



PROJETO DE GRADUAÇÃO

**ESTUDO DA DETERMINAÇÃO DA
INCERTEZA DE MEDIÇÃO NA CALIBRAÇÃO
DINÂMICA DE SENSORES DE TEMPERATURA**

Por,

Gabriel Fernandes Almeida Manso

Brasília, 12 de março de 2013.

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO

ESTUDO DA DETERMINAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO NA CALIBRAÇÃO DINÂMICA DE SENSORES DE TEMPERATURA

POR,

Gabriel Fernandes Almeida Manso

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro Mecânico.

Banca Examinadora

Prof. Antônio Piratelli Filho

UnB/ ENM, Orientador

Prof. Alberto Carlos Guimarães Castro Diniz

UnB/ ENM, Co-Orientador

Prof. Fernando Jorge Rodrigues Neves

UnB/ ENM, Examinador Interno

Brasília, 12 de março de 2013.

Dedicatória

Aos meus pais, Ariovaldo e Celina, e aos meus avós, Antão e Neusa, por todo apoio e carinho para superar todas as dificuldades encontradas ao longo deste caminho. As dificuldades são uma razão a mais para perseverarmos, nos fortalecermos e aprendermos coisas novas. Sem vocês eu jamais chegaria até aqui.

Gabriel Fernandes Almeida Manso

Agradecimentos

Aos meus pais, Ariovaldo e Celina, aos meus avós, Antão e Neusa, e ao meu irmão, Felipe, por todo carinho e paciência durante toda minha vida. Por sempre acreditarem em mim e apoiarem todas as minhas decisões. Sem vocês, as escolhas seriam muito mais difíceis.

Aos professores, Piratelli e Diniz, pela orientação e oportunidade de trabalhar com este tema e ao técnico Filipe por toda ajuda no laboratório de metrologia dinâmica.

Aos meus amigos André, Adriano, Daniel, Guilherme, Márcio e Túlio que me acompanharam durante estes anos na Universidade de Brasília.

Aos meus amigos, Danilo, Brenno e Felipe pela companhia e por todas as caronas para Goiânia.

À minha namorada, Laís, por todo carinho, compreensão e incentivo.

RESUMO

O presente texto apresenta o estudo da determinação da incerteza da medição na calibração dinâmica de sensores de temperatura. Estudos voltados à calibração dinâmica para sensores de pressão e temperatura têm sido realizados no Laboratório de Metrologia Dinâmica (LMD) da Universidade de Brasília. O tubo de choque e o dispositivo de abertura rápida são métodos de calibração para sensores de pressão e estão consolidados com confiabilidade metrológica. Para os sensores de temperatura, foi desenvolvida uma bancada denominada Cuba Rotativa, cujo objetivo é gerar um degrau de temperatura para a calibração em meio líquido. Para contribuir com os procedimentos já desenvolvidos e garantir repetitividade dos ensaios, os estudos da caracterização metrológica da Cuba Rotativa foram retomados. Neste caso considera-se a cuba como instrumento com confiabilidade metrológica. Diversos ensaios foram realizados na bancada de testes para determinar a incerteza de medição, conforme o Guia para Expressão da Incerteza de Medição (GUM), com aplicação de conhecimentos de metrologia, cálculo de incerteza e calibração dinâmica de sensores de temperatura.

Palavras chaves:

Calibração Dinâmica; Incerteza de Medição; Metrologia e Sensores de Temperatura.

ABSTRACT

This work presents a study of the determination of measurement uncertainty in the dynamic calibration of temperature sensors. Studies focused on the dynamic calibration has been performed at the Laboratory of Dynamic Metrology (LMD) at University of Brasilia to pressure and temperature sensors. The shock tube and quick release device are methods of calibration for pressure sensors and are consolidated with metrological reliability. It was developed a bench named Rotating Tank, which generates a temperature step in liquid environment for temperature sensors calibration. It is intended to resume the studies of metrological characterization of the rotating tank and contribute to the procedures already developed to ensure repeatability of the tests, setting the rotating tank as a tool of metrological reliability. It will be performed several tests to calculate the measurement uncertainty, as recommended in the Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM), applying knowledge of metrology, measurement uncertainty and dynamic calibration of temperature sensors.

Palavras chaves:

Dynamic Calibration, Measurement Uncertainty, Metrology and Temperature Sensors.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	OBJETIVO	3
2.	SENSORES DE TEMPERATURA	5
2.1.	CALIBRAÇÃO ESTÁTICA DE SENSORES DE TEMPERATURA.....	6
2.2.	CALIBRAÇÃO DINÂMICA DE SENSORES DE TEMPERATURA.....	7
2.2.1.	TESTES COM CUBA FIXA	8
2.2.2.	TESTES COM CUBA ROTATIVA	9
2.3.	SISTEMAS E MODELOS DINÂMICOS.....	13
2.4.	TRANSFORMADA DE LAPLACE E FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA	14
2.5.	MODELO MATEMÁTICO PARA SENSORES DE PRIMEIRA ORDEM	15
2.6.	MODELO MATEMÁTICO PARA SENSORES DE SEGUNDA ORDEM	20
3.	INCERTEZA DE MEDIÇÃO	22
3.1.	ERRO E INCERTEZA DE MEDIÇÃO	23
3.2.	AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO.....	23
3.3.	AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DAS ESTIMATIVAS DE ENTRADA.....	25
3.3.1.	AVALIAÇÃO DO TIPO A.....	25
3.3.2.	AVALIAÇÃO DO TIPO B.....	25
3.4.	AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DA ESTIMATIVA DE SAÍDA.....	26
3.4.1.	GRANDEZAS DE ENTRADA NÃO CORRELACIONADAS.....	26
3.4.2.	GRANDEZAS DE ENTRADA CORRELACIONADAS.....	26
3.5.	DETERMINANDO A INCERTEZA EXPANDIDA.....	27

3.6.	MODELO MATEMÁTICO DA INCERTEZA NA MEDIÇÃO DE TEMPERATURA.....	28
4.	METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	32
4.1.	APARATO EXPERIMENTAL.....	32
4.2.	EQUIPAMENTO DE AQUISIÇÃO DE SINAIS.....	35
4.3.	CONVERTENDO PARA GRAUS CELSIUS.....	37
4.4.	PLANEJAMENTO FATORIAL DOS EXPERIMENTOS.....	38
4.5.	CUIDADOS COM A CUBA ROTATIVA.....	40
4.6.	AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO.....	40
4.6.1.	AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO PARA A TEMPERATURA INDICADA PELO TERMOPAR.....	41
4.6.2.	AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO PARA O TEMPO DE RESPOSTA DO TERMOPAR.....	43
5.	RESULTADOS.....	44
5.1.	AQUISIÇÃO DE DADOS.....	46
5.2.	ESTABELECIMENTO DO “TEMPO ZERO” DA RESPOSTA DO SENSOR.....	47
5.3.	INCERTEZA DE MEDIÇÃO PARA TEMPERATURA.....	50
5.4.	INCERTEZA DE MEDIÇÃO PARA O TEMPO DE RESPOSTA.....	59
6.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	62
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	64
	APÊNDICE A.....	66
	APÊNDICE B.....	75
	ANEXOS.....	80
	GLOSSÁRIO.....	89

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - (1) LINHA DE PRODUÇÃO DA DSM. (2) PÁTIO DE UMA DAS SEDES INDUSTRIAIS DA BASF. (3) INDÚSTRIA DE BENS DE CONSUMO NÃO DURÁVEIS EM SANTA CATARINA. (4) SETOR AUTOMOTIVO EM ANÁPOLIS (5) COMPLEXO PORTO SUL EM ILHÉUS. (6) INDÚSTRIA QUÍMICA.	1
FIGURA 2 - EFEITO SEEBECK.....	5
FIGURA 3 - COMPENSAÇÃO DA JUNÇÃO DE REFERÊNCIA.....	5
FIGURA 4 - DESENHO ESQUEMÁTICO DA CUBA ROTATIVA (VIANNA ET. AL., 2003)	8
FIGURA 5 - DISPOSITIVO DE MERGULHO RÁPIDO UTILIZADO NA CUBA FIXA (ALMEIDA, 2003)	9
FIGURA 6 - CUBA ROTATIVA COM DISPOSITIVO DE DESMASCARAMENTO (NETO, 1995).....	9
FIGURA 7 - SEÇÃO DE TESTES (HENRIQUE, 2001).....	10
FIGURA 8 - PERFIL DE VELOCIDADE NA VEIA LÍQUIDA DA CUBA PARA H = 20 MM (ADAPTADO DE HENRIQUE, 2001).....	11
FIGURA 9 - PERFIL DE VELOCIDADE NA VEIA LÍQUIDA DA CUBA PARA H = 60 MM (ADAPTADO DE HENRIQUE, 2001).....	11
FIGURA 10 - PERFIL DE VELOCIDADE NA VEIA LÍQUIDA DA CUBA PARA H = 100 MM (ADAPTADO DE HENRIQUE, 2001).....	12
FIGURA 11 - INÉRCIA TÉRMICA NA SEÇÃO DE TESTES (ADAPTADO DE HENRIQUE, 2001).....	12
FIGURA 12 - TERMOPAR DE JUNTA EXPOSTA (ADAPTADO DE TERMOSHAW, 2012).....	15
FIGURA 13 - DEGRAU TEÓRICO DE UMA EXCITAÇÃO DO TIPO DEGRAU UNITÁRIO.....	19
FIGURA 14 - TERMOPAR ENCAPSULADO (ADAPTADO DE TERMOSHAW, 2012)	20
FIGURA 15 - CUBA ROTATIVA E ALGUNS COMPONENTES: (A) COMPARTIMENTO PARA COMPENSAÇÃO DA JUNTA FRIA, (B) CONTROLADOR DE VELOCIDADE DAS CUBAS, (C) QUADRO GERAL DE ENERGIA E (D) PAINEL CONTROLADOR DE TEMPERATURA DO LÍQUIDO.	33
FIGURA 16 - (A) CONTROLADOR DE AQUISIÇÃO DE DADOS - AC1160 E (B) CONDICIONADOR DE SINAIS - MCS1000 (ADAPTADO DE LYNXTEC, 2012)	34
FIGURA 17 - CONFIGURAÇÃO DAS ENTRADAS ANALÓGICAS DO SOFTWARE AQDADOS 2.02	36

FIGURA 18 - (A) AQUISIÇÃO DE DADOS A 2000HZ E TRATADOS A 100 HZ. (B) AMPLIAÇÃO ENTRE O TEMPO DE 2 E 2,2 SEGUNDOS.....	39
FIGURA 19 - AQUISIÇÃO DE DADOS PARA O DEGRAU Nº 11 DO ENSAIO 7.....	46
FIGURA 20 - DEGRAU Nº 11 DO ENSAIO 7 COM ESCALA DE TEMPO CORRIGIDA PARA O TEMPO ZERO.....	48
FIGURA 21 - RESPOSTAS DAS QUINZE REPETIÇÕES DO ENSAIO 7	49
FIGURA 22 - DEGRAU MÉDIO DE TEMPERATURA DO ENSAIO 7	50
FIGURA 23 - DESVIO PADRÃO EXPERIMENTAL PARA CADA INSTANTE DE TEMPO RELATIVO AO ENSAIO 7.....	52
FIGURA 24 - DEGRAU DE TEMPERATURA E INCERTEZA EXPANDIDA PARA O ENSAIO 7.....	56
FIGURA 25 - DEGRAU DE TEMPERATURA E INCERTEZA EXPANDIDA ENTRE O TEMPO ZERO E 0,25S.....	57
FIGURA 26 - INCERTEZA EXPANDIDA PARA O ENSAIO 7	58
FIGURA 27 - DEGRAU DE TEMPERATURA E INCERTEZA EXPANDIDA PARA O ENSAIO 1.....	67
FIGURA 28 - INCERTEZA EXPANDIDA PARA O ENSAIO 1	67
FIGURA 29 - DEGRAU DE TEMPERATURA E INCERTEZA EXPANDIDA PARA O ENSAIO 2.....	68
FIGURA 30 - INCERTEZA EXPANDIDA PARA O ENSAIO 2	68
FIGURA 31 - DEGRAU DE TEMPERATURA E INCERTEZA EXPANDIDA PARA O ENSAIO 3.....	69
FIGURA 32 - INCERTEZA EXPANDIDA PARA O ENSAIO 3	69
FIGURA 33 - DEGRAU DE TEMPERATURA E INCERTEZA EXPANDIDA PARA O ENSAIO 4.....	70
FIGURA 34 - INCERTEZA EXPANDIDA PARA O ENSAIO 4	70
FIGURA 35 - DEGRAU DE TEMPERATURA E INCERTEZA EXPANDIDA PARA O ENSAIO 5.....	71
FIGURA 36 - INCERTEZA EXPANDIDA PARA O ENSAIO 5	71
FIGURA 37 - DEGRAU DE TEMPERATURA E INCERTEZA EXPANDIDA PARA O ENSAIO 6.....	72
FIGURA 38 - INCERTEZA EXPANDIDA PARA O ENSAIO 6	72
FIGURA 39 - DEGRAU DE TEMPERATURA E INCERTEZA EXPANDIDA PARA O ENSAIO 8.....	73

FIGURA 40 - INCERTEZA EXPANDIDA PARA O ENSAIO 8	73
FIGURA 41 - DEGRAU DE TEMPERATURA E INCERTEZA EXPANDIDA PARA O ENSAIO 9.....	74
FIGURA 42 - INCERTEZA EXPANDIDA PARA O ENSAIO 9	74

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - FATORES DE ABRANGÊNCIA K PARA DIFERENTES GRAUS DE LIBERDADE, COM PROBABILIDADE DE 95% PARA DISTRIBUIÇÃO T-STUDENT (INMETRO, 1999).....	28
TABELA 2 - GRANDEZAS DE ENTRADA E OS RESPECTIVOS COEFICIENTES DE SENSIBILIDADE	30
TABELA 3 - FAIXAS DE UTILIZAÇÃO E LIMITES DE ERROS PARA TERMOPARES (ADAPTADO DE ECIL, 2012).....	35
TABELA 4 - PLANEJAMENTO FATORIAL DOS EXPERIMENTOS	39
TABELA 5- ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA - TWO WAY).....	44
TABELA 6 - TEMPERATURA AMBIENTE MÉDIA DE CADA ENSAIO	45
TABELA 7 - INCERTEZA DE MEDIÇÃO PARA TEMPERATURA PARA A AMOSTRA N° 245 (T = 2,42 S) DO ENSAIO 7 .	55
TABELA 8 - INCERTEZA DE MEDIÇÃO PARA O TEMPO DE RESPOSTA DO ENSAIO 7	61
TABELA 9 - TEMPO DE RESPOSTA DE CADA REPETIÇÃO PARA CADA ENSAIO.....	75
TABELA 10 - INCERTEZA DE MEDIÇÃO PARA O TEMPO DE RESPOSTA DO ENSAIO 1.....	76
TABELA 11 - INCERTEZA DE MEDIÇÃO PARA O TEMPO DE RESPOSTA DO ENSAIO 2.....	76
TABELA 12 - INCERTEZA DE MEDIÇÃO PARA O TEMPO DE RESPOSTA DO ENSAIO 3.....	77
TABELA 13 - INCERTEZA DE MEDIÇÃO PARA O TEMPO DE RESPOSTA DO ENSAIO 4.....	77
TABELA 14 - INCERTEZA DE MEDIÇÃO PARA O TEMPO DE RESPOSTA DO ENSAIO 5.....	78
TABELA 15 - INCERTEZA DE MEDIÇÃO PARA O TEMPO DE RESPOSTA DO ENSAIO 6.....	78
TABELA 16 - INCERTEZA DE MEDIÇÃO PARA O TEMPO DE RESPOSTA DO ENSAIO 8.....	79
TABELA 17 - INCERTEZA DE MEDIÇÃO PARA O TEMPO DE RESPOSTA DO ENSAIO 9.....	79

LISTA DE SÍMBOLOS

$E(t)$	sinal de entrada de um sensor em função do tempo
$S(t)$	sinal de saída de um sensor em função do tempo
t	tempo
\mathcal{L}	transformada de Laplace
s	variável do domínio de Laplace, desvio padrao
TF	função de transferência
T	temperatura T do sensor
T_F	temperatura T_F do meio líquido
U	coeficiente global de transferência de calor
W	fluxo de calor que entra no sensor
A_S	área efetiva de transferência de calor
h	coeficiente de transferência de calor por convecção
Q	taxa de variação do calor sensível do sensor
ρ_S	massa específica do material sensor
V_S	volume do sensor
C_S	calor específico do material do sensor
M_S	massa do sensor
τ	constante de tempo
κ	sensibilidade estática do sensor
$R_{\text{intrínseca}}$	resistência térmica interna (intrínseca) do sensor
$R_{\text{extrínseca}}$	resistência térmica externa (extrínseca) do sensor
C_C	calor específico do material do encapsulamento
M_C	massa do encapsulamento
U_{FC}	coeficiente global de transferência de calor entre o fluido e o encapsulamento
U_{CS}	coeficiente global de transferência de calor entre o encapsulamento e a junta

A_C	área efetiva de transferência de calor do encapsulamento
τ_C	constante de tempo de encapsulamento
τ_S	constantes de tempo da junta do sensor
ω_n	frequência natural não-amortecida
ξ	razão de amortecimento
Y	mensurando
f	função modelo
X_i	grandeza de entrada
N	número de grandezas de entrada
y	estimativa de saída
$u(x_i)$	incertezas padrão
$u_c(y)$	incerteza padronizada combinada
$u(x_i, x_j)$	covariância estimada entre duas grandezas de entrada
$r(x_i, x_j)$	coeficiente de correlação estimado entre duas grandezas de entrada
V_T	tensão produzida pelo termopar
V_L	tensão lida no analisador de sinais dinâmicos
G	ganho de tensão do amplificador
V_O	offset na tensão de entrada no amplificador
δT_{dif}	diferença entre temperatura de um sensor de referência e temperatura medida
δT_U	erro associado à não-uniformidade da temperatura do líquido na seção de testes da cuba rotativa
δT_f	desvio da temperatura da junta fria em relação ao ponto de referência
δV_R	erro devido à resolução limitada do analisador de sinais
δT_{amb}	erro associado a variações na temperatura ambiente

T_T	temperatura do termopar
T_L	temperatura do lida no analisador de sinais
δT_U	Correção devido à não-uniformidade da temperatura do líquido na seção de teste da cuba rotativa
δT_R	Correção devido ao processamento e apresentação do resultado
δT_{CE}	Correção devido à calibração estática do termopar utilizado
δT_{EXT}	Correção devido à utilização de cabos de extensão
δT_{JF}	Correção devido à compensação de junta fria de referência
δT_I	Correção devido à linearização

1. INTRODUÇÃO

A proposta deste trabalho é estudar a determinação da incerteza de medição no processo de calibração dinâmica de sensores de temperatura, em especial, os termopares. A utilização de termopares ou qualquer outro transdutor específico para temperatura, possibilita a otimização de custos, eficiência de sistemas e até mesmo eficiência energética.

Uma grande quantidade de processos industriais está relacionada com medição de temperatura e, esses processos, estão cada vez mais associados a sistemas automatizados de controle. Na área de automação e controle de processos, a melhoria contínua dos processos e da qualidade final de produtos depende de sensores de temperatura.

A medição dinâmica de temperatura se torna importante em motores de combustão interna e no monitoramento de caldeiras, usinas termoeletricas e reatores nucleares, por exemplo. Nesses sistemas, é desejável que os sensores respondam de forma rápida e confiável à menor alteração sofrida. A DSM é uma empresa voltada para a saúde, nutrição, farmacêuticos, desenvolvimento de eletro-eletrônicos, energia alternativa e materiais biodegradáveis. A companhia movimenta cerca de € bilhões por ano. Outro exemplo é a BASF é uma empresa química com projetos para a eficiência energética de suas indústrias com previsão de movimentar cerca de €600 milhões por ano e marca presença no Brasil desde 1911 (Figura 1).



Figura 1 - (1) Linha de produção da DSM. (2) Pátio de uma das sedes industriais da BASF. (3) Indústria de bens de consumo não duráveis em Santa Catarina. (4) Setor automotivo em Anápolis (5) Complexo Porto Sul em Ilhéus. (6) Indústria química.

As medições e as respostas dinâmicas dos sensores devem ser confiáveis e rastreáveis, garantidas pela calibração dinâmica dos instrumentos de medição. Segundo o Vocabulário Internacional de Metrologia (INMETRO, 2003), calibração é o conjunto de operações que estabelece, sob condições especificadas, a relação entre os valores indicados por um instrumento de medição ou sistema de medição ou valores representados por uma medida materializada ou um material de referência, e os valores correspondentes das grandezas estabelecidos por padrões. Na calibração estática, o valor da grandeza em questão não varia com o tempo, enquanto que na calibração dinâmica, as grandezas de entrada variam em função do tempo, ou seja, nesse processo deseja-se determinar a resposta dinâmica do instrumento de medição em relação à variação do valor da grandeza medida.

Todo equipamento ou instrumento de medição apresenta erros de medição, até mesmo as mais sofisticadas máquinas de medir por coordenadas. A todo resultado de medição está associado um erro de medição que o descaracteriza, mostrando um valor que difere do valor verdadeiro. Entretanto, o valor verdadeiro de uma medição jamais será de fato conhecido. Mesmo que se corrija o resultado de uma medição, o resultado não pode ser considerado exato devido a interferências aleatórias, determinação imperfeita da correção aplicada ou por falta de conhecimento sobre algum fenômeno físico. Um erro pode passar despercebido, porém, ao saber de sua existência potencial, surge a dúvida acerca da validade do resultado de uma medição. A incerteza de medição tenta quantificar essa dúvida, ou em outras palavras, o quão correto está o resultado da medição.

A incerteza de medição é um dos conceitos mais modernos da metrologia e segundo Fidélis (2012), é uma “declaração de ignorância física” e declará-la é definir uma distribuição para os valores do mensurando que são consistentes com o conhecimento disponível sobre o equipamento de medição e as quantidades de influência.

À medida que se conhece um pouco mais sobre a cadeia de medição e o comportamento das grandezas envolvidas no processo de medição, é possível minimizar as fontes de erros. Ao quantificar a incerteza de medição de resultado da medição de uma grandeza, é possível compará-los com outros resultados ou com valores de referência. Assim como a uniformização das definições de grandezas físicas com a criação do Sistema Internacional de Unidades (SI), o Guia para a Expressão da Incerteza de Medição (GUM) foi criado para padronizar a expressão da incerteza de medição dos resultados dessas grandezas.

O conhecimento do método de calibração, medição ou ensaio é importante para se determinar e quantificar as componentes de incerteza. Para estudar algumas dessas grandezas e seus instrumentos de medição, estudos voltados à calibração dinâmica têm sido realizados no Laboratório de Metrologia Dinâmica (LMD) da Universidade de Brasília para sensores de pressão e temperatura. Para analisar as grandezas e seus instrumentos de medição, estudos votados à calibração dinâmica, para sensores de pressão e temperatura, têm sido realizados no Laboratório de Metrologia Dinâmica (LMD) da

Universidade de Brasília. O tubo de choque e o dispositivo de abertura rápida são métodos de calibração para sensores de pressão e estão consolidados com confiabilidade metrológica.

Foi desenvolvida uma bancada denominada Cuba Rotativa, cujo objetivo é gerar um degrau de temperatura para a calibração em meio líquido. A cuba funciona como um canal de comprimento infinito, com possibilidade de se variar o coeficiente de convecção de transferência de calor e velocidade de desmascaramento, para assegurar que o tempo de formação do degrau não interfira no tempo de resposta do sensor (Vianna et al., 2003).

Como ponto de partida, foi retomado o estudo de caracterização metrológica da cuba rotativa, iniciado com Andrade (1993) e seguido por Neto (1995), Henrique (2001) e Almeida (2003). Pretende-se contribuir com os procedimentos já desenvolvidos para proporcionar maior repetitividade e rastreabilidade aos resultados de medição na calibração dinâmica de sensores de temperatura em meio líquido.

1.1. OBJETIVO

O presente trabalho teve como objetivo estudar a determinação da incerteza de medição na calibração dinâmica de sensores de temperatura, segundo o Guia para a Expressão da Incerteza de Medição (GUM) e envolveu conhecimentos de metrologia, incerteza de medição e calibração dinâmica.

O projeto é dividido em duas etapas. A primeira compreendeu a recuperação e manutenção da cuba e seus componentes, um estudo dos conceitos teóricos sobre os temas e testes preliminares. A segunda etapa envolveu a realização de ensaios para aquisição de dados e posterior processamento para determinar a incerteza de medição segundo as recomendações do GUM, aplicando conhecimentos de metrologia, cálculo de incerteza e calibração dinâmica de sensores de temperatura.

O conteúdo deste relatório está estruturado em 6 capítulos, contando com este capítulo de introdução.

No capítulo 2, com o título “Calibração de sensores de temperatura”, são apresentadas características da calibração estática e dinâmica, com destaque para a caracterização da bancada de testes desenvolvida para calibração dinâmica de sensores de temperatura, e as considerações teóricas sobre os modelos matemáticos das respostas dinâmicas dos sensores de primeira e segunda ordem, aplicados a sensores de temperatura.

O capítulo 3, “Incerteza de medição”, discorre sobre as considerações teóricas necessárias para a determinação da incerteza de medição segundo a recomendação do GUM, e o exemplo do modelo

matemático para se calcular a incerteza na medição de temperatura desenvolvido por Almeida (Almeida, 2003).

Já o capítulo 4, “Metodologia experimental”, descreve os elementos que compõem a cadeia de medição de calibração dinâmica de temperatura na cuba rotativa e define os procedimentos e as considerações que direcionaram o modelo proposto para a determinação da incerteza de medição em sensores de temperatura, tipo termopar.

No capítulo 5, “Resultados” estão apresentados os resultados da calibração dinâmica de um termopar do tipo J de junta exposta, aplicando o modelo proposto no capítulo anterior. Foi determinada a incerteza de medição para o tempo de resposta do sensor e para a temperatura indicada pelo mesmo.

Por fim, o capítulo 6, “Conclusões e sugestões para trabalhos futuros”, apresenta as conclusões sobre o modelo proposto, os resultados conseguidos e sugestões para trabalhos futuros.

2. SENSORES DE TEMPERATURA

O fenômeno da temoeletricidade foi descoberto em 1821 por T. J. Seebeck. O aquecimento de dois metais diferentes com temperaturas diferentes em suas extremidades gera o aparecimento de uma F.E.M. (da ordem de mV), batizado como Efeito Seebeck, devido à diferença de densidade de elétrons livres de um condutor para outro. Um termopar é a união de dois condutores metálicos de natureza distinta soldados em um extremo ao qual se dá o nome de junção de medição (Figura 2).

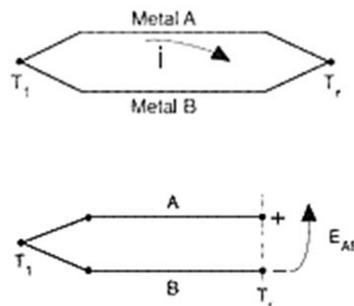


Figura 2 - Efeito Seebeck.

A outra extremidade, junção de referência é levada ao instrumento medidor por onde flui a corrente gerada. Para se usar o termopar como medidor de temperatura, é necessário conhecer a F.E.M. gerada e a temperatura da junção de referência, para sabermos a temperatura da junção de medição. Uma maneira de se determinar a temperatura da junção de referência é força-la para um valor conhecido, por exemplo, zero grau Celsius (Figura 3).

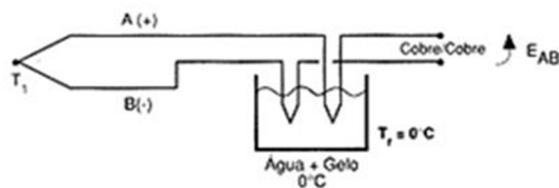


Figura 3 - Compensação da junção de referência.

A calibração desses sensores pode ser realizada de forma direta, na qual são utilizadas grandezas padronizadas como grandezas de entrada. Para cada grandeza padronizada se obtém um valor padrão que irá ser comparado com a grandeza a ser calibrada, possibilitando a obtenção da medida desejada calibrada. Podem ser utilizados como grandezas padronizadas blocos e massas padrões ou pontos de fusão e ebulição, por exemplo.

Nem sempre a forma direta é viável ou possível e a calibração é realizada de forma indireta. As grandezas são geradas de forma simultânea no sistema de medição padrão, gerando uma medida padrão, e no sistema de medição a ser calibrado, gerando a medida desejada calibrada. Para tal, o comportamento medida padrão deve ser conhecido através de um processo de aferição. No caso particular de sensores de temperatura, a incerteza global expandida do sensor que atua como padrão deve ser no mínimo dez vezes menor do que a incerteza global expandida do sensor que está sendo calibrado.

2.1. CALIBRAÇÃO ESTÁTICA DE SENSORES DE TEMPERATURA

As características de desempenho de um instrumento ou sistema de medição podem ser estudadas em termos das suas características estáticas. Em outras palavras, algumas aplicações envolvem a medida de grandezas que permanecem constantes ou que variam lentamente com o tempo, denominadas grandezas estáticas ou quase-estáticas.

A calibração de sensores de temperatura por comparação pode ser aplicada em termopares, termômetros de resistência e termômetros de bulbo. Trata-se de um procedimento mais simplificado quando comparado com um processo de calibração dinâmica. O termômetro de contato a ser calibrado deve ser colocado em um meio que esteja a uma temperatura uniforme juntamente com um termômetro padrão para que se possam comparar os instrumentos.

