ConBRepro
XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
EVENTO ON-LINE
02 a 04 de dezembro de 2026
Inovação e Transformação Digital como Estratégia Competitiva nas Engenharias

Gestão e Infraestrutura da Qualidade, ISO/IEC 17025 e Metrologia: Fundamentos para Laboratórios de Calibração de Vazão de Combustíveis

Sussumu Yukawa
Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção e Sistemas (PPGEPS - Multicampi) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

Sergio E. Gouvea da Costa
Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção e Sistemas (PPGEPS - Multicampi) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

Edson Pinheiro de Lima
Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção e Sistemas (PPGEPS - Multicampi) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

Resumo: A implementação de laboratórios de calibração de turbinas medidoras de volume para o setor de combustíveis exige a articulação entre exigências normativas de gestão da qualidade, rigor técnico-metrológico e requisitos legais específicos da medição fiscal de hidrocarbonetos. Este artigo tem como objetivo consolidar o referencial teórico que sustenta a proposição de uma metodologia integrada para essa implementação, estruturado em três eixos de investigação: gestão da qualidade em laboratórios sob a ótica da ABNT NBR ISO/IEC 17025:2017; fundamentos de metrologia e vazão aplicados a turbinas medidoras e ao método do Medidor Mestre; e infraestrutura da qualidade e requisitos metrológicos legais, incluindo a Portaria Conjunta ANP/Inmetro nº 001/2013 e o Guia para Expressão da Incerteza de Medição (GUM). O referencial foi construído a partir de um portfólio de 28 fontes internacionais selecionado pelo método ProKnow-C, organizado tematicamente em eixos complementares. Os resultados evidenciam que a competência laboratorial moderna depende da integração entre o pensamento baseado em risco preconizado pela norma, a modelagem matemática da incerteza de medição e a governança de uma Infraestrutura da Qualidade articulada globalmente por acordos de reconhecimento mútuo. Conclui-se que a exatidão metrológica no setor de combustíveis não é um atributo isolado do instrumento, mas o resultado sistêmico da convergência entre gestão normativa, rigor físico-matemático e arcabouço legal, fundamento teórico indispensável para a proposição de metodologias de implementação laboratorial tecnicamente robustas e normativamente aderentes.

Palavras-chave: Metrologia Industrial; ISO/IEC 17025; Infraestrutura da Qualidade; Incerteza de Medição.

Quality Management and Infrastructure, ISO/IEC 17025 and Metrology: Foundations for Flow Calibration Laboratories in the Fuel Sector

Abstract: Implementing calibration laboratories for turbine volume flow meters in the fuel sector requires articulating quality-management standards, metrological rigor, and the specific legal requirements of hydrocarbon fiscal measurement. This article consolidates the theoretical framework underlying an integrated methodology for such implementation, structured around three research axes: quality management in laboratories under ISO/IEC 17025:2017; metrology and flow fundamentals applied to turbine meters and the Master Meter method; and quality infrastructure and legal metrological requirements, including Joint Ordinance ANP/Inmetro No. 001/2013 and the Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM). The framework was built from a portfolio of 28 international sources selected through the ProKnow-C method and thematically organized into complementary axes. Results show that modern laboratory competence depends on integrating the risk-based thinking required by the standard, the mathematical modeling of measurement uncertainty, and the governance of a Quality Infrastructure articulated globally through mutual recognition arrangements. It is concluded that metrological accuracy in the fuel sector is not an isolated attribute of the instrument, but the systemic outcome of convergence between normative management, physical-mathematical rigor, and the legal framework — an indispensable theoretical foundation for proposing technically robust and normatively compliant laboratory implementation methodologies.

Keywords: Industrial Metrology; ISO/IEC 17025; Quality Infrastructure; Measurement Uncertainty.

1 Introdução

A exatidão das medições de vazão de hidrocarbonetos líquidos é um requisito estratégico para o setor de combustíveis, sustentando desde a transferência de custódia entre empresas até o cálculo de royalties e a arrecadação fiscal do Estado brasileiro. Nesse contexto, a competência técnica dos laboratórios de ensaio e calibração deixou de ser um diferencial competitivo isolado para se consolidar como um dos pilares da Infraestrutura da Qualidade (IQ), sistema que reúne metrologia, acreditação, normalização e legislação e que sustenta o desenvolvimento econômico e a competitividade industrial das nações (TRAJKOVIĆ et al., 2025).

No centro dessa infraestrutura está a norma ABNT NBR ISO/IEC 17025, referência internacional de competência para laboratórios de ensaio e calibração, cuja versão de 2017 promoveu uma mudança de paradigma ao migrar de uma estrutura prescritiva para uma abordagem baseada em processos e no pensamento baseado em risco (TRAJKOVIĆ et al., 2025; SILVA et al., 2021). Paralelamente, no setor de combustíveis brasileiro, a Portaria Conjunta ANP/Inmetro nº 001/2013 impõe exigências técnicas específicas — calibrações em condições operacionais próximas às reais, com incertezas máximas de ±0,3% para a medição fiscal — que tornam a implementação de um laboratório de calibração de turbinas medidoras de volume um problema simultaneamente normativo, gerencial e físico-matemático (BARATEIRO; EMERIK, 2020).

Esse cenário evidencia um problema de pesquisa relevante: a implementação de um laboratório capaz de atender, ao mesmo tempo, aos requisitos de gestão da ISO/IEC 17025:2017, ao rigor técnico da metrologia de vazão sob condições severas de viscosidade e vazão, e às exigências legais da metrologia legal brasileira, exige um referencial teórico multiaxial, que articule domínios de conhecimento tradicionalmente tratados de forma isolada na literatura — de um lado, estudos de gestão da qualidade e acreditação; de outro, estudos de engenharia metrológica aplicada à instrumentação de vazão.

