



**ORIENTAÇÕES SOBRE A APLICAÇÃO DA
TRANSFERIBILIDADE DA CALIBRAÇÃO
DE MEDIDORES DE VAZÃO CORIOLIS
PARA GASES**

Documento de caráter orientativo

DOQ-DIMCI-018

Revisão 00 - JULHO/2025

	DOQ-DIMCI-018	REV. 00	PÁGINA 2/30
---	---------------	------------	----------------

SUMÁRIO

- 1 Objetivo**
- 2 Campo de aplicação**
- 3 Responsabilidade**
- 4 Documentos de referência**
- 5 Documentos complementares**
- 6 Siglas**
- 7 Termos e definições**
- 8 Fundamentos teóricos**
- 9 Metodologia para análise da transferibilidade da calibração**
- 10 Avaliação da incerteza de medição e critérios de aceitação da transferibilidade**
- 11 Histórico de revisão e quadro de aprovação**
- ANEXO A – Propriedades de gases**
- ANEXO B – Exemplos de aplicação da metodologia**

1 OBJETIVO

1.1 Este documento apresenta orientações sobre a aplicação da transferibilidade de calibração a medidores de vazão Coriolis que operam em vazão ou totalização mássica de gases. Seu propósito é possibilitar que calibrações realizadas em condições de referência sejam aplicáveis em cenários operacionais distintos, assegurando a confiabilidade dos resultados na condição de uso final.

1.2 A metodologia proposta baseia-se na avaliação comparativa do desempenho do medidor em diferentes parâmetros de processo. Seu caráter é orientativo e não substitui normas ou requisitos regulamentares para aplicações específicas, nem impõe obrigações em mercados regulados. Sua elaboração foi realizada a partir de estudos teóricos e experimentais do Inmetro/Dimci/Dinam, da experiência industrial e das boas práticas de calibração. Recomenda-se que todas as partes envolvidas validem previamente sua aplicação.

2 CAMPO DE APLICAÇÃO

2.1 Este documento é destinado a laboratórios, fabricantes, reguladores, especialistas em vazão e demais partes que precisam aplicar transferibilidade em calibrações de medidores de vazão Coriolis operando em medição mássica de gases.

2.2 As orientações aqui apresentadas se aplicam principalmente a situações onde não é viável reproduzir, em laboratório, as mesmas condições de operação em campo, quando há uma oferta limitada de laboratórios capazes de atender às condições operacionais específicas ou quando se busca aumentar a confiabilidade das medições, a partir de uma melhor compreensão do comportamento do medidor quando submetido a diferentes condições operacionais.

2.3 Não fazem parte do campo de aplicação deste DOQ medidores de vazão Coriolis construídos com tubos retos ou de tubo único, tampouco operando em escoamentos multifásicos ou com gás úmido.

3 RESPONSABILIDADE

A responsabilidade pela elaboração e revisão deste documento é da Dimci/Dinam. A responsabilidade pela aprovação, publicação ou cancelamento deste documento é da Dimci.

4 DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA

OIML R 117:2019	<i>Dynamic measuring systems for liquids other than water</i>
OIML R 137:2012	<i>Gas meters</i>
ISO 10790:2015	<i>Measurement of fluid flow in closed conduits - Guidance to the selection, installation and use of Coriolis flowmeters (mass flow, density and volume flow measurements)</i>
AGA REPORT 11:2013	<i>Measurement of natural gas by Coriolis meter</i>
API MPMS Chapter 5.6:2021	<i>Measurement of Liquid Hydrocarbons by Coriolis Meters</i>
GUM:2008	Avaliação de dados de medição - Guia para a expressão da incerteza de medição, emitido em 2012 pelo Inmetro.
GUM JCGM 106:2012	Avaliação de dados de medição — O papel da incerteza de medição na avaliação da conformidade, emitido em 2022 pelo Inmetro.
ABNT NBR 16084:2012	Medição de vazão de fluidos em condutos fechados — Orientação para a seleção, instalação e uso de medidores Coriolis (medições de vazão mássica, massa específica e vazão volumétrica)
ASME B31.1 - 2024	<i>Power Piping</i>
ASME B31.3 - 2024	<i>Process Piping</i>
Artigo	<i>Theory of errors in Coriolis flowmeter readings due to compressibility of the fluid being metered</i> https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2006.07.006
Artigo	<i>Optimizing Coriolis Flowmeter Performance for the Brazilian O&G Industry: Influence Factors and Calibration Strategies</i>
Artigo	<i>Draper, N. R., & Smith, H. (1998). Applied Regression Analysis (3rd ed.). Wiley.</i>
Artigo	<i>Miller, J. N., & Miller, J. C. (2010). Statistics for Analytical Chemistry (6th ed.). Pearson</i>
AGA Report 8 Parte 1:2017	<i>Thermodynamic Properties of Natural Gas and Related Gases, DETAIL and GROSS Equations of State</i>
AGA Report 8 Parte 2:2017	<i>Thermodynamic Properties of Natural Gas and Related Gases, GERG-2008 Equation of State</i>
AGA Report 11: 2013	<i>Measurement of Natural Gas by Coriolis Meter</i>
Refprop 10	<i>NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database</i>

5 DOCUMENTOS COMPLEMENTARES

	DOQ-DIMCI-018	REV. 00	PÁGINA 4/30
---	---------------	------------	----------------

VIM:2012	Vocabulário Internacional de Metrologia
VIML:2016	Vocabulário Internacional de Termos de Metrologia Legal
SI:2021	Sistema Internacional de Unidades
ABNT NBR ISO 4185:2009	Medição de vazão de líquidos em dutos fechados - Método gravimétrico

6 SIGLAS

As siglas das UP/UO do Inmetro podem ser acessadas em: <http://www.inmetro.gov.br/inmetro/pdf/regimento-interno.pdf>.

ISO	<i>International Standardization Organization (Organização Internacional de Normalização)</i>
AGA	<i>American Gas Association (Associação Americana de Gás)</i>
API	<i>American Petroleum Institute (Instituto Americano de Petróleo)</i>
ABNT	<i>Associação Brasileira de Normas Técnicas</i>
GUM	<i>Guide to the expression of uncertainty in measurement (Guia para a expressão da incerteza de medição)</i>

7 TERMOS E DEFINIÇÕES

A este documento são aplicáveis os termos e definições do SI, VIM, VIML e as seguintes definições:

7.1 Transferibilidade

Propriedade de um medidor que permite que os resultados de calibração em uma condição específica sejam aplicados a condições de operação diversas, dentro de limites estabelecidos.

7.2 Calibração transferível

Calibração cujos resultados podem ser aplicados em condições de operacionais distintas daquelas em que foram obtidos.

	DOQ-DIMCI-018	REV. 00	PÁGINA 5/30
---	---------------	------------	----------------

7.3 Compensação automática

Capacidade de um medidor de vazão realizar automaticamente correções para compensar efeitos indesejados ou erros sistemáticos conhecidos, sem a necessidade de correção em pós-processamento.

7.4 Condições de referência

Condições de calibração utilizadas como base para se determinar a sensibilidade do medidor aos parâmetros de processo que influenciam seu desempenho.

7.5 Calibração de referência

Calibração realizada em condições de referência, que será utilizada na avaliação da transferibilidade de um medidor. Estas condições também poderão ser utilizadas para calibrações subsequentes.

7.6 Número de Mach (M)

Adimensional que representa a razão entre a velocidade de um objeto ou de um escoamento fluido e a velocidade do som no meio em que se propaga. Este número é fundamental na mecânica dos fluidos compressíveis, influenciando o comportamento do escoamento, como a formação de ondas de choque e variações de pressão e temperatura.

8 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

8.1 Medidores de vazão Coriolis medem vazão mássica diretamente por meio da força de Coriolis gerada pelo escoamento de um fluido através de um par de tubos vibratórios. O tubo é excitado a vibrar próximo à sua frequência natural, e sensores detectam a deflexão (ou torção) entre as extremidades do tubo. Sem vazão mássica, não há forças de Coriolis agindo no fluido, e as oscilações nas extremidades estão em fase; na presença de vazão, a inércia do fluido provoca um desvio de fase aproximadamente proporcional à vazão mássica. Este desvio é convertido em vazão mássica pelo fator de calibração do medidor de vazão Coriolis.

8.2 Uma das características dos medidores de vazão Coriolis é a capacidade de o mesmo instrumento operar tanto com líquidos quanto com gases. É comum, na indústria, a consideração de que a medição baseada no princípio de Coriolis é independente do tipo e características do fluido e do escoamento, por basear-se eminentemente na vazão mássica. No entanto, devido à natureza complexa das interações fluido-estrutura que ocorrem neste tipo de medidor, parâmetros de processo podem influenciar a exatidão e a precisão das medidas. Desse modo, diversas correções podem ser aplicadas, e recursos de compensação e ajuste vêm sendo desenvolvidos por fabricantes ao longo dos anos. Com isso, é desejável a existência de critérios capazes de definir o nível de influência de parâmetros de processo no desempenho de medidores de vazão Coriolis, de forma a compreender em que condições os resultados de uma calibração são aplicáveis.

8.3 Nas subseções seguintes, são discutidos os principais parâmetros e condições de escoamento que impactam diretamente na capacidade de um medidor de vazão Coriolis manter seu desempenho em diferentes contextos de aplicação, abordando a questão central da transferibilidade da calibração.

8.4 Para os fins deste documento, é razoável assumir que todos os parâmetros de influência podem ser considerados independentes, e cuja correção pode ser realizada aplicando-se um fator multiplicativo ao fator de calibração do medidor ou diretamente sobre o resultado da medição de vazão ou a totalização mássica.

8.5 Temperatura

8.5.1 A variação da temperatura do fluido e do ambiente exercem uma influência significativa no desempenho dos medidores de vazão Coriolis, principalmente sobre o módulo de elasticidade dos tubos vibratórios e em seu comportamento dinâmico. Além disso, em menor escala, podem ocorrer mudanças geométricas e dimensionais, como variações no diâmetro e comprimento desses tubos, devido aos efeitos térmicos de dilatação ou contração. Essas alterações térmicas também podem impactar o ajuste de zero do medidor.

8.5.2 Geralmente, a influência da variação da temperatura segue um padrão linear. A maioria dos modelos comerciais disponíveis atualmente possui sensores de temperatura integrados aos tubos vibratórios para compensar automaticamente os efeitos térmicos, de forma imperceptível ao usuário final.

8.5.3 Os efeitos de temperatura para a maioria dos materiais empregados, na faixa de -50 °C a 150 °C, e em condições de temperatura homogênea e constante, já são bem conhecidos e, de modo geral, são satisfatoriamente compensados pela maior parte dos fabricantes. No entanto, o desempenho exato dessas compensações depende da eficácia dos algoritmos desenvolvidos por cada fabricante e da qualidade do processo de fabricação do medidor.

