

**INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE
SÃO PAULO**

JERRI BERNARDES DE SOUZA

**DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO PARA ANÁLISE DA
HOMOGENEIDADE DO COEFICIENTE DE SEEBECK EM
TERMOPARES**

**São Paulo
2014**

JERRI BERNARDES DE SOUZA

DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO PARA ANÁLISE DA
HOMOGENEIDADE DO COEFICIENTE DE SEEBECK EM TERMOPARES

Dissertação de Mestrado
apresentada ao Instituto de
Pesquisas Tecnológicas do Estado
de São Paulo - IPT, como parte dos
requisitos para a obtenção do título
de Mestre em Processos Industriais.

Data da aprovação: ____/____/____

Prof^ª. Dr^ª. Catia Fredericci
(Orientadora)
IPT – Instituto de Pesquisas
Tecnológicas do Estado de São
Paulo

Membros da Banca Examinadora:

Prof^ª. Dr^ª. Catia Fredericci (Orientadora)
IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

Dr. Manuel Antônio Pires Castanho (Co-orientador)
IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

Prof. Dr. Daniel Rodrigues (Membro)
Brats - Ind. e Com. de Produtos Metálicos Especiais Ltda

JERRI BERNARDES DE SOUZA

DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO PARA ANÁLISE DA
HOMOGENEIDADE DO COEFICIENTE DE SEEBECK EM TERMOPARES

Dissertação de Mestrado
apresentada ao Instituto de
Pesquisas Tecnológicas do Estado
de São Paulo - IPT, como parte dos
requisitos para a obtenção do título
de Mestre em Processos Industriais.

Área de Concentração:
Desenvolvimento e Otimização de
Processos Industriais.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Catia
Fredericci

Co-orientador: Dr. Manuel Antônio
Pires Castanho

São Paulo
2014

Ficha Catalográfica
Elaborada pelo Departamento de Acervo e Informação Tecnológica – DAIT
do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT

S725d

Souza, Jerri Bernardes de

Desenvolvimento de um dispositivo para análise da homogeneidade do coeficiente de Seebeck em termopares. / Jerri Bernardes de Souza. São Paulo, 2014.
143p.

Dissertação (Mestrado em Processos Industriais) - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Área de concentração: Desenvolvimento e Otimização de Processos Industriais.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Catia Fredericci
Co-orientador: Dr. Manuel Antônio Pires Castanho

1. Avaliação de desempenho 2. Homogeneidade 3. Coeficiente de Seebeck 4. Termopar 5. Tese I. Fredericci, orient. II. Castanho, Manuel Antônio Pires, co-orient. III. IPT. Coordenadoria de Ensino Tecnológico IV. Título

14-39

CDU 621.362.1(043)

DEDICATÓRIA

Ao conhecimento transcendental da
Cultura Racional e as forças conscientes da
Natureza que me orientaram para mais esta
realização em minha vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Energia Superior a todas as energias, por iluminar o meu caminho, me dar força e capacidade para superar os obstáculos encontrados.

Ao Sr. Manuel Jacintho Coelho por ter me ensinado o caminho da razão.

À minha orientadora Prof^a. Dr^a. Catia Fredericci, pela disponibilidade, competência, ensinamentos e atenção, que sempre dedicou a mim e ao meu trabalho.

Ao meu co-orientador Dr. Manuel Antônio Pires Castanho pela sugestão, incentivo e auxílio para a realização deste trabalho.

À minha esposa Paxinka Ferreira Barbosa Silva, pelo amor, incentivo, paciência e contínuo companheirismo.

À minha mãe Helena Caracioly de Souza, pelo apoio, estímulo e preocupação com as realizações de meus objetivos.

À minha irmã Eliane Bernardes de Souza, que sempre me incentivou e exaltou as minhas qualidades, me convencendo sempre a confiar em meu potencial.

À Banda Racional Universo em Desencanto por ter me proporcionado uma formação disciplinar e equilibrada qual indiretamente me auxiliou neste trabalho.

À todos e a tudo que, embora não nomeados individualmente, contribuíram de alguma forma para a realização desse trabalho,

minha gratidão.

RESUMO

Dentre os sensores/transdutores de temperatura em processos industriais, os termopares são os mais utilizados, mas também os mais incompreendidos da termometria. Idealmente um termopar quando novo, nunca utilizado, possui homogeneidade em suas características químicas, físicas e conseqüentemente, possui homogeneidade do coeficiente de Seebeck. O termopar quando em uso num processo industrial ou quando submetido a uma calibração, é susceptível a alterações de sua homogeneidade causada por agentes externos como a própria temperatura, degeneração, contaminação química, tensões mecânicas, entre outros. A homogeneidade é negligenciada ou desconhecida por muitos usuários e laboratórios de calibração, sendo este efeito considerado por especialistas como uma das maiores, se não a maior, interferência nas medições de temperatura. Este trabalho descreve a avaliação de desempenho de um dispositivo desenvolvido para a análise da homogeneidade de termopares pelo *método de dois gradientes*, comparando-o com o *método de um gradiente*, em banho termostático de nitrato de sódio (sais fundidos). O dispositivo foi controlado automaticamente por um programa elaborado em plataforma “Labview[®]/National Instruments”, e com capacidade para tratar os dados. As análises da homogeneidade foram realizadas em dois tipos de termopares, um de metal nobre tipo S (Pt–10%Rh/Pt), utilizado normalmente como padrão de referência e um termopar de metal básico tipo K (Cromel–Alumel), sendo este o mais utilizado nos processos industriais. Os termopares foram mapeados 260 mm, de 10 mm em 10 mm, em relação à junção de medição na temperatura de 200 °C. A maior diferença encontrada, entre os dois métodos, foi de 7,155 µV para o termopar tipo S e 354,85 µV para o termopar tipo K.

