

Artigo Técnico

Uma Proposta de Metodologia para Estimativa de Incerteza de Medição em pH

A Proposal for a Methodology for Estimating Measurement Uncertainty in pH

Fabício Gonçalves Torres^{a*}, Diogo Cesar Borges Silva^b, Marcel Joly^{cd}

^a Mestrado em Processos Industriais, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo - SP, Brasil.

^b Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo - SP, Brasil.

^c Docente do Mestrado Profissional em Processos Industriais, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo - SP, Brasil.

^d Agência Reguladora de Serviços Públicos do Estado de São Paulo, ARSESP - Brasil.

*e-mail: fabrigt@ipt.br

Palavras-chave: metrologia; físico-química; medidor de pH; incerteza de medição

Keywords: metrology; physical chemistry; pH meter; measurement uncertainty

Resumo

Os usuários de medidores de pH mesmo nos dias atuais ainda encontram dificuldades para determinar a incerteza de medição. Com a intenção de encorajar os usuários a utilizar uma nova ferramenta para a estimativa da incerteza em seus processos produtivos, foi desenvolvida uma metodologia que equilibra a simplicidade e o rigor técnico, assim exigindo o mínimo de informação para o fim desejado. Considerando as circunstâncias presentes no Brasil, principalmente, no que diz respeito à disponibilidade de Materiais de Referência Certificados, ficou definido que o melhor método adotado pela ferramenta é o Método de Dois Pontos, já que ele garante que as componentes de incerteza provenientes desses Materiais não sejam negligenciadas, e também apresenta ganhos relacionados ao recurso necessário e o tempo gasto para sua execução.

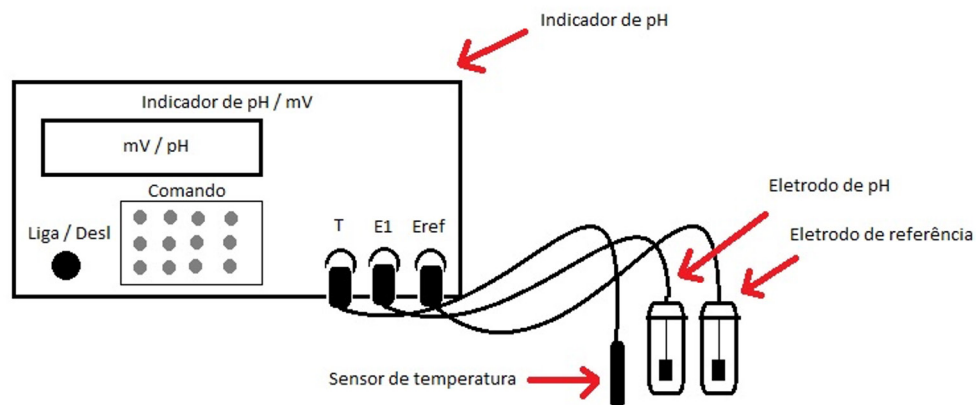
Abstract

Even today, many users of pH meters face difficulties in estimating measurement uncertainty. With the intention of encouraging users to use a new tool for estimating uncertainty in their production processes, a methodology was developed that balances simplicity and technical rigor, thus requiring the minimum amount of information for the desired purpose. Considering the circumstances present in Brazil, mainly with regard to the availability of Certified Reference Materials, it was decided that the best method adopted by the tool is the Two Point Method, since it ensures that the uncertainty components arising from these Materials do not be neglected, and also presents gains related to the necessary resource and the time spent for its execution.

1 Introdução

Um medidor de pH é um equipamento de medição constituído por um mostrador, usualmente digital, e um transdutor (**FIGURA 1**). O mostrador, basicamente, é a interface através da qual a informação de pH é apresentada ao usuário, que funciona como um medidor de tensão contínua, de alta impedância, que lê o sinal de tensão recebido pelo transdutor, e converte seu valor para pH, a partir da Eq. 1.

Figura 1. Medidor de pH composto pelo mostrador (ou indicador), eletrodos e sensor de temperatura.



Fonte: elaborado pelo autor.

$$\text{Valor}_{pH} = 7 - \frac{E F}{\ln(10) R (273,15+T)1000} \quad (1)$$

Onde,

E: diferença de potencial obtida pelos eletrodos (mV).

F: Constante de Faraday (C/mol).

R: Constante dos Gases [J/(K mol)].

T: Temperatura (°C).

