



## CALIBRAÇÃO DINÂMICA DE SENSORES DE TEMPERATURA EM MEIO LÍQUIDO

**João Nildo de Souza Vianna**  
**Alessandro Borges de Souza Oliveira**  
**Reis dos Reis Rodrigues Henrique**  
**Michael Elias Katayose de Almeida**  
Universidade de Brasília – UnB  
Departamento de Engenharia Mecânica – ENM  
Campus Universitário Darcy Ribeiro  
Asa Norte – Brasília – DF – Brasil  
CEP: 70910-900  
E-mail: riccky@uol.com.br

***Resumo:** O objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia global de calibração dinâmica de sensores de temperatura, visando a obtenção de resultados de natureza abrangente que tornem objetiva a seleção de sensores de temperatura sob o ponto de vista de suas respostas dinâmicas. A análise da resposta dinâmica é feita através do estudo da variação da constante de tempo do sensor provocada pela variação do coeficiente convectivo do meio. Para tanto foi desenvolvida uma cuba rotativa com dispositivo de desmascaramento que permite gerar o degrau de temperatura padrão para diferentes coeficientes convectivos do meio líquido utilizado. São apresentados os resultados de qualificação metrológica da cuba desenvolvida, tais resultados validam e mostram a eficiência do dispositivo de calibração desenvolvido.*

***Palavras-chave:** metrologia, calibração dinâmica, temperatura, cuba rotativa.*

### 1. INTRODUÇÃO

A popularização crescente dos sistemas automatizados de controle, onde a resposta dinâmica dos sensores desempenha um papel fundamental, tem exigido o desenvolvimento de metodologias de calibração que assegurem a determinação da função resposta em frequência desses sensores com exatidão e confiabilidade metrológicas. A calibração dinâmica de sensores tem sido objeto de vários trabalhos de pesquisa onde o objetivo é o desenvolvimento de meios e métodos confiáveis e precisos para a determinação das características dinâmicas dos sensores. Entretanto, no que diz respeito aos sensores de temperatura, poucos são os trabalhos que apresentam resultados metrologicamente confiáveis.

A resposta dinâmica de sensores de temperatura, em especial os termopares, depende de duas características principais: resistência intrínseca, associada à sua construção, e resistência extrínseca, devido ao acoplamento com o meio (Vianna et al., 1993). Esta última é proporcional ao inverso do coeficiente de convecção do meio.

Para a calibração dinâmica de sensores de temperatura foi desenvolvida uma bancada de teste denominada Cuba Rotativa, com a finalidade principal de provocar uma excitação tipo degrau em sensores de temperatura, utilizando a técnica de desmascaramento (Neto, 1995). A Cuba Rotativa provoca um aumento do coeficiente convectivo do meio no qual é realizada a calibração dinâmica, possibilitando um eventual desacoplamento entre o sensor e este meio. Assim a resposta dinâmica do sensor de temperatura será influenciada apenas por características inerentes à sua construção.

No presente trabalho é apresentada a caracterização metrológica da Cuba Rotativa, visando estabelecer as condições adequadas para a realização dos ensaios de calibração dinâmica e a posterior elaboração de um procedimento de ensaios.

## 2. CALIBRAÇÃO DINÂMICA DE SENSORES DE TEMPERATURA

A calibração dinâmica tem por objetivos a determinação da função de transferência e a determinação das constantes de tempo do equipamento a ser calibrado. Como será visto mais adiante, a cada elemento sensor de temperatura está associada uma constante de tempo intrínseca que basicamente depende do termo de condução “k” e do volume do material utilizado, e outra, uma constante de tempo extrínseca, que está associada principalmente ao coeficiente de convecção “h” do meio em que o elemento sensor está inserido.

### 2.1. Modelamento Matemático para Calibração Dinâmica de Sensores de Temperatura

Considera-se aqui um sensor de temperatura imerso em um meio líquido, assumindo que a temperatura do fluido ( $T_F$ ) é maior que a temperatura do sensor ( $T$ ).

