *common view*. O *software* desenvolvido levou em consideração dados entre julho de 2018 e outubro de 2021 para o treino dos modelos de previsão da deriva do UTC(IPQ). O primeiro algoritmo utilizado foi o de análise estatística ARIMA (*Autoregressive Integrated Moving Average*) que utiliza dados de séries temporais para prever tendências futuras. Os dados foram divididos segundo o método *holdout cross-validation*, tendo sido separados em 3 subconjuntos (treino, validação e teste). No gráfico da Figura 1 estão representados os resultados da previsão do UTC(IPQ) a 30 dias obtidos com o algoritmo ARIMA. O mesmo conjunto de dados foi utilizado também para treinar um modelo de aprendizagem automática supervisionada tendo por base o algoritmo *Multilayer Perceptron*. No gráfico da Figura 2 estão representados os resultados da previsão do UTC(IPQ) a 100 dias obtidos com este algoritmo. A partir das métricas obtidas da implementação de ambos os algoritmos, concluiu-se que o modelo treinado com o algoritmo ARIMA apresentava melhores valores para a previsão do UTC(IPQ), sendo atualmente utilizado para estimativa da deriva da escala de tempo.

Figura 1: Previsão do UTC(IPQ) a 30 dias pelo algoritmo ARIMA.

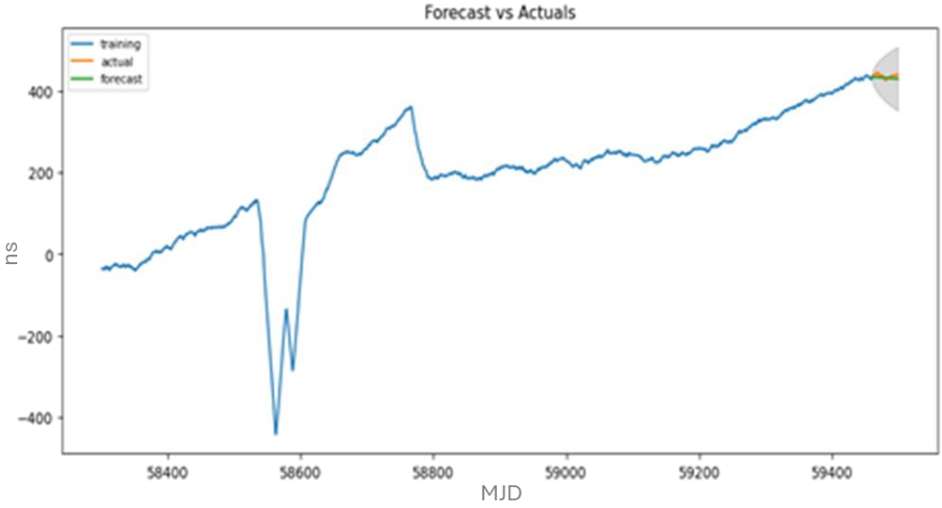
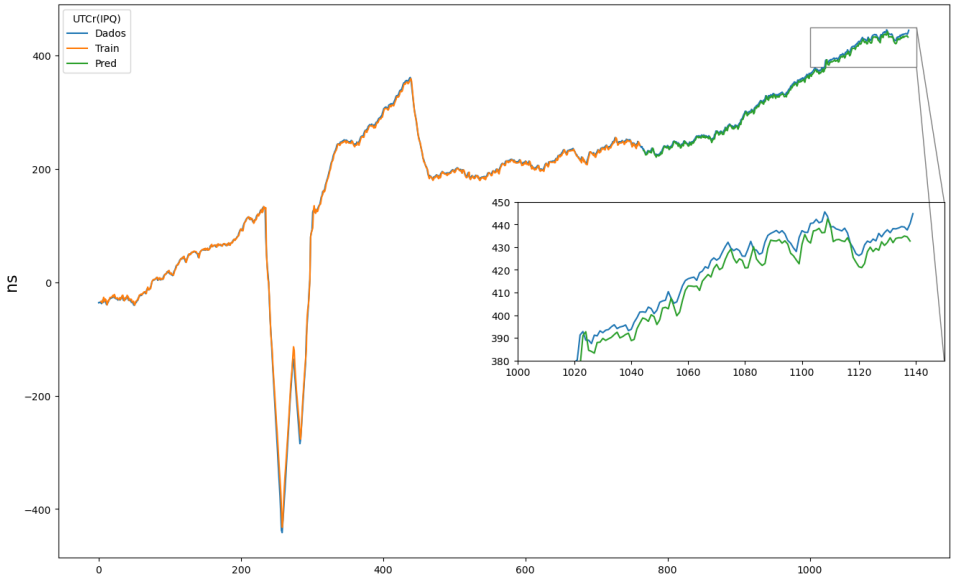


Figura 2: Previsão do UTC(IPQ) a 100 dias pelo algoritmo *Multilayer Perceptron*.

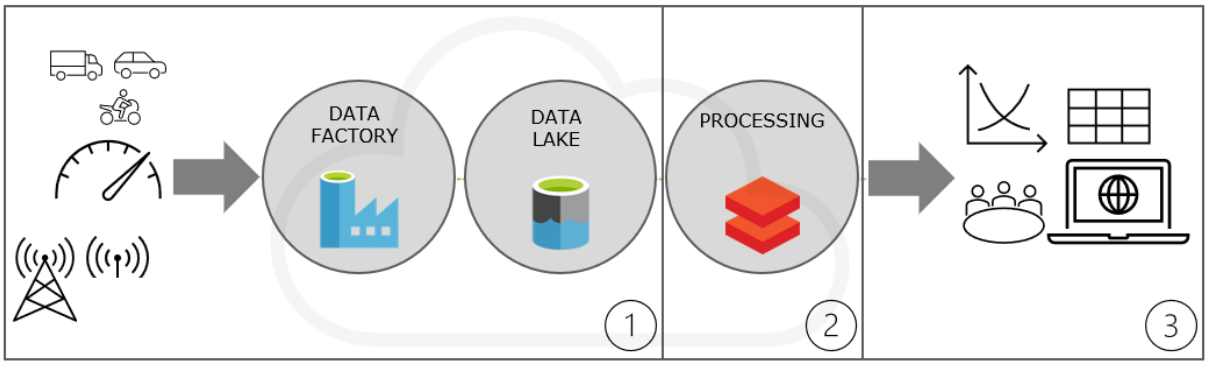


2.1.2. Estimativa da qualidade das características metrológicas de cinemómetros-radar

O projeto MEData, desenvolvido pelo IPQ em parceria com a NOVA IMS da Universidade Nova de Lisboa, visa a aplicação de modelos de aprendizagem automática a resultados de verificação metrológica de cinemómetros-radar, para previsão da qualidade das suas características metrológicas, com o objetivo de otimizar os períodos de controlo metrológico a que estes devem estar sujeitos. A previsão do comportamento dos cinemómetros-radar foi feita tendo por base um grande volume de dados com origem no próprio histórico de verificações metrológicas desses instrumentos de medição. A solução encontrada assenta numa arquitetura

modular e escalável, baseada em componentes de *cloud computing* para o armazenamento e processamento dos dados, e o treino dos modelos. As várias etapas do fluxo de dados, desde a recolha de dados até às previsões finais, estão esquematizadas na Figura 3.

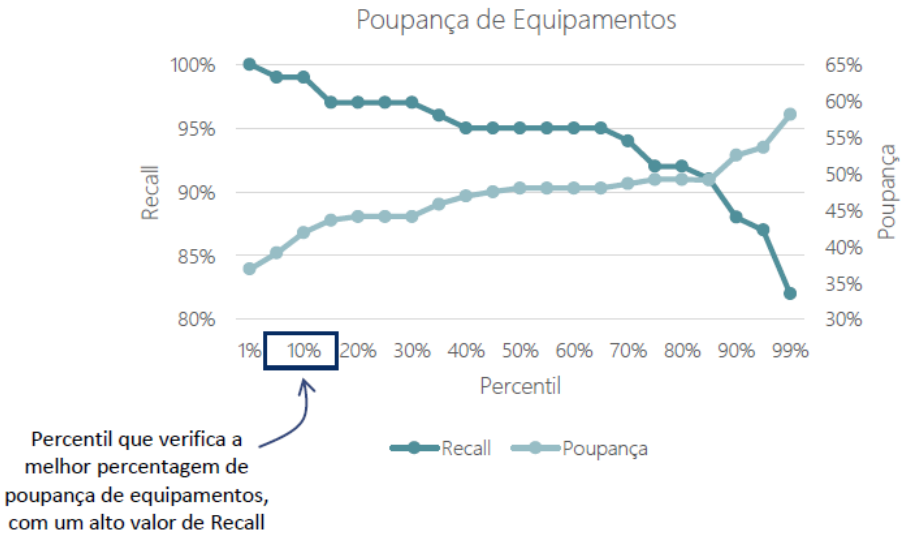
Figura 3: Sequência de etapas no fluxo de dados: 1- recolha e armazenamento de dados; 2- treino de modelos de aprendizagem automática; 3– visualização e decisão.



No gráfico da Figura 4 apresentam-se alguns resultados obtidos para os cinemómetros-radar, considerando dados referentes a mais de uma dezena de anos para o treino dos modelos de aprendizagem automática supervisionada. O gráfico representa a poupança, ou seja, a proporção de equipamentos para os quais, num determinado ano, se poderá evitar a verificação metrológica, atendendo à confiança da previsão produzida pelo modelo. Esta poupança foi estimada pelos algoritmos utilizados e permitiu concluir que para um determinado tipo (marca e modelo) de cinemómetros-radar, a periodicidade requerida no controlo metrológico poderia passar de anual a bienal, permitindo assim uma economia de recursos e de tempo, sem, no entanto, colocar em causa a confiança nos resultados das verificações.

A solução MEData constituiu um produto tecnológico validado em contexto real, orientado a apoiar a tomada de decisão baseada em dados e, ao mesmo tempo, proporcionar ganhos de eficiência por redução do número de verificações metrológicas necessárias. Tem potencial para poder ser utilizada com outros instrumentos de medição sujeitos ao controlo metrológico ou até mesmo, embora num âmbito diferente, ao caso da calibração periódica de instrumentos de medição.

Figura 4: Estimativa da proporção de cinemómetros-radar para os quais poderia ser revisto o período entre verificações metrológicas.



2.1.3. Desenvolvimento de sistemas de inteligência artificial baseados em imagens para diagnóstico médico

O projeto MAIBAI – *Developing a Metrological framework for Assessment of Image-Based Artificial Intelligence systems for disease detection* – foi selecionado para financiamento na *call* de 2022 do programa EMPIR da EURAMET, tendo iniciado em setembro de 2023 e com uma duração de três anos. Os objetivos deste projeto consistem em desenvolver uma estrutura metrológica de sistemas baseados em IA, na área do cancro da mama, de auxílio ao diagnóstico realizado com suporte em imagiologia médica. Esta estrutura garante uma validação mais eficiente, fiável e reprodutível, assegurando a utilização em segurança de *software* de IA em ambiente clínico. Esta abordagem pretende revelar as limitações dos modelos de IA, especialmente quando estes são treinados com dados inadequados ou limitados, impedindo a sua generalização. Por essa razão, serão consideradas variáveis como a proveniência dos dados (populações distintas), equipamentos de medição utilizados (diferentes fabricantes) e processos de aquisição e processamento de dados. O projeto fornece orientações sobre como conceber ensaios robustos e selecionar dados para os algoritmos, garantindo a fiabilidade, a robustez e a segurança das ferramentas de IA aplicadas no diagnóstico médico por imagem. Tomando como exemplo o rastreio mamário, o desempenho de ferramentas de IA é analisado tendo por base um grande repositório de mamografias reais, informando e recomendando um quadro de avaliação global, uniforme e imparcial. As atividades do projeto centram-se no desenvolvimento de uma infraestrutura tecnológica para acesso e extração de dados de imagens

médicas e na criação de um *middleware* de código aberto que uniformize metadados provenientes de diferentes origens. Incluem-se ainda outros objetivos como a identificação de parâmetros de aquisição de imagens e características de grupos populacionais relevantes para organizar dados clínicos em subconjuntos adequados ao treino dos sistemas de IA; a quantificação de incertezas associadas à aplicação das ferramentas e a criação de metodologias para gerar dados sintéticos com base em modelos físicos e técnicas metrológicas. Será também realizada a avaliação do desempenho dessas ferramentas em diferentes cenários, bem como o desenvolvimento de métodos destinados a garantir a sua interpretabilidade e transparência. O projeto considera ainda a criação de ferramentas para validação da IA em imagiologia médica. Prevê-se a promoção da adoção da tecnologia desenvolvida no âmbito do projeto por entidades normativas e reguladoras, pela comunidade metrológica e por utilizadores finais (fabricantes de equipamentos médicos e profissionais de saúde). O consórcio deste projeto inclui 7 Instituições Nacionais de Metrologia, 1 universidade e 4 parceiros da área da saúde (MAIBAI, s.d.).

