




ESTIMATIVA DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO EM UM PROCESSO DE CALIBRAÇÃO DE UM MANÔMETRO

ESTIMATION OF MEASUREMENT UNCERTAINTY IN A PRESSURE GAUGE CALIBRATION PROCESS

Wellington Pereira Gomes*  E-mail: wellingtongomes1@aluno.uema.br

Raí Dias Almeida*  E-mail: raialmeida@aluno.uema.br

Samuel Victor dos Santos Araújo*  E-mail: samuel.araujo1@aluno.uema.br

*Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), São Luís, MA, Brasil.

Resumo: O conhecimento da incerteza de medição constitui uma parte indispensável nos resultados das medições, sendo elementos imprescindíveis para garantir a rastreabilidade e a precisão dos processos de fabricação, bem como para o controle e a regulamentação dos mesmos. O Guia para a Expressão da Incerteza de Medição (GUM) fornece diretrizes internacionais para avaliar a incerteza de medição, sendo reconhecido em diversas áreas como uma medida de confiabilidade e rastreabilidade. O presente artigo tem como objetivo determinar a incerteza de medição em um processo de calibração de um manômetro, pelo método GUM. Os resultados indicam que as incertezas expandidas para os pontos de 30 kgf/cm², 45 kgf/cm² e 75 kgf/cm² do manômetro variam entre 0,57062832 kgf/cm² e 0,637725568 kgf/cm², demonstrando uma faixa confiável de valores dentro da qual a verdadeira pressão medida pode estar contida, para uma probabilidade de abrangência de 95,45 %. Adicionalmente, mediante a análise dos resultados obtidos, constatou-se que a incerteza associada à resolução do manômetro foi a maior contribuição para a incerteza expandida nos três pontos de medição. Essas descobertas comprovam a solidez da metodologia empregada na avaliação da incerteza relacionada às medições de pressão, estabelecendo assim uma base firme para investigações futuras.

Palavras-chave: Incerteza de medição. Guia. Manômetro. Probabilidade.

Abstract: The knowledge of measurement uncertainty is an indispensable part of measurement results, being essential elements to ensure traceability and accuracy of manufacturing processes, as well as for their control and regulation. The Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) provides international guidelines for assessing measurement uncertainty, recognized in various fields as a measure of reliability and traceability. This article aims to determine the measurement uncertainty in a pressure gauge calibration process using the GUM method. The results indicate that the expanded uncertainties for the points of 30 kgf/cm², 45 kgf/cm², and 75 kgf/cm² of the pressure gauge range between 0.57062832 kgf/cm² and 0.637725568 kgf/cm², demonstrating a reliable range of values within which the true measured pressure may lie, with a coverage probability of 95.45%. Additionally, through the analysis of the results obtained, it was found that the uncertainty of the gauge resolution was the largest contribution to the expanded uncertainty at the three measurement points. These findings confirm the robustness of the methodology used in evaluating the uncertainty related to pressure measurements, thus establishing a solid foundation for future investigations.

Keywords: Measurement uncertainty. Guide. Pressure gauge. Probability.

1 INTRODUÇÃO

Ao relatar o resultado de uma medição de uma grandeza física, é obrigatório fornecer alguma indicação quantitativa da qualidade do resultado (Veen; Cox, 2021). Sem tal indicação, os resultados de medição não podem ser comparados, nem entre si nem com valores de referência fornecidos em uma especificação ou padrão (GUM, 2008). Portanto, a representação completa desse mensurando deverá incluir a dúvida deste resultado, a qual é traduzida pela sua incerteza de medição (INMETRO, 2008).

A incerteza de medição, tal como definida no Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM, 2012), representa a característica metrológica do resultado de medição que mais precisamente quantifica a componente de precisão associada à exatidão da medição. Segundo Magalhães (2021), essa condição é essencial para o estabelecimento da rastreabilidade e da compatibilidade metrológica do resultado de medição de um mensurando.

Em distintos campos da metrologia, a consideração das incertezas de medição assume significativa relevância na determinação do resultado real das medições. A importância associada à identificação clara das fontes, bem como à expressão correta da incerteza dos resultados de medição, estende-se além dos laboratórios de calibração e ensaios, pois deve ser amplamente usado no âmbito da metrologia legal e industrial (Santos, 2011).

A técnica mais conhecida para avaliação e expressão da incerteza de medição, é conhecida como ISO GUM. Sua primeira publicação ocorreu em 1993, pela ISO (*International Organization for Standardization e Guide to Expression of Uncertainty in Measurement*), em conjunto com o BIPM (*Bureau International des Poids et mesures*) e outras entidades internacionais reconhecidas (Nogueira *et al.*, 2012).

O Guia para Expressão de Incerteza de Medição (GUM) adota uma abordagem que combina conceitos estatísticos da abordagem frequencista (incerteza do Tipo A) e da abordagem Bayesiana (incerteza do Tipo B) (Donatelli; Konrath, 2005). O método proposto pelo Guia ISO consiste em propagar as estimativas das grandezas de entrada e suas incertezas padrão através de uma aproximação linear da função de medição, de modo a avaliar a incerteza padrão e a incerteza expandida da grandeza de saída, isto é, o mensurando (Martins, 2010).

Este artigo tem como objetivo utilizar a metodologia proposta pelo GUM para determinar a incerteza de medição em um processo de calibração de um manômetro, demonstrando alguns aspectos importantes, como estimar e descrever a incerteza em uma determinada variável, além de apresentar um passo a passo simplificado para o seu cálculo. Acredita-se que este estudo contribuirá com a literatura disponível na área de avaliação de incerteza, auxiliando na análise de dados experimentais de maneira simples, clara e objetiva.

Para o alcance do objetivo principal, o trabalho está dividido da seguinte forma: na primeira parte, são descritos cada estágio do Guia ISO, incluindo a avaliação da incerteza padrão, derivada da combinação das incertezas padrão do Tipo A e do Tipo B, a avaliação da incerteza-padrão combinada e a incerteza expandida. Na segunda parte, a metodologia do GUM é aplicada no estudo de caso, apresentando os resultados sobre o método proposto.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os tópicos subsequentes (2.1 a 2.4), abordarão a versão JCGM 100 de 2008 do Guia para Expressão de Incerteza de Medição (GUM), publicado pela ISO (*International Organization for Standardization*), em conjunto com o BIPM (*Bureau International Des Poids Et Mesures*).

2.1 Modelo matemático

Para avaliar a incerteza de medição pelo GUM, é necessário estabelecer um modelo matemático, conforme demonstrado na Equação 1.

$$Y = f(X_1, X_2, X_3... X_n) \quad (1)$$

Onde Y corresponde à quantidade ou medida que está sendo efetuada ou avaliada. Já $(X_1, X_2, X_3... X_n)$, referem-se aos parâmetros ou variáveis independentes que são consideradas no processo de medição. Denominam-se, neste contexto, Y como a grandeza de saída ou mensurando e X_n como a grandeza de entrada. O mensurando Y não é medido diretamente, mas é determinado, a partir de n outras grandezas de entrada X_n , por uma relação funcional (JCGM, 2009). Faes e Moens

(2020) salientam que, embora a função f seja geralmente expressa de forma analítica, em certas circunstâncias, ela pode ser descrita por meio de um conjunto de expressões. Essas expressões incorporam correções e fatores de ajuste para contemplar efeitos sistemáticos específicos. Incerpi (2008) afirma que este cenário resulta em uma equação mais complexa, impossibilitando sua representação por uma função analítica explícita.