Considerando-se ainda que o fluxo de calor que sai do sensor é nulo, e que o fluxo de calor que entra ( $W$ ) é proporcional à diferença de temperatura ( $T_F - T$ ), temos (Bentley, 1988):

$$W = U \cdot A_s \cdot (T_F - T) \quad (2)$$

Onde:  $W$  = fluxo de calor que entra no sensor [W]  
 $U$  = coeficiente global de transferência de calor [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ]  
 $A_s$  = área efetiva de transferência de calor [ $m^2$ ]

Nesta configuração, a taxa de variação do calor sensível do sensor ( $Q$ ) é dada por:

$$Q = \rho_s \cdot V_s \cdot C_s \cdot \frac{d\Delta T}{dt} \quad (3)$$

Onde:  $\rho_s$  = massa específica do sensor [ $kg/m^3$ ]  
 $V_s$  = volume do sensor [ $m^3$ ]  
 $C_s$  = calor específico do material do sensor [ $J/kg \cdot ^\circ C$ ]

Aplicando-se o balanço de energia, considera-se que a taxa de variação do calor sensível ( $Q$ ) é igual à diferença entre o fluxo de calor que entra e o fluxo de calor que sai do sensor. Assim:

$$Q = W \Rightarrow \rho_s \cdot V_s \cdot C_s \cdot \frac{d\Delta T}{dt} = U \cdot A_s \cdot (\Delta T_F - \Delta T) \quad (4)$$

Onde:  $\Delta T_F = T_F - T_F(0-)$   
 $\Delta T = T - T(0-)$

sendo que  $T_F(0-)$  e  $T(0-)$  são as condições iniciais do problema.

A Eq. (4) pode ser reescrita como:

$$\frac{M_s \cdot C_s}{U \cdot A_s} \cdot \frac{d\Delta T}{dt} + \Delta T = \Delta T_F \quad (5)$$

Onde:  $M_S =$  massa do sensor ( $M_S = \rho_S \cdot V_S$ ) [kg]

A Eq. (5) é uma equação diferencial ordinária linear de primeira ordem na qual os termos  $d\Delta T/dt$  e  $\Delta T$  são multiplicados por coeficientes constantes, e o termo  $[M_S \cdot C_p / U \cdot A]$  tem dimensão de tempo.

Uma equação típica de um sistema dinâmico de primeira ordem é dada por:

$$\tau \cdot \frac{dS(t)}{dt} + S(t) = \kappa \cdot E(t) \quad (6)$$

Onde:  $S(t)$  = sinal de saída  
 $E(t)$  = sinal de entrada  
 $\tau$  = constante de tempo  
 $\kappa$  = sensibilidade estática do sensor

Comparando as Eqs. (5) e (6), tem-se, por analogia, que:

$$\tau = \frac{M_S \cdot C_S}{U \cdot A_S} \quad (i) \quad S(t) = \Delta T \quad (ii) \quad E(t) = \Delta T_F \quad (iii) \quad (7)$$

No coeficiente global de transferência de calor ( $U$ ) são computadas a resistência térmica interna do sensor, ligada ao calor específico, e a resistência térmica entre o sensor e o meio, ou seja, a resistência de acoplamento, ligada à convecção.

Do conceito de resistência térmica total, tem-se:

$$R_{TOT} = \frac{1}{U \cdot A_S} \quad (8)$$

Considerando-se as componentes intrínseca e extrínseca da resistência térmica total tem-se:

$$U \cdot A_S = \frac{1}{R_{intrínseca} + R_{extrínseca}} \quad (9)$$

Substituindo a Eq. (9) na Eq. (7.i), pode-se explicar a participação das resistências intrínseca e extrínseca na expressão da constante de tempo do sensor:

$$\tau = M_S \cdot C_S \cdot (R_{intrínseca} + R_{extrínseca}) \quad (10)$$

Como a condutividade térmica não varia de forma considerável para pequenos diferenciais de temperatura, a parcela intrínseca da resistência pode ser considerada constante. A transferência fora do sensor, ou seja, na interface com o meio se dá por convecção, e esta sim, ao contrário da condutividade térmica, varia largamente de acordo com as condições dinâmicas do meio.

