

Calibração de Sensores de Temperatura de Circuito Integrado para Fundeios em Águas Rasas

Calibration of Integrated Circuit Temperature Sensors for Shallow Water Moorings

Marco V. R. Lopes^{1,2,*}, Rogerio N. Candella^{3,†} e Geraldo Cernicchiaro^{1‡}

¹*Laboratório de Instrumentação e Medidas,
Coordenação de Matéria Condensada, Física Aplicada e Nanociência
Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, Rua Dr. Xavier Sigaud, 150 – Ed. Cesar Lattes
Urca, Rio de Janeiro, RJ. CEP 22290-180*

²*Divisão de Bioacústica, Departamento de Acústica Submarina*

³*Divisão de Oceanografia Física, Departamento de Oceanografia
Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira – Rua Kioto, 253 – Prédio Pesquisa II
Praia dos Anjos, Arraial do Cabo, RJ. CEP 28930-000*

Submetido: 29/09/2019

Aceito: 10/12/2019

Resumo: Um sistema medição da temperatura do oceano com exatidão elevada é fundamental para um melhor conhecimento da variabilidade temporal da estratificação térmica das camadas de água. O custo dos sistemas comerciais disponíveis no mercado apresenta uma grande barreira para a manutenção de uma série contínua de dados. O crescente desenvolvimento de sensores construídos em circuitos integrados surge como uma alternativa economicamente viável para estudos de fenômenos costeiros. Neste trabalho são apresentados o arranjo experimental e a metodologia de calibração utilizada no desenvolvimento de cadeias de termômetros industriais aplicadas a fundeios oceanográficos em águas rasas. Os equipamentos utilizados foram adaptados para atender aos requisitos descritos nas principais normas de metrologia e orientações para laboratórios de calibração. Os resultados demonstram um ganho em exatidão superior em relação aos dados de calibração de fábrica.

Palavras-chave: Calibração, exatidão, 1-Wire, LabVIEW, cadeia de termômetros, fundeios oceanográficos.

Abstract: A high accuracy ocean temperature measurement system is essential for a better understanding of the temporal variability of the thermal stratification of water layers. The cost of available commercial systems presents a major barrier to maintaining a continuous data series. The growing development of sensors built in integrated circuits emerges as an economically viable alternative for studies of coastal phenomena. This work presents the experimental arrangement and the calibration methodology used in the development of industrial thermometer chains applied to shallow water oceanographic moorings. The equipment used was adapted to meet the requirements described in the main metrology standards and guidelines for calibration laboratories. Results demonstrate a gain in superior accuracy over factory calibration data.

Keywords: Calibration, accuracy, 1-Wire, LabVIEW, thermometer string, oceanographic moorings.

1. INTRODUÇÃO

Um sistema medição da temperatura do oceano com exatidão elevada é fundamental para um melhor conhecimento da variabilidade temporal da estratificação térmica das camadas de água [1]. A temperatura da água do mar foi registrada por anos com termômetros de reversão, termistores ou alguns tipos de instrumentos, incluindo termômetros como CTDs ou termosalinômetros. A instrumentação oceanográfica é comumente projetada em diferentes encapsulamentos para permitir a implantação de 250 m a 10.000 m. Alguns deles alcançam uma precisão de $\pm 0,001$ °C e uma

resolução de 0,0001 °C [2]. Infelizmente, os sistemas de monitoramento científico comerciais podem apresentar custos de aquisição e operação proibitivos para manutenção de séries contínuas de dados capazes de descrever a dinâmica dos fenômenos costeiros [3]. Devido ao rápido e constante crescimento da indústria de Circuitos Integrados (CI), os sensores de temperatura integrados se tornaram populares. Esses sensores apresentam algumas vantagens em relação a outros tipos de sensores térmicos, incluindo o baixo custo de fabricação [4]. Em algumas aplicações costeiras, como o monitoramento do fenômeno da ressurgência costeira da região de Cabo Frio, onde ocorrem variações de temperatura com amplitudes superiores a 10 °C [5], o uso de termômetros digitais se apresenta como uma alternativa economicamente viável. Contudo, para manter o custo de fabricação compatível com a demanda de mercado, eles são calibrados apenas em um único ponto de temperatura, apresentando uma incerteza crescente a medida que a temperatura a ser medida

*Electronic address: marvin.lopes@gmail.com

†Electronic address: r.candella@marinha.mil.br

‡Electronic address: geraldo@cbpf.br

se afasta deste ponto [6]. Este desvio apresenta um comportamento que se aproxima a um polinômio do segundo grau [7] e, utilizando métodos de calibração para a correção deste desvio, pode ser alcançado um resultado de dispersão de $\pm 0,15$ °C para toda a faixa de operação do sensor [8].

Neste trabalho são apresentados o arranjo experimental e a metodologia de calibração utilizada no desenvolvimento de cadeias de termômetros industriais aplicadas à fundeios oceanográficos em águas rasas. Conforme descrito em [9] os transdutores de temperatura estudados neste trabalho foram desenvolvidos pela empresa Maxim Integrated. Trata-se dos termômetros digitais DS18B20 que possuem uma resolução selecionável de até 0,0625 °C e uma exatidão garantida pelo fabricante de $\pm 0,5$ °C. Por meio do protocolo serial 1-Wire, estes sensores apresentam a vantagem de se comunicarem utilizando apenas um fio de dados e de poderem compartilhar este canal de dados em distâncias superiores a 100 metros com todos os termômetros conectados ao barramento [10]. O procedimento de calibração permitiu avaliar uma performance significativamente superior ao valor informado na folha de dados do fabricante.

2. ARRANJO EXPERIMENTAL

O arranjo de calibração desenvolvido é constituído basicamente de um meio térmico (Figura 1g), um bloco de equalização (Figura 1f) onde os sensores são inseridos, um instrumento de medição (Figura 1b) para a leitura da termorresistência utilizada como padrão e um software para visualizar e registrar automaticamente a leitura de cada sensor (Figura 1a). O sistema permite a leitura simultânea e de forma automatizada do instrumento de medição do padrão e da interface microcontrolada de controle e aquisição dos termômetros digitais a serem calibrados.

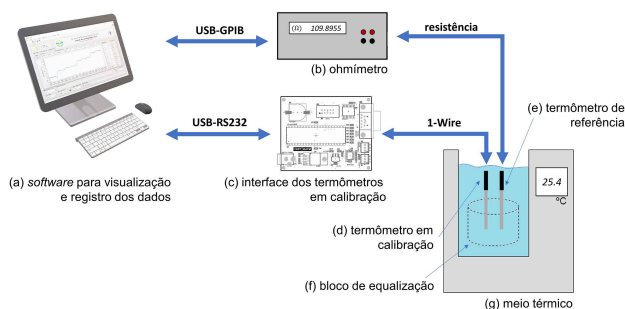


Figura 1 – Diagrama esquemático do sistema de calibração.