8.6 Pressão

8.6.1 Os efeitos de mudanças na pressão estática do fluido medido abrangem o enrijecimento e a deformação dos tubos vibratórios. Esses efeitos tendem a causar uma diminuição linear nos valores das leituras para medidores com tubos curvos à medida que a pressão aumenta. A magnitude desses efeitos depende do material do tubo e das características do projeto, como diâmetro, espessura de parede dos tubos vibratórios e geometria. Esses efeitos tendem a ser mais evidentes em tubos de maior diâmetro e paredes mais finas. Além disso, ressalta-se que a pressão do fluido também pode impactar a estabilidade do zero do medidor.

8.6.2 De modo geral, os fabricantes não implementam um sensor de pressão integrado, mas permitem a aplicação de um coeficiente de compensação constante, a partir da configuração pelo operador, ou, preferencialmente, automática, a partir da entrada de sinal de um sensor de pressão em linha. Normalmente, os manuais de operação dos medidores apresentam os coeficientes de compensação para pressão do fluido.

8.6.3 Quando não especificada pelo fabricante uma fórmula de correção específica, a correção de pressão pode ser determinada pela aplicação de um fator linear simples:

$$f_p = \frac{1}{1 + \alpha_p(p - p_{cal})} \quad (1)$$

Onde p é a pressão estática de processo, p_{cal} é a pressão de calibração e α_p é um coeficiente de compensação de pressão específico do medidor.

	DOQ-DIMCI-018	REV. 00	PÁGINA 7/30
---	---------------	------------	----------------

8.7 Velocidade do som no meio

8.7.1 Quando o fluido em medição possui alta velocidade de propagação do som, como em líquidos, o fluido se comportará como um corpo rígido, de forma que a distribuição de ondas de pressão no fluido, induzidas pela vibração do tubo, mantém mesma fase e amplitude da vibração dos tubos. No entanto, em fluidos com baixa velocidade do som – como os gases – o fluido passa a atuar como um meio ressonante. À medida que a frequência de oscilação do tubo se aproxima da frequência ressonante do fluido, as vibrações do fluido serão amplificadas, resultando em uma maior reação nos tubos vibratórios.

8.7.2 O impacto desse parâmetro depende do diâmetro e da frequência dos tubos vibratórios, bem como da velocidade de propagação do som no fluido, mas não da sua velocidade ou vazão do escoamento. Quando não houver funcionalidades de compensações internas e/ou automáticas, uma maneira de minimizar estes efeitos é a aplicação de correções teóricas. A correção sugerida por *Hemp e Kutin* é constantemente citada na literatura e apresenta bons resultados:

$$f_{sos} = \frac{1}{1 + \frac{\alpha_{sos}}{2} \left(\frac{\omega_d r}{c} \right)^2} \quad (2)$$

Onde ω_d e r são a frequência angular e o raio interno dos tubos vibratórios do medidor, respectivamente, e α_{sos} é um parâmetro que varia com a geometria do medidor e o perfil do escoamento, e tem valor próximo a 1.

8.8 Número de Mach

8.8.1 Escoamentos com elevado número de Mach podem induzir efeitos de compressibilidade e modificar o comportamento dinâmico dos medidores. Embora a literatura disponível sobre a influência do número de Mach no desempenho de medidores de vazão Coriolis seja limitada, observa-se que tais efeitos tendem a ser desprezíveis em regimes subsônicos baixos (normalmente até Mach 0,2). No entanto, acima desse valor, as alterações podem se tornar significativas.

8.8.2 De forma geral, os fabricantes indicam um limite superior para operação de medidores de vazão Coriolis em termos de número de Mach, mas não indicam tendências ou quaisquer correções a serem realizadas. Desta forma, é desejável que os medidores sejam testados até os limites de número de Mach esperado na condição de operação.

8.9 Outros efeitos

8.9.1 Alguns estudos sugerem que a velocidade do escoamento dentro dos tubos vibratórios pode influenciar os resultados de medição de medidores de vazão Coriolis. Estes efeitos podem estar associados à alteração dos modos de vibração do tubo ou à geração de ruído mecânico. De modo geral, este não é um problema para escoamentos com baixa velocidade (abaixo de 60 m/s).

8.9.2 Escoamentos com baixos números de Reynolds também podem impactar negativamente o desempenho de medidores de vazão Coriolis. Este não é o caso para medição de gases ou água, mas pode ter influência significativa nos casos de operação com fluidos de alta viscosidade.

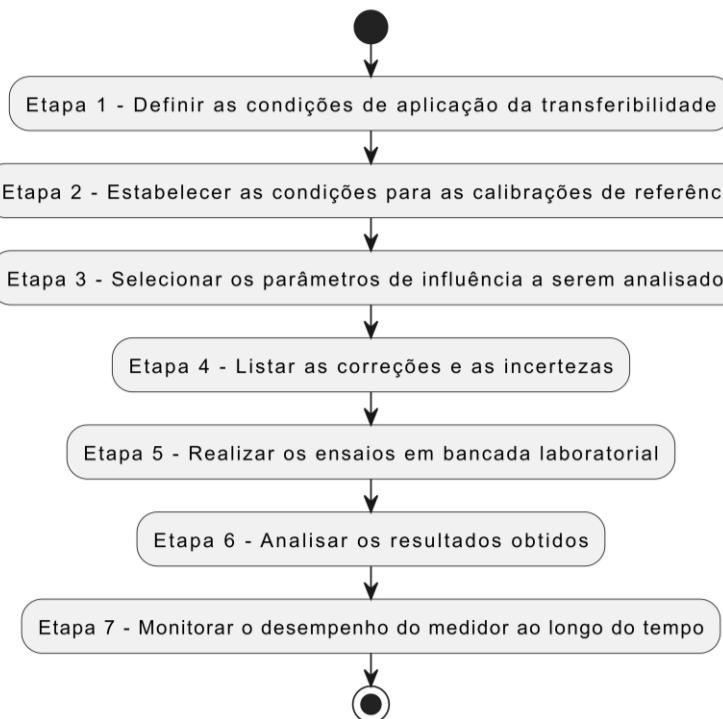
8.9.3 Para medição com gás, convém que também seja observado com cuidado a influência da estabilidade de zero do medidor. Aplicações em gás colocam o medidor de vazão Coriolis próximo do limite inferior de medição, tornando crítica a estabilidade do zero - isto é, a capacidade de não indicar fluxo na ausência de escoamento. Fabricantes adotam projetos com tubos simétricos e materiais homogêneos para minimizar desvios de zero causados por variações de densidade, mas ainda assim é necessário ter cautela ao calibrar ou operar o medidor nesta região.

9 METODOLOGIA PARA ANÁLISE DA TRANSFERIBILIDADE DA CALIBRAÇÃO

9.1 A análise da viabilidade de utilização de medidores de vazão Coriolis calibrados em condições distintas das operacionais requer a avaliação de sua sensibilidade aos parâmetros de processo que influenciam seu desempenho, bem como da capacidade de aplicar correções adequadas aos resultados. Tal análise visa estabelecer os limites operacionais nos quais as incertezas associadas às medições permanecem compatíveis com o propósito metrológico almejado.

9.2 A seguir, apresenta-se um fluxograma, com 7 etapas, para a análise da transferibilidade em medidores de vazão Coriolis, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Fluxograma para Aplicação da Transferibilidade



Fonte: Inmetro/Dimci/Dinam

9.2.1 Etapa 1: Definir as condições de aplicação da transferibilidade

	DOQ-DIMCI-018	REV. 00	PÁGINA 9/30
---	---------------	------------	----------------

Identificar os parâmetros de influência relevantes, como temperatura, pressão, velocidade do som no meio, velocidade de escoamento e número de Mach, aos quais o medidor será submetido durante a operação. Em seguida, estabelecer os limites operacionais para cada parâmetro identificado.

9.2.2 Etapa 2: Estabelecer as condições para as calibrações de referência

Para fluidos de referência, recomenda-se: usar ar ou nitrogênio a uma pressão próxima à condição operacional, caso o fluido seja um gás; ou água a temperatura ambiente e baixa pressão, se for um líquido. As condições de referência podem ser definidas por parâmetro em análise, servindo como base para estimar a incerteza adicional de transferibilidade e para calibrações futuras.

9.2.3 Etapa 3: Selecionar os parâmetros de influência a serem analisados

Identificar quais parâmetros serão ensaiados e estabelecer um limite mínimo de diferença entre as condições de referência e de operação que justifique sua avaliação. Definir os fluidos, pressões e temperaturas a serem usados nos ensaios, utilizando, por exemplo, o ANEXO A - PROPRIEDADE DE GASES para a escolha de gases.

9.2.4 Etapa 4: Listar as correções e incertezas

Para cada parâmetro de influência, determinar as correções necessárias, suas incertezas, fatores de abrangência e graus de liberdade. Em medidores insensíveis a variações de um parâmetro ou com compensação automática, calcular apenas as incertezas, fatores de abrangência e graus de liberdade.

9.2.5 Etapa 5: Realizar os ensaios em bancada laboratorial

Utilizar padrões de calibração adequados que garantam confiabilidade metrológica para detectar variações no desempenho do medidor. Quando possível, empregar os mesmos padrões das calibrações de referência para assegurar correlação entre os resultados. Avaliar a sensibilidade do medidor a cada parâmetro de influência. Caso o padrão seja também um medidor de vazão Coriolis, é importante atentar para a possibilidade de erro de modo comum, o que pode mascarar desvios reais no comportamento do instrumento sob ensaio.

9.2.6 Etapa 6: Analisar os resultados obtidos

Comparar os resultados com as condições de referência, identificar tendências e calcular as incertezas adicionais decorrentes da transferibilidade.

9.2.7 Etapa 7: Monitorar o desempenho do medidor ao longo do tempo

Acompanhar o desempenho do medidor conforme os requisitos do sistema de gestão da qualidade ao qual está submetido, garantindo a confiabilidade dos resultados de medição de forma contínua.

Nota 1 - O escopo dos ensaios realizados é determinado de acordo com o uso pretendido e as necessidades específicas do usuário. Cabe ao usuário decidir se os resultados dos ensaios serão aplicáveis apenas à amostra ensaiada, a outros medidores idênticos (mesmo modelo e diâmetro) ou uma família de medidores.

	DOQ-DIMCI-018	REV. 00	PÁGINA 10/30
---	----------------------	--------------------	-------------------------

A Tabela 1 apresenta os principais parâmetros de influência e de projeto que influenciam na sensibilidade do medidor.

Nota 2 - As correções referentes aos parâmetros de influência podem apresentar valor esperado nulo; ainda assim, é recomendável que sempre se associe uma incerteza. Quando não for viável avaliar individualmente o impacto de cada parâmetro – como velocidade do escoamento e número de Mach –, pode-se adotar uma abordagem por agrupamentos ou até mesmo uma análise global de transferibilidade.