O GUM (2008) apresenta diversos exemplos de mensurandos, como o volume de um recipiente, a massa de um objeto em uma balança, a diferença de potencial elétrico entre os terminais de uma bateria, ou ainda a concentração de chumbo na água contida em um frasco.







O estabelecimento adequado da função de medição (Equação 1) é fundamental na determinação do resultado de uma medição e de sua incerteza associada (Martins, 2010). Psaros *et al.* (2023) ressaltam que, se o modelo não representar bem o processo de medição, resultados enganosos, tanto para o mensurando quanto para sua incerteza, podem ser alcançados.

No método proposto pelo guia, cada incerteza da grandeza de entrada X_n possui uma Função de Densidade de Probabilidade (FDP), ou, *Probability Density Function* (PDF). De acordo com Hernandez (2020), algumas distribuições de probabilidade comumente utilizadas nos dados de entrada são:

1. Normal (Gaussiana) – O usuário define a média (o valor esperado) e o desvio padrão associado à média. Os valores mais próximos da média possuem maior probabilidade de ocorrência. Essa distribuição é simétrica e representa uma série de eventos naturais. Normalmente é usada para incertezas provenientes de certificados de calibração;
2. Retangular (Uniforme) – O usuário define o máximo e o mínimo, e todos os valores têm a mesma probabilidade de ocorrência nessa distribuição. Essa é a distribuição mais conservadora de todas;
3. Triangular – O usuário define os valores mínimo, máximo e provável. Os valores próximos do valor provável têm maior probabilidade de ocorrer.

As funções probabilísticas mais conhecidas estão ilustradas na Figura 1.

Figura 1 – Funções de Densidade de Probabilidade (FDPs)

Informação disponível	FDP atribuída e ilustração (escala arbitrária)
Limites inferior e superior a, b	Retangular: $R(a, b)$ 
Limites inferior e superior não exatos $a \pm d, b \pm d$	Trapezoide curvilíneo: $CTrap(a, b, d)$ 
Soma de duas grandezas com distribuições retangulares atribuídas com limites inferiores a_1, b_1 e limites superiores a_2, b_2	Trapezoidal: $Trap(a, b, \beta)$ com $a = a_1 + a_2$, $b = b_1 + b_2$, $\beta = (b_1 - a_1) - (b_2 - a_2) / (b - a)$ 
Soma de duas grandezas com distribuições retangulares atribuídas com limites inferiores a_1, b_1 e superiores a_2, b_2 e mesma semi-largura ($b_1 - a_1 = b_2 - a_2$)	Triangular: $T(a, b)$ com $a = a_1 + a_2, b = b_1 + b_2$ 
Sinusoidal entre limites inferior e superior a, b	Arco seno (formato de U): $U(a, b)$ 
Melhor estimativa x e incerteza-padrão associada $u(x)$	Gaussiana: $N(x, u^2(x))$ 

Fonte GUM (2008).

Roald *et al.* (2023) enfatizam que os parâmetros estatísticos mais relevantes da Função de Densidade de Probabilidade (FDP), do ponto de vista metrológico, incluem a esperança $E[X]$, que representa o valor esperado de uma variável aleatória, e a variância $Var[X]$ que representam os parâmetros esperança e variância, respectivamente. Dessa maneira, o GUM define que o resultado de uma medição é obtido pelo primeiro momento estatístico, expresso como:

$$\mu_x = E[X] = \int_{-\infty}^{\infty} \xi g_x(\xi) d\xi \quad (2)$$

Em que ξ representa os valores possíveis de uma variável aleatória x , a qual possui uma FDP de uma função $g_x(\xi)$ (função com comportamento aleatório). A incerteza padrão de medição $u(\mu_x)$ associada ao resultado de medição μ_x é relacionada com o segundo momento estatístico centrado na esperança (Reis, 2017), logo:

$$u^2(u_x) = Var[X] = \int_{-\infty}^{+\infty} (\xi - \mu_x)^2 g_x(\xi) d\xi \quad (3)$$

Conforme evidenciado nas fórmulas 2 e 3, é necessário conhecer a FDP da grandeza de entrada para expressar o resultado da medição e sua respectiva incerteza padrão. No que diz respeito às grandezas de entrada X_n , o GUM adota dois métodos para obter essas FDPs: o primeiro consiste em obter uma FDP a partir de uma série de observações independentes (uma distribuição de frequência); o segundo método é a determinação de uma FDP *a priori* proveniente de um levantamento de informações das grandezas estabelecidas (Martins *et al.*, 2010).

2.2 Incertezas tipo A e tipo B

O GUM classifica as incertezas obtidas a partir das distribuições de frequência como incertezas padrão do tipo A, e as incertezas a partir de FDPs *a priori* como incertezas padrão do Tipo B (Reis, 2017). Assunção *et al.* (2024) ressaltam que a incerteza padrão do tipo A (u_A) é obtida por meio da análise estatística, utilizando o desvio padrão σ dos n valores experimentais. Nesse contexto, a FDP associada à incerteza do tipo A é gaussiana. A Equação 4 apresenta o cálculo específico da incerteza do tipo A.

$$u_A(x) = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

Na avaliação da incerteza do tipo B, utilizam-se fontes de informações disponíveis sobre o processo de medição. Segundo Gheysen *et al.* (2024), quando a Função de Densidade de Probabilidade (FDP) de uma grandeza de entrada X_n é derivada do conhecimento geral ou da experiência relacionada ao processo de medição, o GUM classifica isso como uma FDP *a priori*, indicando que a forma dessa FDP é conhecida previamente. Assim, a incerteza padrão do tipo B é fundamentada em conceitos da estatística Bayesiana (Lira, 2008). A FDP *a priori* pode assumir várias formas, conforme ilustrado na Figura 1.

As informações para compor a incerteza do tipo B podem incluir dados históricos de medições, experiência ou conhecimento geral sobre o procedimento de medição, propriedades relevantes de materiais ou instrumentos de medição, especificações do fabricante, dados de calibração e outros certificados, bem como

incertezas associadas a dados de referência presentes em manuais (GUM, 2008). A Equação 5 ilustra o cálculo da incerteza do tipo B.

$$u_B(x\hat{i}) = \frac{E_m}{div} \quad (5)$$

Onde:

$u_B(x\hat{i})$ = A incerteza padrão do tipo B;

E_m = O erro máximo do instrumento medido;

div = Divisor aleatório

Para Hagan e Cox (2023), o valor do divisor div da Equação 5 depende da forma da FDP conhecida. Alguns desses valores estão apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 – Valores de divisores para determinação da incerteza do tipo B

Fonte de incerteza	Divisor (div)	FDP
Escala do instrumento	$2\sqrt{3}$	Retangular
Certificado de calibração	k	Gaussiana
Catálogo do instrumento	$\sqrt{3}$	Retangular
Variações de temperatura no instrumento	$\sqrt{6}$	Triangular

Fonte: Adaptado de Reis (2017).

Um estudo da aplicação de outras FDPs *a priori*, como a trapezoidal e sinusoidal, pode ser consultado no trabalho de Saxena e Kumar (2024). Outros trabalhos apresentam um estudo mais detalhado da avaliação da incerteza do Tipo B em problemas específicos de medição, tais como momento magnético (Aguillard *et al.*, 2023), largura de cordões de solda (Arencibia; Ribeiro, 2009) e revisão da medida de um rotor (Chao *et al.*, 2023). Este último aborda um extenso estudo sobre os conceitos da estatística Bayesiana.