Os valores de temperatura referenciados à ITS-90 foram obtidos a partir da leitura da temperatura estabilizada em um banho térmico agitado. Foi utilizado como meio térmico um banho de líquido agitado com temperatura controlada modelo Q214M2 da empresa Quimis [11]. Este tipo de equipamento proporciona uniformidade e estabilidade térmica na região onde serão inseridos o sensor de referência e os sensores em calibração. A faixa de trabalho de -20 °C a 120 °C abrange a faixa de calibração de interesse para aplicação dos termômetros. O volume de 11 litros do tanque é suficiente

para acomodar o bloco equalizador e os termômetros. A homogeneidade é garantida pela utilização de uma bomba de circulação com vazão de 5 L/min.

Para garantir um melhor equilíbrio térmico entre os sensores durante a calibração foi utilizado um bloco de equalização feito de alumínio. O bloco foi construído em formato cilíndrico com o auxílio do Centro de Torneamento CNC (Comando Numérico Computadorizado) do Laboratório de Instrumentação e Tecnologia Mecânica (LIT-Mec) do CBPF. Em sua face superior foram inseridos 20 orifícios de $6,1$ mm de diâmetro por 35 mm de profundidade, distribuídos radialmente. O bloco conta ainda com duas faces laterais planas destinadas ao uso de termorresistências de contato planares. A Figura 2 apresenta o bloco de equalização construído.

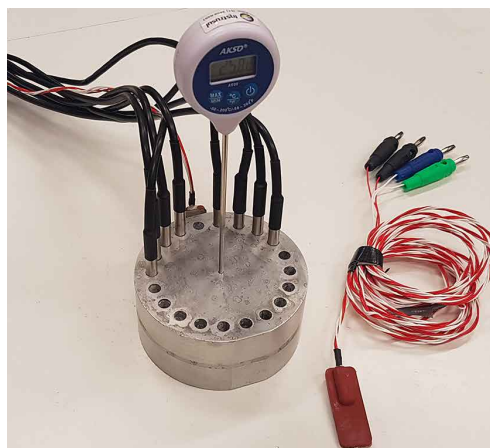


Figura 2 – Bloco de equalização construído.

A temperatura do meio térmico é utilizada como referência no processo de calibração. Seu valor é obtido em função da medida de resistência elétrica de uma termorresistência industrial de platina (TIP) calibrada pelo Instituto Nacional de Metrologia (INMETRO) para a faixa de 10 a 50 °C. A TIP modelo RTF4, fabricada pela Labfacility Temperature & Process Technology, é constituída de um filme fino de platina (Pt) depositado em um substrato de cerâmica. Seu encapsulamento por uma fina camada de borracha de silicone provê resistência a imersão em óleos e/ou produtos químicos. A face de contato é folheada com alumínio autoadesivo. O filme de platina é acessado externamente por 4 fios de conexão. Os fios são isolados eletricamente por um revestimento de Teflon e possuem terminais para se conectarem a um instrumento de medição. De acordo com a ficha técnica [12], a TIP possui uma faixa de operação de -50 a 150 °C e foi construída para ter uma resistência nominal de 100 Ω a 0 °C. Também designada como Pt-100, a TIP atende a Classe B de tolerância estabelecida pela norma internacional IEC571[13], cujo valor é de $\pm(0,30 + 0,005|t|)$ °C. Para medidas com tolerância dentro da faixa de classificação da TIP é necessária a aplicação de uma equação de segunda ordem para relacionar o valor de resistência elétrica R à respectiva temperatura t . Esta equação foi demonstrada pela primeira vez em 1887 por H.L. Callendar [14] ao comparar as medidas da temperatura do termômetro a ar com a tem-

peratura do termômetro de platina. A equação proposta por Callendar é utilizada até os dias atuais para determinar as temperaturas medidas por uma TIP [15], expressa na forma de:

$$W = \frac{R}{R_0} = 1 + At + Bt^2 \quad (1)$$

onde R_0 é a resistência da TIP à 0 °C e os coeficientes A e B são obtidos diretamente no certificado de calibração. A Tabela 1 apresenta os valores fornecidos pelo certificado de calibração da TIP utilizada neste trabalho:

Tabela 1 – Valores dos coeficientes de calibração da TIP[16].

Coeficientes	Valores
A	$3,918003 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
B	$-7,928177 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$

O instrumento de medição utilizado para a medição da resistência elétrica da TIP é um multímetro digital de bancada de 6 ½ dígitos, modelo 34401A da Agilent Technologies. A função de ohmímetro permite realizar medição de resistência elétrica com resolução até a quarta casa decimal na faixa de temperatura de interesse deste trabalho [17]. Na configuração de medida de resistência utilizando 4 terminais, uma fonte de corrente constante força a passagem da corrente de teste I pelas pontas de prova e pela resistência do filme de platina R_{TIP} . A diferença de tensão entre os terminais da termorresistência é medida por um segundo par de pontas de prova com alta impedância de entrada. Apesar de uma pequena corrente (da ordem de μA) poder fluir pelas pontas de prova do medidor de tensão, ela é usualmente negligenciável. A tensão V_M medida pelo multímetro é essencialmente a mesma tensão V_{TIP} presente nos terminais do Pt100, como é possível observar na Figura 3:

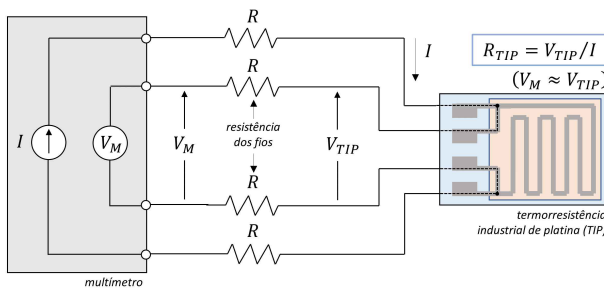


Figura 3 – Método de medida de resistência elétrica utilizando 4 fios.

A resistência então pode ser calculada diretamente por $R_{TIP} = V_M/I$. Desta forma a queda de tensão que normalmente ocorreria devido à resistência das pontas de provas também pode ser ignorada e, conseqüentemente, o valor da resistência do sensor pode ser determinado com maior exatidão do que o método utilizando apenas dois terminais. Os dados são enviados para o computador via protocolo paralelo de 8 bits com lógica negativa do nível TTL conhecido como GPIB.

A interface para aquisição dos dados dos termômetros é baseada no microcontrolador ATmega1284P fabricado pela Atmel Corporation [18]. A comunicação com o barramento dos termômetros é feita por um dos pinos digitais GPIO (*general purpose input/output*) do microcontrolador utilizando um firmware adaptado de [19]. Os dados são enviados para o computador via protocolo serial RS-485. O nível TTL da porta UART é convertido para o nível RS-485 pelo *driver* serial MAX485CAP da Maxim Integrated. Finalmente, o protocolo RS-485 é convertido para o padrão USB por um adaptador comercial. A Figura 4 apresenta a interface montada e o esquema elétrico.