Nota 3 - É recomendado que nenhuma alteração de configuração no medidor seja realizada após a calibração de referência. Caso isso seja necessário, é importante verificar se essa alteração não invalida a calibração de referência.

Nota 4 - A decisão de testar um parâmetro na avaliação da transferibilidade de um medidor de vazão Coriolis considera sua contribuição esperada, a capacidade do medidor de corrigi-lo automaticamente, o conhecimento já consolidado sobre seu efeito, a confiança no fabricante, a existência de dados na literatura, o histórico de uso do medidor e a viabilidade técnica e econômica dos ensaios.

Tabela 1 - Parâmetros de influência

Parâmetro de influência	Características de projeto do medidor	Efeito
Pressão	Geometria	---
	Espessura da parede dos tubos vibratórios	Maior influência com menor espessura
	Diâmetro	Maior influência em maiores diâmetros (recomendado correções para medidores acima de 1")
	Material	Maior influência com menor módulo de elasticidade
Temperatura	Geometria	---
	Material	Maior influência com maior sensibilidade do módulo de elasticidade à temperatura
Velocidade do som no meio	Diâmetro interno dos tubos vibratórios	Maior influência em maiores diâmetros
	Frequência de vibração	Maior influência em maiores frequências de vibração
Velocidade do escoamento nos tubos vibratórios	Projeto dos tubos vibratórios	Menor influência com maior massa e comprimento dos tubos vibratórios
	Frequência de vibração	Menor influência com maior frequência de vibração
	Comprimento dos tubos vibratórios	Maior influência com menor comprimento dos tubos vibratórios
	Geometria dos tubos vibratórios	---
Número de Mach	Geometria dos tubos vibratórios	---
	Diâmetro	---

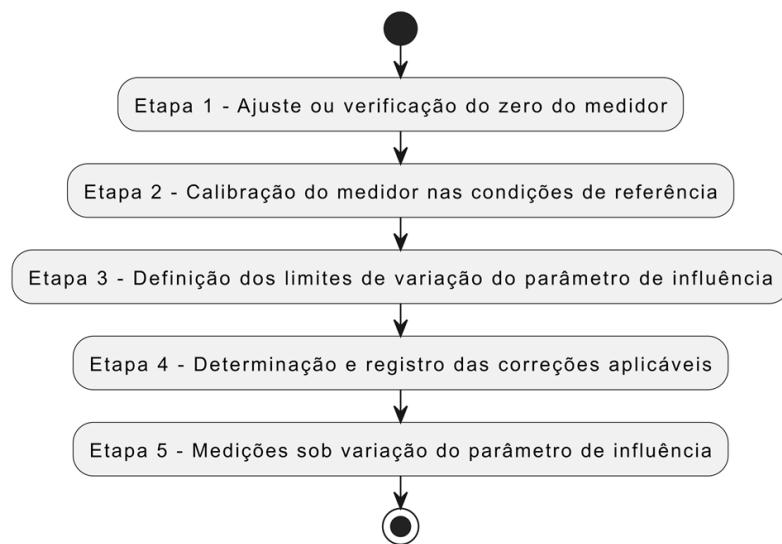
Fonte: Inmetro/Dimci/Dinam

 INMETRO	DOQ-DIMCI-018	REV. 00	PÁGINA 11/30
--	----------------------	-------------------	------------------------

9.3 Caracterização do medidor quanto aos parâmetros de influência

Para caracterizar o comportamento do medidor em relação a cada parâmetro de influência de interesse, recomenda-se executar o procedimento laboratorial ilustrado na Figura 2, que contém cinco etapas principais, a cada parâmetro de influência:

Figura 2 - Procedimento para caracterização do medidor.



Fonte: Inmetro/Dimci/Dinam

9.3.1 Etapa 1 – Ajuste ou verificação do zero do medidor

Realizar o ajuste ou a verificação do zero do medidor segundo as recomendações do fabricante. Essa ação inicial assegura que o ponto de partida das medições esteja corretamente configurado, minimizando erros sistemáticos.

9.3.2 Etapa 2 – Calibração do medidor nas condições de referência

Efetuar a calibração do medidor nas condições de referência, abrangendo toda a faixa de vazão mássica de interesse. Recomenda-se utilizar, no mínimo, 5 pontos igualmente espaçados ao longo da faixa de medição

9.3.3 Etapa 3 – Definição dos limites de variação do parâmetro de influência

Definir e documentar os limites de variação do parâmetro de influência em avaliação, estabelecendo as condições dos ensaios.

- a) as condições exatas dependerão do tipo de parâmetro (por exemplo, temperatura, pressão etc.) e da faixa de operação desejada; e
- b) a
- c) Tabela 2 fornece sugestões para determinar as condições exatas de variação para cada parâmetro.

	DOQ-DIMCI-018	REV. 00	PÁGINA 12/30
---	---------------	------------	-----------------

9.3.4 Etapa 4 – Determinação e registro das correções aplicáveis

Determinar e registrar as correções necessárias para ajustar o parâmetro de influência de interesse, caso o medidor seja sensível a esse parâmetro e não possua recurso de compensação automática.

- a) registrar claramente o valor da correção, o(s) parâmetro(s) medido(s) para essa correção e o procedimento para aplicá-la (por exemplo, equações ou tabelas de correção).

9.3.5 Etapa 5 – Medições sob variação do parâmetro de influência

Realizar medições nos mesmos pontos de vazão mássica ensaiados na calibração de referência, porém variando o parâmetro de influência de acordo com os valores definidos na seção 9.3.3.

- a) caso seja necessário realizar o ajuste de zero a cada mudança do parâmetro de influência, efetuar e registrar esse procedimento e seu novo valor;
- b) se o medidor dispuser de recurso de compensação automática, certificar que ele esteja ativado para o parâmetro em questão; e
- c) registrar os valores medidos de forma sistemática, documentando as condições de cada ensaio.

Tabela 2 - Sugestões para determinação das condições de ensaio

Parâmetro de influência	Faixa (limites de uso)	Condições de ensaio	Medições auxiliares
Pressão	Dentro dos limites de variação elástica do material dos tubos sensores.	Mínimo de três pressões distribuídas uniformemente, entre as pressões máxima e a pressão de referência.	Pressão do fluido (medidor de pressão em linha).
Temperatura	Dentro dos limites de linearidade do módulo de elasticidade do material dos tubos sensores.	Mínimo de três temperaturas distribuídas uniformemente, entre as temperaturas máxima e mínima.	Temperatura do fluido medida por poço termométrico ou por sensor integrado aos tubos vibratórios.
Velocidade do som no meio	Até a menor velocidade do som ensaiada.	Ao menos dois gases com velocidades do som diferentes. Recomenda-se ar ou nitrogênio e dióxido de carbono. A necessidade pode ser avaliada diretamente a partir da equação apresentada em 8.7.	Pressão, temperatura e composição do gás.
Número de Mach	Específico por medidor. Geralmente possui limite máximo em torno de $M = 0,2$.	Ensaiar até o limite superior de número de Mach.	Diâmetro interno dos tubos, vazão volumétrica, velocidade do som no meio.
Velocidade do escoamento dentro dos tubos vibratórios	Específico por medidor. Limitado pelo Mach máximo.	Ensaiar até o limite superior de velocidade do escoamento.	Diâmetro interno dos tubos vibratórios, vazão volumétrica.

Fonte: Inmetro/Dimci/Dinam

 INMETRO	DOQ-DIMCI-018	REV. 00	PÁGINA 13/30
--	----------------------	-------------------	------------------------

Nota 1 - Caso o medidor não tenha recurso de compensação automática, aplicar a correção em pós-processamento, conforme indicado na seção 9.3.4.

Nota 2 – Quando não for possível igualar toda a faixa de vazão mássica em operações com gás, recomenda-se igualar a rangeabilidade (*turndown ratio*) do medidor nas condições de calibração e de operação.

Nota 3 – Para a maioria das ligas metálicas apresentadas na norma ASME B31.1, a faixa de -50 °C a 150 °C apresenta não-linearidades no módulo de elasticidade abaixo de 0,5 %.

Nota 4 – De forma geral, tubos vibratórios construídos de acordo com especificações técnicas amplamente aceitas (por exemplo, ASME B31.3), terão um comportamento linear dentro da classe de pressão indicada.

9.4 Primeira calibração

Nos casos em que os procedimentos dispostos na seção 9.3 não forem executados em cada unidade produzida e a transferibilidade se der entre líquidos e gases, recomenda-se que a primeira calibração seja feita em um gás com propriedades semelhantes ao gás de operação, validando a transferibilidade.

Nota - Para operação em gás natural, é comum a substituição por ar ou nitrogênio; para operação com hidrogênio, é possível utilizar hélio, devido às suas propriedades físicas semelhantes.

9.5 Calibrações subsequentes

9.5.1 As calibrações subsequentes podem ser conduzidas nas condições de referência, em toda a faixa de vazão mássica de operação.

9.5.2 Na ocorrência de qualquer alteração no comportamento do medidor, é recomendado que o procedimento descrito na seção 9.3 seja realizado novamente.

Nota - A alteração no comportamento do medidor pode ser observada por meio de modificação nos indicadores de diagnósticos do medidor ou por uma mudança estatisticamente significativa nos resultados de calibração do medidor entre calibrações consecutivas ou em relação à calibração inicial.

9.6 Operação dos medidores

9.6.1 Para garantia da compensação adequada dos parâmetros de influência do medidor, é importante que os procedimentos utilizados durante a operação sejam os mesmos definidos na seção 9.3.4. É importante que o medidor sempre opere dentro dos limites estabelecidos na seção 9.3.3.

9.6.2 Nas seções anteriores foram dispostas orientações sobre efeitos que podem afetar o desempenho de um medidor de vazão Coriolis em condições de escoamento adequadas. No entanto, efeitos adversos ainda podem ocorrer ao se utilizar fluidos diferentes, como condensação ou efeito *Joule-Thompson*. É importante, também, verificar a compatibilidade química do material dos tubos vibratórios com o fluido operacional, assim como eventuais efeitos de erosão. Outro fator relevante é a queda de pressão ao longo dos tubos vibratórios: em situações extremas, a diferença de pressão entre a entrada e a saída do medidor pode provocar variações significativas na densidade do fluido, especialmente no caso de gases.

	DOQ-DIMCI-018	REV. 00	PÁGINA 14/30
---	---------------	------------	-----------------

9.6.3 Nos casos em que é viável realizar compensações em pós-processamento, ou através de uma correção pré-aplicada no fator de calibração, a prática de transferibilidade da calibração pode ser implementada. No entanto, é importante que os procedimentos de correção aplicados durante a operação sejam os mesmos estabelecidos durante a análise da transferibilidade.