Em uma situação considerada ideal, todas as grandezas de entrada são mantidas constantes durante determinado intervalo de tempo, exceto a grandeza de entrada investigada que é variada dentro de uma faixa de valores constantes. Desta forma, a grandeza de saída também irá variar dentro de uma faixa de valores constantes, resultando em uma relação entrada-saída que representa a calibração estática do instrumento.

Termopares também podem ser calibrados de forma simples utilizando-se fornos, recomendados principalmente para temperaturas mais elevadas. Alguns desses fornos podem chegar facilmente a temperaturas superiores a 1000°C (Henrique, 2001).

As realizações de algumas etapas facilitam o procedimento de calibração estática:

- ✓ Identificar e relacionar todas as possíveis entradas para um dado instrumento;
- ✓ Decidir quais entradas são relevantes baseando-se na aplicação em questão;

- ✓ Obter equipamentos que possibilitam variar as entradas relevantes em faixas consideradas necessárias;
- ✓ Obter as relações entrada-saída ao variar alternadamente cada entrada considerada relevante, mantendo as demais constantes;
- ✓ Realizar uma superposição adequada das várias relações entrada-saída de forma descrever o comportamento global estático do instrumento.

2.2. CALIBRAÇÃO DINÂMICA DE SENSORES DE TEMPERATURA

Calibrar dinamicamente um sensor se torna cada vez mais frequente e necessário diante do crescente uso de sistemas de controle on-line, sistemas de correção de perturbações e sistemas de controle de qualidade do produto. A resposta em tempo real das mudanças no cenário de interesse são de grande importância para o bom funcionamento dos equipamentos e sistemas. Para que isso seja alcançado, seja para qualquer tipo de transdutor, alguns parâmetros direcionam as tomadas de decisões.

A sensibilidade, linearidade, faixa de operação, repetitividade e constante de tempo são parâmetros que caracterizam bem um transdutor estaticamente. Porém, as características dinâmicas destes transdutores não são representadas adequadamente pelos mesmos parâmetros. Para determinar as características do comportamento dinâmico de um elemento ou sistema de medição é necessário considerá-lo um sistema dinâmico e elaborar um modelo matemático representativo (Santos, 2012).

A resposta do sistema de medição ao longo do tempo é o resultado do procedimento de calibração dinâmica. Através dessa resposta, é possível estudar e analisar as características do sistema de medição. A determinação da função de transferência e a determinação das constantes de tempo do equipamento são os objetivos básicos de uma calibração dinâmica (Almeida, 2003).

Para conhecer o comportamento dinâmico de um sistema, é importante estudar os parâmetros que afetam diretamente os resultados. Cada sensor possui suas características próprias, relacionadas à sua construção, o que torna difícil a reprodução idêntica dos mesmos com mesmo material e geometria. Esses fatores interferem na resposta dinâmica, havendo a necessidade de se calibrar dinamicamente cada sensor de interesse de forma individual (Henrique, 2001).

Provocar uma excitação em um elemento sensor de interesse pode ser alcançada através de oscilações alternadas constantes (excitação do tipo senoidal) ou submetendo-se o sensor a um diferencial definido (excitação do tipo degrau), como sinais de entrada. Tratando-se de um processo dinâmico, o sinal de saída é em função do tempo.

Nos sensores de temperatura em especial, o sinal de entrada nada mais é que uma variação repentina da temperatura do meio no qual o elemento sensor está inserido. A variação de temperatura leva a um processo de transferência de calor que podem ser por convecção, condução ou radiação. Estudos indicam que os processos que envolvem métodos convectivos permitem um controle bastante satisfatório dos parâmetros de ensaio, além de apresentarem maior facilidade em sua implementação (Almeida, 2003).

Para se estudar o procedimento de calibração dinâmica de sensores de temperatura, que vem sendo desenvolvido no Laboratório de Metrologia Dinâmica da Universidade de Brasília (LMD), foi desenvolvida uma bancada de testes denominada Cuba Rotativa (Figura 4), cujo objetivo é gerar uma excitação do tipo degrau de temperatura para a calibração de dispositivos em meio líquido.

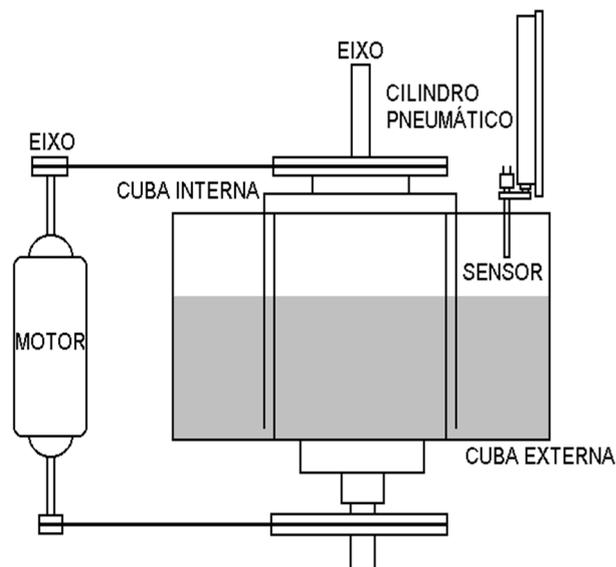


Figura 4 - Desenho esquemático da Cuba Rotativa (Vianna et. al., 2003)

2.2.1. TESTES COM CUBA FIXA

Inicialmente, a imersão do elemento sensor no meio líquido era feito através de um dispositivo de mergulho rápido em uma cuba fixa com líquido aquecido. Andrade (1993) realizou diversos ensaios com termopares e líquidos diferentes e concluiu que o equipamento apresentava um resfriamento local na região que o sensor estava inserido. Além disso, não era possível controlar o coeficiente convectivo de transferência de calor e o dispositivo de mergulho rápido, ilustrado na Figura 5, implicava em grandes acelerações e impactos na ponta do sensor a ser calibrado.

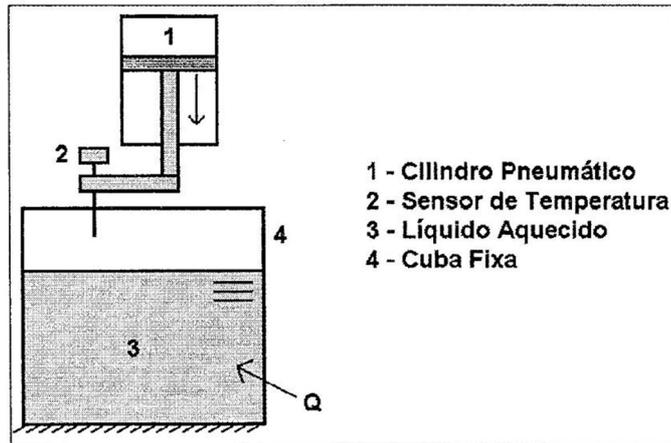


Figura 5 - Dispositivo de mergulho rápido utilizado na cuba fixa (Almeida, 2003)

2.2.2. TESTES COM CUBA ROTATIVA

Na tentativa de aprimorar a bancada de testes com cuba fixa, corrigindo os problemas observados, foi desenvolvida a cuba rotativa que possibilita a calibração dinâmica de sensores de temperatura. Neto (1995) comparou resultados obtidos com os dispositivos de mergulho rápido e de desmascaramento (Figura 6), ambos testados com a cuba rotativa. O sistema de cubas desenvolvido permite colocar o líquido, no qual o sensor será imerso, em movimento. Dessa forma é possível controlar o coeficiente convectivo de transferência de calor, alterando a velocidade angular das cubas.

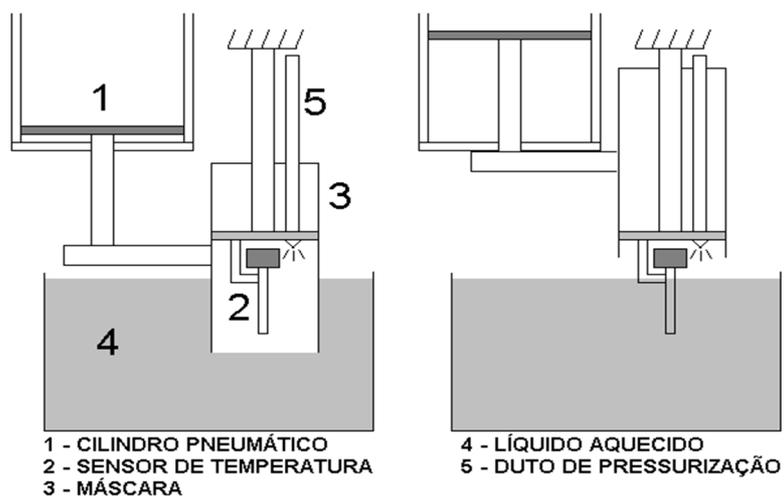


Figura 6 - Cuba rotativa com dispositivo de desmascaramento (Neto, 1995)

Como o raio da cuba interna (0,15m) é duas vezes menor que o raio da cuba externa (0,30m), a velocidade angular da cuba interna é duas vezes o valor da velocidade angular da cuba externa. Essa configuração fornece uma mesma velocidade tangencial ao longo da seção de testes.

O dispositivo de desmascaramento desenvolvido permite inserir o sensor de temperatura na veia líquida de testes sem que sofra impactos e desacelerações bruscas induzidas pelo dispositivo de mergulho rápido. O sensor permanece estático, envolvido por uma proteção de ar pressurizado que mantém a líquido afastado. Quando o sensor é desmascarado, o degrau de temperatura é gerado sem alterar a resposta dinâmica do sensor devido à alta velocidade de exposição do sensor ao meio.

A qualificação metrológica da seção de testes na cuba rotativa foi desenvolvida por Henrique (2001) para levantar o perfil de velocidade nas veias líquidas, bem como para determinar a inércia térmica da cuba ao longo da seção transversal de testes (Figura 7) que se situa entre 0,19m e 0,29m ao longo do raio.

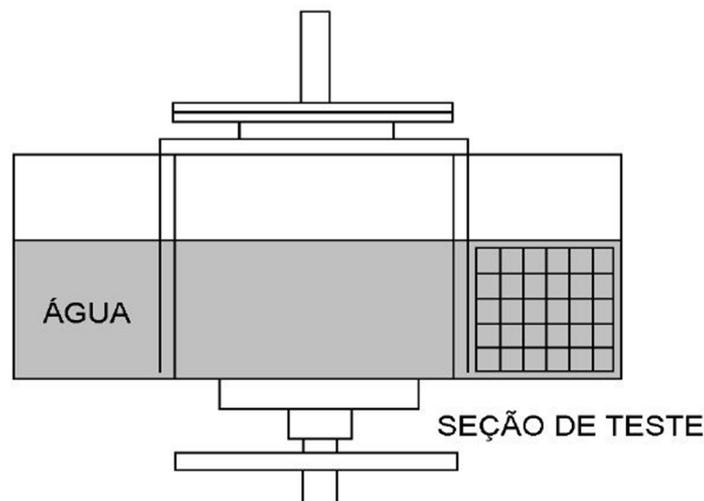


Figura 7 - Seção de testes (Henrique, 2001).

As Figuras (8) a (10) mostram os resultados dos ensaios de velocidade que foram realizados para rotações de 100, 200 e 300RPM em três níveis de altura diferentes, 20, 60 e 100mm. A inércia térmica foi observada para o intervalo de 310K a 325K, apresentados na Figura 11.

Analisados os resultados, fica recomendado que os sensores sejam instalados entre 0,21m e 0,25m ao longo do raio por se tratar de uma faixa de velocidades constantes. Nessa região passa uma veia líquida que se dividirá igualmente entre o sensor e as cubas, evitando grandes perturbações no escoamento devido às paredes. A variação de 1K na temperatura do líquido leva no mínimo 200

segundos, o que fornece uma janela próxima de 3 minutos para a realização de ensaios e coleta de dados.

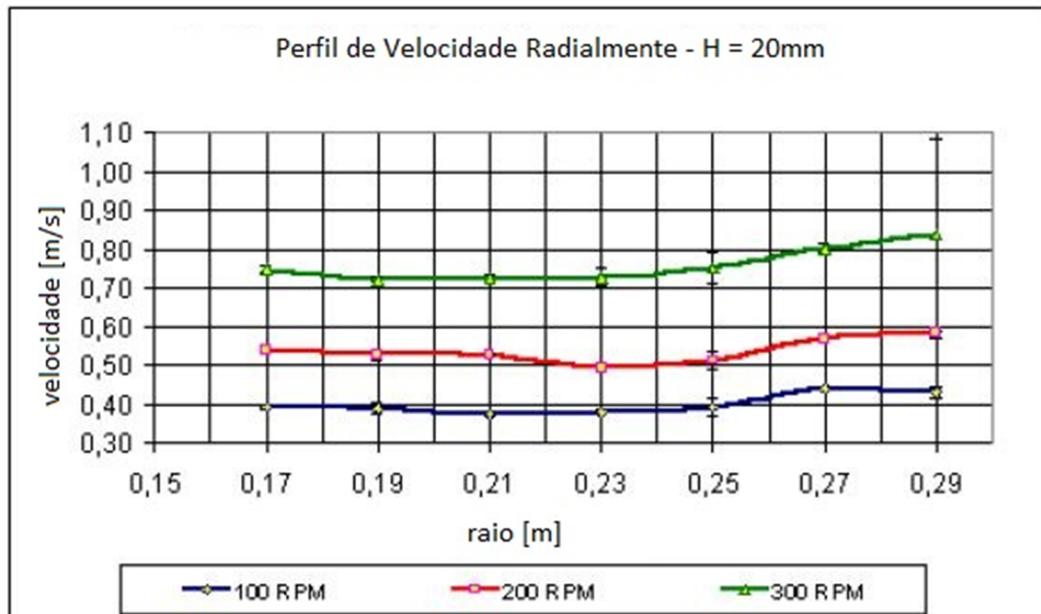


Figura 8 - Perfil de velocidade na veia líquida da cuba para H = 20 mm (adaptado de Henrique, 2001).

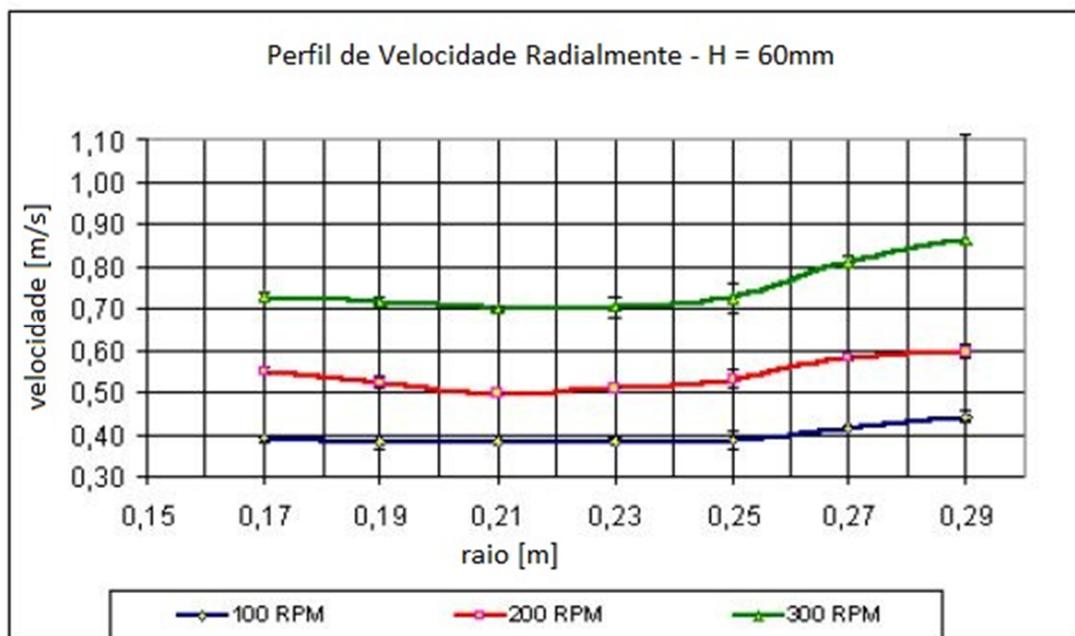


Figura 9 - Perfil de velocidade na veia líquida da cuba para H = 60 mm (adaptado de Henrique, 2001).

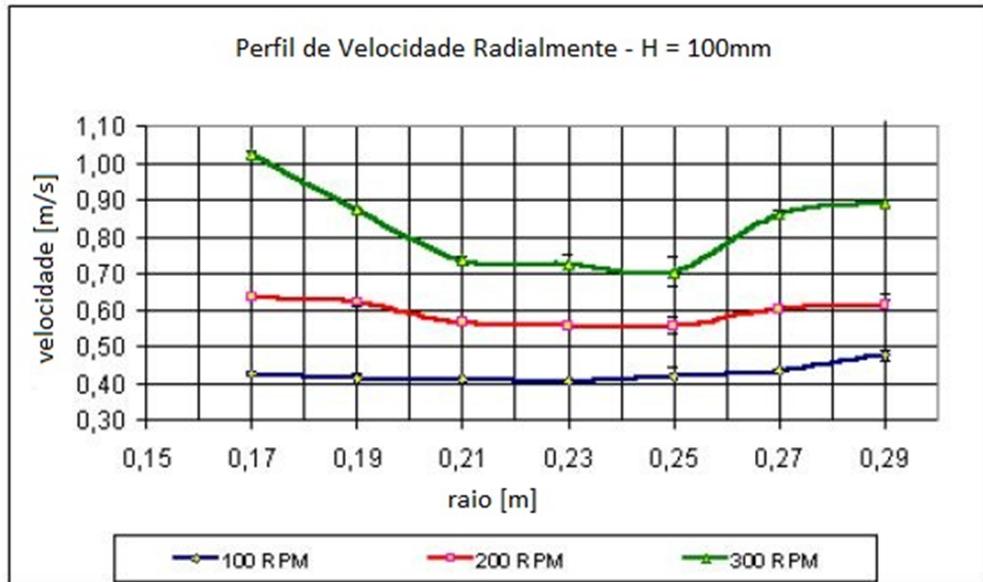


Figura 10 - Perfil de velocidade na veia líquida da cuba para H = 100 mm (adaptado de Henrique, 2001).

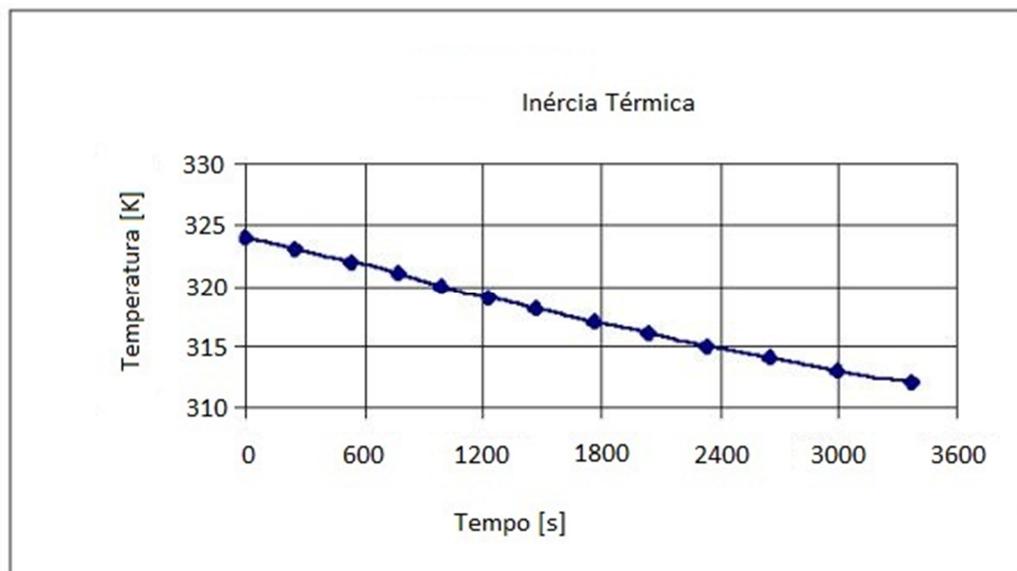


Figura 11 - Inércia térmica na seção de testes (adaptado de Henrique, 2001)

2.3. SISTEMAS E MODELOS DINÂMICOS

A análise de um sistema dinâmico visa determinar a resposta dinâmica de um sistema a estímulos externos ou perturbações. Uma condição de equilíbrio ou de regime permanente provavelmente será atingida, caso o sistema seja estável. O comportamento deste sistema do momento em que é perturbado até se atingir o estado de acomodação é chamado de resposta transiente. No caso de um sistema instável, a condição de equilíbrio nunca será atingida e sua resposta continua tendo uma característica transiente indefinidamente.

Modelos matemáticos podem representar sistemas físicos, descrevendo seu comportamento baseado em princípios físicos fundamentais da conservação da massa, energia e quantidade de movimento. Em um sistema dinâmico de medição, é possível determinar uma expressão matemática geral que relaciona o sinal de entrada “E” no sensor com o sinal de saída “S”, a partir de uma modelagem utilizando equações diferenciais lineares com coeficientes constantes:

$$a_n \cdot \frac{d^n S(t)}{dt^n} + a_{n-1} \cdot \frac{d^{n-1} S(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \cdot \frac{dS(t)}{dt} + a_0 \cdot S(t) = b_n \cdot \frac{d^n E(t)}{dt^n} + b_{n-1} \cdot \frac{d^{n-1} E(t)}{dt^{n-1}} + \dots + b_1 \cdot \frac{dE(t)}{dt} + b_0 \cdot E(t) \quad (2.1)$$

onde t é o tempo e os coeficientes a_i e b_i ($i = 0, 1, \dots, n$), são os coeficientes constantes da equação diferencial linear e dependem dos parâmetros físicos do sistema. O grau “ n ” da equação diferencial está associado ao tipo de resposta fornecida pelo sensor.

A Equação (2.1) assume sua forma mais simples quando todos os coeficientes a_i e b_i , com exceção de a_0 e b_0 , são iguais a zero, reduzindo a equação diferencial a:

$$a_0 E(t) = b_0 S(t) \quad (2.2)$$

Esse modelo representa um sistema de ordem zero. Em outras palavras, um sistema que opera em um estado de equilíbrio cujas propriedades não variam com o tempo. A sensibilidade estática ‘ κ ’ deste sistema é dada por:

$$\kappa = \frac{b_0}{a_0} \quad (2.3)$$

Para modelos não lineares, existem outras abordagens e não serão tratadas neste trabalho. Uma solução para esses modelos é a simulação numérica das variáveis aleatórias utilizando, por exemplo, o método de simulação de Monte Carlo.

2.4. TRANSFORMADA DE LAPLACE E FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA

O método de resolução de equações diferenciais, conhecido como transformação de Laplace, consiste em simplificar o problema por meio de um operador matemático. O operador de Laplace aplicado a uma função $f(t)$ definida para $t \geq 0$, resulta em uma outra função $F(s)$, denominada Transformada de Laplace:

$$F(s) = \mathcal{L}(f) \equiv \int_0^{\infty} e^{-st} f(t) dt \quad (2.4)$$

As propriedades desta transformada são úteis para a análise de sistemas lineares e problemas em que a função envolvida na equação diferencial apresenta descontinuidades. Na calibração dinâmica, o tipo mais comum de perturbação utilizado para análise da resposta dinâmica do sistema é a função degrau.

Outra vantagem ao se utilizar transformada de Laplace é que as integrais e derivadas tornam-se multiplicações e divisões. A resolução de equações diferenciais se reduz a resoluções de equações polinomiais que são mais simples de resolver.

Em sistemas dinâmicos, a função de transferência $TF(s)$ de um componente ou sistema é a razão da transformada de Laplace dos sinais de saída $S(t)$ e da transformada de Laplace dos sinais de entrada $E(t)$:

$$TF(s) \equiv \frac{\mathcal{L}(S(t))}{\mathcal{L}(E(t))} \quad (2.5)$$

A função de transferência pode ser obtida matematicamente, resolvendo a transformada de Laplace das equações diferenciais que descrevem o sistema ou experimentalmente, através da função degrau, onde o sinal de entrada conhecido é aplicado ao sistema e o sinal de saída é medido.

2.5. MODELO MATEMÁTICO PARA SENSORES DE PRIMEIRA ORDEM

Termopares com junta exposta, nos quais o elemento sensor está em contato direto com o meio, são sensores de temperatura característicos de primeira ordem. Esse tipo de termopar é o principal objeto de estudo deste trabalho (Figura 12).



Figura 12 - Termopar de junta exposta (adaptado de TermoShaw, 2012)

Para análise de um sensor imerso em um meio líquido, a temperatura T do sensor é menor que a temperatura T_F do meio líquido. Assume-se ainda que o calor que sai do sensor é nulo e que o fluxo de calor W que entra no sensor é proporcional à diferença de temperatura entre o meio líquido e o sensor (Bentley, 1988):

$$W = U A_S (T_F - T) \quad (2.6)$$

A taxa Q de variação do calor sensível do sensor é:

$$Q = \rho_S V_S C_S \frac{d\Delta T}{dt} \quad (2.7)$$

onde:

W : fluxo de calor que entra no sensor [W];

U : coeficiente global de transferência de calor [W/m^2K];

A_s : área efetiva de transferência de calor [m^2];

ρ_S : massa específica do material sensor [kg/m^3];

V_S : volume do sensor [m^3];

C_S : calor específico do material do sensor.

A taxa de variação do calor sensível do sensor deve ser igual à diferença entre o fluxo de calor que entra no sensor e o fluxo de calor que sai. O balanço de energia do sistema resulta em:

$$\rho_S V_S C_S \frac{d\Delta T}{dT} = U A_S (\Delta T_F - \Delta T) \quad (2.8)$$

e pode ser reescrita como:

$$\frac{M_S C_S}{U A_S} \frac{d\Delta T}{dt} + \Delta T = \Delta T_F \quad (2.9)$$

onde:

M_S : massa da ponta do sensor [kg].

A Equação (2.9) é uma equação diferencial ordinária linear de primeira ordem e reescrevendo a Equação (2.1) com $n=1$ e $b_1=0$, temos:

$$\frac{a_1}{a_0} \frac{dS(t)}{dt} + S(t) = \frac{b_0}{a_0} E(t) \quad (2.10)$$

ou ainda,

$$\tau \frac{dS(t)}{dt} + S(t) = \kappa E(t) \quad (2.11)$$

onde:

τ : constante de tempo;

κ : sensibilidade estática do sensor.

Comparando a Eq. (2.9) e a Eq. (2.11), pode-se inferir que:

$$\tau = \frac{MC_S}{UA_S} \quad (2.12)$$

$$S(t) = \Delta T \quad (2.13)$$

$$E(t) = \Delta T_F \quad (2.14)$$

A grandeza física da resposta do sensor e a grandeza que se deseja medir são relacionadas pela sensibilidade estática do sensor κ , que é constante para um sensor com comportamento linear e por isso não altera a forma de resposta do mesmo. Para termopares, a sensibilidade estática do sensor relaciona tensão com temperatura (Almeida, 2003).

O coeficiente global de transferência de calor U relaciona a resistência térmica interna (intrínseca) do sensor que esta associada diretamente ao coeficiente de condução térmica e às características construtivas do sensor, e a resistência térmica externa (extrínseca) do sensor, ligada ao coeficiente de convecção natural do meio no qual o sensor está inserido. A resistência extrínseca também é conhecida como resistência de acoplamento.

Dessa forma, tem-se que U pode ser obtido da forma:

$$UA_S = \frac{1}{R_{intrínseca} + R_{extrínseca}} \quad (2.15)$$

A influência das resistências intrínsecas e extrínsecas na expressão da constante de tempo do sensor pode ser explicada substituindo-se a Eq. (2.15) na Eq. (2.12):

$$\tau = MC_S(R_{intrínseca} + R_{extrínseca}) \quad (2.16)$$

Para pequenos diferenciais de temperatura, as propriedades de um sensor de temperatura (condutividade térmica) não variam de forma considerável. A parcela intrínseca da resistência térmica pode ser considerada constante. A transferência na interface com o meio (fora do sensor) se dá por

convecção, e ao contrário das propriedades do sensor, varia largamente de acordo com as condições dinâmicas do meio.

Como $R_{\text{extrínseca}}$ é dada pelo inverso do produto de h pela área efetiva de transferência de calor A_s , e os outros membros da Eq. (2.16) são constantes, podemos escrevê-la como:

$$\tau = B_1 + \frac{B_2}{h} \quad (2.17)$$

onde:

$$B_1 = M_S C_S R_{\text{intrínseca}} \quad (2.18)$$

$$B_2 = \frac{M_S C_S}{A_S} \quad (2.19)$$

Uma análise da Eq. (2.17) deixa clara a contribuição das parcelas $R_{\text{intrínseca}}$ e $R_{\text{extrínseca}}$ no valor total da constante de tempo e mostra o caráter invariável da resistência intrínseca e a dependência extrínseca com relação ao coeficiente de convecção h do meio (Henrique, 2001).