O transdutor, basicamente, é composto pelo eletrodo de medição (E1) e pelo eletrodo de referência (Eref). O eletrodo de medição, sensível ao íon hidrônio (H_3O^+), gera uma tensão proporcional à atividade do íon hidrônio, enquanto que o eletrodo de referência proporciona um valor estável de potencial (METTLER TOLEDO, 2016).

Em muitos medidores de pH, é comum haver um sensor de temperatura acoplado ao transdutor, já que a temperatura da solução influencia na medida de pH.

Ainda que um medidor de pH seja um equipamento comum em laboratórios de físico-química, e que as aplicações das medidas de pH sejam tão vastas quanto qualquer outra grandeza física, como massa, tempo, comprimento, entre outras, há lacunas a serem resolvidas no que diz respeito ao uso desses equipamentos, principalmente com relação à rastreabilidade metrológica e à estimativa da incerteza de medição.

1.1 Desafios Práticos para a Obtenção da Rastreabilidade Metrológica em Medidas de pH

Usualmente, a rastreabilidade metrológica das medidas provenientes de um equipamento de medição é obtida a partir de um processo conhecido como “calibração”. Segundo o Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM), calibração consiste em (INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA, 2012b):

Operação que estabelece, sob condições especificadas, numa primeira etapa, uma relação entre os valores e as incertezas de medição fornecidos por padrões e as indicações correspondentes com as incertezas associadas; numa segunda etapa, utiliza esta informação para estabelecer uma relação visando a obtenção dum resultado de medição a partir duma indicação.

Em geral, o processo de calibração é realizado por meio de uma comparação direta entre as medidas obtidas pelo item sob calibração e as medidas de um padrão, na mesma unidade de medida do Sistema Internacional de Unidades (SI).

Para o medidor de pH, o processo de calibração, necessário para a obtenção da rastreabilidade metrológica, consiste em duas etapas.

- Calibração da parte elétrica, e
- Calibração do conjunto mostrador + eletrodos.

A calibração da parte elétrica consiste em comparar os valores medidos pelo mostrador de pH com os valores simulados a partir de um padrão de tensão DC, capaz de gerar tensões elétricas na faixa medida pelo item sob calibração.

A relação entre os valores de tensão medidos pelo mostrador e os valores de pH é dada pela Eq. 1, onde, E é a tensão aplicada pelo padrão de tensão DC (mV) e T é a temperatura, usualmente, definida como 25°C.

Uma vez que a medição de pH é diretamente afetada pela medição de tensão (usualmente, em mV) pelo mostrador, a calibração da parte elétrica, executada sem os eletrodos é necessária. A partir dessa calibração, é possível estimar a não-linearidade da faixa, que é uma das componentes que deve ser considerada ao estimar a incerteza da medição.

A calibração da parte elétrica, que é executada sem os eletrodos, é recomendada, pois, com ela, é possível estimar a não-linearidade da faixa.

Já a calibração do conjunto mostrador e eletrodo possui algumas especificidades que devem ser levadas em consideração. Da mesma forma que a parte elétrica, a calibração do conjunto também exige o uso de um padrão. Entretanto, neste caso, são utilizados Materiais de Referência Certificados (MRC), ou seja, soluções produzidas por produtores certificados, que possuem valores e incertezas, com rastreabilidade metrológica, expressas em um Certificado do MRC.

No caso do pH, as soluções utilizadas como padrão têm a finalidade de servir como solução tampão, já que é esperado que os valores de pH dessas soluções se mantenham inalteradas ao longo do tempo, ainda que seja necessário observar o armazenamento adequado desses materiais, respeitando as condições ambientais recomendadas pelo fabricante.

Equivocadamente, a rotina de calibração e ajuste do eletrodo é, usualmente, nomeada como 'autocalibração' por alguns fabricantes desses instrumentos, já que a calibração, por definição, não envolve qualquer tipo de ajuste, seja físico ou via programas de computador (*softwares*). Obviamente, antes da etapa de se executar qualquer ajuste, o processo de calibração deve ser realizado, já que somente a partir dos resultados de uma comparação com uma referência é que se pode realizar, efetivamente, o ajuste. Para que não haja confusão por conta das definições, neste trabalho optou-se por usar o termo 'autoajuste' ao invés de 'autocalibração', por se considerar este termo ser o mais adequado à rotina usada nestas situações.