Palavras Chave: Análise de Homogeneidade; Coeficiente de Seebeck; Termopar; Termoelemento; Termoeletricidade.

ABSTRACT

Development of a device for analysis of the homogeneity of the Seebeck coefficient Thermocouples

Among the sensors/transducers of temperature in industrial processes, thermocouples are the most widely used, but also the most misunderstood ones. Ideally a new thermocouple is uniform in relation to their chemical and physical properties, and consequently has homogeneous Seebeck coefficient. The thermocouple, when in use in an industrial process or when subjected to calibration, is susceptible to changes in their homogeneity caused by external agents such as, for example, temperature, degeneration, chemical contamination, and mechanical stresses. This effect is commonly overlooked or unknown by many users of thermocouple in industry and in laboratories of calibration. However, it is considered by experts as the largest effect, if not the largest one, interfering in the temperature measurements. This work describes the performance evaluation of a device developed for the analysis of homogeneity in the thermocouple by the method of the two gradients, by comparing it with the method of one gradient in thermostatic bath of sodium nitrate (molten salts). This device is controlled by a program developed in Labview® platform / National Instruments, with capacity to automatically process the data. The investigations were carried out using thermocouples S-type noble metal (Pt – Pt/10%Rh) typically used as a standard reference, and thermocouple K-type (Chromel-Alumel), that is the most used in industrial processes. The thermocouples were mapped 260 mm, 10 mm by 10 mm, for measuring the junction temperature of 200 °C. The largest difference found between the two methods was 7.155 µV for the thermocouple S-type and 354.85 µV for K-type thermocouple.

Key Words: Homogeneities Analysis; Seebeck coefficient; Thermocouple; Thermolement; Thermoelectricity.

Lista de Ilustrações

Figura 1	Thomas Johann Seebeck	24
Figura 2	Experiência de Seebeck sobre Campo Magnético	25
Figura 3	Agitação Molecular de um Condutor Elétrico sob Gradiente Térmico	25
Figura 4	Desbalanceamento de Cargas em um Condutor Elétrico	26
Figura 5	Polaridade nos Termoelementos por Gradiente Térmico em Configuração de Termopar	26
Figura 6	Representação Simbólica do Sensor Termopar	28
Figura 7	Representação Incorreta da Geração de <i>Fem</i> no Termopar	28
Figura 8	Ilustração da Real Região da Geração de <i>Fem</i> no Termopar	29
Figura 9	Superfície de Fermi (eixos x, y e z)	31
Figura 10	Distribuição Fermi	34
Figura 11	Diagrama da Função de Fermi	35
Figura 12	Diagrama de Banda de Energia, Distribuição Fermi-Dirac e Distribuição De Cargas versus Energia	36
Figura 13	Movimento de uma Lacuna sob Diferença de Potencial (DDP)	37
Figura 14	Gradiente de Temperatura x Distribuição de Cargas	37
Figura 15	Estrutura Cúbica de Corpo Centrado (CCC), modelo de esferas rígidas	38
Figura 16	Estrutura Cúbica de Faces Centradas (CFC), modelo de esferas rígidas	39
Figura 17	Estrutura Cúbica Hexagonal Compacto (HC), modelo de esferas rígidas	39
Figura 18	Exemplos de Defeitos Pontuais mais Comuns	41
Figura 19	Discordância Tipo Cunha e Tipo Hélice	42
Figura 20	Contorno de Grão	42
Figura 21	Discordância em Cunha	43
Figura 22	Empilhamento de Discordâncias em Um Contorno de Grão	44
Figura 23	Deformação Plástica	45
Figura 24	Exemplo de Precipitado Coerente	46
Figura 25	Curvas Características de Tratamento Térmico	47

Figura 26	Etapas do Recozimento Subcrítico	50
Figura 27	Termopar Montagem Convencional e Mineral	52
Figura 28	Tipos de Junções de Medição em Termopar de Isolação Mineral	52
Figura 29	Condutor Elétrico com Gradiente Térmico	53
Figura 30	Circuito Equivalente a Célula Seebeck	56
Figura 31	<i>Fem</i> Seebeck Absoluta x Coeficiente Seebeck Absoluto	59
Figura 32	Termopar Homogêneo	60
Figura 33	Termopar Homogêneo com Metal Intermediário (I)	61
Figura 34	Termopar Homogêneo com Metal Intermediário (II)	61
Figura 35	Termopar Homogêneo com Temperatura Intermediária	62
Figura 36	Circuito Termoelétrico Elementar	64
Figura 37	Termopar com Gradiente Térmico	65
Figura 38	Comparação das <i>Fems</i> Seebeck Absoluta e Relativa	67
Figura 39	Circuitos de Termopar	69
Figura 40	Típico Circuito de Termopar	70
Figura 41	Temperatura das Junções / Posição no Circuito (T/x)	71
Figura 42	Coeficiente de Seebeck Não Homogêneo	82
Figura 43	Termoelemento Homogêneo	83
Figura 44	Termopares Após Três Ciclos Térmicos em 900 °C	87
Figura 45	Ilustração de um Sistema de Calibração de Termopar	89
Figura 46	Localização do Termopar não Homogêneo na Calibração e no Processo	90
Figura 47	Efeito da Não Homogeneidade na Imersão do Termopar	91
Figura 48	Efeito Termoelétrico Causado Pela Zona Móvel no Termopar (<i>a e b</i>)	93
Figura 48	Efeito Termoelétrico Causado Pela Zona Móvel no Termopar (<i>c</i>)	94
Figura 49	Representação Elétrica das Células de Seebeck	95