2.3 Método de propagação de incertezas

O cerne do Guia é quantificar o resultado de uma medição (mensurando) e sua incerteza-padrão combinada a partir das várias grandezas de entrada X_n , utilizando um modelo de medição previamente estabelecido (Martins *et al.*, 2010). Este método envolve a propagação das estimativas, das incertezas padrão (tipo A e B) e dos coeficientes de correlação das grandezas de entrada através de uma aproximação

linear pela série de Taylor da função de medição (Martins, 2010). Logo, o modelo matemático (Equação 1) pode ser reescrito como:

$$Y \approx Y_{1ord} = f(\mu_{x_1}, \dots, \mu_{x_n}) + \sum_{n=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_n} \right) (x_n - \mu_{x_n}) \quad (6)$$

Panteghini (2024) afirma que o resultado da medição pode ser determinado a partir da esperança das variáveis aleatórias com FDP conhecida. Portanto, ao se aplicar o operador esperança em ambos os lados da Equação 6, encontra-se:

$$\mu_Y \approx f(\mu_{x_1}, \dots, \mu_{x_n}) \quad (7)$$

No entanto, para Martins (2010), as esperanças das variáveis aleatórias no processo de medição são desconhecidas. Então, utiliza-se suas respectivas estimativas, então a Equação 7, torna-se:

$$y \approx y_{1ord} = f(x_1, \dots, x_N) \quad (8)$$

De acordo com Panteghini (2024), para determinar a incerteza padrão-combinada da melhor estimativa do mensurando Y , é utilizado o segundo momento estatístico central ou operador variância (Equação 2). Portanto, ao aplicar o operador esperança em ambos os lados da expressão resultante do desvio quadrático entre a Equação 6 e a Equação 8 a incerteza padrão-combinada é representada por:

$$u_{c(y)} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial y}{\partial x(i)} \cdot u(x_i) \right]^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{\partial y}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial y}{\partial x_j} \cdot u(x_i) \cdot u(x_j) \cdot r(x_i, x_j)} \quad (9)$$

Onde $u_{c(y)}$ é a incerteza-padrão combinada; $u(x_i)$, a incerteza padrão de uma grandeza de influência $x_i \partial y / \partial x_i$, o coeficiente de sensibilidade da grandeza x_i ; e $r(x_i, x_j)$, o coeficiente de correlação x_i e x_j (Coral, 2018). O valor da incerteza-padrão combinada também engloba as incertezas herdadas dos padrões, conforme as diretrizes dos certificados de calibração correspondentes (GUM, 2008).

Zhang (2021) questiona o uso da incerteza-padrão combinada na avaliação da incerteza de medição em modelos matemáticos não lineares ou que apresentem variáveis preponderantes não normais, afirmando que isso pode levar a incertezas inadequadas. Forbes (2012) acrescenta que, em modelos não lineares, a relação entre as variáveis de entrada pode ser complexa, tornando a determinação da incerteza uma tarefa desafiadora, exigindo o cálculo das derivadas parciais da Equação 9. No entanto, se o modelo de medição for linear (Equação 1), o cálculo das derivadas parciais não é necessário.

2.4 Incerteza expandida e graus de liberdade efetivos

O GUM (2008) sustenta a utilização da incerteza-padrão combinada $u_{c(y)}$ como um parâmetro para expressar de forma quantitativa a incerteza do resultado de medição em diversas situações. Holas e Kaminska (2023) corroboram essa abordagem, oferecendo justificativas quantitativas para empregar a incerteza-padrão combinada como um parâmetro associado ao resultado de uma medição.

Entretanto, conforme apontado por Reis (2017), as indústrias, comércios e agências regulamentadoras reconhecem a importância de fornecer uma medida de incerteza que estabeleça um intervalo em torno do resultado da medição, abrangendo uma ampla gama de valores atribuíveis ao mensurando. Rodrigues *et al.* (2023) ressaltam que essa medida adicional de incerteza, que atende a esse critério, é conhecida como incerteza expandida, representada por U .

A incerteza expandida U é definida como a grandeza que estabelece um intervalo em torno do resultado de uma medição, esperando-se que englobe uma grande fração da distribuição de valores que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando (VIM, 2012). Incerpi (2008) aponta que essa fração pode ser interpretada como a probabilidade de abrangência ou nível de confiança do intervalo. Para obtê-la, multiplica-se a incerteza-padrão combinada $u_{c(y)}$ por um fator de abrangência k (GUM, 2008). A Equação 10 ilustra o procedimento para calcular a incerteza expandida.

$$U=k.u_{c(y)} \quad (10)$$

Neudecker *et al.* (2023) afirmam que o conhecimento da incerteza expandida requer a expressão do resultado de uma medição como um intervalo de abrangência simétrico, representado por $Y = [y \pm U(y)] = (y \pm k \cdot u_{c(y)})$, em que y é a estimativa do mensurando. Nessa representação, o mensurando Y é delimitado pelos valores $y-U$ e $y+U$ para uma determinada probabilidade de abrangência p . Para Robbi *et al.* (2015), o valor estimado y do mensurando é obtido com base em análise estatística ou outros meios, como tabelas, constantes físicas, certificados de calibração etc. Para um processo de várias medições, o melhor estimador é a média aritmética μ dos n valores experimentais.

Para determinar a variável k da Equação 10, é necessário calcular os graus de liberdade efetivos V_{eff} da incerteza-padrão combinada; os V_{eff} (Equação 11) são uma medida da incerteza de $u_{c(y)}$ e representam um fator-chave na determinação do fator de abrangência k (Frenkel, 2006).

$$V_{eff} = \frac{u_{c(y)}^4}{\sum_{i=1}^n V_{re}^{-1} \cdot \left(\frac{dy}{dx_i} \cdot u(x_i) \right)^4} \quad (11)$$

Onde:

V_{re} = Graus de Liberdade;

$u_{c(y)}$ = Incerteza-padrão combinada;

$u(x_i)$ = incerteza de uma grandeza de influência (Tipo A ou B).

Para Forbes (2012), a fórmula de Welch-Satterthwaite (Equação 11) é uma boa aproximação para estimar os graus de liberdade efetivos e, conseqüentemente, o intervalo de abrangência do mensurando. Willink (2008), por sua vez, aponta que a fórmula de Welch-Satterthwaite requer uma abordagem cuidadosa. Como discutido por Hagan e Cox (2023), a Equação 11 foi desenvolvida numa abordagem frequencista (avaliação do Tipo A da incerteza padrão), enquanto que o GUM, além de empregar essa abordagem, também incorpora a estatística Bayesiana para a avaliação do Tipo B da incerteza padrão.

Segundo King *et al.* (2019), a abordagem frequencista na análise de medições envolve a avaliação de cada grandeza de entrada X_n da função de mediação através

de uma série de n medições independentes. Nesse contexto, cada estimativa e sua incerteza padrão do Tipo A possuem $V_{re} = n - 1$ graus de liberdade.