Figura 5: Exemplos de um nódulo bem definido e espiculado; exemplos de uma distorção e de um agrupamento de calcificações (NPL, 2024)**.**

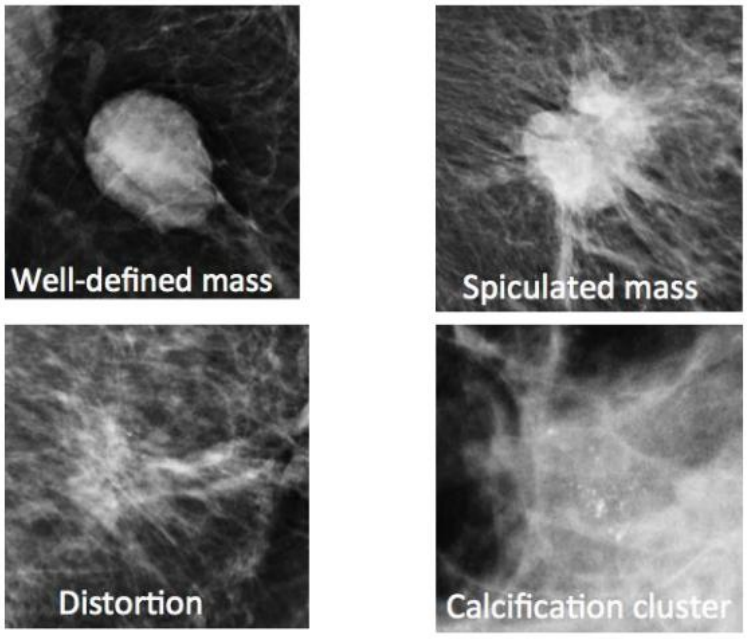
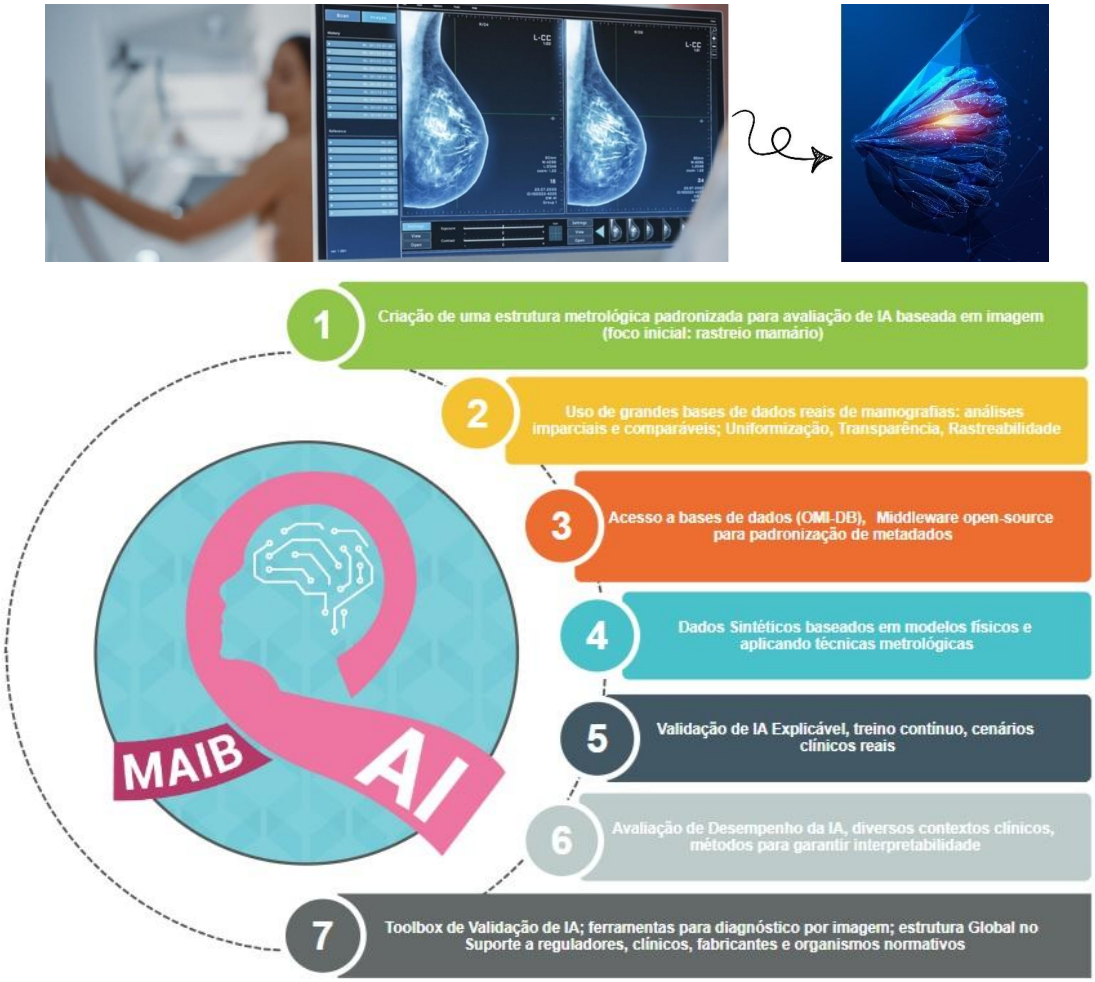


Figura 6: Poster do projeto MAIBAI com os principais objetivos.



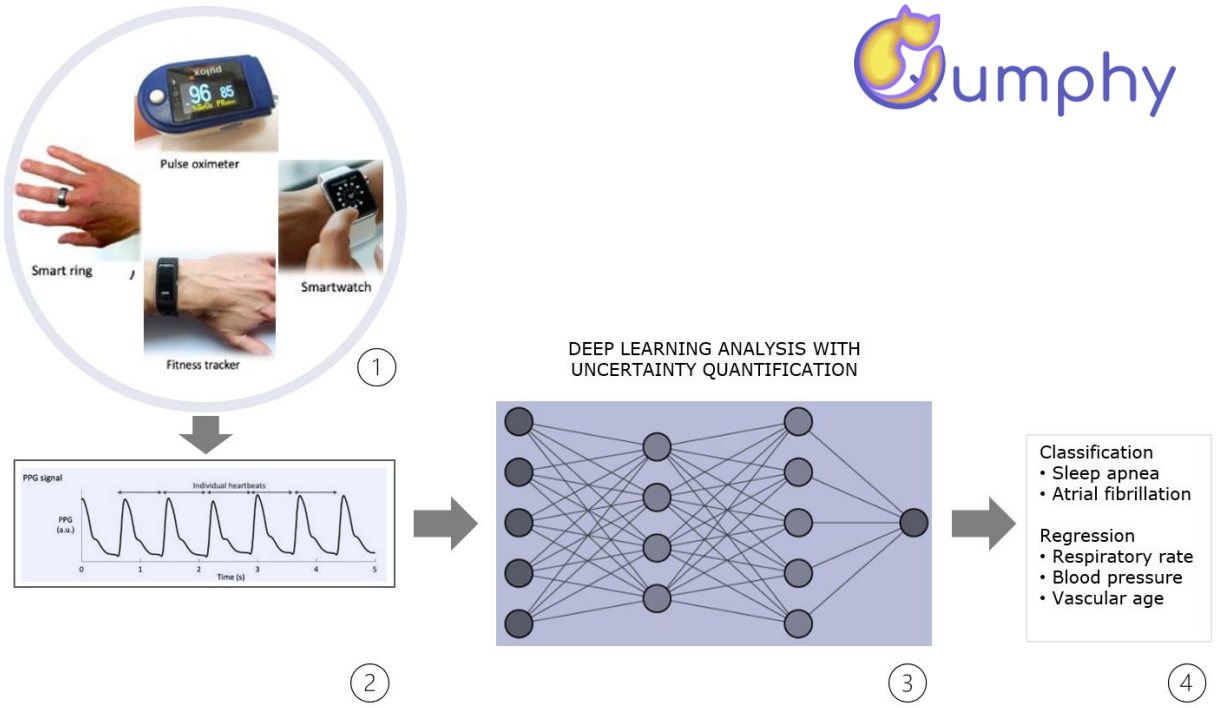
2.1.4. Quantificação da incerteza associada a modelos de aprendizagem automática aplicados a sinais de fotopletismografia

Selecionado para financiamento na *call* de 2022 do programa EMPIR da EURAMET, o projeto QUMPHY – *Uncertainty quantification for machine learning models applied to photoplethysmography signals* –, iniciado em setembro de 2023 e com a duração de três anos, tem como principal objetivo publicar um guia de boas práticas e disponibilizar um repositório de código e de exemplos de referência em que se especifica como as incertezas dos modelos de aprendizagem automática devem ser quantificadas quando aplicadas à avaliação de sinais de fotopletismografia (PPG). A fotopletismografia é uma técnica analítica ótica que tem por base medições de absorção de luz à superfície da pele para detetar variações de volume na circulação sanguínea. Os sinais PPG são usados em rotina para determinar o ritmo cardíaco e o nível de

saturação do oxigénio no sangue, além de conterem informação cardiovascular e dos sistemas respiratório e nervoso autónomo.

Exemplos de equipamentos utilizados na medição destes sinais, de forma não invasiva, são os oxímetros de pulso, as pulseiras e os relógios de *fitness*. O projeto visa investigar o desempenho, a exatidão e a fiabilidade de modelos de aprendizagem automática quando aplicados a sinais PPG de indivíduos com antecedentes fisiológicos diversos, levando em consideração aspetos como o tom de pele, sexo ou idade, de forma a evitar preconceitos e discriminação nos modelos aplicados. O consórcio deste projeto inclui 6 Institutições Nacionais de Metrologia e Laboratórios Designados, 8 universidades e 2 parceiros da área da saúde (QUMPHY, s.d.).

Figura 7: Sequência de etapas na aplicação de modelos de aprendizagem automática a sinais PPG para previsão de parâmetros fisiológicos: 1- origem dos sinais, 2- análise de sinais, 3- treino do modelo, 4- previsão de ritmo respiratório, ritmo cardíaco, pressão arterial, idade vascular, risco de apneia de sono.



2.1.5. Desenvolvimento de ferramentas para a avaliação da qualidade dos dados em redes de sensores

O projeto FunSNM – *Fundamental principles of sensor network metrology* –, financiado pelo programa EPM da EURAMET, tem como objetivo desenvolver métodos para avaliar a

confiabilidade e a robustez de redes distribuídas de sensores. O projeto tem duas fases distintas: 1) desenvolvimento de *software* para analisar o melhor método de avaliação da qualidade dos dados provenientes de redes de sensores; 2) aplicação do *software* desenvolvido a casos concretos (FUNSNM, s.d.). O projeto trará benefícios em diferentes vertentes como seja uma redução de custos energéticos devido a uma maior eficiência das redes de distribuição de energia, uma redução de cerca de seis toneladas de emissões de CO_2, e poupanças estimadas em cerca de cinco mil milhões de euros (FUNSNM, s.d.). Um outro aspeto importante diz respeito ao impacto em termos de normalização em várias vertentes, devido à natureza genérica e abrangente dos casos de estudo desta investigação. O impacto mais imediato será nos programas de trabalho dos comités técnicos do CEN, ISO, IEC, IEEE, e WELMEC, e respetivos grupos de trabalho envolvidos na normalização relacionadas com os casos de estudo e aplicações em serviços, indústria e ambiente. Alguns dos aspetos sobre redes de sensores que estão a ser estudados neste projeto incluem a localização dos sensores (João A. Sousa, 2024), o desempenho dos sensores, a utilização de valores instantâneos ou médios, a sincronização dos dados e a resolução, entre muitos outros relacionados com a qualidade dos dados (C. Pires J. A.-G., 2026). As redes de sensores podem ser compostas por dezenas ou milhares de sensores, muitas vezes medindo diferentes parâmetros sob diferentes condições ambientais. Na indústria, por exemplo, podem ser utilizados para garantir a conformidade com a Diretiva 2010/75/UE relativa a emissões industriais, ou para monitorizar o controlo da qualidade no fabrico avançado. As redes de sensores são também utilizadas para medir a poluição nas cidades, a fim de demonstrar a conformidade com a Diretiva 2008/50/CE relativa à qualidade do ar ambiente e a um ar mais limpo na Europa. No entanto, a evolução dos tipos de sensores e a introdução de *software* com IA significa que estas redes estão a debater-se com a questão da qualidade dos dados em diferentes graus. Além disso, muitas redes têm incertezas de medição desconhecidas e carecem de rastreabilidade do SI. Este projeto investiga os aspetos metrológicos das redes de sensores e está a desenvolver métodos confiáveis e robustos para avaliar a qualidade dos dados e a incerteza de medição em ambientes do mundo real. Os sensores em redes distribuídas são também avaliados metrologicamente, abrangendo uma grande variedade de tipos de sensores e distribuições geográficas. Serão aplicadas tecnologias semânticas para desenvolver novas abordagens para sensores em redes grandes e transitórias, como as utilizadas para medições da qualidade do ar em ambientes urbanos. Os resultados obtidos são validados em pelo menos três estudos de caso reais, abrangendo áreas como o processamento industrial, a monitorização ambiental e os sistemas de distribuição de energia, e.g., *District Heating*. No final do projeto, as informações sobre como reduzir a incerteza de medição e melhorar a rastreabilidade do SI,

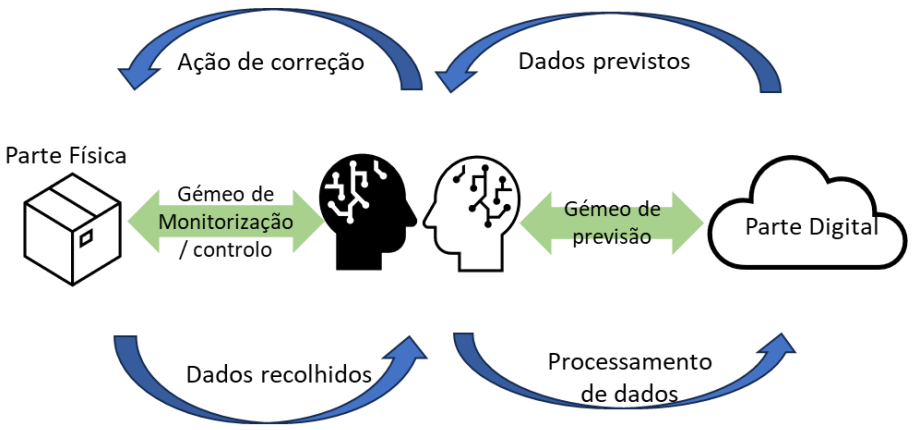
para redes de sensores estáticos ou móveis, terão um impacto positivo na monitorização ambiental e ajudarão a apoiar as diretivas europeias neste domínio.

Figura 8: Logótipo do projeto FunSNM.

2.2. Digital twin para um misturador de frequência

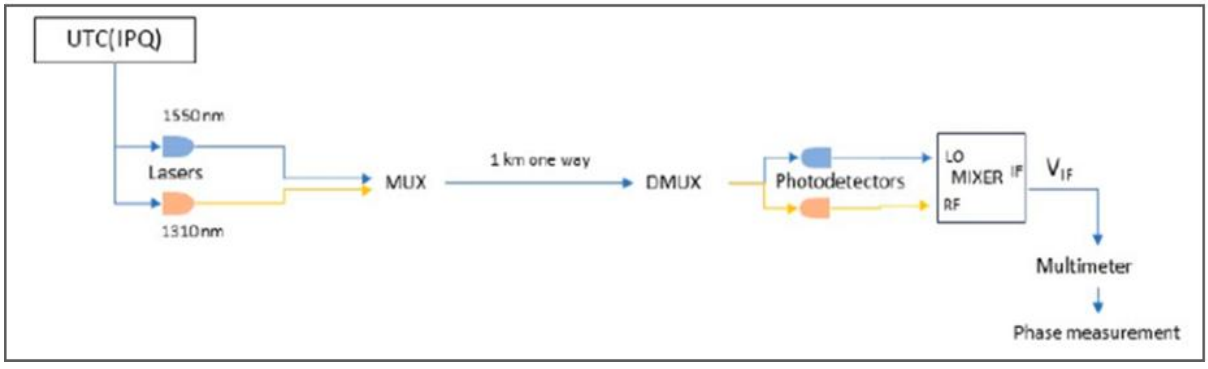
O *digital twin* é uma representação digital de um sistema físico programada por forma a reproduzir o comportamento desse sistema físico, com a particularidade de existir troca bidirecional de informação, em tempo real, entre a parte digital e a parte física. Permite simular, monitorizar, prever e otimizar o seu comportamento, e possibilita a realização de experiências virtuais onde se colocam em prática cenários hipotéticos, obtendo respostas a casos particulares de interesse que não seriam possíveis de reproduzir na realidade. Na Figura 9 está representado um esquema genérico de um *digital twin*. Os *digital twins* têm um enorme potencial de crescimento, permitindo que as empresas tenham informação dos seus produtos, desde a fase inicial de projeto até à fase final de produção, garantindo o controlo de qualidade durante todo o ciclo de vida do produto. Podem ser usados para simular a exatidão da medição de novas ferramentas de metrologia e, em muitas aplicações, são essenciais para uma quantificação confiável da incerteza de medição.

