

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL
TESE DEFENDIDA POR Benedito Sá de Araújo
Filho E APROVADA P
COMISSÃO JULGADORA EM 18 OUT 1999


ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

Projeções do Desvio de Calibração e Estudo da Confiabilidade de Termopares

Autor: Benedito Sá de Araújo Filho

Orientador: Paulo Roberto G. Kurka

Co-orientador: Kamal A. R. Ismail

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE PROJETO MECÂNICO**

Projeções do Desvio de Calibração e Estudo da Confiabilidade de Termopares

Autor: Benedito Sá de Araújo Filho

Orientador: Paulo Roberto G. Kurka

Co-orientador: Kamal A.R. Ismail

Curso: Engenharia Mecânica

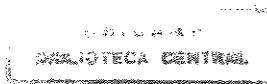
Área de Concentração: Projetos Mecânicos

Tese de doutorado apresentada à Comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Campinas 1999

S.P. - Brasil

ii



UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	110/0000
V.	EX.
TCMBO BC/	40189
PROC.	278/00
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	29/01/00
N.º CPD	

CM-00135985-1

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

Ar15p Araújo Filho, Benedito Sá de
Projeções do desvio de calibração e estudo da
confiabilidade de termopares / Benedito Sá de Araújo
Filho.--Campinas, SP: [s.n.], 1999.

Orientadores: Paulo Roberto G. Kurka, Kamal A. R.
Ismail.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Confiabilidade (Engenharia). 2. Termoeletricidade.
3. Detectores. I. Kurka, Paulo Roberto G.. II. Ismail,
Kamal A. R.. III. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Mecânica. IV. Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE PROJETO MECÂNICO**

TESE DE DOUTORADO

**Projeções do Desvio de Calibração e Estudo da
Confiabilidade de Termopares**

Autor: Benedito Sá de Araújo Filho

Orientador: Paulo Roberto G. Kurka

Co-orientador: Kamal A.R. Ismail



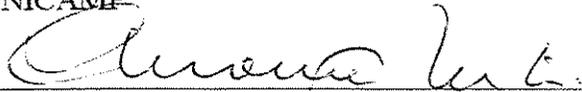
Prof. Dr. Paulo Roberto Gardel Kurka, Presidente
FEM / UNICAMP



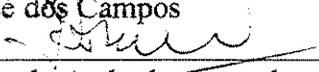
Prof. Dr. Franco Giuseppe Dedini
FEM / UNICAMP



Prof. Dr. Antônio Batocchio
FEM / UNICAMP



Prof. Dr. Carlos de Moura Neto
ITA / São José dos Campos



Prof. Dr. Irany de Andrade Azevedo
ITA / São José dos Campos

Campinas, 18 de outubro de 1999

Dedicatória

Dedico este trabalho à memória de meus pais, à minha esposa Jurema e aos meus filhos Maria Cláudia e Carlos Eduardo.

Agradecimentos

Ao Dr. Paulo Roberto G. Kurka pelo apoio e orientação na realização deste trabalho.

Ao Dr. Kamal A.R. Ismail e sua equipe técnica de laboratório pelo fornecimento dos dados que serviram para o desenvolvimento desta tese.

À Direção do Instituto de Aeronáutica e Espaço, e à Chefia da Divisão de Sistemas Bélicos pelo apoio na execução de todas as atividades relacionadas com este trabalho.

À Eng.^a Maria Fátima C. Sá Ribeiro pela valiosa colaboração.

À CEMAN - Central de Manutenção S.A. (atual ABB) pelo fornecimento de dados experimentais de campo e apoio ao trabalho de pesquisa.

Ninguém pode se realizar só por ter talento. Deus dá talento:
o trabalho transforma o talento em gênio.

Anna Pavlova

Índice

1	Introdução	1
1.1	Considerações iniciais	1
1.2	Revisão bibliográfica	2
1.3	Organização do trabalho	6
2	Medidas de Estatística e de Confiabilidade	8
2.1	Introdução	8
2.2	Medidas de dispersão	9
2.2.1	Faixa de amplitudes	9
2.2.2	Variância	10
2.2.3	Desvio-padrão	10
2.3	Função densidade probabilidade	10
2.4	Distribuição gama	10
2.5	Distribuição qui-quadrado	13
2.5.1	Propriedades da distribuição qui-quadrado	15
2.6	Distribuição amostral do desvio-padrão e qui-quadrado	15
2.7	Intervalo de confiança para variância da população	16
2.8	Teoria da confiabilidade	17
2.8.1	Conceito de confiabilidade	17
2.8.2	Problemas estudados pela confiabilidade	18
2.8.3	Falhas estatísticas	18
2.8.4	Teoria estatística e confiabilidade	20
2.8.5	Taxa condicional de falha	22
2.8.6	Curvas de vida	24

2.8.7 Distribuição de probabilidade em confiabilidade	25
2.9 Resumo do capítulo	37
3 Teoria de Termopares	38
3.1 Introdução	38
3.2 Efeitos termoelétricos	39
3.2.1 Efeito Seebeck	39
3.2.2 Efeito Peltier	40
3.2.3 Efeito Thomson	41
3.2.4 Resumo	42
3.3 As leis termoelétricas	42
3.3.1 Primeira lei termoelétrica	42
3.3.2 Segunda lei termoelétrica	43
3.3.3 Terceira lei termoelétrica	45
3.4 Critérios de seleção de termopares	47
3.5 Termopares mais usados	48
3.5.1 Termopares Tipo S	48
3.5.2 Termopares Tipo R	49
3.5.3 Termopares Tipo B	49
3.5.4 Termopares Tipo J	50
3.5.5 Termopares Tipo T	50
3.5.6 Termopares Tipo K	50
3.5.7 Termopares Tipo E	51
3.6 Fabricação de termopares	52
3.7 Proteção de termopares	53
3.8 Calibração de termopares	55
3.9 Resumo do capítulo	57
4. Estudo das curvas de calibração e confiabilidade	58
4.1 Introdução	58
4.2 Curvas de calibração	59

4.3 Cálculo dos limites das curvas de calibração	67
4.4 Cálculo da confiabilidade de termopares	68
4.5 Resumo do capítulo	70
5 Resultado da Análise Experimental	71
5.1 Introdução	71
5.2 Tabelas	72
5.2.1 Termopares Tipo T- Cliente A	72
5.2.2 Termopares Tipo J - Cliente B	73
5.2.3 Termopares Tipo J - Cliente C	74
5.2.4 Termopares Tipo J - Cliente D	75
5.3 Resultados	78
5.3.1 Termopares Tipo T	78
5.3.2 Termopares Tipo J - Cliente B	83
5.3.3 Termopares Tipo J - Cliente C	89
5.3.4 Termopares Tipo J - Cliente D	98
5.3.5 Média entre termopares Tipo J	107
5.3.6 Conclusões	109
6 Conclusões e Sugestões para Próximos Trabalhos	110
6.1 Conclusões	110
6.2 Sugestões para próximos trabalhos	111
Referências Bibliográficas	113

Resumo

ARAÚJO FILHO, Benedito Sá, *Projeções do Desvio de Calibração e Estudo da Confiabilidade de Termopares*, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1999, 120 p. Tese (Doutorado).

O objetivo desta pesquisa é elaborar técnicas e critérios para a projeção de desvios de calibração e estudo de confiabilidade nas medidas de termopares. Propõe-se a criação de um modelo baseado no estudo dos desvios das curvas de calibração. A distribuição qui-quadrado é utilizada na determinação dos limites das curvas de desvio em função de tempo para diversos tipos de termopares em cada temperatura específica. O modelo exponencial é escolhido para a função de distribuição de confiabilidade. Os parâmetros de desvio são determinados a partir de um procedimento que tem por base a análise de dados experimentais. Resultados de aplicação prática da metodologia proposta são apresentados para o cálculo das curvas de confiabilidade de termopares do tipo T e J. São apresentadas sugestões sobre a extensão de uso e aperfeiçoamento das técnicas desenvolvidas.

Palavras-Chave

- Confiabilidade, Termopares

Abstract

ARAÚJO FILHO, Benedito Sá, *Projections of Calibration Deviation and Study of Thermocouple Reliability*, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1999, 120 p. Tese (Doutorado).

The purpose of the present work is to develop techniques and suitable criteria to be used in the prediction of calibration curve deviations and reliability of thermocouple measurements. The chi-squared distribution is used to determine the limits of time deviation curves of different thermocouple types, at specific temperatures. The exponential model is chosen to represent the reliability distribution function. Deviation parameters are determined from a procedure based on experimental data analysis. Results of the practical application of the proposed methodology are shown for the determination of reliability curves of thermocouples of the type T and J. Improvement of the techniques as well as extension of their applications are suggested at the end of the work.

Key-Words

- Reliability, Thermocouples

Lista de Figuras

2.1	Distribuição gama	12
2.2	Distribuição de qui-quadrado	13
2.3	Falhas casuais	23
2.4	Falhas por desgaste	23
2.5	Falhas precoces	24
2.6	Curva da banheira	25
2.7	Curva de probabilidade de falha $F(t)$	26
2.8	Curva de densidade de probabilidade de falha $f(t)$	27
2.9	Curva de taxa de falha $\lambda(t)$	27
2.10	Curva de confiabilidade $R(t)$	28
2.11	Distribuição normal	29
2.12	Confiabilidade da distribuição normal	30
2.13	F.d.p. de Weibull para β com $\eta = 1$ e $\gamma = 0$	32
2.14	F.d.p. de Weibull para η com $\beta = 1$ e $\gamma = 0$	33
2.15	F.d.p. de Weibull para γ com $\beta = 1$ e $\eta = 1$	34
2.16	Curva de confiabilidade da distribuição de Weibull	35
2.17	Curva da taxa de falha da distribuição de Weibull	36
3.1	Efeito Seebeck	39
3.2	Efeito Peltier	40
3.3	Primeira lei termoelétrica	43
3.4	Segunda lei termoelétrica	43
3.5	Segunda lei termoelétrica	43
3.6	F.e.m. induzida por materiais	44

3.7	Terceira lei termoelétrica	45
3.8	Ligação em série e em paralelo	46
4.1	Gráfico desvio x tempo para termopares cromel-alumel	62
4.2	Curva de calibração do desvio x tempo para termopares Tipo K	64
4.3	Curva de calibração do desvio x tempo para termopares Tipo T	65
4.4	Curva de calibração do desvio x tempo para termopares Tipo J	66
4.5	Curva dos limites dos desvios x tempo	68
4.6	Curva de confiabilidade x tempo	69
5.1	Curva de desvio de calibração dos termopares Tipo T	78
5.2	Curva de limites dos desvios de termopares Tipo T, $T = 0,08^{\circ}\text{C}$	79
5.3	Curva de limites dos desvios de termopares Tipo T, $T = 50^{\circ}\text{C}$	80
5.4	Curva de limites dos desvios de termopares Tipo T, $T = 100^{\circ}\text{C}$	81
5.5	Curva de confiabilidade x tempo de termopares Tipo T	83
5.6	Curva de desvio de calibração dos termopares Tipo J-B	84
5.7	Curva de limites dos desvios de termopares Tipo J-B, $T = 78^{\circ}\text{C}$	85
5.8	Curva de limites dos desvios de termopares Tipo J-B, $T = 163^{\circ}\text{C}$	86
5.9	Curva de limites dos desvios de termopares Tipo J-B, $T = 250^{\circ}\text{C}$	87
5.10	Curva de confiabilidade x tempo de termopares Tipo J-B	89
5.11	Curva de desvio de calibração dos termopares Tipo J-C	90
5.12	Curva de limites dos desvios de termopares Tipo J-C, $T = 0,20^{\circ}\text{C}$	91
5.13	Curva de limites dos desvios de termopares Tipo J-C, $T = 5^{\circ}\text{C}$	92
5.14	Curva de limites dos desvios de termopares Tipo J-C, $T = 10^{\circ}\text{C}$	93
5.15	Curva de limites dos desvios de termopares Tipo J-C, $T = 25^{\circ}\text{C}$	94
5.16	Curva de limites dos desvios de termopares Tipo J-C, $T = 75^{\circ}\text{C}$	96
5.17	Curva de limites dos desvios de termopares Tipo J-C, $T = 150^{\circ}\text{C}$	96
5.18	Curva de confiabilidade x tempo de termopares Tipo J-C	98
5.19	Curva de desvio de calibração dos termopares Tipo J-D	99
5.20	Curva de limites dos desvios de termopares Tipo J-D, $T = 67^{\circ}\text{C}$	100

5.21	Curva de limites dos desvios de termopares Tipo J-D, T = 78°C	101
5.22	Curva de limites dos desvios de termopares Tipo J-D, T = 110°C	102
5.23	Curva de limites dos desvios de termopares Tipo J-D, T = 142°C	103
5.24	Curva de limites dos desvios de termopares Tipo J-D, T = 155°C	104
5.25	Curva de limites dos desvios de termopares Tipo J-D, T = 190°C	105
5.26	Curva de confiabilidade x tempo de termopares Tipo J-D	107
5.27	Curva de confiabilidade x tempo de termopares Tipo J	108