O objetivo deste artigo é consolidar o referencial teórico que fundamenta a proposição de uma metodologia integrada para a implementação de laboratórios de ensaios e calibração de turbinas medidoras de volume no setor de combustíveis, estruturando a literatura selecionada em três eixos de investigação complementares: (i) gestão da qualidade em laboratórios sob a ótica da ISO/IEC 17025:2017; (ii) fundamentos de metrologia e vazão,

com foco em turbinas medidoras e no método do Medidor Mestre; e (iii) infraestrutura da qualidade e requisitos metrológicos legais aplicáveis ao setor de combustíveis brasileiro.

Metodologicamente, o referencial foi construído a partir de um portfólio bibliográfico de 28 fontes internacionais, selecionado por meio do método ProKnow-C e organizado tematicamente segundo os três eixos citados — procedimento detalhado na Seção 2. Este artigo está dividido em sete seções, além desta introdução. A Seção 2 apresenta os procedimentos metodológicos de estruturação do referencial. As Seções 3, 4 e 5 desenvolvem, respectivamente, os três eixos teóricos mencionados. A Seção 6 discute a convergência entre os eixos e sua relevância para a metodologia proposta, e a Seção 7 apresenta as conclusões do estudo.

2 Metodologia

Quanto à natureza, esta pesquisa caracteriza-se como aplicada, pois seu propósito é fundamentar teoricamente o desenvolvimento de uma solução prática para a medição fiscal de hidrocarbonetos. A abordagem combina elementos qualitativos e quantitativos: a dimensão qualitativa orienta a interpretação dos requisitos normativos da ISO/IEC 17025:2017 e a estruturação de processos de gestão, enquanto a dimensão quantitativa fornece o rigor matemático necessário à modelagem da incerteza de medição e à validação de métodos de calibração. Esse referencial insere-se no âmbito de uma pesquisa mais ampla conduzida sob a estratégia de Design Science Research (DSR), na qual a construção teórica constitui a etapa de fundamentação que precede a proposição do artefato metodológico (PEFFERS et al., 2007 apud WEIDLICH et al., 2024).

A estruturação do referencial teórico seguiu uma lógica de organização em eixos de investigação, escolhidos por cobrirem integralmente o ciclo de vida da implementação de um laboratório de turbinas, integrando os requisitos legais à física da medição:

a) Eixo 1 – Gestão da Qualidade: alinhado aos requisitos da ISO/IEC 17025:2017, com foco no pensamento baseado em risco e na preservação da imparcialidade, fundamentado nos estudos de Silva et al. (2021) e Gusarova et al. (2020), que analisam a transição normativa e a gestão de ameaças à integridade dos ensaios;

b) Eixo 2 – Metrologia e Vazão: constitui a base técnica para o método do Medidor Mestre, sustentado pela literatura de Chun et al. (2017) e Kim e Cheong (2026), que validam a aplicação do GUM e o uso de modelagens matemáticas para corrigir os efeitos de viscosidade e densidade na calibração de turbinas;

c) Eixo 3 – Infraestrutura da Qualidade e Requisitos Legais: essencial para garantir a validade do modelo no mercado brasileiro, ancorado no trabalho de Barateiro e Emerik (2020), que definem as condições operacionais críticas para a medição fiscal de combustíveis, e em Trajković et al. (2025) e Velychko et al. (2024), que discutem a arquitetura global da infraestrutura da qualidade.

As fontes que sustentam os três eixos derivam de um portfólio bibliográfico único de 28 estudos, selecionado por meio do método ProKnow-C (Knowledge Development Process – Constructivist), com buscas realizadas nas bases Scopus, Web of Science e IEEE Xplore, delimitadas ao período de 2017 a 2026 — ano de publicação da versão vigente da ISO/IEC 17025. Os critérios de inclusão priorizaram estudos sobre implementação e impacto da conformidade normativa, metrologia de vazão, rastreabilidade, avaliação de incerteza e gestão digital de dados laboratoriais; foram excluídas publicações restritas a contextos clínico, farmacêutico ou ambiental sem relação direta com a metrologia industrial. O detalhamento do processo de busca, filtragem e triagem bibliométrica — incluindo as expressões de busca, os filtros aplicados por base de dados e a caracterização quantitativa do portfólio — é apresentado em artigo complementar dedicado à revisão sistemática da

literatura, de modo a preservar o escopo deste artigo, centrado na síntese teórica dos três eixos.

Após a estabilização do portfólio, os 28 estudos foram lidos integralmente e classificados segundo sua aderência a cada eixo temático, havendo fontes que contribuem simultaneamente para mais de um eixo, em função da natureza interdisciplinar da competência laboratorial. A síntese teórica resultante, apresentada nas seções seguintes, não reproduz uma classificação normativa preexistente, mas resulta da triangulação analítica dos achados do portfólio, articulados pelo pesquisador em uma estrutura conceitual coerente com os objetivos da pesquisa.

3 Gestão da Qualidade em Laboratórios (ISO/IEC 17025:2017)

A gestão de alto desempenho em laboratórios constitui um dos pilares operacionais da Infraestrutura da Qualidade, elemento essencial para o desenvolvimento econômico e a competitividade industrial (TRAJKOVIĆ et al., 2025). A norma ISO/IEC 17025 consolidou-se como o padrão global de competência técnica: sua adoção garante que resultados de ensaio e calibração sejam aceitos internacionalmente por meio de acordos de reconhecimento mútuo, eliminando barreiras técnicas ao comércio (TRAJKOVIĆ et al., 2025).