Como  $R_{extrínseca}$  é dada pelo inverso do produto de “h” pela área “ $A_S$ ”, e todos os outros membros da equação são constantes, a Eq. (10) pode ser escrita da seguinte forma:

$$\tau = B1 + \frac{B2}{h} \quad \text{com} \quad B1 = M_S \cdot C_S \cdot R_{intrínseca} \quad \text{e} \quad B2 = \frac{M_S \cdot C_S}{A_S} \quad (11)$$

Uma análise da Eq. (11) deixa bem claras as parcelas de contribuição da  $R_{intrínseca}$  e da  $R_{extrínseca}$  no valor total da constante de tempo, e mostra ainda o caráter invariável da resistência intrínseca e a dependência da resistência extrínseca com relação ao coeficiente de convecção do meio “h”.

## 2.2. Método Experimental para Determinação da Constante de Tempo “ $\tau$ ”

Se a Eq. (11) for plotada em um gráfico  $\tau \times h$ , a visualização do comportamento da constante de tempo “ $\tau$ ” em função do coeficiente de convecção “h” fica muito bem evidenciada.

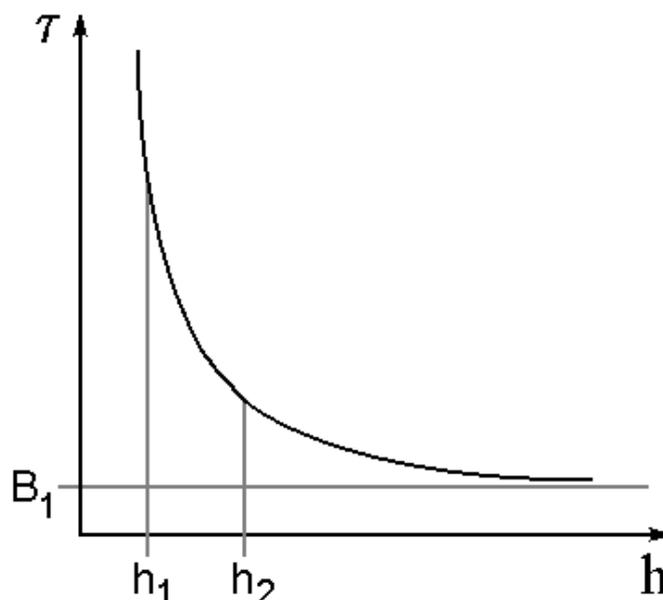


Figura 1 – Variação da constante de tempo com “h”

Como pode ser visto na Eq. (11), se o valor de “h” for indefinidamente grande, o segundo termo do lado direito da equação tende a zero, tornando o valor da constante de tempo aproximadamente igual ao valor de  $R_{intrínseca}$ .

Na prática é impossível a obtenção de um “h” infinito, mas como o formato da Eq. (11) é conhecido (uma hipérbole), é possível o levantamento de vários pares (h,  $\tau$ ) para valores bem controlados de “h”, calculando-se “ $\tau$ ” a partir do tempo de resposta de um sistema de primeira ordem, ou seja,  $\tau = 63,2\%$  do tempo de resposta total.

Os resultados dos ensaios permitem construir um trecho limitado da curva correspondente aos pares (h,  $\tau$ ) que são possíveis de se medir experimentalmente. Entretanto, através de um ajuste de curva hiperbólica é possível inferir o valor da constante de tempo intrínseca (Andrade, 1993).

## 3. CUBA ROTATIVA

Foi desenvolvido um dispositivo experimental para a realização de ensaios de calibração dinâmica de sensores de temperatura, denominado Cuba Rotativa. O princípio básico deste sistema é a possibilidade de se controlar o coeficiente convectivo de transferência de calor por meio do monitoramento da velocidade angular das cubas coaxiais. O degrau de temperatura é conseguido por meio do dispositivo de desmascaramento.

A Figura (2) mostra um esquema geral da Cuba Rotativa, onde são apresentados seus principais componentes: o motor, a transmissão (correias e polias), as cubas (interna e externa) e o cilindro pneumático. O detalhe do dispositivo de desmascaramento está apresentado na Fig. (3).