Lista de Tabelas

2.1	Distribuição qui-quadrado	14
3.1	Tubo de proteção de termopares em aplicações específicas	53
4.1	Desvio de termopares cromel-alumel em função do tempo	60
5.1	Desvio de temperatura x tempo para termopares Tipo T	72
5.2	Desvio de temperatura x tempo para termopares Tipo J-B	73
5.3	Desvio de temperatura x tempo para termopares Tipo J-C	74
5.4	Desvio de temperatura x tempo para termopares Tipo J-D	75
5.5	MTTF para termopares Tipo T	82
5.6	MTTF para termopares Tipo J-B	88
5.7	MTTF para termopares Tipo J-C	97
5.8	MTTF para termopares Tipo J-D	106
5.9	MTTF para termopares Tipo J	108

Nomenclatura

n	número de componentes de um conjunto
\bar{x}	média de um conjunto
$E(x)$	esperança de x
A	amplitude
$s^2(x)$	variância de um conjunto
$V(x)$	variância de x
$s(x)$	desvio-padrão de um conjunto
σ^2	variância populacional
σ	desvio-padrão populacional
$\Gamma(p)$	função gama
$\chi_{n,p}^2$	distribuição qui-quadrado
$1-\alpha$	nível de confiança
$F(t)$	probabilidade do componente falhar
$f(t)$	densidade probabilidade de falha
$R(t)$	confiabilidade do componente
$\lambda(t)$	taxa de falha
MTTF	tempo médio até falha
$m(t)$	tempo médio até falha
μ	média populacional
β	parâmetro de forma
γ	parâmetro de situação
η	parâmetro de escala
E_S	coeficiente de Seebeck
dQ_p	calor absorvido

E_P coeficiente de Peltier
 E_T coeficiente de Thomson
 D_K desvio de calibração

Capítulo 1

Introdução

1.1 Considerações iniciais

Medidas de temperatura são fatores primordiais em diversos processos industriais e a sua confiabilidade deve estar, idealmente, sempre dentro de certos padrões estabelecidos.

Existem sistemas onde a precisão da medida da temperatura é de vital importância para o seu correto funcionamento. Alguns processos exigem que uma dada temperatura seja mantida dentro de limites estreitos por um longo período de tempo. Para medição de temperatura são utilizados termopares.

Em muitos processos industriais os termopares funcionam corretamente, quando postos em utilização, até que haja evidência de uma falha mecânica ou sérios erros nas temperaturas indicadas. De qualquer maneira, muito tempo antes disso ocorrer, as medidas registradas pelos termopares podem ser imprecisas.

Qualquer instrumento de medida utilizado em linhas de produção sofre desgastes, seja devido ao tempo de uso ou devido a sua permanência em ambientes agressivos. Os primeiros indícios de desgastes que aparecem estão relacionados com a perda de precisão dos sensores, que são verificadas por um processo de calibração. Os desvios de temperatura registrados na calibração, servem como referência para procedimentos de compensação das leituras ou como critério de falha para a decisão sobre o descarte do componente. Um problema que surge é saber com que freqüência deve ser feito esse ajuste ou, em outras palavras, como se dá a evolução das perdas de calibração dos sensores. Essa é uma questão importante, pois a falta ou a realização desnecessária de uma intervenção de manutenção em uma linha de produção além de causar sérios problemas acarreta em maiores custos e tempo perdido. Toda manutenção, portanto, deve

ser corretamente programada visando maximizar a segurança e a relação custo /desempenho com a diminuição das perdas econômicas e das imprecisões técnicas.

Este trabalho tem por objetivo a realização de estudos sobre a progressão do desvio de calibração de termopares, bem como a aplicação destes resultados para a determinação de limites de confiabilidade dos processos que dependam da leitura de temperatura desses equipamentos.

1.2 Revisão bibliográfica

No início deste trabalho verificou-se que Kim (1992), Spiegel (1972) e Lipschutz (1972), realizaram estudo de medidas de dispersão (faixa de amplitude, variância e desvio-padrão). Estas medidas foram utilizadas para o estabelecimento de relações estatísticas do desvio de calibração dos termopares em função do tempo. Costa (1992), Casela (1990) e Meyer (1978) analisaram a distribuição qui-quadrado que é empregada na determinação dos limites do desvio-padrão das curvas de desvio em função do tempo, para diversos tipos de termopares em cada temperatura específica. A distribuição qui-quadrado é utilizada para análise na teoria das pequenas amostras (número de componentes menor do que 30). Isso porque em aplicações práticas de acompanhamento de desvio de calibração de termopares, o número de amostras disponíveis é sempre menor do que se desejaria para se realizar um estudo estatístico de grandes populações. Torna-se necessário, também, estabelecer uma relação entre a distribuição amostral do desvio-padrão e a distribuição qui-quadrado e, posteriormente, obter-se um intervalo de confiança num certo nível determinado para o desvio-padrão populacional.

Araújo Filho (1982) e Martins (1990) apresentam o conceito de confiabilidade. Desde o primeiro instante em que o homem produziu seus primeiros objetos manufaturados, introduziu-se o conceito do que hoje se entende por confiabilidade dos produtos e processos. Em primeiro lugar, interessa certamente que o produto tenha uma boa durabilidade, isto é, que durante um período, convenientemente ao longo de tempo, cumpra as especificações de desempenho para as quais foi projetado. No início de nossa civilização, os produtos eram simples, do ponto-de-vista de sua realização. Apesar de rudimentares, eles cumpriam a sua missão e satisfaziam aquelas expectativas, muito tímidas, para as quais tinham sido idealizados. A evolução das tecnologias de projeto e de fabricação tornaram os equipamentos bem mais complexos tanto na sua concepção quanto na sua operação. Esses fatores proporcionaram um grande avanço no estudo da teoria da

confiabilidade, pois teve-se necessidade de um conhecimento mais profundo dos modelos e da matemática utilizada para explicar e modelar as falhas dos componentes e sistemas.

Bazovsky (1961), Ireson (1966), Alven (1964) e Fuqua (1990), verificam as equações que descrevem a falha, sua densidade de probabilidade e a expressão da confiabilidade ao longo do tempo). Bérghamo Filho (1979), Marcovici (1992), Schwob (1969) e Shooman (1968) apresentam três tipos de falhas: as precoces, os desgastes e as casuais. É conhecido do ponto de vista estatístico, que existe comportamento diferenciado para a duração de vida de distintos componentes ou sistemas. Obviamente, esse comportamento diferente implica na necessidade de se considerar diferentes modelos estatísticos, isto é, funções de probabilidades distintas, para explicar e analisar o comportamento da distribuição de falhas em diversos tipos de componentes ou sistemas. Charles (1988), O'Connor (1994) e Billinton (1987) mostram algumas das distribuições de densidade de probabilidade de falha que são utilizadas na teoria da confiabilidade: a exponencial, a normal e a de Weibull.

Alguns trabalhos importantes sobre a confiabilidade de processos que utilizam sensores de temperatura podem também ser citados. Howell (1987), Huang (1991),(1994) e Kim (1987) estudam a confiabilidade de sensores de temperatura em veículos espaciais. Fazem uma análise das possíveis falhas nas medidas dos sensores de temperatura do motor principal de um veículo espacial. Para análise de falha dos sensores é escolhida a distribuição de probabilidade de falha exponencial, ou seja, a taxa de falha é constante. Nesse trabalho, supõe-se que o sistema pode ter vários estados de operação. O método empregado para o cálculo da probabilidade de falha é o de eventos compostos aproximados apresentado por Shooman (1968), que conduzem diretamente a expressões de integrais múltiplas para probabilidade de estado em termos da falha do sistema.

Denson (1998), Relatório AIR 5286 (1998), Evans (1998), La Sala (1998) e Ogunyemi (1997), mostram a evolução dos conceitos e métodos empregados na análise da confiabilidade ao longo do tempo. Em um sistema de medidas de temperatura, os sensores podem estar ligados em série ou em paralelo, Araújo Filho (1982), Leviting (1998), Medanic (1993), Yan (1978) e Billinton (1998) apresentam o efeito da redundância e a sua otimização, na análise de confiabilidade de sistemas série e paralelo. Hameury (1989), (1990), Rodrigues (1990) e Aggarwal (1989), descrevem a importância da qualidade dos componentes e a sua correta utilização para obter-se a confiabilidade necessária de um dado sistema. Dhillon (1988) apresenta

em seu trabalho modelos de confiabilidade do desempenho humano e a sua influência na qualidade de sistemas de engenharia.

Para um melhor conhecimento dos efeitos termoelétricos nos termopares foi realizada uma revisão da teoria termoelétrica. A análise dessa teoria inicia-se com os trabalhos de Benedict (1984), (1987), Nieto (1977), Schooley (1988), McGee (1988) e Kamal (1998), na qual se estudam os efeitos termoelétricos Seebeck, Peltier e Thomson. Da descoberta dos efeitos termoelétricos evolui-se para a definição das três leis que constituem a base da teoria termoelétrica. Depois da análise da teoria são analisados os trabalhos de Burns (1993), Nepomuceno (1990) e Preston (1990) nos quais são apresentados critérios de seleção para termopares, chegando-se aos tipos mais usuais nos processos de controle de temperaturas industriais: S, B, J, R, T, K e E, sendo que o tipo S, constituído de Pt 90% Rh 10%-Pt, é usado para definir a Escala Internacional Prática de Temperatura e também na calibração por comparação de outros termopares. Roeser (1968) mostra que a fabricação e a proteção de termopares exigem cuidados especiais e as normas técnicas devem ser seguidas com bastante critério

Burns (1989), Pollock (1991), ASTM E1159-87 (1992) e Mangum (1990) descrevem os princípios e os métodos de calibração dos termopares. O objetivo da calibração é determinar a relação entre a força eletromotriz e a temperatura. Um fator importante na calibração do termopar é a precisão do instrumento usado para medir a fem. A calibração pode ser realizada a ponto fixo ou por comparação com instrumentos padrões. Os pontos fixos podem ser, por exemplo, o ponto de ebulição do oxigênio, o ponto triplo da água e o ponto de congelamento do ouro.

Andrews (1987), apresenta um trabalho sobre estabilidade de termopares cromel-alumel. Realiza-se um estudo nas curvas de desvio da fem de termopares cromel-alumel a várias temperaturas e vários tempos. Baseados em dados apresentados nesse trabalho, determinam-se as curvas exponenciais de desvio de calibração em função do tempo para diversas temperaturas. Da análise dessa curva nota-se um aumento do desvio com o passar do tempo e uma metodologia de estudo é estabelecer uma condição de limite de desvio permitido e verificar em que tempo cada curva de uma determinada temperatura alcança esse limite.

Outro trabalho bastante relevante foi desenvolvido por Kamal (1998) com o objetivo de elaborar técnicas e critérios confiáveis para serem utilizados na manutenção de sensores de temperatura. Testou-se um conjunto de diversos termopares tipos K, T e J sob diferentes

condições de trabalho. Todos os termopares foram fabricados e testados no laboratório da UNICAMP segundo normas correspondentes. Analisando-se as curvas, nota-se um aumento do desvio com o passar do tempo. Verifica-se que para os três tipos analisados os desvios são maiores para os termopares tipo K, quando comparados com os desvios dos termopares tipos T e J. Outro resultado importante é que o desvio obedece a uma lei de variação exponencial ao longo do tempo.

Ripple (1994), Burns (1989), Taylor (1990) e GEUM (1993) estudam a incerteza na calibração de termopares e a influência destas nas medidas de temperaturas. Bentley (1992), Burns (1966) e (1992), McLaren (1982) e Wang (1992) apresentam trabalhos sobre a instabilidade de termopares. Vieira (1991), descreve recursos para se obter ganhos de produtividade e qualidade na medição de temperaturas utilizando termopares.

Yang (1996), (1997), Kim (1987), Janice (1997) e Henry (1993) mostram em seus trabalhos uma auto-avaliação de termopares e sua utilização em sistemas operacionais de medidas de temperatura. Bogue (1994), Wroe (1991) e Furniss (1993) apresentam trabalhos sobre sensores avançados e sua utilização em sistemas complexos.

Após o estudo da bibliografia citada, partiu-se para a criação de um método que visa obter a confiabilidade de termopares baseado no estudo do desvio das suas curvas de calibração. Dentro da bibliografia estudada não foi encontrado um método com as características apresentadas nesse trabalho, justificando assim, a definição de procedimentos e análise para determinação da confiabilidade de termopares. A metodologia empregada determina as curvas exponenciais do desvio de calibração para cada temperatura de um determinado termopar, seus limites e os gráficos de confiabilidade correspondentes. Calculam-se o desvio-padrão e os seus limites por meio de uma distribuição do tipo qui-quadrado. Assim, para cada conjunto de dados de calibração, chega-se a valores inferiores e superiores de tolerância quanto à chegada das condições limites de desvio. A coleção de tempos de tolerâncias até a chegada das condições limites, nas diferentes temperaturas de calibração, é utilizada para a construção de um gráfico de confiabilidade em função do tempo. Tal gráfico, de característica exponencial, representa um importante indicador prático para atividade de manutenção de sensores.