Figura 9: Esquema genérico de um *digital twin*.



Recentemente, no domínio metrológico do Tempo e Frequência, e no âmbito da realização e disseminação do padrão nacional de frequência, desenvolveu-se um *digital twin* que replica a utilização de um misturador de frequência a funcionar como sensor de fase para transferência de frequência. O aparato experimental inclui, além de outros equipamentos, um misturador de frequência utilizado para determinar a fase entre dois sinais. Na Figura 10 está representado o esquema deste *digital twin*. Utilizando o misturador como sensor de fase, e recorrendo a dados em tempo real provenientes de sensores de temperatura colocados ao longo do comprimento da fibra, o *digital twin* foi treinado para medir variações de fase provocadas por flutuações de temperatura na fibra ótica e no próprio misturador. O *digital twin* foi treinado com dois algoritmos: ARIMA e redes neuronais LSTM (*Long Short-Term Memory*). Para estimar a exatidão do misturador de frequência a operar como medidor de fase, foram tidas em consideração várias contribuições para a incerteza de medição e incluídas no próprio *digital twin*, permitindo obter em tempo real um valor de fase com a respetiva incerteza de medição associada (C. Pires M. A., 2024).

Figura 10: Esquema do *digital twin* de um sistema para medição da variação de fase entre dois sinais com diferentes comprimentos de onda ao longo de uma fibra ótica: LASER para transformar o sinal UTC(IPQ) em luz, multiplexers de comprimento de onda (MUX e DMUX), fotodetetores, misturador de frequências e multímetro para medição da variação de fase.



2.3. Certificado digital de calibração

O certificado digital de calibração é um ficheiro que permite apresentar os resultados relativos à calibração de um instrumento de medição de tal maneira que pode ser integrado numa cadeia de processamento automático, ou seja, pode ser diretamente processado por máquinas,

permitindo que os resultados de uma calibração, e.g., o erro de indicação e a respetiva incerteza associada, sejam transmitidos e interpretados diretamente por equipamentos sem a necessidade de intervenção manual. A sua estrutura é definida por um conjunto de regras e especificações para os próprios dados, estando em conformidade com os requisitos do referencial normativo ISO/IEC 17025 (o principal quadro normativo para a competência de laboratórios de ensaio ou de calibração).

A implementação de certificados digitais de calibração foi feita quer enquanto estudo de caso, quer como solução a nível interno. Por um lado, no domínio do Tempo e Frequência, seguindo uma linha de teste e desenvolvimento promovida pelo projeto da EURAMET TC-IM 1448, foram gerados certificados digitais para o caso de calibrações de frequencímetros. Na Figura 11 pode ver-se um exemplo do código XML e a correspondente representação *human readable*, referentes aos resultados de calibração apresentados num certificado digital.

Figura 11: Parte de um certificado digital de calibração de um frequencímetro: 1- código XML (*machine readable*), 2- correspondente informação no PDF (*human readable*).

1

```
▼<ns0:column scope="reference" dataCategory="TargetValue" measurand="Measure.Frequency" metaDataCategory="Data">
   <ns0:heading lang="pt">Freq referencia</ns0:heading>
   <ns0:heading lang="en">Reference frequency</ns0:heading>
   <ns0:unit>\hertz</ns0:unit>
   <ns0:valueXMLList>100.000040815 999.9998729600002 99999.987598 999999.8753999999 9999999.002 19999997.53</ns0:valueXMLList>
 </ns0:column>
▼<ns0:column scope="itemIndication" dataCategory="Value" measurand="Measure.Frequency" metaDataCategory="Data">
   <ns0:heading lang="pt">Freq DUT</ns0:heading>
   <ns0:heading lang="en">DUT frequency</ns0:heading>
   <ns0:unit>\hertz</ns0:unit>
   <ns0:valueXMLList>99.99964855 999.9996280000001 99999.90039999998 999999.01 9999991.014 19999980.88</ns0:valueXMLList>
 </ns0:column>
```

2

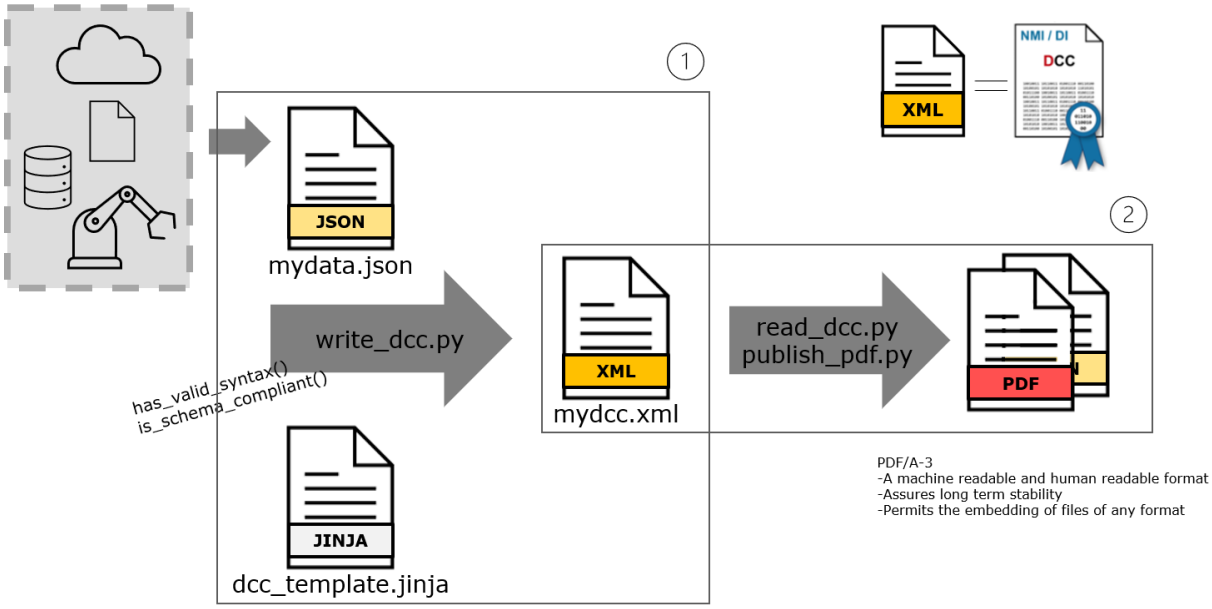
RESULTADO Temperatura ambiente [22,0 ± 0,4] ºC

Valor de referência vref / Hz	Erro de medição E / Hz	Incerteza Expandida do Erro UE / Hz
100,0000408	-0,0003923	0,00181917
999,999873	-0,000245	0,0021162
99999,98760	-0,08720	0,002050
999999,8754	-0,8654	0,02007
9999999,002	-7,988	0,3043
19999997,53	-16,650	0,2803

Por outro lado, no domínio da Massa, desenvolveu-se s*oftware* para gerar certificados digitais de calibração com o propósito de os utilizar em rotina nas calibrações internas dos padrões nacionais de massa. Este *software* contempla 2 etapas distintas: 1) geração do certificado digital (ficheiro XML), a partir de um ficheiro em formato JSON com todos os dados

da calibração e onde se incluem os dados administrativos e os resultados do ensaio; 2) publicação de um ficheiro PDF, a partir da informação no ficheiro XML, e que inclui em anexo esse mesmo ficheiro XML. A Figura 12 mostra esquematicamente o sistema para publicação de certificados digitais de calibração.

Figura 12: Sistema para publicação de certificado digital de calibração: 1- preparação de ficheiro XML com dados e resultados da calibração; 2- publicação de ficheiro PDF com o próprio ficheiro XML em anexo.



Uma das principais vantagens de tal sistema reside na possibilidade de ação em tempo real da instrumentação de forma autónoma. Na fábrica do futuro, haverá um grande número de sensores de baixo custo e, portanto, será necessário usar os dados dos certificados de calibração para verificar a validade dos dados medidos em tempo real ou quase real. Para isso, o formato legível por máquina (*machine readable*) pode ser usado por sensores inteligentes para verificar a qualidade dos dados medidos, aceitando os resultados da calibração ou, em alternativa, impor correções automáticas nas suas leituras para atingir o mesmo objetivo (J. A. Sousa, 2019).

3. Conclusões

A metrologia está a atravessar uma fase de transformação digital, marcada pela adoção de várias tecnologias digitais como por exemplo a IA. Esta transformação digital está alinhada com as estratégias europeias para moldar o futuro digital e industrial, designadamente o *Clean Industrial Deal* (CID, s.d.), prometendo benefícios significativos para a comunidade, como a

aceleração do tempo de entrada no mercado de produtos e serviços de medição, a redução de atrasos processuais e uma contribuição vital para a inovação, agilidade e sustentabilidade. A transformação digital é igualmente fundamental para a transição energética em curso e será um fator catalisador nesse sentido.

O Laboratório Nacional de Metrologia do IPQ tem acompanhado estas mudanças, demonstrando a sua capacidade de adotar e implementar novas ferramentas digitais. Exemplos recentes incluem a implementação de algoritmos de aprendizagem automática para prever a deriva da escala de tempo de referência UTC(IPQ), a solução MEData para otimização dos períodos de verificação metrológica obrigatória dos cinemómetros-radar, o *digital twin* para um misturador de frequência a funcionar como sensor de fase, e a implementação dos certificados digitais de calibração. Além disso, o IPQ tem estado envolvido em vários projetos de investigação científica, que estão na vanguarda da utilização da tecnologia de IA em metrologia, como o MAIBAI, o QUMPHY, e o FunSNM.

Perspetiva-se que no futuro próximo venha a existir uma maior cooperação entre as Instituições Nacionais de Metrologia, os governos, a indústria e os especialistas de IA, de modo a potenciar a transição para uma fase de medições totalmente digitais. A nível nacional prevê-se a integração de uma infraestrutura de IA que dê resposta às necessidades atuais e futuras, na área da gestão da metrologia, nas suas vertentes do controlo metrológico e qualificação de entidades, bem como nas vertentes da metrologia científica e aplicada já referidas. Com esta infraestrutura, pretende-se gerir a grande quantidade de dados e informação que são gerados diariamente, isto com o objetivo de permitir uma gestão eficaz da infraestrutura da qualidade que no futuro será totalmente digital. Os processos serão integralmente digitais, os objetos estarão em redes, recorrendo cada vez mais ao uso das ferramentas de IA. Esta transição é um processo crucial para as organizações. As Instituições Nacionais de Metrologia são chave para responder às necessidades da indústria, de áreas emergentes como as tecnologias quânticas e, no geral, em todas as áreas prioritárias para o bem-estar da sociedade.

Referências

C. Pires, J. A.-G. (2026). Assessment of Data Quality Metrics and Uncertainty Propagation in Distributed Sensor Networks. Em IMEKO (Ed.), *FLOMEKO 2026.*

C. Pires, M. A. (2024). Digital twin for a frequency mixer used as phase sensor. *Sensors*, 24, 7574. https://doi.org/10.3390/s24237574

CID. (s.d.). Obtido de https://commission.europa.eu/topics/competitiveness/clean-industrial-deal_pt

FUNSNM. (s.d.). Obtido de https://www.funsnm.eu/

ISO. (2022). Obtido de https://www.iso.org/contents/news/2022/05/metrology-in-digital-era-1.html

J. A. Sousa, L. R. (2019). Digitalização, Investigação e Desenvolvimento da Metrologia no IPQ. *e-medida, Revista Espanõla de Metrologia*.

João A. Sousa, A. B. (2024). Gaussian processes and sensor network calibration. *Measurement: Sensors*, 38, 101512. doi:https://doi.org/10.1016/j.measen.2024.101512

MAIBAI. (s.d.). Obtido de https://www.maibaiproject.eu/

NPL. (2024). *Technical report on the categorisation of clinical data into subsets based on identified population subgroups and image acquisition key factors.*

QUMPHY. (s.d.). Obtido de https://www.qumphy.ptb.de/qumphy

SEDF. (s.d.). Obtido de https://digital-strategy.ec.europa.eu/en

Authors Profiles

João Alves e Sousa is a Principal Researcher and Director of the National Metrology Laboratory of IPQ – Instituto Português da Qualidade. He has a PhD on Mechanical Engineering related to Energy Conservation in High Temperature Systems, and he is presently the Chair of the European Metrology Network for Clean Energy. He has more than 100 publications on peer review journals and international conferences and is currently the Chair of the IMEKO Technical Committee TC7 – Measurement Science.

Carlos Pires has graduated in Physical Engineering from the Faculty of Sciences of the University of Lisbon and, by the same university, he did a master's degree in Physical Engineering. In 2007, he started his duties at the Speed Laboratory of the National Metrology Laboratory, of the Portuguese Institute for Quality. In 2015, assumes the functions of Head for the Time and Frequency domain, He currently serves as Chair of the Time and Frequency Technical Committee (TC-TF) of EURAMET.

Gonçalo Carvalhal holds a degree in Physics from University of Coimbra and a postgraduate diploma in “Development of Information Systems” from ISCTE - University Institute of Lisbon. He is a metrologist with more than 15 years of experience in the field of Radioactivity (Gamma Spectrometry) and Ionizing Radiation Metrology. In 2023, he joined IPQ to work in Mass Metrology.

Liliana Eusébio has a degree in Physical Engineering from the Faculty of Sciences of the University of Lisbon. In 2007 she joined IPQ and started her activities in the Photometry Laboratory, and then in the Length Laboratory. In 2015, she started working on Thermometry assuming the functions of Head for Fixed Points Domain. Her main function is to carry out and disseminate the thermodynamic unit, kelvin, as well as to provide traceability to the unit at national level.