A transição para a versão 2017 representou uma mudança de paradigma sob a ótica da Engenharia de Produção: a migração de uma estrutura prescritiva para uma abordagem baseada em processos e no pensamento baseado em risco (TRAJKOVIĆ et al., 2025; SILVA et al., 2021). O laboratório deixa de ser tratado como uma unidade funcional isolada e passa a ser gerido como um fluxo de valor no qual o gerenciamento de riscos integra o próprio Sistema de Gestão da Qualidade (SGQ) (SILVA et al., 2021). Estudos de Grochau et al. (2017, 2020) evidenciam, ainda, que a acreditação laboratorial correlaciona-se positivamente com o Produto Interno Bruto (PIB) das nações.

Para Macii (2024), a metrologia industrial transcende o ambiente puramente técnico e integra-se estrategicamente ao negócio. A integração sistêmica entre a ISO/IEC 17025:2017, a ISO 9001:2015 e a ISO 10012:2003 estabelece um arcabouço de gestão metrológica que sustenta a competitividade industrial, provendo os fundamentos para que a organização garanta os recursos necessários à validade dos resultados em todos os processos de apoio, operação e avaliação de desempenho (MACII, 2024).

A estruturação de um sistema de gestão voltado à competência técnica e à confiabilidade dos resultados requer a adoção de frameworks que promovam a melhoria contínua e a mitigação de riscos, entre os quais se destaca o ciclo PDCA (Plan-Do-Check-Act), que orienta o laboratório a alinhar suas operações aos requisitos normativos, assegurando que suas atividades não constituam processos isolados, mas partes de um ambiente de gestão integrado.

Conforme recomendado por Gusarova et al. (2020), a transição normativa deve ser fundamentada nesse mesmo ciclo, permitindo que a gestão da qualidade ocorra de forma lógica e planejada, integrando a identificação de riscos às atividades diárias de ensaio e calibração. Sob a perspectiva do modelo S-O-R (Stimulus-Organism-Response), estímulos estratégicos — como a digitalização e a busca pela acreditação — influenciam a percepção de valor sobre a Qualidade de Serviço Sustentável, gerando respostas superiores em satisfação e fidelização de clientes (DARWISH et al., 2024). Essa modernização gerencial é viabilizada pela transformação digital: sistemas de gerenciamento de informações laboratoriais (LIMS) simplificam a acreditação ao atuarem como repositórios centralizados de evidências de conformidade técnica e integridade de dados, permitindo o monitoramento em tempo real de pessoal, equipamentos e condições ambientais (DYUMAEVA; MOSHKOVA, 2019). No estado da arte, os Gêmeos Digitais oferecem uma visão end-to-

end das operações, permitindo prever gargalos operacionais e otimizar a alocação de recursos (WEIDLICH et al., 2024).

A implementação de um SGQ conforme a ISO/IEC 17025:2017 exige, ainda, um diagnóstico organizacional prévio fundamentado na teoria da Gap Analysis (Análise de Lacunas), método utilizado para medir o diferencial entre o estado operacional atual do laboratório e os requisitos exigidos (KLAUENBERG et al., 2023). A autoavaliação permite identificar o "nível de prontidão" (readiness level) da organização, transformando requisitos normativos complexos em metas mensuráveis, funcionando como transição de uma conformidade reativa para uma postura proativa (OHN, 2024). Operacionalmente, a metodologia baseia-se em listas de verificação estruturadas, categorizando falhas em dimensões de recursos, estrutura e processos, integradas ao pensamento baseado em risco por meio de ferramentas como a Matriz de Probabilidade e Consequência (SILVA et al., 2021; MYTYCH; LIGARSKI, 2018). Para falhas críticas, recomenda-se a técnica dos Cinco Porquês associada ao Diagrama de Ishikawa (SILVA et al., 2021), complementadas pelo witnessing (testemunho técnico), já que a competência de um analista não pode ser garantida apenas por registros de treinamento (GUSAROVA et al., 2020).

O impacto econômico dessa governança é mensurável: Macii (2024) demonstra que a metrologia industrial gera Taxas de Retorno Interno entre 20% e 44%, ao passo que organizações com padrões metrológicos rigorosos apresentam o dobro de probabilidade de exportar bens, com incremento de faturamento anual de até 5,3%. Em perspectiva macro, observa-se correlação estatisticamente significativa entre a densidade de laboratórios acreditados e o crescimento do PIB nacional (GROCHAU et al., 2017; 2020; TRAJKOVIĆ et al., 2025), enquanto Okezue et al. (2020), por meio de análise de variância (ANOVA), comprovam a redução na severidade de não conformidades após a acreditação. Em síntese, o desempenho elevado depende de uma Cultura de Confiança e do comprometimento da alta gestão com os princípios da Gestão da Qualidade Total (TQM) (MYTYCH; LIGARSKI, 2018; BIEŃKOWSKA et al., 2017).

Por fim, a competência metrológica exige controle estrito sobre pessoal, instalações e equipamentos, tratados como componentes críticos que influenciam diretamente a incerteza de medição (VOIT et al., 2023). A gestão de ativos deve transcender a simples manutenção de registros, exigindo controle proativo sobre o ciclo de vida dos equipamentos: Macii (2024) propõe a otimização de intervalos de calibração por meio da distribuição de Weibull, prevendo o "tempo para fora da conformidade" e equilibrando custos de manutenção com os riscos financeiros de medições imprecisas, com base nas diretrizes ILAC-G24/OIML D10.