1.3 Organização do Trabalho

A tese é constituída de cinco capítulos adicionais com os seguintes conteúdos:

O capítulo 2 apresenta uma revisão sobre medidas de estatística e de confiabilidade utilizadas no desenvolvimento deste trabalho. Mostram-se as medidas de dispersão: faixa de amplitudes, variância e desvio-padrão. O parâmetro de dispersão utilizado na tese é o desvio-padrão.

Utiliza-se a distribuição qui-quadrado para a determinação dos limites do desvio-padrão populacional, nas curvas do desvio em função do tempo, para diversos tipos de termopares em cada temperatura específica. Estabelece-se uma relação na qual se mostra que o desvio-padrão distribui-se conforme uma variação do tipo qui quadrado com $n-1$ graus de liberdade. Dessa análise obtém-se um intervalo de confiança ao nível $1-\alpha$, para um desvio-padrão da população σ .

São apresentados o conceito e as expressões matemáticas da teoria da confiabilidade. Algumas distribuições, que têm aplicação na teoria da confiabilidade, são apresentadas como a exponencial, a normal e a de Weibull. A distribuição exponencial é utilizada no cálculo da confiabilidade dos termopares, pois é a que analisa a variação da vida do componente ou sistema quando este está na faixa de taxa de falha constante, ou seja, seu período de vida útil.

O capítulo 3 apresenta informações gerais sobre as principais características dos termopares. São apresentados o efeito e as leis termoelétricas que conceituam a teoria dos termopares. Expõem-se os critérios de seleção, os tipos, a fabricação, a proteção e a calibração de termopares que são utilizados na teoria e na prática.

O capítulo 4 apresenta o estudo de parametrização das curvas de desvio de calibração baseado em dados experimentais de laboratório. Analisa-se o período de vida útil do termopar, no qual o modelo de confiabilidade tende a uma distribuição exponencial. Determina-se o ponto no qual os limites das curvas de desvio em função do tempo para diversos tipos de termopares em cada temperatura específica alcançam o desvio permitido. Com a distribuição exponencial e os pontos especificados pelos limites das curvas de desvio determina-se a probabilidade de um termopar.

O capítulo 5 é de aplicação da metodologia experimental de análise desenvolvida em termopares do tipo T e J de acordo com os valores fornecidos pelo bancos de dados da empresa CEMAN (Central de Manutenção S.A). Apresentam-se as curvas de desvio de calibração dos

termopares em função do tempo em cada temperatura específica. Determinam-se os desvios-padrão e os seus limites inferiores e superiores para cada temperatura. Calculam-se as médias desses limites entre as diversas temperaturas de termopares tipo T e J. Com o valor médio dos limites inferiores e superiores determina-se o MTTF. Calcula-se a curva de confiabilidade para os limites inferior e superior médio, e determina-se a probabilidade do termopar funcionar sem falhas durante um período igual ao seu MTTF.

O capítulo 6 apresenta as conclusões finais e sugestões para novos trabalhos.

Capítulo 2

Medidas de Estatísticas e de Confiabilidade

2.1 Introdução

Neste capítulo apresenta-se uma revisão de medidas de estatística e de confiabilidade que serão utilizadas no trabalho.

Inicialmente, mostram-se as medidas de dispersão: faixa de amplitudes, variância e desvio-padrão. O parâmetro utilizado nesse trabalho é o desvio-padrão.

Apresenta-se a definição de função densidade de probabilidade que será utilizada na conceituação da confiabilidade.

A distribuição qui-quadrado (uma forma particular da distribuição gama) é analisada e empregada na determinação dos limites do desvio-padrão das curvas de desvio em função do tempo para diversos tipos de termopares em cada temperatura específica. A distribuição qui-quadrado é utilizada para análise de amostras com o número de componentes menor que 30. Tal estudo é denominado teoria das pequenas amostras. O nome mais apropriado, entretanto, deveria ser teoria exata da amostragem, visto que os resultados obtidos são válidos tanto para grandes como para pequenas amostras. Em seguida, é necessário estabelecer uma relação entre a distribuição amostral do desvio-padrão e a distribuição qui-quadrado. Isso é obtido por meio de uma relação na qual se estima que o desvio-padrão possua uma distribuição tipo qui-quadrado com $n-1$ graus de liberdade. Finalmente, obtém-se um intervalo de confiança ao nível $1-\alpha$ para o desvio-padrão da população, σ .

Apresenta-se e discute-se com detalhes o conceito de confiabilidade. Para analisar a confiabilidade de um componente ou sistema devem ser verificadas a sua predição e avaliação. A predição consiste na criação de modelos matemáticos que permitem predizer a confiabilidade de um componente ou sistema. A avaliação consiste na utilização de técnicas que permitem medir os

valores reais da confiabilidade, verificar as predições efetuadas baseadas nos modelos e controlar a manutenção a um certo nível exigido. As expressões matemáticas são deduzidas e defini-se a equação da confiabilidade em função do tempo.

Na teoria da confiabilidade podem ocorrer três tipos de falhas de acordo com a sua evolução ao longo do tempo. Esses tipos são: as falhas precoces, os desgaste e as casuais, que são expostas e discutidas com detalhes.

Do ponto de vista estatístico existem comportamentos diferenciados para a duração da vida de distintos componentes ou sistemas. Logo, há necessidade de considerar diferentes modelos matemáticos. Neste capítulo são apresentadas algumas distribuições que têm aplicação na teoria da confiabilidade que são a exponencial, a normal e a de Weibull.

2.2 Medidas de dispersão

A informação fornecida por medidas de fenômenos físicos necessita, em geral, ser complementada pelos dados de dispersão. Estes servem para indicar o quanto as medidas se apresentam dispersas em torno de uma região central. Caracterizam, portanto, o grau de variação existente no conjunto de valores. As medidas de dispersão de interesse neste trabalho são: a faixa de amplitudes, a variância e o desvio-padrão Costa Neto (1992).

2.2.1 Faixa de amplitudes

A faixa de amplitudes é definida como a diferença entre o maior e o menor valores do conjunto de dados:

$$A = X_{\max} - X_{\min}. \quad (2.1)$$

O valor de A está relacionado com a dispersão dos dados. Entretanto, por depender de apenas dois pontos do conjunto de dados, a informação fornecida pela faixa de amplitudes é relativamente pobre como indicador de dispersão. Salvo aplicações no controle de qualidade, a faixa de amplitudes não é muito utilizada como medida de dispersão.

2.2.2 Variância

A variância de um conjunto de dados é por definição, a média dos quadrados das diferenças dos valores em relação à sua média, isto é:

$$s^2(x) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}. \quad (2.2)$$

2.2.3 Desvio-padrão

Define-se o desvio-padrão como a raiz quadrada positiva da variância. O cálculo do desvio-padrão é feito por meio da variância :

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}}. \quad (2.3)$$

2.3 Função densidade probabilidade

Diz-se que X é uma variável aleatória contínua, se existir uma função f, denominada função densidade probabilidade (fdp) de X, que satisfaça às seguintes condições:

- $f(x) > 0$;
- $\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1$; e
- para quaisquer a,b com $-\infty < a < b < +\infty$ tem-se: $P(a \leq X \leq b) = \int_a^b f(x) dx$.

2.4 Distribuição gama

Antes de apresentar a distribuição gama é necessário definir a função gama (Meyer 1978).

A função gama, denotada por Γ , possui a seguinte expressão :

$$\Gamma(p) = \int_0^{\infty} x^{p-1} \cdot e^{-x}, \quad (2.4)$$

definido para $p > 0$.

Integrando por partes e fazendo $e^{-x} dx = dv$ e $x^{p-1} = u$, obtém-se:

$$\Gamma(p) = e^{-x} \cdot x^{p-1} \Big|_0^{\infty} - \int_0^{\infty} [-e^{-x} \cdot (p-1) \cdot x^{p-2}] dx,$$

$$\Gamma(p) = 0 + (p-1) \int_0^{\infty} e^{-x} \cdot x^{p-2} dx, e$$

$$\Gamma(p) = (p-1) \cdot \Gamma(p-1). \quad (2.5)$$

Desse modo, mostra-se que a função gama obedece a uma interessante relação de recorrência. Supõe-se que p seja inteiro positivo e igual a n . Aplicando-se a equação (2.5) repetidamente, obtém-se:

$$\Gamma(n) = (n-1) \cdot \Gamma(n-1),$$

$$\Gamma(n) = (n-1) \cdot (n-2) \cdot \Gamma(n-2), e$$

$$\Gamma(n) = (n-1) \cdot (n-2) \cdot \Gamma(1).$$

Porém,

$$\Gamma(1) = \int_0^{\infty} e^{-x} dx = 1; \text{ por isso tem-se:}$$

$$\Gamma(n) = (n-1)!, \quad (2.6)$$

onde n é um inteiro positivo. Portanto, pode-se considerar a função gama como sendo uma generalização da função fatorial. Pode-se verificar que:

$$\Gamma(1/2) = \int_0^{\infty} x^{-1/2} \cdot e^{-x} dx = \sqrt{\pi} . \quad (2.7)$$

Com o auxílio da função gama, pode-se introduzir a distribuição de probabilidade gama.

Definição: Seja X uma variável aleatória contínua que tome somente valores não negativos. Diz-se que X tem uma distribuição de probabilidade gama, se a sua função de densidade de probabilidade for dada por:

$$f(x) = \frac{\alpha(x)^{r-1} e^{-\alpha x}}{\Gamma(r)} . \quad (2.8)$$

Esta distribuição depende de dois parâmetros, r e α , dos quais se exige $r > 0$, $\alpha > 0$. Em virtude da definição da função gama tem-se:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1 . \quad (2.9)$$

A figura 2.1 mostra o gráfico da fdp [equação (2.8)] para vários valores de r e $\alpha = 1$.

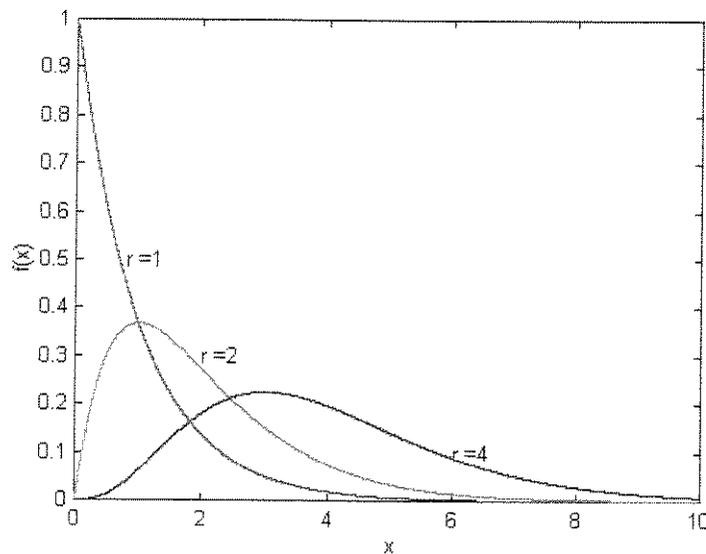


Figura 2.1 – Distribuição gama

Se $r = 1$, a equação (2.9) fica $f(x) = \alpha.e^{-\alpha x}$. Portanto, a distribuição exponencial é um caso particular da distribuição gama.

Se X apresentar uma distribuição gama dada pela equação (2.8) tem-se então:

$$E(X) = r/\alpha, \text{ e} \tag{2.10}$$

$$V(X) = r/\alpha^2. \tag{2.11}$$

2.5 Distribuição qui-quadrado

Tem-se uma distribuição gama em função de z dada pela expressão:

$$f(z) = \frac{\alpha.(\alpha.z)^{r-1}.e^{-\alpha z}}{\Gamma(r)}. \tag{2.12}$$

Fazendo na expressão anterior $\alpha = 1/2$ e $r = n/2$ onde n é inteiro e positivo obtém-se:

$$f(z) = \frac{z^{(n/2)-1}.e^{-z/2}}{2^{n/2}.\Gamma(n/2)}. \tag{2.13}$$

Uma variável aleatória Z , que tenha fdp dada pela equação (2.13) terá uma distribuição qui-quadrado, com n graus de liberdade (denotada por χ_n^2). Na figura (2.2), a fdp está apresentada para $n = 1, 2$ e $n > 2$.