É importante ressaltar que o ato de somente executar a calibração do conjunto, em laboratório externo, não é suficiente para garantir a confiabilidade metrológica dos resultados de medição deste tipo de instrumento. Isto porque os eletrodos de pH não são estáveis o suficiente para se manterem confiáveis por um longo período de tempo. Esta instabilidade varia de acordo com diversos fatores, tais como: quantidade e tipo de uso, armazenamento e limpeza. Portanto, na prática, é recomendável que, antes do uso do equipamento para a medição de pH, deve-se efetuar calibração e ajuste da curva de Nerst, que relaciona tensão elétrica e pH, para, em seguida, realizar a medida do pH da solução desconhecida, por meio de uso de MRC.

1.2 Visão geral dos métodos para Estimativa de Incerteza de Medição em pH

Segundo a Coordenação Geral de Acreditação (2019), os medidores de pH podem ser autoajustados por meio de dois métodos:

- Método de Dois Pontos, e
- Método de Multipontos

O Método de Dois Pontos consiste em utilizar dois MRC para a obtenção da curva de Nerst, enquanto que o Método de Multipontos levanta a curva de Nerst através de uma regressão linear obtida a partir de 3 a 5 MRCs.

Por meio do Método de Dois Pontos, o mensurando é obtido através da Eq. 2 a seguir.

$$pH(X) = pH(MRC_1) + \frac{E(X) - E(MRC_1)}{E(MRC_2) - E(MRC_1)} \cdot [pH(MRC_2) - pH(MRC_1)] \quad (2)$$

Onde,

pH(X): valor de pH da solução desconhecida.

pH(MRC₁): valor de pH do primeiro MRC utilizado no autoajuste pelo Método de Dois Pontos.

pH(MRC₂): valor de pH do segundo MRC utilizado no autoajuste pelo Método de Dois Pontos.

E(X): valor da diferença de potencial obtida na medição da solução desconhecida.

E(MRC₁): valor da diferença de potencial obtida no autoajuste com o primeiro MRC.

E(MRC₂): valor da diferença de potencial obtida no autoajuste com o segundo MRC.

As principais componentes de incerteza envolvidas no Método de Dois Pontos são apresentadas a seguir.

- Variabilidade das leituras;
- Resolução;
- Incerteza do certificado do MRC de pH(MRC₁) e pH(MRC₂);
- Incerteza devido à não-linearidade da faixa elétrica do medidor;
- Incerteza devido à temperatura, e
- Incerteza devido à junção de referência do eletrodo.

Das componentes de incerteza mencionadas, geralmente, nas condições em que a temperatura é adequadamente controlada à 25 °C, as maiores componentes de incerteza são provenientes dos MRCs utilizados no autoajuste.

Pelo Método de Multipontos, o mensurando é obtido através da curva de Nerst proveniente da regressão linear, conforme Eq. 3.

$$pH(X) = \frac{E_V^0 - E(X)}{k'} \quad (3)$$

Onde,

pH(X): valor de pH da solução desconhecida.

e_V^0 : coeficiente linear da regressão linear.

k' : coeficiente angular da regressão linear.

E(X): valor de tensão medido para a solução desconhecida.

As componentes de incerteza provenientes do Método de Multipontos são apresentadas a seguir.

- Incerteza devido à curva obtida pela regressão linear;
- Variabilidade das leituras;
- Resolução;
- Incerteza devido à não-linearidade da faixa elétrica do medidor;
- Incerteza devido à temperatura, e
- Incerteza devido à junção de referência do eletrodo.

Percebe-se que, no Método de Multipontos, as incertezas correspondentes aos MRCs utilizados no autoajuste são negligenciadas. Entretanto, vale sublinhar que elas somente podem ser efetivamente desprezadas se as incertezas expandidas dos MRCs forem inferiores a pH 0,006 (NAUMANN, ALEXANDER-WEBER & EBERHARDT, 2002). Levando em consideração os MRCs disponíveis por produtores acreditados pela Cgcre (ver **TABELA 1**), é possível constatar que são poucas as opções de MRCs com incertezas inferiores a 0,006 que podem ser negligenciadas.

Tabela 1. Valores e incertezas disponíveis para produção por laboratórios acreditados pela CGCRE.

Valor	Incerteza Mínima	Incerteza Máxima
pH 1,7	pH 0,008	pH 0,018
pH 4,0	pH 0,007	pH 0,024
pH 6,9	pH 0,007	pH 0,029
pH 7,0	pH 0,005	pH 0,027
pH 9,2	pH 0,014	pH 0,038
pH 10,0	pH 0,014	pH 0,054

Fonte: Adaptado pelo autor com base em Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (2022b).