Figura 50	Dispositivo de Análise da Homogeneidade-Método dois Gradientes	97
Figura 51	Dispositivo de Deslocamento com Vista Explodida	98
Figura 52	Motor de Passo Bipolar	98
Figura 53	<i>Driver Chopper 5 A</i>	99
Figura 54	Fonte Simétrica $\pm 12 V(cc) / 10 A$	99
Figura 55	Relé de Estado Sólido	99
Figura 56	Encapsulamento da Resistência de Aquecimento	100
Figura 57	Desenho do Aquecedor	101
Figura 58	Dispositivo de Deslocamento com Aquecedor Acoplado	102
Figura 59	Módulo MyDaq	102
Figura 60	Medidor de Termopar TC-01-USB	103
Figura 61	Painel Frontal dos Comandos de Deslocamento	103
Figura 62	Painel Frontal do Comando do Aquecedor	104
Figura 63	Painel Frontal do Comando PID do Aquecedor	104
Figura 64	Painel Frontal dos Dados do Termopar em Análise	105
Figura 65	Homogeneidade do Termopar Tipo K, sensor novo	108
Figura 66	Homogeneidade do Termopar Tipo S, sensor novo	109
Figura 67	Perfil Térmico do Forno Utilizado Para Induzir Não Homogeneidade em 880 °C	110
Figura 68	Perfil Térmico do Forno Utilizado Para Induzir Não Homogeneidade em 1090 °C	110
Figura 69	Homogeneidade do Termopar Tipo K, após Indução ($\mu V / mm$)	111
Figura 70	Homogeneidade do Termopar Tipo S, após Indução ($\mu V / mm$)	112
Figura 71	Homogeneidade do Termopar Tipo K, após Indução ($\mu V / mm$) – Dois Gradientes	113
Figura 72	Homogeneidade do Termopar Tipo S, após Indução ($\mu V / mm$) – Dois Gradientes	114

Figura 73	Comparação Entre os Dois Métodos – Termopar Tipo K ($\mu V / mm$)	114
Figura 74	Comparação Entre os Dois Métodos – Termopar Tipo S ($\mu V / mm$)	115
Figura 75	Módulo de Geração PWM	139
Figura 76	Módulo de Comando Estático do Motor	139
Figura 77	Módulo de Comando Dinâmico do Motor	140
Figura 78	Módulo do Comando PID do Aquecedor	140
Figura 79	Módulo de Seleção do Tipo do Termopar para Análise	141
Figura 80	Módulo de Aquisição do Sinal do Termopar em Análise	141
Figura 81	Módulo de Pico e Vale do Sinal do Termopar em Análise	142
Figura 82	Módulo de Apresentação Gráfica do Termopar em Análise	142

Lista de Tabelas

Tabela 1	<i>Fem</i> Seebeck absoluta de alguns elementos ($\mu\text{V} / ^\circ\text{C}$)	58
Tabela 2	Limites de temperatura em relação às bitolas dos termoelementos	73
Tabela 3	Gradiente Térmico Axial do Aquecedor	101
Tabela 4	Incerteza Para o Termopar Tipo K	116
Tabela 5	Incerteza Para o Termopar Tipo K Induzido	117
Tabela 6	Incerteza Para o Termopar tipo S	118
Tabela 7	Incerteza Para o Termopar tipo S Induzido	119
Tabela 8	Influência da Componente Homogeneidade na Estimativa da Incerteza	120
Tabela 9	Método Dois Gradientes x Um Gradiente	123
Tabela 10	Incerteza Para o Termopar Tipo K - Método Um Gradiente	143
Tabela 11	Incerteza Para o Termopar Tipo S - Método Um Gradiente	144
Tabela 12	Incerteza Para o Termopar tipo K - Método Dois Gradientes	145
Tabela 13	Incerteza Para o Termopar tipo S - Método Dois Gradientes	146

Lista de abreviaturas e siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ALUMEL	Níquel / 2% Manganês / 2% Alumínio / 1% Silício
ANSI	American National Standards Institute
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
AWG	American Wire Gauge
BITS	Binarys Digits
CONSTANTAN	Cobre / 45% Níquel
CROMEL	Níquel / 10% Cromo
EURAMET	European Association of National Metrology Institutes
FEM	Força Eletromotriz
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
ISA	International Society of Automation
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NIST	National Institute of Standards and Technology
USB	Universal Serial Bus

Lista de Símbolos

$^{\circ}C$:	Grau Célsius
$^{\circ}F$:	Grau Fahrenheit
K	:	Kelvin
T	:	Temperatura
σ	:	Coeficiente de Seebeck
V	:	Volt
E	:	<i>Fem</i> Seebeck
ΔE	:	Intervalo de <i>Fem</i> Seebeck
ΔV	:	Intervalo de Tensão
ΔT	:	Intervalo de Temperatura
C	:	Constante Arbitraria de Integração
$N.m$:	Newton metro
$min.$:	Minuto
V_{cc}	:	Tensão de Corrente Contínua
mm	:	Milímetro
in	:	Polegada
mV	:	Milivolt
μV	:	Microvolt
k	:	Fator de abrangência
δT	:	Ínfima Diferença de Temperatura
δx	:	Ínfimo Comprimento
KX	:	Cabo de Extensão Tipo K
DIO	:	Saída e Entrada de Sinal Digital
AO	:	Saída de Sinal Analógico
In	:	Entrada
Out	:	Saída