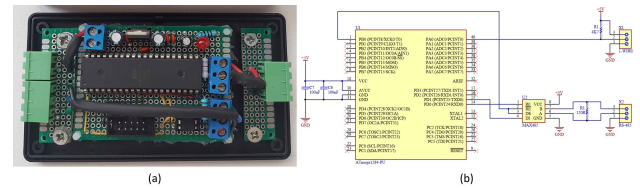


Figura 4 – Interface microcontrolada dos termômetros em calibração (a) e o respectivo esquema elétrico (b).

Os dados medidos pelo ohmímetro e pela interface dos termômetros são enviados diretamente para um computador. O software para visualização e registro destes dados foi desenvolvido em linguagem de programação gráfica de alto nível desenvolvida pela National Instruments. O ambiente de desenvolvimento do software LabVIEW permite o desenvolvimento das rotinas desejadas, controlando os protocolos GPIB e RS-485 convertidos para as portas USB do computador por meio de ícones tanto para o código fonte quanto para a interface de comunicação com o usuário. A Figura 5 apresenta o módulo desenvolvido para visualização dos dados medidos pelo termômetro de referência e dos sensores em calibração. O valor da resistência do Pt-100 é gravado em arquivo de texto em conjunto com todas as indicações digitais para posterior análise estatística e estimativa da incerteza de medição.

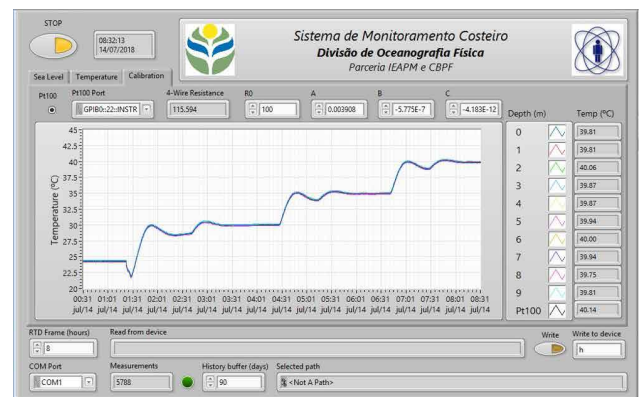


Figura 5 – Módulo de calibração desenvolvido para visualização e registro dos dados utilizando LabVIEW.

3. METODOLOGIA DE CALIBRAÇÃO

O objetivo principal do procedimento de calibração foi determinar a correção que deve ser aplicada à indicação do termômetro digital para referenciá-la à Escala Internacional de Temperatura de 1990 (ITS-90). A metodologia escolhida buscou atender à maioria dos requisitos exigidos pela Norma Brasileira NBR 14610 [20] criada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). A NBR 14610 especifica o método de calibração para um indicador de temperatura com sensor, por comparação com instrumento padrão rastreável à ITS-90. De acordo com o método, ambos os instrumentos foram submetidos a um meio térmico com temperatura controlada, onde foram tomadas 120 leituras consecutivas e independentes, em intervalos de 10 segundos, para cada temperatura t_{90} .

Para cada série de medidas o modelo de medição da correção C foi expresso por:

$$C = t_{ref} - t_{ind} \quad (2)$$

onde t_{ref} é a referência de temperatura na ITS-90 e t_{ind} é a temperatura indicada por cada instrumento em calibração. A temperatura do meio térmico foi variada dentro da faixa de interesse e na quantidade de pontos desejados. Foram escolhidos 9 pontos de temperatura contidos na faixa de calibração do termômetro de referência (10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 e 50 °C). Os valores dos instrumentos foram comparados em cada ponto para a determinação da curva de calibração e a avaliação das componentes de incerteza envolvidas no processo de medição. Ao final do procedimento os valores encontrados para a correção foram ajustados pelo método dos mínimos quadrados para determinação da curva de calibração.

A incerteza estimada do ajuste foi combinada com as fontes de incerteza levantadas para avaliação da incerteza de medição do termômetro em cada temperatura. Todo o procedimento para avaliação das incertezas foi baseado na propagação de variâncias e covariâncias, conhecida como lei da propagação de incertezas, segundo as orientações contidas no Guia para Expressão de Incerteza de Medição [21], conhecido na literatura como método GUM ou método clássico [22]. O método indica que, após cada fonte de incerteza ser estimada, as mesmas devem ser propagadas para uma incerteza-padrão combinada $u_c(y)$, expressa a partir de:

$$u_c^2(y) = \underbrace{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i)}_{1^\circ \text{ termo}} + 2 \underbrace{\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} cov(x_i, x_j)}_{2^\circ \text{ termo}} \quad (3)$$

onde n é a quantidade fontes de incerteza x_i estimadas para um modelo de medição na forma $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, as derivadas parciais são chamadas de coeficientes de sensibilidade e a covariância estimada do 2º termo da equação, associada com x_i e x_j , é diferente de zero quando estas variáveis são correlacionadas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Incerteza Mínima do Sistema de Calibração

O valor da temperatura atribuído ao meio térmico representa a temperatura de referência em cada ponto da calibração. O seu modelo de medição foi definido por:

$$t_{ref} = t_{TIP}(W) + \delta t_W + \delta t_{cal} + \delta t_{ba} \quad (4)$$

onde,

$t_{TIP}(W)$ é a temperatura determinada pela TIP em função de W ;

δt_W é a correção da temperatura devida à razão entre as resistências;

δt_{cal} é a correção da calibração da TIP; e

δt_{ba} é a correção da estabilidade do banho térmico.

O valor de t_{TIP} , calculado em função de $W(t)$, foi obtido diretamente pela solução da equação (1):

$$t_{tip} = \frac{-A + \sqrt{A^2 - 4 \cdot B \cdot (1 - W(t))}}{2 \cdot B} \quad (5)$$

onde os valores dos coeficientes A e B utilizados foram fornecidos pelo certificado de calibração da TIP (Tabela 1).

4.1.1. Avaliação das Medidas de Resistência

A determinação do parâmetro W e sua respectiva incerteza dependem da avaliação da resistência da TIP na temperatura de calibração e no ponto do gelo (0 °C). Os valores de $R(t)$ e $R(0^\circ\text{C})$ foram determinados por:

$$R(t) = R_t + \delta R_{cal} + \delta R_{res} \quad (6)$$

e

$$R(0^\circ\text{C}) = R_0 + \delta R_{0,cal} + \delta R_{0,res} + \delta R_{est} + \delta t_0 \quad (7)$$

onde os seus respectivos termos foram obtidos da seguinte forma:

- Os valores de R_t e R_0 foram obtidos pela média aritmética das 120 leituras de resistência na temperatura de calibração t e no ponto do gelo. As respectivas incertezas, u_{R_t} e u_{R_0} , calculadas pelo desvio padrão experimental da média, foram consideradas como componentes do tipo A, de distribuição normal, com 119 graus de liberdade.
- As correções δR_{cal} e $\delta R_{0,cal}$, referentes à calibração do instrumento de medição, foram consideradas nulas e as suas incertezas $u_{R_{cal}}$ e $u_{R_{0,cal}}$ foram obtidas a partir da fórmula especificada na folha de dados do fabricante para o período de 1 ano após a calibração de fábrica. O valor foi calculado por $\pm(0,010\% \text{ da leitura} + 0,004\% \text{ da faixa})$ para a faixa de medição de 100,0000 Ω com 4 terminais e corrente de teste de 1 mA. As incertezas foram consideradas como componentes do tipo B, de distribuição normal,

com fator de abrangência $k = 2$ e graus de liberdade infinitos.