Este dispositivo permite que o sensor seja instalado diretamente dentro da veia líquida da cuba rotativa, evitando assim grandes impactos durante o mergulho. Para que o sensor fique isolado do

líquido aquecido, ele é protegido por uma máscara pressurizada impedindo a entrada de líquido em seu interior. Esta máscara está ligada a um cilindro pneumático que permite o desmascaramento do sensor, com grande velocidade, estabelecendo o contato com a veia líquida e possibilitando assim a geração do degrau de temperatura (Vianna et al., 1995).

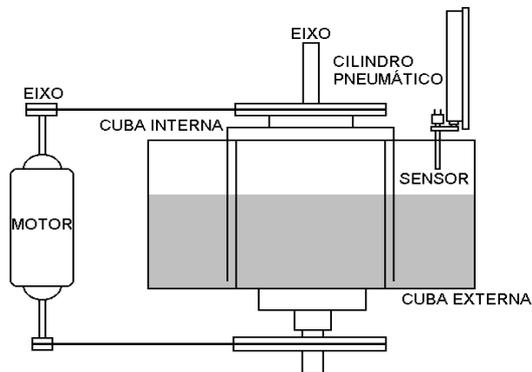


Figura 2 – Cuba Rotativa

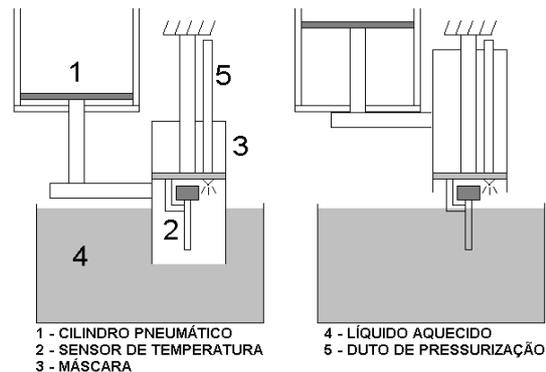


Figura 3 – Dispositivo de desmascaramento

### 3.1. Esquema de Montagem das Cubas Interna e Externa e a Seção de Testes

Uma outra peculiaridade do sistema de cubas rotativas é a relação de velocidades angulares entre a cuba interna, que gira a uma velocidade angular  $\omega_1$  igual a duas vezes a velocidade angular da cuba externa  $\omega_2$ . Este detalhe de montagem é decorrente da necessidade de uma mesma velocidade tangencial ao longo da seção de testes, pois o raio da cuba interna ( $r_1=150\text{mm}$ ) é igual à metade do raio da cuba externa ( $r_2=300\text{mm}$ ). O detalhe desta montagem é apresentado na Fig. (4).

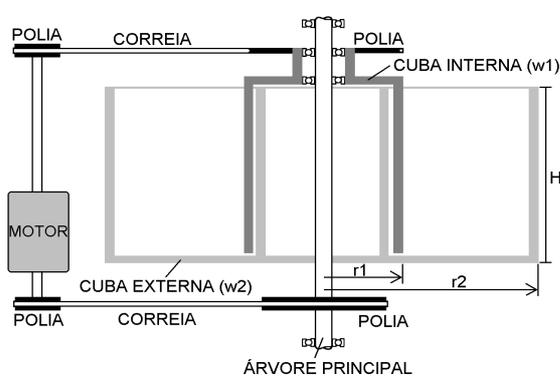


Figura 4 – Cubas interna e externa

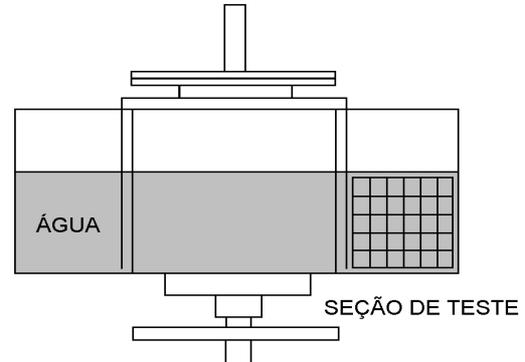


Figura 5 – Seção de testes

Foi criada uma zona de realização de ensaios, e para isso foi montada uma malha de quarenta e dois pontos na seção transversal da cuba, sendo sete posições ao longo do raio (entre  $r_1$  e  $r_2$ ), e seis posições ao longo da altura "H", para que se pudesse realizar os testes de caracterização metrológica da Cuba Rotativa (levantamento dos perfis de velocidade e temperatura e determinação da inércia térmica). Essa malha aparece detalhada na Fig. (5). As medidas de velocidade foram realizadas com o auxílio de um tubo de Pitot, e as de temperatura, utilizando-se uma termoresistência do tipo PT-100.