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	20
1.1	Motivação.....	20
1.2	Objetivos.....	23
1.2.1	Objetivo Geral.....	23
1.2.2	Objetivos Específicos.....	23
1.3	Contribuições Esperadas.....	23
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	24
2.1	Efeito Seebeck.....	24
2.2	Comportamento do Termopar.....	27
2.3	Região de Geração de Força Eletromotriz (<i>Fem</i>).....	28
2.4	Energia de Fermi.....	30
2.4.1	Superfície de Fermi.....	31
2.4.2	Função de Fermi.....	31
2.4.3	Bandas de Energia.....	35
2.5	Ligação Metálica.....	38
2.5.1	Sistema Cúbico de Corpo Centrado (CCC).....	38
2.5.2	Sistema Cúbico de Faces Centradas (CFC).....	38
2.5.3	Sistema Hexagonal Compacto (HC).....	39
2.5.4	Imperfeições Cristalinas.....	40
2.5.4.1	Defeitos Pontuais.....	40
2.5.4.2	Defeitos Lineares.....	41
2.5.4.3	Defeitos Planares.....	42
2.5.5	Mecanismos de Endurecimento.....	43
2.5.6	Endurecimento Devido ao Contorno de Grão.....	43
2.5.7	Endurecimento por Deformação.....	44

2.5.8	Endurecimento por Solução Sólida.....	45
2.5.9	Endurecimento por Precipitação.....	45
2.5.10	Tratamentos Térmicos.....	46
2.5.11	Têmpera.....	47
2.5.12	Revenimento.....	47
2.5.13	Homogeneização.....	48
2.5.14	Recozimento.....	48
2.5.15	Recozimento Subcrítico.....	49
2.5.16	Normalização.....	51
2.6	Equacionamento do Termopar.....	51
2.7	Lei dos Circuitos Termoelétricos.....	59
2.7.1	Lei dos Metais Homogêneos.....	59
2.7.2	Lei dos Metais Intermediários.....	60
2.7.3	Lei das Temperaturas Intermediárias.....	62
2.7.4	Circuito Termoelétrico.....	62
2.8	Análise de Circuito Termoelétrico.....	68
2.9	Termopares	73
2.9.1	Tipos de Termopares.....	73
2.9.2	Aplicação Geral dos Termopares mais Utilizados.....	74
2.9.2.1	Termopar Tipo T.....	74
2.9.2.2	Termopar Tipo J.....	74
2.9.2.3	Termopar Tipo K.....	74
2.9.2.4	Termopar Tipo E.....	75
2.9.2.5	Termopar Tipo N.....	75
2.9.2.6	Termopar Tipo S e Tipo R.....	76
2.9.2.7	Termopar Tipo B.....	76

2.9.3	Outros Termopares Construidos com Metais Nobres Puros.....	77
2.10	Homogeneidade.....	78
2.10.1	Influência da Homogeneidade no Processo Industrial.....	78
2.10.2	Influência da Homogeneidade na Calibração.....	80
2.10.3	Termoelemento Não Homogêneo.....	81
2.10.4	Erro de Não Homogeneidade.....	81
2.10.5	Homogeneidade – Conceitos e Avaliação	83
2.10.6	Não Homogeneidade Causada por Deformação Mecânica.....	85
2.10.7	Não Homogeneidade Causada por Contaminação Química.....	86
2.10.8	Não Homogeneidade Causada por Ciclos Térmicos.....	86
2.11	Fontes de Erro de Medição com Termopar.....	87
2.11.1	Erro de Imersão.....	87
2.11.2	Erro Galvânico.....	87
2.11.3	Erro de Equivalência dos Termoelementos.....	87
2.12	Medição na Calibração x Medição no Processo.....	88
2.13	Métodos de Análise da Não Homogeneidade.....	92
2.13.1	Medições em Banhos e Fornos – Método de Um Gradiente.....	92
2.13.2	Medições Com Método de Dois Gradientes.....	92
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	97
3.1	Dispositivo de Análise da Homogeneidade Termoelétrica.....	97
3.2	Custo do Dispositivo.....	105
3.3	Análise dos Gradientes Térmicos no Dispositivo.....	106
3.4	Análise pelo Método de Um Gradiente Térmico.....	107
3.4.1	Características dos Termopares Analisados.....	107
3.4.2	Equipamentos Utilizados no Método de Um Gradiente Térmico.....	107
3.4.3	Análise Prática pelo Método de Um Gradiente Térmico.....	108

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	108
4.1	Resultados da Análise pelo Método de Um Gradiente Térmico.....	108
4.2	Indução da Não Homogeneidade nos Termopares Novos.....	109
4.3	Análises Pós Indução pelo Método de Um Gradiente.....	111
4.4	Resultados Pós Indução - Método Dois Gradientes.....	113
4.5	Comparação Entre os Resultados dos Dois Métodos.....	114
4.6	Discussão Sobre os Resultados.....	115
4.6.1	Componente Homogeneidade Termoelétrica no Cálculo da Incerteza.....	115
4.6.2	Detalhamento da Análise.....	121
4.7	Comparativo: Método Dois Gradientes x Um Gradiente.....	123
5	CONCLUSÃO.....	125
5.1	Sugestões para Trabalhos Posteriores.....	126
	REFERÊNCIAS.....	127
	REFERÊNCIAS CONSULTADAS.....	131
	ANEXO A - Automação do Dispositivo Elaborada na Plataforma Labview®.....	135
	ANEXO B - Incerteza de Medição dos Resultados das Análises.....	139

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

Segundo Holmsten *et al.* (2008), a homogeneidade termoelétrica nos termoelementos é uma das principais componentes da incerteza de medição de temperatura com termopar. No processo de calibração é importante quantificar a homogeneidade do termopar e considerá-la na avaliação do resultado e da incerteza de medição.