4 Fundamentos de Metrologia e Vazão

A metrologia de vazão industrial, particularmente no setor de hidrocarbonetos, exige compreensão exaustiva das interações entre a geometria do sensor, a dinâmica do fluido e os métodos estatísticos de validação de resultados (BARATEIRO; EMERIK, 2020; KIM; CHEONG, 2026; PRAKOSA et al., 2025). A capacidade de rastreamento metrológica aos padrões internacionais é o eixo central que assegura a exatidão das medições, requisito vital para a transparência nas transferências de custódia e para a competitividade das organizações em mercado globalizado (BARATEIRO; EMERIK, 2020; PRAKOSA et al., 2025).

4.1 Turbinas Medidoras de Volume: Desempenho Dinâmico e Modelagem de Viscosidade

As turbinas medidoras de volume operam pela conversão da energia cinética do fluido em movimento rotativo, no qual a velocidade angular do rotor é, idealmente, proporcional à vazão volumétrica (KIM; CHEONG, 2026). A performance real do sensor, contudo, é

determinada pelo balanço dinâmico de torques: o rotor é impulsionado pelo torque motor gerado pela diferença de pressão entre as faces das palhetas, devendo superar os torques resistentes do atrito mecânico dos mancais e das forças de arrasto viscoso. O desempenho é, portanto, criticamente dependente de parâmetros geométricos como a folga radial (tip clearance), o ângulo de inclinação das palhetas e a massa do rotor — parâmetros cuja otimização, via simulação de Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) e modelos de Interação Fluido-Estrutura (FSI), estende a linearidade do sensor em regimes de baixa pressão e vazão (KIM; CHEONG, 2026).

O sinal metrológico é gerado pela interação entre ímãs fixados nas palhetas e um sensor de efeito Hall, convertendo a rotação em pulsos digitais, cuja relação com o volume deslocado é expressa pelo Fator K (pulsos/litro). O principal desafio técnico reside na dependência desse fator em relação à viscosidade cinemática do fluido: Prakosa et al. (2025) demonstram que o comportamento da turbina deve ser analisado por meio da Curva Universal de Viscosidade (UVC), que mapeia o Fator K em função da razão entre frequência e viscosidade, revelando três regimes distintos — laminar (resposta linear, mas sensível à temperatura), de transição (não linearidades críticas, nas quais ajustes polinomiais tradicionais falham) e turbulento (estabilização do Fator K). Para superar as limitações de predição no regime de transição, os autores propõem modelos de Spline Cúbica (Not-A-Knot) aplicados ao logaritmo natural da razão frequência-viscosidade, reduzindo a incerteza preditiva e o erro residual em comparação a regressões clássicas.

4.2 O Método do Medidor Mestre e a Tecnologia de Medição Mássica

O Método do Medidor Mestre (Master Meter) fundamenta-se na comparação direta entre um medidor padrão de referência (REF) e um medidor sob teste (DUT), instalados em série na mesma linha de escoamento. Segundo Chun et al. (2017), essa configuração é amplamente adotada em laboratórios acreditados por sua eficiência operacional e simplicidade em relação ao método gravimétrico, sendo capaz de atingir incertezas tão baixas quanto 0,20%, com validade sustentada na equação da continuidade, desde que as condições de densidade do fluido sejam monitoradas e mantidas estáveis.



Figura 1 – Método Master Meter: eficiência e precisão na calibração de vazão

Fonte: elaborado pelos autores (2026), baseado em Chun et al. (2017) e Barateiro e Emerik (2020)

O rigor técnico do método depende do controle de fatores críticos como a estabilidade de longo prazo e a correlação cruzada entre os medidores, o que torna a escolha de um medidor de referência robusto imperativa. Nesse sentido, os medidores mássicos consolidaram-se como estado da arte para padrões de referência: conforme discutido por

Barateiro e Emerik (2020), essa tecnologia realiza medições diretas de massa, densidade e volume simultaneamente, apresentando sensibilidade desprezível a variações de viscosidade, com robustez amplificada por algoritmos de compensação dinâmica de pressão e temperatura com sensores RTD, permitindo incertezas de até ±0,05%. A manutenção da rastreabilidade desses ativos exige monitoramento sistemático do desvio metrológico (drift), preferencialmente apoiado por softwares de automação estatística (VELYCHKO et al., 2024). Complementarmente, em sistemas de medição de hidrocarbonetos, a análise de Sedimentos Básicos e Água (BSW) é realizada de forma on-line e simultânea à medição de vazão, garantindo a integridade do cálculo do volume líquido exigido pela Portaria 001/2013 (BARATEIRO; EMERIK, 2020).

5 Infraestrutura da Qualidade e Requisitos Metrológicos Legais

A exatidão das medições no setor de combustíveis não é um requisito isolado, mas o produto de uma robusta Infraestrutura da Qualidade (IQ). Segundo Trajković et al. (2025), a IQ é definida como o ecossistema de organizações públicas e privadas e o arcabouço legal que engloba quatro pilares essenciais — metrologia, acreditação, normalização e legislação —, atuando como uma “rede global invisível” que melhora a conformidade de produtos e serviços e elimina barreiras técnicas ao comércio internacional. No âmbito da Engenharia de Produção, a IQ assegura que o processamento confiável de dados de sensores seja o cerne das operações industriais modernas (MACII, 2024; TRAJKOVIĆ et al., 2025).