Em contrapartida, a análise do Tipo B da incerteza padrão estabelece uma FDP *a priori* (tópico 2.2). Essencialmente, essa abordagem pressupõe que os graus de liberdade se aproximem do infinito ($V_{re} \rightarrow \infty$), de maneira intuitiva (Willink, 2008). Essa tendência é observada uma vez que o valor da incerteza padrão, $u(xi)$, resultante desse tipo de avaliação, é presumivelmente conhecido (GUM, 2008). Porém, a depender da qualidade de informação utilizada para a estimativa da PDF *a priori*, os graus de liberdade V_{re} não podem ser considerados como um valor demasiadamente grande (tendendo ao infinito) (Martins, 2010).

Neste contexto, pode-se inferir que a aplicação efetiva da fórmula de Welch-Satterthwaite é viável somente se o mensurando Y possuir pelo menos uma incerteza do tipo A associada à grandeza de entrada X_n . Essa hipótese pode ser considerada correta caso cada estimativa represente a média de várias observações amostradas (Frenkel, 2006).

A Tabela 1, conhecida como tabela t de Student, é uma ferramenta estatística utilizada para identificar os valores de k com base nos graus de liberdades efetivos.

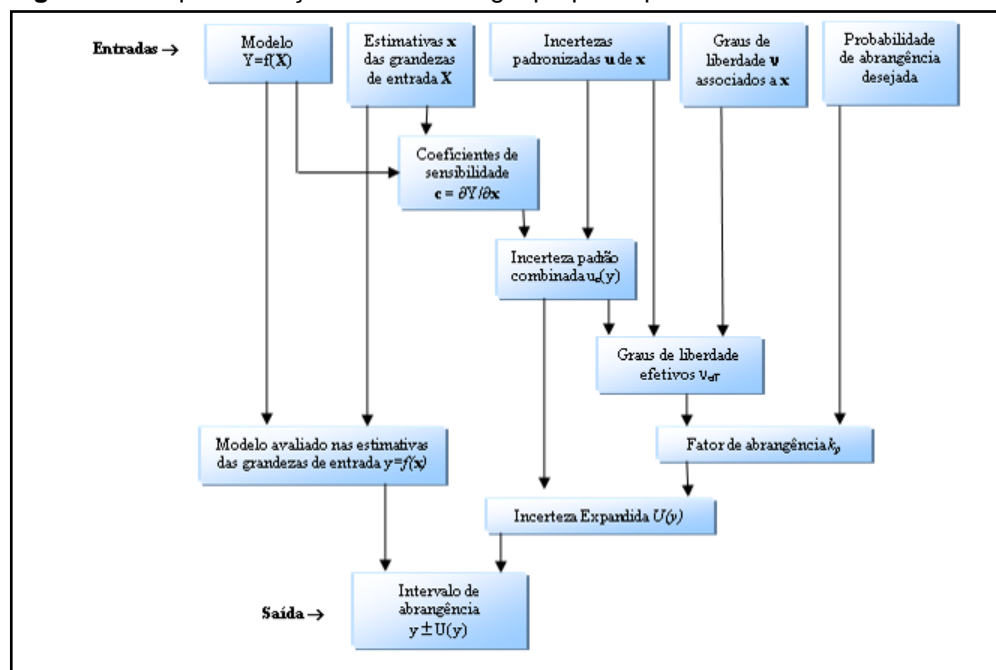
Tabela 1 – Distribuição t de Student

Graus (V_{eff})	Fração p em porcentagem					
	68,27 ^{a)}	90	95	95,45 ^{b)}	99	99,73 ^{a)}
1	1,84	6,31	12,71	13,97	63,66	235,78
2	1,32	2,92	4,3	4,53	9,92	19,21
3	1,2	2,35	3,18	3,31	5,84	9,22
4	1,14	2,13	2,78	2,87	4,6	6,62
5	1,11	2,02	2,57	2,65	4,03	5,51
6	1,09	1,94	2,45	2,52	3,71	4,9
7	1,08	1,89	2,36	2,43	3,5	4,53
8	1,07	1,86	2,31	2,37	3,36	4,28
9	1,06	1,83	2,26	2,32	3,25	4,09
10	1,05	1,81	2,23	2,28	3,17	3,96
11	1,05	1,8	2,2	2,25	3,11	3,85
12	1,04	1,78	2,18	2,23	3,05	3,76
13	1,04	1,77	2,16	2,21	3,01	3,69
14	1,04	1,76	2,14	2,2	2,98	3,64
15	1,03	1,75	2,13	2,18	2,95	3,59
16	1,03	1,75	2,12	2,17	2,92	3,54
17	1,03	1,74	2,11	2,16	2,9	3,51
18	1,03	1,73	2,1	2,15	2,88	3,48
19	1,03	1,73	2,09	2,14	2,86	3,45
20	1,03	1,72	2,09	2,13	2,85	3,42
25	1,02	1,71	2,06	2,11	2,79	3,33
30	1,02	1,7	2,04	2,09	2,75	3,27
35	1,01	1,69	2,03	2,07	2,72	3,23
40	1,01	1,68	2,02	2,06	2,7	3,2
45	1,01	1,68	2,01	2,06	2,69	3,18
50	1,01	1,68	2,01	2,05	2,68	3,16
100	1,005	1,66	1,984	2,025	2,626	3,077
∞	1	1,645	1,96	2	2,576	3

Fonte: Adaptado de GUM (2008).

Os valores de k praticados pela indústria são quase sempre 2 e 3, para $p = 95\%$ e 98% de confiabilidade, respectivamente (Reis, 2017). O resumo da metodologia do GUM pode ser visualizado na Figura 2.

Figura 2 – Esquematização da metodologia proposta pelo GUM



Fonte: Adaptado de Landgraf e Stempniak (2004).

As definições essenciais para a correta aplicação do método GUM são explicadas por Bich, Cox e Harris (2003) e Kusnandar *et al.* (2024). Além disso, outros artigos na literatura que fornecem uma breve revisão do método GUM incluem: Cox *et al.* (2003); Kacker e Jones (2003); White e Saunders (2007); Jurado, Ludvigson e Serena (2015). Seoni *et al.* (2023) apresentam um passo a passo simplificado para utilizar inteligências artificiais como ferramenta para auxiliar no detalhamento da incerteza de medição. Por fim, Rearden *et al.* (2017) apresentam um estudo explicando os coeficientes de sensibilidade, apresentados na Equação 9.

3 METODOLOGIA

Quanto à sua natureza, este estudo classifica-se como uma pesquisa aplicada, uma vez que visa gerar conhecimentos direcionados à solução de problemas específicos relacionados à metrologia. Sob a perspectiva da abordagem, a pesquisa pode ser classificada como quali-quantitativa, incorporando o uso de técnicas

matemáticas, considerando que um determinado modelo será avaliado e alguns dados quantitativos precisam ser fornecidos (Silva; Menezes, 2005).

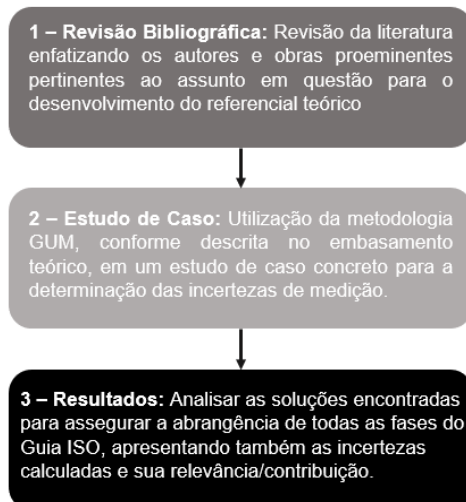
Esta pesquisa também incorpora uma revisão bibliográfica, pois para estabelecer a fundamentação teórica dentro do contexto estudado, foi conduzida uma pesquisa bibliográfica com o intuito de buscar embasamento para uma melhor compreensão dos conceitos e abordagens disponíveis na literatura. Após a revisão teórica, a pesquisa foi estruturada por meio de um estudo de caso, o qual apresenta a resolução da determinação das incertezas em um modelo de medição, utilizando a metodologia proposta pelo GUM.