João Abrantes has graduated in Physical Engineering from the Faculty of Sciences and Technology of the University of Coimbra and holds a postgraduate diploma in Radiation Protection and Safety from IST - University of Lisbon. He worked for 16 years in the fields of Radiation Dosimetry and, later, responsible for the Laboratory of Radioactivity Measurements (Gas Proportional Counters and Liquid Scintillation Counters). Since 2018, he is a metrologist at IPQ, assuming the function of Head for the Mass and Solid Density domains in 2020.

https://doi.org/10.48552/edesp1-26-88-96

Atualidade da Fotometria e Radiometria

Olivier Pellegrino
opellegrino@ipq.pt
Instituto Português da Qualidade, I. P.
ORCID: 0000-0003-4167-1647

Raquel Quendera
rquendera@ipq.pt
Instituto Português da Qualidade, I. P.
ORCID: 0000-0001-6827-1550

Luís Correia de Sá
lcsa@ipq.pt
Instituto Português da Qualidade, I. P.
ORCID: 0009-0007-2311-4448

Resumo:
Com esta comunicação, pretende-se evidenciar o contributo do Laboratório de Fotometria e Radiometria (LFR) do Instituto Português da Qualidade, a Instituição Nacional de Metrologia (NMI) de Portugal, nesses domínios metrológicos, através dos projetos de investigação em que está envolvido. Com efeito, a eliminação e substituição das lâmpadas a filamento de tungsténio motivaram estudos para a atualização dos métodos de utilização de lâmpadas, agora díodos emissores de luz (lâmpadas LED), incluindo a determinação de grandezas integrais em comprimento de onda. No projeto RevStdLED, evidenciou-se que os índices de diferenciação dos fotómetros não foram muito alterados pelo uso dos novos dispositivos de iluminação, todavia, demostrou que as correlações espectrais podem ter influência nas estimativas das incertezas de medição das grandezas integrais. Uma correta descrição da irradiância espectral dos novos dispositivos de iluminação e metodologia de utilização dos mesmos têm também originado a criação de projeto de investigação, o NEWSTAND, em que o LFR tem participado, para futura disseminação. Finalmente, para responder às exigências de exatidão de medição dos espectrofotómetros, dispositivos muito utilizados em análise médica para medição de absorbância de filtros líquidos, o LFR tem participado num projeto europeu, o ETraceAbs, para atualização das práticas dessas medições dos diferentes laboratórios de espectrofotometria de NMI europeus, sendo a coordenar uma comparação entre os laboratórios, com filtros líquidos de referência produzidos pelo projeto em apreço.

Palavras-chave: absorbância de filtros líquidos, fotometria, irradiância espectral, LED.

Abstract:
This communication aims to highlight the contribution of the Photometry and Radiometry Laboratory (LFR) of the Portuguese Institute for Quality, the National Metrology Institution (INM) of Portugal, in these metrological fields, through the research projects in which it is involved. Indeed, the elimination and replacement of tungsten filament lamps have prompted studies to update the methods for using lamps, now light-emitting diodes (LED lamps), including the determination of integral quantities over wavelength. In the RevStdLED project, it was shown that the differentiation indices of photometers were not significantly affected by the use of the new lighting devices; however, it was demonstrated that spectral correlations can influence the estimates of measurement uncertainties of integral quantities. A correct description of the spectral irradiance of the new lighting devices and the methodology for their use has also led to the creation of a research project, NEWSTAND, in which LFR has participated, for future dissemination. Finally, to meet the accuracy requirements of spectrophotometer measurements, devices widely used in medical analysis for measuring the absorbance of liquid filters, LFR has participated in a European project, ETraceAbs, to update the measurement practices of different NMI spectrophotometry laboratories in Europe, coordinating an inter-laboratory comparison with liquid reference filters produced by the mentioned project.

Keywords: absorbance of liquid filters, LED, photometry, spectral irradiance.

1. Introdução

Dentro dos desafios colocados à nossa sociedade, os recursos em energia e uma boa utilização dos instrumentos de medição para a saúde ocupam um lugar importante. Assim, a necessária poupança de energia, motivada pela consciencialização da quantidade limitada de recursos naturais, impus eliminação e substituição da iluminação incandescente, através de lâmpadas com filamento de tungsténio, por principalmente dispositivos de iluminação de estado sólido, i.e. díodos emissores de luz (lâmpadas LED). Novos dispositivos e novos métodos de medição têm sido então implementados para a utilização dessa nova fonte de iluminação, criando estudos e projetos de investigação para esses efeitos (Iacomussi, 2015). Por outro lado, paralelamente ao melhoramento dos dispositivos de medição, refletindo-se nos respetivos desempenhos e exatidão de medição, em retorno, mais exigência tem vindo da sociedade, em particular do meio médico para mais confiança na interpretação dos resultados de análise, de maneira a melhorar os tratamentos para os pacientes. Os espectrofotómetros, para a medição da absorbância de filtros líquidos, são dispositivos de medição medicais exemplares nessa temática, por ser muito frequentemente utilizados em análise médica.

Enquanto Instituição Nacional de Metrologia (NMI), o Instituto Português da Qualidade, I.P. (IPQ) tem por missão a manutenção e a disseminação dos padrões nacionais de medição dos

domínios metrológicos associados às grandezas de base do Sistema Internacional de Unidades (SI), cuja intensidade luminosa é da responsabilidade do Laboratório de Fotometria e Radiometria (LFR). Membro do Comité Técnico em Fotometria e Radiometria da Associação Europeia das Instituições Nacionais de Metrologia (Euramet), o LFR tem tido conhecimento e participado em projetos de investigação científica associados a esse domínio metrológico. Essas participações têm permitido ter conhecimento das atualizações acontecendo através da troca de experiências e publicações para a comunidade científica. Mas, em que consiste a Fotometria-Radiometria, enquanto metrologia óptica, desenvolvida no LFR? Quais atividades de investigação científica estão efetuadas pelo LFR no âmbito da Euramet? Começando por uma apresentação da Fotometria-Radiometria, enquanto ramo da metrologia óptica, propomos tentar responder a essas perguntas, dando um contribuo para a atualidade da fotometria e da radiometria em Portugal e na Europa.

2. Fotometria - Radiometria

Três modelos podem ser mobilizados para descrever a metrologia óptica (Henri, 1996). O primeiro, a óptica geométrica, considera o movimento da luz segundo linhas retas, no sentido matemático, e chamados de raios luminosos. De facto, os raios luminosos têm constituído um instrumento ideal para definir alinhamentos, referenciar posições e medir ângulos, desde milhares de anos. Hoje em dia, os raios luminosos podem ser materializados por um feixe laser, que pode percorrer distâncias de dezenas até centenas de metros, emitidos por um laser He-Ne de potência da ordem de uns miliwatts. Uma aplicação do modelo do raio luminoso é a refratometria ou medição do índice de refração, que tem de ser sempre tido em conta para qualquer medição em óptica. A refratometria está também muito utilizada para determinação de concentrações desde a metalurgia até ao setor alimentar, por exemplo na indústria vitivinícola (Furtado, 2010). Segundo o modelo ondulatório, a luz é uma radiação eletromagnética, uma variação periódica de um "vetor luminoso", perpendicular à direção de propagação e é caracterizada por uma frequência, ν, ou uma das próprias grandezas associadas à frequência, à energia, E, ou ao comprimento de onda, λ. As radiações eletromagnéticas podem ter como origem a passagem de corrente elétrica numa antena, a subida de temperatura num corpo, uma descarga elétrica, etc.. As radiações visíveis, que são consideradas nos fenómenos da óptica, têm valores de frequência entre 395 THz e 790 THz, o que corresponde a comprimentos de onda entre 760 nm e 380 nm ou energias entre 1,7 eV e 3,0 eV. Aliado ao modelo do raio luminoso, o modelo ondulatório permite ainda interpretar a formação das

imagens. O terceiro modelo considera as medições de grandezas derivadas da energia associada à luz, quer com os olhos, quer com recetores físicos. A fotometria diz respeito à iluminação tendo em conta a sensibilidade do olho humano e a espectrofotometria é uma das ferramentas mais eficaz da análise desde a astronomia, à ciência dos materiais até à biologia.

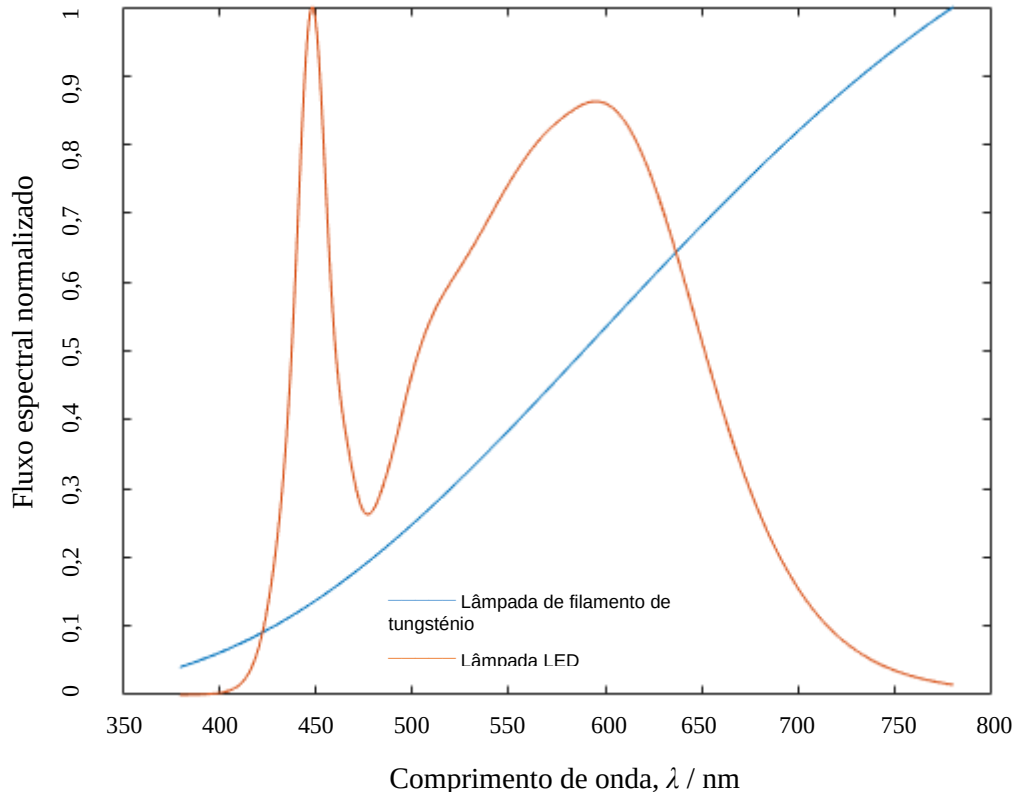
Enquanto a radiometria considera o estudo das radiações eletromagnéticas para valores de comprimentos de onda entre 1 nm (raios x) e 1 mm (ondas elétricas), o que corresponde a valores de comprimento intermédios entre as distâncias interatómicas nos meios condensados (da ordem de 0,5 nm) e os diâmetros de abertura dos instrumentos (da ordem de 1 cm), com detetores físicos adequados, a fotometria "limita"-se à radiação visível, i.e. percebida pelo olho humano, no intervalo já apresentado. Na retina do olho humano, a luz é absorvida por centenas de milhões de células fotossensíveis, os bastonetes e os cones, em função do comprimento de onda e da intensidade dos fotões, da direção do feixe iluminando e da zona recetora, sendo o olho sensível a 11 ordens de grandeza de luminância, nomeadamente entre a luz de um dia ensolarado de 10^5 cd m^{-2} e alguns fotões, de 10^{-6} cd m^{-2}, de uma noite sem lua. Enquanto os bastonetes apenas contêm um tipo de molécula de fotopigmento, a rodopsina, sensível na totalidade do espectro visível com um máximo sensibilidade em 507 nm, existem três tipos de cones, aproximadamente 6 milhões em cada olho, com moléculas recetoras específicas de sensibilidade centrada em intervalos espectrais de diferentes comprimentos de onda, referidos por S, M e L, por serem centrados em comprimentos de onda curtos (entre 420 nm e 440 nm), médios (entre 534 nm e 545 nm) e compridos (entre 546 nm e 580 nm), respetivamente. Os bastonetes são situados na periferia da retina, enquanto os cones encontram-se dentro de um campo central de 2º de diâmetro angular. A sensação visual é devida à conversão em sinais elétricos transmitidos ao nervo óptico para o córtex visual do cérebro dos fotões absorvidos pelos fotopigmentos.

Para que o resultado da medição da luz seja mais próximo possível da sensação visual do observador humano exposto à mesma radiação, a Comissão Internacional da Iluminação (CIE) introduziu as funções de eficiência luminosa espectral $V(\lambda)$ e $V'(\lambda)$, que descrevem a sensibilidade espectral relativa de um olho humano "médio" para as visões fotópica (i.e. pelos cones) e escotópica (pelos bastonetes), respetivamente (Zwinkels, 2010). O Comité Internacional dos Pesos e Medidas (CIPM) aprovou o uso dessas funções que permitem definir as grandezas fotométricas como grandezas proporcionais à integral de uma distribuição de potência espectral ponderada por uma função específica de comprimento de onda. Assim, qualquer grandeza fotométrica X_v, como o fluxo luminoso, a intensidade luminosa, a luminância e a iluminância, é definida através da equação:

$$X_{\mathrm{v}} = K_{\mathrm{m}} \int X_{\mathrm{e},\lambda}(\lambda)\, V(\lambda)\, \mathrm{d}\lambda$$

em que $X_{\mathrm{e},\lambda}$ é a grandeza espectral radiométrica correspondente, nomeadamente a distribuição espectral do fluxo energético, da intensidade energética, da radiância e da irradiância, respetivamente, para uma determinada fonte luminosa e a constante multiplicativa K_{m} é o valor máximo da eficácia luminosa, igual a 683 lm W^{-1}, em λ = 555 nm, para a visão fotópica. Para a visão escotópica, as grandezas fotométricas são definidas com a constante multiplicativa K'_{m} = 1700 lm W^{-1}, em λ = 507 nm. Ora, a substituição progressiva e irreversível das lâmpadas a filamento de tungstênio por lâmpadas com díodos emissores de luz (lâmpadas LED), cada uma com diferentes distribuições como se pode ver na Figura 1, tem motivado projetos de investigação sobre as consequências nos índices da qualidade dos fotómetros e sobre a criação de novas lâmpadas de tecnologia LED com propriedades espectrais mais semelhantes possíveis das de filamento de tungsténio.

Figura 1 – Distribuições espectrais de uma lâmpada de filamento de tungsténio e de uma lâmpada LED



Fonte: Udo Krüger, *et al.*", 2022 *Metrologia* 59 065003 (12pp).

De modo geral, é, portanto, muito importante para muitas aplicações, além da fotometria, ter um conhecimento exato da irradiância espectral, que é a densidade do fluxo energético por área

irradiada e por comprimento de onda, produzida pelas fontes luminosas. Para esse efeito, os resultados de medição espectrorradiométricas têm de estar rastreados ao SI e qualquer alteração do tipo de lâmpada suscita, então, um estudo.