## 4. METODOLOGIA DOS ENSAIOS

Com o objetivo de se utilizar a Cuba Rotativa na calibração dinâmica de sensores comerciais foi realizada uma série de testes para a qualificação metrológica da mesma (Henrique, 2001). Foram analisadas as variações de velocidade e de temperatura, ao longo da seção transversal de testes, e

também a sua inércia térmica, tendo em vista que a cuba é desprovida de isolamento térmico. Esses resultados permitem analisar a influência dos principais parâmetros de funcionamento da cuba nos resultados das calibrações.

Utilizando a seção de testes descrita anteriormente, foram feitas seis medições de temperatura e velocidade para que fosse possível o cálculo da incerteza combinada. As medições foram realizadas em três rotações distintas, sendo 100, 200 e 300 rotações por minuto no motor.

#### 4.1. Determinação do Gradiente de Velocidade na Seção de Testes

São apresentadas amostras do perfil de velocidade na seção de ensaios, para as três rotações pré-estabelecidas e em três níveis de altura, sendo 20, 60 e 100 mm a partir do fundo da Cuba Rotativa.

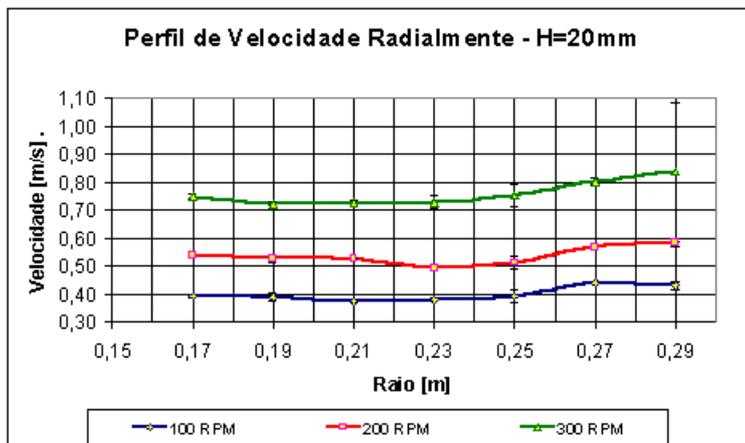


Figura 6 – Perfil de velocidade na veia líquida da cuba – H=20mm

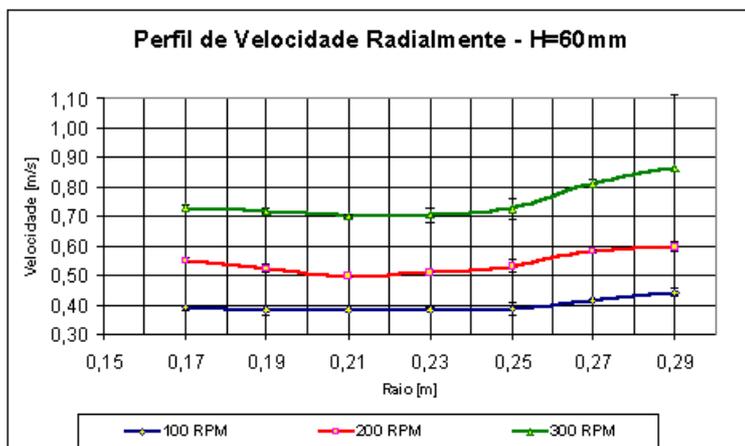


Figura 7 – Perfil de velocidade na veia líquida da cuba – H=60mm

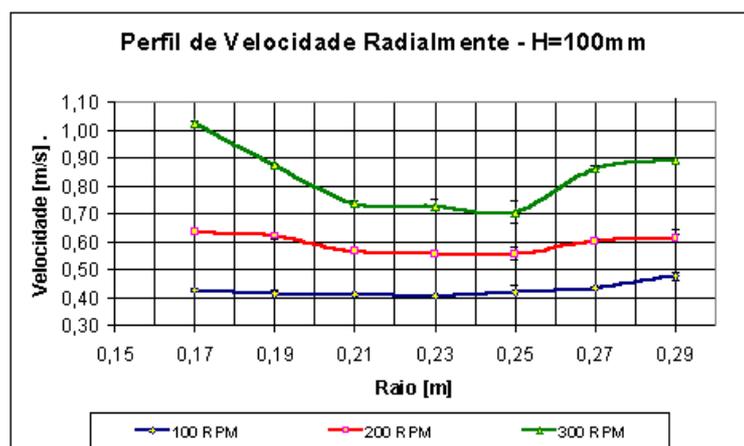


Figura 8 – Perfil de velocidade na veia líquida da cuba – H=100mm

É claramente visível a variação de velocidade ao longo do raio, independentemente da altura escolhida para essa avaliação. No entanto, pode-se perceber nas Figs. (6) a (8) que no intervalo central entre as duas cubas girantes, ou seja, entre as posições 0,21 m e 0,25 m ao longo do raio, que a velocidade permanece aproximadamente constante em todos os níveis de altura analisados.