De acordo com Yin (2004), o estudo de caso é um método de investigação que se caracteriza pela análise aprofundada de uma determinada realidade. Em relação aos estudos de caso, representam a estratégia preferida quando se colocam questões do tipo “como” e “por que”, quando o pesquisador tem pouco controle sobre os eventos e quando o foco se encontra em fenômenos contemporâneos inseridos em algum contexto da vida real (Deus; Vaccarro, 2009).

Segundo Dubé e Paré (2003), os "Estudos de Caso" são apropriados quando o objeto de investigação é complexo e quando o fenômeno estudado não pode ser analisado fora do contexto em que ocorre. Esse método de investigação também é apropriado nos casos em que é necessária profundidade na pesquisa (Eisenhardt, 1989).

Subsequentemente, apresentam-se os resultados obtidos com o estudo de caso. A Figura 3 ilustra as etapas do desenvolvimento do trabalho.

Figura 3 – Esquematização do trabalho



Fonte: Autores (2024).

Os dados coletados para o estudo foram obtidos em um laboratório de metrologia, um ambiente especialmente projetado e equipado com instrumentação de última geração para garantir a precisão e a consistência das medições.

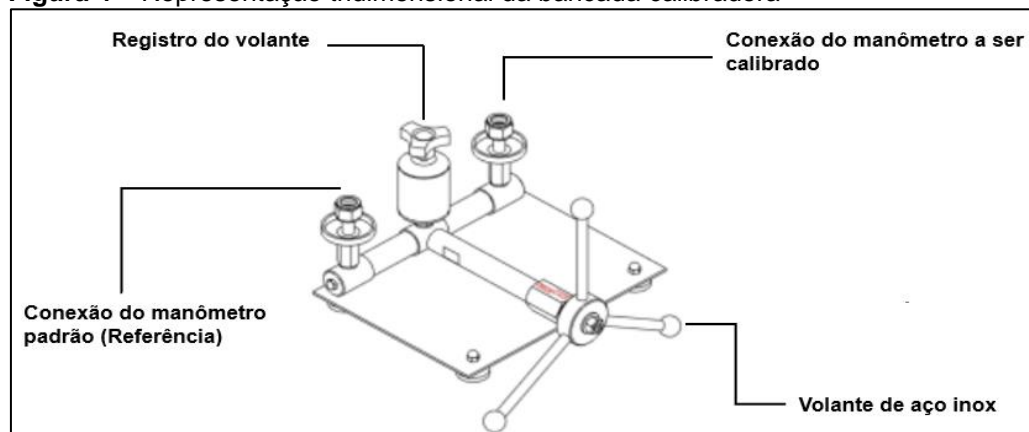
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a aplicação da metodologia proposta pelo GUM, será apresentado um estudo de caso, no qual se pretende avaliar a incerteza de medição em um processo de calibração de um manômetro. No tópico 4.1, serão apresentadas as especificações dos instrumentos de medição utilizados, juntamente com as variáveis de entrada requeridas para o cálculo das incertezas. No tópico 4.2, o cálculo das incertezas será realizado, seguido pela apresentação dos resultados do estudo de caso.

4.1 Coleta de dados do manômetro

O estudo inicia-se com as especificações dos instrumentos. O instrumento a ser calibrado é um manômetro com resolução de 1 kgf/cm^2 e faixa nominal de 0 a 160 kgf/cm^2 . Para o experimento, também foi utilizado um manômetro padrão com resolução de $0,1 \text{ kgf/cm}^2$ e faixa de indicação nominal de 0 a 200 kgf/cm^2 . Além disso, o manômetro padrão possui uma incerteza declarada no próprio certificado de $0,1 \text{ kgf/cm}^2$, em relação ao fundo da escala. O dispositivo utilizado para comparar os valores fornecidos pelo manômetro a ser calibrado (indicação) e o valor de referência do manômetro padrão (valor verdadeiro) foi uma bancada de calibração de manômetro. A Figura 4 ilustra as componentes da bancada de calibração.

Figura 4 – Representação tridimensional da bancada calibradora



Fonte: Autores (2024).

Inicialmente, o manômetro padrão e o manômetro a ser calibrado são posicionados na bancada de calibração em seus respectivos locais de conexão. Posteriormente, uma pressão é aplicada à bancada através do volante; os ponteiros dos manômetros avançam e as leituras do manômetro a ser calibrado são registradas em incrementos de 1 kgf/cm². Em seguida, a pressão é gradualmente reduzida até que os ponteiros retornem às suas posições de referência. Durante esse processo de redução da pressão, as leituras do manômetro a ser calibrado são novamente coletadas em intervalos de 1 kgf/cm². Este procedimento também envolve ajustar e corrigir a pressão para cima ou para baixo do manômetro a ser calibrado, com base no valor de referência do manômetro padrão, aguardando a estabilidade por no máximo 1 minuto. Foram realizados 3 ciclos de pressão e redução da pressão na bancada de calibração, totalizando 6 medições de avanço e retorno.

A Tabela 2 apresenta os valores obtidos para os pontos de calibração de 30 kgf/cm², 45 kgf/cm² e 75 kgf/cm² do manômetro.

Tabela 2 – Valores coletados do experimento

Parâmetros	Pontos de calibração		
	30 kgf/cm ²	45 kgf/cm ²	75 kgf/cm ²
Avanço	29,8	45	75
Retorno	29,6	44,6	74,6
Avanço	29,7	45,1	75
Retorno	29,7	44,7	74,6
Avanço	29,8	45,1	75
Retorno	29,7	44,7	74,6
Média	29,71667	44,86667	74,8
Desvio Padrão (σ)	0,0753	0,2251	0,2191

Fonte Autores (2024).

Conforme apresentado na Tabela 2, os experimentos foram repetidos em múltiplas ocasiões, resultando em diversos valores para cada ponto de calibração. Nesse contexto, adota-se a média das indicações μ como uma estimativa do valor verdadeiro das leituras do manômetro, no qual a média se aproxima do valor verdadeiro à medida que o número de leituras aumenta.

O procedimento inicial para a avaliação da incerteza de medição, conforme proposto pelo GUM, consiste em estabelecer a função de medição do sistema. Em seguida, realiza-se a avaliação da função metrológica das grandezas de entrada, que, neste caso, corresponde às leituras do manômetro. Seguindo esta abordagem, o modelo matemático proposto para avaliar as incertezas associadas à leitura do

manômetro, que é linear neste caso devido à independência de suas variáveis, é apresentado na Equação 12.

$$L_m = I + R + R_m + H + h \quad (12)$$

Onde:

L_m = Leitura do Manômetro;

I = Médias das indicações

R = Resolução do manômetro padrão;

R_m = Resolução do manômetro;

H = Histerese;

h = Herdada.