Embora medidas físico-químicas sejam essenciais e estejam consolidadas como prática comum em ambientes laboratoriais no que diz respeito às medidas de pH, as boas práticas metrológicas ainda não estão amplamente difundidas. Esta afirmação foi evidenciada pelo nosso grupo através de pesquisa prévia envolvendo usuários desses equipamentos. Esta pesquisa demonstrou que, ainda hoje, mais da metade dos usuários não estima a incerteza de medição e, parte dos que estimam, declaram enfrentar dificuldades com relação a esta prática (TORRES; SILVA & JOLY, 2021).

2 Objetivo

Considerando que há um número elevado de usuários de medidores de pH que têm dificuldades para estimar incerteza de medição, o presente trabalho teve o objetivo de desenvolver uma metodologia para cálculo e estimativa de incerteza de medição.

Em uma etapa seguinte desta pesquisa, a mesma foi encapsulada em uma ferramenta computacional disponibilizada na Internet para acesso irrestrito.

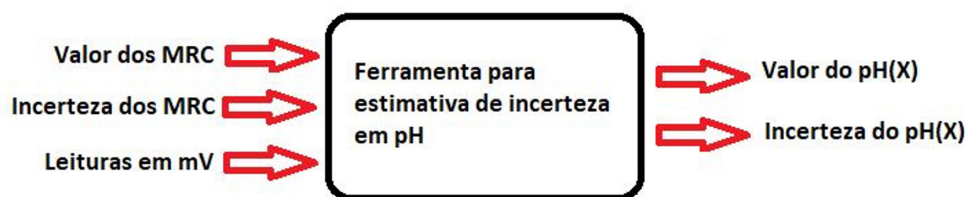
Neste sentido, a metodologia desenvolvida considerou, por premissa, a exigência de um equilíbrio entre a simplicidade e o rigor metrológico, evitando, assim, a necessidade de preenchimento de diversas informações que não contribuem significativamente com o seu propósito. Entretanto, a metodologia permitirá que usuários com conhecimentos mais avançados em estimativa de incerteza, possam, de acordo com as circunstâncias, alterar valores prefixados, para minimizar o risco de subestimar ou superestimar a incerteza de medição.

3 Metodologia

O desenvolvimento da metodologia levou em consideração a aplicação apenas do Método de Dois Pontos, uma vez que este método permite que as incertezas provenientes dos MRCs sejam consideradas, pois, conforme evidenciado pela **TABELA 1**, elas não podem ser negligenciadas no outro método.

A **FIGURA 2** apresenta os dados de entrada e saída envolvidos na metodologia proposta.

Figura 2. Dados de entrada e saída da ferramenta proposta.



Fonte: elaborado pelo autor.

Para o adequado uso da metodologia, é requerido que:

- O usuário preencha os valores dos MRCs (com suas respectivas incertezas) provenientes dos Certificados dos MRC;
- As leituras dos MRCs e do pH(X) sejam realizadas em tensão (mV);
- A temperatura das amostras seja controlada em banho termostaticado, a 25 °C, cuja variabilidade seja menor que 0,1 °C, e
- O mostrador de pH possua resolução para tensão superior ou igual a 1 mV.

O Método de Multipontos poderia ser implementado, com algumas alterações, de forma que as componentes de incerteza dos MRCs fossem incorporadas. Todavia, o revés desta abordagem é o fato de que isso traria mais complexidade ao processo de cálculo. Adicionalmente, entende-se que o Método de Dois Pontos, quando adequadamente aplicado, possui outras vantagens. Incluídas aqui estão a exigência de menos recursos, já que são necessários somente dois MRCs para o processo de autoajuste, e também, a redução do tempo, já que o número de leituras necessárias também é reduzido, comparado com o Método de Multipontos.

4 Resultados

A metodologia foi desenvolvida considerando a quantidade mínima de informação que o usuário deve preencher. Uma ferramenta baseada na metodologia proposta foi desenvolvida e tem sua interface principal ilustrada na **FIGURA 3**. Nesta figura, as células cinzas indicam os dados de entrada, ou seja, os dados a serem preenchidos pelo usuário, enquanto que as células verdes indicam os dados de saída, ou seja, o valor de pH(X) obtido a partir da curva de Nerst autoajustado e sua respectiva incerteza de medição.

Figura 3. Ferramenta proposta, considerando o Método de Dois Pontos.