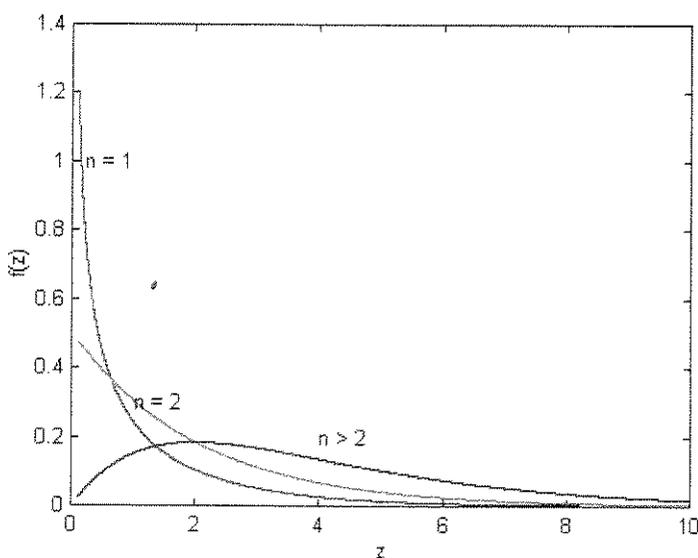


Figura 2.2 – Distribuição Qui-Quadrado

A substituição de $\alpha = \frac{1}{2}$ e $r = n / 2$ tem como consequência imediata por meio das equações (2.10) e (2.11), que:

$$E(Z) = n, e \tag{2.14}$$

$$V(Z) = 2n. \tag{2.15}$$

As expressões (2.14) e (2.15) mostram que a esperança é igual ao número de pontos analisados (n) de um dado conjunto e a variância é igual ao seu dobro (2n).

A distribuição qui-quadrado possui numerosas e importantes aplicações em estatística, algumas das quais serão futuramente mencionadas. Em virtude de sua importância, a distribuição qui-quadrado está tabulada para diferentes valores do parâmetro n, conforme apresentado na tabela 2.1 mostrada a seguir.

Tabela 2.1 – Distribuição do $\chi^2_{n,p}$

n \ P	0,995	0,99	0,95	0,90	0,50	0,10	0,05
1	0,0 ³ 39	0,0 ³ 16	0,0039	0,0158	0,453	2,706	3,841
2	0,0100	0,0201	0,103	0,211	1,386	4,605	5,991
3	0,0717	0,115	0,152	0,581	2,366	6,251	7,815
4	0,207	0,297	0,711	1,061	3,357	7,779	9,488
5	0,412	0,554	1,145	1,610	4,351	9,236	11,070
6	0,676	0,872	1,635	2,201	5,348	10,645	12,592
7	0,989	1,239	2,167	2,833	6,346	12,017	14,067
8	1,344	1,616	2,733	3,490	7,344	13,362	15,507
9	1,735	2,088	3,325	4,168	8,343	14,684	16,919
10	2,156	2,558	3,940	4,865	9,342	15,987	18,307
11	2,603	3,053	4,575	5,578	10,341	17,275	19,675
12	3,074	3,571	5,226	6,304	11,340	18,549	21,026
13	3,565	4,107	5,892	7,042	12,340	19,812	22,362
14	4,075	4,660	6,571	7,790	13,339	21,064	23,685
15	4,601	5,229	7,261	8,547	14,339	22,307	24,996
16	5,142	5,812	7,962	9,312	15,338	23,542	26,296
17	5,697	6,408	8,672	10,085	16,338	24,769	27,587
18	6,265	7,015	9,390	10,865	17,338	25,989	28,869
19	6,844	7,633	10,117	11,651	18,338	27,204	30,144
20	7,434	8,260	10,851	12,443	19,337	28,412	31,410
21	8,034	8,897	11,591	13,240	20,337	29,615	32,671
22	8,643	9,542	12,338	14,041	21,337	30,813	33,924
23	9,260	10,196	13,091	14,848	22,337	32,007	35,172
24	9,886	10,856	13,818	15,659	22,337	33,196	36,415
25	10,520	11,524	14,611	16,473	24,336	34,382	37,652

26	11,160	12,198	15,379	17,292	25,336	35,563	38,885
27	11,808	12,879	16,151	18,114	26,336	36,741	40,113
28	12,461	13,565	16,928	18,939	27,336	37,916	41,337
29	13,121	14,256	17,708	19,768	28,336	39,087	42,557
30	13,787	14,953	18,493	20,599	29,336	40,256	43,773
40	20,707	22,164	26,509	29,051	39,335	51,805	55,578
50	27,991	29,707	34,764	37,689	49,335	63,167	67,505
60	35,535	37,485	43,181	46,459	59,335	74,397	79,082

2.5.1 Propriedades da distribuição qui-quadrado

São importantes as seguintes observações:

- Nota-se na figura 2.2 que para $n = 1$, a distribuição qui-quadrado tem o aspecto de uma distribuição exponencial, para $n = 2$, tende a uma distribuição exponencial.
- Nota-se da figura 2.2 que para $n > 2$ a distribuição qui-quadrado aproxima-se a uma distribuição normal.

2.6 Distribuição amostral do desvio-padrão e distribuição qui-quadrado

A variância de um conjunto de dados foi apresentada na expressão (2.2) como:

$$s^2(x) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}.$$

Pode-se definir uma expressão equivalente de medida de variância, associada à família de distribuição de probabilidades do tipo qui quadrado como:

$$\chi_{n-1}^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \mu}{\sigma} \right)^2, \quad (2.16)$$

onde x_i são valores aleatórios independentes retirados de uma população normal de média μ e desvio-padrão σ . Substituindo μ por \bar{x} na equação (2.16) têm-se:

$$\chi_{n-1}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{\sigma^2} = \frac{n-1}{\sigma^2} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}, \text{ e}$$

$$\chi_{n-1}^2 = \frac{(n-1) \cdot s^2}{\sigma^2}, \quad (2.17)$$

o que comparado com a expressão (2.2) resulta em:

$$s^2 = \frac{\sigma^2 \cdot \chi_{n-1}^2}{n-1}. \quad (2.18)$$

Tem-se, portanto, que s^2 se distribui conforme uma distribuição tipo qui-quadrado com $n - 1$ graus de liberdade a menos de uma constante.

2.7 Intervalo de confiança para a variância da população

Seja agora o problema da construção do intervalo de confiança ao nível $1 - \alpha$ para a variância σ^2 da população. O conhecimento da distribuição qui-quadrado visto no item anterior será fundamental para esse propósito.

Considere na distribuição χ_{n-1}^2 os dois valores particulares $\chi_{n-1, 1-\alpha/2}^2$ e $\chi_{n-1, \alpha/2}^2$.

Por construção, esses valores são tais que:

$$P(\chi_{n-1, 1-\alpha/2}^2 \leq \chi_{n-1}^2 \leq \chi_{n-1, \alpha/2}^2) = 1 - \alpha. \quad (2.19)$$

A relação (2.17) permite escrever a desigualdade entre parêntesis como:

$$\chi_{n-1, 1-\alpha/2}^2 \leq \frac{(n-1) \cdot s^2}{\sigma^2} \leq \chi_{n-1, \alpha/2}^2.$$

Dividindo todos os membros da expressão anterior por $(n-1)s^2$ e tomando os seus inversos tem-se:

$$\frac{(n-1) \cdot s^2}{\chi_{n-1, \alpha/2}^2} \leq \sigma^2 \leq \frac{(n-1) \cdot s^2}{\chi_{n-1, 1-\alpha/2}^2}. \quad (2.20)$$

Logo, para se determinar σ , tem-se:

$$\sqrt{\frac{(n-1) \cdot s^2}{\chi_{n-1, \alpha/2}^2}} \leq \sigma \leq \sqrt{\frac{(n-1) \cdot s^2}{\chi_{n-1, 1-\alpha/2}^2}}. \quad (2.21)$$

Os limites inferior e superior da variável σ podem ser representados por σ_1 e σ_2 tornando a expressão (2.21) em:

$$\sigma_1 \leq \sigma \leq \sigma_2. \quad (2.22)$$

As quantidades expressas em (2.22) são os limites do intervalo de confiança para σ com um nível de confiança $1-\alpha$.

2.8 Teoria da confiabilidade

2.8.1 Conceito de confiabilidade

O conceito de confiabilidade de maior utilização entre os especialistas que se ocupam dessa área é:

“Confiabilidade é a probabilidade de um sistema ou componente funcionar de acordo com as especificações durante um dado intervalo de tempo, e em determinadas condições de operação” Araújo Filho (1982).

Por probabilidade entende-se aqui não o aspecto subjetivo do termo, mas o significado matemático, ou físico, de frequência relativa da ocorrência de um dado sucesso na repetição de um grande número de eventos. A confiabilidade pode ser medida, portanto por um número entre 0 e 1 (Martins 1990).

Usam-se as palavras “sistema ou componente”, pois o objeto cuja confiabilidade quer-se estudar pode ser simples ou muito complexo. O conceito é, essencialmente, o mesmo para um capacitor, uma nave espacial, um computador ou um automóvel.

É necessário destacar outros aspectos dessa definição. Em primeiro lugar, fala-se de “funcionamento adequado com as especificações”; isso evidencia que um sistema não necessita forçosamente funcionar de acordo com um esquema sim ou não, podendo haver vários estados intermediários de funcionamento, adequados em maior ou menor grau. Isso implica na necessidade de definir com precisão os diferentes estados de funcionamento, caracterizando aceitabilidade (sucesso) ou não (falha), bem como, em alguns casos, determinar com precisão as características da transição de um estado a outro.

Outro aspecto a considerar é o tempo; limita-se à medição de confiabilidade a um dado período de tempo, pois o funcionamento de alguns sistemas pode ser fundamentalmente afetado em suas características, com o passar do tempo, quer se encontre em operação ou não (Bergamo Filho 1979).

2.8.2 Problemas estudados pela confiabilidade

Em princípio são dois os grandes problemas que a Teoria da Confiabilidade deve analisar: a predição da confiabilidade e a sua avaliação (Bazovsky 1961).

O primeiro consiste na criação de modelos matemáticos que permitam prever a confiabilidade de um sistema, sugerir métodos para melhorá-la, desenvolver princípios de projetos de sistemas e componentes, novos materiais e tecnologias de processo.

A avaliação da confiabilidade consiste na utilização de técnicas, que permitam medir os seus valores reais, verificar as predições efetuadas com base nos modelos e controlar a manutenção a um certo nível exigido.

2.8.3 Falhas estatísticas

De acordo com o ponto de vista estatístico podem existir três tipos básicos de falhas, de acordo com a sua evolução em relação ao tempo.

Estes tipos são:

a) Falhas Precoces

A experiência mostra que, devido fundamentalmente a anormalidades da fabricação ou, às vezes, a um uso demasiadamente intenso, ou um projeto defeituoso, aparecem falhas logo após iniciar-se o uso do componente ou equipamento. As falhas precoces podem geralmente ser eliminadas por meio de um controle rigoroso na fabricação e também mediante testes, antes do envio do produto ao consumidor.

b) Falhas por Desgaste

Em segundo lugar encontram-se as falhas causadas por desgaste de partes dos componentes do equipamento. Este tipo de falha é um sintoma de envelhecimento do equipamento e pode ser causado por um desgaste real, por uma perda de características importantes ou por degeneração das mesmas. Em alguns casos pode-se reduzir ou eliminar o efeito (ou a presença) das falhas por desgaste. Por exemplo, em um equipamento submetido a um trabalho intermitente, pode-se substituir a intervalos convenientes as peças sujeitas a desgaste. Em geral, os métodos de manutenção preventiva têm por objetivo prolongar a vida útil dos equipamentos atuando sobre os componentes que tendem a desgastar-se.

c) Falhas Casuais

Além das falhas precoces e por desgaste, cujas razões são quase óbvias, do ponto de vista técnico, devem-se considerar outros tipos de falhas que se apresentam de forma inesperada, ao acaso, a intervalos de tempos irregulares. As causas desse tipo de falha em componentes podem ser as mais diversas; porém, normalmente pode tratar-se de um pico de concentração de tensões aleatórias, que atua sobre algum ponto fraco e produz a quebra.

A teoria e a prática da confiabilidade fazem essa distinção entre falhas casuais, precoces e por desgaste, em primeiro lugar, porque cada uma delas possui uma distribuição estatística que pertence a grupos funcionais bem diferentes (e que, portanto, exigem tratamento matemático diferente) e segundo, porque as técnicas para reduzi-las ou eliminá-las diferem radicalmente. Em razão do exposto, a atenção principal concentra-se nas falhas casuais e sua prevenção, pois são

essas falhas que incidem desfavoravelmente sobre a confiabilidade dos equipamentos durante sua vida operacional.

2.8.4 Teoria estatística e confiabilidade

A seguir apresentam-se alguns conceitos da Teoria da Estatística, que vão servir de base para definir uma série de parâmetros da Teoria da Confiabilidade.