- c) As correções δR_{res} e $\delta R_{0_{res}}$, referentes à resolução de $0,0001 \Omega$ do multímetro, foram consideradas nulas e as suas incertezas $u_{R_{res}}$ e $u_{R_{0_{res}}}$ foram consideradas como componentes do tipo B, de distribuição uniforme com graus de liberdade infinitos. O valor da resolução foi utilizado para determinar os limites de $\pm(a = 0,0001/2)/\sqrt{3}$ da distribuição.
- d) A correção δR_{est} , referente à estabilidade da TIP, foi considerada nula e a sua incerteza $u_{R_{est}}$ foi considerada como componente do tipo B, de distribuição uniforme com graus de liberdade infinitos. O valor de $\Delta R_0 = |R_{0_f} - R_{0_i}|$, diferença entre as leituras médias de R_0 antes e depois do procedimento de calibração, foi utilizado para determinar os limites de $\pm(a = \Delta R_0)/\sqrt{3}$ da distribuição. Essa correção pode ser utilizada quando o nível de incerteza requerido não demanda a avaliação da contribuição de histerese.
- e) A correção δt_0 , devida à realização do banho do ponto do gelo conforme orientado em [23], foi considerada como nula e a sua incerteza u_{t_0} como componente do tipo B, de distribuição uniforme com graus de liberdade infinitos. O valor conhecido de $0,01 \text{ }^\circ\text{C}$, baseado na experiência de sua realização em laboratórios de calibração [24], foi utilizado para determinar os limites de $\pm(a = 0,01)/\sqrt{3}$ da distribuição.

Os resultados estimados para $u_{R(t)}$ e $u_{R(0^\circ\text{C})}$ foram obtidos a partir da aplicação da LPU nas equações (6) e (7):

$$u_{R(t)}^2 = c_1^2 u_{R_t}^2 + c_2^2 u_{R_{cal}}^2 + c_3^2 u_{R_{res}}^2 \quad (8)$$

e

$$u_{R(0^\circ\text{C})}^2 = c_1^2 u_{R_0}^2 + c_2^2 u_{R_{0_{cal}}}^2 + c_3^2 u_{R_{0_{res}}}^2 + c_4^2 u_{R_{0_{est}}}^2 + c_R^2 u_{R_{t_0}}^2 \quad (9)$$

onde os coeficientes de sensibilidade são $c_1 = c_2 = c_3 = c_4 = 1$ e o coeficiente c_R , utilizado para converter o valor em graus Celsius para ohms, foi obtido pela derivada parcial da equação (1) em relação a t .

A correção δt_W foi considerada nula e sua incerteza u_{t_W} foi obtida a partir da seguinte equação:

$$u_{t_W}^2 = c_t^2 u_W^2 \quad (10)$$

onde c_t é o coeficiente de sensibilidade utilizado para converter o valor adimensional da incerteza u_W do parâmetro W para graus Celsius. O valor de c_t foi determinado pela derivada parcial da equação (5) em relação a W e o valor da incerteza u_W foi obtido a partir das derivadas parciais de $W(t)$ em relação a $R(t)$ e $R(0^\circ\text{C})$:

$$u_W^2 = \left(\frac{\partial W(t)}{\partial R(t)} \right)^2 u_{R(t)}^2 + \left(\frac{\partial W(t)}{\partial R(0^\circ\text{C})} \right)^2 u_{R(0^\circ\text{C})}^2 \quad (11)$$

4.1.2. Correção da Calibração da TIP

Uma vez que t_{tip} foi obtida diretamente da função de ajuste, a correção δt_{cal} foi considerada nula e sua incerteza $u_{t_{cal}}$, fornecida no certificado de calibração, foi considerada como componente do tipo B, de distribuição normal, com fator de abrangência $k = 2$ e graus de liberdade infinitos. As incertezas declaradas no certificado de calibração da TIP são apresentadas na Tabela 2. Nos pontos intermediários foi considerada a maior incerteza do intervalo.

Tabela 2 – Incerteza declarada no certificado de calibração da TIP para um fator de abrangência $k = 2$ e probabilidade de abrangência de aproximadamente 95% [16].

Temperatura ($^\circ\text{C}$)	U ($^\circ\text{C}$)
10,026	0,025
20,020	0,025
29,997	0,038
40,065	0,028
50,065	0,054

4.1.3. Correção da Estabilidade do Banho Térmico

A estabilidade do banho foi avaliada conforme as orientações descritas em [25]. Foram realizadas 180 leituras da TIP em intervalos de 10 segundos, o que corresponde a um tempo total de 30 minutos de observação. A correção δt_{ba} foi considerada nula e a sua incerteza $u_{t_{ba}}$ como componente do tipo B, de distribuição uniforme com graus de liberdade infinitos. O valor do máximo desvio entre cada temperatura medida e o valor médio de todas as observações foi utilizado para determinar os limites de $\pm(a = \max |t_{TIP_i} - \bar{t}_{TIP}|)/\sqrt{3}$ da distribuição. A Figura 6 apresenta a série de medidas com o valor médio de $24,488 \text{ }^\circ\text{C}$ e desvio padrão de $0,004 \text{ }^\circ\text{C}$. O experimento foi realizado em temperatura ambiente de $25,2 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ e o desvio máximo observado foi de $0,0086 \text{ }^\circ\text{C}$.

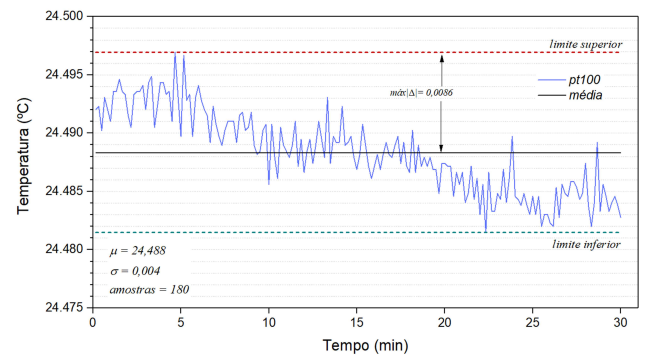


Figura 6 – Avaliação da estabilidade do banho em $24,488 \text{ }^\circ\text{C}$.