De acordo com Hiti *et al.* (2005), a compreensão do funcionamento de um termopar é necessária para entender como e porque há um grande potencial de erro ao se fazer medições de temperatura com este tipo de sensor, inclusive com aqueles que foram calibrados e certificados. A simples construção de um circuito composto por apenas dois fios diferentes, oculta uma complexidade devido à dependência termoelétrica sobre os gradientes de temperatura ao longo de toda a sua extensão. A sensibilidade termoelétrica, que é a relação de geração da força eletromotriz (*fem*) proporcional ao gradiente térmico, é denominada de coeficiente de Seebeck. Se o coeficiente de Seebeck é uniforme, homogêneo por toda a extensão do termopar, a *fem* gerada será relacionada somente com as extremidades isotérmicas do circuito.

Na prática, a homogeneidade do coeficiente de Seebeck é altamente susceptível a variáveis mecânicas, térmicas, químicas, magnéticas e nucleares. Essas intervenções podem ocasionar aleatoriamente zonas de não homogeneidade termoelétrica. Esta não homogeneidade é considerada como uma das principais fontes de erro na medição de temperatura e na avaliação da incerteza da calibração de termopares.

De acordo com Abdelaziz e Edler (2009), existem alguns métodos de avaliação da homogeneidade do coeficiente de Seebeck. Os mais utilizados são realizados em banhos termostáticos, células de ponto fixo de temperatura (método de um gradiente), e por dispositivo de aquecimento móvel (método de dois gradientes). As principais particularidades de um sistema de avaliação de homogeneidade são a abrangência do gradiente de temperatura e a uniformidade térmica, que determinam a resolução dimensional e a resolução da *fem* gerada pelo sistema.

O sistema de análise da homogeneidade por imersão em meio térmico é denominado método de um gradiente térmico. Este método consiste na imersão ou imersão do termopar lentamente e milimetricamente num meio isotérmico com as suas junções em temperaturas conhecidas e estáveis. Neste procedimento, caso haja alguma região com o coeficiente de Seebeck não homogêneo, situado na região de interface do meio isotérmico e a temperatura ambiente, o sistema de monitoramento acusará uma alteração da *fem* gerada pelo termopar.

O sistema de análise da homogeneidade por deslocamento de uma pequena zona aquecida, ao longo de um termopar, é denominado de método de dois gradientes. As junções ficam em temperaturas conhecidas e estáveis gerando uma *fem* fixa. Este método induz duas regiões de gradiente térmico nas duas extremidades do aquecedor e caso não haja homogeneidade do coeficiente de Seebeck nas duas ou em uma das regiões dos dois gradientes, a *fem* de referência do termopar será alterada.

Em ambos os métodos, caso haja alguma região com não homogeneidade no coeficiente de Seebeck, haverá alteração na *fem* gerada pelo termopar causando erro na medição. O valor da *fem* de um termopar é proporcional a todos os gradientes de temperatura aplicados por toda a sua extensão (desde as junções de referência até a junção de medição) e aos coeficientes de Seebeck de cada segmento submetido a um gradiente térmico. Assim, desigualdade no coeficiente de Seebeck distribuído regionalmente nos termoelementos de um termopar, submetidos a gradiente térmico, causa interferências na *fem* total.

A finalidade da análise de homogeneidade é detectar uma possível variação do coeficiente de Seebeck nos termopares, e ao ser quantificada incorporá-la ao cálculo da estimativa da incerteza de medição da calibração conforme o documento GUM (2008). Dependendo dos resultados do teste, são possíveis três situações:

1º- Quando o desvio da *fem* estiver dentro da incerteza do sistema de análise, considera-se que o coeficiente de Seebeck do termopar é homogêneo, e este valor de incerteza do sistema deve ser agregado como uma variável de influência, com distribuição de probabilidade retangular, na equação da estimativa da incerteza de medição da calibração.

2º- No caso em que o desvio obtido esteja entre o valor da incerteza do sistema de análise e o valor máximo de tolerância da classe do termopar, este valor deverá ser incorporado como uma variável de influência, com distribuição de probabilidade retangular, na equação da estimativa da incerteza de medição da calibração.

3º- No caso em que o valor obtido apresente desvio superior ao valor de tolerância da classe de exatidão do termopar, recomenda-se o descarte do termopar ou submetê-lo a tratamento térmico que recupere suas características metrológicas.

Segundo Zvizdic e Veliki (2006), os termopares são frequentemente utilizados em profundidades de imersão diferentes daquelas na qual foram calibrados e existe pouca probabilidade de uma possível região não homogênea do termopar estar em uma zona isotérmica durante o uso num processo industrial. Se um forno de calibração possui uma adequada profundidade de imersão isotérmica, a interferência da homogeneidade do coeficiente de Seebeck pode não ser detectada durante a calibração, porque a área não homogênea estará em meio isotérmico e com isso não gerará *fem*. Os laboratórios que realizam calibração de termopar devem avaliar a homogeneidade desses transdutores/sensores, considerando-a nos resultados apresentados no certificado de calibração emitido, informando assim valores que representem a realidade do comportamento do termopar.

Este trabalho é motivado pela carência de estudos sobre este assunto de homogeneidade do coeficiente de Seebeck no cenário brasileiro e pelo impacto na incerteza das medições de temperatura realizadas com termopar, tanto nos processos industriais quanto em laboratórios de calibração.

Procura-se com este trabalho o desenvolvimento de um dispositivo para a avaliação da homogeneidade de termopares, pelo método de dois gradientes, a quantificação do valor deste comportamento o qual deverá ser agregado ao cálculo da estimativa da incerteza de medição na calibração de um termopar.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem o objetivo de desenvolver um dispositivo aplicado à avaliação da homogeneidade do coeficiente de Seebeck em termopares.