Entrada de dados

MRC pH maior	6,859	(pH)
Incerteza pH maior	0,023	(pH)
MRC pH menor	4,007	(pH)
Incerteza pH menor	0,026	(pH)

leituras em: mV pH

Leitura 1 pH maior	-15,1	(mV)
Leitura 2 pH maior	-15,1	(mV)
Leitura 3 pH maior	-15,1	(mV)
Leitura 1 pH menor	153,8	(mV)
Leitura 2 pH menor	153,8	(mV)
Leitura 3 pH menor	153,8	(mV)
Leitura 1 pH desconhecido	153,8	(mV)
Leitura 2 pH desconhecido	153,7	(mV)
Leitura 3 pH desconhecido	153,6	(mV)

Resultados

pH X = 4,009 pH
U pH X ± 0,048 pH

Fonte: elaborado pelo autor.

É importante ressaltar que a metodologia é aplicável a qualquer ponto na faixa de pH, seja ela ácida, neutra ou alcalina. Entretanto, é esperado que o usuário escolha adequadamente os MRCs de acordo com o valor esperado de pH(X) a ser medido.

Diferentemente do que ocorre nas funções de auto ajuste de alguns medidores de pH, que fixam os pontos de MRC, sendo um deles o valor de pH 7, intitulado pH(0), esta metodologia não exige que um dos MRC seja de valor neutro. É necessário, apenas, que o valor a ser preenchido na célula do pH(maior) seja numericamente maior que o valor do pH(menor). É recomendável também que o usuário escolha os valores de MRC mais próximos possíveis do pH(X), e de forma que o pH(X) esteja entre os valores dos MRC escolhidos.

Como exemplo, se o usuário necessitar efetuar a medição de uma solução cujo valor de pH seja aproximadamente 3,0. Considerando os valores disponíveis na **TABELA 1**, o usuário deve dispor dos MRC de 1,7 e 4,0, sendo que o valor de 1,7 deve ser preenchido em pH(menor), enquanto que o de 4,0, em pH(maior). Percebe-se que, neste caso, não foi necessário o uso do MRC de pH 7,0, já que, o ajuste da curva, entre 1,7 e 7,0 poderia causar piora na exatidão da medida devido à influência da não-linearidade da faixa do medidor de pH, ou seja, um risco que pode ser reduzido ao definir um ajuste da curva num segmento menor, entre 1,7 e 4,0, por exemplo.

Na **FIGURA 4** são ilustradas as variáveis que podem ser editadas pelo usuário. Vale ressaltar que elas são previamente valoradas com parâmetros *default*, ou seja, valores que foram definidos de acordo com manuais de fabricante, e por meio de análise da influência de cada variável na incerteza expandida da medição.

Figura 4. Demais variáveis pré-fixadas para o usuário, porém, com possibilidade de edição.

Configurações		
Resolução em tensão	1	(mV)
Incerteza do termômetro	0,1	(°C)
Variabilidade da temperatura	0,1	(°C)
Não-linearidade da faixa	0,1	(%)
Junção de referência	0,6	(mV)

Ocultar configurações

Fonte: elaborado pelo autor.

A estimativa de incerteza é calculada segundo o Guia para a Expressão de Incerteza de Medição – GUM (INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA, 2012a) em duas partes. Primeiramente, obtêm-se o valor do coeficiente angular k' e, em seguida, obtêm-se o valor de $pH(X)$. As **Figuras 5 e 6** apresentam as contribuições na incerteza expandida da medição para k' e para $pH(X)$, respectivamente. Estes valores apresentados são baseados a partir de simulação com os dados de entrada pertencentes ao documento orientativo da Cgcre (COORDENAÇÃO GERAL DE ACREDITAÇÃO, 2019).

Figura 5. Estimativa da incerteza de medição do coeficiente angular k' .

Componente	uxi	div	coef	uxi*coef/div	(uxi*coef/div) ²	Contrib. %
Variabilidade eMaior	0.0000	2.0000	0.3506	0.0000	0.0000	0.0000
Resolucao eMaior	0.5000	1.7321	0.3506	0.1012	0.0102	6.1954
Resolucao eMaior	0.5000	1.7321	0.3506	0.1012	0.0102	6.1954
Resolucao eMenor	0.5000	1.7321	0.3506	0.1012	0.0102	6.1954
Certificado pH Maior	0.0230	2.0000	20.7649	0.2388	0.0570	34.4833
Certificado pH Menor	0.0280	2.0000	20.7649	0.2899	0.0729	44.0656
Variabilidade temp.	0.1000	1.7321	0.1984	0.0115	0.0001	0.0794
Certificado temp.	0.1000	2.0000	0.1984	0.0099	0.0001	0.0595
Junção de ref.	0.6000	1.7321	0.3506	0.1215	0.0148	8.9214
				Total	0.1654	
				uc	0.4067	
				veff	4763282.1982	
				k	2.0000	
				U	0.8133	

Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 6. Estimativa da incerteza de medição de pH(X).