Aplicando o operador de Laplace à Eq. (2.11), obtém-se a função de transferência para sensores de primeira ordem:

$$TF(s) \equiv \frac{\mathcal{L}(S(t))}{\mathcal{L}(E(t))} = \frac{\kappa}{(\tau \cdot s + 1)} \quad (2.20)$$

Submetendo uma função degrau de amplitude R como um sinal de entrada à Eq. (2.20), tem-se o sinal de saída $S(t)$ no domínio de Laplace:

$$\mathcal{L}(S(t)) = \frac{\kappa}{(\tau \cdot s + 1)} \frac{R}{s} \quad (2.21)$$

Aplicando-se a transformada inversa de Laplace à Eq. (2.21) para obter o sinal de saída no domínio do tempo de um sensor de primeira ordem a uma excitação do tipo degrau, tem-se (Doebelin, 2004):

$$\frac{S(t)}{\kappa R} = \left(1 - e^{-t/\tau}\right) \quad (2.22)$$

O valor de κ para termopares é expresso em mV/°C, desse modo o produto (κR) é uma voltagem, tendo em vista que a intensidade do degrau R é definida como uma temperatura. A Figura 13 mostra a resposta teórica da Eq. (2.22) a um degrau unitário de temperatura.

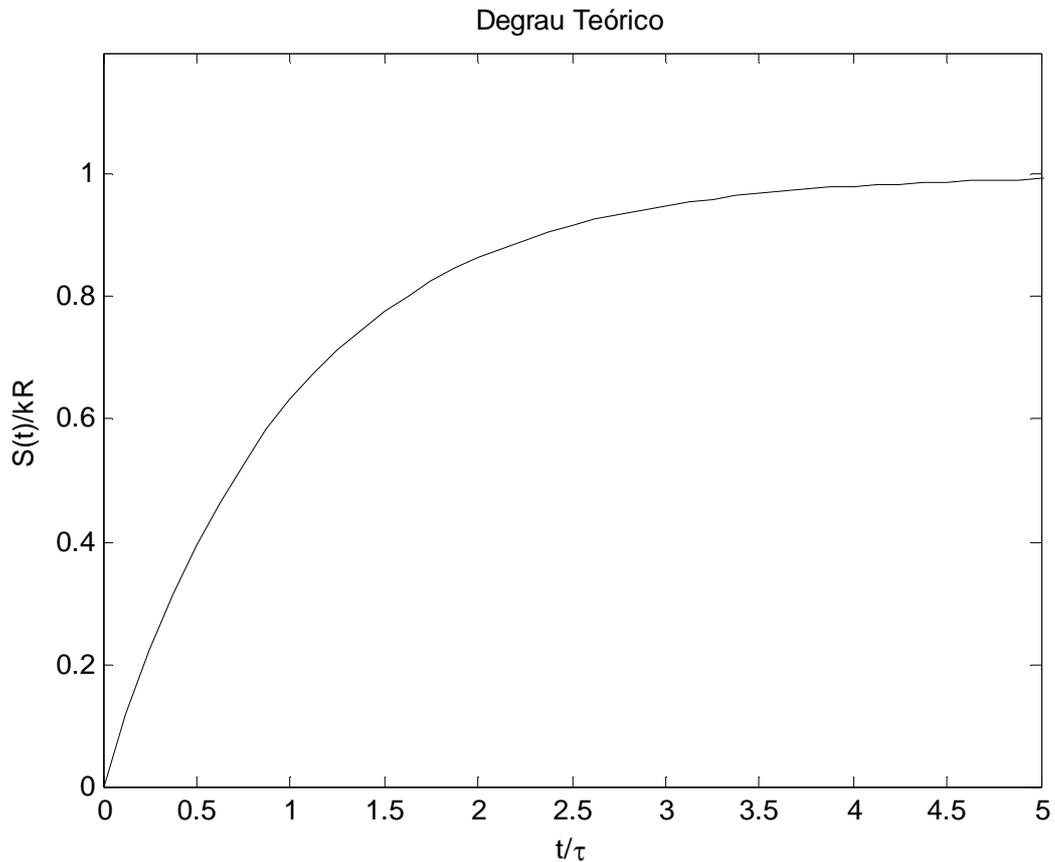


Figura 13 - Degrau teórico de uma excitação do tipo degrau unitário

Fazendo $t = \tau$, observa-se que o sinal de saída atinge 63,2% do degrau total de temperatura R , enquanto que o tempo de estabilização é o tempo que o sensor atinge 95% do degrau (Doebelin, 2004). Essa constatação permite a determinação da constante de tempo do sensor através de sua curva de resposta experimental, obtida a partir da calibração dinâmica do mesmo (Vianna et al., 2003).

2.6. MODELO MATEMÁTICO PARA SENSORES DE SEGUNDA ORDEM

Termopares encapsulados, ilustrado na Figura 14, os quais o elemento sensor está isolado do meio envolto por uma proteção, podem ser analisados como sensores de segunda ordem.



Figura 14 - Termopar encapsulado (adaptado de TermoShaw, 2012)

As mesmas considerações assumidas para os sensores de primeira ordem são feitas para os sensores de segunda ordem imersos em meio líquido, respeitando a equação diferencial ordinária linear de segunda ordem a seguir:

$$\frac{a_2}{a_0} \frac{d^2 S(t)}{dt^2} + \frac{a_1}{a_0} \frac{dS(t)}{dt} + S(t) = \frac{b_0}{a_0} E(t) \quad (2.23)$$

Levando-se em conta a transferência de calor entre o encapsulamento e a junta do sensor, além da troca de calor entre o meio e o próprio encapsulamento, obtém-se a partir do balanço de energia para o encapsulamento e para a junta a seguinte equação:

$$\left[\left(\frac{M_C C_C}{U_{FCA_C}} \right) \left(\frac{M_S C_S}{U_{CSA_S}} \right) \right] \frac{d^2 \Delta T}{dt^2} + \left[\left(\frac{M_C C_C}{U_{FCA_C}} \right) + \left(\frac{M_S C_S}{U_{CSA_S}} \right) + \left(\frac{M_S C_S}{U_{FCA_C}} \right) \right] \frac{d\Delta T}{dt} + \Delta T = \Delta T_F \quad (2.24)$$

sendo:

C_C : calor específico do material do encapsulamento [J/kgK]

M_C : massa do encapsulamento [kg]

U_{FC} : coeficiente global de transferência de calor entre o fluido e o encapsulamento [W/m²k]

U_{CS} : coeficiente global de transferência de calor entre o encapsulamento e a junta [W/m²k]

A_C : área efetiva de transferência de calor do encapsulamento [m²]

A Equação (2.24) é uma equação diferencial ordinária linear de segunda ordem com coeficientes constantes e pode ser reescrita definindo as constantes de tempo de encapsulamento τ_C e da junta do sensor τ_S :

$$[\tau_C \tau_S] \frac{d^2 S(t)}{dt^2} + \left[\tau_C + \tau_S + \left(\frac{M_S C_S}{U_{FC} A_C} \right) \right] \frac{dS(t)}{dt} + S(t) = E(t) \quad (2.25)$$

onde:

$$\tau_C = \left(\frac{M_C C_C}{U_{FC} A_C} \right) \quad (2.26)$$

$$\tau_S = \left(\frac{M_S C_S}{U_{CS} A_S} \right) \quad (2.27)$$

A função de transferência de segunda ordem pode ser obtida aplicando-se o operador de Laplace e rearranjada em função da frequência natural não-amortecida ω_n e a razão de amortecimento ξ :

$$TF(s) \equiv \frac{\mathcal{L}(S(t))}{\mathcal{L}(E(t))} = \frac{\kappa}{\frac{s^2}{\omega_n^2} + \frac{2\xi s}{\omega_n} + 1} \quad (2.28)$$

com:

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{\tau_C \tau_S}} \quad (2.29)$$

$$\xi = \frac{\tau_C + \tau_S + \left(\frac{M_S C_S}{U_{FC} A_C} \right)}{2\sqrt{\tau_C \tau_S}} \quad (2.30)$$

A forma da resposta dinâmica de um sensor de segunda ordem depende do valor ξ (Rao, 2008):

- ✓ $\xi = 1$, o sistema é criticamente amortecido;
- ✓ $0 < \xi < 1$, o sistema é sub-amortecido;
- ✓ $\xi > 1$, o sistema é super-amortecido.

3. INCERTEZA DE MEDIÇÃO

Com a crescente competitividade pelo mercado mundial, tanto as pequenas quanto as grandes empresas precisam garantir de alguma forma a qualidade de seus produtos, melhorar processos produtivos e reduzir custos. Para saber se o produto atende às especificações de qualidade é necessário quantificar as variáveis. Nesse contexto, a metrologia tem ganhado cada vez mais importância nas mais diversas áreas.

O conceito de incerteza surgiu para caracterizar quantitativamente a qualidade do resultado de uma medição. A partir do momento que essa caracterização se torna possível e viável, pode-se analisar a confiabilidade dos resultados obtidos, e ainda, comparar resultados de diferentes medições entre si ou valores de referência fornecidos por uma especificação ou uma norma. A importância do valor da incerteza de medição aumenta à medida que sua magnitude se aproxima da tolerância do processo. Em alguns casos, desconhecer a incerteza pode resultar em ações equivocadas.

Entretanto, imperfeições estão presentes em todo e qualquer sistema de medição fazendo com que os resultados não coincidam com o valor verdadeiro do mensurando. Enquanto o valor da incerteza de medição associada a esses resultados quantifica o grau de desconhecimento desse afastamento, ou, em outras palavras, a dúvida acerca da validade do resultado de uma medição, o erro é a diferença entre o resultado e o valor verdadeiro de uma grandeza. O valor verdadeiro de uma grandeza seria resultado de uma medição livre de imperfeições, e por isso, não é conhecido (ABNT, 2003).

O Sistema Internacional de Unidades (SI) trouxe uma padronização e uma maior coerência a todas as medições científicas e tecnológicas e isso só foi possível devido à aceitação da comunidade internacional. Na era do mercado global, faltava ainda um método para avaliar e expressar a incerteza de medição de forma uniforme, que fosse aplicável a todas as espécies de medição e todos os tipos de dados de entrada. As diversas metodologias, adotadas nos mais diversos países para o procedimento de avaliação e expressão da incerteza de medição, não possuíam coerência entre si, impossibilitando a intercomparação de resultados.

Essas preocupações levaram a maior autoridade em metrologia, CIPM (“Comité International des Poids et Mesures”), a solicitar ajuda a grandes organizações, como o BIPM (“Bureau International des Poids et Mesures”) e a ISO (“International Organization for Standardization”), para estudar e propor procedimentos de determinação e expressão da incerteza de medição para uso em padronização, calibração, credenciamento de laboratórios e serviços metrológicos.

Os estudos realizados resultaram em um documento com recomendações denominado “Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement” (GUM), publicado em 1993. Sistemas mais

consistentes de garantia da qualidade de medição puderam ser desenvolvidos a partir dessa padronização, melhorando a confiabilidade metrológica dos mesmos. Desde então, o GUM vem sendo adotado por diversos países e traduzido para alguns idiomas. Há uma versão traduzida para o português (ABNT, 2003), e esse documento é usado no Manual de Qualidade do Laboratório de Metrologia Dinâmica (LMD) da Universidade de Brasília.

3.1. ERRO E INCERTEZA DE MEDIÇÃO

Os termos erro e incerteza não podem ser confundidos e devem ser esclarecidos. As imperfeições presentes nas medições que dão origem ao erro no resultado do mensurando podem ser corrigidas ou minimizadas. O erro é um conceito idealizado, não se pode conhecer seu valor verdadeiro e possui duas componentes.

O erro que se origina de variações, de forma imprevisível é denominado erro aleatório. Os efeitos dessa aleatoriedade são a causa das variações em observações repetidas do mensurando. O erro aleatório pode ser minimizado aumentando-se o número de observações, mas não pode ser compensado. Sua esperança é zero. Segundo o VIM (INMETRO, 2003), o erro aleatório é o resultado de uma medição menos a média que resultaria de um infinito número de medições do mesmo mensurando efetuadas sob condições de repetitividade. Porém, apenas um número finito de medições pode ser realizado sendo possível apenas estimar o erro aleatório.

O erro sistemático tem origem no efeito conhecido que uma grandeza de influência tem sobre um resultado de medição. Este efeito sistemático pode ser quantificado e um fator de correção pode ser aplicado para compensá-lo. O erro sistemático, assim como o erro aleatório, não pode ser anulado, mas pode ser minimizado. Após as correções a esperança ou valor esperado do erro devido a um efeito sistemático é supostamente zero (ABNT, 2003).

3.2. AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO

Difícilmente o mensurando é determinado diretamente, dependendo de um conjunto de N outras grandezas de entrada $X_i (i=1,2,3,\dots,N)$, de acordo com a relação funcional a seguir:

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_N) \quad (3.1)$$

A função f é denominada função modelo e determina como os valores do mensurando são obtidos a partir dos valores das grandezas de entrada. Essa relação pode ser determinada experimentalmente ou até mesmo um algoritmo que terá de ser resolvido numericamente.

O resultado de uma medição, também chamado de valor de saída, é uma estimativa do mensurando Y , denotado por y e pode ser obtido da Eq. (3.1) usando estimativas de entrada x_i para os N valores das grandezas de entrada X_i :

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_N) \quad (3.2)$$

Segundo o GUM, define-se a incerteza padrão como a incerteza do resultado expressa como um desvio padrão. Quando este resultado é obtido por meio de várias outras grandezas, a incerteza padrão é então denominada incerteza padrão combinada. A incerteza padronizada associada à estimativa de saída y , denotada por $u(y)$, é o desvio padrão de Y , determinado a partir das estimativas x_i das grandezas de entrada X_i e a combinação das incertezas padrão $u(x_i)$.

A incerteza pode ser agrupada em dois tipos de avaliação:

- ✓ Avaliação do tipo A, na qual a incerteza é obtida por meio de análise estatística de uma série de observações. É obtida por meio de uma função de densidade de probabilidade proveniente de uma distribuição de frequência de um conjunto de dados;
- ✓ Avaliação do tipo B baseia-se em meios que não utilizam uma série de observações repetidas.

Conforme o caso, a incerteza padrão pode ser constituída apenas do tipo A ou tipo B, ou ambas.

3.3. AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DAS ESTIMATIVAS DE ENTRADA

3.3.1. AVALIAÇÃO DO TIPO A

Na avaliação do tipo A, muitas vezes a melhor estimativa de uma grandeza X , para N medições independentes, é a sua média aritmética \bar{X} das medições realizadas:

$$x = \bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \quad (3.3)$$

A incerteza padronizada $u(x_i)$ da estimativa de entrada x_i é expressa como o desvio padrão experimental da média $s(\bar{X})$, que é a raiz quadrada positiva da variância experimental da média. A variância estimada das medições realizadas é dada por:

$$s^2(X) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \quad (3.4)$$

3.3.2. AVALIAÇÃO DO TIPO B

A avaliação da incerteza do tipo B depende de informações relacionadas à variável X_i que podem ser obtidas em documentos ou por meio de conhecimento adquirido. Essas informações podem incluir:

- ✓ resultados de medições prévias;
- ✓ especificações de fabricantes;
- ✓ dados de certificados de calibração;
- ✓ experiência e conhecimento do comportamento e propriedades de materiais e instrumentos utilizados;
- ✓ incertezas relacionadas a dados de referência obtidos de manuais.

3.4. AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DA ESTIMATIVA DE SAÍDA

3.4.1. GRANDEZAS DE ENTRADA NÃO CORRELACIONADAS

Para as grandezas de entradas independentes, a incerteza padronizada combinada $u_c(y)$ é obtida pela raiz quadrada positiva da variância combinada das incertezas padronizadas $u_c^2(y)$:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) \quad (3.5)$$

onde f é a função dada na Eq. (3.2) e $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ é o coeficiente de sensibilidade que relaciona o quanto a estimativa de saída y é influenciada por variações das estimativas de entrada x_i . A Equação (3.5) é uma aproximação de primeira ordem da série de Taylor e expressa a lei de propagação da incerteza.

3.4.2. GRANDEZAS DE ENTRADA CORRELACIONADAS

Quando as grandezas de entrada X_i são dependentes ou correlacionadas, a variância da incerteza padronizada combinada $u_c^2(y)$ da estimativa de saída é:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \quad (3.6)$$

ou ainda,

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \quad (3.7)$$

onde as estimativas de X_i e X_j são dadas por x_i e x_j , e $u(x_i, x_j)$ é a covariância estimada entre as duas grandezas.

O grau de correlação entre x_i e x_j é dado pelo coeficiente de correlação estimado $r(x_i, x_j)$:

$$r(x_i, x_j) = \frac{u(x_i, x_j)}{u(x_i)u(x_j)} \quad (3.8)$$

A Equação (3.7) pode ser reescrita em função do coeficiente de correlação estimado:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i)u(x_j)r(x_i, x_j) \quad (3.9)$$

O coeficiente de correlação estimado $r(x_i, x_j)$ será igual a zero caso as estimativas x_i e x_j sejam independentes e a variação em uma delas não provoca uma variação esperada na outra.

3.5. DETERMINANDO A INCERTEZA EXPANDIDA

A recomendação para se utilizar a incerteza padrão combinada $u_c(y)$ como o parâmetro quantitativo para se representar a incerteza do resultado de uma medição está na Recomendação INC-1 (1980) do Grupo de trabalho sobre a Declaração de Incertezas, na qual o GUM (ABNT, 2003) está baseado. Porém, em alguns casos comerciais, industriais e regulamentadores, e quando se envolve saúde e segurança, é necessário definir um intervalo em torno de um resultado da medição que inclua uma faixa maior da distribuição de valores que poderiam ser atribuídos ao mensurando, denominada incerteza expandida U :

$$U = k u_c(y) \quad (3.10)$$

A incerteza expandida está associada à probabilidade de abrangência ou nível de confiança do intervalo. Para o caso em que a distribuição de probabilidade de y é aproximadamente normal, o valor do fator de abrangência k é igual a dois e fornece um intervalo de confiança com 95%. Para alguns casos com avaliação de incerteza tipo A com um número de repetições menor que 10, mesmo admitindo-se que a estimativa de saída possua um comportamento normal, a confiabilidade não é satisfeita. Admite-se, então, que y tem comportamento semelhante à distribuição t-Student.

O fator de abrangência deve ser determinado pelo número de graus de liberdade efetivos v_{eff} da incerteza padronizada, determinado através da fórmula de Welch-Satterthwaite:

$$v_{eff} = \frac{u_c^A(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^A(y)}{v_i}} \quad (3.11)$$

em que v_i é o número de graus de liberdade efetivos da incerteza padrão $u_i(y)$.

Os graus de liberdade, para avaliações do tipo A, são dados por $v_i = N - 1$. Para avaliações de incertezas do tipo B, determinar os graus de liberdade se torna complicado e é comum considerar $v_i \rightarrow \infty$. O fator de abrangência é então obtido da distribuição t-Student, de acordo com a probabilidade de abrangência desejada (Tabela 1).

Tabela 1 - Fatores de abrangência k para diferentes graus de liberdade, com probabilidade de 95% para distribuição t-Student (INMETRO, 1999).

v_{eff}	1	2	3	4	5	6	7	8	10	20	50	∞
K	13.97	4.53	3.31	2.87	2.65	2.52	2.43	2.37	2.28	2.13	2.05	2.00

Calculado a incerteza expandida, o resultado de uma medição é representado por $Y = y \pm U$, representando que a melhor estimativa para Y é y e que $y - U$ a $y + U$ é o intervalo para o qual se espera uma faixa de distribuição de valores que podem ser atribuídos a Y (ABNT, 2003).

3.6. MODELO MATEMÁTICO DA INCERTEZA NA MEDIÇÃO DE TEMPERATURA

É importante estudar e entender os elementos da cadeia de medição para conhecer suas características dinâmicas. Alguns métodos de cálculo de erro associado à medição dinâmica são baseados na função de transferência desses elementos, permitindo relacionar os dados de saída e de entrada da cadeia de medição em função do tempo. Entretanto, esses modelos teóricos ficam restritos às respostas dinâmicas teóricas, sem considerar os erros presentes na cadeia de medição.

Para o estudo da determinação da incerteza de medição na calibração dinâmica de sensores de temperatura desenvolvido no LMD-UnB, foi desenvolvido uma função modelo para os testes a serem

realizados na cuba rotativa. Essa função se baseia na observação e detecção das fontes de erro e imperfeições associadas à cadeia de medição e associa uma incerteza determinada estatisticamente a cada ponto da resposta dinâmica do sensor a ser calibrado. O modelo segue os procedimentos de referência para o cálculo de incerteza detalhados no GUM (INMETRO, 2003) e define as componentes de incerteza que devem ser calculadas.

As principais fontes de erro na medição de temperatura com termopares são (Almeida, 2003):

- ✓ variação da temperatura da fonte térmica;
- ✓ variação de temperatura na junta fria;
- ✓ tensões parasitas associadas à utilização de cabos de extensão ou compensação, ou de chaves seletoras;
- ✓ interferência eletromagnética;
- ✓ tensões mecânicas ou deformações, não-homogeneidades, oxidação e efeitos de liga do material do sensor;
- ✓ má condução de calor ao longo do termopar proveniente da imersão insuficiente na fonte térmica.

O modelo matemático desenvolvido, representado pela Eq. (3.12), relaciona a tensão produzida nos terminais de um termopar com as demais grandezas de influência de entrada da cadeia de medição (Vianna et al., 2003):

$$V_T = \frac{V_L}{G} - V_O + \frac{\delta T_{dif}}{\kappa_q} + \frac{\delta T_U}{\kappa_q} - \frac{\delta T_f}{\kappa_f} + \frac{\delta V_R}{G} - \gamma \cdot \delta T_{amb} \quad (3.12)$$

onde:

V_T : tensão produzida pelo termopar [mV];

V_L : tensão lida no analisador de sinais dinâmicos [mV];

G : ganho de tensão do amplificador [mV/mV];

V_O : offset na tensão de entrada no amplificador [mV];

δT_{dif} : diferença entre a temperatura de um sensor de referência e a temperatura medida, em um dado instante de tempo [°C];

δT_U : erro associado à não-uniformidade da temperatura do líquido na seção de testes da cuba rotativa [°C];

δT_f : desvio da temperatura da junta fria em relação ao ponto de referência 0° C [°C];

δV_R : erro devido à resolução limitada do analisador de sinais [mV];

δT_{amb} : erro associado a variações na temperatura ambiente [°C];

κ_q : sensibilidade estática do termopar na temperatura de junta quente [°C/mV];

κ_f : sensibilidade estática do termopar na temperatura de junta fria [°C/mV];

γ : coeficiente de temperatura do amplificador [mV/°C].

A Equação (3.12) é uma função modelo nos moldes da Eq. (3.2). A estimativa da grandeza de saída é V_T e as estimativas das grandezas de entrada do cálculo da incerteza de medição são V_L , V_O , δT_{dif} , δT_U , δT_f , δV_R e δT_{amb} . O coeficiente de sensibilidade c de cada grandeza de entrada é representada na Tabela 2.

Tabela 2 - Grandezas de entrada e os respectivos coeficientes de sensibilidade

Grandeza de entrada	Coeficiente de sensibilidade (c)
V_L	$c_1 = \frac{1}{G}$
V_O	$c_2 = -1$
δT_{dif}	$c_3 = -\frac{1}{\kappa_q}$
δT_U	$c_4 = \frac{1}{\kappa_q}$
δT_f	$c_5 = \frac{1}{\kappa_f}$
δV_R	$c_6 = \frac{1}{G}$
δT_{amb}	$c_7 = -\gamma$

A cada estimativa da grandeza de entrada está associada uma incerteza padronizada $u(x_i)$, que combinadas, resultam na incerteza padronizada combinada da estimativa da grandeza de saída $u_c(y)$.

As grandezas V_L e δT_{dif} presentes na Eq. (3.12) são as únicas que variam para cada ponto no tempo (Almeida, 2003).

4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Neste capítulo será apresentado a metodologia, os instrumentos que serão utilizados na cadeia de medição e os procedimentos seguidos para calibração dinâmica dos sensores, com o objetivo de se atingir uma maior relevância científica e uma boa conclusão sobre os resultados da incerteza de medição a partir da utilização de equipamentos de aquisição e processamento de dados disponíveis no Laboratório de Metrologia Dinâmica (LMD), da Universidade de Brasília.

4.1. APARATO EXPERIMENTAL

Para a calibração dinâmica do termopar escolhido é necessário estudar e compreender o sistema de aquisição de dados e é proposto um modelo para determinar a incerteza de medição para a cadeia de medição utilizada. O amplificador CI-741 e o analisador dinâmico de sinais HP3565A utilizados por Almeida (2003), e o CI-741 e o analisador dinâmico de sinais HP3566A utilizados por Henriques (2001) não estão em estado de funcionamento e estão sendo substituídos pelo controlador e conversor A/D Lynx AC1160 com entrada para termopares e condicionador de sinais MCS1000, cujo relatório de calibração se encontra no “Anexo I” deste relatório. Foi utilizado o software AqDAnalysis para análise e processamento dos sinais experimentais, bem como o software MatLab, versão R2010a, para tratamento e estudo dos dados adquiridos.

Para a realização dos testes foi montado uma cadeia de medição dinâmica de temperatura com a cuba rotativa e realizados testes preliminares para verificar o correto funcionamento dos equipamentos da bancada (Figura 15).

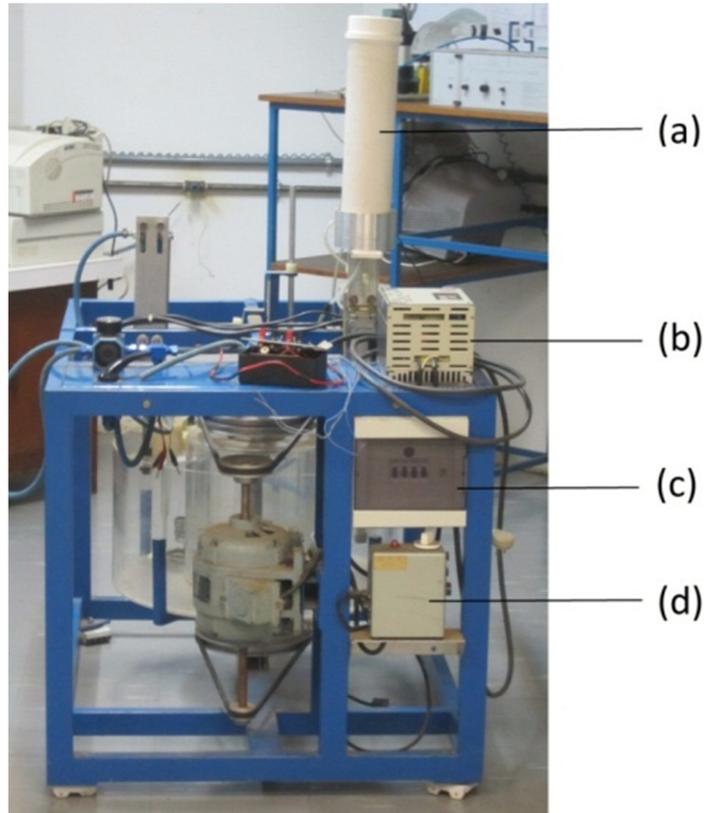


Figura 15 - Cuba rotativa e alguns componentes: (a) compartimento para compensação da junta fria, (b) controlador de velocidade das cubas, (c) quadro geral de energia e (d) painel controlador de temperatura do líquido.

Fazem parte da cadeia de medição:

- cuba rotativa e dispositivo de desmascaramento;
- compressor 2 HP e cilindro de armazenamento com capacidade para até 8 bar de pressurização;
- termopar utilizado para medir e monitorar a temperatura da água contida na cuba rotativa;
- termopar a ser calibrado dinamicamente, utilizado no dispositivo de desmascaramento, e o respectivo cabo de extensão;
- controlador e conversor A/D Lynx AC1160 com entrada para termopares e condicionador de sinais MCS1000 (Figura 16);

- computador com o software AqDados 7.02 – Programa de Aquisição de Sinais, instalado;
- termômetros de bulbo de mercúrio para medição da temperatura ambiente.

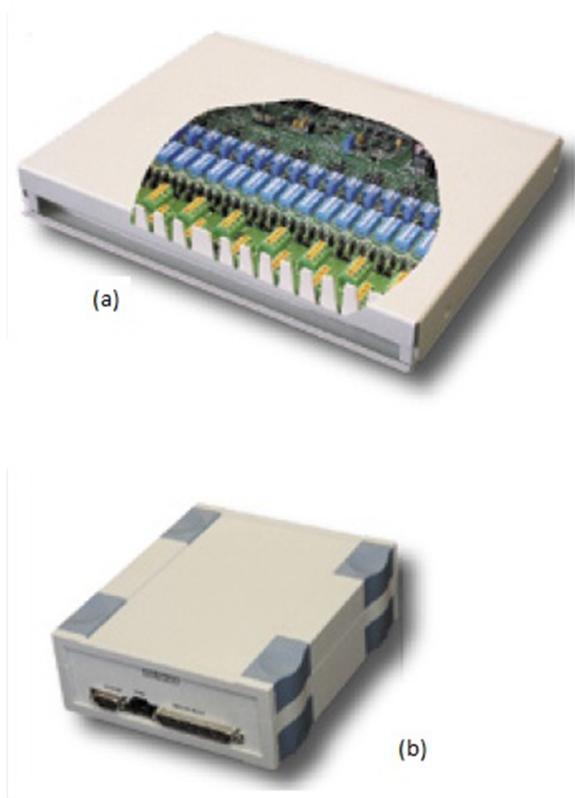


Figura 16 - (a) Controlador de aquisição de dados - AC1160 e (b) Condicionador de sinais - MCS1000 (adaptado de Lynxtec, 2012)

Será utilizado um termopar tipo J de junta exposta para o estudo da incerteza de medição por ser bastante utilizado nas mais diversas áreas e um tipo K para monitorar a temperatura da água contida na cuba rotativa. Ambos encontram-se à disposição no Laboratório de Metrologia Dinâmica (LMD). A Tabela 3 mostra algumas características de vários tipos de termopares, dentre eles, os utilizados.