9.7 Extrapolação

9.7.1 É importante evitar a extrapolação de resultados experimentais sempre que possível, devido ao risco de erros quando o comportamento do sistema fora do intervalo de dados não é bem conhecido. No entanto, em condições difíceis ou inviáveis de serem reproduzidas em laboratório, especialmente relacionadas à pressão e temperatura, é possível considerar, com cautela, a extrapolação dos resultados para valores superiores aos ensaiados (seção 9.3.3), quando há evidências de que o modelo de regressão (linear ou não linear) se mantém consistente fora do intervalo experimental.

9.7.2 Para se estimar os valores de incerteza associados ao valor do parâmetro extrapolado, é recomendado que seja utilizada uma regressão linear pelo método dos mínimos quadrados.

Nota - É importante assegurar que a extrapolação não ultrapasse a região de linearidade do parâmetro sob análise. Para a temperatura, essa região pode ser estabelecida como a faixa linear do módulo de elasticidade da liga metálica dos tubos vibratórios. Para a pressão, o limite elástico (valor da tensão a partir do qual o material começa a se deformar plasticamente) pode ser utilizado para a determinação da região de linearidade.

10 AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO E CRITÉRIOS DE ACEITAÇÃO DA TRANSFERIBILIDADE

Quando um medidor de vazão de fluidos Coriolis opera fora das condições em que foi calibrado, é conveniente que componentes adicionais de incertezas, relativos à contribuição dos parâmetros de influência considerados, sejam incluídos no balanço de incerteza.

Nota 1 - A metodologia aqui apresentada não é a única abordagem possível, porém apresenta uma metodologia conservadora e viável.

Nota 2 – Apesar da introdução de componentes adicionais de incerteza, a metodologia proposta contempla parâmetros de reproduzibilidade intrínsecos ao comportamento do medidor, os quais não são usualmente capturados em calibrações convencionais, promovendo, assim, maior robustez metrológica ao resultado da medição.

10.1 Avaliação da incerteza para cada parâmetro de influência na transferibilidade

A incerteza expandida para cada parâmetro de influência na transferibilidade, após a realização dos ensaios, pode ser calculada como:

$$U_{t,i} = k_{t,i} \sqrt{\left(\frac{U_{r,i}}{k_{r,i}}\right)^2 + \left(\frac{U_{e,i}}{k_{e,i}}\right)^2 + \left(\frac{U_i}{k_i}\right)^2} \quad (3)$$

Onde:

$U_{t,i}$, $k_{t,i}$ são as incertezas expandidas e fatores de abrangência de transferibilidade, para cada parâmetro, respectivamente.

$U_{r,i}$, $k_{r,i}$ são a incerteza expandida e o fator de abrangência obtidos na calibração de referência para o parâmetro em análise (9.3.2), respectivamente.

$U_{e,i}$, $k_{e,i}$ são a incerteza expandida e fator de abrangência obtidos no ensaio de cada parâmetro de influência (9.3.5), respectivamente.

U_i e k_i são a incerteza expandida e fator de abrangência associados à correção de cada um dos parâmetros de influência, respectivamente.

10.2 Para assegurar a adequação dos valores de incerteza atribuídos a cada um dos parâmetros de influência, o seguinte método estatístico pode ser aplicado:

$$\frac{|e_r - e_{e,i}|_{max}}{\sqrt{U_r^2 + U_i^2}} \leq 1 \quad (4)$$

10.3 É recomendável que as incertezas expandidas (U_i) e fatores de abrangência (k_i) associados à correção dos parâmetros de influência sejam determinadas previamente aos ensaios. Caso contrário, uma forma simples e conservadora de se estimar U_i é a partir da máxima diferença entre os erros apresentados pelo medidor obtidos na calibração de referência (e_r) e nos ensaios de cada um dos parâmetros ($e_{e,i}$), com distribuição de probabilidades (k_i) retangular, tal que:

$$\frac{U_i}{k_i} = \frac{|e_r - e_{e,i}|_{max}}{\sqrt{3}} \quad (5)$$

Nota – Uma vez que o cálculo da incerteza de transferibilidade considera as incertezas de referência e dos ensaios, o mínimo valor possível será limitado pela maior incerteza envolvida nos ensaios. Desta forma, não é possível que um medidor calibrado em água e operado em gás apresente incertezas de medição inferiores às obtidas com uma calibração com gás.

	DOQ-DIMCI-018	REV. 00	PÁGINA 16/30
---	---------------	------------	-----------------

10.4 Incerteza de calibração com transferibilidade

A incerteza associada ao valor do fator de calibração do medidor, após a aplicação de todas as correções ($U_{c,t}$), pode ser estimada como:

$$U_{c,t} = k_{c,t} \sqrt{\left(\frac{U_c}{k_c}\right)^2 + \sum \left(\frac{U_{t,i}}{k_{t,i}}\right)^2} \quad (6)$$

Onde $k_{c,t}$ é o fator de abrangência da calibração transferível, U_c e k_c são a incerteza expandida e o fator de abrangência da calibração, respectivamente.

Nota 1 - As equações para cálculo de incertezas (tanto de transferibilidade quanto de calibração) podem ser modificadas para que constem as correlações existentes entre as grandezas de entrada.

Nota 2 - Os cálculos para obtenção dos valores de incerteza, fatores de abrangência e graus de liberdade efetivos podem ser obtidos nas recomendações contidas no GUM.

Nota 3 – Caso o medidor opere – ou seja calibrado – na zona de influência de zero, é recomendável que a estabilidade de zero – medida ou declarada pelo fabricante – seja incluída nos cálculos.

10.5 Avaliação da incerteza para valores extrapolados

Nos casos em que há extração, a incerteza associada à regressão linear pode ser combinada à incerteza relacionada à transferibilidade do parâmetro em análise.

	DOQ-DIMCI-018	REV. 00	PÁGINA 17/30
---	---------------	------------	-----------------

10.6 Recomendações sobre os critérios de aceitação da transferibilidade

10.6.1 Para a aceitação da transferibilidade da calibração de um medidor de vazão Coriolis, recomenda-se que a incerteza expandida, após a aplicação de todas as correções, seja menor ou igual à incerteza máxima aceitável (U_{max}) para a aplicação, em todos os pontos de vazão mássica ensaiados:

$$U_{c,t} \leq U_{max} \quad (7)$$

10.6.2 A critério do usuário, outros aspectos podem ser avaliados nos resultados dos ensaios, a exemplo da repetibilidade, linearidade e erros máximos admissíveis.

11 HISTÓRICO DE REVISÃO E QUADRO DE APROVAÇÃO

Revisão	Data	Itens Revisados
00	Jul/2025	▪ Emissão inicial.

Quadro de Aprovação		
	Nome	Atribuição
Elaborado por:	Fábio Ouverney Costa	Pesq. Tecnologista em Metrologia e Qualidade
	Douglas de Almeida Garcia	Engenheiro Pesquisador
	Jorge Gomez Sanchez	Pesquisador
	Marcos Henrique G. de Aquino	Pesq. Tecnologista em Metrologia e Qualidade
	Werickson F. de Carvalho Rocha	Pesq. Tecnologista em Metrologia e Qualidade
Verificado por:	Anderson Mascarenhas Fontes	Bolsista
	Caroline Margarida Mendes Salgado	Assistente Executiva
	Priscila Costa Gabriel	Chefe do Laliq
	Samuel Araujo	Chefe do Lagas
	Gelson Martins da Rocha	Chefe e Gestor da Qualidade da Dinam
Aprovado por:	Erlon Henrique Martins Ferreira	Gestor da Qualidade da Dimci

/ANEXO A

ANEXO A - PROPRIEDADE DE GASES

A-1 Este anexo apresenta propriedades de velocidade do som e densidade para alguns dos gases mais comumente utilizados na indústria - especificamente, gás natural, ar, nitrogênio, dióxido de carbono, hélio e hidrogênio. Esses dados podem ser empregados para prever o efeito da velocidade do som no meio, calcular a velocidade de escoamento, dimensionar adequadamente o medidor, aplicar correções relacionadas à compressibilidade do fluido e estimar o número de Mach, além de auxiliar no desenvolvimento de matrizes de teste para verificação da transferibilidade de calibração.

A-2 As informações foram obtidas por meio do *software* RefProp 10, desenvolvido pelo NIST, e complementadas pelas equações da norma AGA 8, amplamente utilizada na modelagem termodinâmica de misturas gasosa para a indústria do petróleo. No caso do gás natural, as propriedades termofísicas foram calculadas com base na composição de referência apresentada na Tabela 1:

Tabela 1 - Composição dos gases

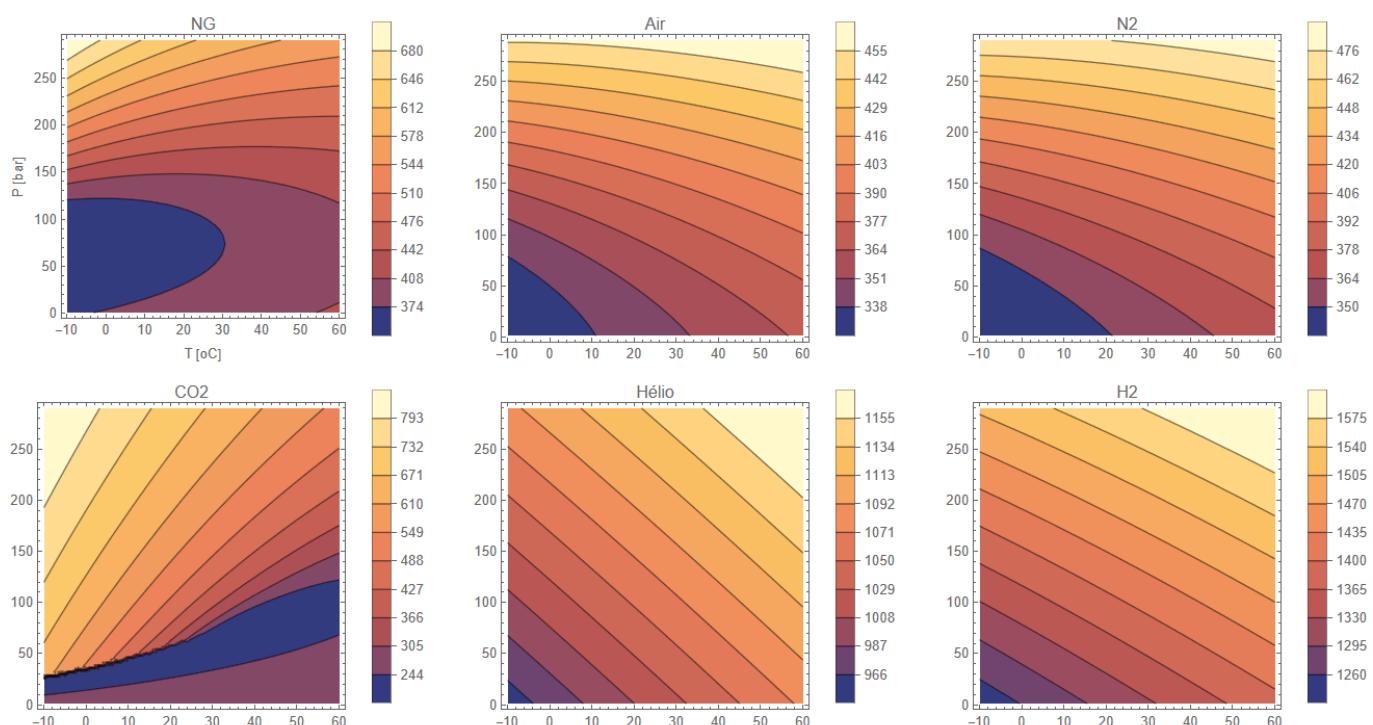
Fluido	Fração molar [%]	Fluido	Fração molar [%]
Água (H ₂ O)	0,01	Hidrogênio (H ₂)	0,40
Argônio (Ar)	0,10	Hélio (He)	0,70
Butano (C ₄ H ₁₀)	0,30	Isobutano (C ₄ H ₁₀)	0,15
Decano (C ₁₀ H ₂₂)	0,009	Isopentano (C ₅ H ₁₂)	0,05
Dióxido de carbono (CO ₂)	6,00	Metano (CH ₄)	77,8
Etano (C ₂ H ₆)	8,00	Monóxido de carbono (CO)	0,20
Heptano (C ₇ H ₁₆)	0,09	Nitrogênio (N ₂)	2,00
Hexano (C ₆ H ₁₄)	0,22	Nonano (C ₉ H ₂₀)	0,02
Hidrogênio sulfeto (H ₂ S)	0,25	Octano (C ₈ H ₁₈)	0,02
Oxigênio (O ₂)	0,50	Propano (C ₃ H ₈)	3,00
Pentano (C ₅ H ₁₂)	0,17		