Define-se τ , como uma variável aleatória que mede, em uma unidade adequada, a duração da vida do componente. Por uma questão de hábito, τ é apresentado em função do tempo, mas essa variável pode ser definida, por exemplo, pelo número de quilômetros percorridos, ou o número de ciclos realizados.

$F(t)$ é definido como a probabilidade do componente falhar no instante t , tendo iniciado em $t = 0$.

A função densidade probabilidade de falha é dada por:

$$f(t) = dF(t)/dt. \quad (2.23)$$

$R(t)$ é definida como a confiabilidade do componente funcionar sem falhas até o instante t , tendo iniciado em $t = 0$. Logo:

$$F(t) = 1 - R(t). \quad (2.24)$$

Derivando-se as expressões (2.24) obtém-se:

$$dF(t)/dt = - dR(t)/dt. \quad (2.25)$$

A taxa de falha [$\lambda(t)$] tem por expressão:

$$\lambda(t) = [dF(t)/dt] / R(t). \quad (2.26)$$

Levando a expressão (2.23) na expressão (2.26) resulta:

$$\lambda(t) = f(t) / R(t). \quad (2.27)$$

Na expressão anterior tem-se a taxa de falha em função da densidade de probabilidade de falha e da confiabilidade.

Levando a expressão(2.25) na expressão (2.276 obtém-se:

$$\lambda(t) = [- dR(t)/dt] / R(t). \quad (2.28)$$

Integrando a função (2.28) tem-se:

$$\int_0^t dR(t) / R(t) = - \int_0^t \lambda(t) dt ;$$

$$\ln R(t) = - \int_0^t \lambda(t) dt ; e$$

$$R(t) = \exp[- \int_0^t \lambda(t) dt]. \quad (2.29)$$

Na expressão (2.29) tem-se a confiabilidade em função da taxa de falha.

De maneira análoga têm-se as expressões de F(t) e f(t):

$$F(t) = 1 - \exp[- \int_0^t \lambda(t) dt], e \quad (2.30)$$

$$f(t) = \lambda(t) \exp[- \int_0^t \lambda(t) dt]. \quad (2.31)$$

Um parâmetro importante em confiabilidade é o MTTF (Tempo médio para falhar), que é definido como a esperança matemática da função densidade de probabilidade , ou seja:

$$m(t) = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt . \quad (2.32)$$

$$\text{Como } f(t) = -dR(t) / dt , \text{ tem-se:} \quad (2.33)$$

$$m(t) = \int_0^{\infty} t \cdot -dR(t) / dt , e$$

$$m(t) = \int_0^{\infty} R(t) \cdot dt . \quad (2.34)$$

2.8.5 Taxa condicional de falha

a) Falhas Casuais

A definição apresentada para as falhas casuais indica que a probabilidade de falha de um sistema é a mesma para qualquer intervalo dt que se considere, isto é:

$$\lambda(t) = \text{constante} = \lambda . \quad (2.35)$$

Logo pode se concluir que a distribuição é exponencial, conforme as expressões abaixo:

$$F(t) = 1 - \exp[-\lambda t] ; \quad (2.36)$$

$$R(t) = \exp[-\lambda t] ; e \quad (2.37)$$

$$f(t) = \lambda \exp[-\lambda t] . \quad (2.38)$$

A figura 2.3 ilustra essas expressões:

b) Falhas por Desgaste

Para este tipo de falha é evidente que um componente vai possuir uma taxa condicional de falha crescente (ou ao menos não decrescente), pois é natural admitir uma maior probabilidade de morte nos componentes mais velhos entre uma população com características homogêneas de vida .

A taxa de falha de desgaste é definida pela expressão:

$$\lambda(t) = \frac{\beta(t - \gamma)^{\beta-1}}{\eta^\beta} \quad \text{quando } \beta > 1. \quad (2.39)$$

A figura 2.4 ilustra esse tipo de falha.

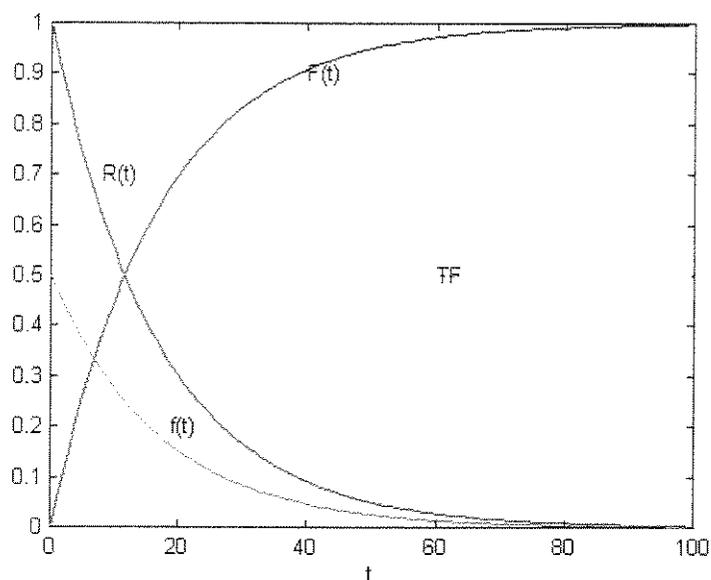


Figura 2.3 - Falhas Casuais

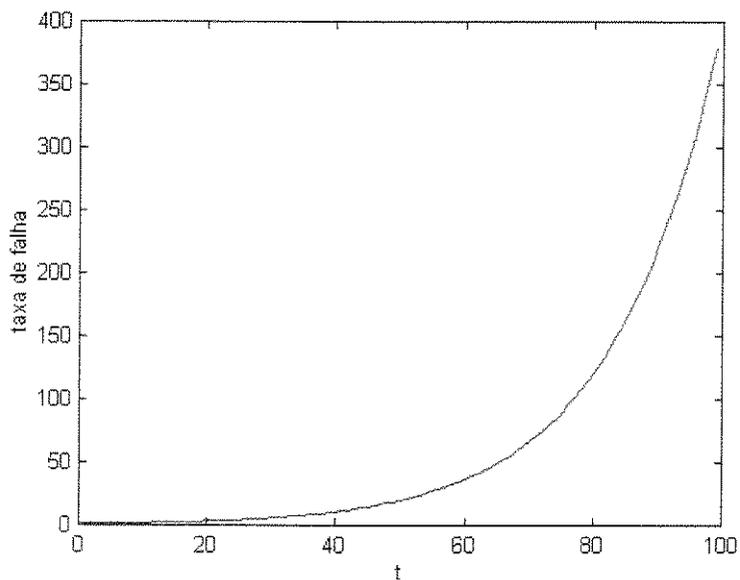


Figura 2.4 - Falhas por Desgaste

c) Falhas Precoces

Com considerações similares ao parágrafo anterior, pode-se concluir que para esse tipo de falha a taxa condicional de falha deve ser uma função decrescente.

A taxa de falhas precoces é definida pela equação 2.39 quando $\beta < 1$.

A figura 2.5 ilustra este tipo de falha

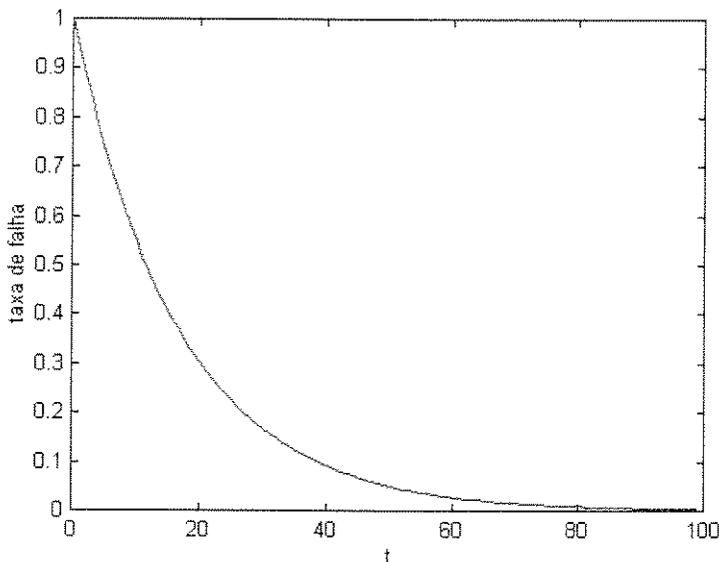


Figura 2.5 - Falhas Precoces

2.8.6 Curvas de vida

Para usar componentes a um nível satisfatório de confiabilidade, o engenheiro necessita contar com dados referentes à propriedade de vida dos mesmos, especificamente a variação dessas propriedades com o tempo, em relação ao meio ambiente e ao nível de atuação Ireson (1966).

Em geral, faz sentido admitir que um equipamento complexo terá uma taxa de falhas que apresentará os três componentes básicos acima apresentados. Assim, após um período de “mortalidade infantil”, onde a taxa de falha é decrescente, tem-se a vida útil do equipamento (onde as falhas do mesmo são puramente casuais) para finalizar com um período de desgaste onde a taxa de falhas é crescente.

A figura 2.6, representa esse comportamento teórico da taxa condicional de falhas, por meio de uma evolução no tempo conhecida como “Curva da Banheira”.

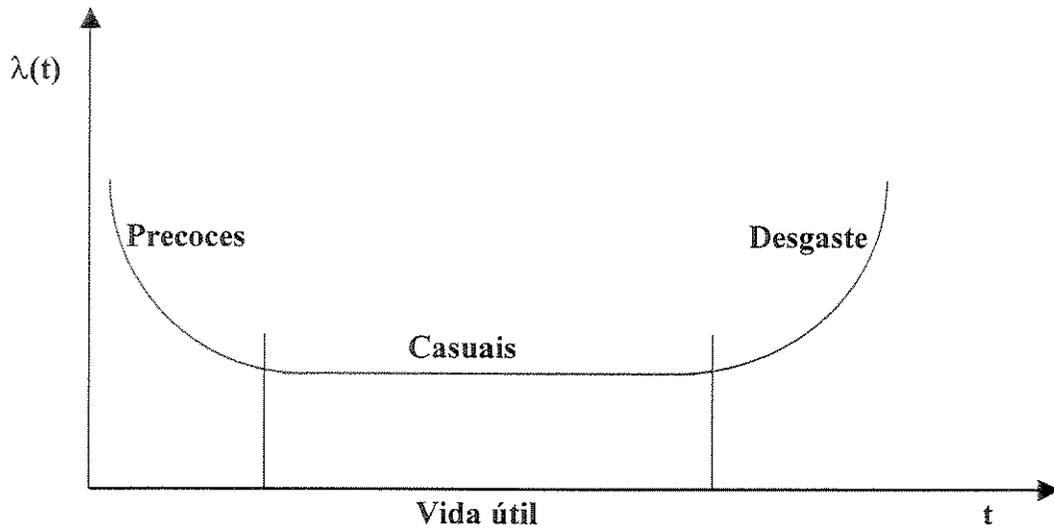


Figura 2.6 - Curva da Banheira

2.8.7 Distribuição de probabilidades em confiabilidade

Do ponto de vista estatístico, existem comportamento diferenciados para a duração da vida de distintos componentes ou sistemas. Obviamente, esse comportamento diferente implica na necessidade de considerar diferentes modelos estatísticos, isto é, funções de probabilidade distintas, para explicar, analisar e fazer referência a respeito da confiabilidade em cada caso particular. Nesta seção apresentam-se algumas distribuições que têm aplicações na teoria da confiabilidade.

a) Distribuição Exponencial Negativa

Uma das importantes leis de falhas é a descrita pela distribuição exponencial. Essa distribuição tem aplicação nas falhas casuais, sendo suas funções de distribuição, densidade, taxa condicional de falhas e confiabilidade apresentadas nas equações (2.37) à (2.39).