Tabela 3 - Faixas de utilização e limites de erros para termopares (adaptado de Ecil, 2012)

Letra designada pela ASTM E 230	Nome dos Termoelementos	Faixa de Utilização (°C)	Limite de Erro* (Escolher o maior)	
			Padrão	Especial
E	(+) Chromel (-) Constantan	0 a 870	±1,7°C ou ±0,5%	±1°C ou ±0,4%
		-200 a 0	±1,7°C ou ±1%	-
J	(+) Ferro (-) Constantan	0 a 760	±2,2°C ou ±0,75%	±1,1°C ou ±0,4%
K	(+) Chromel (-) Alumel	0 a 1260	±2,2°C ou ±0,75%	±1,1°C ou ±0,4%
		-200 a 0	±2,2°C ou ±2%	-
N	(+) Nicrosil (-) Nisil	0 a 1260	±2,2°C ou ±0,75%	±1,1°C ou ±0,4%
T	(+) Cobre (-) Constantan	0 a 370	±1°C ou ±0,75%	±0,5°C ou ±0,4%
		-200 a 0	±1°C ou ±1,5%	-
R	(+) Platina/13% Ródio (-) Platina	0 a 1480	±1,5°C ou ±0,25%	±0,6°C ou ±0,1%
S	(+) Platina/10% Ródio (-) Platina	0 a 1480	±1,5°C ou ±0,25%	±0,6°C ou ±0,1%
B	(+) Platina/30% Ródio (-) Platina/6% Ródio	870 a 1700	±0,5%	-
C	(+) tungstênio-5% rênio (-) tungstênio-26% rênio	0 a 2315	±4,4°C ou ±1%	-

4.2. EQUIPAMENTO DE AQUISIÇÃO DE SINAIS

Após verificar o correto funcionamento da bancada: o motor, as resistências elétricas, o compressor e os dispositivos pneumáticos, deve-se ligar o termopar auxiliar e o termopar a ser calibrado ao controlador de aquisição de dados - AC1160 que, por sua vez, é conectado ao Condicionador de sinais - MCS1000 e esse, ao computador.

O controlador de aquisição de dados - AC1160 possui 16 canais de entrada, dos quais três canais foram selecionados. Para este trabalho, foram convenientemente selecionados os três primeiros canais e configurados da seguinte maneira:

- ✓ canal 0: junta fria
- ✓ canal 1: termopar auxiliar tipo K encapsulado
- ✓ canal 2: termopar a ser calibrado tipo J de junta exposta

Cada canal deve receber as configurações analógicas de acordo com o relatório de calibração do equipamento, encontrado no Anexo I. Deve-se selecionar o tipo de termopar, o limite inferior e o limite superior dos canais em milivolts de acordo com o ganho de tensão desejado, conforme ilustrado na Figura 17.

Os sinais de termopares são tensões muito baixas para serem lidas diretamente por um conversor A/D. Por isso, normalmente há uma amplificação do sinal do termopar para que o mesmo se ajuste à faixa de entrada do conversor A/D. Todos os canais foram configurados com ganho nominal do condicionador de 300 vezes, ou seja, a tensão gerada pelo termopar que chega ao controlador de sinais é amplificada 300 vezes para ser lida e interpretada pelo mesmo.

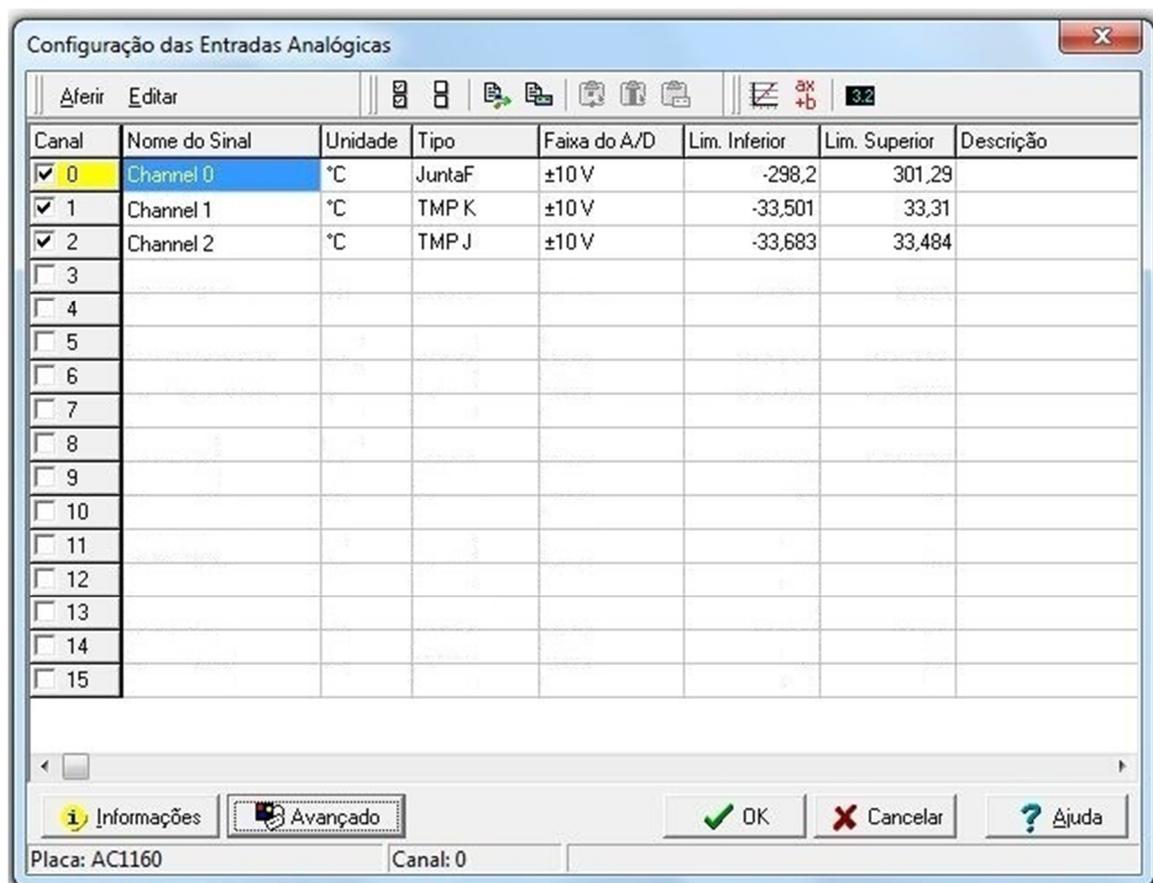


Figura 17 - Configuração das Entradas Analógicas do Software AqDados 2.02

4.3. CONVERTENDO PARA GRAUS CELSIUS

Como os termopares são sensores de temperatura cujos sinais gerados (tensão em mV) não podem ser convertidos linearmente para a temperatura correspondente, há um recurso no software AqDados que permite a linearização de sinais para converter os sinais de sensores tipo termopar para valores na unidade da grandeza medida (°C). Se não houver uma tabela de linearização para o termopar que será utilizado, deverá ser criada uma tabela conforme indicado no Apêndice A – Linearizando Sinais de Termopar, do Manual do Usuário do software AqDados 7.02.

Os valores de sinais tipo termopar são linearizados automaticamente durante a apresentação dos mesmos em telas e janelas. Desta forma, os dados de saída dos experimentos são apresentados em Graus Celsius. A linearização pode ser feita de duas formas:

- ✓ com compensação de junta fria
- ✓ sem compensação de junta fria

Na linearização com compensação de junta fria, os valores do sinal de um termopar levam em consideração a tensão fornecida por um sensor adicional responsável por uma temperatura de referência conhecida (por exemplo, zero grau Celsius). Esse sensor adicional é chamado Junta Fria e sua tensão fornecida pode ser convertida diretamente para a temperatura de junta fria.

Na linearização sem compensação de junta fria não há um sensor adicional. A compensação é realizada via hardware pelo condicionador de sinais.

Por exemplo, suponha que o termopar Tipo J forneça um sinal de 2,059 mV (equivalente a 40°C). Se o canal de junta fria informa uma temperatura de 22°C, a tensão correspondente a essa temperatura, cerca de 1,122 mV (obtida na tabela de linearização do termopar tipo J), deve ser somada à tensão fornecida pelo termopar antes de se calcular a temperatura indicada pelo termopar na tabela. Assim, a temperatura real medida seria correspondente a $2,059 + 1,122 = 3,181$ mV, que corresponderia a aproximadamente 61,5°C.

Todos os experimentos realizados durante este trabalho utilizaram linearização sem compensação da junta fria.

4.4. PLANEJAMENTO FATORIAL DOS EXPERIMENTOS

Para calibrar o sensor de temperatura, foi utilizada água como meio de medição, aquecida por meio de resistências elétricas instaladas no interior da cuba. A cuba é feita de um material (acrílico) que não suporta temperaturas elevadas, não é recomendado ultrapassar 70°C, impedindo calibrar o termopar em todo o seu intervalo de trabalho (0 a 760°C). Os resultados obtidos neste trabalho valem apenas para os intervalos de temperatura testados e não podem ser garantidos para temperaturas superiores às determinadas nos ensaios.

A temperatura inicial do degrau varia de acordo com a temperatura do banho, uma vez que a temperatura inicial do degrau equivale à temperatura do vapor no interior do dispositivo de desmascaramento imediatamente antes do contato do sensor com a água. Quanto mais elevada estiver a temperatura da água contida na cuba, maior será a temperatura do vapor dentro do dispositivo consequentemente.

Existem três variáveis que podem ser controladas e variadas: a velocidade de rotação da cuba, a temperatura do banho e a pressão do cilindro pneumático que aciona o dispositivo de desmascaramento. Todos os ensaios foram realizados com a cuba a 250 rpm, uma vez que acima de 200 rpm a velocidade não mais influi de forma significativa na resposta dinâmica do sensor (Henrique, 2001). Para conseguir um intervalo maior de operação, foram escolhidos três valores para a variável temperatura do banho igualmente espaçados: 40, 50 e 60°C. A pressão do cilindro pneumático que aciona o dispositivo de desmascaramento influencia na velocidade de exposição do sensor à água contida na cuba e também foram escolhidos três valores igualmente espaçados: 2, 4 e 6 bar. A significância das variáveis aleatórias foi testada estatisticamente por meio de uma análise de variância.

Definidas as variáveis citadas acima, os ensaios foram definidos através de um planejamento fatorial 3^2 , resultando em 9 combinações experimentais mostrados na Tabela 4. Buscando atingir uma maior relevância científica e uma boa conclusão sobre os resultados, os ensaios foram realizados de forma aleatória, de modo a garantir a distribuição equânime de qualquer fator não considerado, ou seja, um maior número de variáveis externas ao experimento influencia de maneira igual.

Tabela 4 - Planejamento Fatorial dos Experimentos

Variáveis	Ensaio								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Temperatura do Banho (°C)	40	50	60	40	50	60	40	50	60
Dispositivo de Desmascaramento (bar)	2	2	2	4	4	4	6	6	6

Para cada ensaio foram realizadas 15 repetições para garantir estatisticamente uma boa quantidade de informações e representar de forma significativa os resultados encontrados. Definido as condições de cada ensaio, a ordem de realização foi sorteada. Foram testadas duas frequências de aquisição de dados, 100 e 2000 Hz, e verificaram-se melhores resultados com os dados adquiridos à frequência de 100 Hz, sendo essa também utilizada nos trabalhos anteriores a este. A aquisição à frequência de 2000 Hz sofreu muita interferência e ruídos (Figura 18) e, ainda, acima de 200 Hz os termopares podem apresentar um amortecimento considerável do sinal (Henrique, 2001).

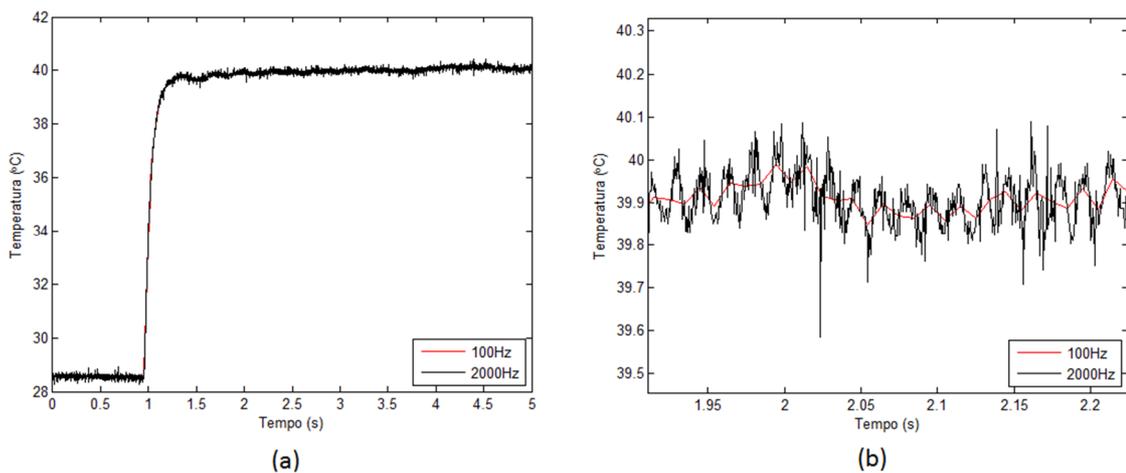


Figura 18 - (a) Aquisição de dados a 2000Hz e tratados a 100 Hz. (b) Ampliação entre o tempo de 2 e 2,2 segundos.

4.5. CUIDADOS COM A CUBA ROTATIVA

Antes de iniciar o ensaio é necessário deixar a bancada em acordo com as condições iniciais de cada ensaio sorteado. Para aquecer a água contida na cuba são utilizadas duas resistências elétricas, uma principal e uma secundária, conhecidas popularmente como mergulhão. A resistência principal está ligada ao painel de controle de temperatura, localizado na parte inferior da bancada. Há uma termorresistência do tipo PT 100 ligada a um termostato que permite estabelecer a temperatura do banho. A função da resistência secundária é de acelerar o processo de aquecimento do banho. Ambas estão fixadas a um mecanismo pneumático que permite suspendê-las, retirando-as da água.

As resistências não devem ser ligadas quando estiverem fora do banho para não danificarem e devem ser retiradas para a realização de qualquer medição, evitando assim, maiores riscos de choque elétrico e interferências no sinal a ser adquirido.

O compressor deve ser acionado para carregar o cilindro de armazenamento a uma pressão suficiente para a realização do ensaio. A pressão do dispositivo de desmascaramento é controlada manualmente através de uma válvula localizada na bancada, bem como o desmascaramento durante os ensaios.

O motor deve ser acionado e a rotação ajustada para 249 rpm no mostrador digital do painel responsável pela rotação do mesmo. Se for necessário retirar qualquer objeto que tenha caído dentro da cuba com água, desligar toda a parte elétrica da bancada.

A realização de cada repetição para uma determinada temperatura deve ocorrer entre um intervalo de no máximo $\pm 0,5$ °C, monitorado pelo termopar auxiliar. Por exemplo, para os testes com temperatura do banho a 40 °C, o ensaio poderá ser realizado enquanto o termômetro auxiliar indicar uma temperatura entre 39,5 e 40,5 °C.

4.6. AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO

Para direcionar a avaliação da incerteza de medição, foi seguido o roteiro proposto pelo CECT-Centro de Educação, Consultoria e Treinamento em Metrologia, Sistema da Qualidade e Desenvolvimento de Pessoal Ltda:

- especificar o mensurando e o modelo matemático;
- identificar as componentes de incerteza;

- quantificar as componentes de incerteza e verificar os níveis de confiança;
- definir o tipo de distribuição para cada componente de incerteza;
- usar o coeficiente de sensibilidade para obter a incerteza padrão;
- calcular a incerteza combinada;
- calcular os graus de liberdade efetivos;
- determinar o fator de abrangência;
- calcular a incerteza expandida.

Diante do roteiro acima e das recomendações do Guia para Expressão da Incerteza de Medição (GUM), foi possível estabelecer uma incerteza de medição para o tempo de resposta do termopar e para a temperatura.

4.6.1. AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO PARA A TEMPERATURA INDICADA PELO TERMOPAR

O estudo para determinar a incerteza de medição de um sistema de medição de temperatura leva em consideração o conjunto completo de instrumentos de medição e outros equipamentos acoplados para executar uma medição específica. A cadeia de medição é a sequência de elementos de um instrumento ou sistema de medição, que constitui o trajeto do sinal de medição desde o estímulo até a resposta (VIM, 2003).

Neste trabalho, temos um sistema automatizado de medição composto por um transdutor tipo termopar ligado a um instrumento de condicionamento, conversão, processamento e apresentação de sinal. Isso é uma das principais diferenças entre a cadeia de medição de temperatura utilizada aqui e a cadeia utilizada em por Almeida (Almeida, 2003). Outra diferença perceptível é que trabalharemos diretamente com as grandezas de saída em graus Celsius e não em milivolt como era feito anteriormente. Para cada diferença entre as cadeias de medição se faz necessário um novo estudo sobre o modelo matemático e as componentes de incerteza. Analisando o controlador de aquisição de dados - AC1160, o condicionador de sinais - MCS1000 e a bancada como um todo, seguem-se as seguintes contribuições para a incerteza de medição de temperatura:

- ✓ Correção devido à não-uniformidade da temperatura do líquido na seção de teste da cuba rotativa (δT_U)
- ✓ Correção devido ao processamento e apresentação do resultado (δT_R)
- ✓ Correção devido à calibração estática do termopar utilizado (δT_{CE})
- ✓ Correção devido à utilização de cabos de extensão (δT_{EXT})
- ✓ Correção devido à compensação de junta fria de referência (δT_{JF})
- ✓ Correção devido à linearização (δT_I)

Desta forma, o modelo matemático da calibração e componentes de incerteza de medição de temperatura resulta em:

$$T_T = T_L + \delta T_U + \delta T_R + \delta T_{CE} + \delta T_{EXT} + \delta T_{JF} + \delta T_I \quad (4.1)$$

onde,

T_T : temperatura do termopar

T_L : temperatura do lida no analisador de sinais

Comparando com a Eq. (4.1) e Eq. (3.2), que representa uma função modelo genérica, as seguintes correspondências podem ser feitas:

$$y = T_T \quad (4.3)$$

$$f = \sum_{i=1}^7 c_i x_i \quad (4.4)$$

onde:

$$x_1 = T_L$$

$$x_2 = \delta T_U$$

$$x_3 = \delta T_R$$

$$x_4 = \delta T_{CE}$$

$$x_5 = \delta T_{EXT}$$

$$x_6 = \delta T_{JF}$$

$$x_7 = \delta T_I$$

Os valores c_i , $i = 1, 2, \dots, 7$, são os coeficientes de sensibilidade da função f e são todos iguais a um, pois todas as estimativas estão na mesma unidade de engenharia, graus Celsius. Os parâmetros x_i são as estimativas das grandezas de entrada para o cálculo da incerteza de medição e para cada uma dessas grandezas há uma incerteza padronizada $u(x_i)$ que serão combinadas para determinar a incerteza padronizada combinada $u_c(y)$ da estimativa de saída. Apenas a grandeza T_L varia para cada ponto no tempo, as demais permanecem constantes.

4.6.2. AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO PARA O TEMPO DE RESPOSTA DO TERMOPAR

Durante o levantamento das fontes de incerteza para o tempo de resposta do termopar, foram identificadas duas fontes de contribuição: o desvio padrão das medições dos tempos de resposta para uma mesma condição de ensaio e a resolução limitada da leitura pelo equipamento de aquisição de dados. Para a primeira assume-se uma distribuição normal de probabilidade, caracterizando uma incerteza do Tipo A, enquanto que para a segunda, assume-se uma distribuição retangular, caracterizando uma incerteza do Tipo B. Desta forma, o modelo matemático da incerteza para o tempo de resposta, baseado na Eq. 3.2 do Capítulo 3, é dado em segundos por:

$$\tau = t + \delta Res \tag{4.2}$$

onde,

τ : tempo de resposta do sensor

t : tempo de resposta calculado do sensor

δRes : erro associado à resolução limitada da leitura do tempo pelo equipamento de aquisição de dados

5. RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados experimentais encontrados referentes ao degrau de temperatura e o cálculo da incerteza de medição para o tempo de resposta e a temperatura do termopar tipo J de junta exposta, com o auxílio de ferramentas computacionais como MatLab R2010a e Microsoft Excel 2010 para tratamento e análise dos dados.

Como o experimento foi planejado com duas variáveis, foi realizada uma análise de variância para testá-las, chamado ANOVA - Two way ou ANOVA - fator duplo, utilizando o software Microsoft Excel 2010 (Tabela 5).

Tabela 5- Análise de variância (ANOVA - Two way)

Fonte de variação	Soma de Quadrados	Grau de liberdade	Quadrado Médio	Razão de Variâncias (F)	Valor P	F crítico
Temperatura	0,00953	2	0,00476	31,8465	6,398e-12	3,0681
Pressão	0,00515	2	0,00257	17,2326	2,422e-7	3,0681
Interações entre grupos	0,01547	4	0,00386	25,8613	1,171e-15	2,4435
Dentro dos grupos	0,01885	126	0,00015			
Total	0,04902	134				

Pode-se concluir que há diferença entre os grupos que comparados, pois o valor F calculado pela razão das variâncias entre e dentro dos grupos é maior que o valor tabelado de F (F crítico, que é função dos graus de liberdade entre e dentro dos grupos e da probabilidade admitida no teste).

Os ensaios foram realizados a uma temperatura ambiente controlada para que todos os experimentos fossem influenciados de forma semelhante. A temperatura ambiente média foi de 21,2°C e a Tabela 6 mostra a temperatura média durante a realização de cada ensaio.

Tabela 6 - Temperatura Ambiente Média de Cada Ensaio

Ensaio	Temperatura do Banho (°C)	Pressão no dispositivo de Desmascaramento (bar)	Temperatura Ambiente Média (°C)
1	40	2	22,70
2	50	2	22,40
3	60	2	20,53
4	40	4	20,57
5	50	4	22,13
6	60	4	20,57
7	40	6	20,63
8	50	6	21,30
9	60	6	22,03

5.1. AQUISIÇÃO DE DADOS

Para iniciar a aquisição de dados, os seguintes pontos devem ser verificados:

- ✓ configuração das entradas analógicas;
- ✓ parâmetros da aquisição de dados, como frequência e tempo de aquisição;
- ✓ pressão na válvula do dispositivo de desmascaramento;
- ✓ ligação dos termopares nos canais corretos;
- ✓ temperatura do banho indicada pelo termopar auxiliar.

Como o dispositivo de desmascaramento e a aquisição de dados são acionados manualmente, é necessário um tempo de aquisição que registre antes, durante e após a resposta tipo degrau, conforme ilustrado na Figura 19.

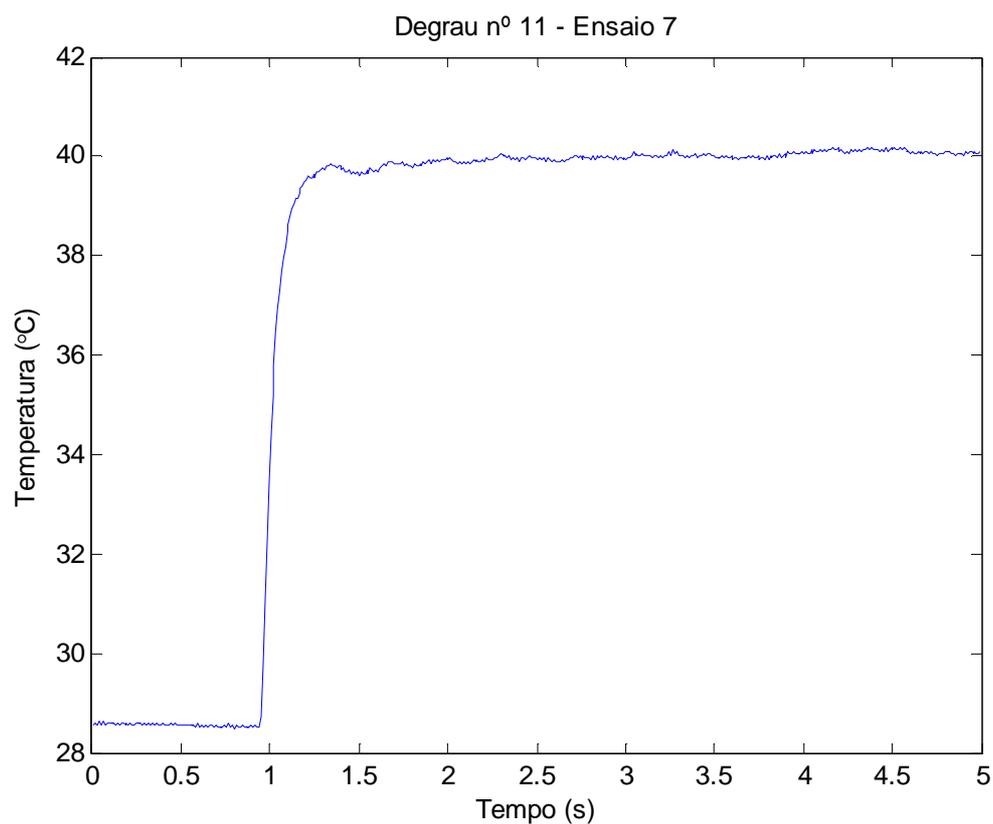


Figura 19 - Aquisição de dados para o degrau nº 11 do Ensaio 7

5.2. ESTABELECIMENTO DO “TEMPO ZERO” DA RESPOSTA DO SENSOR

Para se calcular a incerteza de medição na calibração dinâmica foi necessário fazer uma adaptação do caso estático considerando a resposta dinâmica do sensor com uma série de medições estáticas. Dessa forma, é necessário que todos os degraus de um determinado ensaio tenham uma origem comum e bem definida, o que permite a obtenção do valor de uma grandeza em um mesmo instante de tempo para todos os degraus. Como o desmascaramento e o início do desmascaramento são feitos de forma manual, não há uma origem comum a todas as aquisições de dados.

Para corrigir essa diferença existente entre o início da aquisição de dados e o início da resposta do termopar a uma excitação do tipo degrau, foi necessário aplicar um método de alinhamento temporal das curvas de resposta dinâmica. O método denominado de “Método da Derivada Segunda” aplica-se apenas a sensores considerados de primeira ordem, submetidos a uma função degrau (Almeida, 2003).

O método baseia-se no comportamento da segunda derivada temporal do sinal dinâmico medido. A descontinuidade da derivada primeira apresenta uma variação infinitamente rápida, percebida pela derivada segunda no seu ponto de valor máximo. Graficamente a função $\frac{\partial^2}{\partial t^2}$ apresenta um pico onde seria o início do sinal se não houvesse uma diferença entre o início da aquisição de dados e o início da resposta do sensor. O valor do pico em si não importa neste estudo, mas sim para qual valor de tempo ele ocorre.

Para o valor de tempo onde ocorre o pico da derivada segunda, há uma temperatura que corresponde à temperatura inicial do degrau. Sabendo seu valor e sua posição no tempo, é possível corrigir a escala de tempo alinhando a resposta dinâmica do sensor com o instante zero, conforme ilustra a Figura 20. Para tratar os dados e aplicar o método acima citado, foi desenvolvido um código utilizando o software MatLab.

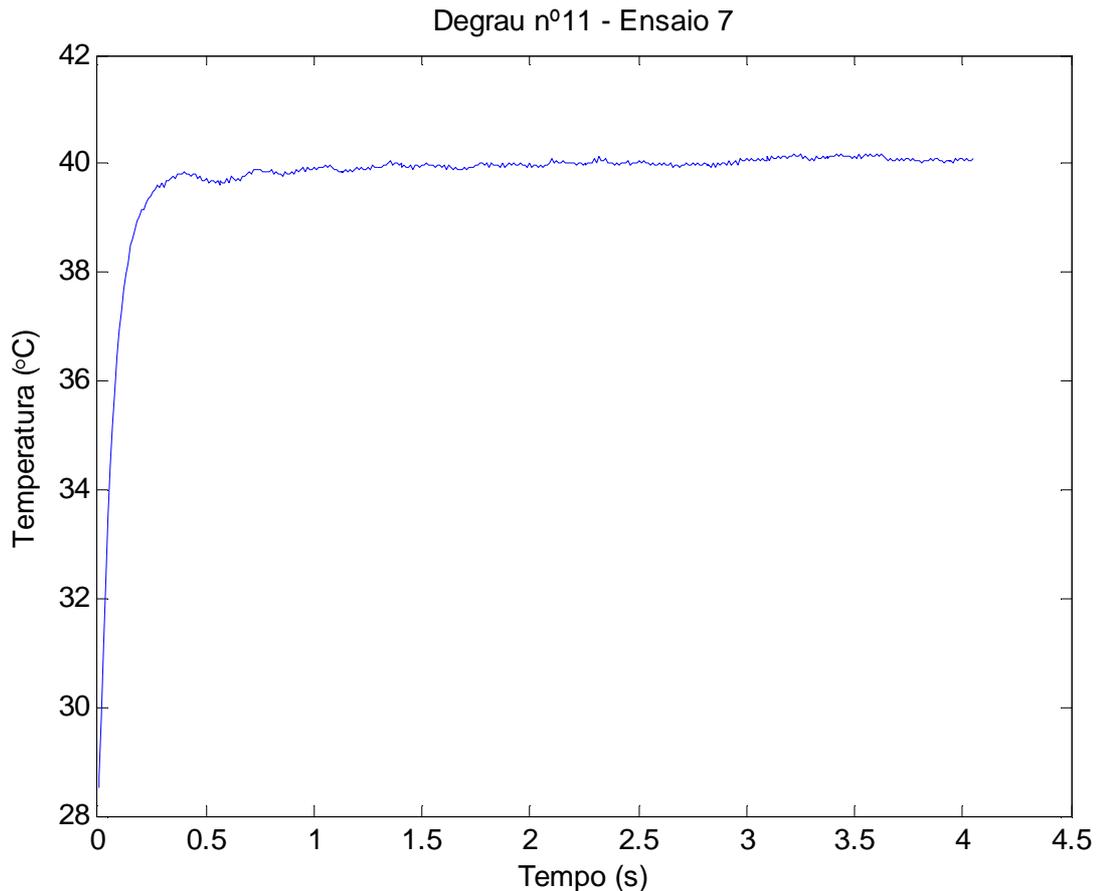


Figura 20 - Degrau nº 11 do Ensaio 7 com escala de tempo corrigida para o tempo zero

Aplicando o método a todas repetições de um mesmo ensaio, foi possível garantir que todos estivessem um ponto zero em comum. Feito isso, foi necessário garantir que todos tivessem o mesmo número de pontos para posteriormente aplicar o método proposto no GUM para calcular a incerteza de medição associada a cada ponto da resposta do sensor, considerando cada ponto como uma medição estática.