A análise espectral permite uma clara identificação de componentes químicos e, por extrapolação, biológicos, assim como das quantidades associadas. A espectrofotometria, que permite essas análises a partir das radiações absorvidas pelos sistemas em apreço, tem conhecido de grandes desenvolvimentos e aplicações, em particular no ramo médico. Tais como todos os dispositivos de medição médicos (MMDs) têm sido submetidos ao Regulamento Europeu sobre os MMDs (Regulation (EU) 2017/746). Apresentamos, a seguir, os trabalhos mais recentes em que o Laboratório de Fotometria-Radiometria do IPQ tem sido envolvido, ao abrigo da investigação científica promovida pela Euramet.

3. Projetos RevStdLED e NEWSTAND

No âmbito do *European Metrology Programme for Innovation and Research* (EMPIR), o projeto *Revision and extension of standards for test methods for LED lamps, luminaires and modules* – RevStdLED procurou encontrar uma resposta atempada ao aumento das fontes LED como meio de iluminação. Com efeito, apesar das lâmpadas LED se têm tornado as fontes de iluminação preferidas para os fabricantes e os utilizadores, os métodos de medição e de análise continuavam a ser baseadas nas lâmpadas clássicas de filamento de tungsténio. O objetivo principal do projeto RevStdLED foi de atualizar esses métodos de medição e de análise devido à utilização das lâmpadas LED. A primeira ferramenta em estudo foi o cálculo do índice de diferenciação do fotómetro f'_1 em relação a $V(\lambda)$, que tradicionalmente inclui a distribuição espectral do iluminante A, da Comissão Internacional da Iluminação (CIE), i.e. a lâmpada com filamento de tungsténio. Numa publicação, em que participou o IPQ (Krüger, 2022), foi demonstrado que a mudança de lâmpada de referência para uma fonte LED não necessita mudar a definição de f'_1. A importância da dependência espectral nas grandezas radiométricas e fotométricas tem motivado também o estudo do cálculo de grandezas integrais espectrais em que os dados têm sido supostos ser não correlacionados. O IPQ também participou numa publicação (Krüger, 2025), no âmbito do projeto mencionado, de um estudo da contribuição das correlações espectrais na determinação da incerteza de medição de grandezas integrais, utilizando um método, desenvolvido pelo Aalto, baseando em decomposição ortogonal e simulação de Monte Carlo. Uma conclusão deste trabalho foi que não considerar as correlações espectrais parciais pode levar a uma subestimação significativa da incerteza de medição.

Financiado pela *European Partnership on Metrology* (EPM), co-financiado pelo *Horizon Europe Research and Innovation Programme* da União Europeia e pelos estados participantes, o projeto *New Calibration Standards and Methods for Radiometry and Photometry After Phaseout of Incandescent Lamps* - NEWSTAND tem como objetivo geral garantir que os resultados de medição de irradiância espectral estejam rastreados ao SI, desde as fontes de iluminação naturais às artificiais e desenvolver uma infraestrutura metrológica requerida para esse efeito. Pois, esse projeto é necessário desde que as lâmpadas de incandescência, utilizadas como padrões de transferência, estão a ser descontinuadas. Desenvolver novas fontes padrão de transferência, com incerteza de transferência da ordem de 0,5 % (k = 2), novos métodos para rastreabilidade de medição de irradiância baseada em detetor, e não em fontes de iluminação e guias de boa prática associados a esses métodos e novas fontes para seleção de espectrorradiómetros de transferência, incluindo a calibração dos mesmos e uma infraestrutura europeia integrada de metrologia entre laboratórios primários e utilizadores finais. A participação do IPQ nesse projeto, iniciado em 2023 e ainda em curso, é essencial como contribuição ao desenvolvimento nacional das tecnologias associadas à mudança de paradigma que abrange indústrias envolvendo medições de radiações solares, a radiometria actínica, os fotovoltaicos, a iluminação e a cor.

4. Projeto ETraceAbs

A sociedade tem importantes exigências (Regulation (EU) 2017/746) sobre o reconhecimento internacional da qualidade dos serviços médicos e de metrologia, para os quais os NMI têm que fornecer resultados de medição de fatores de transmissão e de absorbância (ou densidade óptica) rastreáveis ao SI através de filtros líquidos de absorbância. Com efeito, muitos dispositivos de medição medicais medem a absorbância de filtros líquidos (OALF), que são também utilizados para a calibração desses instrumentos de medição. Todavia, existe um grande hiato entre a produção, a caracterização e a utilização de tais filtros, conduzindo a uma falta de rastreabilidade dos resultados de medição. Financiado pela EPM, o projeto *Establishing European traceability for medical measuring devices through optical absorbance liquid filters* - ETraceAbs destina-se a preencher essa lacuna pelo apoio ao desenvolvimento de capacidades de medição para absorbância de filtros líquidos de laboratórios de espectrofotometria dos NMI europeus em termos de rastreabilidade ao SI dos resultados de medição de absorbância óptica desses filtros. Com esse projeto, a exatidão dos resultados de medição clínicos será assim melhorada e permitindo melhores conclusões para os tratamentos aos pacientes.

Numa primeira fase, uma série de critérios foram estabelecidos para a composição e a preparação dos filtros líquidos de absorbância. O intervalo espectral é de 220 nm a 780 nm, e absorbâncias entre 0,001 e 3,000 (correspondendo valores de fator de transmissão entre 99,77 % entre 0,1 %, respetivamente), temperaturas entre 15 °C e 40 °C e incertezas padrão relativas entre 0,3 % e 1,0 %. Com esses filtros, uma comparação das medições de absorbância entre os diferentes participantes do projeto será efetuada e sob a responsabilidade do IPQ, a fim de estabelecer uma equivalência entre os diferentes laboratórios. Um Guia de Boas práticas de preparação, caracterização e utilização dos filtros líquidos de absorbância será elaborado, tendo o apoio de organizações internacionais com autoridade nesta matéria, como o Comité Técnico de Fotometria-Radiometria da Euramet, a Organização Internacional de Metrologia Legal (OIML, 2004) ou a Organização Internacional de Normalização (ISO, 2022). O IPQ já tem divulgado esse projeto numa conferência Luso-Ibérica de Química (Brida, 2025).

Referências

Brida, G., Correia de Sá, L., Quendera, R., Pellegrino, O. (2025) Rastreabilidade de dispositivos médicos de medição usando filtros líquidos de absorbância óptica *Livro de Resumos do XXIX Encontro Luso-Galego de Química*

Furtado, A., Pellegrino, O., Alves, S., Beja, E., Fortes, S., Spohr, I., Filipe, E. (201) Determinação da fracção mássica de soluções aquosas em glucose por refractometria e densimetria *Atas da CONFMET 2010*

Henri, M. (1996) Les grandeurs optiques et leurs mesures *Techniques de l'Ingénieur, traité Mesures et Contrôle*, R 6250, 1-5.

Iacomussi, P., Radis, M., Rossi, G. (2015) European EMRP Projects About LED Lighting *Energy Procedia*, 78, 2675-80.

ISO 15189:2022 *Medical laboratories — Requirements for quality and competence*.

Krüger, U., Ferrero, A., Mantela, V., Thorseth, A., Trampert, K., Pellegrino, O., Sperling, A. (2022) Evaluation of different general $V(\lambda)$ mismatch indices of photometers for LED-based light sources in general lighting applications *Metrologia*, 59, 065003 (12pp).

Krüger, U., Ferrero, A., Thorseth, A., Pellegrino, O., Dubard, J., Ikonen, E., Sperling, A. (2025) Sensitivity evaluation of measurement uncertainty contributions of spectral data for calculated integral quantities *Lighting Res. Technol.*, 57, 345–362.

OIML R 135, *Spectrophotometers for medical laboratories, Edition 2004*, Retrieved from: https://www.oiml.org/en/publications/recommendations/en/files/pdf_r/r136-p-e04.pdf

Regulation (EU) 2017/746 of the European Parliament and of the Council of 5 April 2017 on in vitro diagnostic medical devices and repealing Directive 98/79/EC and Commission Decision 2010/227/EU.

Zwinkels, J.C., Ikonen, E., Fox, N.P., Ulm, G., Rastello, M.L. (2010) Photometry, radiometry and 'the candela': evolution in the classical and quantum world *Metrologia*, 47, R15-R32.

Authors Profiles

Olivier Pellegrino is a chemist engineer with PhD in Physics, Université de Pierre et Marie Curie (France) and Head of Photometry, Radiometry, Refractometry and Speed Laboratories, at the Portuguese Institute for Quality (IPQ), the Portuguese National Metrology Institute, IPQ contact person in EURAMET Photometry Radiometry, member of national IEC TC 1 "Terminology", national ISO/IEC/TC25 “Quantities and Units”, and Chair of the /IEC/TC25 “Quantities and Units”. Main research areas are metrology in photometry-radiometry, uncertainty measurement calculations.

Raquel Quendera is a chemist engineer with more than 10 years of experience in pH metrology and the Head of Electrochemistry Laboratory, representative of CCQM Electrochemistry WG and Chair of BIPM/CCQM/EAWG TG on seawater pH. Main research areas are metrology in chemistry, mainly in primary and secondary pH, preparation and certification of TRIS CRMs for measurement of pH in seawater for ocean acidification monitoring.

Luís Correia de Sá holds a degree from the Instituto Superior de Engenharia do Porto, in Portugal. He is currently a senior technician at the Portuguese Institute for Quality (IPQ). Having conducted research for several years in the field of food quality control, his research interests now focus on metrology and photometry.

https://doi.org/10.48552/edesp1-26-97-118

O Papel das Redes Europeias de Metrologia no Desenvolvimento Sustentável e Tecnológico da Europa

Florbela A. Dias
florbelad@ipq.pt
Instituto Português da Qualidade, I.P.
0009-0002-9425-146X

Fernanda Saraiva
fsaraiva@ipq.pt
Instituto Português da Qualidade, I.P.
0009-0008-2068-5680

Raquel Quendera
rquendera@ipq.pt
Instituto Português da Qualidade, I.P.
0000-0001-6827-1550

João Alves e Sousa
jasousa@ipq.pt
Instituto Português da Qualidade, I.P.
0000-0002-9630-0854

Resumo:

O presente trabalho tem como objetivo analisar o papel das *European Metrology Networks* (EMN) no fortalecimento do desenvolvimento sustentável, tecnológico e económico da Europa, destacando a sua contribuição em áreas estratégicas como a energia limpa, os gases energéticos, a fabricação avançada e a observação climática e oceânica. A metodologia adotada consistiu numa revisão aprofundada de documentos institucionais da EURAMET, estudos recentes sobre metrologia aplicada e exemplos de projetos desenvolvidos no âmbito das EMN, permitindo identificar tanto o enquadramento estrutural das redes como as suas aplicações práticas nos setores analisados.

Os resultados evidenciam que as EMN desempenham um papel crucial na harmonização das medições, no desenvolvimento de padrões avançados e na promoção da inovação tecnológica, através de uma melhor coordenação de atividades a nível europeu e envolvimento dos principais stakeholders na definição das agendas de investigação, e dessa forma ultrapassar os desafios metrológicos existentes. Observa-se que, na energia limpa, estas redes melhoram a confiança nas medições e aumentam a eficiência dos sistemas energéticos; nos gases energéticos, contribuem para a segurança, a redução de emissões e a otimização de infraestruturas; na fabricação avançada, fortalecem a precisão produtiva e a

competitividade industrial; e na observação climática e oceânica, asseguram dados robustos essenciais para políticas ambientais.
As EMN são fundamentais para enfrentar desafios globais, reforçar a competitividade europeia e apoiar a transição para uma economia sustentável. A consolidação destas redes e o contínuo investimento em capacidades metrológicas são determinantes para o futuro tecnológico e ambiental da Europa.

Palavras-chave: Energia limpa, gases energéticos, fabricação avançada, observação climática e oceânica, redes de metrologia

Abstract:

The present work aims to analyze the role of the European Metrology Networks (EMN) in strengthening Europe's sustainable, technological and economic development, highlighting their contribution in strategic areas such as clean energy, energy gases, advanced manufacturing, and climate and ocean observation. The methodology adopted consisted of an in-depth review of institutional documents from EURAMET, recent studies on applied metrology, and examples of projects developed within the scope of the EMN, allowing for the identification of both the structural framework of the networks and their practical applications in the sectors analyzed.
The results show that the EMNs play a crucial role in the harmonization of measurements, the development of advanced standards, and the promotion of technological innovation, through the improved coordination at European level and involvement of key stakeholders in the definition of the strategic research agendas, and in that way overcome the existent metrological challenges. In the field of clean energy, these networks improve measurement reliability and increase the efficiency of energy systems; in energy gases, they contribute to safety, emission reduction, and the optimization of infrastructure; in advanced manufacturing, they strengthen production precision and industrial competitiveness; and in climate and ocean observation, they ensure robust data essential for environmental policies.
The EMN are fundamental for addressing global challenges, enhancing European competitiveness, and supporting the transition towards a sustainable economy. The consolidation of these networks and continued investment in metrological capabilities is crucial for Europe's technological and environmental future.

Keywords: Clean energy, energy gases, advanced manufacturing, climate and ocean observation, metrology networks

1. Introdução

A metrologia, definida como a ciência da medição, desempenha um papel central na investigação científica, no desenvolvimento tecnológico e na sustentabilidade ambiental. A exatidão e confiança das medições são fundamentais para garantir que processos industriais, sistemas energéticos e monitorização ambiental possam operar de forma segura, eficiente e competitiva. No contexto europeu, os desafios globais contemporâneos — desde as alterações

climáticas e a transição energética até à inovação industrial e à proteção dos oceanos — exigem soluções metrológicas avançadas, coordenadas e harmonizadas entre os diferentes países.

Neste cenário, surgem as *European Metrology Networks* (EMN) [1], redes colaborativas que agregam institutos nacionais de metrologia, centros de investigação, universidades e parceiros industriais, com o objetivo de desenvolver padrões de medição de excelência, promover a inovação e garantir interoperabilidade a nível europeu e internacional, de uma forma integrada e coordenada, para responder com eficácia à necessidade de desenvolver novos métodos de medição em áreas emergentes. Estas redes focam-se em áreas estratégicas, incluindo *Clean Energy* (Energia Limpa), *Energy Gases* (Gases Energéticos), *Advanced Manufacturing* (Fabricação Avançada) e *Climate and Ocean Observation* (Observação Climática e Oceânica).

O presente artigo pretende explorar de forma detalhada a necessidade das EMN, a sua organização, as aplicações práticas em cada uma das áreas mencionadas, o impacto potencial destas redes em termos sociais, económicos, ambientais e tecnológicos e a participação/contribuição do IPQ para estas redes.