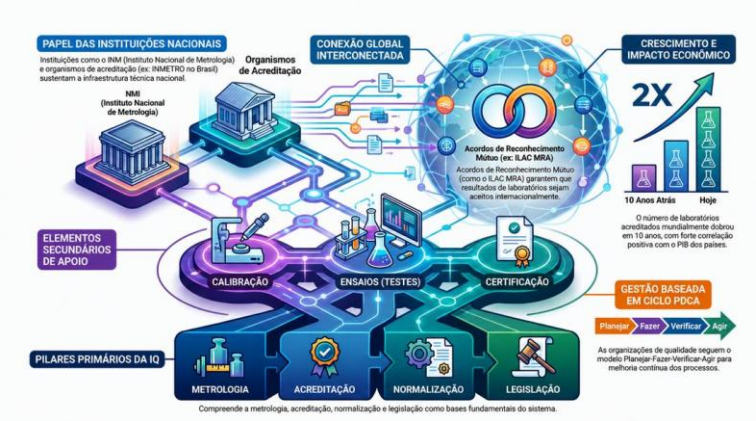

Figura 2 – Infraestrutura da Qualidade: o alicerce da conformidade global

Fonte: elaborado pelos autores (2026), baseado em Macii (2024) e Trajković et al. (2025)

Essa estrutura organiza-se por meio de um fluxo de melhoria contínua orientado pelo ciclo PDCA, no qual metrologia e acreditação atuam como bases para as atividades de calibração e ensaios, fortalecido pela atuação de instituições nacionais — como o Inmetro no Brasil — e por sua conexão com a esfera global via Acordos de Reconhecimento Mútuo (ILAC MRA), que permitem que resultados gerados localmente sejam aceitos internacionalmente, dispensando a repetição de testes entre fronteiras. O número de laboratórios acreditados dobrou na última década, refletindo o impacto direto da metrologia na competitividade e no PIB das nações.

5.1 Evolução Histórica e Governança Global

A maturidade do sistema metrológico atual resulta de uma trajetória de harmonização global. O pilar da metrologia científica moderna remonta a 1875, com a Convenção do Metro e a criação do BIPM, que estabeleceu as bases do Sistema Internacional de Unidades (KLAUENBERG et al., 2023; VELYCHKO et al., 2024). O conceito formal de acreditação de laboratórios originou-se em 1947, intensificando-se na década de 1990 em razão do surto no comércio global (ZHAI et al., 2019), até o alinhamento definitivo em 1999, com a adoção da ISO/IEC 17025, que unificou os requisitos para laboratórios de ensaio e calibração em

todo o mundo (ZHAI et al., 2019; TRAJKOVIĆ et al., 2025). No cenário brasileiro, a integração do setor de energia a essa infraestrutura consolidou-se em 2000, com a assinatura do acordo ILAC MRA (GROCHAU et al., 2020), permitindo que os resultados de laboratórios acreditados — como os da Rede Brasileira de Calibração (RBC), sob supervisão do Inmetro — sejam aceitos globalmente sob o princípio de que um item "testado uma vez é aceito em qualquer lugar" (ZHAI et al., 2019; BARATEIRO; EMERIK, 2020). Simultaneamente, foi instituída no Brasil a Portaria Conjunta ANP/Inmetro nº 001, marco regulatório das exigências metrológicas para a medição de petróleo e gás natural (BARATEIRO; EMERIK, 2020).

5.2 A Portaria Conjunta ANP/Inmetro nº 001/2013 e a Governança Dual

É imperativo distinguir as duas esferas normativas que regem um laboratório de calibração de medidores de vazão para o setor de óleo e gás. A ISO/IEC 17025:2017 define como o laboratório deve ser gerido, estabelecendo requisitos gerais de competência, imparcialidade e operação consistente, com foco no pensamento baseado em risco (MACII, 2024; TRAJKOVIĆ et al., 2025; SILVA et al., 2021). Já a Portaria Conjunta ANP/Inmetro nº 001/2013 atua como o braço da Metrologia Legal no Brasil, definindo o que deve ser medido e sob quais condições, com o objetivo de assegurar a integridade fiscal e o cálculo exato de royalties sobre a produção de hidrocarbonetos (BARATEIRO; EMERIK, 2020).

A Portaria exige que a calibração ocorra em condições operacionais o mais próximas possível das condições de campo: os desvios máximos permitidos entre parâmetros de calibração e de operação são de ±20% para viscosidade e densidade, ±5ºC para temperatura e ±10% para pressão e vazão. A regulamentação estabelece, ainda, alvos de incerteza críticos — limite de ±0,3% para a medição fiscal e de ±1,0% para a transferência de custódia —, além de exigir que as calibrações sejam reportadas em unidades volumétricas, o que demanda que medidores Coriolis sejam configurados com algoritmos de densidade em tempo real (BARATEIRO; EMERIK, 2020).

5.3 Incerteza de Medição e a Aplicação do GUM

A incerteza de medição é o parâmetro que caracteriza a dispersão dos valores atribuíveis ao mensurando, sendo o indicador definitivo do grau de confiança dos dados (DÉSENFANT; PRIEL, 2017; VOIT et al., 2023). Conforme o JCGM 100:2008 (GUM), o conhecimento sobre qualquer grandeza é intrinsecamente incompleto, exigindo a distinção entre fontes de Tipo A, avaliadas por análise estatística, e Tipo B, fundamentadas em julgamento científico e certificados de calibração (DÉSENFANT; PRIEL, 2017; VOIT et al., 2023). No caso do Método do Medidor Mestre, o modelo matemático deve considerar que o padrão (REF) e o medidor sob teste (DUT) não são independentes, exigindo a inclusão de um termo de correlação cruzada para evitar a subestimação da incerteza final (CHUN et al., 2017). A determinação do fator de abrangência exige o cálculo dos graus de liberdade efetivos pela fórmula de Welch-Satterthwaite, para um nível de confiança de aproximadamente 95% (DÉSENFANT; PRIEL, 2017); para modelos não lineares recomenda-se a Simulação de Monte Carlo (GUM Suplemento 1), capaz de propagar distribuições completas e lidar com funções de densidade de probabilidade assimétricas (DÉSENFANT; PRIEL, 2017; ZHUSSUPBEKOV et al., 2019).