Para considerar essa adaptação válida, admite-se que:

- ✓ O coeficiente global de transferência de calor U relaciona a resistência térmica interna (intrínseca) do sensor que está associada diretamente ao coeficiente de condução térmica às características construtivas do sensor, e a resistência térmica externa (extrínseca) do sensor ao coeficiente de convecção natural do meio no qual o sensor está inserido, conforme mostrado nas Eq. (2.12), Eq. (2.17) e Eq. (2.22). A resistência extrínseca é conhecida como resistência de acoplamento. Os ensaios foram realizados a uma velocidade que permitisse o desacoplamento do sensor com o meio, de forma que a resposta do sensor não fosse influenciada pela velocidade de rotação da cuba.

- ✓ Para pequenos diferenciais de temperatura, as propriedades de um sensor de temperatura (condutividade térmica) não variam de forma considerável. A parcela intrínseca da resistência térmica pode ser considerada constante.

Dessa forma, os degraus ao final de cada ensaio tomam a forma ilustrada na Figura 21.

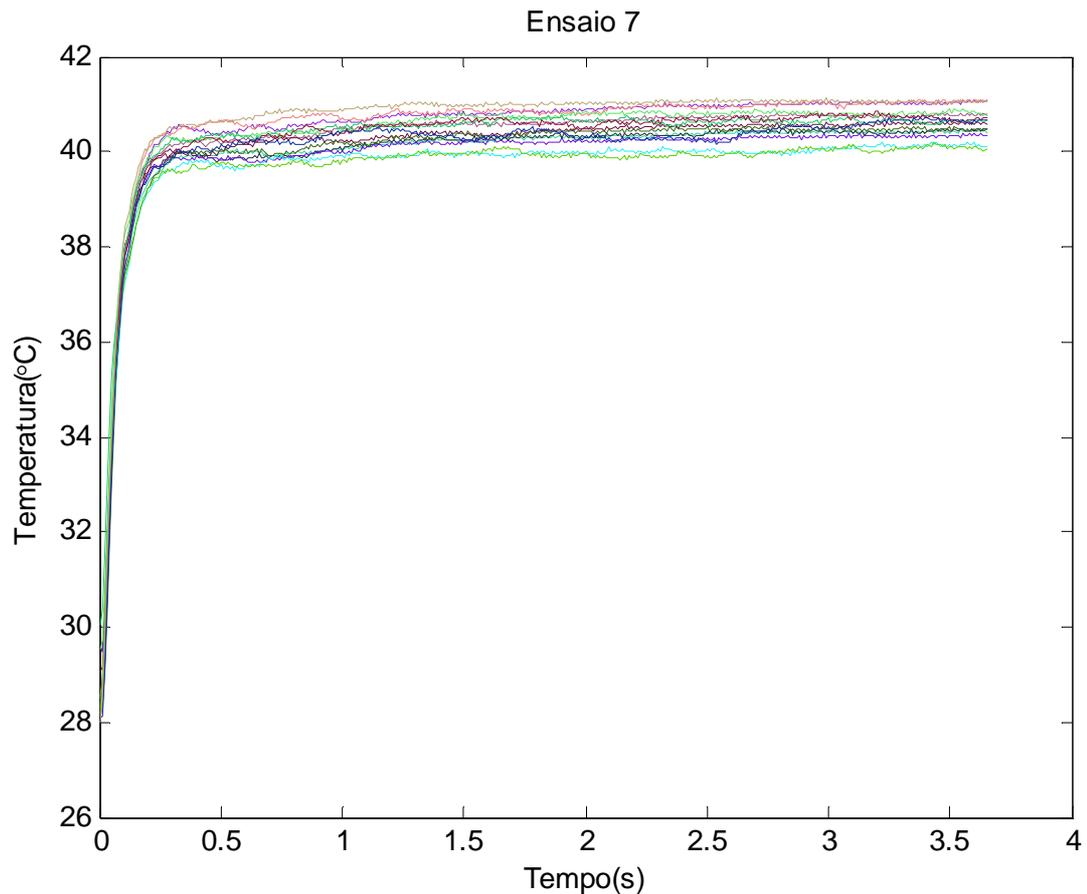


Figura 21 - Respostas das quinze repetições do Ensaio 7

Com as 15 curvas com um mesmo número de pontos é possível obter uma curva resultante esperada, onde o primeiro elemento é a média de 15 valores, sendo esses valores o primeiro elemento de cada curva. O segundo elemento da curva resultante média é, também, a média entre 15 valores, sendo esses valores o segundo elemento de cada curva, e assim por diante, até compor o último elemento da curva que representa a resposta dinâmica média do sensor para determinadas condições de ensaio, conforme mostrado na Figura 22.

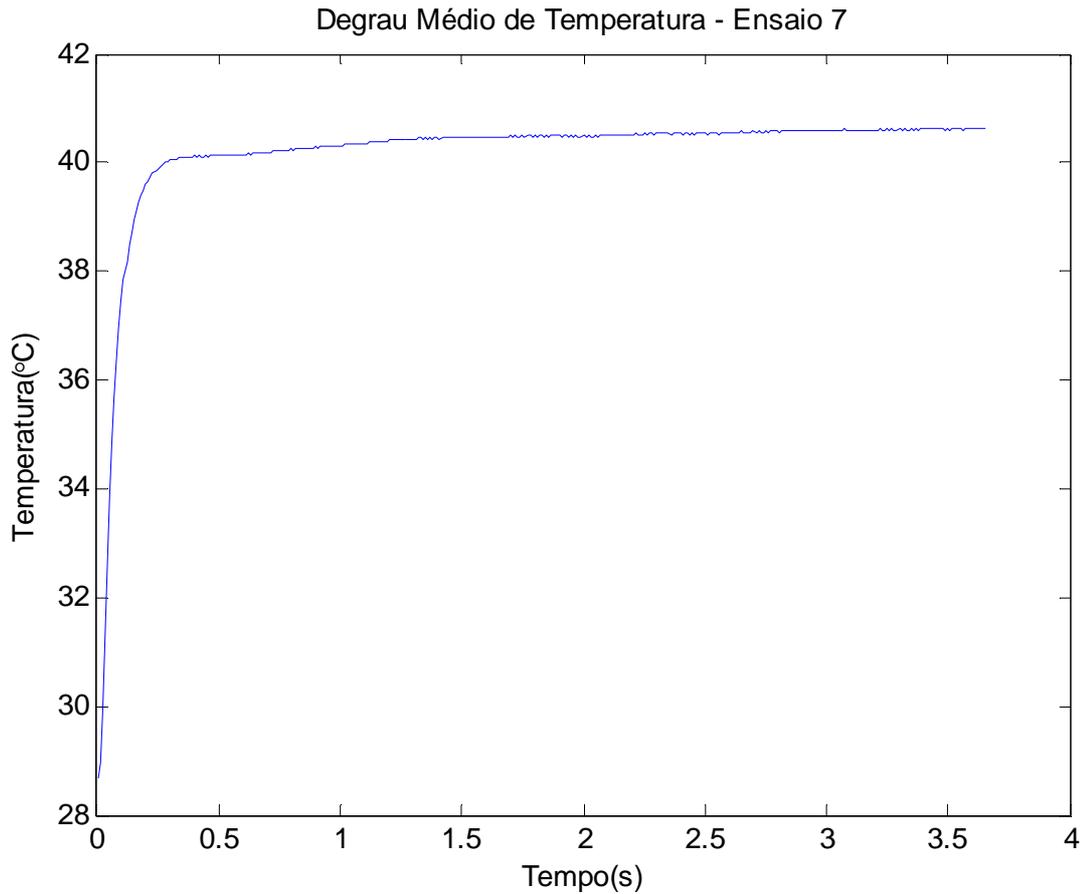


Figura 22 - Degrau médio de temperatura do Ensaio 7

Com a resposta dinâmica esperada do sensor e os degraus corrigidos conforme mencionado acima, é possível determinar a incerteza de medição na calibração dinâmica de temperatura para o tempo de resposta (τ) do sensor e para a temperatura indicada durante a resposta a uma excitação do tipo degrau.

5.3. INCERTEZA DE MEDIÇÃO PARA TEMPERATURA

Para o cálculo da incerteza de medição associado à temperatura indicada (T_L) indicada pelo sensor temos como contribuição da incerteza de medição as grandezas indicadas no modelo proposto na seção 4.6.1:

$$T_T = T_L + \delta T_U + \delta T_R + \delta T_{CE} + \delta T_{EXT} + \delta T_{JF} + \delta T_I$$

onde,

T_T : temperatura do termopar

T_L : temperatura lida no analisador de sinais

δT_U : Correção devido à não-uniformidade da temperatura do líquido na seção de teste da cuba rotativa

δT_R : Correção devido ao processamento e apresentação do resultado

δT_{CE} : Correção devido à calibração estática do termopar utilizado

δT_{EXT} : Correção devido à utilização de cabos de extensão

δT_{JP} : Correção devido à compensação de junta fria de referência

δT_I : Correção devido à linearização

✓ Temperatura lida no analisador de sinais (T_L)

Apenas o valor esperado T_L varia para cada ensaio, avaliado através de uma série de medições repetidas, utilizando métodos estatísticos, o que caracteriza uma incerteza do Tipo A e uma distribuição normal de probabilidade. A estimativa de T_L é a média do valor de temperatura correspondente a um tempo t comum a todos os degraus e sua incerteza padronizada $u(x_i)$ é dada por:

$$u(T_L) = \frac{s(T_L)}{\sqrt{n}} \quad (5.1)$$

onde,

$u(T_L)$: incerteza padronizada associada à grandeza T_L

$s(T_L)$: desvio padrão experimental dos tempos de resposta de um determinado ensaio

n : número de repetições

Para cada ponto de temperatura no tempo há um desvio padrão associado, conforme mostrado na Figura 23, que irá contribuir com a incerteza padronizada relacionada a T_L , descrita pela Eq. (5.1).

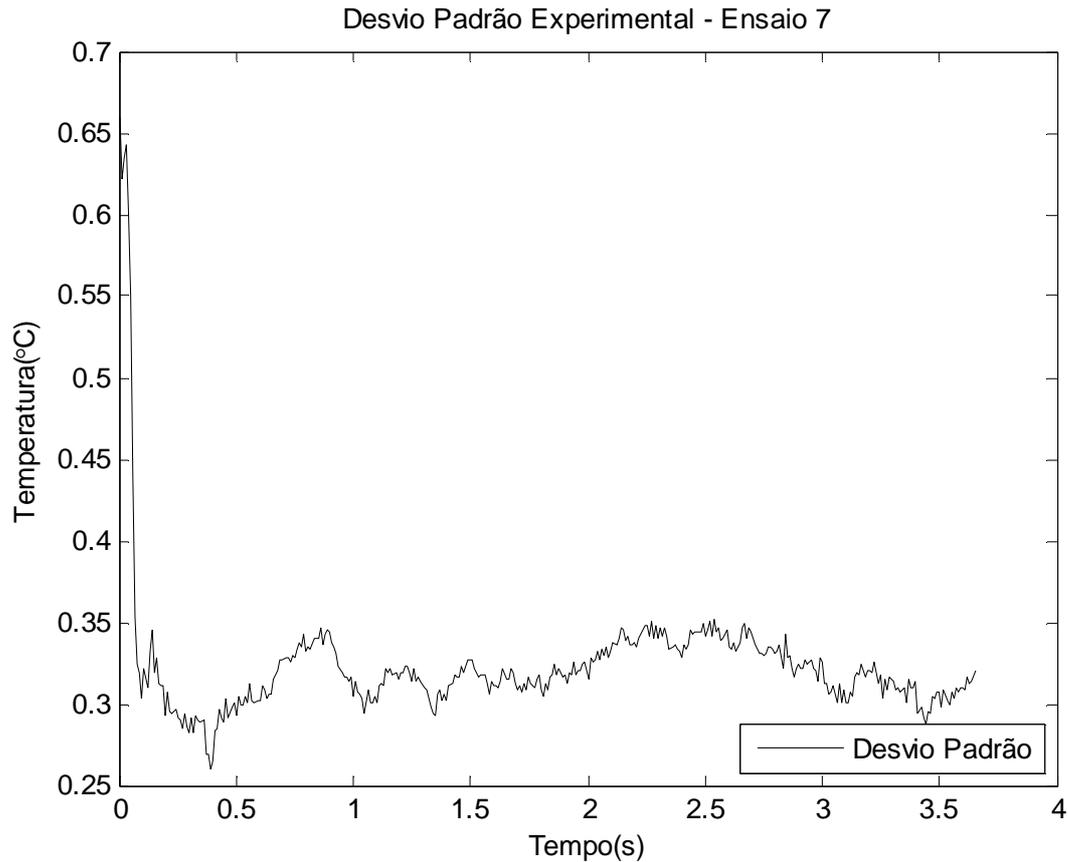


Figura 23 - Desvio padrão experimental para cada instante de tempo relativo ao Ensaio 7

✓ **Correção devido à não-uniformidade da temperatura do líquido na seção de teste da cuba rotativa (δT_U)**

A correção devido à não-uniformidade da temperatura do líquido na seção de teste da cuba rotativa é oriunda da análise do perfil de variação da temperatura do líquido na seção de teste. O seu valor caracteriza uma incerteza do Tipo B, com uma distribuição retangular de probabilidade e é retirado da literatura (Michael, 2003, Henrique, 2001):

$$\delta T_U = 0,000 \pm 0,035 \text{ } ^\circ\text{C}$$

e sua incerteza padronizada $u(x_i)$ é dada por:

$$u(\delta T_U) = \frac{\delta T_U}{\sqrt{3}} \quad (5.2)$$

✓ **Correção devido ao processamento e apresentação do resultado (δT_R)**

A correção devido à resolução associada ao processamento e apresentação dos resultados depende do número de dígitos ou número de bits, que indicam a mínima representação possível para o valor da grandeza medida. O seu valor caracteriza uma incerteza do Tipo B, com uma distribuição retangular de probabilidade:

$$\delta T_R = 0,0000 \pm 0,0001 \text{ } ^\circ\text{C}$$

e sua incerteza padronizada $u(x_i)$ é calculada de forma análoga à Eq. 5.2.

✓ **Correção devido à calibração estática do termopar utilizado (δT_{CE})**

O valor da correção devido à calibração estática do termopar é retirado de relatórios de calibração. A calibração é realizada pelo técnico do Laboratório de Metrologia Dinâmica, utilizando uma termorresistência do Tipo PT 100 como referência. O certificado de calibração do Pt-100 encontra-se no “Anexo II” e permite rastrear as grandezas de medição do termopar que utilizamos neste trabalho, garantindo maior credibilidade para os resultados aqui encontrados. O seu valor caracteriza uma incerteza do Tipo B, com uma distribuição retangular de probabilidade:

$$\delta T_{CE} = 0,00 \pm 0,28 \text{ } ^\circ\text{C}$$

e sua incerteza padronizada $u(x_i)$ é calculada de forma análoga à Eq. 5.2.

✓ **Correção devido à utilização de cabos de extensão (δT_{EXT})**

A incerteza devido à utilização de cabos de extensão afeta a sensibilidade do termopar e pode induzir erros grandes. Com o uso de cabos de cobres comuns interligando o termopar ao instrumento, sujeito a temperaturas diferentes entre suas extremidades, surgirão erros na indicação final de temperatura, pois o cabo de cobre não compensa o diferencial de temperatura, levando a um erro. Este erro pode ser maior ou menor, dependendo da gradiente de temperatura existente. Seu valor varia de acordo com o material e podem ser retirados de catálogos de fabricantes específicos para cada tipo de termopar (ECIL, 2012), caracterizando uma incerteza do Tipo B, com uma distribuição retangular de probabilidade:

$$\delta T_{EXT} = 0,0 \pm 0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

e sua incerteza padronizada $u(x_i)$ é calculada de forma análoga à Eq. 5.2.

✓ **Correção devido à compensação de junta fria de referência (δT_{JF})**

A junta de referência (junta fria) consiste em um sistema que corrige a tensão de saída do termopar para expressar a temperatura absoluta medida pelo sensor. Os ensaios deste trabalho foram realizados sem compensação de junta fria, não há um sensor adicional. A compensação é realizada via hardware pelo condicionador de sinais. Foi atribuído um valor retirado da literatura que representa a ordem de grandeza normalmente obtida quando utilizado compensação eletrônica (Barp, 2001). O seu valor caracteriza uma incerteza do Tipo B, com uma distribuição retangular de probabilidade:

$$\delta T_{JF} = 0,00 \pm 0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

e sua incerteza padronizada $u(x_i)$ é calculada de forma análoga à Eq. 5.2.

✓ **Correção devido à linearização (δT_I)**

Os polinômios de conversão entre tensão e temperatura utilizados na linearização feita pelo analisador de sinais geralmente apresentam um erro residual determinado pela máxima diferença entre os valores tabelados e os valores obtidos pelo polinômio. Esse valor depende do número de pontos empregados, da faixa de medição desejada, do grau do polinômio utilizado e foi retirado da literatura (Barp, 2001).

$$\delta T_I = 0,00 \pm 0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

e sua incerteza padronizada $u(x_i)$ é calculada de forma análoga à Eq. 5.2.

A Tabela 7, mostra o cálculo da incerteza para as condições de temperatura e pressão no dispositivo de desmascaramento do Ensaio 7 para a amostra n°245 ($t = 2,42$ s), considerando o nível de confiança de 95,45 %, k igual a 2.

Tabela 7 - Incerteza de medição para temperatura para a amostra n° 245 ($t = 2,42$ s) do Ensaio 7

Grandeza X_i	Estimativa x_i	Incerteza Padronizada $u(x_i)$	Distribuição de Probabilidade	Coefficiente de Sensibilidade	Incerteza $u_i(y)$	Grau de Liberdade	Unidade de Engenharia
T_L	40,5066	$0,3144/\sqrt{15}$	Normal	1	0,08118	14	[°C]
δT_U	0	$0,035/\sqrt{3}$	Retangular	1	0,02020	∞	[°C]
δT_R	0	$0,0001/\sqrt{3}$	Retangular	1	5,77E-5	∞	[°C]
δT_{CE}	0	$0,28/\sqrt{3}$	Retangular	1	0,16165	∞	[°C]
δT_{EXT}	0	$0,1/\sqrt{3}$	Retangular	1	0,05773	∞	[°C]
δT_{JF}	0	$0,1/\sqrt{3}$	Retangular	1	0,05773	∞	[°C]
δT_I	0	$0,1/\sqrt{3}$	Retangular	1	0,05773	∞	[°C]
				$u_c(y)$	0,2077		[°C]
				U	0,4154		[°C]
				p	95,45%	k	2

O cálculo da incerteza mostrado na Tabela 7 é aplicado para cada instante de tempo da aquisição do sinal. As incertezas expandidas calculadas compõem um limite inferior e um limite superior para cada ponto do degrau. A Figura 24 é o resultado final do cálculo da incerteza de medição para as condições do Ensaio 7, considerando o nível de confiança de 95,45 %, k igual a 2.

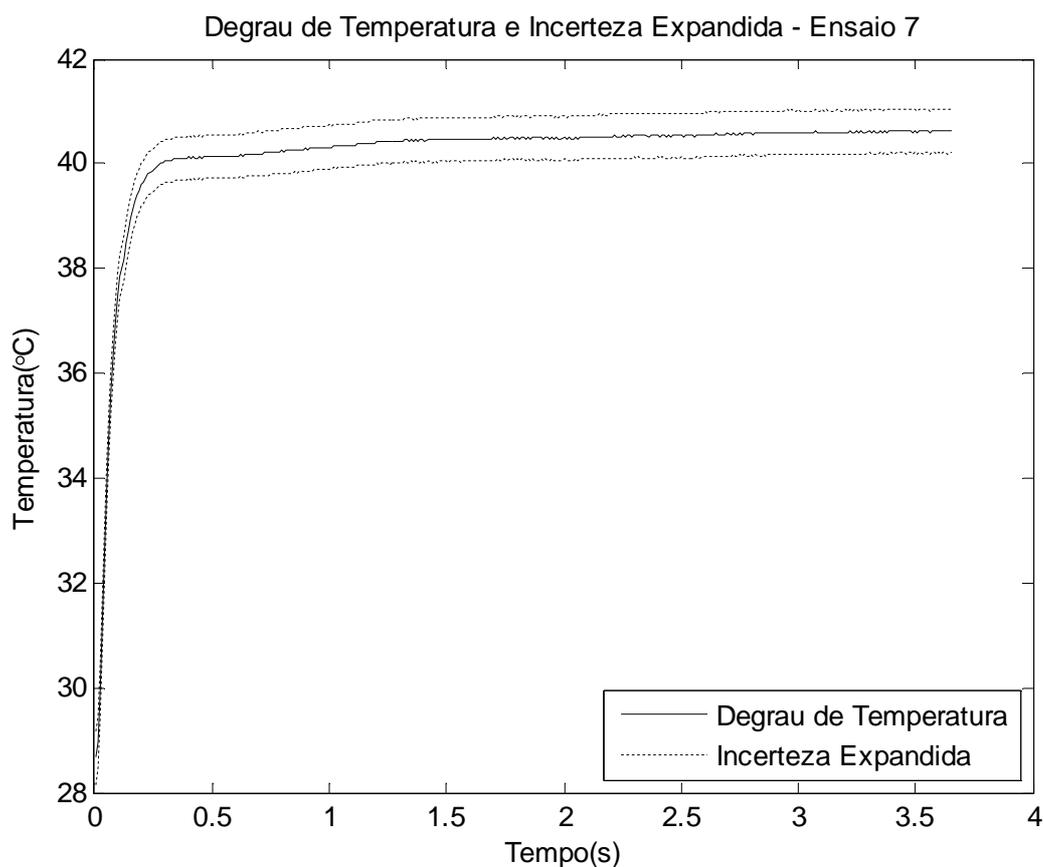


Figura 24 - Degrau de Temperatura e Incerteza Expandida para o Ensaio 7

A Figura 24 oculta algumas informações quanto a incerteza no início do degrau, induzindo à conclusão equivocada de que a incerteza é menor no início do degrau e maior à medida que o sinal estabiliza. O que ocorre é justamente o contrário e pode ser verificado nas Figura 25 e Figura 26.

A Figura 25 mostra que a curva do degrau de temperatura e da incerteza expandida para o ensaio 7 entre o tempo zero e 0,25 s não coincidem.

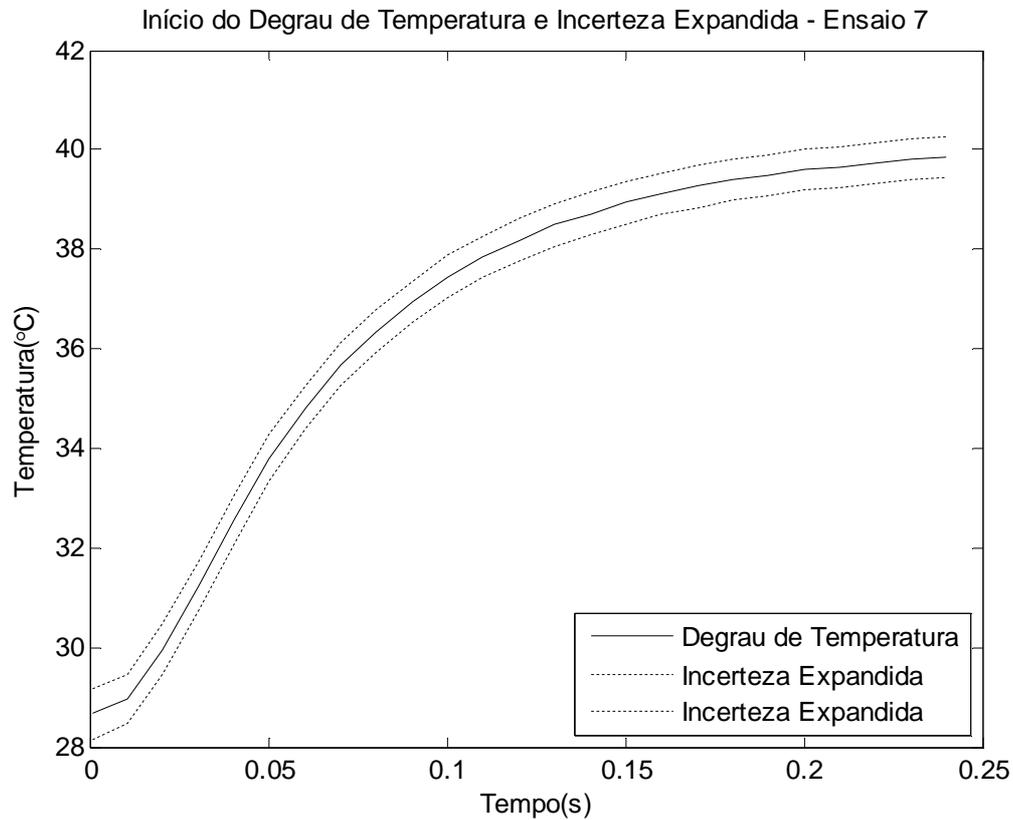


Figura 25 - Degrau de Temperatura e Incerteza Expandida entre o tempo zero e 0,25s.

A Figura 26 mostra a incerteza expandida para cada instante de tempo do Ensaio 7 e é possível perceber que os maiores valores da incerteza expandida ocorrem no início do degrau, devido à presença de erros aleatórios que contribuam de forma considerável para que a incerteza padronizada relacionada à dispersão das medidas fosse a principal contribuição para a incerteza padronizada combinada para a temperatura.

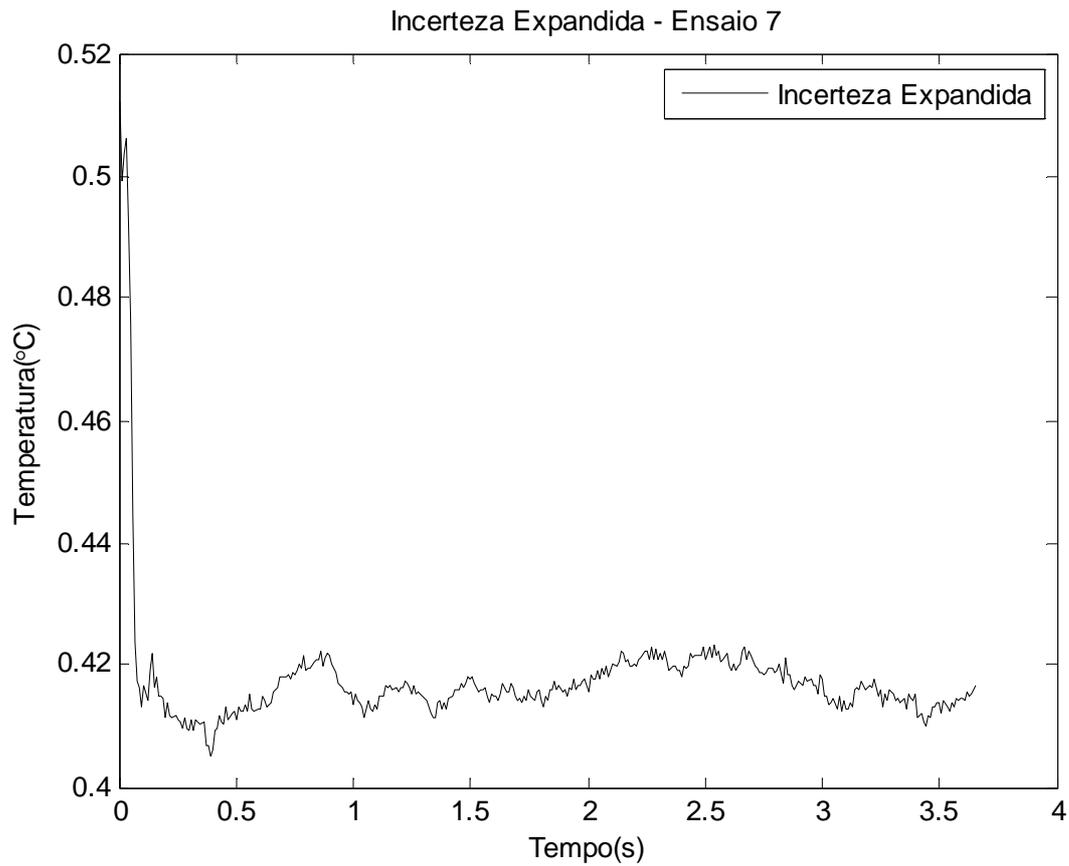


Figura 26 - Incerteza Expandida para o Ensaio 7

O degrau de temperatura e incerteza expandida dos demais ensaios estão apresentados no “Apêndice A”.