1.2.2 Objetivos Específicos

A homogeneidade do coeficiente de Seebeck nos termopares é um efeito altamente significativo, principalmente em termopares já utilizados em processos industriais. Como este efeito é indesejável ao termopar, uma maneira de se obter um grau de confiança em medições com este sensor é quantificar periodicamente este comportamento. Neste trabalho será realizada a comparação dos resultados obtidos com o dispositivo proposto com os resultados obtidos pelo método tradicional em banho termostático de nitrato de sódio.

1.3 Contribuições Esperadas

A contribuição esperada é a divulgação da importância da consideração do efeito da homogeneidade do coeficiente de Seebeck tanto para os laboratórios de calibração quanto para os usuários de termopares, além do desenvolvimento de um dispositivo qualificado para esta análise.

REFERÊNCIAS

ABDELAZIZ, Y. A.; EDLER, F. **A Method for Evaluation of the Inhomogeneity of Thermoelements**. IOP Publishing. Londres, 2009. 4p.

ANDERSON, R. L; ADAMS R. K.; DUGGINS, B. C.; **Limitations of Thermocouples in Temperature Measurements**. Oak Ridge National Laboratory. Oak Ridge, 1984. 33p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS; **STP 492: The Theory and Properties of Thermocouple Elements**. Philadelphia, 1971. 94p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS; **ASTM MNL-12: Manual on the Use of Thermocouples in Temperature Measurement**, 4^a Ed. Philadelphia, 1993. 312p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS; **ASTM E 220-02: Test Method for Calibration of Thermocouples by Comparison Techniques**. Philadelphia, 2002. 15p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS; **ASTM E 230-03: Standard Specification and Temperature-Electromotive Force (EMF) Tables for Standardized Thermocouples**. Philadelphia, 2003. 192p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS; **ASTM E 563-02: Preparation and Use of an Ice-Point Bath as a Reference Temperature**. Philadelphia, 2002. 4p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS; **ASTM E 696-00: Standard Specification for Tungsten-Rhenium Alloy Thermocouple Wire**. Philadelphia, 2000. 3p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS; **ASTM E 988-96: Standard Temperature-Electromotive Force (EMF) Tables for Tungsten-Rhenium Thermocouples**. Philadelphia, 2002. 2p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS; **ASTM E 1751-00: Standard Guide for Temperature Electromotive Force (emf) Tables for Non-Letter Designated Thermocouple Combinations**. Philadelphia, 2000. 99p.

ANISIMOV, V. I., ZANEN, J., ANDERSEN, O. K.; **Band Theory and Mott Insulators: Hubbard U Instead of Stoner I**. Max-Planck-Institut für Festkörperforschung. Stuttgart, 1991. 12p.

AMERICAN SOCIETY FOR MATERIALS; **Fundamentals of the Heat Treating of Steel- Chapter II**. Cleveland, 2003. 18p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS; **ABNT NBR 12550 – Termometria – Terminologia**. São Paulo, 1998. 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS; **ABNT NBR 13770 - Termopar - Calibração por Comparação com Instrumento-padrão**. São Paulo, 2013. 13p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS; **ABNT NBR 12771 – Termopares – Tabelas de Referência**. São Paulo, 1999. 64p.

BENTLEY, R. E.; **Theory and Practice of Thermoelectric Thermometry – Volume 3**.CSIRO. Sydney. 1998. 245p.

BERRY, J. M.; MARTIN, D. L.; **STP-178 Thermocouple Immersion Errors**. American Society for Testing and Materials. Philadelphia, 1956. 8p.

BURNS, G. W.; SCROGER, M. G.; **NIST 250-35: The Calibration of Thermocouples and Thermocouples Materials**. National Institute of Standards and Technology. Gaithersburg, 1989. 199p.

CABALLERO, F. G., *et al.* **Time-Temperature-Transformation Diagram Within the Bainitic Temperature Range in a Medium Carbon Steel**. Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas – Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid, 2004. 10p.

DIGGES, T. G., ROSENBERG, S. J., GEIL, G. W.; **Heat Treatment and Properties of Iron and Steel – Monograph 88**. National Bureau of Standards. Gaithersburg, 1966. 48p.

EUROPEAN ASSOCIATION OF NATIONAL METROLOGY INSTITUTES; **Euramet/cg-08/v.01: Calibration of Thermocouples**. Braunschweig, 2011. 19p.

FLORIDA CENTER FOR INSTRUCTIONAL TECHNOLOGY. Consulta em página específica. Disponível em: <<http://etc.usf.edu/clipart/35600/35600/35659/seebeck>>. Acesso em: 06/10/2013.

BEREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES – BIPM; **Evaluation of Measurement Data – Guide to the Expression of Uncertainty In Measurement – GUM**. Paris, 2008. 141p.

HITI, M. *et al.* **Measurement Device and Procedure for Thermocouple Inhomogeneity Detection**. University of Ljubljana-Faculty of Electrical Engineering. Ljubljana, 2005. 6p.

HOLMSTEN, M. *et al.* **Inhomogeneity Measurements of Long Thermocouples using a Short Movable Heating Zone**. Technical Research Institute of Sweden. Borås, 2008. 11p.

INSTRUMENT SOCIETY OF AMERICA; **ISA-MC.1:Temperature Measurement Thermocouples**. Research Triangle Park, 1982. 72p.

JÜNGEL, A., KRAUSE, S., PIETRA, P.; **Diffuse Semiconductor Moment Equations Using Fermi-Dirac Statistics**. University of Technology-Wiedner Hauptstr. Wien, 2010. 20p.

KASAP, S. O.; **Thermoelectric Effects in Metals: Thermocouples**. University of Saskatchewan. Saskatchewan, 2001. 11p.