As figuras 2.7, 2.8, 2.9 e 2.10 mostram o comportamento destas expressões:

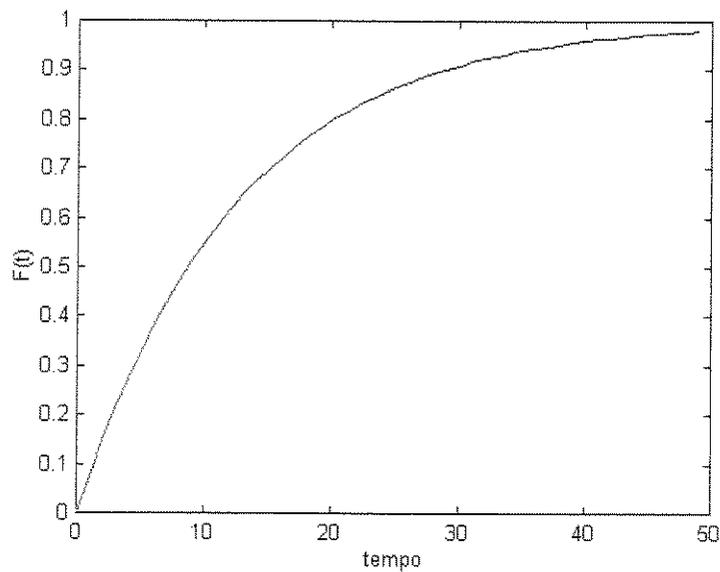


Figura 2.7 - Curva da Probabilidade de Falha $F(t)$

No caso dessa distribuição, o MTTF é dado por:

$$E(t) = m(t) = \int_0^{\infty} t \cdot \exp(-\lambda t) dt = 1/\lambda . \quad (2.40)$$

A variância de uma distribuição é dada por:

$$V(t) = E(t^2) - E^2(t) , e \quad (2.41)$$

$$E(t^2) = \int_0^{\infty} t^2 \exp(-\lambda t) dt = 2/\lambda^2 , \quad (2.42)$$

e que resulta em:

$$V(t) = 2/\lambda^2 - 1/\lambda^2 = 1/\lambda^2 . \quad (2.43)$$

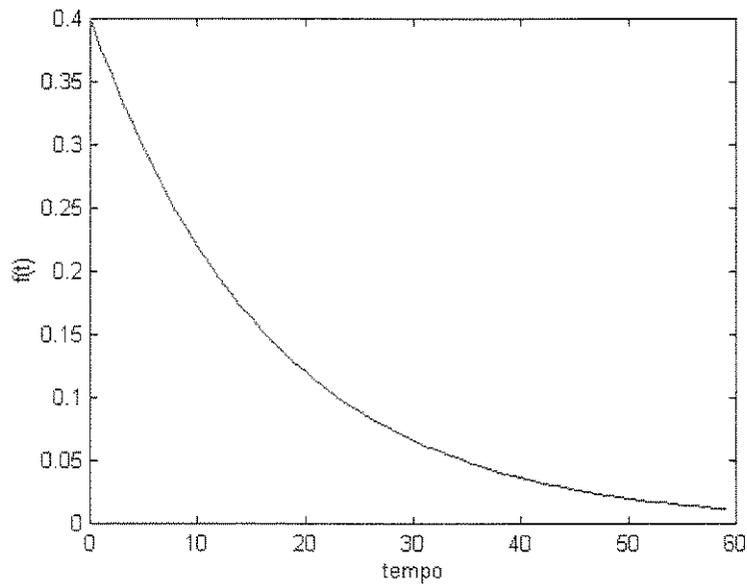


Figura 2.8 – Curva da Densidade de Probabilidade de Falha $f(t)$

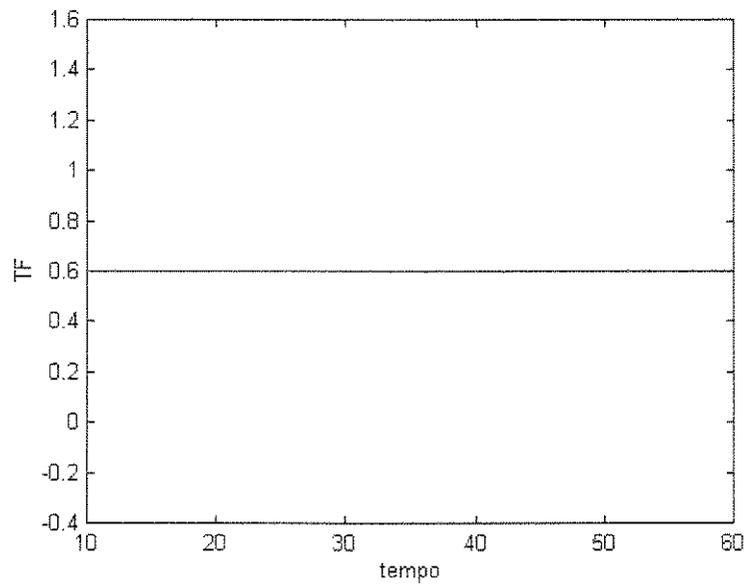


Figura 2.9 – Curva da Taxa de Falha $\lambda(t)$

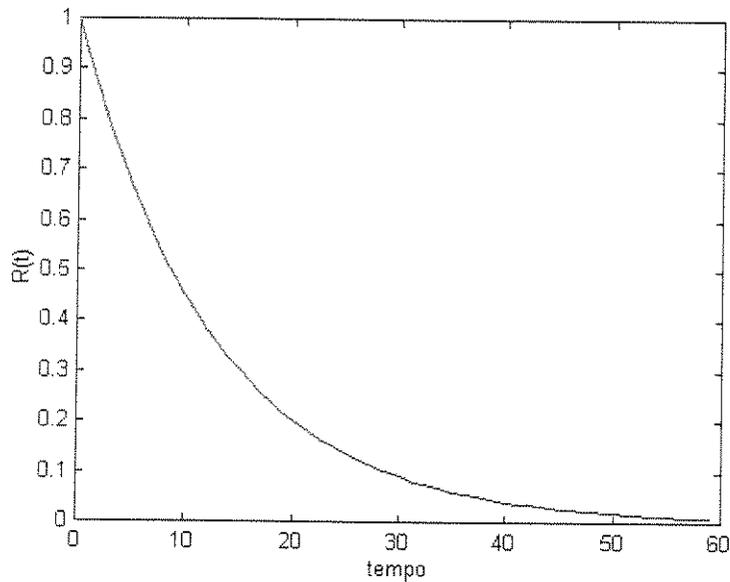


Figura 2.10 – Curva da Confiabilidade R(t)

A distribuição exponencial é a mais usada na análise da confiabilidade de equipamentos e componentes em função do tempo por representar o comportamento de falha ao longo da vida útil.

Análises experimentais, verificaram que a curva de confiabilidade de equipamentos complexos adaptam-se a uma distribuição exponencial, independente do tipo de distribuição de vida dos componentes.

b) Distribuição Normal

Existem componentes que se encontram na região de desgaste e seu comportamento das falhas pode ser representado pela distribuição normal. Isto é, se t for a duração da vida de uma peça, sua fdp será dada por :

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot \exp \left[- \frac{1}{2} \left(\frac{t - \mu}{\sigma} \right)^2 \right]. \quad (2.44)$$

Na expressão anterior t é o tempo, μ é a média e σ é o desvio-padrão. Com essa equação determina-se a curva da figura 2.11.

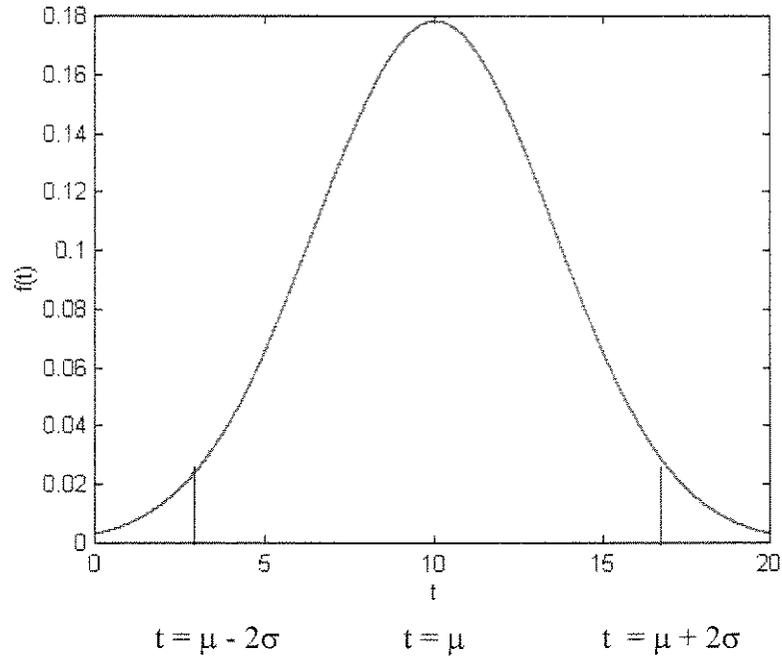


Figura 2.11 - Distribuição Normal

Na figura (2.11) tem-se que a maioria das peças falha em torno de μ e o número de falhas decresce simetricamente quando t cresce. A lei de falhas normal indica que cerca de 95,72 % das falhas ocorrem para valores de t dentro do intervalo $[\mu - 2\sigma$ a $\mu + 2\sigma]$.

Da expressão (2.23), têm-se que:

$$f(t) = dF(t)/dt .$$

Logo:

$$F(t) = \int_{-\infty}^t f(t) \cdot dt ;$$

$$F(t) = \int_{-\infty}^t \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2\right] dt . \tag{2.45}$$

e

$$R(t) = 1 - \int_{-\infty}^t \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2\right] dt . \quad (2.46)$$

A função de confiabilidade pode ser expressa em termos da função de distribuição acumulada normal Φ tabelada, da seguinte maneira:

$$R(t) = 1 - \Phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right) = 1 - \Phi(z) . \quad (2.47)$$

A figura 2.12, apresenta a curva de confiabilidade para a lei de falha normal.

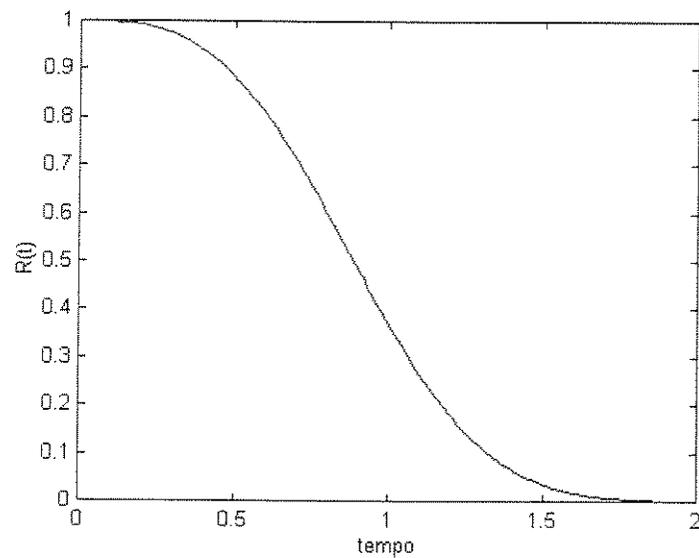


Figura 2.12 - Confiabilidade da Distribuição Normal

A esperança de uma distribuição normal é dada por:

$$E(t) = \mu . \quad (2.48)$$

A variância da distribuição normal é:

$$V(t) = \sigma^2 . \quad (2.49)$$

A variável z é distribuída normalmente, com a particularidade de ter média zero e variância unitária.

Pelo fato da lei de falhas normal representar um modelo adequado para componentes nos quais a falha seja devida a algum efeito de desgaste e em consequência ser adequada para representar o comportamento após a vida útil, ela não é incluída entre as mais importantes leis de falhas encontradas .

c) Distribuição de Weibull

Em 1939, o engenheiro sueco Weibull propôs essa distribuição na análise de um problema de fadiga em metais. A justificativa dada na época baseava-se em conveniências matemáticas e nos bons resultados obtidos quando utilizada para análise de resultados experimentais. Entretanto, existem razões de fundo teórico, que fazem válidas as amplas aplicações dessa distribuição.

A função de probabilidade é dada pela expressão:

$$F(t) = 1 - \exp\left[- \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta\right]. \quad (2.50)$$

Pode-se deduzir, portanto, da equação acima que a densidade probabilidade de falha e a confiabilidade são dadas por:

$$f(t) = \frac{\beta(t-\gamma)^{\beta-1}}{\eta^\beta} \cdot \exp\left[- \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta\right], e \quad (2.51)$$

$$R(t) = \exp\left[- \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta\right]. \quad (2.52)$$

A taxa de falha pode ser obtida de (2.28) e resulta :

$$\lambda(t) = \frac{\beta(t-\gamma)^{\beta-1}}{\eta^\beta}. \quad (2.53)$$

Nessa expressão, β é o parâmetro de forma, γ é o parâmetro de situação e η é o parâmetro de escala.

a.1) Parâmetro β

O parâmetro β determina o formato da curva conforme mostra a figura 2.13.

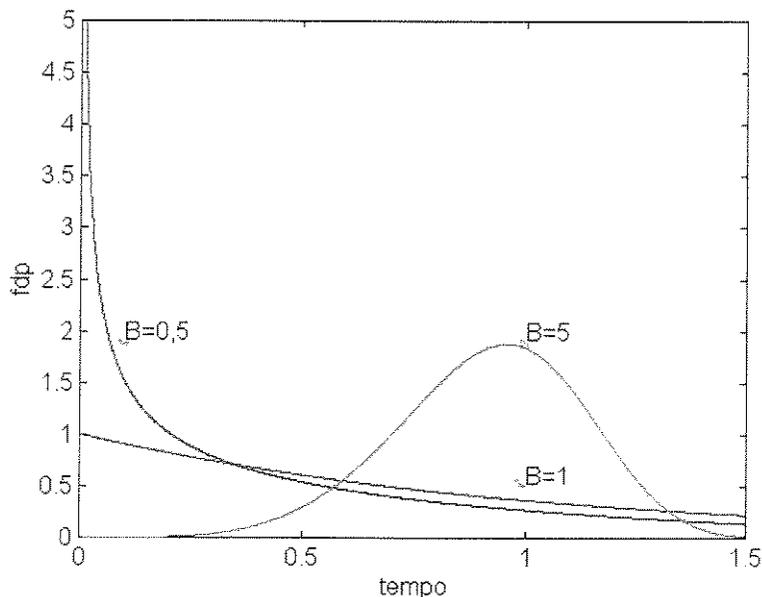


Figura 2.13 – Fdp de Weibull para valores de β , com $\eta = 1$ e $\gamma = 0$.