5.4. INCERTEZA DE MEDIÇÃO PARA O TEMPO DE RESPOSTA

Para o cálculo da incerteza de medição associado ao tempo de resposta (τ) do sensor temos a contribuição da grandeza referente ao valor esperado do tempo de resposta (t) e a correção devido à resolução limitada do equipamento de aquisição de sinais para o tempo (δRes).

Apenas o valor esperado t varia para cada ensaio, avaliado através de uma série de medições repetidas, utilizando métodos estatísticos, o que caracteriza uma incerteza do Tipo A e uma distribuição normal de probabilidade.

Para se estimar o valor de t que é a média do tempo de resposta das 15 repetições, é necessário calcular o tempo de resposta para cada repetição de um determinado ensaio. Conforme explicado na seção 2.5, o sinal esperado para uma excitação do tipo degrau é modelado a partir da Eq. 2.22 e o tempo de resposta do sensor é o tempo que o sinal de saída leva para atingir aproximadamente 63,2% do degrau total de temperatura.

Para se obter o valor esperado para o tempo de resposta de uma repetição, foram seguidos os seguintes passos:

- ✓ estabelecer qual a amplitude do degrau de temperatura ensaiado, obtida pela diferença entre a temperatura final e a temperatura inicial do degrau. A temperatura final do degrau foi considerada como a média dos valores para um intervalo de tempo acima da tempo de estabilização que é quando o sinal da resposta do sensor atinge 95% do degrau gerado, enquanto que a temperatura inicial é o valor correspondente de temperatura para o tempo zero estabelecido na seção 5.2;
- ✓ obter 63,2% da amplitude calculada e somar ao valor correspondente de temperatura para o tempo zero;
- ✓ para o valor de temperatura resultante do passo anterior, há um tempo equivalente que será o tempo de resposta do sensor.

Entretanto, como a incerteza de medição associada a cada ponto da resposta do sensor foi calculada considerando cada ponto como uma medição estática na seção 5.3, após realizar os passos listados acima, é necessário analisar o conjunto de dados e verificar qual o valor de temperatura coletado que mais se aproxima do valor de temperatura calculado para 63,2% do degrau gerado. Esse

valor está associado a um tempo que será o tempo de resposta experimental do sensor e será utilizado para o cálculo da estimativa t do tempo de resposta.

Sendo a estimativa de t , a média dos tempos de resposta de um determinado ensaio, sua incerteza padronizada $u(x_i)$ é dada por:

$$u(t) = \frac{s(t)}{\sqrt{n}} \quad (5.3)$$

onde,

$u(t)$: incerteza padronizada associada à grandeza t

$s(t)$: desvio padrão experimental dos tempos de resposta de um determinado ensaio

n : número de repetições

O valor de δRes caracteriza uma incerteza do Tipo B, com uma distribuição retangular de probabilidade. O valor de δRes é:

$$\delta Res = 0,00 \pm 0,01 \text{ s}$$

e sua incerteza padronizada $u(x_i)$ é dada por:

$$u(\delta Res) = \frac{\delta Res}{\sqrt{3}} \quad (5.4)$$

Desta forma, é possível calcular a estimativa das grandezas de entrada para o cálculo da incerteza de medição e para cada uma dessas grandezas há uma incerteza padronizada $u(x_i)$ que serão combinadas para determinar a incerteza padronizada combinada $u_c(y)$ da estimativa de saída.

A Tabela 8 mostra o cálculo da incerteza para as condições de temperatura e pressão no dispositivo de desmascaramento do Ensaio 7, considerando o nível de confiança de 95,45 %, k igual a 2.

Tabela 8 - Incerteza de medição para o tempo de resposta do Ensaio 7

Grandeza X_i	Estimativa x_i	Incerteza Padronizada $u(x_i)$	Distribuição de Probabilidade	Coefficiente de Sensibilidade c_i	Contribuição de Incerteza $u_i(y)$	Grau de Liberdade Efetivo
t	0,071	$0,0034/\sqrt{15}$	Normal	1	0,000878	14
δRes	0	$0,01/\sqrt{3}$	Retangular	1	0,005774	∞
			p = 95%	$u_c(y)$	0,00584	
			k = 2	U	0,01168	

A incerteza expandida para o tempo de resposta (τ) do Ensaio 7 pode ser finalmente expressa por:

$$\tau = 0,07 \pm 0,01 \text{ s}$$

O mesmo procedimento foi realizado para os demais ensaios e os resultados podem ser visualizados no “Apêndice B”, juntamente com o tempo de resposta de cada degrau para cada condição de ensaio.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Foi apresentado os conceitos teóricos para o procedimento de avaliação da incerteza de medição, com contribuições específicas para calibração de sensores de temperatura de primeira ordem e foi utilizada uma bancada denominada “Cuba Rotativa” com um dispositivo de desmascaramento que permite expor o sensor a uma excitação do tipo degrau para a realização dos experimentos.

Foi desenvolvido um modelo matemático que relaciona as principais fontes de incerteza associadas ao sistema de medição utilizado, por meio de uma adaptação do procedimento do caso estático proposto no GUM à calibração dinâmica.

O Guia possui uma redação de caráter científico o que dificulta a sua aplicação a atividades industriais. Entretanto, a necessidade de avaliação da incerteza em sistemas automatizados cresce significativamente e, cada vez mais, os processos exigem níveis menores de incerteza. É necessária uma análise detalhada da cadeia de medição para adequar o modelo matemático às fontes de incerteza de uma forma consistente.

A implantação do modelo matemático e tratamento dos dados foram realizados auxiliados pelos programas MatLab R2010a e Microsoft Excel. Os resultados encontrados são garantidos apenas para as condições de temperaturas ensaiadas e para o equipamento utilizado para a aquisição do sinal.

A bancada de testes limitou a calibração do termopar utilizado em toda a sua faixa de operação, que vai de 0°C a 760°C, assim como também limita a calibração dos outros sensores que podem ser utilizados na bancada. Não é recomendado ultrapassar uma temperatura de 70°C, pois o material que compõe a cuba (acrílico) não suporta temperaturas elevadas. Caso haja a necessidade de se utilizar o termopar acima de 60°C, uma nova calibração deve ser realizada, adequada à utilização do sensor. Para isso, existem outras técnicas e outros meios de calibração.

O estudo da determinação da incerteza de medição para a temperatura e o tempo de resposta foi aplicado a um termopar tipo J de junta exposta que responde como um sensor de primeira ordem, entretanto o procedimento desenvolvido pode ser adaptado para qualquer outro transdutor. Verificou-se a presença de erros aleatórios que contribuiriam de forma considerável para que a incerteza padronizada relacionada à dispersão das medidas fosse a principal contribuição para a incerteza padronizada combinada para a temperatura. Os maiores valores da incerteza expandida ocorrem no início do degrau. Como o acionamento do dispositivo de desmascaramento e o início da aquisição de

dados foram realizados de forma manual, o “método da segunda derivada” aplicado se mostrou satisfatório para determinar o início do degrau.

Como sugestões para trabalhos futuros, foram identificadas as seguintes oportunidades:

- ✓ estudar o escoamento em volta do sensor, quando o mesmo for exposto ao líquido contido na cuba e como seu comportamento influencia na determinação da incerteza de medição;
- ✓ ampliar a avaliação da incerteza de medição verificando a viabilidade de se utilizar simulação numérica das variáveis aleatórias pelo método de simulação de Monte Carlo (ISO GUM Supplement 2008);
- ✓ aplicar o método de simulação de Monte Carlo para o estudo de modelos não lineares.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, M. E. K., “Calibração Dinâmica de Sensores de Temperatura – Caracterização Metrológica da Cuba Rotativa”, Projeto de Graduação, Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília, Brasil, 2003.

ANDRADE, F. E. M., “Calibração Dinâmica de Sensores de Temperatura”, Projeto de Graduação, Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília, Brasil, 1993.

ABNT, INMETRO. “Guia para a Expressão da Incerteza de Medição- GUM”, 3ª edição brasileira em língua portuguesa, Rio de Janeiro, 2003.

BENTLEY, J. P., “Principles of Measurement Systems”, 2ª edição, Longman Scientific & Technical, Essex, Inglaterra, 1988.

BARP, ALEXANDRE M., “Metodologia de avaliação e de gerenciamento da incerteza de sistemas de medição de temperatura”, Programa de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.

DOEBELIN, ERNEST O., “Measurement Systems: application and design” – 5ª edição, McGraw-Hill, 2004.

“Expressão da Incerteza e Medição na Calibração”, Versão Brasileira do Documento de Referência EA-4/02, EA (European Cooperation for Accreditation), 1999.

FIDÉLIS, G. C. “Relação entre Incerteza e Erro de Medição”, Centro de Educação, Consultoria e Treinamento (CECT) de Florianópolis. Disponível em <http://www.cect.com.br/artigos.html>. Acessado em junho, 2012.

HENRIQUE, R. R. R., “Calibração Dinâmica de Sensores de Temperatura em Meio Líquido”, Projeto de Graduação, Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília, Brasil, 2001.

INMETRO. “Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia – VIM”. 3. ed. Rio de Janeiro, 2003. 75p.

NETO, A. C., “Calibração Dinâmica de Sensores de Temperatura – Cuba Rotativa”, Projeto de Graduação, Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília, Brasil, 1995.

RAO, S. S., “Vibrações Mecânicas”, São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

SANTOS, A. M. N., “Efeitos Dinâmicos na Medição: Problemas em Metrologia Dinâmica e Medição por Coordenadas”, Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas, Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília, Brasil, 2012.

VIANNA, J. N. S., ALMEIDA, M. E. K., DINIZ, A.C.G.C., OLIVEIRA, A.B.S., “Incerteza de medição na calibração dinâmica de sensores de temperatura”, Anais do III Congresso Brasileiro de Metrologia, Sociedade Brasileira de Metrologia – SBM, Recife, 2003.

WALTER, LINK, “Metrologia Mecânica – Expressão da Incerteza de medição”, 2ª edição revisada, Mitutoyo SulAmericana Ltda., outubro, 1999.

MANUAL DO USUÁRIO DO SOFTWARE AQDADOS 7.02, revisão 9, dezembro de 2008.

ECIL – EMPRESA COMERCIAL IMPORTADORA LTDA. Disponível em <http://www.ecil.com.br/temperatura-industrial/pirometria/termopares/>. Acessado em junho, 2012.

LYNX TECNOLOGIA ELETRÔNICA LTDA. Disponível em http://www.lynxtec.com.br/download/brochuras/aquisição_dados.pdf. Acessado em junho, 2012.

TERMOSHAW INDÚSTRIA E COMÉRCIO DE TERMOPARES. Disponível em <http://www.termoshaw.com.br/termopares.html>. Acessado em junho, 2012.

APÊNDICE A

FIGURA 27 - DEGRAU DE TEMPERATURA E INCERTEZA EXPANDIDA PARA O ENSAIO 1.....	67
FIGURA 28 - INCERTEZA EXPANDIDA PARA O ENSAIO 1	67
FIGURA 29 - DEGRAU DE TEMPERATURA E INCERTEZA EXPANDIDA PARA O ENSAIO 2.....	68
FIGURA 30 - INCERTEZA EXPANDIDA PARA O ENSAIO 2	68
FIGURA 31 - DEGRAU DE TEMPERATURA E INCERTEZA EXPANDIDA PARA O ENSAIO 3.....	69
FIGURA 32 - INCERTEZA EXPANDIDA PARA O ENSAIO 3	69
FIGURA 33 - DEGRAU DE TEMPERATURA E INCERTEZA EXPANDIDA PARA O ENSAIO 4.....	70
FIGURA 34 - INCERTEZA EXPANDIDA PARA O ENSAIO 4	70
FIGURA 35 - DEGRAU DE TEMPERATURA E INCERTEZA EXPANDIDA PARA O ENSAIO 5.....	71
FIGURA 36 - INCERTEZA EXPANDIDA PARA O ENSAIO 5	71
FIGURA 37 - DEGRAU DE TEMPERATURA E INCERTEZA EXPANDIDA PARA O ENSAIO 6.....	72
FIGURA 38 - INCERTEZA EXPANDIDA PARA O ENSAIO 6	72
FIGURA 39 - DEGRAU DE TEMPERATURA E INCERTEZA EXPANDIDA PARA O ENSAIO 8.....	73
FIGURA 40 - INCERTEZA EXPANDIDA PARA O ENSAIO 8	73
FIGURA 41 - DEGRAU DE TEMPERATURA E INCERTEZA EXPANDIDA PARA O ENSAIO 9.....	74
FIGURA 42 - INCERTEZA EXPANDIDA PARA O ENSAIO 9	74