Esta faixa de velocidades, constantes na parte central entre as cubas, permite que nesta posição sejam instalados os sensores a serem calibrados dinamicamente, sem que ocorram grandes variações de velocidade devido à sua instalação.

Outro motivo pelo qual sugere-se a instalação do sensor a ser calibrado na parte central entre as cubas é o fato de a veia líquida que passa pela região do sensor se dividir igualmente entre ele e as cubas interna e externa, evitando assim a geração de silagem na sua parte posterior, decorrente das grandes perturbações no escoamento provocadas pelas paredes da cuba.

#### 4.2. Determinação do Perfil de Temperatura na Seção de Testes

Utilizando a mesma malha de pontos utilizada para a determinação do gradiente de velocidade, e também a mesma metodologia para a realização dos ensaios, foi montada uma grade de temperatura na seção de testes. Os resultados das medições de temperatura foram aproximadamente constantes, com uma margem de erro de aproximadamente 0,1 Kelvin, ou seja, pode-se afirmar que o perfil de temperatura na seção de ensaios é aproximadamente constante (Henrique, 2001).

#### 4.3. Determinação da Inércia Térmica da Cuba Rotativa

O gráfico da Fig. (9) mostra como ocorre a queda de temperatura do líquido contido na Cuba Rotativa ao longo do tempo:

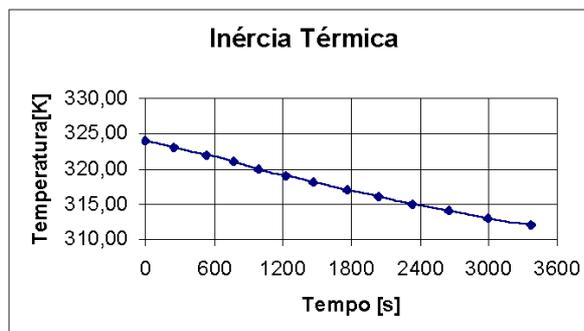


Figura 9 – Inércia térmica da Cuba Rotativa em R=0,23m e H=0,06m

Analisando os seis primeiros pontos do gráfico da Fig. (9), percebe-se que, para que haja uma redução de 1 Kelvin na temperatura do líquido contido na cuba, é necessário um tempo de no mínimo 200 segundos, ou seja, se for definido que a variação máxima seja de 1 Kelvin no período de realização dos ensaios, o experimentalista irá dispor de um tempo aproximado de 3 minutos para a realização do ensaio.