O baixo valor do desvio encontrado em relação a incerteza inicial de fábrica dos termômetros em calibração permite deduzir que este banho térmico possui performance ad-

equada para o procedimento de calibração proposto. Na folha de dados do fabricante do banho [11] não é informado o valor da estabilidade e , portanto, não foi possível fazer uma comparação. Entretanto, o valor encontrado no experimento é significativamente superior ao valor da sensibilidade ($\pm 0,1$ °C) do termômetro utilizado pelo controlador térmico do equipamento. Este fato indica que foi acertada a decisão de não usar o sensor de temperatura do controlador do banho como referência para calibração.

4.1.4. Incerteza Final do Sistema de Calibração

A incerteza associada ao procedimento de medição da temperatura de referência considerou todas as contribuições do arranjo experimental desenvolvido e representa a incerteza mínima de calibração para os experimentos realizados no Laboratório de Instrumentação e Medidas (LIM) do CBPF. O resultado estimado para $u_{t_{ref}}$ foi obtido a partir da aplicação da LPU na equação (4):

$$u_{t_{ref}}^2 = c_1^2 u_{t_w}^2 + c_2^2 u_{t_{cal}}^2 + c_3^2 u_{t_{ba}}^2 \quad (12)$$

onde os coeficientes de sensibilidade são $c_1 = c_2 = c_3 = 1$. A Tabela 3 apresenta o resultado obtido para as 9 temperaturas de referência.

Tabela 3 – Resultado da estimativa de incerteza do sistema de calibração.

t_{ref}	u_{t_w}	$u_{t_{cal}}$	$u_{t_{ba}}$	$u_{t_{ref}}$
10,198	0,027031	0,0125	0,000497	0,029785
15,124	0,027516	0,0125	0,000497	0,030226
20,145	0,028128	0,0125	0,000497	0,030784
24,488	0,028442	0,0190	0,000497	0,034208
30,172	0,029016	0,0190	0,000497	0,034687
35,144	0,029605	0,0190	0,000497	0,035181
40,120	0,030013	0,0140	0,000497	0,033121
45,193	0,030543	0,0270	0,000497	0,040771
50,402	0,031050	0,0270	0,000497	0,041151

O maior valor encontrado na Tabela 3, referente à temperatura de 50 °C, foi considerado como representando a incerteza mínima de calibração que o arranjo experimental é capaz de oferecer. Para laboratórios de calibração acreditados pelo INMETRO este valor é definido em [26] como a capacidade de medição e calibração (CMC) do laboratório.

Quanto menor o valor da CMC maior é a qualidade do serviço prestado. Levando-se em consideração que foram avaliadas as maiores fontes de incertezas, o resultado encontrado não teria uma diferença significativa caso fossem cumpridos todos os requisitos de acreditação. Deste modo, é possível comparar o valor da incerteza mínima do arranjo experimental com a CMC publicada no escopo de acreditação de todos os laboratórios acreditados, disponível no site do INMETRO [27]. O valor estimado de 0,082 °C para um fator de abrangência $k = 2$ e probabilidade de abrangência de aproximadamente 95% se mostrou inferior aos valores de CMC de diversos laboratórios acreditados.

4.2. Incerteza do Termômetro em Calibração

Na Figura 7 é apresentado o espalhamento do erro entre os 11 sensores utilizados antes de aplicar o ajuste de calibração. O resultado demonstra um comportamento de aproximadamente 0,5 °C para $\pm 3\sigma$, semelhante ao comportamento esperado conforme consta na folha de dados do fabricante, com quase a mesma amplitude de dispersão.

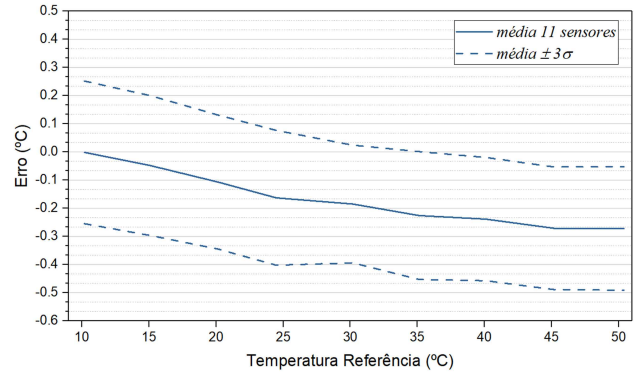


Figura 7 – Variação do erro na faixa de calibração.

O modelo de medição para a indicação a ser corrigida dos termômetros digitais (TD) em calibração foi definido por:

$$t_{ind} = t_{TD} + \delta t_{res} + \delta t_{est} \quad (13)$$

onde,

t_{TD} é a temperatura determinada pelo TD;

δt_{res} é a correção devida à resolução da indicação digital;

e

δt_{est} é a correção associada à estabilidade do TD.

Os termos da equação de t_{ind} foram obtidos da seguinte forma:

- O valor de t_{TD} foi obtido pela média aritmética das 120 indicações do TD. A sua incerteza u_{TD} , calculada pelo desvio-padrão experimental da média, foi considerada como componente do tipo A, de distribuição normal, com 119 graus de liberdade.
- A correção δt_{res} foi considerada nula e a sua incerteza u_{res} como componente do tipo B, de distribuição uniforme com graus de liberdade infinitos. O TD foi configurado para a resolução máxima de 12 bits, onde o menor valor de temperatura que é possível diferenciar é de 0,0625 °C. O valor da resolução foi utilizado para determinar os limites de $\pm(a = 0,0625/2)/\sqrt{3}$ da distribuição.
- A correção δt_{est} foi considerada nula e sua incerteza u_{est} como componente do tipo B, de distribuição uniforme com graus de liberdade infinitos. O valor de $\Delta t_0 = |t_{0f} - t_{0i}|$, diferença entre as leituras médias de t_{TD} no ponto do gelo antes e depois do procedimento de calibração, foi utilizado para determinar os limites de $\pm(a = \Delta t_0)/\sqrt{3}$ da distribuição. Da mesma forma

Tabela 4 – Planilha completa para cálculo da incerteza do Termômetro 1 ($t_{ref} = 20\text{ }^\circ\text{C}$).