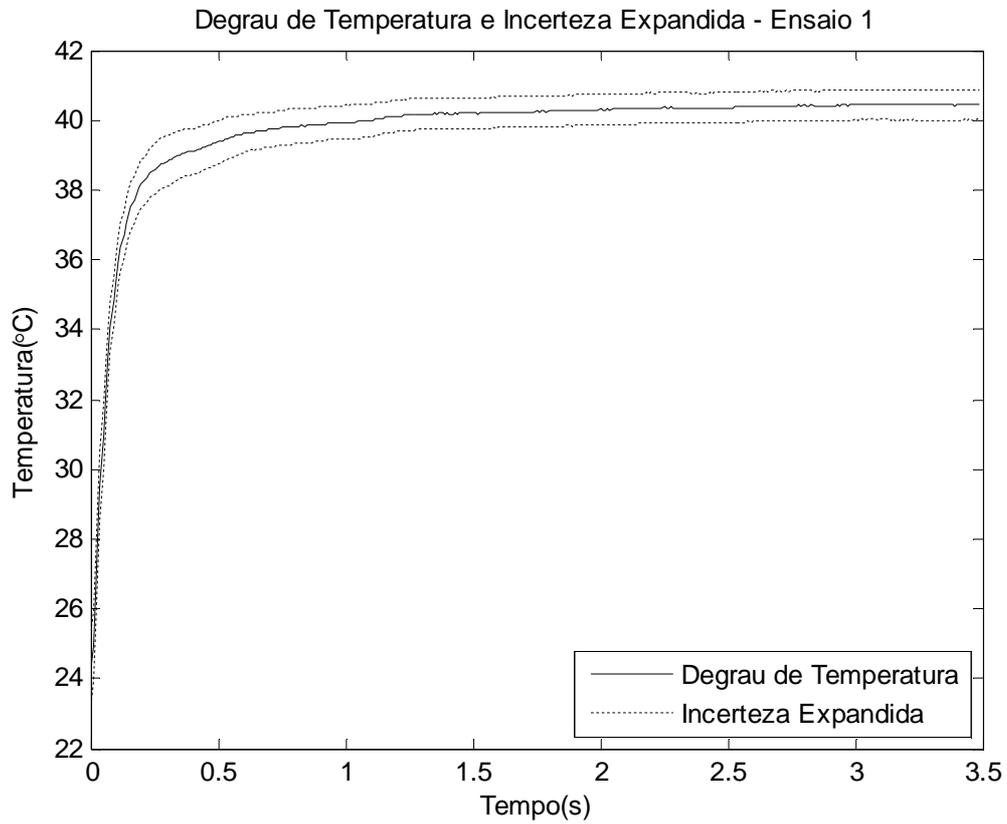


Figura 27 - Degrau de Temperatura e Incerteza Expandida para o Ensaio 1

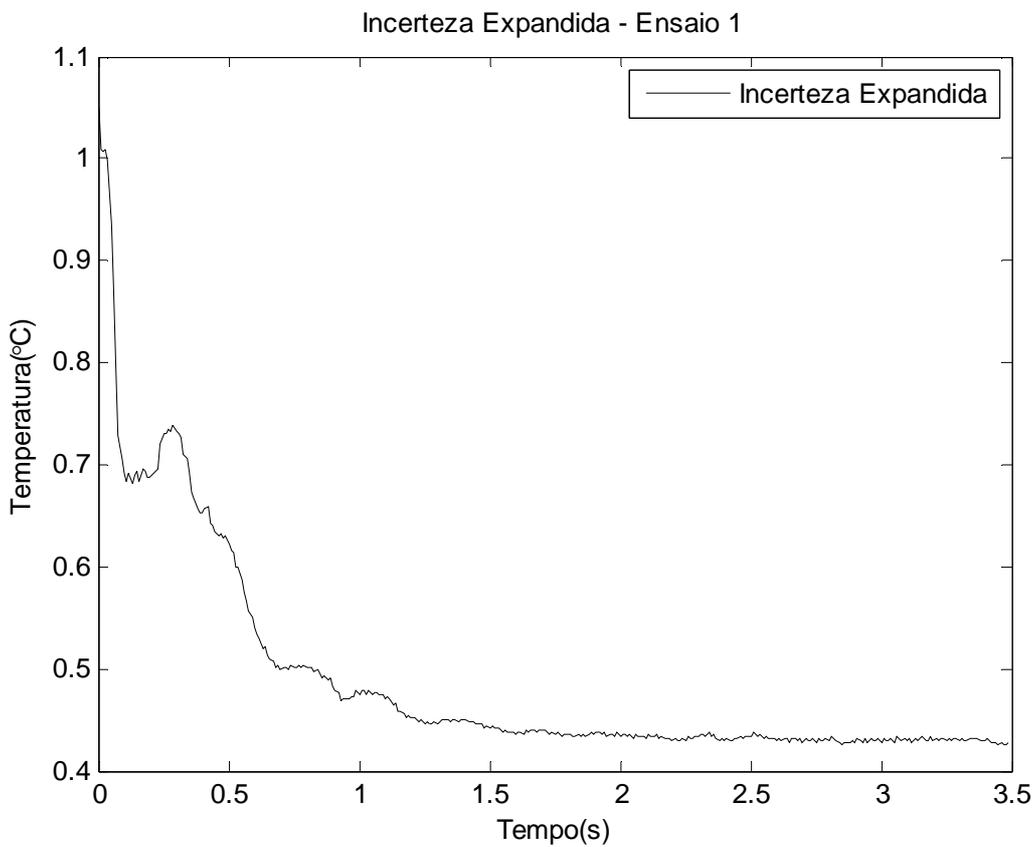


Figura 28 - Incerteza Expandida para o Ensaio 1

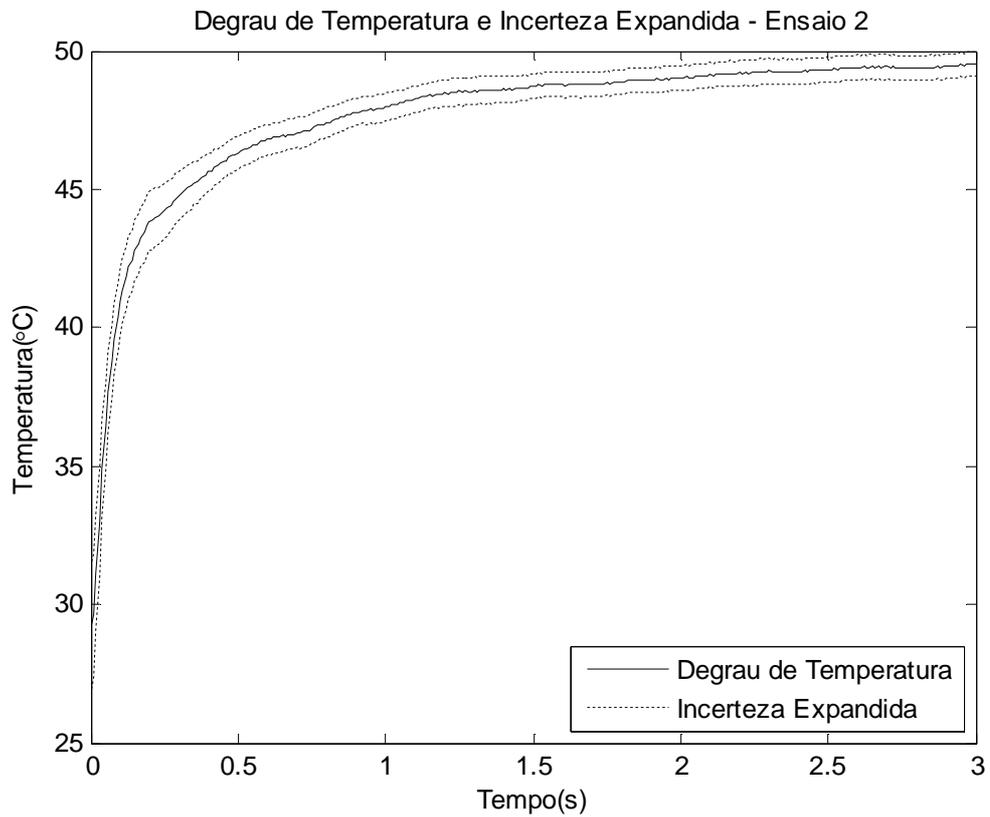


Figura 29 - Degrau de Temperatura e Incerteza Expandida para o Ensaio 2

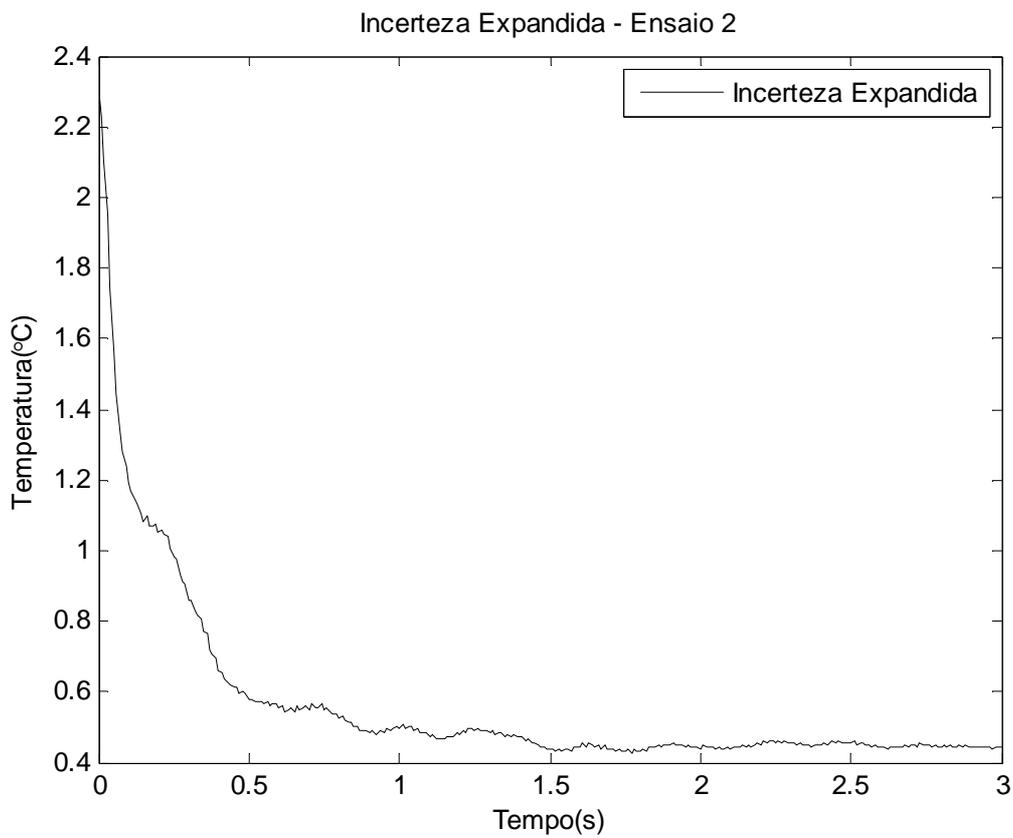


Figura 30 - Incerteza Expandida para o Ensaio 2

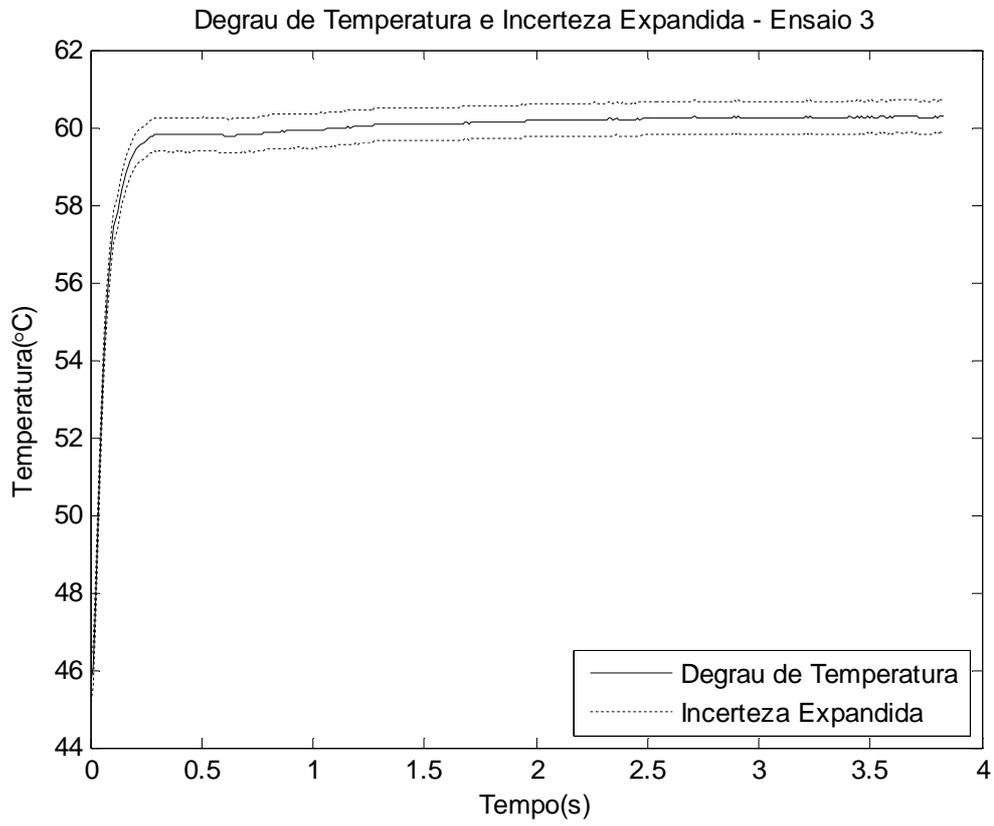


Figura 31 - Degrau de Temperatura e Incerteza Expandida para o Ensaio 3

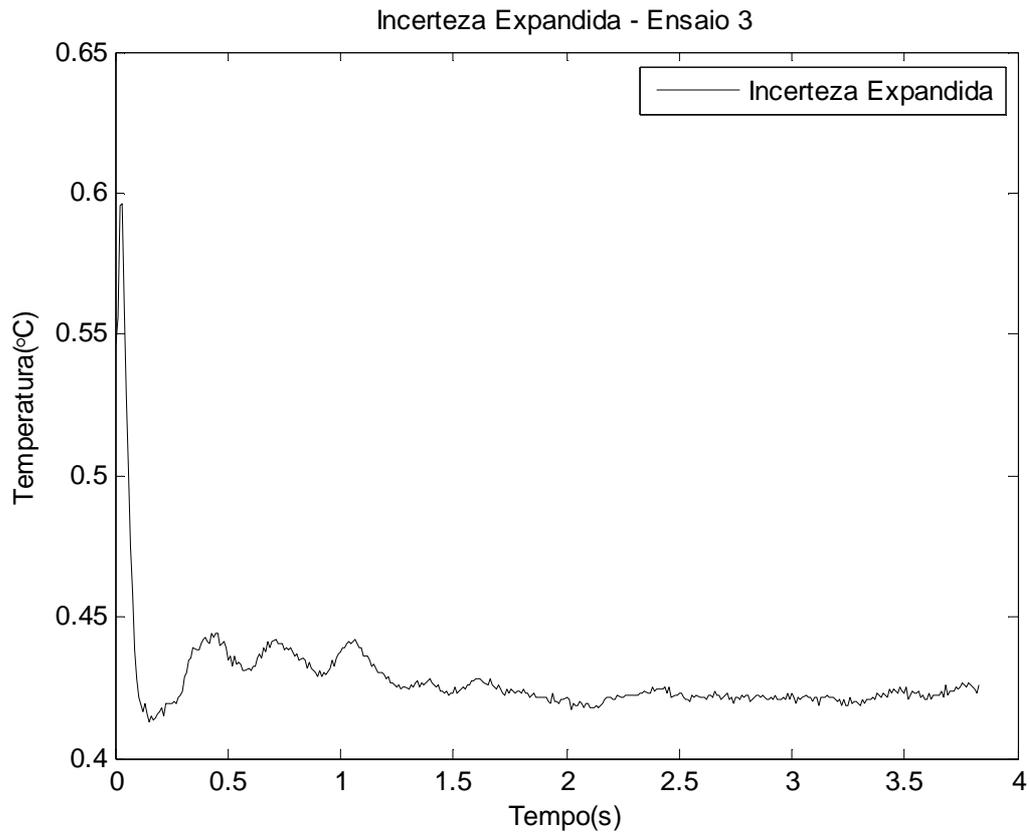


Figura 32 - Incerteza Expandida para o Ensaio 3

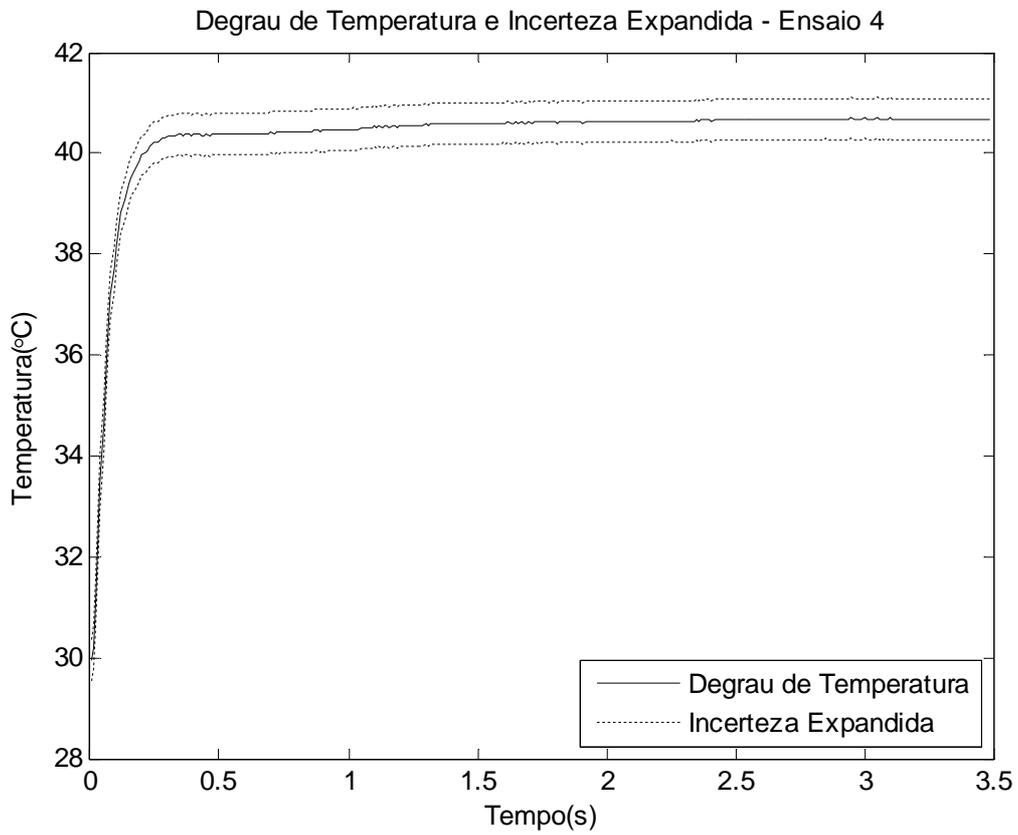


Figura 33 - Degrau de Temperatura e Incerteza Expandida para o Ensaio 4

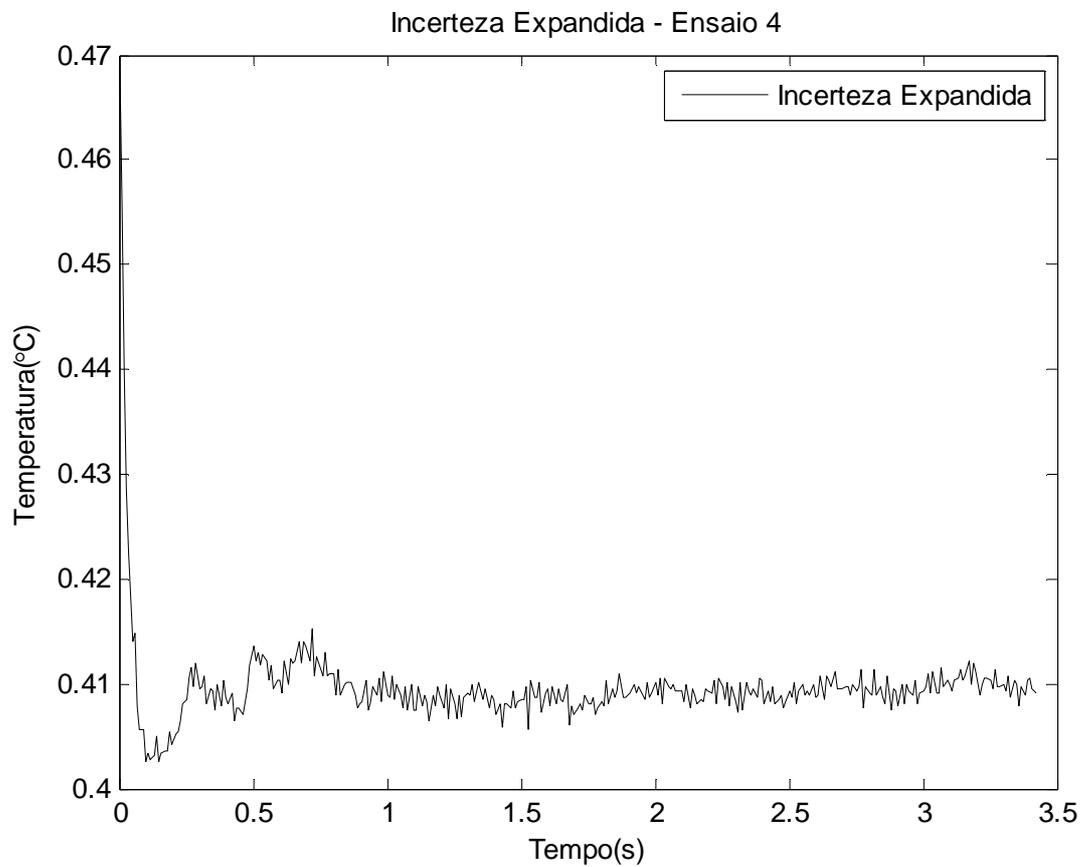


Figura 34 - Incerteza Expandida para o Ensaio 4

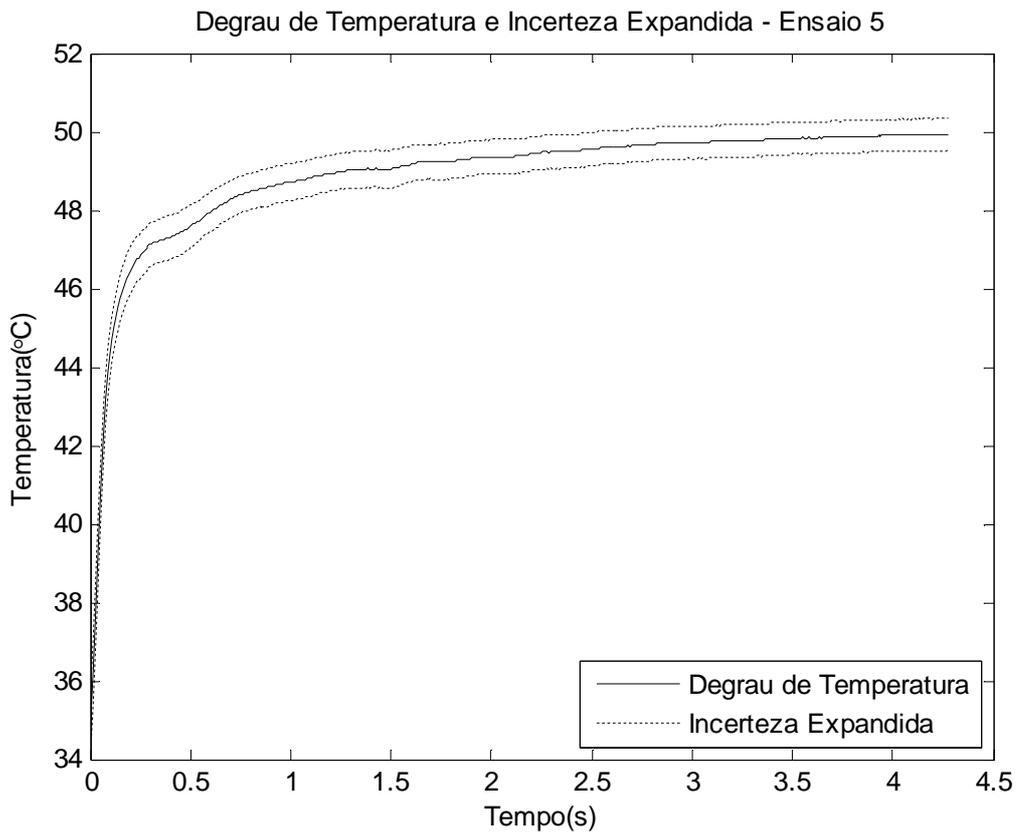


Figura 35 - Degrau de Temperatura e Incerteza Expandida para o Ensaio 5

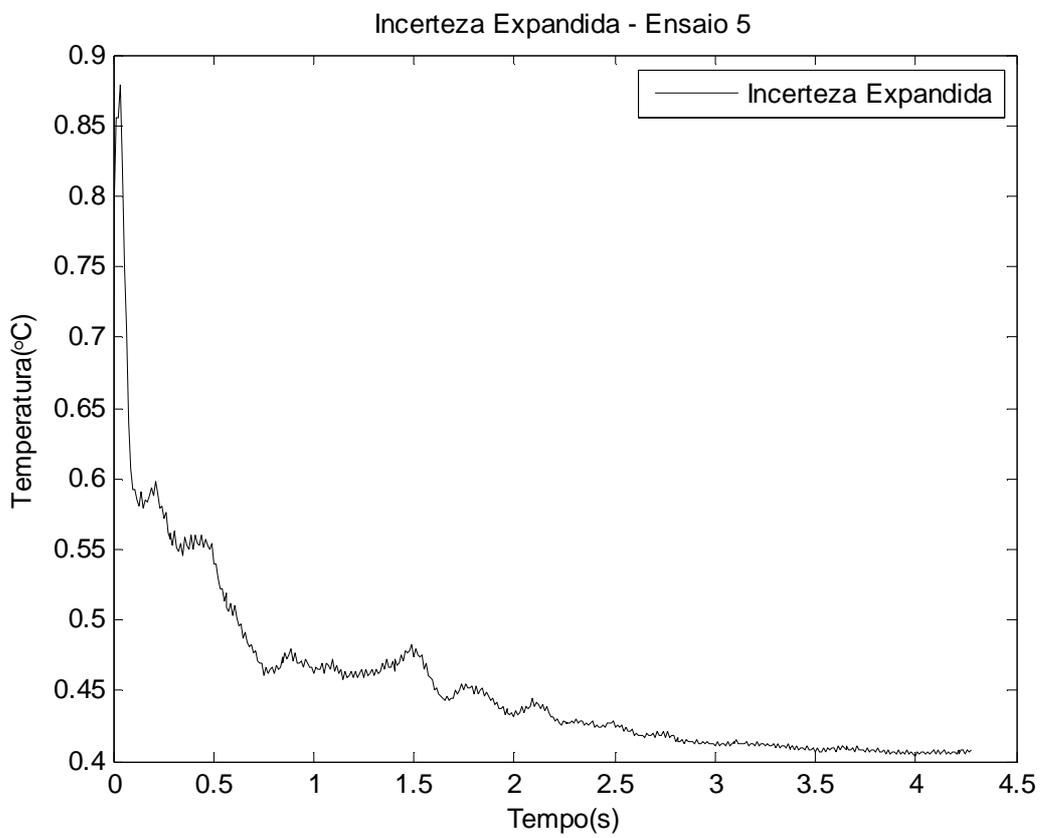


Figura 36 - Incerteza Expandida para o Ensaio 5

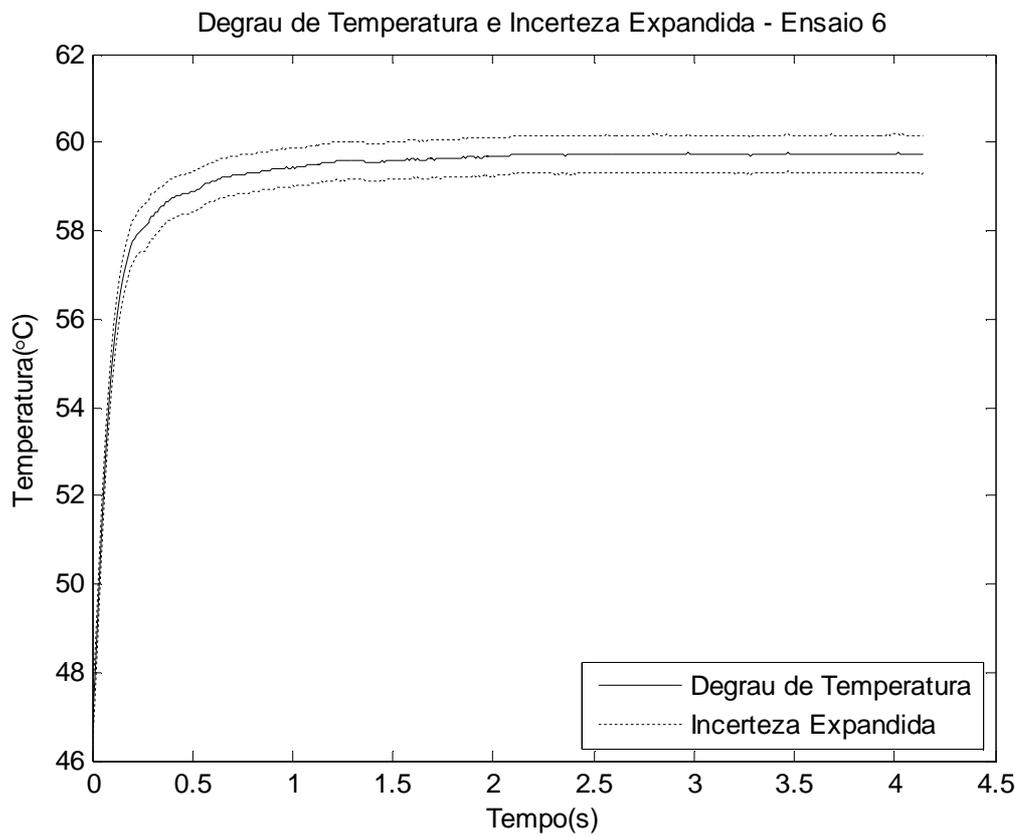


Figura 37 - Degrau de Temperatura e Incerteza Expandida para o Ensaio 6

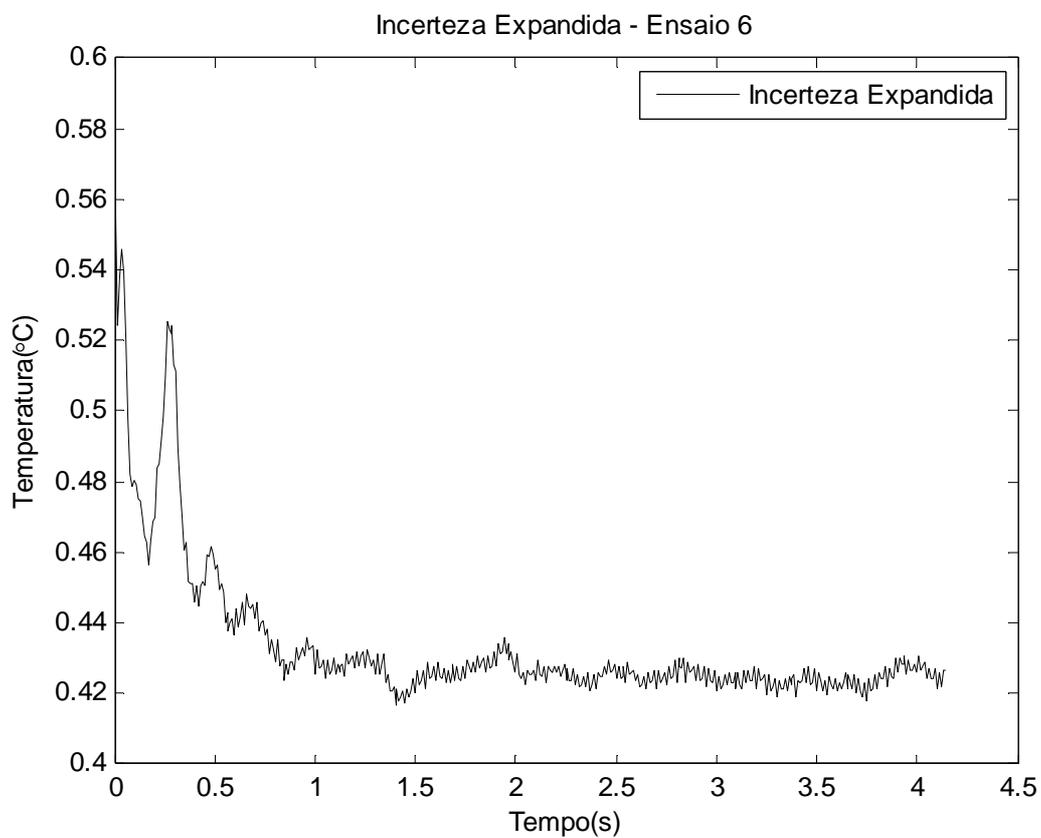


Figura 38 - Incerteza Expandida para o Ensaio 6

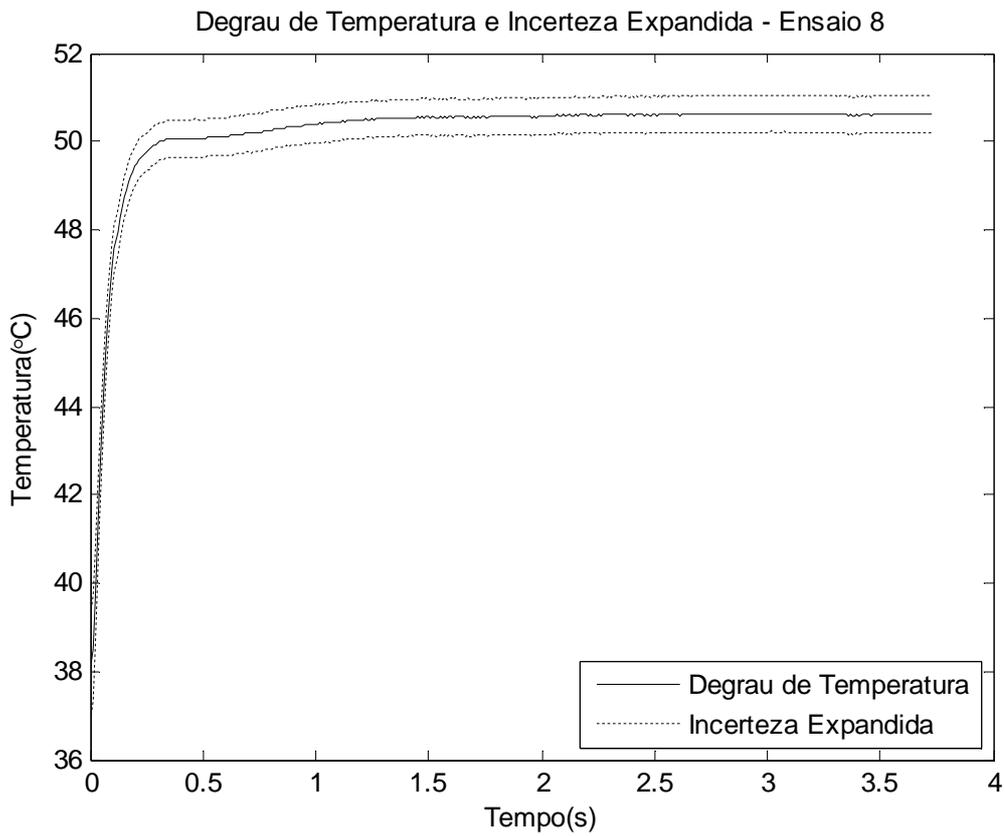


Figura 39 - Degrau de Temperatura e Incerteza Expandida para o Ensaio 8

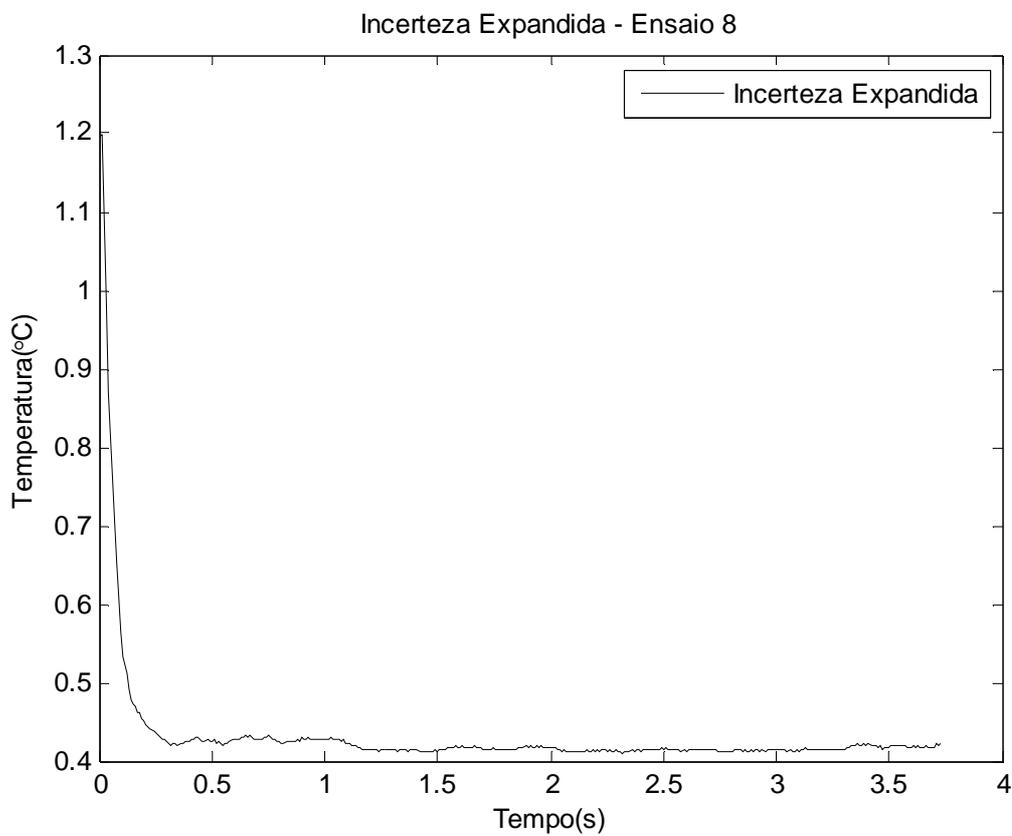


Figura 40 - Incerteza Expandida para o Ensaio 8

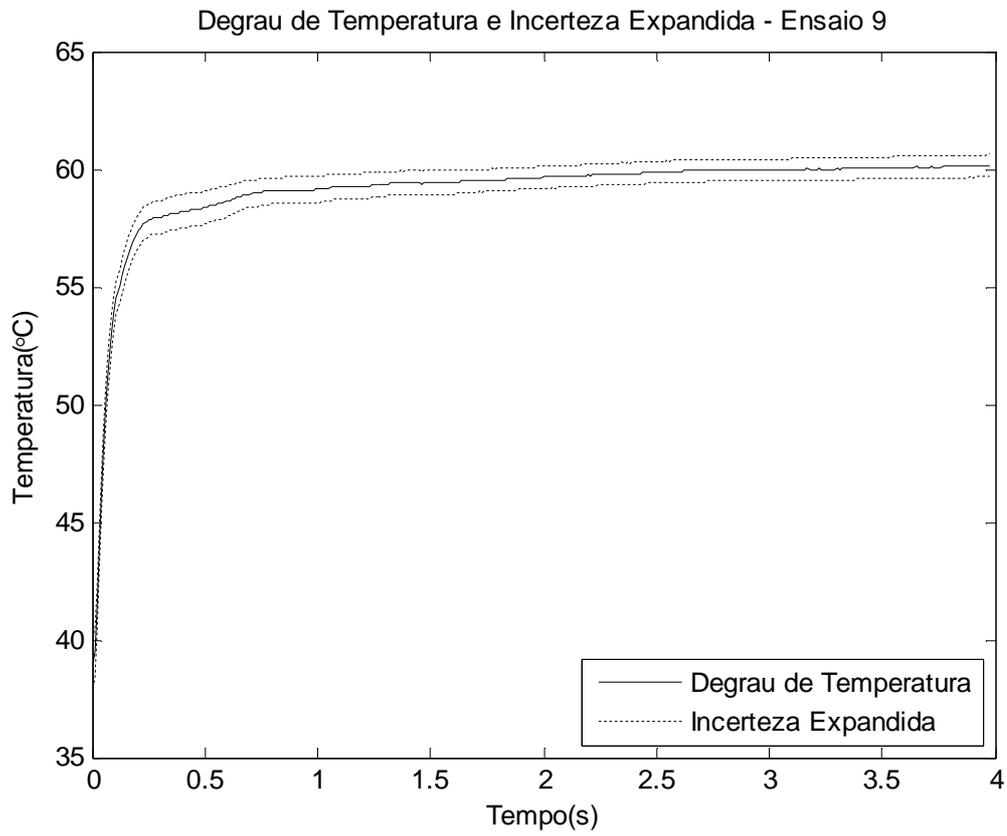


Figura 41 - Degrau de Temperatura e Incerteza Expandida para o Ensaio 9

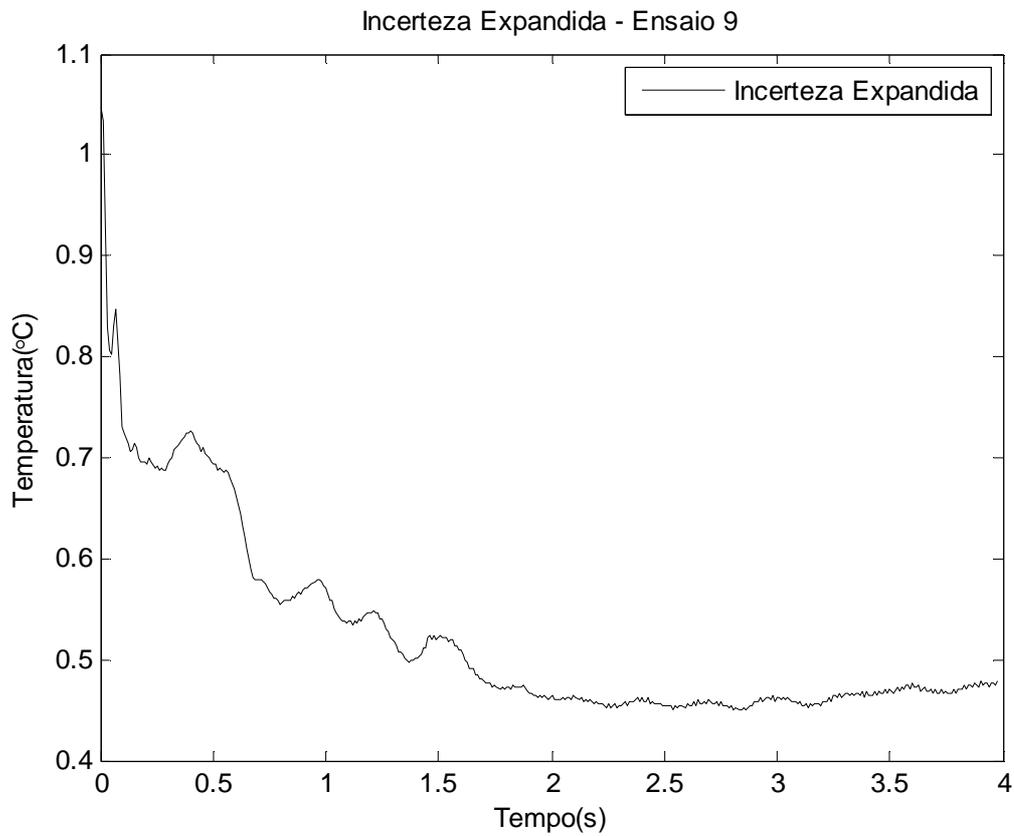


Figura 42 - Incerteza Expandida para o Ensaio 9

APÊNDICE B

Tabela 9 - Tempo de resposta de cada repetição para cada ensaio

Ensaio	Tempo de Resposta (s)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0,10	0,07	0,06	0,07	0,08	0,07	0,07	0,07	0,09	0,06	0,08	0,12	0,09	0,09	0,12
2	0,11	0,11	0,10	0,08	0,11	0,10	0,14	0,09	0,10	0,12	0,14	0,12	0,11	0,15	0,11
3	0,06	0,06	0,06	0,07	0,07	0,06	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06	0,07	0,06	0,07	0,07
4	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06	0,07	0,07
5	0,09	0,09	0,11	0,10	0,10	0,12	0,11	0,09	0,10	0,10	0,08	0,09	0,08	0,07	0,07
6	0,10	0,11	0,09	0,10	0,10	0,09	0,10	0,09	0,09	0,09	0,10	0,09	0,10	0,12	0,09
7	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
8	0,07	0,07	0,07	0,07	0,06	0,07	0,07	0,07	0,10	0,06	0,07	0,09	0,07	0,10	0,09
9	0,07	0,07	0,07	0,06	0,07	0,08	0,07	0,07	0,07	0,06	0,07	0,07	0,08	0,07	0,08