1.1. *European Metrology Network*: Uma Visão Geral

As European Metrology Networks surgem no âmbito do European Metrology Programme for Innovation and Research (EMPIR) [2], coordenado pelo European Association of National Metrology Institutes (EURAMET) [3]. Este programa visa reforçar a capacidade de investigação e inovação europeia em metrologia, promovendo a colaboração entre institutos de metrologia nacionais, universidades, centros de investigação e parceiros da indústria.

1.1.1. Estrutura e funcionamento

Cada EMN é estruturada como uma rede temática que agrupa especialistas e laboratórios com interesses comuns. A coordenação envolve a definição de objetivos estratégicos, o planeamento de projetos de investigação conjunta e a padronização de métodos de medição. Entre as principais funções das EMN [1] destacam-se:

- Desenvolvimento de padrões de medição avançados, garantindo a comparabilidade e rastreabilidade de medições entre países;

- Apoio à investigação científica e tecnológica, promovendo a inovação em setores estratégicos como energia, indústria e ambiente;

- Promoção da harmonização normativa, essencial para a competitividade europeia e a conformidade com regulamentações internacionais;

- Formação e capacitação de recursos humanos, garantindo a continuidade e excelência na ciência da medição.

1.1.2. Relevância estratégica

A existência de redes de metrologia é vital num mundo altamente globalizado. Sem padrões harmonizados, os dados gerados por diferentes laboratórios seriam inconsistentes, prejudicando a investigação, a produção industrial e a monitorização ambiental. Além disso, a colaboração internacional permite partilhar conhecimento, reduzir custos de investigação e acelerar a implementação de novas tecnologias.

2. EMN *Advanced Manufacturing*

A fabricação avançada está a transformar a indústria, exigindo métodos metrológicos inovadores para garantir a qualidade dos processos e dos produtos. Neste contexto, surgiu a Rede Metrológica Europeia para Fabricação Avançada (EMN *Advanced Manufacturing*) [4], com a missão de coordenar a comunidade metrológica a nível europeu e promover a disseminação e o impacto das soluções desenvolvidas. É gerida por Institutos Nacionais de Metrologia e Institutos Designados, em estreita colaboração com as partes interessadas. Esta rede tem como principais objetivos o estabelecimento de um diálogo contínuo com os *stakeholders*, o desenvolvimento de uma Agenda Estratégica de Investigação para as tecnologias de fabricação avançada, a criação de programas de troca de conhecimento e a implementação de um serviço online para apoiar os utilizadores, em áreas prioritárias, como sejam: (1) Materiais Avançados, (2) Sistemas de Fabrico Inteligentes e (3) Componentes e Produtos Fabricados. Os grupos de trabalho internos, para cada uma das três áreas prioritárias, dinamizam as atividades entre as secções desta EMN e são relevantes para a comunicação externa.

2.1. Agenda Estratégica de Investigação da EMN *Advanced Manufacturing*

A indústria transformadora, composta por cerca de 20 setores industriais, constitui a espinha dorsal da economia europeia [5]. A fabricação avançada foi identificada pela Comissão Europeia como uma das seis Tecnologias Facilitadoras Chave, com aplicações transversais em múltiplas indústrias [6]. Para garantir o desenvolvimento sustentável da fabricação avançada, é essencial enfrentar os desafios e aproveitar as oportunidades alinhadas com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas (ODS) [7].

A EMN *Advanced Manufacturing* desenvolveu a sua Agenda Estratégica de Investigação (AEI) [8] em estreita colaboração com as partes interessadas, com o objetivo de identificar e

descrever as áreas prioritárias de investigação em metrologia que devem ser abordadas para impulsionar a inovação na indústria de fabricação avançada na Europa. Com base numa revisão das estratégias industriais relevantes e em consultas diretas com stakeholders europeus, foram identificados desafios e oportunidades prioritários a curto e médio prazo, a partir de uma abordagem dupla onde se incluíram as características comuns às cadeias de produção, estruturadas em torno de Tópicos Transversais Gerais (CCT) e as especificidades dos Setores Industriais Chave (KIS). Na AEI são descritos as correlações entre os fatores limitantes e o seu impacto nos CCT e KIS.

2.1.1. Principais áreas de investigação em metrologia na AEI

A caracterização de materiais em meios complexos e a avaliação da reciclabilidade e reutilização são fundamentais. A metrologia deve apoiar processos sustentáveis, avaliar riscos de novas tecnologias e contribuir para a determinação de grandezas críticas relacionadas à economia circular. Neste contexto os desafios e oportunidades foram agrupados, na AEI, em categorias que refletem as condições essenciais para a Fabricação Avançada, incluindo tecnologias facilitadoras como a digitalização, nomeadamente na Metrologia para o Design Inteligente de Produtos, na Metrologia para Materiais Avançados, na Metrologia para Fabricação e Montagem Inteligentes, na Metrologia para Controle de Qualidade e Testes, na Metrologia para Digitalização e Integração Vertical.

2.1.2. Os Grupos de Trabalho da EMN *Advanced Manufacturing*

Os 3 Grupos de Trabalho (GT) da EMN permitem aos membros reforçar os seus interesses individuais, criando oportunidades de colaboração, aumentando a divulgação dos resultados científicos e apoiando prioridades estratégicas, com a ligação às Parcerias da União Europeia (EU). Os GT desenvolvem atividades essenciais em três áreas:

- Operação: Foco na comunicação eficaz e na divulgação de informação e projetos.
- Partes Interessadas: Interação direta com *stakeholders*, ampliando a visibilidade dos institutos e apoiando áreas prioritárias de investigação.
- Impacto e Valor: Relação com decisores e definição de estratégias para gerar valor e criar sinergias.

Nestes grupos foi conduzida uma análise aprofundada dos documentos estratégicos e de política da União Europeia, com enfoque em áreas críticas para a competitividade e inovação industrial. Entre os documentos destaca-se o Pacto para uma Indústria Limpa (de fevereiro de 2025) [9], analisado pelo IPQ e apresentado ao EMN. Neste documento a Comissão Europeia apresentou uma estratégia para reforçar a competitividade da União Europeia e acelerar a descarbonização

da indústria. O plano assenta em seis pilares: energia acessível e limpa, mercados líderes, investimento público e privado, economia circular, parcerias globais e desenvolvimento de competências. Entre as medidas propostas destacam-se a criação do Banco de Descarbonização Industrial, simplificação das regras de auxílio estatal para energias renováveis, apoio a pequenos reatores nucleares e promoção do hidrogénio renovável. O Pacto inclui ainda a futura Lei da Economia Circular e a União de Competências para garantir empregos qualificados. Apesar do potencial transformador, persistem desafios como a dependência de combustíveis fósseis importados e a falta de flexibilidade do sistema energético. A Comissão abriu uma consulta pública sobre o novo Quadro de Auxílios Estatais, visando assegurar capacidade produtiva em tecnologias limpas e uma transição justa e sustentável.

Os resultados das análises efetuadas pelos GT são a base para as propostas de ideias a novos projetos de investigação e desenvolvimento no âmbito do Programa de Parceria Europeia em Metrologia (*European Partnership on Metrology*), a submeter nas respetivas *call*.

Toda a atividade é atualizada e divulgada através do portal da EMN *Advanced Manufacturing* disponibilizado pela EURAMET, em: https://www.euramet.org/european-metrology-networks/advanced-manufacturing/what-we-do.

3. EMN *Energy Gases*

Entre as várias áreas de atuação das EMN, a Energy Gases [10] assume um papel crítico. Este setor engloba gases como o hidrogénio, o metano, o biogás e outros combustíveis gasosos, que são fundamentais para a descarbonização da economia europeia e para a transição para fontes de energia mais sustentáveis. No entanto, o manuseamento, transporte e utilização destes gases apresentam desafios significativos, que exigem medições exatas e seguras. A existência de uma rede europeia dedicada à metrologia dos gases energéticos responde a esta necessidade, promovendo a utilização de padrões, a confiança e a inovação tecnológica.

3.1. Importância e contextos de atuação

A transição energética, para fontes renováveis e para gases renováveis ou de baixo carbono (hidrogénio verde, biometano, captura e armazenamento de carbono — CCUS), exige rigor nas medições para assegurar que políticas, tarifas, regulações e certificações sejam corretas e justas. Sem boa metrologia, há riscos de discrepâncias ou fraudes, ou simplesmente de ineficiências.

Ao normalizar métodos, garantir rastreabilidade metrológica, partilhar boas práticas, e fomentar cooperação entre institutos nacionais de metrologia, universidades, laboratórios,

indústria e reguladores, o EMN *Energy Gases* [10] ajuda a diminuir barreiras técnicas que poderiam atrasar a adoção de gases renováveis ou medidas de mitigação climática.

3.2. Desafios

Apesar do progresso, há vários desafios técnicos, institucionais e práticos:

Complexidade metrológica: medir hidrogénio puro ou misturas com grande precisão exige lidar com variabilidade de humidade, contaminação, variação de pressão e temperatura, entre outros. Os métodos têm de ser adaptados para cada aplicação, o que exige esforços de investigação, desenvolvimento e certificação.

Integração nas redes existentes: muitas infraestruturas de gás foram desenhadas para gás natural e não para hidrogénio ou misturas — o que pode alterar propriedades físicas, químicas e de segurança. As medições têm de levar em conta essas mudanças.

Padrões internacionais: é preciso que haja acordos e normas à escala europeia ou global, de modo que medições feitas em diferentes países sejam comparáveis e reconhecidas.

Financiamento e suporte institucional: projetos de metrologia exigem investimento, laboratórios, equipamento, pessoal altamente especializado. Garantir continuidade, evolução tecnológica e manutenção dos padrões primários requer apoio público, regulação favorável e cooperação privada-pública.

Regulação e políticas: políticas energéticas, de certificação de gases renováveis, de neutralidade carbónica, etc., dependem de medições de confiança. Se a legislação, certificações ou incentivos estiverem desenhados com base em premissas pouco rigorosas, pode haver incerteza, litígios ou falta de confiança por parte da indústria e consumidores.

3.3. Impacto Potencial da EMN Energy Gases

A EMN Energy Gases [10] poderá contribuir para:

- Acelerar a adoção de hidrogénio verde e biometano, por meio de certificações de qualidade e medições fiáveis, o que por sua vez ajuda a descarbonizar setores como a indústria pesada, transporte e geração de energia.
- Garantir que projetos de captura de carbono sejam contabilizados corretamente, reforçando a credibilidade das metas climáticas nacionais e internacionais.
- Auxiliar na criação de cadeias de valor para gases renováveis, com segurança jurídica e técnica, criando confiança para investidores, reguladores e utilizadores finais.

- Facilitar interoperabilidade de redes de gás verde entre países da UE, por meio de normas comuns de medição, de forma a permitir comércio ou transporte transfronteiriço de hidrogénio ou biogás.

O impacto da EMN Energy Gases é também amplo e multifacetado, abrangendo aspetos técnicos, económicos, ambientais e sociais.

Do ponto de vista técnico, a rede permite o desenvolvimento de métodos de medição avançados que aumentam a exatidão e a confiança dos dados. Por exemplo, sensores calibrados para detetar fugas de metano ou sistemas de monitorização em tempo real da pureza do hidrogénio permitem reduzir erros e riscos operacionais.

Economicamente, a EMN contribui para a competitividade industrial. Empresas que operam em múltiplos países podem confiar em medições harmonizadas, reduzindo custos de calibração e evitando barreiras técnicas. A normalização promove também a eficiência na produção e distribuição, diminuindo desperdícios e aumentando o retorno de investimento em infraestruturas energéticas.

O impacto ambiental é igualmente relevante. A medição exata de emissões de metano ou de composição de biogás permite monitorizar a pegada ambiental de atividades energéticas, contribuindo para a redução de gases de efeito estufa. Sistemas de monitorização contínua podem detetar fugas em tempo real, evitando emissões desnecessárias e promovendo práticas mais sustentáveis.

Do ponto de vista social, a EMN contribui para a segurança das comunidades e trabalhadores. A monitorização rigorosa de gases inflamáveis e tóxicos previne acidentes, protege a saúde pública e fortalece a confiança da sociedade nas tecnologias energéticas emergentes. Além disso, a rede promove a formação de profissionais altamente qualificados em metrologia e tecnologia de gases energéticos, reforçando a capacidade científica e tecnológica da Europa.

A rede europeia de metrologia dedicada a *Energy Gases* é uma infraestrutura estratégica para a transição energética e para a sustentabilidade ambiental na Europa. A sua existência responde a necessidades críticas de segurança, eficiência e inovação tecnológica, permitindo medições de confiança e harmonizadas de hidrogénio, metano, biogás e outros gases energéticos.

3.4. Grupos de Trabalho (*Task Groups*) estabelecidos pela EMN EG

O EMN EG estabeleceu grupos de trabalho para organizar as atividades dentro da rede de metrologia [11]. O EMN é composto por 21 institutos membros, e cada grupo de trabalho é constituído por indivíduos de cada instituto membro.

TG1: *Strategic Research Agenda*

TG2: *Measurement Service Platform*

TG3: *Stakeholder engagement + Standardization*

TG4: *General Communication & Impact*

Newsletters, atualização do website, cartas para os membros, atualização de apresentações

Organização de eventos

Preparação do plano de comunicação

TG5: *Funding opportunities*

Oportunidades de financiamento EPM e externas para investigação e para a sustentabilidade do EMN

TG6: *Synergies*

Formação, ensaios de aptidão (PTs), investigação colaborativa

Cada grupo de trabalho reporta ao comité de direção (*steering committee*) do EMN EG.

3.5. Projetos Colaborativos de Investigação em curso

A EURAMET, em colaboração com esta rede, apresenta vários projetos de investigação conjunta (EMRP, EMPIR, EPM) relacionados com gases energéticos, visando apoiar a transição energética para combustíveis gasosos renováveis, garantir medições fiáveis, segurança, eficiência e rastreabilidade metrológica [12].

- MetNH3Energy (*Metrology to support ammonia use in emerging applications*)

  Este projeto investiga a metrologia para apoiar o uso do amoníaco em aplicações emergentes. O amoníaco pode atuar como transportador ou vetor energético (por exemplo como meio para armazenar ou transportar hidrogénio), e o projeto pretende desenvolver infraestruturas de medição para garantir a sua utilização segura e eficiente.

- CryoMet (*Metrology for reliable liquefied energy gases measurement*)

  Foca-se nas medições de gases energéticos liquefeitos (por exemplo hidrogénio liquefeito), garantindo que as medições de caudal, composição e outras propriedades sejam rastreáveis e de confiança. Isto é importante para suportar o uso seguro e industrial destes gases no contexto da transição energética.