O próximo passo, descrito no GUM (tópico 2.1 a 2.4), consiste em atribuir as incertezas padrão (tipo A ou B) para cada componente das grandezas de entrada do modelo matemático (Equação 12). Dessa forma, as seguintes incertezas foram consideradas para o presente trabalho: incerteza de repetibilidade (tipo A), incerteza associada à resolução do manômetro padrão (tipo B), incerteza associada à resolução do manômetro (tipo B), incerteza da histerese (tipo B) e incerteza herdada do material (tipo B).

4.2 Cálculo das incertezas de medição

A incerteza associada à média das leituras, também conhecida como incerteza de repetibilidade (IR), foi calculada com base na equação 4. No ponto de 30 kgf/cm², para $n = 6$, e com desvio padrão de 0,0753 kgf/cm² obteve-se uma repetibilidade de 0,030732 kgf/cm². O mesmo procedimento foi aplicado para os pontos de 45 kgf/cm² e 75 kgf/cm², e foram obtidos os seguintes valores para a incerteza da repetibilidade: 0,0904 kgf/cm² e 0,08914672 kgf/cm², respectivamente.

A Incerteza da histerese (IH) difere da deformação permanente de um elemento medido após uma carga excessiva. Em termos simples, quando um determinado material é submetido a tensões constantes, a histerese surge devido à resposta diferenciada que o instrumento de medição apresenta quando é estimulado no sentido de aumento ou redução da pressão. No caso do manômetro, a incerteza da histerese foi calculada a partir da Equação 5, onde o erro máximo (E_m) adotado foi a média do

avanço subtraída da média do retorno e aplicado um divisor (*div*) de $2\sqrt{3}$ (correspondente a uma distribuição retangular). Com isso, para os pontos de 30 kgf/cm², 45 kgf/cm² e 75 kgf/cm², foram obtidos os seguintes valores: 0,02886751 kgf/cm², 0,1154701 kgf/cm² e 0,09622408 kgf/cm², respectivamente.

A incerteza associada à resolução do manômetro padrão (*IRP*), que se refere à menor mudança no valor da medida que o instrumento pode detectar, foi calculada através da Equação 5, com o $E_m = 0,1$ kgf/cm² e $div = 2\sqrt{3}$. O valor obtido foi de 0,028868 kgf/cm² para os três pontos de calibração.

Por outro lado, em relação à incerteza associada à resolução do manômetro (*IRM*), foi adotado o erro máximo de 1 kgf/cm², que representa sua resolução. Utilizando a Equação 5, obteve-se o valor de 0,288675 kgf/cm² para os pontos de medição selecionados, considerando $div = 2\sqrt{3}$.

Por fim, a Incerteza herdada (*Ih*) do manômetro foi determinada com base nas informações do certificado do manômetro padrão. Para os pontos de 30 kgf/cm², 45 kgf/cm² e 75 kgf/cm², foram obtidos os respectivos valores: 0,029717 kgf/cm², 0,044867 kgf/cm² e 0,0748 kgf/cm².

Os resultados das incertezas para os pontos de calibração escolhidos estão representados na Tabela 3.

Tabela 3 – Incertezas de medição tipo A e B para os respectivos pontos de calibração

Incertezas	Pontos de calibração e Graus de liberdades			
	30 kgf/cm ²	45 kgf/cm ²	75 kgf/cm ²	Graus de Liberdade (<i>Vre</i>)
<i>IR (A)</i>	0,030596	0,091886	0,090655	5
<i>IRP (B)</i>	0,028868	0,028868	0,028868	∞
<i>IRM (B)</i>	0,288675	0,288675	0,288675	∞
<i>IH (B)</i>	0,025019	0,115342	0,123752	∞
<i>Ih (B)</i>	0,029717	0,044867	0,0748	∞

Fonte: Autores (2024).

Com base nos resultados da Tabela 3, observa-se que a incerteza associada à resolução do manômetro *IRM* é consistentemente a mais elevada entre todas as fontes de incerteza consideradas, independentemente do ponto de referência de pressão analisado. Isso se deve ao fato de que a resolução do manômetro a ser calibrado é de 1 kgf/cm², o que restringe a precisão das medições e, conseqüentemente, influencia sua incerteza associada.

Os graus de liberdade V_{re} de *IR* (Tabela 3) foram calculados usando a fórmula $V_{re} = n - 1$, onde n representa os valores experimentais ou o tamanho da amostra.

Considerando que foram realizadas 6 medições para cada ponto de calibração, então $V_{re} = 5$ para os três pontos de referências. Ademais, as incertezas padrão IRP , IRM e IH e ih possuem graus de liberdade igual a ∞ , uma vez que apresentam uma Função Densidade de Probabilidade (FDP) *a priori*.

Em seguida, realizou-se o cálculo da incerteza-padrão combinada $u_{c(y)}$ dos graus de liberdade efetivos V_{eff} da incerteza expandida U e do fator de abrangência k , conforme proposto pelo guia. Os resultados desses parâmetros estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Incerteza expandida e combinada em diferentes pontos de calibração

Pontos de calibração (kgf/cm ²)	Parâmetros			
	$u_{c(y)}$	(V_{eff})	(k)	(U)
30	0,294299	42800,68028	1,96	0,573672655
45	0,328522	817,0170884	1,96	0,637725568
75	0,336593	950,220675	1,96	0,63065971

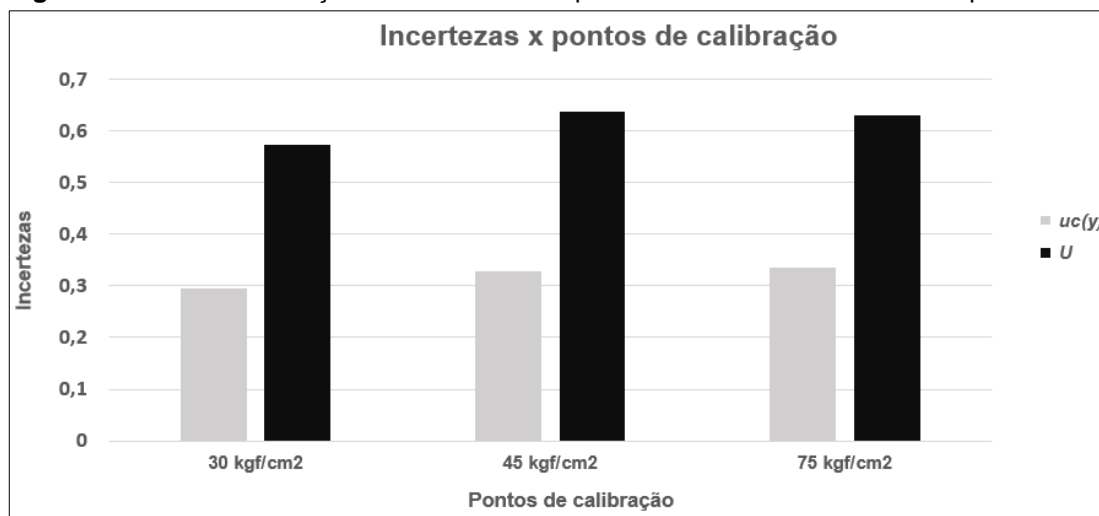
Fonte: Autores (2024).

Conforme observado na Tabela 4, os valores críticos da distribuição t de Student (representados como k) foram consistentes, registrando-se como 1,96 para todas as medições. Isso sugere um nível de confiança de aproximadamente 95%.