Grandeza	Incerteza-padrão	Unid.	Tipo de distribuição	Divisor	Cofic. de sensibilidade	Contribuição	Unid.	Graus de liberdade	Contribuição relativa (%)
R_0	0,00021	Ω	normal	1	c_{R_0} ($^\circ\text{C}/\Omega$)	0,00583	$^\circ\text{C}$	119	2,21
δR_{0cal}	0,01399	Ω	normal	2	c_{R_0} ($^\circ\text{C}/\Omega$)	0,01943	$^\circ\text{C}$	∞	24,48
δR_{0res}	0,0001	Ω	uniforme	$2\sqrt{3}$	c_{R_0} ($^\circ\text{C}/\Omega$)	0,00008	$^\circ\text{C}$	∞	0,00
δR_{0est}	0,00142	Ω	uniforme	$\sqrt{3}$	1 ($^\circ\text{C}$)	0,00228	$^\circ\text{C}$	∞	0,34
δR_{0_0}	0,01	$^\circ\text{C}$	uniforme	$\sqrt{3}$	c_{R_0} ($^\circ\text{C}/\Omega$)	0,00577	$^\circ\text{C}$	∞	2,16
R_t	0,001010	Ω	normal	1	c_{R_0} ($^\circ\text{C}/\Omega$)	0,00260	$^\circ\text{C}$	119	0,44
δR_{cal}	0,014780	Ω	normal	2	c_{R_0} ($^\circ\text{C}/\Omega$)	0,01903	$^\circ\text{C}$	∞	23,49
δR_{res}	0,0001	Ω	uniforme	$2\sqrt{3}$	c_{R_0} ($^\circ\text{C}/\Omega$)	0,00007	$^\circ\text{C}$	∞	0,00
δt_{cal}	0,0125	$^\circ\text{C}$	uniforme	1	1 ($^\circ\text{C}$)	0,01250	$^\circ\text{C}$	∞	10,14
δt_{ba}	0,0086	$^\circ\text{C}$	uniforme	$\sqrt{3}$	1 ($^\circ\text{C}$)	0,00497	$^\circ\text{C}$	∞	1,60
δt_{TD}	0,002757	$^\circ\text{C}$	normal	1	1 ($^\circ\text{C}$)	0,00276	$^\circ\text{C}$	119	0,49
δt_{res}	0,0625	$^\circ\text{C}$	uniforme	$2\sqrt{3}$	1 ($^\circ\text{C}$)	0,01804	$^\circ\text{C}$	∞	21,12
δt_{est}	0,00313	$^\circ\text{C}$	uniforme	$\sqrt{3}$	1 ($^\circ\text{C}$)	0,00181	$^\circ\text{C}$	∞	0,21
δt_{ajus}	0,01434	$^\circ\text{C}$	normal	1	1 ($^\circ\text{C}$)	0,01434	$^\circ\text{C}$	∞	13,33

que ocorre para a TIP essa correção pode ser utilizada quando o nível de incerteza requerido não demanda a avaliação da contribuição de histerese.

O resultado estimado para u_{ind} foi obtido a partir da aplicação da LPU na equação (13):

$$u_{ind}^2 = c_1^2 u_{TD}^2 + c_2^2 u_{res}^2 + c_3^2 u_{est}^2 \quad (14)$$

onde os coeficientes de sensibilidade são $c_1 = c_2 = c_3 = 1$.

4.3. Incerteza do Modelo de Ajuste

Para o ajuste de cada curva foram consideradas os 9 valores de correção calculados em cada ponto de calibração. A correção δt_{ajus} foi considerada nula e a sua incerteza $u_{t_{ajus}}$ como componente do tipo A, de distribuição normal, com 6 graus de liberdade. Os 9 graus de liberdade inicialmente disponíveis foram diminuídos da quantidade de parâmetros calculados por meio do ajuste $(n-3)$. O valor de $u_{t_{ajus}}$ foi calculado em função da soma dos quadrados dos desvios de cada correção c_i determinada em relação ao valor estimado \hat{c}_i pela curva de regressão [28]:

$$u_{t_{ajus}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (c_i - \hat{c}_i)^2}{\text{graus de liberdade}} \quad (15)$$

4.4. Balanço das Incertezas

A avaliação da contribuição relativa de cada fonte de incerteza permitiu identificar quais fontes apresentam maior influência. Para que as grandezas pudessem ser comparadas foi preciso apresentá-las na unidade de medida da propriedade em estudo, que neste caso é em graus Celsius, utilizando os coeficientes de sensibilidade c_{R_0} e c_{R_t} . Estes coeficientes foram expressos levando em consideração a relação

entre a resistência no ponto de calibração e no ponto do gelo (W), calculada pela derivada parcial de W em relação a $R(0^\circ\text{C})$ e $R(t)$, respectivamente. Como é possível observar na Tabela 4, algumas contribuições apresentam valores significativamente superiores. A contribuição da incerteza devida à resolução do termômetro digital, por exemplo, chega a ser maior do que a contribuição devido à estabilidade em aproximadamente 10 vezes. No entanto, a contribuição associada a repetitividade não passou de 0,5% e o seu valor corresponde a um desvio-padrão de 0,0302 (quase a metade da resolução conseguida com 12 bits). Este fato sugere que, em situações onde seja possível utilizar técnicas de sobreamostragem, como foi realizada em [29] para este mesmo tipo de termômetro, aumentar a resolução em 1 ou 2 bits permitirá explorar de forma otimizada a precisão alcançada por este sensor.

Outras contribuições que apresentaram impacto significativo correspondem a incerteza herdada da calibração do multímetro nas medidas de $R(t)$ e $R(0^\circ\text{C})$. Apesar de o multímetro permitir realizar medidas de resistência a 4 pontas com resolução na unidade da quarta casa decimal, pouco se pode fazer em relação à melhoria de sua exatidão. Como pode ser observado em [30], certificados de calibração emitidos por diferentes laboratórios acreditados para o mesmo multímetro utilizado neste trabalho não obtiveram uma incerteza inferior ao valor considerado nesta avaliação.

4.5. Incerteza Final da Calibração

O resultado estimado para a incerteza final de calibração foi obtido a partir de:

$$u_c^2 = c_1^2 u_{ref}^2 + c_2^2 u_{ind}^2 + c_3^2 u_{t_{ajus}}^2 \quad (16)$$

onde u_c é a incerteza combinada da correção de calibração na temperatura t e os coeficientes de sensibilidade são $c_1 = c_2 = c_3 = 1$.

Tabela 5 – Resultado da regressão linear para todos os termômetros em calibração.

Termômetro	a_1	a_2	a_3	R^2	$u_{t_{ajus}}$
Term 1	-0,2113624	0,01805882	-0,00018884665	0,98344	0,01434
Term 2	-0,1595772	0,01928833	-0,0001941927	0,97962	0,01798
Term 3	-0,04237302	0,01783893	-0,0001881991	0,98561	0,01310
Term 4	-0,2563207	0,01881831	-0,0001414712	0,99369	0,01304
Term 5	-0,07566701	0,01595666	-0,0001565792	0,99054	0,01046
Term 6	-0,1335065	0,01548670	-0,0001256539	0,99156	0,01170
Term 7	-0,3437740	0,01735423	-0,0001566336	0,99484	0,00916
Term 8	-0,1282831	0,01490396	-0,0001386856	0,98703	0,01219
Term 9	0,02777196	0,006707633	-0,00004002497	0,98223	0,00920
Term 10	-0,08350611	0,01280469	-0,0001381736	0,96454	0,01438
Term 11	-0,2067135	0,01480053	-0,0001264977	0,98954	0,01185