Fonte: Inmetro/Dimci/Dinam

A-3 VELOCIDADE DO SOM

A Figura 1 apresenta mapas de contorno para velocidade do som em diversos gases em função da temperatura [°C] e pressão [bar].

Figura 1 - Velocidade do som no meio [m/s] em alguns gases, em função da temperatura [°C] e pressão [bar].

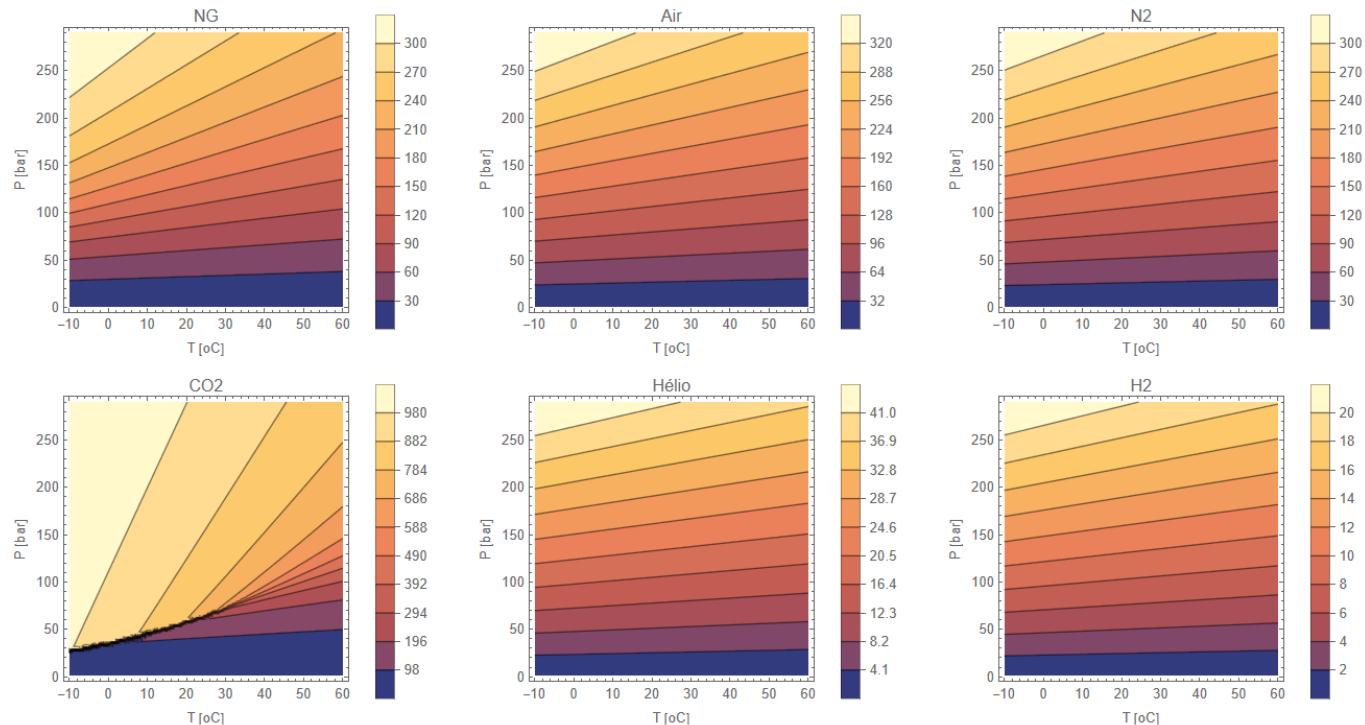


Fonte: Inmetro/Dimci/Dinam

A-4 DENSIDADE

A Figura 2 mostra os mapas de contorno de densidade para diversos gases em função da temperatura e da pressão.

Figura 2 - Densidade [kg/m³] em alguns gases, em função da temperatura [°C] e pressão [bar]



Fonte: Inmetro/Dimci/Dinam

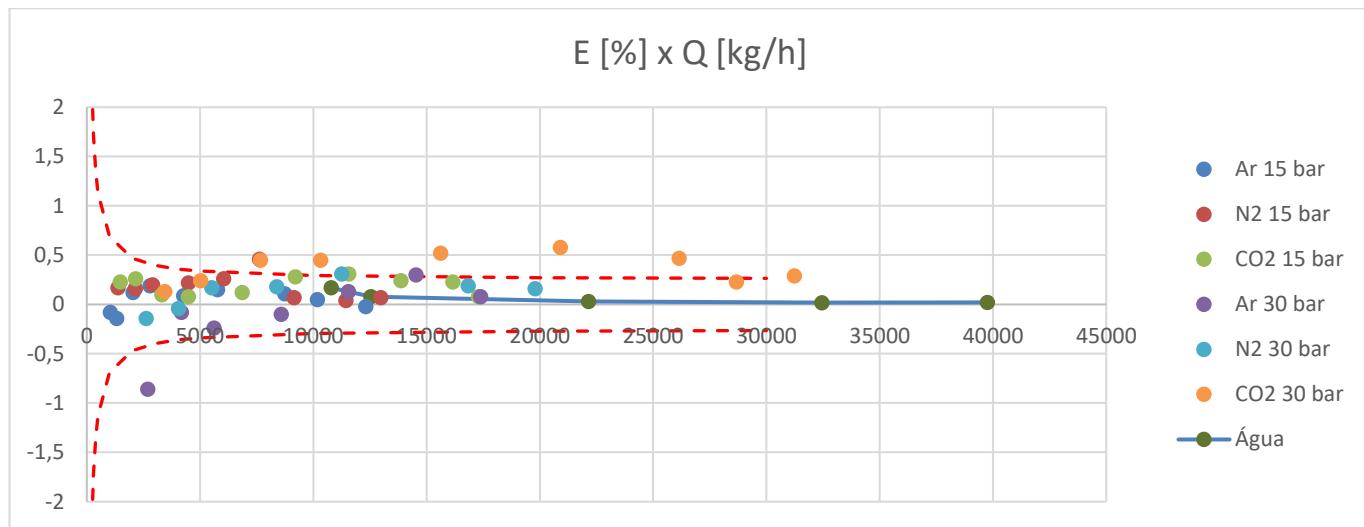
/ANEXO B

ANEXO B - Exemplos de aplicação da metodologia

B-1 Exemplo 1 – Análise completa de desempenho de medidor de 3 polegadas

B-1.1 O primeiro exemplo trata de um medidor de 3 polegadas, ensaiado em 15 e 30 bar, com ar, nitrogênio e dióxido de carbono, além de água a aproximadamente 2 bar. As incertezas para os ensaios com gás foram de aproximadamente 0,41 %, e com água, 0,07 %. Os resultados para os erros de medição, antes da aplicação de qualquer correção, podem ser vistos na Figura 1.

Figura 1 – Resultados dos erros de medição sem correções.



Fonte: Inmetro/Dimci/Dinam

B-1.2 As correções a serem realizadas neste medidor são as relacionadas à pressão e à velocidade do som. Como o medidor não possui nenhum recurso de compensação integrado, as correções serão realizadas em pós-processamento. Para o efeito de velocidade do som, a equação (1) será aplicada:

$$f_{sos} = \frac{1}{1 + \frac{\alpha_{sos}}{2} \left(\frac{\omega_d r}{c} \right)^2} \quad (1)$$

B-1.3 O diâmetro interno do tubo vibratório declarado pelo fabricante é de 44,7 mm e a frequência de vibração, obtida durante os ensaios, foi de aproximadamente 93 Hz, com uma pequena variação em função da pressão e densidade do fluido em ensaio. α_{sos} foi considerado unitário, tal que as correções aplicadas foram, aproximadamente:

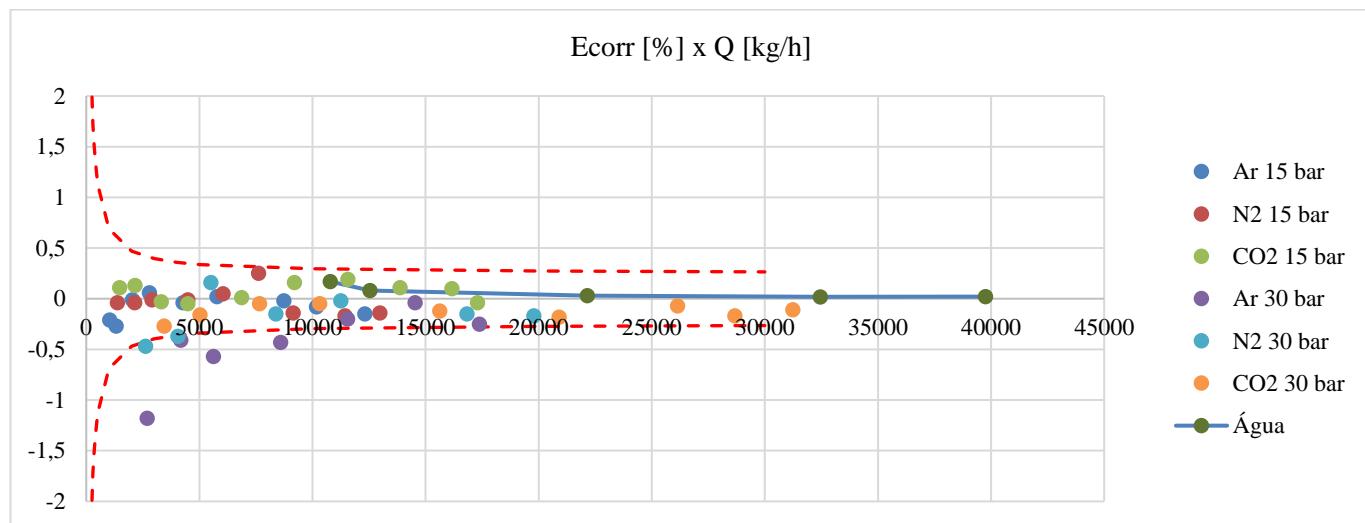
Tabela 1 - Correções aplicadas.