Componente	uxi	div	coef	uxi*coef/div	(uxi*coef/div) ²	Contrib. %
Certificado pH Maior	0.0230	2.0000	1.0000	0.0115	0.0001	23.3742
Variabilidade eMaior	0.0000	2.0000	0.0169	0.0000	0.0000	0.0000
Resolução eMaior	0.5000	1.7321	0.0169	0.0049	0.0000	4.1995
Variabilidade Ex	0.1000	2.0000	0.0169	0.0008	0.0000	0.1260
Resolução eX	0.5000	1.7321	0.0169	0.0049	0.0000	4.1995
Incerteza k'	0.8133	2.0000	0.0481	0.0196	0.0004	67.7039
Não Linearidade elétrica	0.1537	1.7321	0.0169	0.0015	0.0000	0.3968
				Total	0.0006	
				uc	0.0238	
				veff	1890077.0335	
				k	2.0000	
				U	0.0476	

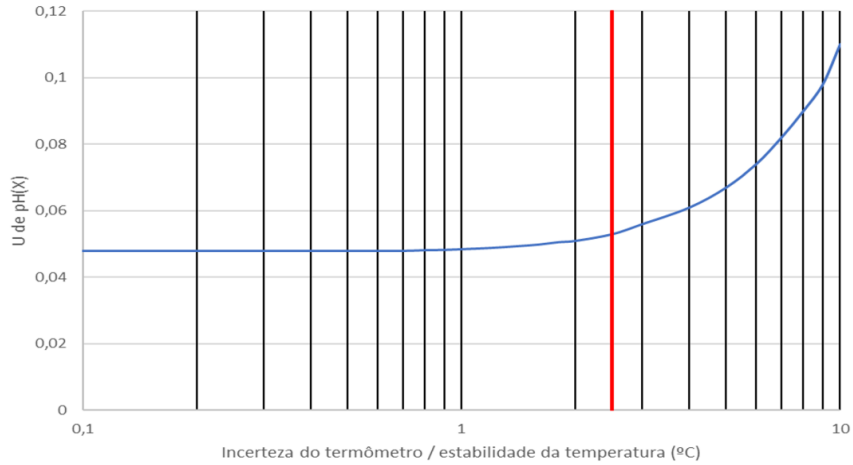
Fonte: elaborado pelo autor.

5 Discussão dos Resultados

Para a tomada de decisão na atribuição de valores das variáveis que compõe a incerteza expandida da medição, que estão presentes na ferramenta, foi necessária uma análise da influência de algumas das componentes de incerteza presentes no mensurando, quais sejam, incerteza do termômetro, estabilidade da temperatura, resolução do medidor, junção de referência e não-linearidade do medidor.

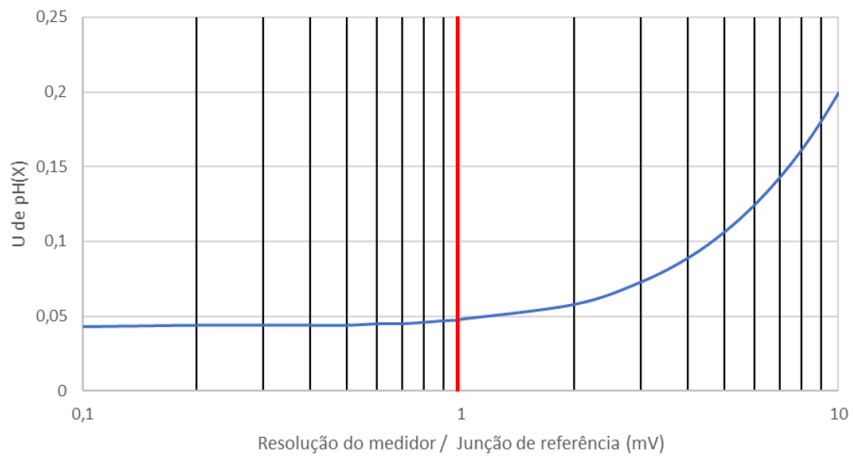
Os resultados estão ilustrados nas **Figuras 7 a 9**. Nestas figuras, os gráficos foram gerados mantendo-se os demais valores fixos e variando apenas a componente analisada. A linha vertical vermelha indica o ponto na escala em que a componente começa a aumentar a incerteza de pH(X) mais que 10% do seu valor e, portanto, torna-se mais significativo.

Figura 7. Contribuição individual da componente “incerteza do termômetro” / “estabilidade da temperatura” para a estimativa de incerteza de pH(X) – Método de Dois Pontos.