Quando $\beta < 1$, $\lambda(t)$ é decrescente e tem-se a situação de falha precoce, ou seja, analisa-se o período de início de vida do sistema ou componente.

Quando $\beta = 1$, a distribuição de Weibull é representada por uma exponencial, como mostra a figura 2.13, com $\eta = 1$ e $\gamma = 0$.

Tem-se:

$$f(t) = \frac{1}{\eta} \exp\left(-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta\right), \text{ e} \tag{2.54}$$

$$\lambda(t) = \frac{1}{\eta} = \text{constante} . \tag{2.55}$$

Nesse caso, em que $\lambda(t)$ é uma constante, tem-se a situação de falhas casuais, ou seja, analisa-se o período de vida útil do sistema ou componente.

Quando $\beta > 1$, a distribuição de Weibull tende a uma distribuição normal como mostra a figura 2.13, com $\eta = 1$ e $\gamma = 0$.

Nesse caso, tem-se a situação de falhas devido à degradação do sistema, a taxa de falha $\lambda(t)$ é crescente, ou seja, analisa-se o período de fim de vida do sistema ou componente.

a.2) Parâmetro η

Uma mudança no parâmetro de escala η , mantendo γ e β constantes, terá o mesmo efeito na distribuição, que uma alteração na escala da abcissa. Em outras palavras, fará com que a declinação da curva se torne mais ou menos acentuada. A figura 2.14 mostra essas variações quando $\beta = 1$ e $\gamma = 0$.

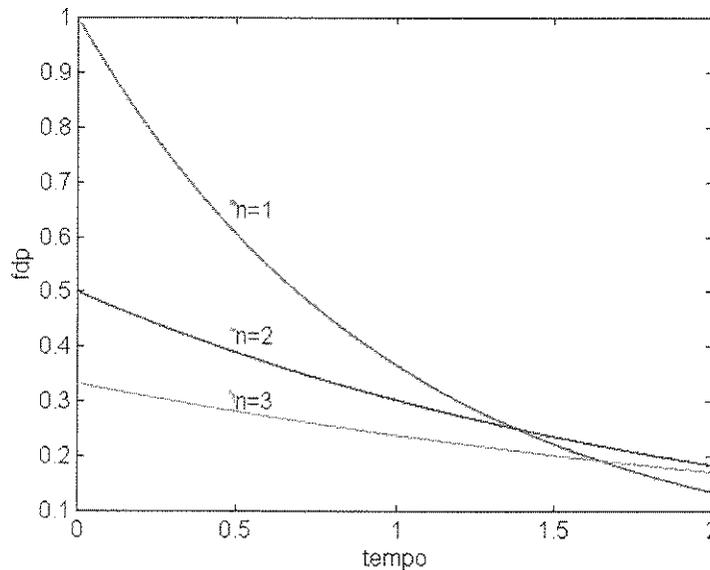


Figura 2.14 - Fdp de Weibull para valores de η , com $\beta = 1$ e $\gamma = 0$

a.3) Parâmetro γ

Esse parâmetro localiza a distribuição ao longo da abcissa. Quando $\gamma = 0$ a distribuição começa em $t = 0$. Se $\gamma > 0$, a distribuição começa à direita da origem e se $\gamma < 0$, a distribuição começa à esquerda da origem. A figura 2.15 ilustra esses casos para $\beta = 1$.

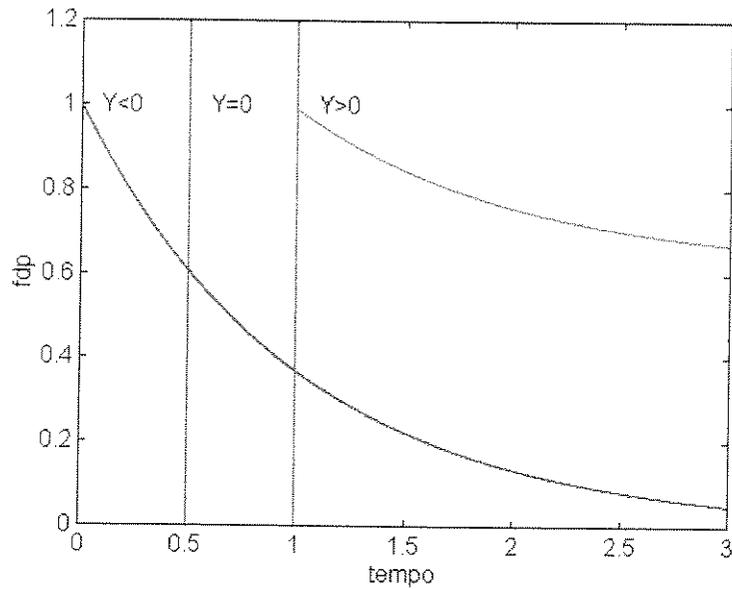


Figura 2.15 - Fdp de Weibull para valores de γ , com $\beta = 1$.

b) Característica da Confiabilidade da Distribuição de Weibull

A confiabilidade de Weibull é dada pela expressão (2.52):

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta\right].$$

A figura 2.16 ilustra essa expressão.

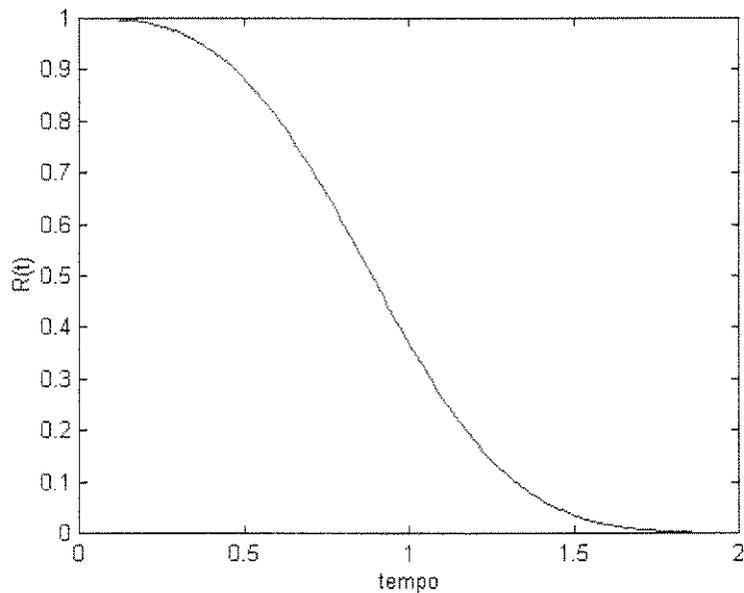


Figura 2.16 – Curva da Confiabilidade da Distribuição de Weibull

Pode-se observar que:

b1) A função da Confiabilidade da Distribuição de Weibull começa com valor de 1 e vai diminuindo à medida que t cresce. Quando $t \rightarrow \infty$, a confiabilidade $R(t)$ tende a zero.

b2) Independente dos valores dos três parâmetros β , γ e η , a confiabilidade para uma missão com duração equivalente a $\gamma + \eta$, a partir de zero é sempre igual à 0,37. Isso pode ser facilmente demonstrado substituindo-se t por $\gamma + \eta$ na equação (2.52).

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta\right]; \text{ e}$$

$$R(\gamma + \eta) = \exp\left[-\left(\frac{\gamma + \eta - \gamma}{\eta}\right)^\beta\right] = \exp(-1^\beta) = 0,37. \quad (2.56)$$

Isso quer dizer que 37% das unidades irão sobreviver durante uma missão equivalente a $\gamma + \eta$.

c) Característica da Taxa de Falha da Distribuição de Weibull.

A taxa de falha da distribuição de Weibull é dada pela equação (2.53):

$$\lambda(t) = \frac{\beta(t - \gamma)^{\beta-1}}{\eta^\beta}.$$

A figura 2.17 ilustra essa expressão:

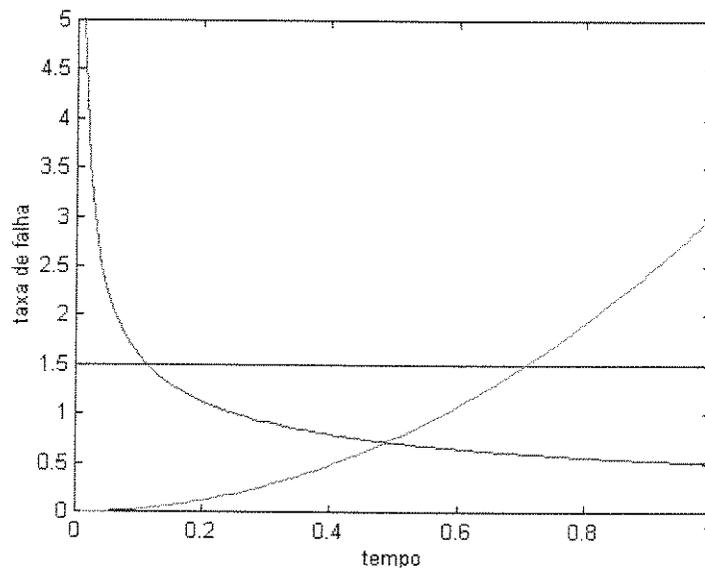


Figura 2.17 – Curvas de Taxas de Falhas da Distribuição de Weibull

c1) Para valores de $\beta < 1$, a função começa no ∞ e diminui à medida que o tempo cresce e quando $t \rightarrow \infty$, $\lambda \rightarrow 0$.

c2) Quando $\beta = 1$, a função fica constante $\lambda(t) = \frac{1}{\eta}$, que representa o período de vida útil.

c3) Quando $\beta > 1$, $\lambda(t)$ aumenta à medida que t aumenta sendo indicada para representar unidades que apresentam falhas do tipo de desgaste.

2.9 Resumo do Capítulo

Neste capítulo, apresentou-se as medidas de estatísticas e de confiabilidade, que são utilizadas no trabalho.

Os conceitos de desvio-padrão e a distribuição qui-quadrado para a determinação dos limites deste nas curvas do desvio em função do tempo para diversos tipos de termopares em cada temperatura específica.

A distribuição qui-quadrado é utilizada para análise de amostra com número de componentes menor que 30, cujo estudo é denominado teoria das pequenas amostras.

Estabeleceu-se uma relação entre a distribuição amostral do desvio-padrão e a de qui quadrado, na qual concluiu-se que o desvio-padrão possui uma distribuição do tipo qui quadrado com $n-1$ graus de liberdade.

Da conclusão dessa análise obtêm-se um intervalo de confiança ao nível $1-\alpha$, para um desvio-padrão da população σ .

O conceito e as expressões matemáticas da teoria da confiabilidade foram expostas.

Algumas distribuições que têm aplicação na teoria da confiabilidade foram apresentadas e concluiu-se que a distribuição exponencial é utilizada no calculo da confiabilidade dos termopares, pois é a que analisa a variação da vida do componente ou sistema quando este está na faixa de taxa de falha constante, ou seja no seu período de vida útil.

Capítulo 3

Teoria dos Termopares

3.1 Introdução

A utilização de termopares para medidas de temperaturas é de grande importância no controle de processos industriais. Existem sistemas onde a precisão da medida é fundamental para o seu correto funcionamento. Alguns processos exigem que uma dada temperatura seja mantida dentro de limites estreitos por um longo período de tempo. A eficiência na operação, a uniformidade da produção como a utilização correta dos tipos de termopares é um fator preponderante no desempenho desses processos. Portanto, é apresentado uma revisão mais detalhada dos princípios de operação, leis termoelétricas e seleção de termopares. Tal conhecimento é introduzido com a finalidade de ampliar a compreensão do leitor sobre o equipamento cuja operação é fruto de investigação no presente trabalho Benedict (1987).

A maioria dos termopares recebe um tratamento de aquecimento estabilizante dado pelo fabricante. Quando alta precisão é requerida ao longo do tempo de vida útil do termopar as mudanças na estabilização devem ser analisadas com maiores detalhes Roeser (1968).