5.4 Rastreabilidade e Garantia Metrológica Estratégica

A Garantia Metrológica Estratégica constitui o pilar de sustentação da confiabilidade científica e da competitividade industrial, permitindo relacionar um resultado de medição a padrões nacionais ou internacionais do SI por meio de uma cadeia ininterrupta e documentada de calibrações (VELYCHKO et al., 2024). Esse reconhecimento mútuo em escala global é sustentado por dois acordos: o CIPM MRA, que estabelece a equivalência de padrões entre os Institutos Nacionais de Metrologia, e o ILAC MRA, que permite que os

resultados de laboratórios acreditados sejam aceitos em mais de cem economias (VELYCHKO et al., 2024; ZHAI et al., 2019).

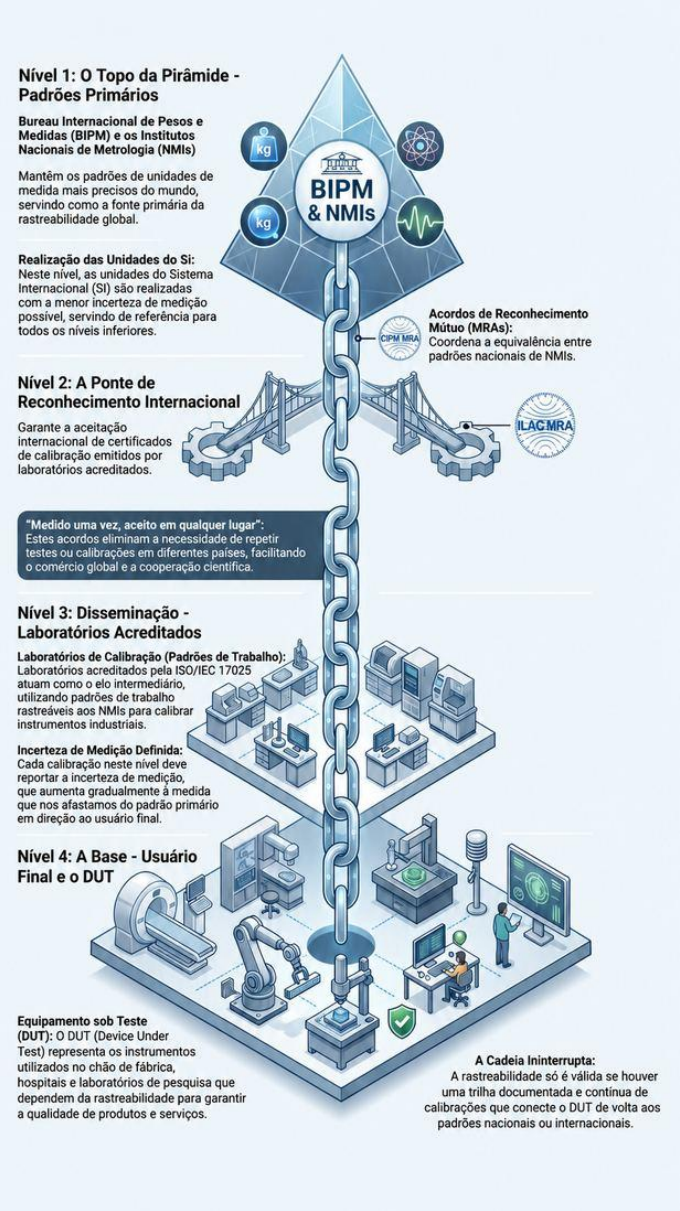

Figura 3 – A cadeia de rastreabilidade metrológica global: do padrão internacional ao usuário
Fonte: elaborado pelos autores (2026), baseado em Velychko, Gordiyenko e Kursin (2024)

A manutenção técnica desse elo exige gestão proativa do ciclo de vida dos padrões, com foco no monitoramento do desvio metrológico: a diretriz ILAC-G24/OIML D10 fornece os métodos matemáticos para estabelecer e revisar intervalos de calibração com base no desempenho histórico dos equipamentos, distinguindo-se do GUM ao definir “quando” recalibrar, e não apenas “quanto” é a incerteza no momento do teste (VELYCHKO et al., 2024; MACII, 2024). Para o setor de petróleo, essa governança permite monitorar medidores mestre Coriolis, garantindo que permaneçam dentro da conformidade de ±0,3% exigida pela Portaria 001/2013 (BARATEIRO; EMERIK, 2020). A validade dessa infraestrutura é, por fim, ratificada por Comparações Interlaboratoriais, nas quais o desempenho técnico é comprovado matematicamente pelo índice En (Erro Normalizado): valores de $|En| \leq 1,0$ atestam que o laboratório gera resultados consistentes com referências internacionais (VELYCHKO et al., 2024).

6 Discussão: Síntese e Convergência entre os Eixos Teóricos

Com o objetivo de consolidar, de forma sintética, o referencial teórico desenvolvido nas Seções 3 a 5, o Quadro 1 apresenta o foco temático, os principais conceitos e ferramentas e os autores centrais de cada um dos três eixos de investigação que estruturam este artigo.