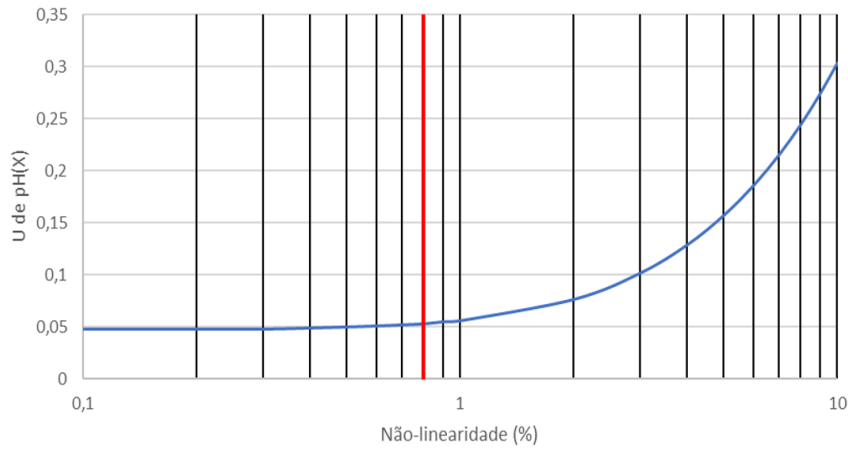
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 8. Contribuição individual da componente “resolução do medidor” / “junção de referência” para a estimativa de incerteza de pH(X) – Método de Dois Pontos.



Fonte: elaborado pelo autor.

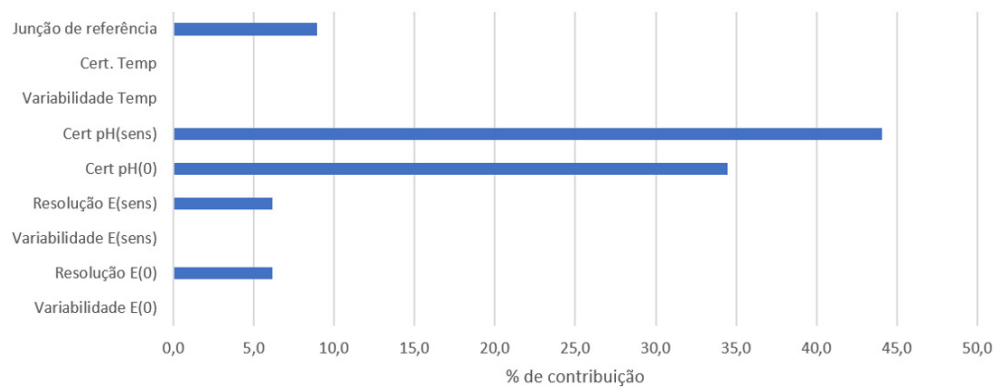
Figura 9. Contribuição individual da componente “não-linearidade” para a estimativa de incerteza de pH(X) – Método de Dois Pontos.



Fonte: elaborado pelo autor.

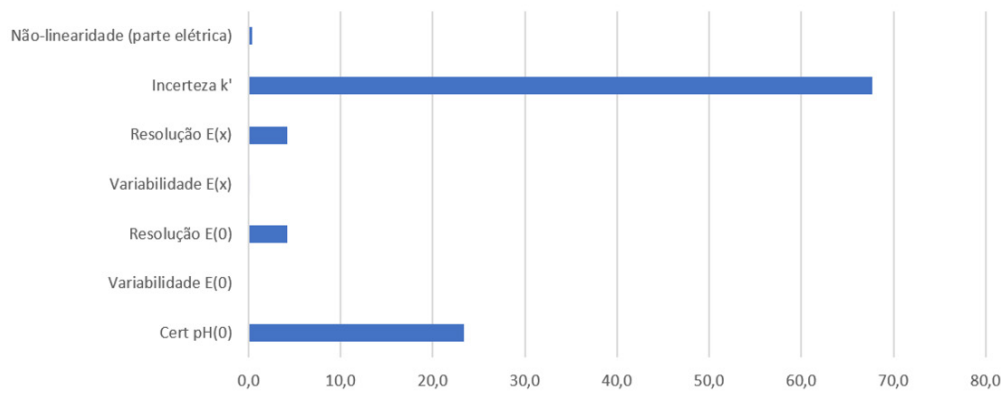
Adicionalmente, a partir da simulação realizada por meio dos dados de entrada do Documento Orientativo da Cgcre, foi possível estimar a contribuição relativa de cada componente, com os valores prefixados, conforme demonstradas nas **Figuras 10 e 11**.