KOLLIE, T. G., *et al.*; **Temperature Measurement Errors with type K (Chromel vs Alumel) Thermocouples due to Short-Ranged Ordering in Chromel**. Oak Ridge National Laboratory. Oak Ridge, 1975. 15p.

MILAN, M. T., MALUF, O., SPINELLI, D., FILHO, W. W. B.; **Metais Uma Visão Objetiva – 1ª Edição – Volume 1**, Editora Suprema. São Carlos, 2004. 254p.

NICHOLAS, J. V.; WHITE D. R.; **Traceable Temperatures: An Introduction to Temperature Measurement and Calibration**. Wiley Publishing. Hoboken, 2001. 444p.

ONGRAI, O *et al.*; **Comparative Study of Pt / Pd and Pt – Rh / Pt Thermocouples**. Engineering Measurement Division, National Physical Laboratory. Londres, 2010. 11p.

PAVLOV, B. P.; LIZHEVSKAYA, L. I.; SERMYAGINA, L. P.; **A Graphical Method of Calculating Thermocouple Errors due to Electrode Inhomogeneity**. Moscou, 1985. 3p.

PRIEST, D. N.; **How Accurate are Those Thermocouples?** Priest & Associates Consulting LLC. Pleasanton, 2006.7p.

REED, R. P.; **The effect of Interrogating Temperature Profile in the Seebeck Inhomogeneity Method of Test (SIMOT)**. American Institute of Physics. Albuquerque, 2003. 6p.

RODRIGUES, J., MURTEIRA, M.; **Física Quântica da Matéria: Energia de Fermi**. Instituto Superior Técnico. Lisboa, 2011. 4p.

SANTOS, P. R. F. *et al.*; **Relatório da Comparação Interlaboratorial com Termopar de Isolação Mineral Tipo K**. Comissão Técnica 11 – DICLA/INMETRO. Xerém, 2007. 11p.

SCIENCE & SOCIETY – PICTURE LIBRARY. Consulta em página específica. Disponível em: <<http://www.ssplprints.com/image.php?imgref=10303147>>. Acesso em 18/11/2013.

SHOCKLEY, W.; **Electrons and Holes in Semiconductors**. Bell Telephone Laboratories. Princeton. 1950. 558p.
SIGRIST, M.; **Solid State Theory**. Institut für Theoretische Physik. Graz, 2013. 164p.

SLONEKER, K. C.; **Publication: Volume 159, Issue number 4: Understanding Thermocouples**. Ceramic Industry. Danville. 2009. 7p.

THE PENNSYLVANIA STATE UNIVERSITY. Consulta em página específica. Disponível em:<<https://www.e-education.psu.edu/matse201/node/555>>. Acesso em 15/09/2013.

VAN VLACK, L. H.; **Princípios de Ciência dos Materiais**. Editora Edgard Blücher. São Paulo, 1970. 224p.

ZUR, A., MCGill, T.C., SMITH, D.L.; **Fermi-Level Position at a Semiconductor-metal Interface**. California Institute of Technology. Pasadena, 1983. 18p.

ZVIZDIC, D., VELIKI T.; **Testing of Thermocouples for Inhomogeneity**. University of Zagreb. Zagreb, 2006. 5p.

REFERÊNCIAS CONSULTADAS

ANATYCHUK, L. I. *et al.*; **Inverse Problems of Thermoelectricity**. Institute of Thermoelectricity of the National Academy of Sciences and Ministry of Education and Science of Ukraine. Chernivtsi, 2011. 6p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS; **ASTM E 1129/E 1129M-98: Standard Specification for Thermocouple Connectors**. Philadelphia, 2002. 5p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS; **ASTM E 1652-03: Standard Specification for Magnesium Oxide and Aluminum Oxide Powder and Crushable Insulators Used in the Manufacture of Metal-Sheathed Platinum Resistance Thermometers, Base Metal Thermocouples, and Noble Metal Thermocouples**. Philadelphia, 2003. 8p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS; **ASTM E 608/E 608M-06: Standard Specification for Mineral-Insulated, Metal-Sheathed Base Metal Thermocouples**. Philadelphia, 2006. 8p.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS; **Temperature Measurement: Instruments and Apparatus**. ASME. New York, 2004. 134p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS; **ABNT NBR 13774 – Cabos e Fios de Compensação ou Extensão para Termopar – Tolerâncias e Identificação**, 2008. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS; **ABNT NBR 13863 – Preparação e Uso de Junção de Referência para Calibração de Termopar**. São Paulo, 2008. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS; **ABNT NBR 14097 - Termopar Isolação Mineral**. São Paulo, 1998. 5p.

BAUSCHKE, D. *et al.*; **Thermowell Calculations**. Rosemount, Inc. Chanhassen, 2011. 24p.

BERNHARD, F.; **In-situ Calibration of Inhomogeneous Thermocouples by Integrated Miniature fixed-point Cells**. Ilmenau University of Technology. Ilmenau, 2007. 18p.

BONNIER, G., *et al.*; **Model for Uncertainty Estimation in Comparison Calibration of Thermocouples**. In: XVII Imeko World Congress Metrology in the 3rd Millennium, 2003, Dubrovnik, Croacia. **Proceedings XVII Imeko World Congress**, June 22-27. Dubrovnik. Croatia. 6p.

BRAGIN, B. K.; PAVLOV, B. P.; **Method of Determining the Thermoelectric Inhomogeneity of the Electrodes of Thermocouples**. Moscou, 1979. 3p.

CASAS-VÁZQUEZ, J.; JOU D.; **Temperature in Non-equilibrium States: Review of Open Problems and Current Proposals**. Institute of Physics Publishing. Barcelona, 2003. 87p.