Dado que as informações sobre a incerteza expandida U e a estimativa y (Tabela 2) do mensurando estão disponíveis, é possível determinar o resultado de medição. Neste caso, o resultado de medição do manômetro em cada ponto de calibração é definido pelo intervalo ($\mu \pm U$). Para o ponto de 30 kgf/cm², por exemplo, com uma incerteza expandida de 0,57 kgf/cm², é possível afirmar que o intervalo no qual a verdadeira pressão medida pode estar contida, com um nível de confiança de 95%, é de $(29,71 \pm 0,57)$ kgf/cm². Para o ponto de 45 kgf/cm², com uma incerteza expandida de 0,63 kgf/cm² o intervalo é de $(45,86 \pm 0,63)$ kgf/cm², enquanto para 75 kgf/cm² com um valor semelhante da incerteza expandida do ponto de 45 kgf/cm², o intervalo é de $(74 \pm 0,63)$ kgf/cm².

A Figura 5 demonstra uma comparação gráfica entre a incerteza padrão-combinada $u_{c(y)}$ e a incerteza expandida U nos diferentes pontos de calibração.

Figura 5 – Gráfico de relação entre a incerteza-padrão combinada e incerteza expandida



Fonte: Autores (2024).

Como ilustrado na Figura 4, os valores de $u_c(y)$ mostram-se relativamente baixas, variando entre 0,294299 kgf/cm² e 0,336593 kgf/cm², e com níveis de confiabilidade limitados. Em contrapartida, as incertezas expandidas U variam de 0,57 kgf/cm² a 0,63 kgf/cm², proporcionando uma margem mais conservadora para a análise dos dados, considerando um fator de abrangência k de 95%. Nota-se que a incerteza expandida aumenta conforme a referência de pressão se eleva, refletindo as variações nas condições de medição e nas características do equipamento.

A partir dos resultados obtidos, ao considerar a incerteza expandida e os intervalos de confiança, é possível obter uma compreensão mais abrangente da variação dos dados e da confiabilidade das medições. Portanto, não é viável utilizar a incerteza-padrão combinada como fator para expressar o resultado de medição. Adicionalmente, a utilização dos valores críticos da distribuição t de Student proporciona uma base sólida para estabelecer os limites de confiança, permitindo uma interpretação mais precisa dos resultados.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo, realizou-se uma análise extensiva do método proposto pelo Guia para a Expressão da Incerteza de Medição (GUM). Ao longo do trabalho foram apresentadas as definições, terminologias e procedimentos de cálculo, conforme a literatura, utilizados para a avaliação da incerteza-padrão combinada e expandida.

Para validar e explorar este método, a metodologia foi implementada em um processo de calibração de um manômetro em um laboratório de metrologia.

O modelo matemático utilizado na determinação da incerteza de medição durante a calibração do manômetro foi linear, como indicado pela Equação 9, sendo assim, não houve necessidade dos cálculos complexos das derivadas parciais da Equação 6, proposta pelo GUM. Essa simplificação permitiu uma análise mais direta e rápida da incerteza de medição, contribuindo para a eficiência do processo de avaliação. Ademais, foi possível calcular de maneira efetiva a fórmula de Welch-Satterthwaite para encontrar o fator de abrangência k , uma vez que o modelo matemático uma incerteza do tipo A, que neste caso é a incerteza da repetibilidade IR .

Os valores das incertezas expandidas encontrados para os pontos de 30 kgf/cm², 45 kgf/cm² e 75 kgf/cm² variam entre $\pm 0,57$ kgf/cm², $\pm 0,63$ kgf/cm² e $\pm 0,63$ kgf/cm², respectivamente, considerando uma probabilidade de abrangência de 95,45%. É importante notar que a incerteza expandida associada ao ponto de 30 kgf/cm² é a menor entre os pontos avaliados. Observou-se que a incerteza associada à resolução do manômetro (IRM) foi a fonte de maior contribuição para a incerteza expandida em todos os três pontos de medição. Algumas medidas podem ser tomadas com o intuito de diminuir essa incerteza, dentre elas: utilizar um manômetro com uma faixa nominal maior; utilizar um manômetro com uma resolução igual ao manômetro padrão durante a calibração.

Este trabalho contribui para o entendimento de um método que se destaca como uma alternativa mais sólida e eficaz para avaliar a incerteza de medição. De forma simplificada, este método permite determinar com precisão o valor da incerteza em modelos de medição linear. Recomenda-se para estudos futuros a utilização da metodologia para determinar a incerteza de medição em processos similares de calibração em laboratórios de metrologia.

REFERÊNCIAS

AGUILLARD, D. P. *et al.* Measurement of the positive muon anomalous magnetic moment to 0.20 ppm. **Physical review letters**, v. 131, n. 16, 2023.

ARENCIBIA, R. V.; RIBEIRO, J. R. DOS S. Incerteza na medição da largura de cordões de solda. **Soldagem e Inspecao / Welding and Inspection**, v. 14, n. 3, p. 263–269, 2009.

ASSUNÇÃO, W. *et al.* Contribuições para o cálculo da incerteza de medição por Simulação de Monte Carlo em um processo de calibração de Micrômetro. **Revista Contemporânea**, v. 4, n. 7, p. e5087, 2024.

BICH, W.; COX, M. G.; HARRIS, P. M. Evolution of the 'guide to the expression of uncertainty in measurement'. **Metrologia**, v. 43, n. 4, p. S161–S166, 2006.

CHAO, F. *et al.* A state-of-the-art review on uncertainty analysis of rotor systems. **Mechanical systems and signal processing**, v. 183, n. 109619, p. 109619, 2023.

CORAL, R. Propagação de Incertezas de Medição através de Redes Neurais Artificiais utilizando o Método de Monte Carlo. **Revista Eletrônica Técnico Científica do IFSC**, v.2, n. 1, p. 70-76, 2018.

COX, M. G. *et al.* Model-based measurement uncertainty evaluation, with applications in testing. **Accreditation and quality assurance**, v. 8, n. 12, p. 548–554, 2003.

COX, M.; HARRIS, P. The GUM and its planned supplemental guides. **Accreditation and quality assurance**, v. 8, n. 7–8, p. 375–379, 2003.

DA SILVA, E. L; MENEZES, E. M. T. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. UFSC, Florianópolis, 4ª edição, v. 123, 2005.

DE DEUS, A. D.; VACCARO, G. L. R. Uma abordagem para implementação de qualidade assegurada no fornecimento, baseada em análise de capacidade: um estudo de caso em uma empresa do setor automotivo. **Revista produção online**, v. 9, n. 4, 2009.

DONATELLI, G. D.; KONRATH, A. C. Simulação de Monte Carlo na avaliação de incertezas de medição. **Revista de Ciência & Tecnologia**. v. 13, n. 25, p. 5-15, 2005.

DUBÉ, L; PARÉ, G. Rigor in information systems positivist case research: Current practices, trends, and recommendations. **MIS quarterly: management information systems**, v. 27, n. 4, p. 597, 2003.

EISENHARDT, K. M. Building theories from case study research. **Academy of management review**, v. 14, n. 4, p. 532, 1989.

FAES, M.; MOENS, D. Recent trends in the modeling and quantification of non-probabilistic uncertainty. **Archives of Computational Methods in Engineering. State of the Art Reviews**, v. 27, n. 3, p. 633–671, 2020.

FORBES, A. B. An MCMC algorithm based on GUM Supplement 1 for uncertainty evaluation. **Measurement**: journal of the International Measurement Confederation, v. 45, n. 5, p. 1188–1199, 2012.