Figura 10. Contribuição das componentes de incerteza para a estimativa de incerteza de k' – Método de Dois Pontos.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 11. Contribuição das componentes de incerteza para a estimativa de incerteza de pH(X) – Método de Dois Pontos.



Fonte: elaborado pelo autor.

É possível identificar que, na estimativa da incerteza de k' e, conseqüentemente, de $pH(X)$, as principais componentes de incerteza são provenientes dos MRCs utilizados no autoajuste da curva de Nerst. Os valores das demais componentes de incerteza, prefixados no programa, embora sejam contabilizados na incerteza expandida da medição, possui menor contribuição. De fato, de acordo com as **Figuras 7 a 9**, os valores são iguais ou inferiores aos valores que delimitam uma atenção maior, já que, caso maiores, poderiam influenciar mais na incerteza expandida. E, portanto, é importante ressaltar que, embora as variáveis, tais como resolução, incerteza do termômetro, entre outros, estejam prefixados, cabe ao usuário avaliar a pertinência de alterar estes valores, em circunstâncias que exigem estas alterações, embora, sejam casos atípicos no processo da medida de pH, com equipamento em adequado funcionamento.

Apesar de não haver necessidade de o usuário efetuar o autoajuste definido pelo fabricante do medidor de pH, é recomendável que este autoajuste também seja realizado como checagem operacional, pois, ele pode auxiliar na identificação de problema com o eletrodo, que pode acarretar em perda de exatidão, principalmente, por conta da instabilidade das leituras.

6 Conclusão

Com a intenção de encorajar e auxiliar os usuários de medidores de pH a estimarem a incerteza de medição em seus processos produtivos, foi desenvolvida uma ferramenta para estimativa de incerteza destes instrumentos.

Embora seja de consenso na literatura que o Método de Multipontos apresenta menor incerteza de medição, isso somente é válido para o caso em que as incertezas dos MRC disponíveis sejam inferiores a $\text{pH } 0,006$, o que não é o caso aplicável aos produtores acreditados pela Cgcre em território nacional. Isto faz com que as incertezas provenientes dos MRCs devam ser consideradas no Método de Multipontos, tornando o processo mais dispendioso.

Portanto, a ferramenta foi desenvolvida empregando o Método de Dois Pontos, uma vez que se buscou equilíbrio entre simplicidade e rigor técnico, tendo em consideração a complexidade do processo, o tempo necessário, o custo envolvido e o cenário nacional.

As figuras 3, 4, 5 e 6, são oriundas desta ferramenta que pode ser acessada através do *link* <https://github2diogo.github.io/pHmetodo2pontos/>.

7 Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 17025**: Requisitos gerais para a competência de produtores de material de referência. Rio de Janeiro. 2017a.

COORDENAÇÃO GERAL DE ACREDITAÇÃO. Documento de Caráter Orientativo - Orientações para Aplicação dos Requisitos Técnicos da ABNT ISO/IEC 17025 na Acreditação de Laboratórios de Calibração para o Grupo de Serviço de Físico-Química. CGCRE, 2019, rev. 3, 45 p.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Produtores de Materiais de Referência**. Disponível em: < <https://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/acreditacao/organismos-acreditados/produtores-de-materiais-de-referencia>>. Acesso em: 24 jan. 2022.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Guia para Expressão da Incerteza de Medição – GUM**. Rio de Janeiro: 2012a, 1ª ed., 141 p.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. **Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM)**: Conceitos Fundamentais e Gerais e Termos Associados. 1ª Edição Luso-Brasileira, 2012b, 93 p.

INMETRO. **Guia para Expressão da Incerteza de Medição – GUM**. Rio de Janeiro: 2012b, 1ª ed., 141 p.

METTLER TOLEDO. **A Guide to pH Measurement – Theory and Practice of Laboratory pH Applications**. Suíça: 2016, 60p.

NAUMANN, R.; ALEXANDER-WEBER, CH.; EBERHARDT, R. **Traceability of pH measurements by glass electrode cells**: performance characteristic of pH electrodes by multi-point calibration. In: ANALYTICAL AND BIOANALYTICAL CHEMISTRY, 374, 778–786 (2002).

TORRES, F. G.; SILVA, D. C. B.; JOLY, M. Uma Pesquisa com Usuários sobre Gestão Metrológica na Área de Físico-Química. **Revista IPT**, v. 5, p. 45-66, 2021.

10.29327/2202814.7.24-4