CASTANHO, M. A. P.; BALDO, C. R.; **A Study of Inhomogeneities of Thermocouples and its Contribution to the Calibration Uncertainty Calculus**. In: XX Imeko World Congress Metrology for Green Groth, 2012, Busan, Republica da Coreia. 4p.

CASTANHO, M. A. P.; LINK, W.; PEREIRA, M.F.F.; **Validação de Calibração de Termopares pelo Método da Ponte (Pontos do Ouro e do Paládio)**. Sociedade Brasileira de Metrologia. Recife, 2003. 8p.

DIVISÃO DE ACREDITAÇÃO DE LABORATÓRIOS; **NIT-DICLA-021: Expressão da Incerteza de Medição por Laboratórios de Calibração**. Inmetro. Xerém, 2013. 27p.

FORNEY, L. J.; MEEKS, E. L.; FRALICK, G. C.; **Frequency Response of a Suported Thermocouple Wire: Effects of Axial Conduction**. Georgia Institute of Technology. Tsukuba, 1991. 62p.

INDUSTRIAL HEATING. **Thermocouple - Nearly 200 years old, Still Getting Better**. Pittsburgh, 2009. 4p.

ISOTHERMAL TECHNOLOGY; **Temperature Calibration with Isotech Block Baths**. Isotech. Southport, 1999. 80p.

IZUCHI, M. *et al.*; **Uncertainty Assessment on the Calibration of Pt/Pd Thermocouples at the Freezing Point of Silver**. Fukui University. Tsukuba, 2003. 3p.

JAHAN, F.; BALLICO M. J.; **APMP-T-S1-04: Regional Comparison of Type R (Pt-Pt13%Rh) Thermocouples from 0 to 1.100 °C**. National Measurement Institute of Australia. Sydney, 2006. 55p.

JAHAN, F.; BALLICO, M. **Overcoming Inhomogeneity and Hysteresis Limitations of Type R Thermocouples in an International Comparison**. National Measurement Institute. Sydney, 2007. 11p.

KERLIN, T. W.; JOHNSON, M. P.; **Thermocouples: What one needs to Know?** International Society of Automation. Durham, 2011. 4p.

MARKOV, O. I.; **Influence of the Concentration Distribution of Weakly Degenerate Carriers on the Efficiency of an Arm of a Thermocouple**. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, Vol. 79, nº1. Orel, 2006. 6p.

MEIRELLES, B. R.; **Efeitos de Desordem nas Propriedades Estruturais e Termodinâmicas de Ligas Metálicas**. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2005. 97p.

MOREIRA, L.; **Revista Cerâmica Industrial, Volume 7, Número 5 de Setembro/Octubre de 2002: Medição de Temperatura Usando-se Termopar.** Associação Brasileira de Cerâmica. São Paulo, 2002. 3p.

PEARCE, J. V.; HARRIS, P. M.; GREENWOOD J. C.; **Evaluating Uncertainties in Interpolations Between Calibration Data for Thermocouples.** National Physical Laboratory. Londres, 2010. 10p.

PETKOVIC, S. G. *et al.*; **Stability of type K Thermocouples at 1.000 °C.** Instituto Nacional de Metrologia, Padronização e Qualidade Industrial. Xerém, 2003. 10p.

POLLOCK, D. D.; **Short-Range Ordering in Nickel-Chromium Thermocouple Alloys.** American Society for Testing and Materials. Philadelphia, 1983. 2p.

PROGRAMA DE ENSAIOS DE PROFICIÊNCIA DA DIRETORIA DE METROLOGIA CIENTÍFICA E INDUSTRIAL PEP-DIMCI; **COMPARAÇÃO INTERLABORATORIAL COM TERMOPAR TIPO K DE -40 A 300 °C RELATÓRIO FINAL – Nº 007/11.** Inmetro. Xerém, 2011. 23p.

RIPPLE, D. C.; BURNS, G. W.; SCROGER, M. G.; **NIST IR 5340: Assessment of Uncertainties of Thermocouple Calibrations at NIST.** Process Measurements Division - National Institute of Standards and Technology . Gaithersburg, 1993. 35p.
RIPPLE, D. C.; BURNS, G. W.; **Standard Reference Material 1749: Au/Pt Thermocouple Thermometer.** National Institute of Standards and Technology. Gaithersburg, 2002. 43p.

SLONEKER, K. C.; **Life Expectancy Study of Small Diameter Type E, K and N Mineral-Insulated Thermocouples Above 1000 °C in Air.** Electronic Development Labs. Danville, 2011. 11p.

TAMBA, J., *et al.*; **Evaluating the Inhomogeneity of Thermocouples Using a Pressure-Controlled Water Heat Pipe.** National Metrology Institute of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology. Tsukuba, 2011. 16p.

TAMURA, Y.; UEMATSU, C.; **Inhomogeneity of base Metal Thermocouples.** Fukui University. Fukui, 2003. 4p.

TAVENER, J. P.; AYRES, D. J.; DAVIES, N. **Industrial Measurements With Very Short Immersion & Surface Temperature Measurements.** Isothermal Technology Limited. Southport, 199?. 6p.

VALENCIANI, V. C.; **Ligações em Estrutura de Aço.** Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 1997. 352p.

WANG, T. P. *et al.*; **Stabilized Metal Sheathed Type K and E Thermocouples Improve Turbine Efficiency.** Thermo Electric Canada. Ontario, 1997. 10p.

WHITE, D. R.; MASON, R. S. **A Thermocouple Homogeneity Scanner Based on an Open Pressure-Controlled Water Heatpipe.** Measurement Standards Laboratory. Lower Hutt, 2010. 9p.

ZAID, G.; **A Method to Determine Inhomogeneity of Thermocouple.** Indonesian Institute of Sciences. Tangerang, 2002. 4p.