- SmartGasNet (*Metrology for smart metering in gas networks*)

  Este projeto visa desenvolver medições inteligentes (“smart metering”) para redes de gás, com métodos de medição mais precisos e rastreáveis para apoiar a integração de gases renováveis na rede de distribuição.

- MetroHyVe3 (*Metrology for hydrogen vehicles 3*)

  Continua o trabalho em metrologia para veículos a hidrogénio, garantindo medições precisas no reabastecimento ("refuelling") e na cadeia de fornecimento de hidrogénio, de modo a promover a adoção de veículos movidos a hidrogénio.

- H2FlowTrace (*Flow measurement traceability for hydrogen in gas networks*)

  Projeto dedicado à rastreabilidade metrológica das medições do caudal de hidrogénio nas redes de gás. O objetivo é assegurar medições de fluxo de hidrogénio com confiança metrológica, especialmente importante com a expansão do hidrogénio como vetor energético.

- MaritimeMET (*Metrology for green maritime shipping: Emission control through traceable measurements and machine learning approaches*)

  Este projeto apoia a descarbonização do transporte marítimo, desenvolvendo medições rastreáveis para controlar as emissões (por exemplo de gases de escape) em navios, e usa abordagens de *machine learning*.

- MetHyTrucks (*Metrology to support standardisation of hydrogen fuel sampling for heavy duty hydrogen transport*)

  Foca-se na amostragem normalizada de combustível de hidrogénio para transporte pesado ("heavy-duty"), para garantir medições de confiança e rastreáveis da composição do hidrogénio usado em veículos pesados.

- MetCCUS (*Metrology Support for Carbon Capture Utilisation and Storage*)

  Apoia a captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS), desenvolvendo materiais de referência, métodos analíticos e propriedades físicas para medir CO_2 de forma rastreável, o que é essencial para operações seguras de cadeias CCUS.

- BiometCAP (*Protocol for SI-traceable validation of methods for biomethane conformity assessment*)

  Este projeto define protocolos para validar métodos de avaliação de conformidade do biometano, com rastreabilidade ao SI (Sistema Internacional de Unidades), para garantir que o biometano usado na rede cumpre os padrões da qualidade.

- Met4H2 (*Metrology for the hydrogen supply chain*)

  Aborda a cadeia de fornecimento de hidrogénio ("supply chain"), garantindo que desde a produção até à distribuição e uso final, as medições estão bem definidas, rastreáveis e confiáveis.

3.6. Contribuição do IPQ

O IPQ participa ativamente no *European Metrology Network for Energy Gases* (EMN EG), contribuindo para o desenvolvimento de soluções metrológicas que apoiem a transição energética. A sua participação envolve a presença regular em reuniões de trabalho, onde são discutidas prioridades técnicas e estratégicas, bem como a organização de workshops e *webinares* que promovem a partilha de conhecimento entre especialistas e partes interessadas. O IPQ fornece ainda informação para a plataforma de serviços disponível no site do EMN EG, incluindo descrições de capacidades metrológicas e publicações relevantes.

No domínio da investigação, o IPQ integra dois projetos europeus: MetCCUS [13], dedicado ao apoio metrológico para tecnologias de captura, utilização e armazenamento de carbono, e MetNH3Energy [14], focado na metrologia associada ao uso emergente de amoníaco como vetor energético. Contribui também para a elaboração da Strategic Research Agenda (SRA) do EMN EG [15], ajudando a definir prioridades científicas para os próximos anos.

Além disso, o IPQ participa no *Task Group* 4 (TG4) – *General Communication & Impact*, colaborando na preparação de conteúdos e na Newsletter do EMN EG, reforçando a visibilidade e o impacto da rede.

4. EMN *Climate and Ocean Observation*

A Rede de Metrologia Europeia para a Observação do Clima e dos Oceanos (EMN COO) [16] desempenha um papel fundamental na aplicação da metrologia às observações climáticas e oceânicas. Esta rede reúne institutos nacionais de metrologia, institutos designados e parceiros afiliados para garantir que as medições sejam metrologicamente rastreáveis, precisas, interoperáveis e estáveis, apoiando assim a tomada de decisões informadas sobre as alterações climáticas e a gestão sustentável dos oceanos.

4.1. Importância e contextos de atuação

As observações das redes de sensores in situ, redes de monitorização e sensores de satélite, e a sua transformação em grandezas bio e geofísicas como as variáveis climáticas essenciais (ECVs) e as variáveis oceânicas essenciais (EOVs), constituem a base dos serviços de informação ambiental utilizados numa ampla gama de aplicações sociais e comerciais.

A compreensão das alterações climáticas, o apoio à utilização sustentável e proteção dos oceanos, e a prestação de serviços climáticos inovadores exigem observações fiáveis. O Sistema Global de Observação do Clima (GCOS) [17] definiu 55 Variáveis Climáticas Essenciais

(ECVs) que devem ser monitorizadas através de medições globais, complementadas pelo Sistema Global de Observação dos Oceanos (GOOS) [18] com as Variáveis Oceânicas Essenciais (EOVs).

A metrologia permite criar registos observacionais robustos e ajuda os utilizadores a avaliar a adequação destes registos para os seus propósitos específicos. Sem rastreabilidade metrológica adequada, existem riscos de inconsistências nos dados, incertezas nos modelos climáticos e decisões políticas baseadas em informação pouco fiável.

4.2. Desafios

Apesar dos avanços, persistem vários desafios técnicos, institucionais e práticos:

- Complexidade das medições ambientais: Medir variáveis climáticas e oceânicas com precisão envolve lidar com condições extremas (temperaturas, pressões, humidade), ambientes hostis (oceano profundo, polos) e escalas temporais longas, exigindo calibrações estáveis ao longo de décadas.
-Integração de diferentes plataformas de observação: As medições provêm de diversas fontes (satélites, boias, estações terrestres, navios) que utilizam diferentes tecnologias e métodos. Harmonizar estas medições e assegurar comparabilidade é um desafio técnico significativo.
- Rastreabilidade e incerteza: Estabelecer rastreabilidade ao Sistema Internacional de Unidades (SI) para todas as ECVs e EOVs, e quantificar adequadamente as incertezas de medição, é essencial mas tecnicamente exigente para muitas variáveis ambientais.
- Coordenação internacional: As observações climáticas e oceânicas são globais por natureza, exigindo coordenação entre países, instituições e comunidades científicas diversas. É necessário garantir que as medições feitas em diferentes regiões sejam comparáveis e mutuamente reconhecidas.
- Financiamento sustentável: Manter redes de observação de longo prazo, desenvolver novos métodos de medição e assegurar a continuidade das calibrações requer investimento significativo e compromisso político duradouro.

4.3. Impacto Potencial da EMN COO

A EMN COO contribui significativamente para:

- Melhorar modelos climáticos: Fornecendo dados de observação com rastreabilidade metrológica, a rede ajuda a reduzir incertezas nos modelos climáticos e aumentar a

fiabilidade das previsões climáticas futuras.

- Apoiar políticas climáticas: Medições fiáveis são essenciais para monitorizar o cumprimento de acordos internacionais (como o Acordo de Paris), verificar emissões de gases de efeito estufa e avaliar o progresso em direção à neutralidade carbónica.
- Proteger os oceanos: A monitorização precisa da temperatura oceânica, do pH (acidificação), níveis de oxigénio e outras variáveis é crucial para a gestão sustentável dos recursos marinhos e para compreender o papel dos oceanos no sistema climático.
- Apoiar serviços climáticos: Desde previsões meteorológicas até alertas de eventos extremos, a qualidade dos serviços depende fundamentalmente da qualidade das observações subjacentes.

O impacto é multifacetado, abrangendo aspetos técnicos, ambientais, económicos e sociais. Do ponto de vista técnico, a rede promove o desenvolvimento de métodos de medição avançados e materiais de referência certificados para variáveis climáticas e oceânicas. Ambientalmente, contribui para a monitorização da saúde planetária e deteção precoce de alterações críticas. Economicamente, apoia setores como agricultura, pesca, seguros e energia, que dependem de informação climática fiável. Socialmente, fortalece a capacidade da sociedade para responder às alterações climáticas através de decisões informadas.

4.4. Estrutura e Grupos de Trabalho

O projeto EMPIR "Support for a European Metrology Network for Climate and Ocean Observation" (18NET04, ForClimateOcean) [19] começou em 2019 a estabelecer um ponto focal para metrologistas e especialistas nos campos da observação climática e oceânica, apoiando a coordenação entre os institutos de metrologia europeus.

A rede EMN COO foi uma das primeiras Redes Europeias de Metrologia estabelecidas pela EURAMET e tem sido utilizada como modelo para as EMN subsequentes. A rede organiza as suas atividades através de grupos de trabalho que abordam diferentes aspetos:

- Agenda de Investigação Estratégica (*Strategic Research Agenda*): Desenvolvida em 2022, identifica as necessidades de investigação em metrologia para observações climáticas e oceânicas.
- Envolvimento das partes interessadas: A rede trabalha ativamente com comunidades de observação climática, agências espaciais (ESA), organizações meteorológicas (WMO), e o Bureau Internacional de Pesos e Medidas (BIPM).

- Comunicação e impacto: Divulgação de conhecimento, organização de seminários e promoção da metrologia nas comunidades de observação climática e oceanográfica.
- Identificação de oportunidades de financiamento: Para projetos de investigação colaborativa no âmbito do Programa Europeu de Metrologia.

4.5. Projetos Colaborativos de Investigação

A EURAMET e a rede EMN COO apoiam diversos projetos de investigação relacionados com observações climáticas e oceânicas, incluindo:

- MeteoMet e MeteoMet2: Metrologia para pressão, temperatura, humidade e velocidade do ar na atmosfera, e para variáveis climáticas essenciais.
- Projetos de monitorização de humidade do solo: Desenvolvimento de protocolos de medições de referência para a validação de dados de satélite e modelos climáticos.
- Medições de mercúrio atmosférico: Garantir rastreabilidade nas concentrações de mercúrio para proteger pessoas e ambiente.
- Monitorização polar: Desenvolvimento de capacidades metrológicas para observações em regiões polares, sensíveis às alterações climáticas.
- Medições de precipitação: Assegurar rastreabilidade para pluviómetros que não podem ser calibrados usando métodos estabelecidos.
- Bioaerossóis e poluição radioativa: Desenvolvimento de materiais de referência certificados para espectrometria de massa.

4.6. Contribuição Internacional

A rede EMN COO apoiou o BIPM e a WMO na preparação e realização de um seminário altamente participado, produtivo e orientado para a ação em 2022 sobre "*Metrology for Climate Action*" [20]. A rede contribuiu significativamente para a organização, facilitação e participação em eventos do seminário e para a elaboração do relatório de recomendações subsequente.

A Agenda de Investigação Estratégica da rede EMN COO forneceu contributos valiosos, e as conexões com as partes interessadas criadas pela rede trouxeram comunidades que anteriormente não interagiam com a comunidade metrológica. As recomendações do seminário, juntamente com a agenda estratégica da rede EMN, têm sido utilizadas para propor projetos de investigação colaborativa à Parceria Europeia de Metrologia.

A rede EMN-COO estabeleceu parcerias fortes com outras redes europeias de metrologia, nomeadamente Mathmet (Matemática e Estatística) e PolMo (Monitorização de Poluição), propondo projetos de investigação que reúnem estas comunidades.

4.7. Contribuição do IPQ

O IPQ participa ativamente na *European Metrology Network for Climate and Ocean Observation*, contribuindo para o desenvolvimento de soluções metrológicas que apoiem a observação climática e oceânica. A participação do IPQ envolve a presença em reuniões de trabalho, seminários, congressos e discussões estratégicas, contribuindo para a elaboração da *Strategic Research Agenda* e identificação de necessidades metrológicas.

O IPQ colabora na partilha de conhecimento e capacidades metrológicas através da plataforma de serviços da rede EMN-COO, e participa em atividades de comunicação e disseminação, reforçando a visibilidade e o impacto da rede a nível europeu e internacional. A participação em projetos de investigação colaborativa permite ao IPQ contribuir para o avanço da metrologia aplicada às observações climáticas e oceânicas, apoiando assim os esforços globais de combate às alterações climáticas.

O projeto20NRM06 SapHTies (Metrology for standardised seawater pH_T measurements in support of international and European climate strategies) da EURAMET (2021-2024) enquadrou-se nas prioridades estratégicas da rede EMN-COO nomeadamente através da sua Agenda de Investigação Estratégica, em que foram identificadas lacunas críticas na medição de parâmetros marinhos e ambientais. O projeto SapHTies teve como objetivo principal desenvolver métodos de medição rastreáveis ao SI e padronizados para o pHT da água do mar. Este parâmetro é fundamental para monitorizar a acidificação oceânica, um dos impactos mais críticos e indiretos das alterações climáticas nos ecossistemas marinhos. O projeto envolveu institutos nacionais de metrologia e organizações de investigação de vários países europeus, contribuindo para a revisão da norma ISO 18191:2015 sobre determinação do pH em água do mar e para melhorar a comparabilidade das medições realizadas em diferentes redes de monitorização oceânica a nível global [21, 22].

5. EMN *Clean Energy*

A Energia Limpa é essencial para permitir que a Europa atinja os objetivos a que se propôs com o documento estratégico *Green Deal* [23], e mais recentemente com o documento estratégico *Clean Industrial Deal* [24], de conseguir zero emissões de gases de efeito de estufa

no ano 2050, i.e., atingir a neutralidade carbónica nessa altura, e estabelecer um fornecimento de energia seguro e fiável para a Europa, e de, por outro lado, aumentar a competitividade da indústria europeia através dos melhores desempenhos trazidos pelas novas tecnologias. O foco principal desta rede EMN [25] é em tópicos centrados na geração, armazenamento, conversão e utilização de energia renovável.

5.1. Importância e contextos de atuação

Para conseguir atingir os objetivos da transição energética estabelecidos pela EU é imprescindível implementar uma infraestrutura de medição adequada e eficaz, e esta rede vai operar como uma interface entre a comunidade metrológica e os principais *stakeholders* no domínio da energia limpa.

Existindo outras duas redes na área da energia, relacionadas com Gases Energéticos e com as Redes Elétricas Inteligentes, com quem existe uma continuada colaboração efetiva, esta EMN vai atuar como um ponto fulcral e único para consultas externas em tópicos de energias limpas e influenciar o futuro cenário na investigação metrológica, incluindo investimentos, através do alinhamento de estratégias, parcerias e roteiros externos.

Para tal é crucial conseguir estabelecer um diálogo contínuo e efetivo com os principais *stakeholders* neste campo, de forma a obter informação sobre as suas necessidades metrológicas e dessa forma influenciar a agenda de investigação a nível europeu, e permitir uma rápida adoção dos resultados dessa investigação pela comunidade metrológica.