Quadro 1 – Síntese do referencial teórico por eixo de investigação

Eixo	Foco temático	Conceitos e ferramentas centrais	Principais autores
Eixo 1 – Gestão da Qualidade (ISO/IEC 17025:2017)	Governança normativa e gestão de riscos em laboratórios de ensaio e calibração	Pensamento baseado em risco; ciclo PDCA; Gap Analysis; LIMS; Gêmeos Digitais; TQM	Trajković et al. (2025); Silva et al. (2021); Gusarova et al. (2020); Macii (2024)
Eixo 2 – Metrologia e Vazão	Rigor físico-matemático da medição de vazão de hidrocarbonetos	Turbinas medidoras; Curva Universal de Viscosidade; Método do Medidor Mestre; medidores mássicos; Splines Cúbicas	Kim e Cheong (2026); Prakosa et al. (2025); Chun et al. (2017); Barateiro e Emerik (2020)
Eixo 3 – Infraestrutura da Qualidade e Requisitos Legais	Arcabouço legal, rastreabilidade metrológica e reconhecimento mútuo internacional	Portaria ANP/Inmetro nº 001/2013; GUM; CIPM MRA; ILAC MRA; índice En	Trajković et al. (2025); Velychko et al. (2024); Barateiro e Emerik (2020)

Fonte: elaborado pelos autores (2026)

O percurso teórico realizado evidencia que a exatidão na metrologia de vazão, embora fundamentada em princípios físicos e métodos rigorosos como o Master Meter, é indissociável de uma gestão baseada em risco e de uma Infraestrutura da Qualidade robusta (TRAJKOVIĆ et al., 2025; BARATEIRO; EMERIK, 2020; SILVA et al., 2021). Os três eixos investigados não operam de forma isolada: o Eixo 1 fornece a lógica de governança e gestão de riscos; o Eixo 2 fornece o rigor físico-matemático que garante a exatidão dos instrumentos e dos métodos de calibração; e o Eixo 3 fornece o arcabouço legal e a rede de reconhecimento mútuo que conferem validade jurídica e internacional aos resultados. Essa convergência consolida a visão de que a ciência das medições é elemento central para a transição rumo a organizações sustentáveis e centradas no valor (MACII, 2024).

Essa articulação teórica multiaxial evidencia, contudo, uma tensão recorrente na literatura: a maioria dos estudos analisados aborda isoladamente ou a ciência dura da medição, ou a gestão organizacional da acreditação, mas raramente integra ambas as dimensões em um único modelo aplicado. Essa fragmentação, discutida com maior profundidade e evidência quantitativa em revisão bibliométrica complementar sobre o mesmo portfólio de fontes, reforça a relevância de um referencial que trate a implementação laboratorial como um problema simultaneamente técnico e gerencial, e não como domínios paralelos.

7 Conclusões

Este artigo teve como objetivo consolidar o referencial teórico que sustenta a proposição de uma metodologia integrada para a implementação de laboratórios de ensaios e calibração de turbinas medidoras de volume no setor de combustíveis. Para tanto, a literatura selecionada por meio do método ProKnow-C — um portfólio de 28 fontes internacionais publicadas entre 2017 e 2026 — foi organizada em três eixos de investigação complementares: gestão da qualidade sob a ótica da ISO/IEC 17025:2017, fundamentos de metrologia e vazão aplicados a turbinas medidoras e ao método do Medidor Mestre, e infraestrutura da qualidade e requisitos metrológicos legais específicos do setor de combustíveis brasileiro.

Os resultados evidenciam que a competência laboratorial moderna depende da articulação entre domínios tradicionalmente tratados de forma isolada na literatura: de um lado, a gestão baseada em risco, a governança digital via LIMS e Gêmeos Digitais, e a autoavaliação estruturada por Gap Analysis; de outro, o rigor físico-matemático da calibração de turbinas sob condições de alta viscosidade e vazão, sustentado pela

aplicação do GUM e por modelos preditivos como as Splines Cúbicas; e, por fim, o arcabouço legal e a rede de reconhecimento mútuo — CIPM MRA e ILAC MRA — que conferem validade internacional e jurídica aos resultados.

Como principal contribuição teórica, este artigo demonstra que a exatidão metrológica no setor de combustíveis não é um atributo isolado do instrumento de medição, mas o resultado sistêmico da convergência entre gestão normativa, rigor técnico e arcabouço legal — evidência que fundamenta a necessidade de metodologias de implementação laboratorial que tratem esses três domínios de forma integrada, e não paralela.

Como limitação, reconhece-se que o referencial aqui sintetizado tem caráter predominantemente narrativo e conceitual, não substituindo a análise bibliométrica quantitativa do portfólio — apresentada em artigo complementar —, tampouco a validação empírica da metodologia proposta. Sugere-se, como trabalhos futuros, o aprofundamento da integração entre os três eixos por meio de estudos de caso aplicados, bem como a investigação de modelos que quantifiquem o retorno financeiro da integração entre infraestrutura física e gestão digital em laboratórios de metrologia de vazão. Em síntese, o referencial teórico consolidado neste artigo fornece a base conceitual para que a implementação de laboratórios de calibração no setor de combustíveis avance de uma lógica de conformidade documental para uma lógica de inteligência metrológica integrada.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS; INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. Portaria Conjunta ANP/Inmetro nº 1, de 19 de junho de 2013. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 20 jun. 2013.

BARATEIRO, C. E. R. B.; EMERIK, R. C. S. Liquid hydrocarbon flow meters calibration with high flow and viscosity: New facility. **Flow Measurement and Instrumentation,** v. 73, 101749, 2020.

BIEŃKOWSKA, A.; BIEŃKOWSKI, P.; ZABŁOCKA-KLUCZKA, A. Kształtowanie kultury zaufania w laboratoriach badawczych i wzorcujących. **Przegląd Elektrotechniczny,** v. 93, n. 3, p. 223-226, 2017.

CHUN, S.; YOON, B.; CHOI, H-M.; LEE, Y.B. Water Flow Meter Calibration with a Master Meter Method. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, v. 18, n. 8, p. 1075-1083, 2017.