Finalmente, o resultado da avaliação da incerteza pode ser divulgado como um intervalo de abrangência no qual a metade deste intervalo é denominada como incerteza expandida e definida por:

$$U = k \cdot u_c = t(0,9545; v_{eff} - 1) \cdot u_c \quad (17)$$

onde o fator de abrangência k foi calculado a partir do valor tabelado t da distribuição t -Student como uma função $f = t(\alpha, \nu)$. O nível de significância $\alpha = 0,0455$ corresponde a uma probabilidade de 95,45% para que o mensurando seja determinado dentro de um intervalo de $\pm t$ em torno de seu valor médio. Os graus de liberdade são calculados como $(v_{eff} - 1)$. Os graus de liberdade efetivos v_{eff} são obtidos a partir da equação de Welch-Satterwaite, conforme recomendado em [21], desenvolvida para todas as fontes de incertezas do tipo A avaliadas:

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\frac{(c_{R_0} u_{R_0})^4}{n-1} + \frac{(c_{R_t} u_{R_t})^4}{n-1} + \frac{(c_1 u_{r_{TD}})^4}{n-1} + \frac{(c_2 u_{t_{ajus}})^4}{n-3}} \quad (18)$$

onde os graus de liberdade associados às incertezas do tipo B ($u_{R_{0cal}}, u_{R_{0res}}, u_{R_{0est}}, u_{cal}, u_{R_{cal}}, u_{R_{res}}, u_{R_{est}}, u_{R_{t0}}, u_{ba}, u_{res}$ e $u_{t_{est}}$) foram considerados como infinitos e os coeficientes de sensibilidade $c_1 = c_2$ possuem valor unitário.

Para cada termômetro foi feito um gráfico como aquele apresentado na Figura 8, apresentando o resultado do ajuste e a incerteza expandida para todos os pontos de calibração. Os limites da incerteza expandida levam em consideração o resultado da calibração, incluindo a incerteza do próprio ajuste.

A Tabela 5 apresenta os coeficientes de regressão calculados pelo método dos mínimos quadrados para a curva de correção de cada termômetro em calibração. Na tabela também são apresentados o respectivo coeficiente de determinação R^2 e a incerteza atribuída ao ajuste de cada curva. Analisando a Tabela 5 é possível concluir que todos os ajustes realizados foram capazes de explicar a variação do valor da correção em relação a variação da temperatura indicada entre aproximadamente 96 a 99% dos casos (valores referentes ao R^2 encontrados para o Termômetro 10 e o termômetro 7). Os valores de incerteza do ajuste também demonstram um valor de incerteza significativamente infe-

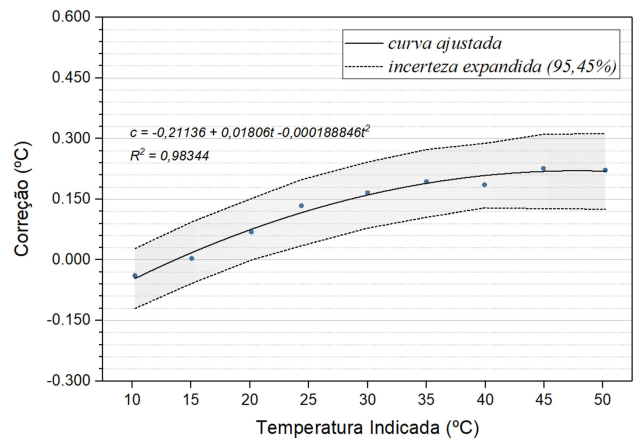


Figura 8 – Curva de correção do Termômetro 1 e limites da incerteza expandida da calibração declarada para uma probabilidade de abrangência de 95,45%.

rior ao valor atribuído à exatidão do sensor divulgado na folha de dados do fabricante.

Em certificados de calibração emitidos por laboratórios acreditados é comum apresentar em uma tabela o resultado da incerteza combinada e fazer referência à identificação do instrumento padrão utilizado. Neste trabalho foram incluídas na tabela final as contribuições do instrumento de referência, do processo de medida do item em calibração e da incerteza do ajuste para fins de avaliação da metodologia. A Tabela 6 apresenta detalhadamente o resultado de cada contribuição referente à calibração do Termômetro 1 e a incerteza expandida da medição é declarada como a incerteza padrão combinada, multiplicada pelo fator de abrangência, o qual corresponde a uma probabilidade de abrangência de 95,45%.

4.6. Validação da Calibração

As curvas de calibração foram aplicadas aos valores medidos pelos termômetros em uma nova série de 180 medições realizadas a cada 10 segundos, o que corresponde a um tempo total de observação de 60 minutos. Na Figura 9 é ap-

Tabela 6 – Resultado da calibração do Termômetro 1 onde a incerteza expandida da medição U corresponde a uma probabilidade de abrangência de 95,45%.

t_{ref}	t_{ind}	Correção	$u_{t_{ref}}$	$u_{t_{ind}}$	$u_{t_{ajus}}$	u_c	k	U
10,198	10,237	-0,046	0,030	0,018	0,014	0,037	2,01	0,074
15,124	15,121	0,017	0,030	0,018	0,014	0,038	2,01	0,076
20,145	20,076	0,076	0,031	0,018	0,014	0,038	2,01	0,076
24,488	24,354	0,117	0,034	0,018	0,014	0,041	2,01	0,082
30,172	30,006	0,160	0,035	0,018	0,014	0,041	2,01	0,082
35,144	34,951	0,190	0,035	0,018	0,014	0,042	2,01	0,084
40,120	39,934	0,209	0,033	0,018	0,014	0,040	2,01	0,080
45,193	44,967	0,218	0,041	0,018	0,014	0,046	2,00	0,092
50,402	50,180	0,219	0,041	0,018	0,014	0,047	2,00	0,094

resutado o erro observado para todos os termômetros.

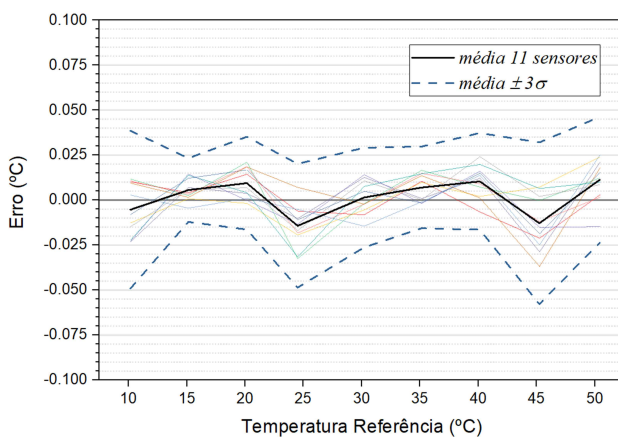


Figura 9 – Erro observado após a aplicação do ajuste de calibração em uma nova série de 60 minutos para os 11 sensores.