5.2. Desafios

A panóplia de tópicos e tecnologias abrangidos pela área das energias limpas é muitíssimo vasta, e inclui, o solar térmico e o solar fotovoltaico, a energia eólica, a geotermia, a hídrica, a biomassa, a eficiência energética, a energia em edifícios, as células de combustível, o armazenamento de energia por baterias e por outros processos, Power2X, e vários outros. Daí ter sido necessário fazer escolhas, e priorizar alguns destes tópicos para tornar a tarefa exequível, dentro das linhas mestras definidas acima. Esses tópicos escolhidos foram o solar fotovoltaico, a energia eólica e o armazenamento de energia por baterias.

Atendendo ao carácter multidisciplinar desta EMN existe cooperação com vários comités técnicos da EURAMET e com outras EMN, em particular aquelas relacionadas com a energia,

e já referidas, e a EMN Mathmet, relacionada com a matemática e estatística, e que inclui a validação de software e a utilização de ferramentas de IA.

5.3. Impacto Potencial da EMN Clean Energy

A EU lançou recentemente um novo documento estratégico *Clean Industrial Deal* [24], para estabelecer uma infraestrutura para a transição energética industrial e para a competitividade económica europeia, com o objetivo de posicionar a sua "indústria verde" como um fator de crescimento. Mais importante ainda, uma das prioridades desta estratégia está claramente identificada como a tecnologia limpa, que é a atividade central da EMN Clean Energy.

As tecnologias associadas à energia limpa como o fotovoltaico, energia eólica, armazenamento por baterias, e a produção de combustíveis alternativos, (também conhecido por Power2X) têm um papel crucial na melhoria da competitividade da indústria europeia e na promoção de práticas de indústria limpa, contribuindo para remover barreiras regulatórias excessivas (apenas medições robustas e fiáveis o podem conseguir) e reforçar a posição europeia como um interveniente importante na "fabricação verde". Este impacto [26] pode ser demonstrado de forma clara pela melhoria em fatores como custos, resiliência, sustentabilidade, conformidade, inovação e ambiente tal como indicado abaixo:

1. Redução de custos: as fontes de energia renováveis, como o solar e o fotovoltaico, têm vindo e registar uma redução de custos significativa nos últimos anos.
2. Independência energética e Resiliência: através da adoção de tecnologias de energias limpas, a indústria consegue reduzir a sua dependência de combustíveis sólidos importados, aumentando a segurança energética e a previsibilidade. Esta independência vai proteger a indústria de preços de energia voláteis e disrupções no fornecimento.
3. Sustentabilidade e Conformidade: a utilização de energias renováveis ajuda a indústria a cumprir metas ambientais e objetivos de sustentabilidade. Isto tem impacto não só nas questões ambientais como na imagem pública das organizações.
4. Inovação e criação de Emprego: o setor das energias limpas impulsiona a inovação e cria oportunidades de emprego. As indústrias que investem em tecnologias de energias renováveis vão beneficiar dos avanços em eficiência e produtividade, ao mesmo tempo que contribuem para o crescimento económico.
5. Impacto ambiental: as tecnologias de energias limpas reduzem de forma significativa as emissões de gases de efeito de estufa e outros poluentes, contribuindo para um meio ambiente mais limpo, o que está alinhado com os esforços globais para combater as alterações climáticas e promover um setor industrial mais sustentável e mais limpo.

A rede metrológica europeia para energias limpas contribui para estes pontos chave ao permitir um ponto de contacto centralizado para todas as questões metrológicas que dizem respeito ao setor das energias limpas, e onde o contacto com os *stakeholders* permite identificar

as suas necessidades para informar e formatar a investigação e outras atividades, e dessa forma permitir uma rápida adoção dos resultados da investigação pela comunidade metrológica.

5.4. Agenda Estratégica de Investigação para a Energia Limpa

A agenda estratégica de investigação desta rede para energias limpas, está focada nas vertentes do solar fotovoltaico, da energia eólica e das baterias para armazenamento energético, que foram as áreas definidas como prioritárias, visto não ser possível abarcar toda a diversidade de áreas existentes, e tem como principais catalisadores o facto da transição energética limpa ser essencial para a neutralidade climática, segurança económica e resiliência económica.

Os principais tópicos identificados nesta temática, incluem:

1. Necessidade de melhorar o conhecimento dos mecanismos de degradação e envelhecimento que afetam os materiais utilizados em painéis fotovoltaicos e baterias, para uma melhor previsibilidade do seu tempo de vida e otimização da manutenção.
2. Necessidade de validar metrologicamente a quantificação do impacto ambiental resultante da implantação das tecnologias de energias limpas.
3. Necessidade de novas capacidades de medição para caracterizar novos materiais utilizados na produção, armazenamento e conversão (Power to X) de energia limpa, bem como para otimizar processos de produção baseados em novos materiais e novas tecnologias.
4. Necessidade de dar suporte metrológico à indústria para que esta consiga cumprir os requisitos da regulamentação ambiental e atinja os objetivos de sustentabilidade (e.g., *Green Deal Industrial Plan*, *Clean Industrial Deal*, *Renewable Energy Directive*, e *REPowerEU*).
5. Necessidade de desenvolver normas harmonizadas e especificações comuns para as tecnologias das energias limpas e novos materiais para a produção, armazenamento e conversão de energia.

5.5. Projetos de investigação e Evolução Prevista para a Energia Limpa

As diversas *Calls* dos programas de investigação da EURAMET, como é o caso do EMPIR (2014-2020) e EPM (2021-2027), têm permitido avanços significativos nas tecnologias limpas através do estudo e desenvolvimento de novos métodos de medição [27], e nas próximas Call de 2026, designadamente no tópico IND (Indústria), e em 2027, designadamente no tópico *Green Deal*, esperam-se novos avanços e respostas para as seguintes necessidades,

a. Desenvolvimento e validação de ferramentas para aumentar o tempo de vida e otimizar a manutenção de instalações de energias limpas, por exemplo, através da avaliação do ciclo de vida e formas de caracterizar o desempenho em funcionamento (*in-operando*).

b. Desenvolvimento de capacidades metrológicas para medições rastreadas e validadas de emissões de poluentes emergentes da geração, uso e desmantelamento de instalações de energias limpas.
c. Desenvolvimento e validação de capacidades de medição para otimização e garantia da qualidade de dispositivos e materiais utilizados para energia limpa, incluindo painéis fotovoltaicos, turbinas eólicas e baterias. Adicionalmente, suportar a adoção de resultados de investigação e de soluções de baixa maturidade tecnológica (*Low Technology Readiness*) para facilitar a implantação de tecnologias de energia limpa da europa.
d. Desenvolvimento e validação de capacidades metrológicas para apoiar a inovação em materiais alternativos para tecnologias limpas, e assim promover a utilização de matéria prima disponível na europa.
e. Desenvolvimento e validação de metodologias rastreadas para apoiar a indústria e os reguladores na demonstração do cumprimento com requisitos técnicos e legais definidos em normas e regulamentos, permitindo maior competitividade industrial e maior harmonização na implementação de infraestrutura regulamentar na europa.
f. Investimento em investigação metrológica pré-normativa para apoiar o desenvolvimento de grupos de trabalho para normas de medição associadas a tecnologias de energia limpa para facilitar a entrada no mercado global e aumentar a competitividade da tecnologia europeia.

5.6. A Contribuição do IPQ

O Laboratório Nacional de Metrologia (LNM) do IPQ participou no projeto JNP (*Joint Network Project*) 20NET01 *Clean Energy*, para apoiar a criação de uma rede metrológica europeia para a energia limpa, que terminou em 2024, e quando esta rede foi estabelecida, o IPQ ficou a liderar a rede, sendo atualmente *Chair* do EMN *Clean Energy*. A contribuição do IPQ é assim decisiva para a sustentabilidade da mesma, através da elaboração de uma agenda estratégica [28] que define a Visão e a Missão da rede, e os principais objetivos, e participa ativamente na definição de uma agenda de investigação que estabelece os principais tópicos de investigação em termos de prioridades e desafios emergentes.

6. Conclusão

As European Metrology Networks constituem um pilar estratégico para o desenvolvimento sustentável, tecnológico e económico da Europa. Ao focarem-se em áreas cruciais como energia limpa, gases energéticos, fabricação avançada e monitorização climática e oceânica, estas redes garantem medições fiáveis, precisas e harmonizadas, fundamentais para a inovação, segurança e sustentabilidade.

O impacto das EMN transcende a metrologia, influenciando políticas públicas, competitividade industrial e proteção ambiental. A sua implementação fortalece a cooperação

internacional, promove a normalização das medições e apoia a transição para uma economia de baixo carbono, inovadora e resiliente.

Assim, as EMN não são apenas necessárias, mas constituem um elemento central para assegurar que a Europa continua a liderar em ciência, tecnologia e desenvolvimento sustentável no século XXI. O reforço destas redes, aliado à formação contínua de especialistas e ao desenvolvimento de novos padrões de medição, permitirá à Europa enfrentar desafios globais de forma mais eficaz, competitiva e sustentável.

Referências

[1] EURAMET. (2025-11-14). EURAMET's European Metrology Networks. European Metrology Networks

[2] EURAMET. (2025-11-14). European Metrology Programme for Innovation and Research (EMPIR). EMPIR

[3] EURAMET. (2025-11-14). The European Association of National Metrology Institutes. https://www.euramet.org/about-euramet

[4] EURAMET. (2025-11-05). European Metrology Network for Advanced Manufacturing - *What we do*. https://www.euramet.org/european-metrology-networks/advanced-manufacturing/what-we-do

[5] ManuFUTURE SRIA 2030, for a Competitive, Sustainable and Resilient European Manufacturing from ManuFUTURE High-Level Group, December 2019. ManuFUTURE_SRIA_2030.pdf

[6] European Commission. (2025-11-05). Directorate-General for Research and Innovation, Re-finding industry – Defining innovation, Publications Office, 2018.

https://data.europa.eu/doi/10.2777/927953

[7] United Nations. (2025-11-05). Department of Economic and Social Affairs Sustainable Development Goals. https://sdgs.un.org/goals

[8] EURAMET. (2025-11-05). Strategic Research Agenda of the EMN for Advanced Manufacturing. https://www.euramet.org/european-metrology-networks/advanced-manufacturing/strategy/strategic-research-agenda

[9] European Union. (2025-11-05). Clean Industrial Deal - A plan for EU competitiveness and decarbonization. Clean Industrial Deal - European Commission

[10] EURAMET. (2025-11-14). European Metrology Network for Energy Gases. Energy Gases

[11] European Metrology Network for Energy Gases. (2025-11-17). Latest developments within EMN Energy Gases – June 2024 Update. Latest developments within EMN Energy Gases – June 2024 Update

[12] European Metrology Network for Energy Gases. (2025-11-17). Collaborative Research Projects. Projects

[13] METCCUS. (2025-11-17). About the project. MetCCUS

[14] MetNH3Energy. (2025-11-17). Metrology to Support Ammonia Use in Emerging Applications. INTRODUCTION - MetNH3Energy

[15] European Metrology Network for Energy Gases. (2025-11-17). Strategic Research Agenda. Strategic Research Agenda

[16] EURAMET EMN COO. (2025-11-21). European Metrology Network for Climate and Ocean Observation. https://www.euramet.org/climate-and-ocean-observation

[17] GCOS. (2025-11-21). Essential Climate Variables. Global Climate Observing System. https://gcos.wmo.int/en/essential-climate-variables

[18] GOOS. (2025-11-21). Essential Ocean Variables. Global Ocean Observing System. https://www.goosocean.org/index.php?option=com_content&view=article&id=14&Itemid=114

[19] EURAMET. (2025-11-21). Support for a European Metrology Network for climate and ocean observation (18NET04 ForClimateOcean). EMPIR Project. https://www.euramet.org/research-innovation/search-research-projects/

[20] BIPM & WMO. (2025-11-21). Workshop: Metrology for Climate Action. Bureau International des Poids et Mesures & World Meteorological Organization. https://www.bipm.org/en/conference-centre/metrology-for-climate-action

[21] EURAMET. (2025-11-21). SapHTies - Standard approaches for pH Total in seawater (20NRM06). European Association of National Metrology Institutes. https://www.euramet.org/research-innovation/search-research-projects/details/project/standard-approaches-for-ph-total-in-seawater

[22] International Organization for Standardization. (2015). Water quality — Determination of pH in sea water (ISO 18191:2015).

[23] European Commission. (2025-11-26). The European Green Deal. The European Green Deal - European Commission

[24] European Commission. (2025-11-26). Clean Industrial Deal. A plan for EU competitiveness and decarbonization. Clean Industrial Deal - European Commission

[25] EURAMET. (2025-11-26). European Metrology Network for Clean Energy. Clean Energy

[26] EURAMET. (2025-11-26). EURAMET 2030 Strategy. Strategy 2030

[27] European Metrology Network for Clean Energy. (2025-11-26). Collaborative Research Projects. Projects

[28] European Metrology Network for Clean Energy. (2025-11-26). Strategic Agenda of EMN Clean Energy. Strategic Agenda

Authors Profiles

Fernanda Saraiva is M.Sc. in Physics Engineering from the Faculty of Sciences and Technology - Nova University of Lisbon – Portugal since 2019. She is the head of the Metrology Length Laboratory, at the Portuguese Institute for Quality (IPQ), in Almada, Portugal. The main research interest is measuring techniques, quality assessment, metrological compatibility, and calibration of metrological standards of length.

Florbela A. Dias completed her PhD in Chemistry at Faculty of Sciences and Technology of the New University of Lisbon. Since 2002, Florbela Dias has been working full-time at the Portuguese Institute for Quality as the Head of the Reference Gas Laboratory. Additionally, since 2002, she has served as the Contact Person at EURAMET Gas Working Group and the Consultative Committee for Amount of Substance - BIPM. Since 2012, she has held the position of GLP Inspector in the scope of GLP principles of OECD.

Raquel Quendera is a chemist engineer with more than 10 years of experience in pH metrology and the Head of Electrochemistry Laboratory, representative of CCQM Electrochemistry WG and Chair of BIPM/CCQM/EAWG TG on seawater pH. Main research areas are metrology in chemistry, mainly in primary and secondary pH, preparation and certification of TRIS CRMs for measurement of pH in seawater for ocean acidification monitoring.

João Alves e Sousa, is a Principal Researcher and Director of the National Metrology Laboratory of IPQ – Instituto Português da Qualidade. He has a PhD on Mechanical Engineering related to Energy Conservation in High Temperature Systems, and he is presently the Chair of the European Metrology Network for Clean Energy. He has more than 100 publications on peer review journals and international conferences, and is currently the Chair of the IMEKO Technical Committee TC7 – Measurement Science.