Tabela 10 - Incerteza de medição para o tempo de resposta do Ensaio 1

Grandeza X_i	Estimativa x_i	Incerteza Padronizada $u(x_i)$	Distribuição de Probabilidade	Coefficiente de Sensibilidade c_i	Contribuição de Incerteza $u_i(y)$	Grau de Liberdade Efetivo
t	0,113	$0,0184/\sqrt{15}$	Normal	1	0,004758	14
δRes	0	$0,01/\sqrt{3}$	Retangular	1	0,005774	∞
			p = 95%	$u_c(y)$	0,007481	
			k = 2	U	0,014963	

$$\tau_1 = 0,11 \pm 0,01 \text{ s}$$

Tabela 11 - Incerteza de medição para o tempo de resposta do Ensaio 2

Grandeza X_i	Estimativa x_i	Incerteza Padronizada $u(x_i)$	Distribuição de Probabilidade	Coefficiente de Sensibilidade c_i	Contribuição de Incerteza $u_i(y)$	Grau de Liberdade Efetivo
t	0,113	$0,0184/\sqrt{15}$	Normal	1	0,004758	14
δRes	0	$0,01/\sqrt{3}$	Retangular	1	0,005774	∞
			p = 95%	$u_c(y)$	0,007481	
			k = 2	U	0,014963	

$$\tau_2 = 0,11 \pm 0,01 \text{ s}$$

Tabela 12 - Incerteza de medição para o tempo de resposta do Ensaio 3

Grandeza X_i	Estimativa x_i	Incerteza Padronizada $u(x_i)$	Distribuição de Probabilidade	Coefficiente de Sensibilidade c_i	Contribuição de Incerteza $u_i(y)$	Grau de Liberdade Efetivo
t	0,064	$0,0049/\sqrt{15}$	Normal	1	0,001265	14
δRes	0	$0,01/\sqrt{3}$	Retangular	1	0,005774	∞
			p = 95%	$u_c(y)$	0,00591	
			k = 2	U	0,01182	

$$\tau_3 = 0,06 \pm 0,01 \text{ s}$$

Tabela 13 - Incerteza de medição para o tempo de resposta do Ensaio 4

Grandeza X_i	Estimativa x_i	Incerteza Padronizada $u(x_i)$	Distribuição de Probabilidade	Coefficiente de Sensibilidade c_i	Contribuição de Incerteza $u_i(y)$	Grau de Liberdade Efetivo
t	0,069	$0,0057/\sqrt{15}$	Normal	1	0,001481	14
δRes	0	$0,01/\sqrt{3}$	Retangular	1	0,005774	∞
			p = 95%	$u_c(y)$	0,00596	
			k = 2	U	0,01192	

$$\tau_4 = 0,07 \pm 0,01 \text{ s}$$

Tabela 14 - Incerteza de medição para o tempo de resposta do Ensaio 5

Grandeza X_i	Estimativa x_i	Incerteza Padronizada $u(x_i)$	Distribuição de Probabilidade	Coefficiente de Sensibilidade c_i	Contribuição de Incerteza $u_i(y)$	Grau de Liberdade Efetivo
t	0,093	$0,0139/\sqrt{15}$	Normal	1	0,003586	14
δRes	0	$0,01/\sqrt{3}$	Retangular	1	0,005774	∞
			p = 95%	$u_c(y)$	0,006797	
			k = 2	U	0,013593	

$$\tau_5 = 0,09 \pm 0,01 \text{ s}$$

Tabela 15 - Incerteza de medição para o tempo de resposta do Ensaio 6

Grandeza X_i	Estimativa x_i	Incerteza Padronizada $u(x_i)$	Distribuição de Probabilidade	Coefficiente de Sensibilidade c_i	Contribuição de Incerteza $u_i(y)$	Grau de Liberdade Efetivo
t	0,097	$0,0085/\sqrt{15}$	Normal	1	0,002204	14
δRes	0	$0,01/\sqrt{3}$	Retangular	1	0,005774	∞
			p = 95%	$u_c(y)$	0,00618	
			k = 2	U	0,01236	

$$\tau_6 = 0,10 \pm 0,01 \text{ s}$$

Tabela 16 - Incerteza de medição para o tempo de resposta do Ensaio 8

Grandeza X_i	Estimativa x_i	Incerteza Padronizada $u(x_i)$	Distribuição de Probabilidade	Coefficiente de Sensibilidade c_i	Contribuição de Incerteza $u_i(y)$	Grau de Liberdade Efetivo
t	0,076	$0,0125/\sqrt{15}$	Normal	1	0,003239	14
δRes	0	$0,01/\sqrt{3}$	Retangular	1	0,005774	∞
			p = 95%	$u_c(y)$	0,00662	
			k = 2	U	0,01324	

$$\tau_8 = 0,08 \pm 0,01 \text{ s}$$

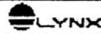
Tabela 17 - Incerteza de medição para o tempo de resposta do Ensaio 9

Grandeza X_i	Estimativa x_i	Incerteza Padronizada $u(x_i)$	Distribuição de Probabilidade	Coefficiente de Sensibilidade c_i	Contribuição de Incerteza $u_i(y)$	Grau de Liberdade Efetivo
t	0,073	$0,0093/\sqrt{15}$	Normal	1	0,002398	14
δRes	0	$0,01/\sqrt{3}$	Retangular	1	0,005774	∞
			p = 95%	$u_c(y)$	0,006252	
			k = 2	U	0,012503	

$$\tau_9 = 0,07 \pm 0,01 \text{ s}$$

ANEXOS

		Pág.
Anexo I	Relatório de Calibração do controlador AC1160 e do Condicionador MCS1000	81
Anexo II	Certificado de Calibração da Termoresistência tipo Pt-100	86



Lynx Tecnologia Eletrônica Ltda
Rua Dr. José Elias, 358/368 - Alto da Lapa
www.lyntec.com.br

RELATÓRIO DE CALIBRAÇÃO

OS: C7848

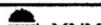
Cod. doc.: C784801A.CAW

Canal	Nome	Ganho nominal	Ganho real	Desvio	Lim superior	Lim inferior	Unidade	Faixa do A/D
canal 0	1	1.00	0.9920	-0.80%	10.080	-10.081	Vdc	+/- 10V
	5	5.00	4.9344	-1.31%	2.0265	-2.0266	Vdc	+/- 10V
	100	100.00	99.397	-0.60%	100.59	-100.62	mVdc	+/- 10V
	300	300.00	298.97	-0.34%	33.435	-33.460	mVdc	+/- 10V
	600	600.00	595.22	-0.80%	16.788	-16.812	mVdc	+/- 10V
	1000	1000.00	995.06	-0.49%	10.037	-10.061	mVdc	+/- 10V
	corrente	500.00	491.63	-1.67%	20.340	-20.340	mAdc	+/- 10V
canal 1	1	1.00	0.9920	-0.80%	10.079	-10.081	Vdc	+/- 10V
	5	5.00	4.9397	-1.21%	2.0243	-2.0245	Vdc	+/- 10V
	100	100.00	99.382	-0.62%	100.61	-100.63	mVdc	+/- 10V
	300	300.00	299.35	-0.22%	33.310	-33.501	mVdc	+/- 10V
	600	600.00	596.37	-0.60%	16.761	-16.774	mVdc	+/- 10V
	1000	1000.00	995.79	-0.42%	10.035	-10.048	mVdc	+/- 10V
	corrente	500.00	491.73	-1.65%	20.336	-20.336	mAdc	+/- 10V
canal 2	1	1.00	0.9912	-0.88%	10.087	-10.089	Vdc	+/- 10V
	5	5.00	4.9227	-1.55%	2.0311	-2.0317	Vdc	+/- 10V
	100	100.00	98.994	-1.01%	101.00	-101.03	mVdc	+/- 10V
	300	300.00	297.76	-0.75%	33.484	-33.683	mVdc	+/- 10V
	600	600.00	595.07	-0.82%	16.793	-16.815	mVdc	+/- 10V
	1000	1000.00	992.52	-0.75%	10.065	-10.085	mVdc	+/- 10V
	corrente	500.00	489.69	-2.06%	20.420	-20.421	mAdc	+/- 10V
canal 3	1	1.00	0.9926	-0.74%	10.073	-10.074	Vdc	+/- 10V
	5	5.00	4.9417	-1.17%	2.0232	-2.0239	Vdc	+/- 10V
	100	100.00	99.182	-0.82%	100.80	-100.84	mVdc	+/- 10V
	300	300.00	299.49	-0.17%	33.285	-33.494	mVdc	+/- 10V
	600	600.00	597.17	-0.47%	16.729	-16.761	mVdc	+/- 10V
	1000	1000.00	996.58	-0.34%	10.018	-10.049	mVdc	+/- 10V
	corrente	500.00	492.56	-1.49%	20.301	-20.302	mAdc	+/- 10V
canal 4	1	1.00	0.9915	-0.85%	10.084	-10.086	Vdc	+/- 10V
	5	5.00	4.9325	-1.35%	2.0270	-2.0277	Vdc	+/- 10V
	100	100.00	99.266	-0.73%	100.71	-100.76	mVdc	+/- 10V
	300	300.00	297.60	-0.80%	33.495	-33.708	mVdc	+/- 10V
	600	600.00	596.72	-0.55%	16.739	-16.776	mVdc	+/- 10V
	1000	1000.00	994.21	-0.58%	10.040	-10.076	mVdc	+/- 10V
	corrente	500.00	490.94	-1.81%	20.368	-20.369	mAdc	+/- 10V

Controlador (A/D): AC1160
Condicionador: MCS1000

NIP: 54462
NIP: 54463

data do relatório: 23/3/2011
página 2 de 5



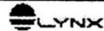
Lynx Tecnologia Eletrônica Ltda
Rua Dr. José Elias, 358/368 - Alto da Lapa
www.lyntec.com.br

RELATÓRIO DE CALIBRAÇÃO

OS: C7848

Cod. doc.: C784801A.CAW

Canal	Nome	Ganho nominal	Ganho real	Desvio	Lim superior	Lim inferior	Unidade	Faixa do A/D
canal 5	1	1.00	0.9918	-0.82%	10.082	-10.083	Vdc	+/- 10V
	5	5.00	4.9375	-1.25%	2.0250	-2.0256	Vdc	+/- 10V
	100	100.00	99.296	-0.70%	100.70	-100.70	mVdc	+/- 10V
	300	300.00	300.15	0.05%	33.231	-33.402	mVdc	+/- 10V
	600	600.00	594.96	-0.84%	16.811	-16.804	mVdc	+/- 10V
	1000	1000.00	995.16	-0.48%	10.052	-10.044	mVdc	+/- 10V
	corrente	500.00	491.08	-1.78%	20.362	-20.363	mAdc	+/- 10V
canal 6	1	1.00	0.9933	-0.67%	10.066	-10.067	Vdc	+/- 10V
	5	5.00	4.9368	-1.26%	2.0252	-2.0259	Vdc	+/- 10V
	100	100.00	99.432	-0.57%	100.57	-100.57	mVdc	+/- 10V
	300	300.00	300.91	0.30%	33.148	-33.317	mVdc	+/- 10V
	600	600.00	596.55	-0.58%	16.766	-16.759	mVdc	+/- 10V
	1000	1000.00	997.57	-0.24%	10.028	-10.019	mVdc	+/- 10V
	corrente	500.00	491.65	-1.67%	20.340	-20.339	mAdc	+/- 10V
canal 7	1	1.00	0.9954	-0.46%	10.037	-10.056	Vdc	+/- 10V
	5	5.00	4.9600	-0.80%	2.0157	-2.0164	Vdc	+/- 10V
	100	100.00	99.404	-0.60%	100.59	-100.60	mVdc	+/- 10V
	300	300.00	297.97	-0.68%	33.472	-33.649	mVdc	+/- 10V
	600	600.00	597.28	-0.45%	16.743	-16.742	mVdc	+/- 10V
	1000	1000.00	995.36	-0.46%	10.047	-10.045	mVdc	+/- 10V
	corrente	500.00	494.48	-1.10%	20.222	-20.223	mAdc	+/- 10V
canal 8	1	1.00	0.9928	-0.72%	10.063	-10.082	Vdc	+/- 10V
	5	5.00	4.9208	-1.58%	2.0318	-2.0324	Vdc	+/- 10V
	100	100.00	99.272	-0.73%	100.73	-100.73	mVdc	+/- 10V
	300	300.00	300.01	0.00%	33.244	-33.419	mVdc	+/- 10V
	600	600.00	598.00	-0.33%	16.635	-16.809	mVdc	+/- 10V
	1000	1000.00	991.27	-0.87%	10.089	-10.086	mVdc	+/- 10V
	corrente	500.00	489.56	-2.09%	20.419	-20.433	mAdc	+/- 10V
canal 9	1	1.00	0.9947	-0.53%	10.044	-10.062	Vdc	+/- 10V
	5	5.00	4.9548	-0.90%	2.0179	-2.0184	Vdc	+/- 10V
	100	100.00	99.432	-0.57%	100.57	-100.56	mVdc	+/- 10V
	300	300.00	297.63	-0.79%	33.516	-33.680	mVdc	+/- 10V
	600	600.00	604.10	0.68%	16.471	-16.635	mVdc	+/- 10V
	1000	1000.00	995.08	-0.49%	10.055	-10.043	mVdc	+/- 10V
	corrente	500.00	493.16	-1.37%	20.277	-20.277	mAdc	+/- 10V
Controlador (A/D):		AC1160	NIP: 54462		data do relatório: 23/3/2011			
Condicionador:		MCS1000	NIP: 54463		página 3 de 5			



Lynx Tecnologia Eletrônica Ltda
Rua Dr. José Elias, 358/368 - Alto da Lapa
www.lynxtec.com.br

RELATÓRIO DE CALIBRAÇÃO

OS: C7848

Cod. doc.: C784801A.CAW

Canal	Nome	Ganho nominal	Ganho real	Desvio	Lim superior	Lim inferior	Unidade	Faixa do A/D
canal 10	1	1.00	0.9894	-1.06%	10.097	-10.115	Vdc	+/- 10V
	5	5.00	4.9186	-1.63%	2.0328	-2.0333	Vdc	+/- 10V
	100	100.00	98.649	-1.35%	101.36	-101.37	mVdc	+/- 10V
	300	300.00	298.00	-0.67%	33.469	-33.645	mVdc	+/- 10V
	600	600.00	600.04	0.01%	16.577	-16.753	mVdc	+/- 10V
	1000	1000.00	990.68	-0.93%	10.094	-10.093	mVdc	+/- 10V
	corrente	500.00	490.70	-1.86%	20.378	-20.379	mAdc	+/- 10V
canal 11	1	1.00	0.9950	-0.50%	10.040	-10.059	Vdc	+/- 10V
	5	5.00	4.9536	-0.93%	2.0183	-2.0190	Vdc	+/- 10V
	100	100.00	99.415	-0.59%	100.57	-100.59	mVdc	+/- 10V
	300	300.00	298.88	-0.37%	33.363	-33.553	mVdc	+/- 10V
	600	600.00	604.66	0.78%	16.444	-16.631	mVdc	+/- 10V
	1000	1000.00	996.90	-0.31%	10.025	-10.036	mVdc	+/- 10V
	corrente	500.00	493.85	-1.23%	20.248	-20.249	mAdc	+/- 10V
canal 12	1	1.00	0.9927	-0.73%	10.064	-10.083	Vdc	+/- 10V
	5	5.00	4.9409	-1.18%	2.0236	-2.0242	Vdc	+/- 10V
	100	100.00	99.004	-1.00%	100.99	-101.01	mVdc	+/- 10V
	300	300.00	299.70	-0.10%	33.275	-33.457	mVdc	+/- 10V
	600	600.00	602.43	0.41%	16.509	-16.688	mVdc	+/- 10V
	1000	1000.00	995.09	-0.49%	10.047	-10.050	mVdc	+/- 10V
	corrente	500.00	491.88	-1.62%	20.326	-20.334	mAdc	+/- 10V
canal 13	1	1.00	0.9964	-0.36%	10.027	-10.046	Vdc	+/- 10V
	5	5.00	4.9562	-0.88%	2.0173	-2.0179	Vdc	+/- 10V
	100	100.00	99.750	-0.25%	100.25	-100.24	mVdc	+/- 10V
	300	300.00	300.29	0.10%	33.219	-33.382	mVdc	+/- 10V
	600	600.00	604.79	0.80%	16.453	-16.615	mVdc	+/- 10V
	1000	1000.00	998.79	-0.12%	10.019	-10.004	mVdc	+/- 10V
	corrente	500.00	493.34	-1.33%	20.269	-20.270	mAdc	+/- 10V
canal 14	1	1.00	0.9951	-0.49%	10.039	-10.058	Vdc	+/- 10V
	5	5.00	4.9535	-0.93%	2.0183	-2.0191	Vdc	+/- 10V
	100	100.00	99.372	-0.63%	100.62	-100.64	mVdc	+/- 10V
	300	300.00	299.03	-0.32%	33.350	-33.533	mVdc	+/- 10V
	600	600.00	602.38	0.40%	16.509	-16.691	mVdc	+/- 10V
	1000	1000.00	994.75	-0.53%	10.050	-10.055	mVdc	+/- 10V
	corrente	500.00	493.36	-1.33%	20.268	-20.269	mAdc	+/- 10V

Controlador (A/D): AC1160
Condicionador: MCS1000

NIP: 54462
NIP: 54463

data do relatório: 23/3/2011
página 4 de 5



Lynx Tecnologia Eletrônica Ltda
Rua Dr. José Elias, 358/368 - Alto da Lapa
www.lynxtec.com.br

RELATÓRIO DE CALIBRAÇÃO

OS: C7848

Cod. doc.: C784801A.CAW

Canal	Nome	Ganho nominal	Ganho real	Desvio	Lim superior	Lim inferior	Unidade	Faixa do A/D
canal 15	1	1.00	0.9932	-0.68%	10.058	-10.077	Vdc	+/- 10V
	5	5.00	4.9413	-1.17%	2.0234	-2.0240	Vdc	+/- 10V
	100	100.00	99.261	-0.74%	100.73	-100.75	mVdc	+/- 10V
	300	300.00	299.25	-0.25%	33.324	-33.508	mVdc	+/- 10V
	600	600.00	600.17	0.03%	16.569	-16.754	mVdc	+/- 10V
	1000	1000.00	992.69	-0.73%	10.069	-10.077	mVdc	+/- 10V
	corrente	500.00	492.97	-1.41%	20.285	-20.285	mAdc	+/- 10V

Junta Fria					301.29	-298.2	oC	+/- 10V
------------	--	--	--	--	--------	--------	----	---------

Controlador (A/D): AC1160
Condicionador: MCS1000

NIP: 54462
NIP: 54463

data do relatório: 23/3/2011
página 5 de 5

Anexo II: Certificado de Calibração da Termoresistência tipo Pt-100



CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

Laboratório de Metrologia ECIL

Rede Brasileira de Calibração

Laboratório de Calibração credenciado pela Cgcre / Inmetro nas áreas de Temperatura, sob o nº 026, e Eletricidade, sob o nº 111

Nº 1026/06

Fis:1/3

CLIENTE: Universidade de Brasília - Lab. de Metrologia Dinâmica

Endereço: Av. L3 Norte - Ed. Finatec - Asa Norte - Brasília - DF

Documento do Cliente: E-MAIL

Documento ECIL: PI-63595

OBJETO DA CALIBRAÇÃO: Termoresistência tipo Pt-100 a 4 fios

Fabricante: Ecil

Nº Série: - X - X - X -

Ident. Cliente: LMD 14

Compr.: 250 mm

Diâmetro: 8 mm

Rastreab: - X - X - X -

PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO:

A calibração foi conduzida em um meio termostático de homogeneidade conhecida, onde se realizaram medições subsequentes das indicações do(s) termômetro(s) padrão e do termômetro em teste. A temperatura t_{90} foi determinada com base no Certificado de Calibração do termômetro padrão (ou média dos dois padrões). Calculou-se a resistência esperada nessa temperatura, de acordo com as tabelas de referência e o erro apresentado pelo instrumento em teste, o qual foi convertido para graus Celsius. Procedimento de referência: IT 000380 Rev. 7. Norma de referência: IEC 60751 Rev.1983 Amd.1995.

NOTAS:

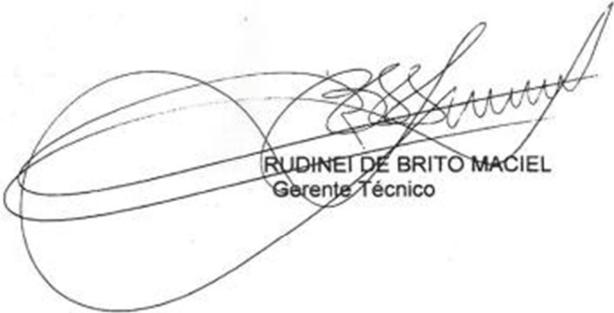
1. Este Laboratório adota a Escala Internacional de Temperatura de 1990.
2. Condições ambientais: Temperatura: 23 ± 3 °C; Umidade: 50 ± 20 %.
3. Este certificado atende aos requisitos de credenciamento pela CGCRE/INMETRO, o qual avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida (ou ao Sistema Internacional de Unidades-SI).
4. Os resultados deste certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração nas condições especificadas, não sendo extensivos a quaisquer lotes.
5. A reprodução deste certificado deverá ser completa. A reprodução de partes requer aprovação escrita do Laboratório.

Data da Emissão: 05/05/06

Data da Calibração: 14/03/06

PIEDADE - SP - BRASIL

IMP000006 REV. 1


RUDINEI DE BRITO MACIEL
Gerente Técnico



temperatura industrial

Ecil Produtos e Sistemas de Medição e Controle Ltda

Rua Benjamin da Silveira Baldy, 2001 - 18170-000 - Piedade - SP

Tel.: (15) 3244-8019 Fax.: (15) 3244-1672

www.ecil.com.br selab@ecil.com.br



CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

Laboratório de Metrologia ECIL

Rede Brasileira de Calibração

Laboratório de Calibração credenciado pela Cgcre / Inmetro nas áreas de Temperatura, sob o nº 026, e Eletricidade, sob o nº 111

Nº1026/06

Fis: 2/3

RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO:

Os resultados a seguir apresentados referem-se à situação do instrumento, conforme recebido pelo Laboratório.

Profundidade de Imersão (mm)	Padrão Utilizado	Temperatura t_{90} (°C)	Resistência (Ω)	Erro (°C)	Incerteza da Medição (\pm °C)	Fator k	Veff
210	909/651	-19,76	92,251	-0,01	0,03	2,00	∞
210	909/651	-14,84	94,184	-0,01	0,03	2,00	∞
210	909/651	-9,90	96,122	0,00	0,03	2,00	∞
210	909/651	-5,01	98,041	0,00	0,03	2,00	∞
210	Ponto de Gelo	0,00	100,001	0,00	0,01	2,00	∞
210	909/651	40,10	115,582	0,01	0,01	2,00	∞
210	909/689	74,33	128,735	0,01	0,01	2,00	∞
210	909/689	84,87	132,754	0,00	0,01	2,00	∞
210	909/689	94,66	136,482	0,01	0,03	2,18	15
210	909/689	125,09	147,986	0,00	0,01	2,00	∞
210	909/689	149,85	157,266	-0,01	0,04	2,52	7
210	909/689	179,73	168,373	-0,02	0,03	2,00	∞
210	909/689	189,96	172,148	-0,02	0,03	2,00	∞
210	909/689	199,99	175,841	-0,03	0,03	2,00	∞

Ro inicial = 100,001 Ω

Ro final = 100,001 \pm 0,004 Ω

Os resultados acima apresentados referem-se à média de 4 leituras, tomadas em intervalos de 1 minuto. A corrente de medição utilizada foi de 1 mA. A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k, o qual para uma distribuição t com ν_{eff} graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

A temperatura (t°C) foi relacionada com a resistência do termômetro $R_{(t^{\circ}C)}$ e a resistência no ponto de gelo pelas equações:

a) Temperaturas acima de 0°C : $R_{(t^{\circ}C)}/R_{(0^{\circ}C)} = 1 + At + Bt^2$

b) Temperaturas abaixo de 0°C: $R_{(t^{\circ}C)}/R_{(0^{\circ}C)} = 1 + At + Bt^2 + Ct^3 (t-100)$, onde

A = 0,003908912

B = -5,83432E-07

C = -4,83545E-11



Ecil Produtos e Sistemas de Medição e Controle Ltda

Rua Benjamin da Silveira Baldy, 2001 - 18170-000 - Piedade - SP

Tel.: (15) 3244-8019 Fax: (15) 3244-1672

www.ecil.com.br selab@ecil.com.br



CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

Laboratório de Metrologia ECIL

Rede Brasileira de Calibração

Laboratório de Calibração credenciado pela Cgcre / Inmetro nas áreas de Temperatura, sob o nº 026, e Eletricidade, sob o nº 111

Nº1026/06

Fis: 3/3

Atenção: É essencial que o valor de $R_{(0^{\circ}\text{C})}$ seja medido em intervalos periódicos e que sempre o valor mais recente seja usado na fórmula.

Esses coeficientes foram usados para gerar a tabela de Resistência x Temperatura, anexo deste Certificado. A incerteza dos valores determinados através da equação de interpolação é

Temperatura (°C)	Incerteza (±°C)	Fator k	Veff	Temperatura (°C)	Incerteza (±°C)	Fator k	Veff
-20	0,03	2,04	61	85	0,03	2,07	35
-15	0,03	2,06	42	95	0,03	2,07	39
-10	0,03	2,09	30	125	0,03	2,07	38
-5	0,03	2,11	24	150	0,04	2,18	15
0	0,02	2,00	101	180	0,03	2,05	49
40	0,03	2,09	29	190	0,03	2,43	8
75	0,03	2,09	30	200	0,03	2,43	8

RASTREABILIDADE DOS PADRÕES UTILIZADOS

1. Termômetros Padrão:

Identificação	Tipo	Certificado	Validade	Rastreabilidade
909/651	25 Ohms	4606/05	01/11/06	RBC/ECIL
909/689	25 Ohms	DIMCI 1966/03	14/12/08	INMETRO

2. Instrumentos Padrão:

Descrição	Modelo	Certificado	Validade	Rastreabilidade
Ponte Resistiva ASL	F17	DIMCI 2211/05*	13/12/07	INMETRO

* O certificado acima mencionado refere-se ao resistor padrão usado para o ajuste periódico da Ponte (Ajuste válido até 13/04/07).

IMP00006 REV. 1



Ecil Produtos e Sistemas de Medição e Controle Ltda

Rua Benjamin da Silveira Baldy, 2001 - 18170-000 - Piedade - SP

Tel.: (15) 3244-8019 Fax.: (15) 3244-1672

www.ecil.com.br selab@ecil.com.br

GLOSSÁRIO

Lista de conceitos segundo o “VOCABULÁRIO INTERNACIONAL DE TERMOS FUNDAMENTAIS E GERAIS DE METROLOGIA”, INMETRO, 3ª edição. Rio de Janeiro, 2003.

CADEIA DE MEDIÇÃO

Seqüência de elementos de um instrumento ou sistema de medição que constitui o trajeto do sinal de medição desde o estímulo até a resposta.

CALIBRAÇÃO

Conjunto de operações que estabelece, sob condições especificadas, a relação entre os valores Indicados por um instrumento de medição ou sistema de medição ou valores representados por uma medida materializada ou um material de referência, e os valores correspondentes das grandezas estabelecidos por padrões.

CONFIABILIDADE METROLÓGICA

Genericamente confiabilidade refere-se à capacidade de um item (produto, processo ou sistema) desempenhar uma função requerida sob condições pré-estabelecidas em um período de tempo definido. Para um sistema, ou instrumento de medição, confiabilidade metrológica refere-se à sua capacidade de fornecer resultados de medições confiáveis conforme condições de utilização definidas.

CORREÇÃO

Valor adicionado algebricamente ao resultado não corrigido de uma medição para compensar um erro sistemático.

ERRO ALEATÓRIO

Resultado de uma medição menos a média que resultaria de um infinito número de medições do mesmo mensurando efetuadas sob condições de repetitividade.

ERRO SISTEMÁTICO

Média que resultaria de um infinito número de medições do mesmo mensurando, efetuadas sob condições de repetitividade, menos o valor verdadeiro do mensurando.

FAIXA DE OPERAÇÃO

Faixa entre os valores mínimo e máximo da variável de entrada para a qual se projetou o instrumento de medida.

GRANDEZA

Atributo de um fenômeno, corpo ou substância que pode ser qualitativamente distinguido e quantitativamente determinado.

INCERTEZA DE MEDIÇÃO

Parâmetro, associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser fundamentadamente atribuídos a um mensurando.

INÉRCIA TÉRMICA

O conceito de inércia térmica caracteriza a resistência oferecida pelo sistema térmico à tentativa de alterar o seu estado termodinâmico.

MENSURANDO

Objeto da medição. Grandeza específica submetida à medição.

PADRÕES

Medida materializada, instrumento de medição, material de referência ou sistema de medição destinado a definir, realizar, conservar ou reproduzir uma unidade ou um ou mais valores de uma grandeza para servir como referência.

RASTREABILIDADE

Propriedade do resultado de uma medição ou do valor de um padrão estar relacionado a referências estabelecidas, geralmente a padrões nacionais ou internacionais, através de uma cadeia contínua de comparações, todas tendo incertezas estabelecidas.

REPETITIVIDADE DE RESULTADOS

Grau de concordância entre os resultados de medições sucessivas de um mesmo mensurando efetuadas sob as mesmas condições de medição.

RESOLUÇÃO

Menor diferença entre indicações de um dispositivo mostrador que pode ser significativamente percebida.

SENSIBILIDADE

Varição da resposta de um instrumento de medição dividida pela correspondente variação do estímulo.

VALOR VERDADEIRO

Valor consistente com a definição de uma dada grandeza específica.