DARWISH, M. W. D.; DOHEIR, M.; AL-KUMAIM, N. H. S.; SALEH, H.; YAACOB, N. M. Optimizing Customer Satisfaction Through Sustainable Service Quality in ISO 17025 Accredited Calibration Laboratories. International **Journal of Sustainable Development and Planning**, v. 19, n. 12, p. 4843-4849, 2024.

DYUMAEVA, I. V.; MOSHKOVA, M. V. Laboratory Information Management Systems: Way to Simplify Accreditation. **Zavodskaya Laboratoriya**, v. 85, n. 10, p. 70-75, 2019.

DÉSENFANT, M.; PRIEL, M. Reference and additional methods for measurement uncertainty evaluation. **Measurement**, v. 95, p. 339–344, 2017.

GROCHAU, I. H.; LEAL, D. K. B.; TEN CATEN, C. S. European current landscape in laboratory accreditation**. Accreditation and Quality Assurance**, v. 25, n. 4, p. 303–310, 2020.

GROCHAU, I. H.; TEN CATEN, C. S.; FORTE, M. M. C. Current American landscape in laboratory accreditation according to ISO/IEC 17025. **Accreditation and Quality Assurance**, v. 22, p. 57–62, 2017.

GUSAROVA, S. N.; EROKHINA, Y.; KRAMOK, D. I.; KHUNUZIDI, E.I. Recommendations for labs on the transition to GOST ISO/IEC 17025–2019. Industrial Laboratory**. Diagnostics of Materials**, v. 86, n. 2, p. 69-78, 2020.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION; INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION**. ISO/IEC 17025:2017: general requirements for the competence of testing and calibration laboratories.** 3. ed. Geneva: ISO, 2017.

JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY. **Evaluation of measurement data: guide to the expression of uncertainty in measurement.** JCGM 100:2008. Sèvres: BIPM, 2008.

KIM, H.; CHEONG, C.; RYU, S-Y.; PARK, S. Design optimization of turbine flow meter in ice maker water supply to improve flow measurement performance**. Flow Measurement and Instrumentation**, v. 108, 103134, 2026.

KLAUENBERG, K.; GREENWOOD, J.; FOYER, G. Propagation of conformity statements in compliance with the GUM and ISO 17025. **Metrologia**, v. 60, n. 5, 054004, 2023.

LACERDA, R. T. O.; ENSSLIN, L.; ENSSLIN, S. R. Uma análise bibliométrica da literatura sobre estratégia e avaliação de desempenho. Gestão & Produção, v. 19, n. 1, p. 59–78, 2012.

MACII, David. Basics of Industrial Metrology. **IEEE Instrumentation & Measurement Magazine**, v. 27, n. 4, p. 26-36, 2024.

MYTYCH, J.; LIGARSKI, M. J. Management System functioning in accredited laboratories in Poland. **Management Systems in Production Engineering**, v.26, n.1, p. 42-48, 2018.

OHN, Han-Min. Internal audit techniques for testing laboratories: ISO/IEC 17025:2017 perspective. **Accreditation and Quality Assurance,** v. 29, p. 263-266, 2024.

OKEZUE, M. A.; ADEYEYE, M. C.; BYRN, S. J.; ABIOLA, V. O.; CLASE, K. L. Impact of ISO/IEC 17025 laboratory accreditation in sub-Saharan Africa: a case study. **BMC Health Services Research**, v. 20, 1065, 2020.

PRAKOSA, J. A.; ALIAS, N.; PURWOWIBOWO, P.; ALGARNI, A. D.; SOLIMAN, N. F. Not-A-Knot cubic spline model to predict accurately the viscosity calibration curve of turbine flow meter. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 102, 102765, 2025.

SALES, D. M.; ALVES, R. A. da S.; ROCHA, J. C. P. Development of a Prototype Management Software for Testing Laboratories**. Brazilian Journal of Analytical Chemistry (BrJAC),** v. 6, n. 22, p. 29-38, 2019.

SILVA, F. R.; GROCHAU, I. H.; VEIT, H. M. System proposal for implementation of risk management in the context of ISO/IEC 17025**. Accreditation and Quality Assurance**, v. 26, p. 271–278, 2021.

TRAJKOVIĆ, D. V.; RUSO, J. V.; RAKIC, A.S.; FILIPOVIC, J. V. Mapping conformity assessment bodies in the Republic of Serbia: focus on ISO/IEC 17025 accredited laboratories. **Accreditation and Quality Assurance,** v. 30, p. 693–705, 2025.

VELYCHKO, O.; GORDIYENKO, T.; KURSIN, S. Global Metrological Traceability at Different Measurement Levels: Practical Aspects. **IEEE Instrumentation & Measurement Magazine**, v. 27, n. 1, p.38-45, 2024.

VOIT, K.; ZEMAN, O.; GAPPMAIER, P.; WRIESSNIG, K.; ADAMCOVA, R. Influence of Measurement Uncertainty in the Determination of Selected Rock Parameters—**A Realistic Approach. Materials**, v. 16, n. 8, 3045, 2023.

WEIDLICH, R.; ALBRECHT, T.; DERR, P.; RÖGLINGER, M. Designing a Process-Oriented Digital Twin for Industrial Testing Laboratories. **IEEE Transactions on Engineering Management**, v. 71, p. 13802–13813, 2024.

ZHAI, P.; WANG, R.; ZHOU, Y.; HU, D.; LI, J.; ZHOU, Y. Enhancing the capabilities of biosafety laboratories through the established accreditation system: China. **Journal of Biosafety and Biosecurity**, v. 1, n. 1, p. 86–89, 2019.

ZHUSSUPBEKOV, S. S.; KHAN, S. G.; IBRAYEVA, L. K. The analysis of approaches to measurement uncertainty evaluation for calibration. **IAPGOŚ**, v. 3, p. 26-29, 2019.