Condição	SOS [m/s]	f_{sos}
ar, 15 bar	345,6	0,9993
N ₂ , 15 bar	352,8	0,9993
CO ₂ , 15 bar	253,6	0,9986
ar, 30 bar	348,1	0,9992
N ₂ , 30 bar	354,0	0,9993
CO ₂ , 30 bar	239,3	0,9984

Fonte: Inmetro/Dimci/Dinam

B-1.4 Para este medidor, o coeficiente de pressão α_p declarado pelo fabricante é $-0.009\%/\text{bar}$ e a equação (1) será aplicada. A figura 2 mostra os resultados dos erros de medição após a aplicação das correções:

Figura 2 – Erros do medidor após correção de velocidade do som e de pressão.

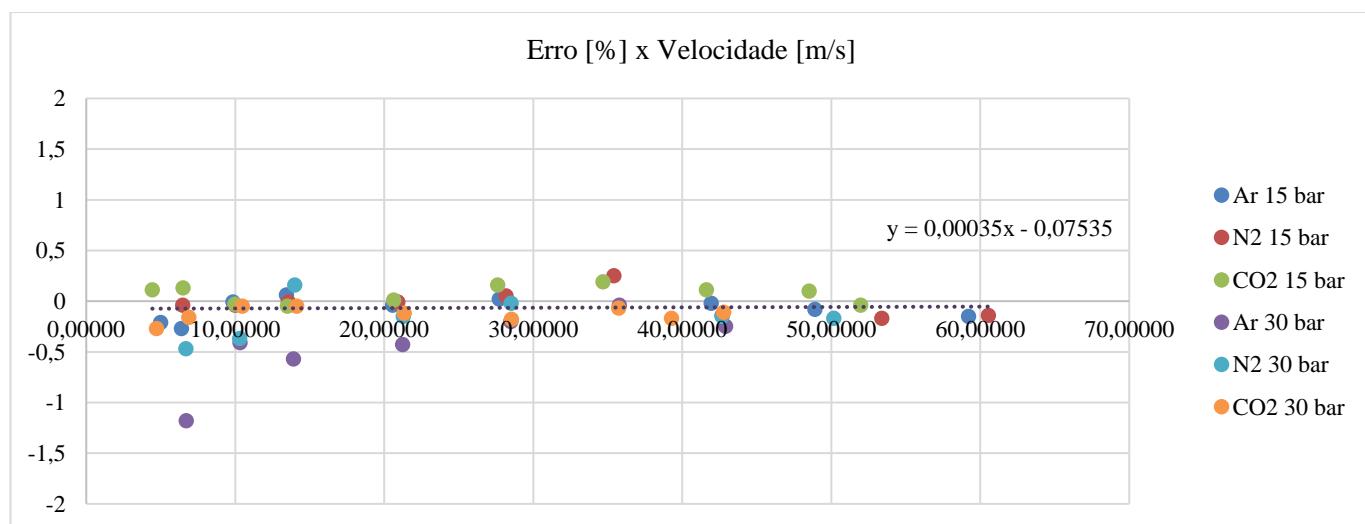


Fonte: Inmetro/Dimci/Dinam

B-1.5 Com exceção de alguns pontos em ar a 30 bar, todos os resultados ficaram dentro dos limites de exatidão especificados pelo fabricante. Os desvios que ocorreram com ar a 30 bar podem ser associados a um efeito de zero no medidor, observado seu aumento progressivo com a diminuição da vazão mássica.

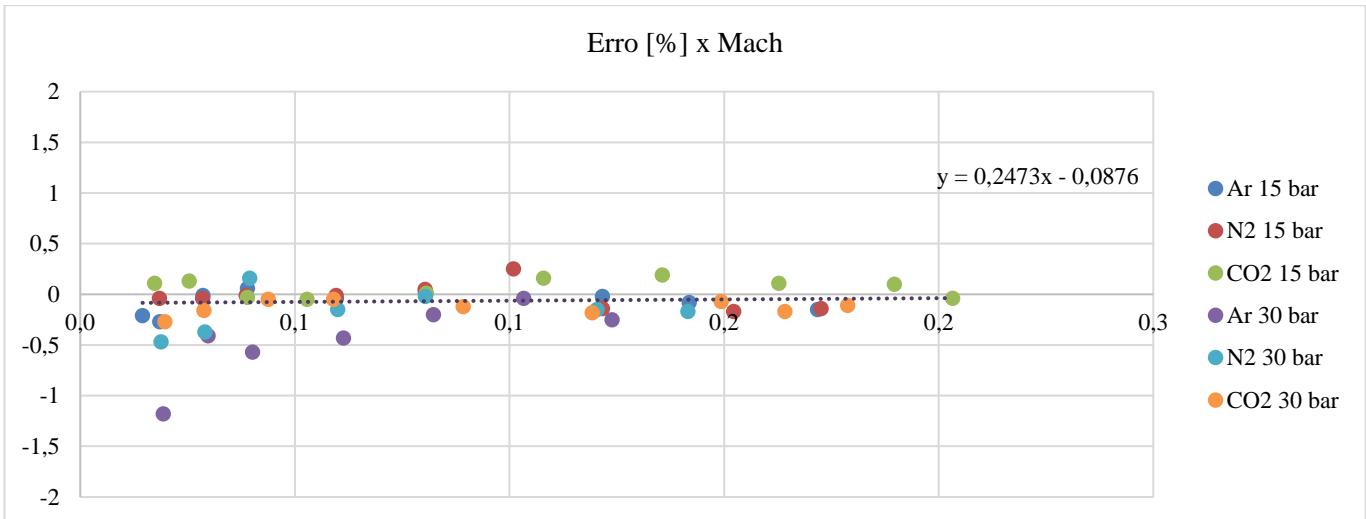
B-6 A segunda análise a ser realizada é a da influência da velocidade do escoamento e do número de Mach nos tubos vibratórios, que será feita sobre os valores corrigidos pela velocidade do som.

Figura 3 – Análise da influência da velocidade do escoamento na medição.



Fonte: Inmetro/Dimci/Dinam

Figura 4 – Análise da influência do número de Mach na medição.



Fonte: Inmetro/Dimci/Dinam

B-1.7 Na Figura 3 e Figura 4, é possível observar que o medidor não apresenta tendências de comportamento em relação à velocidade ou ao número de Mach do escoamento. Uma regressão linear, desconsiderando os 4 primeiros pontos para ar a 30 bar, confirmam esta análise. O valor do coeficiente da variável dependente (velocidade ou número de Mach) é inferior à incerteza do coeficiente, de forma que não é possível afirmar, estatisticamente, que estes parâmetros têm qualquer influência, até os limites testados, no comportamento do medidor:

Tabela 2 – Valores dos coeficientes e respectivas incertezas padrão

Parâmetro	Valor do coeficiente	Incerteza padrão do coeficiente
Velocidade do escoamento	0,00035 %/(m/s)	0,0013
Número de Mach	0,25	0,38

Fonte: Inmetro/Dimci/Dinam

B-1.8 Considerando a análise realizada, não será atribuída nenhuma correção específica aos parâmetros de velocidade do escoamento e número de Mach.

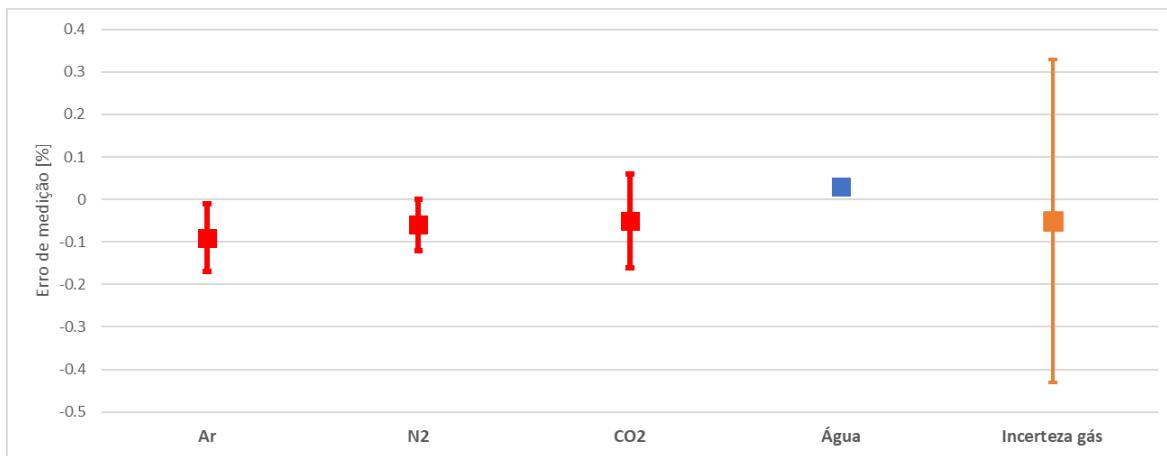
B-1.9 Adicionalmente, uma análise de variância sobre os resultados agrupados por fluidos confirma que não é possível atribuir ao tipo de fluido qualquer diferença entre os erros corrigidos do medidor, para um grau de confiança de 95% ($p = 0,268$).

Nota – A análise de variância não leva explicitamente em consideração a incerteza de medição, considerando apenas a variabilidade dos dados dentro e entre os grupos estudados. Desta forma, mesmo que o p-valor do teste seja menor que o nível de significância escolhido (normalmente, 5%), é sugerido que uma análise criteriosa seja realizada antes de se descartar a possibilidade de se realizar transferibilidade.