FRENKEL, R. B. Statistical background to the ISO guide to the expression of uncertainty in measurement. **Technology transfer series monograph, National Measurement Institute of Australia**, 2006.

GHEYSEN, L. *et al.* Uncertainty quantification of the wall thickness and stiffness in an idealized dissected aorta. **Journal of the mechanical behavior of biomedical materials**, v. 151, p. 106370, 2024.

GUM – **Guia para Expressão de Incertezas de Medições**. Avaliação de dados de medição, 2008.

HAGAN, A.; COX, M. Simple informative prior distributions for Type A uncertainty evaluation in metrology. **Metrologia**, v. 60, n. 2, p. 025003, 2023.

HERNANDEZ, H. Probability distributions in groups of random elements. **ForsChem Research Reports**, v. 5, n.1, p. 1–1, 2020.

HOLAS, P.; KAMIŃSKA, J. Mindfulness meditation and psychedelics: potential synergies and commonalities. **Pharmacological reports: PR**, v. 75, n. 6, p. 1398–1409, 2023.

INCERPI, P.H. **Incerteza de medição – método proposto para a análise da conformidade do produto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2008.

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. **A estimativa da incerteza de medição pelos métodos do ISO GUM 95 e de simulação de Monte Carlo**, 2008.

JCGM. **Evaluation of measurement data; Evaluation of measurement data An introduction to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” and related documents**, 2009.

JURADO, K.; LUDVIGSON, S. C.; SERENA, N. G. Measuring uncertainty. **American Economic Review**, v. 105, n. 3, p. 1177–1216, 2015.

KACKER, R.; JONES, A. On use of Bayesian statistics to make the Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement consistent. **Metrologia**, v. 40, n. 5, p. 235–248, 2003.

KING, G. B. *et al.* Direct comparison between Bayesian and frequentist uncertainty quantification for nuclear reactions. **Physical review letters**, v. 122, n. 23, p. 232502, 2019.

KUSNANDAR, N. *et al.* Bibliometric review of measurement uncertainty: Research classification and future tendencies. **Measurement: journal of the International Measurement Confederation**, v. 232, n. 114636, p. 114636, 2024.

LANDGRAF, W. R.; STEMPIAK, C. R. Simulação de Monte Carlo e ferramentas para avaliação da incerteza de medição. In: **Congresso Latino Americano de Metrologia**, 2004.

LIRA, I. The generalized maximum entropy trapezoidal probability density function. **Metrologia**, v. 45, n. 4, p. L17–L20, 2008.

MAGALHÃES, F. W. Estimation of analytical measurement uncertainty for ethyl carbamate quantification in cachaça by CG-IDMS recalculated based on sound metrological and statistic concepts. **Revista Virtual de Química**, v. 13, n. 2, p. 394-418, 2021.

MARTINS, M. A. F. **Contribuições Para a Avaliação da Incerteza de Medição No Regime Estacionário**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial). Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2010.

MARTINS, M. A. F. *et al.* Comparação entre os métodos linear e não linear para a avaliação da incerteza de medição. **Controle & Automação**, v. 21, n. 6, p. 557–576, 2010.

NEUDECKER, D. *et al.* Templates of expected measurement uncertainties. **EPJ Nuclear sciences & technologies**, v. 9, p. 35, 2023.

NOGUEIRA, R. *et al.* Development studies of a new metronidazole certified reference material. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 23, n.3, p. 435-444, 2012.

PANTEGHINI, M. Analytical performance specifications for combined uncertainty budget in the implementation of metrological traceability. **Clinical chemistry and laboratory medicine**, v. 62, n. 8, p. 1497–1504, 2024.

PSAROS, A. F. *et al.* Uncertainty quantification in scientific machine learning: Methods, metrics, and comparisons. **Journal of computational physics**, v. 477, n. 111902, p. 111902, 2023.

REARDEN, B. T. *et al.* Sensitivity and uncertainty analysis capabilities and data in SCALE. **Nuclear technology**, v. 174, n. 2, p. 236–288, 2011.

REIS, S. F. DA S. **Quantificação de incertezas em método de aceleração para determinação da inércia de rotação**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

ROALD, L. A. *et al.* Power systems optimization under uncertainty: A review of methods and applications. **Electric power systems research**, v. 214, n. 108725, p. 108725, 2023.

ROBBI, D. B. *et al.* Quantificação de incertezas em experimento simples de vibrações. **Revista Interdisciplinar De Pesquisa Em Engenharia**. v. 1 n. 1, p. 1-25, 2015.

RODRIGUES, J. A. *et al.* Different approaches for estimation of the expanded uncertainty of an analytical method developed for determining pharmaceutical active compounds in wastewater using solid-phase extraction and a liquid chromatography coupled with tandem mass spectrometry method. **Analytical methods: advancing methods and applications**, v. 15, n. 1, p. 109–123, 2023.

SANTOS, D. R. DOS. **Caracterização das fontes e expressão da incerteza de medição em processos de medições lineares do laboratório: UTFPR-LAMEC**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

SAXENA, R.; KUMAR, H. Design and development of trapezoidal-shaped transducer for industrial and scientific applications. **Mapan**, v. 39, n. 2, p. 349–363, 2024.

SEONI, S. *et al.* Application of uncertainty quantification to artificial intelligence in healthcare: A review of last decade (2013–2023). **Computers in biology and medicine**, v. 165, n. 107441, p. 107441, 2023.

VEEN, A. M. H. VAN DER; COX, M. G. Getting started with uncertainty evaluation using the Monte Carlo method in R. **Accreditation and quality assurance**, v. 26, n. 3, p. 129-141, 2021.

VIM – Vocabulário Internacional de Metrologia. **Conceitos fundamentais e gerais e termos associados**, 2012.

WHITE, D. R.; SAUNDERS, P. The propagation of uncertainty with calibration equations. **Measurement science & technology**, v. 18, n. 7, p. 2157–2169, 2007.

WILLINK, R. An inconsistency in uncertainty analysis relating to effective degrees of freedom. **Metrologia**, v. 45, n. 1, p. 63–67, 2008.

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. Porto Alegre: Bookman, 2^a edição, 2001.

ZHANG, J. Modern Monte Carlo methods for efficient uncertainty quantification and propagation: A survey. Wiley interdisciplinary reviews. **Computational statistics**, v. 13, n. 5, 2021.

Autores

Wellington Pereira Gomes

Engenheiro de Produção pela Universidade Estadual do Maranhão. Experiência na área de metrologia como pesquisador pelo PIBIC (Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica) e pela Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão (FAPEMA) na área de Engenharia Econômica. Membro do Núcleo Interdisciplinar de Pesquisa da UEMA (NIEEP/UEMA).

Raí Dias Almeida

Graduando em Engenharia de Produção pela Universidade Estadual do Maranhão. Experiência como pesquisador na área de inovação sustentável através do PIBIC (Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica), bem como em Materiais, com projeto de pesquisa focado na área de fundição no Instituto Federal do Maranhão.

Samuel Victor dos Santos Araújo

Graduando em Engenharia de Produção pela Universidade Estadual do Maranhão. Experiência como pesquisador na área de engenharia econômica através do PIBIC (Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica).



Artigo recebido em: 29/04/2024 e aceito para publicação em: 29/07/2024

DOI: <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v24i3.5256>