A variação de em relação a média dos 11 sensores após a aplicação do ajuste de calibração não foi superior a . Considerando todas as contribuições de incerteza avaliadas du-

rante a calibração, o resultado é inferior à para uma probabilidade de abrangência de . Este resultado corrobora com a reprodutibilidade dos resultados obtidos em [8] na avaliação de um conjunto dos mesmos sensores utilizados neste trabalho.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foram apresentados o arranjo experimental utilizado e a metodologia de calibração de termômetros digitais. Os equipamentos utilizados foram adaptados para atender às orientações contidas nas principais normas de metrologia. As leituras dos sensores foram comparadas em 9 pontos dentro da faixa de calibração do termômetro de referência. As correções encontradas para cada sensor foram ajustadas em curvas que apresentaram um coeficiente de determinação superior a 0,96. De acordo com os dados do fabricante esperava-se um valor para exatidão de $\pm 0,5$ °C em toda a faixa de medição. O processo de avaliação de incerteza realizado neste trabalho resultou em uma redução para $\pm 0,1$ °C, entre a faixa de 10 e 50 °C, indicando ser segura sua aplicação alternativa em fundeios de águas rasas.

- [1] R. Srinivasan, V. Rajendran, S. Zacharia, T. Sudhakar, Advances in sea surface layer temperature measurements with fast responding thermistor arrays on drifting buoys, Res. Commun. 115 (2018) 325–330. doi:10.18520/cs/v115/i2/325-330.
- [2] P. Álvarez, A. Almécija, I. González, S. Torres, Development and calibration of a cost-effective temperature sensor, in: 7th Int. Work. Mar. Technol. MARTECH 2016. “Instrumentation viewpoint”, Universitat Politècnica de Catalunya, 2016: p. 17–18. <http://hdl.handle.net/2117/99755> (acessado 16 de setembro de 2019).
- [3] W. Schmidt, D. Raymond, D. Parish, I.G.C. Ashton, P.I. Miller, C.J.A. Campos, J.D. Shutler, Design and operation of a low-cost and compact autonomous buoy system for use in coastal aquaculture and water quality monitoring, Aquac. Eng. 80 (2018) 28–36. doi:10.1016/J.AQUAENG.2017.12.002.
- [4] J.G. Webster, The Measurement, Instrumentation and Sensors, IEEE Press, 1999.
- [5] G. Silva, M.S. Dourado, R. Candella, Estudo preliminar da climatologia da ressurgência na região de Arraial do Cabo, RJ, in: XIV Congr. Bras. Meteorol., Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2006.
- [6] F. Udrea, S. Santra, J.W. Gardner, CMOS temperature sensors - concepts, state-of-the-art and prospects, in: 2008 Int. Semicond. Conf., IEEE, 2008: p. 31–40. doi:10.1109/SMICND.2008.4703322.
- [7] Maxim Integrated, Application Note 208: Curve Fitting the Error of Bandgap-Based Digital Temperature Sensor, [s.d.]. <https://www.maximintegrated.com/en/appnotes/index.mvp/id/208> (acessado 16 de setembro de 2019).
- [8] G. Lewis, P. Merken, M. Vandewal, Enhanced Accuracy of CMOS Smart Temperature Sensors by Nonlinear Curvature Correction, Sensors. 18 (2018) 4087. doi:10.3390/s18124087.
- [9] M.V.R. Lopes, R.N. Candella, G. Cernicchiaro, Desenvolvimento de um Sistema de Monitoramento de Gradiente Térmico Costeiro, in: XXII Congr. Bras. Automática - CBA2018, João Pessoa - PB, 2018.

- doi:10.20906/CPS/CBA2018-0898.
- [10] Maxim Integrated, Guidelines for Reliable Long Line 1-Wire @ Networks 1-Wire Network Topologies, 2008.
 - [11] Quimis, Banho Ultratermoestático Microprocessado com Circulador Q214M2, 28a, [s.d.]. www.quimis.com.br.
 - [12] Labfacility, Self Adhesive Patch PT100 Sensor - Type PRT, [s.d.]. www.labfacility.com.
 - [13] IEC 60571 - Industrial Platinum Resistance Thermometers and Platinum Temperature Sensors, 2.0, Geneva, Switzerland, 2008.
 - [14] H.L. Callendar, On the Practical Measurement of Temperature: Experiments Made at the Cavendish Laboratory, Cambridge, Philos. Trans. R. Soc. London. A. 178 (1887) 161–230. doi:10.2307/90554.
 - [15] ABNT, NBR 13773 - Termorresistência Industrial de Platina - Requisitos e Métodos de Ensaio, Rio de Janeiro, 1997.
 - [16] INMETRO, Certificado de Calibração DIMCI 1466/2017 - Termômetro de Resistência de Platina, 2017.
 - [17] Service Guide Multimeter Agilent 34401A, 2005.
 - [18] Atmel Corporation, ATmega1284p - 8-bit AVR Microcontroller with 128k Bytes In-System Programmable Flash, 2009.
 - [19] Atmel Corporation, AVR318: Dallas 1-Wire Master on tinyAVR and megaAVR, San Jose, CA, 2016.
 - [20] ABNT, NBR 14610 - Indicador de Temperatura com Sensor - Calibração por Comparação com Instrumento-Padrão, 2000.
 - [21] INMETRO, GUM 2008 - Guia para a expressão de incerteza de medição, 2008. http://www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes_avulsas.asp.
 - [22] G.A. de A. Gonçalves, R. Requião, R. de A. Kalid, Desenvolvimento de Software para Avaliação da Incerteza de Medição, in: 6o Congr. Bras. Metrol., 2011.
 - [23] ABNT, NBR 15854 - Banho do Ponto do Gelo - Preparação, Conservação e uso como uma Temperatura de Referência, 1a, Rio de Janeiro, 2010.
 - [24] Nota Técnica 004 - Preparação e Uso de Banho de Gelo em Atividades de Calibração, 2013.
 - [25] EURAMET cg-13 - Calibration of Temperature Block Calibrators, 2015.
 - [26] INMETRO, DOQ-CGCRE-020 - Definição de Termos Utilizados nos Documentos Relacionados à Acreditação de Laboratórios, Produtores de Materiais de Referência e Provedores de Ensaio de Proficiência, 2019.
 - [27] INMETRO, RBC - Rede Brasileira de Calibração, ([s.d.]). <http://www.inmetro.gov.br/laboratorios/rbc> (acessado 15 de setembro de 2019).
 - [28] P.A. Lopes, Incerteza de Medições para Ensaio Físico-Químicos, Autografia, 2017.
 - [29] A.P. Leontyev, I.O. Yaroshchuk, S. V. Smirnov, A. V. Koshelova, A.A. Pivovarov, A.N. Samchenko, A.N. Shvyrev, A spatially distributed measuring complex for monitoring hydrophysical processes on the ocean shelf, Instruments Exp. Tech. 60 (2017) 130–136. doi:10.1134/S0020441216060191.
 - [30] A. de F. Orlando, Calibração de um Termômetro Pt-100 como Padrão de Trabalho de um Laboratório de Serviços Metrológicos, in: Metrol. 2003 - Metrol. para a Vida, Sociedade Brasileira de Metrologia (SBM), Recife, Pernambuco, 2003.