B-1.10 Uma análise adicional pode ser realizada: a Figura 5 apresenta, para cada fluido ensaiado (ar, N₂, CO₂ e água), a mediana dos resultados de desempenho do medidor, acompanhada do intervalo de variabilidade representado por \pm MAD (desvio absoluto mediano). A mediana fornece uma medida robusta da tendência central dos dados, enquanto o MAD expressa a dispersão em torno dessa mediana de forma menos sensível a *outliers* do que o desvio padrão. No caso em análise, as faixas de ar, N₂ e CO₂ se

interceptam amplamente, sugerindo desempenho equivalente nesses gases, enquanto água exibe um viés ligeiramente positivo. A última barra à direita, que representa a incerteza de medição para gases, abrange em muitas vezes todo o intervalo de mediana \pm MAD.

Figura 5 - Comparação das medianas \pm MAD para todos os fluidos ensaiados.



Fonte: Inmetro/Dimci/Dinam

B-1.11 Como todos os ensaios em gás foram realizados utilizando o mesmo padrão de referência, a fórmula da incerteza de transferibilidade pode ser ajustada para considerar a correlação entre os resultados. Considerando que a incerteza do método pode ser completamente correlacionada entre os ensaios, somente a incerteza tipo A dos ensaios precisa ser considerada, tal que a equação (2) se torna:

$$U_{t,i} = k_{t,i} \sqrt{s_{x_{r,i}}^2 + s_{x_{e,i}}^2 + \left(\frac{U_i}{k_i}\right)^2} \quad (2)$$

Onde $s_{x_{r,i}}$ e $s_{x_{e,i}}$ são os desvios padrões da média dos erros de medição obtidos na calibração de referência (CO_2) e nos ensaios de cada parâmetro (demais gases), respectivamente.

B-1.12 Neste exemplo, um único parâmetro, englobando todos os efeitos, será considerado, cuja incerteza foi estimada previamente em 0,1% ($k=2$). Os dados para cálculo da incerteza de transferibilidade podem ser vistos na Tabela 4, considerando os ensaios com CO_2 a 30 bar como referência.

Tabela 4 - Dados para cálculo da incerteza de transferibilidade entre CO_2 e gases.

CO ₂ a 30 bar (referência)	Gases	Parâmetro	Transferibilidade
U [%]	-	0,10	0,23
k	-	1,732	2,15
v	5	∞	18,91
s_x, u [%]	0,06	0,058	0,11

Fonte: Inmetro/Dimci/Dinam

B-2 Exemplo 2 – Análise completa de desempenho de medidor de 4 polegadas

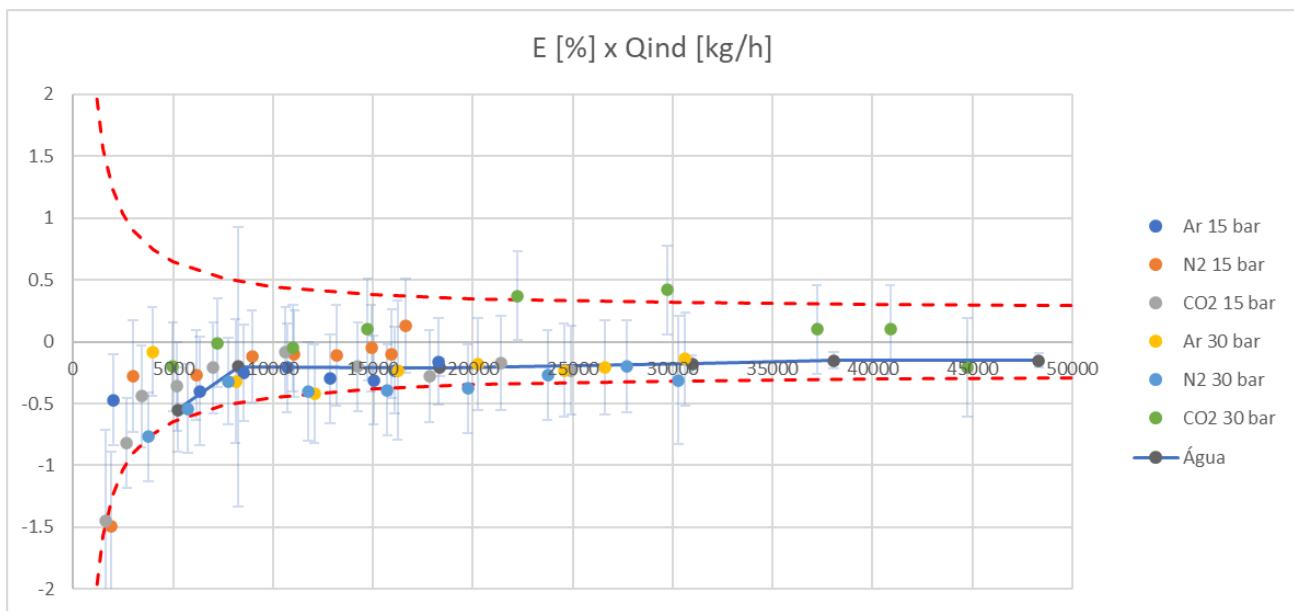
B-2.1 O segundo exemplo trata de um medidor de 4 polegadas, ensaiado com água a 2 bar e ar, nitrogênio e dióxido de carbono, em pressões próximas a 15 e 30 bar. Nestas condições, os limites, em relação à densidade, vazão mássica, velocidade de escoamento, número de Mach e velocidade do som no meio estão dispostos na Tabela 3, e os resultados dos erros corrigidos do medidor dos ensaios são apresentados na Figura 6.

Tabela 3 – Limites dos parâmetros analisados.

Parâmetro	Unidade	Mínimo	Máximo
Pressão	bar	2	30
Velocidade do som	m/s	240	1480
Densidade	kg/m ³	18	997
Velocidade do escoamento	m/s	0,17	32
Número de Mach	-	0	0,1

Fonte: Inmetro/Dimci/Dinam

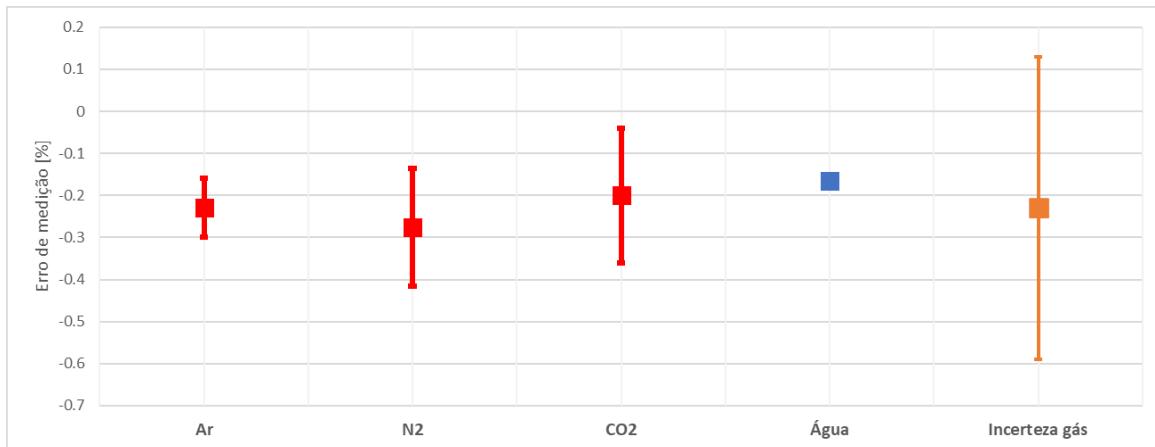
Figura 6 - Erros de medição (%) em função da vazão mássica (kg/h) para todos as condições ensaiadas



Fonte: Inmetro/Dimci/Dinam

B-2.2 Observa-se que, com exceção de dois pontos de vazão em CO₂, todos os resultados de erro de medição se mantiveram dentro dos limites de exatidão estabelecidos pelo fabricante. Ressalta-se, no entanto, que considerando-se a incerteza de medição associada a esses pontos, não é possível afirmar que o medidor apresentou desempenho fora dos limites. A Figura 7 mostra os valores das medianas dos erros corrigidos \pm MAD, confirmando que, considerando as incertezas de calibração, o medidor apresenta desempenho coerente para todos os fluidos ensaiados. Desta forma, a transferibilidade pode ser dada tanto entre diferentes gases quanto entre água e gás, mantidos os limites dos parâmetros ensaiados.

Figura 7 - Comparação das medianas do erro de medição (em %) \pm MAD para todos os fluidos ensaiados.



Fonte: Inmetro/Dimci/Dinam

B-2.3 Para esses ensaios, um único parâmetro, englobando os efeitos citados neste documento, será considerado, com incerteza expandida de 0,10 % ($k=2$), estimada previamente. Tomando as incertezas médias de calibração para gás e para água, conforme mostrado na Tabela , teremos uma incerteza de transferibilidade entre água e gás de 0,43 %, para $k=2$.

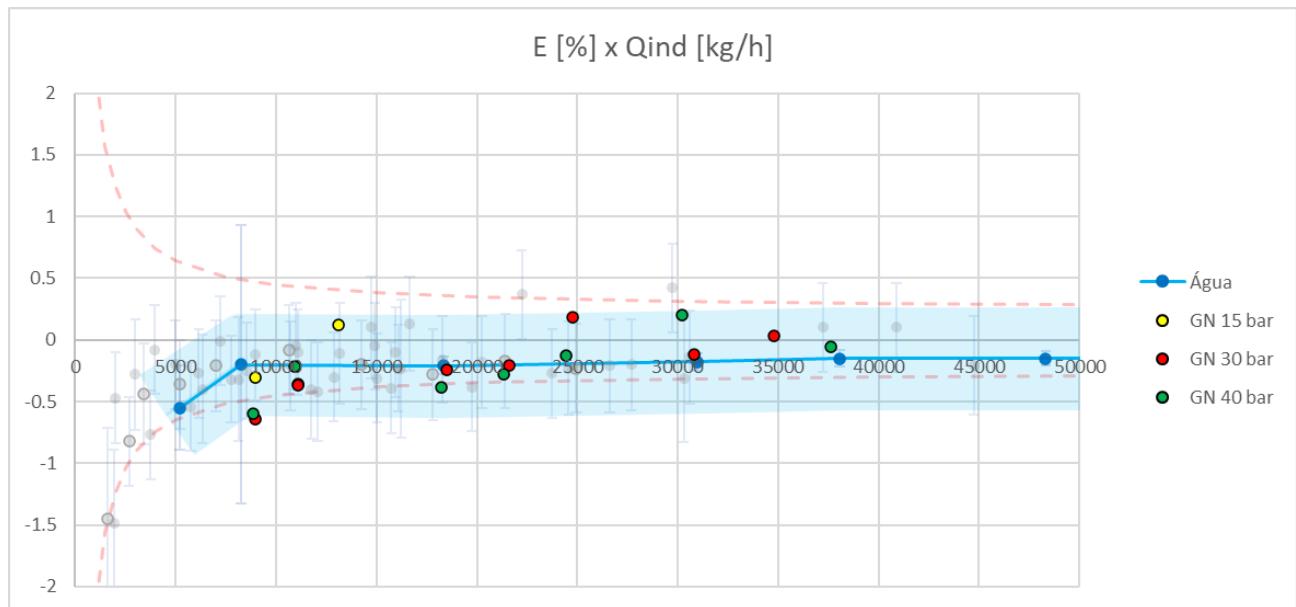
Tabela 4 - Dados para cálculo da incerteza de transferibilidade entre água e gás.