Sendo conhecida a taxa de resfriamento da cuba na faixa de 310 Kelvin até 325 Kelvin, fica sugerido que novos experimentos sejam realizados nas temperaturas entre 323 Kelvin e 324 Kelvin, com uma duração máxima dos ensaios de 180 segundos.

A temperatura do sensor antes do desmascaramento deve ser controlada, podendo ser a temperatura ambiente em um local climatizado ou também uma temperatura padrão, como a temperatura de gelo fundente, por exemplo, que pode ser executada através de uma irrigação do sensor antes do desmascaramento.

## **5. CONCLUSÃO**

A partir da proposta inicial deste trabalho, que era a realização da caracterização metrológica da Cuba Rotativa, e após a obtenção dos resultados, conclui-se que ela pode certamente ser considerada um equipamento de calibração dinâmica de sensores de temperatura, mas algumas considerações devem ser observadas. Sejam elas:

O sensor a ser calibrado deve ser instalado exatamente na metade da distância entre a cuba interna e a cuba externa. Tal observação é decorrente da variação de velocidade ao longo do raio da cuba, sendo a parte central a que mantém os níveis de velocidade constantes, independente da rotação de trabalho da cuba.

Não foi verificada grande variação da temperatura na seção transversal de testes, ou seja, a cuba apresenta uma veia líquida com temperatura homogênea. No entanto, durante a realização dos ensaios recomenda-se a retirada das resistências de aquecimento da veia líquida, pois as mesmas induzem ruídos e interferências eletromagnéticas na resposta do sensor a ser calibrado. Devido à retirada das resistências de aquecimento, a cuba começa a apresentar um decaimento de temperatura, a uma taxa de aproximadamente 0,25 K/min, em um ambiente climatizado a 295 K (22 graus Celsius). Sugere-se que uma aquisição de dados não ultrapasse 3 minutos, de forma a manter a temperatura aproximadamente estável.

## **6. REFERÊNCIAS**

- Vianna, J. N. S., Andrade, F. E. M., 1993, “Análise da Influência das Variáveis de Acoplamento na Resposta Dinâmica de Sensores de Temperatura”, XII COBEM, Brasília, Brasil.
- Neto, A. C., 1995, “Calibração Dinâmica de Sensores de Temperatura – Cuba Rotativa”, Projeto de Graduação, ENM – UnB, Brasília, Brasil.
- Bentley, J. P., 1988, “Principles of Measurement Systems”, Longman Scientific & Technical, Essex, Inglaterra.
- Andrade, F. E. M., 1993, “Calibração Dinâmica de Sensores de Temperatura”, Projeto de Graduação, ENM – UnB, Brasília, Brasil.
- Vianna, J. N. S., Oliveira, A. B. S., Neto, A. C., 1995, “TC-12 - Contribuição para o Estudo de Meios de Calibração Dinâmica para Sensores de Temperatura”, III Congresso Anual de La Somim, México.
- Henrique, R. R. R., 2001, “Calibração Dinâmica de Sensores de Temperatura em Meio Líquido”, Projeto de Graduação, ENM – UnB, Brasília, Brasil.

## **7. DIREITOS AUTORAIS**

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

# DYNAMICAL CALIBRATION OF TEMPERATURE SENSORS IN LIQUID

**João Nildo de Souza Vianna**  
**Alessandro Borges de Souza Oliveira**  
**Reis dos Reis Rodrigues Henrique**  
**Michael Elias Katayose de Almeida**  
University of Brasilia – UnB  
Department of Mechanical Engineering – ENM  
Campus Darcy Ribeiro  
Asa Norte – Brasilia – DF – Brazil  
Zip Code: 70910-900  
E-mail: riccky@uol.com.br

***Abstract:** This work presents a global method of dynamical calibration of temperature sensors, to obtain suitable results for an objective selection of these sensors, based on their dynamical responses. The analysis is made upon the variation of the sensor's time constant caused by the variation of the environmental convective coefficient. For this purpose, a rotating tank with an unmasking device has been developed, to generate a standard temperature step for the liquid's various convective coefficients. This work presents the metrological qualification results of the rotating tank, showing the efficiency of the calibration device developed.*

***Keywords:** metrology, dynamical calibration, temperature, rotating tank.*