	Água	Gás	Parâmetro	Transferibilidade
U [%]	0,087	0,41	0,10	0,43
k	2,13	2	1,732	2,00
v	45	3000	∞	3342
u [%]	0,041	0,205	0,058	0,22

Fonte: Inmetro/Dimci/Dinam

B-2.4 Como ilustração adicional da metodologia, resultados de ensaios em gás natural a 15, 30 e 40 bar (Figura 8) foram confrontados com o envelope de incerteza composto pela calibração em água acrescida da incerteza de transferibilidade (0,43 %). Todos os pontos de medição se mantiveram dentro dessa faixa de incerteza, demonstrando que o procedimento de transferibilidade aplicado ao fluido de referência (água) é capaz de gerar resultados válidos também para gás natural.

Figura 8 - Resultados de erros de medição (%) em função da vazão mássica para ensaios utilizando gás natural.



Fonte: Inmetro/Dimci/Dinam

B-3 Exemplo – Análise teórica de influência de velocidade do som

B-3.1 Ao se especificar um medidor de vazão, é recomendado que o usuário verifique, teoricamente, qual a influência máxima que um determinado fator pode ter sobre a medição em vazão. Como exemplo, a Tabela 5 mostra os possíveis efeitos de velocidade do som em diversos medidores de um mesmo fabricante, a partir de dados disponíveis em catálogos:

Tabela 5 - Máximo erro (em %) causado pelo efeito da velocidade do som em diversos medidores.

DN	Diâmetro nominal Polegadas	Diâmetro interno [mm]	Frequência [Hz] Min Max	Velocidade do som [m/s]							
				250	300	350	400	450	500	550	600
DN3	0,17	2,54	100 150	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
DN3	0,17	2,9	100 150	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
DN6	0,25	4,83	100 150	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
DN6	0,25	5,23	100 150	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
DN10	0,38	6,92	100 150	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
DN15	0,5	7,49	150 300	0,04%	0,03%	0,02%	0,02%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%
DN15	0,5	8,51	150 300	0,05%	0,04%	0,03%	0,02%	0,02%	0,01%	0,01%	0,01%
DN15	0,5	8,76	100 150	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
DN20	0,75	11,3	100 150	0,02%	0,02%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
DN25	1	16,4	100 150	0,05%	0,03%	0,02%	0,02%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%
DN25	1	15	150 300	0,16%	0,11%	0,08%	0,06%	0,05%	0,04%	0,03%	0,03%
DN25	1	15,7	150 300	0,17%	0,12%	0,09%	0,07%	0,05%	0,04%	0,04%	0,03%
DN40	1,5	18,9	150 300	0,25%	0,18%	0,13%	0,10%	0,08%	0,06%	0,05%	0,04%
DN40	1,5	19,7	150 300	0,28%	0,19%	0,14%	0,11%	0,09%	0,07%	0,06%	0,05%
DN50	2	26,9	100	0,06%	0,04%	0,03%	0,02%	0,02%	0,01%	0,01%	0,01%
DN80	3	44,7	100	0,16%	0,11%	0,08%	0,06%	0,05%	0,04%	0,03%	0,03%
DN100	4	57,4	100 150	0,58%	0,40%	0,30%	0,23%	0,18%	0,15%	0,12%	0,10%
DN100-DN150	4 a 6	73	100 150	0,94%	0,65%	0,48%	0,37%	0,29%	0,24%	0,20%	0,16%
DN150-DN200	6 a 8	88,9	100	0,62%	0,43%	0,32%	0,24%	0,19%	0,16%	0,13%	0,11%
DN200-DN250	8 a 10	114	100	1,02%	0,71%	0,52%	0,40%	0,32%	0,26%	0,21%	0,18%
DN250-DN300	10 a 14	143	100	1,59%	1,11%	0,82%	0,63%	0,50%	0,40%	0,33%	0,28%

Fonte: Inmetro/Dimci/Dinam

B-3.2 Na

Tabela 5, é possível observar que todos os medidores com diâmetro inferior a DN20 (3/4 polegadas) ou inferior, não é esperado que o medidor tenha efeitos significativos relacionados à velocidade do som. No caso mais extremo, nos medidores de 10 a 14 polegadas, o efeito pode ser expressivo. Se o medidor for calibrado em um fluido com velocidade do som de 400 m/s (por exemplo, gás natural a 60 bar) e operado com fluido com velocidade do som de 600 m/s (por exemplo, gás natural a 250 bar), um erro adicional de 0,3% pode ocorrer.

B-4 Exemplo 4 – Exemplo de aplicação

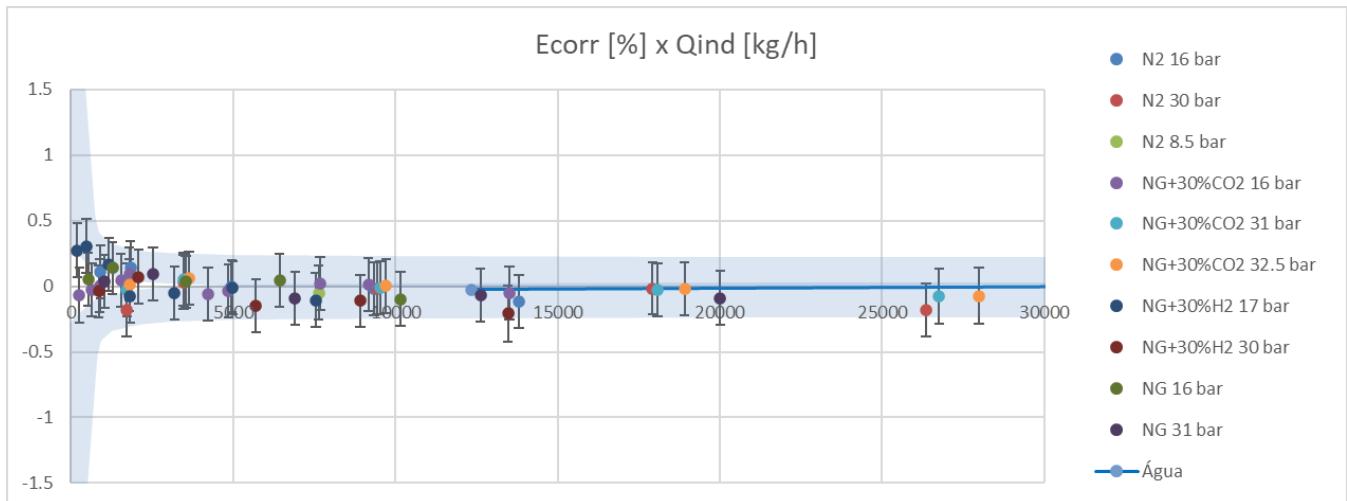
B-4.1 A Figura 9 apresenta resultados de medição para dois medidores Coriolis, de 2 e 3 polegadas, em paralelo. Os ensaios foram realizados com diversos gases, com grande variação dos parâmetros de influência, conforme indicado na Tabela 6. Ambos os medidores foram calibrados com água, com incerteza na ordem de 0,02 % ($k=2$) e corrigidos para os efeitos de pressão e velocidade do som, e possuem incerteza de medição de 0,20 %. As bandas azuis representam uma faixa de 0,20 % de incerteza, somadas à estabilidade de zero do medidor.

Tabela 6 - Limites de operação dos parâmetros de influência para as condições testadas.

Parâmetro	Unidade	Mínimo	Máximo
Pressão	bar	8,5	33,0
Velocidade do som	m/s	334,2	485,1
Densidade	kg/m ³	9,7	485,1
Velocidade do escoamento	m/s	3,4	62,8
Número de Mach	-	0,01	0,19

Fonte: Inmetro/Dimci/Dinam

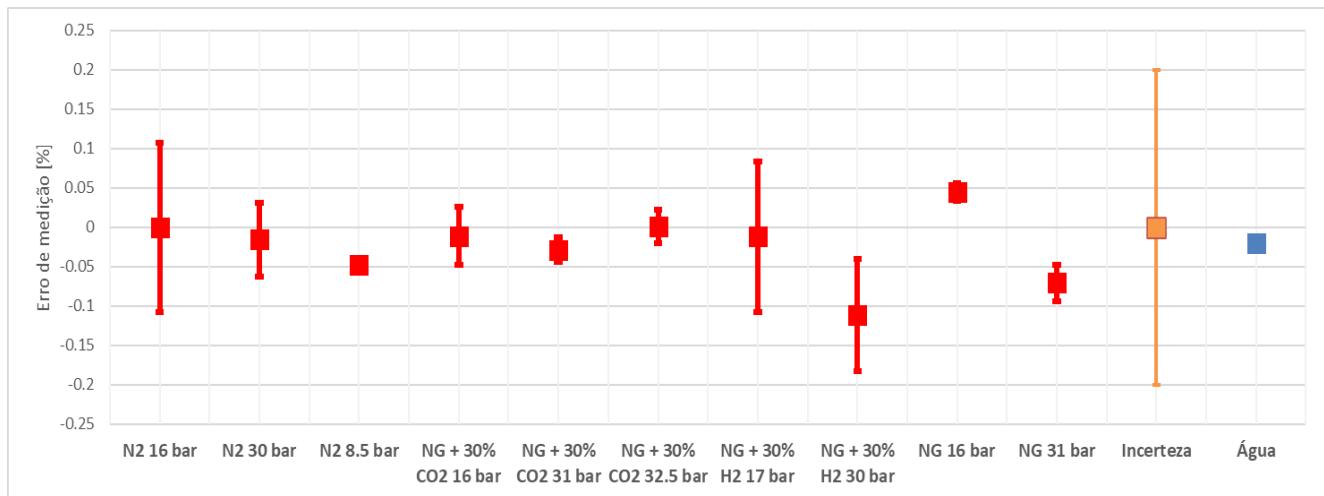
Figura 9 - Resultados de erros de medição corrigidos em função da vazão mássica para ensaios utilizando nitrogênio e misturas de gás natural.



Fonte: Inmetro/Dimci/Dinam

B-4.2 Por fim, o gráfico das medianas dos erros de medição \pm MAD (Figura 10) confirma que a calibração do medidor com água pode ser transferida a outros gases.

Figura 10 - Comparação das medianas do erro de medição \pm MAD para todos os fluidos ensaiados.



Fonte: Inmetro/Dimci/Dinam