Em muitos processos industriais os termopares funcionam corretamente, quando postos em utilização, até que haja evidência de uma falha mecânica ou sérios erros nas temperaturas indicadas. De qualquer maneira, muito tempo antes disso ocorrer, o termopar pode ter mudado suas características tanto em grandeza quanto na precisão da temperatura medida.

As mudanças nas características termoelétricas dos materiais do termopar devido às condições de serviços desfavoráveis são usualmente graduais e acumulativas. Elas dependem de fatores como: temperatura, tempo de duração de serviço e atmosfera em torno do termopar .

3.2 Efeitos termoelétricos

3.2.1 Efeito Seebeck

Em 1821, T.J. Seebeck descobriu que num circuito formado por dois condutores metálicos diferentes, como na figura 3.1, se uma das junções estiver à temperatura T_1 e a outra numa temperatura T_2 , uma corrente percorrerá o circuito formado pelos dois condutores. Tal corrente existirá enquanto houver essa diferença de temperatura entre as junções. A força eletromotriz que dá origem a essa corrente, é chamada de Seebeck, sendo diretamente proporcional à diferença de temperatura entre as junções. Para uma combinação de materiais, A e B com uma diferença de temperatura dT , a tensão Seebeck (E_S) pode ser escrita como:

$$dE_S = \alpha_{AB} dT, \text{ ou} \quad (3.1)$$

$$E_S = \int \alpha_{AB} \cdot dT, \quad (3.2)$$

onde α_{AB} é denominado coeficiente Seebeck ou potência termoelétrica para o par de materiais A e B, definido por:

$$\alpha_{AB} = dE_S / dT. \quad (3.3)$$

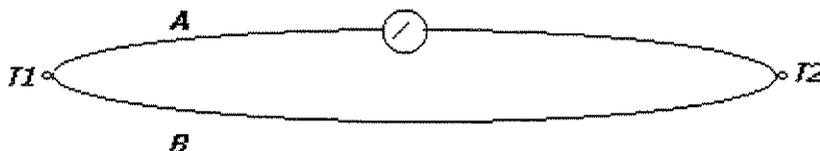


Figura 3.1 - Efeito Seebeck

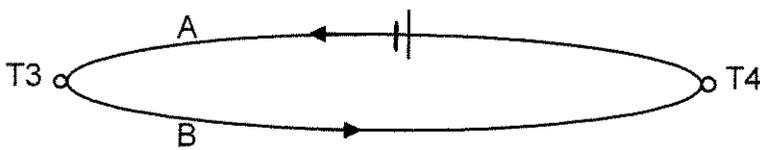
3.2.2 Efeito Peltier

Anos mais tarde, Jean C. A. Peltier descobriu que, quando dois condutores metálicos diferentes são ligados como na figura 3.2, uma corrente percorre o circuito e uma das junções absorve calor enquanto a outra liberta calor. Percebeu ainda que ao inverter o sentido da corrente o efeito nas junções também se invertia, ou seja, a que antes liberava calor passava agora a absorver e a que absorvia passava a liberar.

Evidentemente, a quantidade de calor absorvida ou liberada em uma junção é proporcional à corrente que atravessa essa junção. O efeito Peltier manifesta-se quando a corrente é introduzida externamente ou é induzida pelo próprio termopar e o calor absorvido ou cedido é proporcional à corrente e obedece a relação:

$$dQ_P = E_P I dt. \quad (3.4)$$

E_P é denominado coeficiente ou tensão Peltier e I é a corrente que passa pela junção no intervalo de tempo dt . A direção e intensidade da tensão Peltier dependem da temperatura e dos materiais da junção sendo que E_P , para uma junção, é independente da temperatura da outra junção.



$$T3 = T1 + \Delta T$$

$$T4 = T2 - \Delta T$$

ΔT = variação de temperatura na junção

Figura 3.2 - Efeito Peltier

3.2.3 Efeito Thomson

Em 1851, Thomson chegou à notável conclusão que uma corrente elétrica produz diferentes efeitos térmicos dependendo da direção de sua passagem do quente para o frio ou do frio para o quente no mesmo material.

Aplicando os princípios da Termodinâmica para o termopar e desprezando o aquecimento por condução, Thomson explicou que, se uma corrente elétrica produz somente os efeitos de aquecimento reversíveis de Peltier, a tensão Peltier poderá igualar à tensão Seebeck e assim ser linearmente proporcional à diferença de temperatura para as junções do termopar.

O efeito Thomson relativo a absorção de calor ocorre sempre que uma corrente atravessa um condutor homogêneo, através do qual um gradiente de temperatura é mantido, desprezando a introdução externa de uma corrente ou sua introdução pelo termopar. O calor Thomson absorvido ou gerado em uma unidade de volume de um condutor é proporcional à diferença de temperatura e a corrente e tem como expressão:

$$dQ = [\int \sigma \cdot dT] I d\theta, \quad (3.5)$$

onde σ (coeficiente de Thomson) é o coeficiente de proporcionalidade e representa a razão pela qual o calor é absorvido ou emitido, por unidade de diferença de temperatura e por unidade de corrente.

Esse coeficiente também representa um fem por unidade de temperatura. A tensão Thomson estabelecida em um condutor pode ser expressa como:

$$E_T = \int_{T_1}^{T_2} \sigma \cdot dT. \quad (3.6)$$

A direção e intensidade de E_T dependem da diferença de temperatura e do material considerado.

3.2.4 Resumo

Em resumo, correntes termoelétricas podem existir sempre que as junções de um circuito de no mínimo dois materiais diferentes estão expostos a diferentes temperaturas. Essa diferença de temperaturas é acompanhada pela condução de calor, enquanto que a corrente elétrica é acompanhada pelo efeito de aquecimento irreversível de Joule. Ao mesmo tempo, a passagem de corrente é acompanhada pelos efeitos reversíveis de aquecimento e resfriamento Peltier para as junções de metais diferentes; a combinação diferença de temperatura e passagem de corrente elétrica é acompanhada pelos efeitos reversíveis de aquecimento e resfriamento Thomson ao longo dos condutores. Os dois efeitos reversíveis (aquecimento e resfriamento) são manifestações de quatro fem diferentes que compõe a fem Seebeck:

$$E_S = E_P(T_1) \Big|_{AB} - E_P(T_2) \Big|_{AB} + \int_{T_1}^{T_2} \sigma_A \cdot dT - \int_{T_1}^{T_2} \sigma_B \cdot dT = \int_{T_1}^{T_2} \alpha_{AB} \cdot dT . \quad (3.7)$$

3.3 As Leis Termoelétricas

3.3.1 Primeira Lei Termoelétrica

Foi a partir da descoberta dos efeitos termoelétricos e da sua constatação, que se evoluiu para a construção das três leis que constituem a base da teoria termoelétrica. Fundamentados nesses efeitos e nessas leis, podem ser compreendidos e explicados todos os fenômenos que ocorrem no plano da medição termoelétrica das temperaturas.

A primeira delas - a lei do circuito homogêneo -, estabelece que a fem produzida num termopar depende apenas das temperaturas a que estão submetidas as junções, isto é, a variação de temperatura ao longo do fio (T_3) não interfere na fem produzida pelas junções que é função apenas da diferença de temperatura dos terminais. Essa lei está ilustrada na figura 3.3.

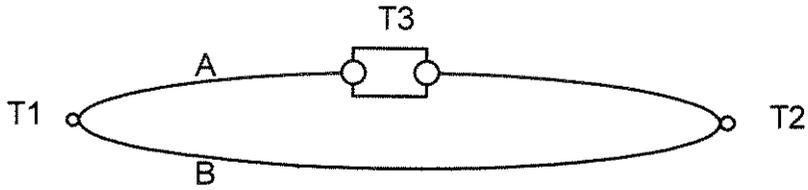


Figura 3.3 - Primeira Lei Termoelétrica

3.3.2 Segunda Lei Termoelétrica

A segunda lei, a dos materiais intermediários, informa que se num circuito composto de dois materiais distintos A e B for acrescentado um outro material C, como ilustrado na figura 3.4, este não provoca alteração na fem resultante se ambos os contatos de A com C, estiverem à mesma temperatura. De outra forma, a figura 3.5 mostra o material C colocado entre os materiais A e B. Nesse caso, a inserção de C entre A e B também não ocasiona alteração na fem, se ambas as ligações de A e B com C estiverem à mesma temperatura. Dessas considerações pode-se, então, antever uma aplicação prática, que é a inserção dos fios de cobre entre os terminais de um termopar, pois esses fios não mudam a fem produzida pelo termopar, desde que as junções estejam à mesma temperatura.

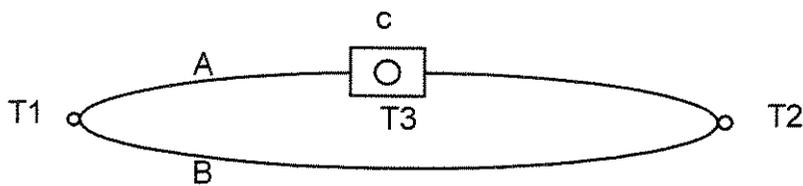


Figura 3.4 – Segunda Lei Termoelétrica

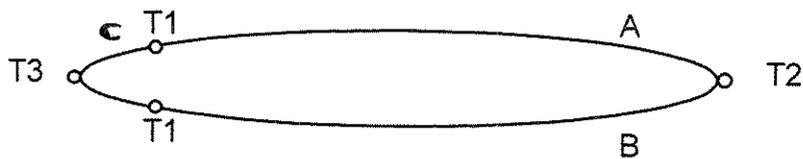
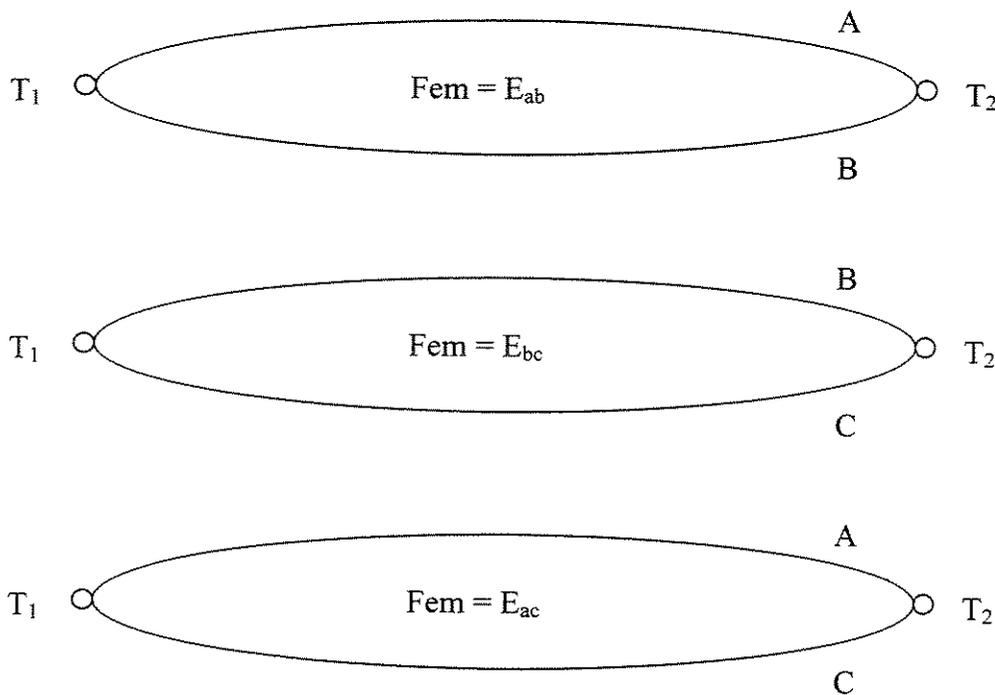


Figura 3.5 – Segunda Lei Termoelétrica

Um exemplo prático dessa aplicação é a ligação dos fios do termopar no cabeçote, onde são conectados ao fio de extensão por meio de um contato comum de cobre. Se houver uma variação de temperatura nesse contato, isto introduz erros de medição, pois será criado um outro termopar onde uma das pernas será de cobre. Contudo, como o tamanho do contato é relativamente pequeno, ambas as junções estão à mesma temperatura e pode-se perfeitamente proceder à leitura com precisão, apesar de um metal diferente ter sido acrescentado ao circuito termopar.

Uma consequência dessa lei está ilustrada na figura 3.6, onde uma das extremidades do termopar composto pelos materiais A e B está na temperatura T_1 , e a outra extremidade, na temperatura T_2 . Entre os terminais tem-se uma fem chamada E_{ab} . Se num segundo termopar formado pelos materiais B e C, uma das junções está à temperatura T_1 e a outra à temperatura T_2 , resulta então uma fem E_{bc} . Tendo-se um terceiro termopar constituído dos materiais A e C e mantendo-se suas extremidades na temperatura T_1 e T_2 , observa-se que $E_{ac} = E_{ab} + E_{bc}$. Logo, conclui-se que a fem para diferentes materiais possui as propriedades aditivas.

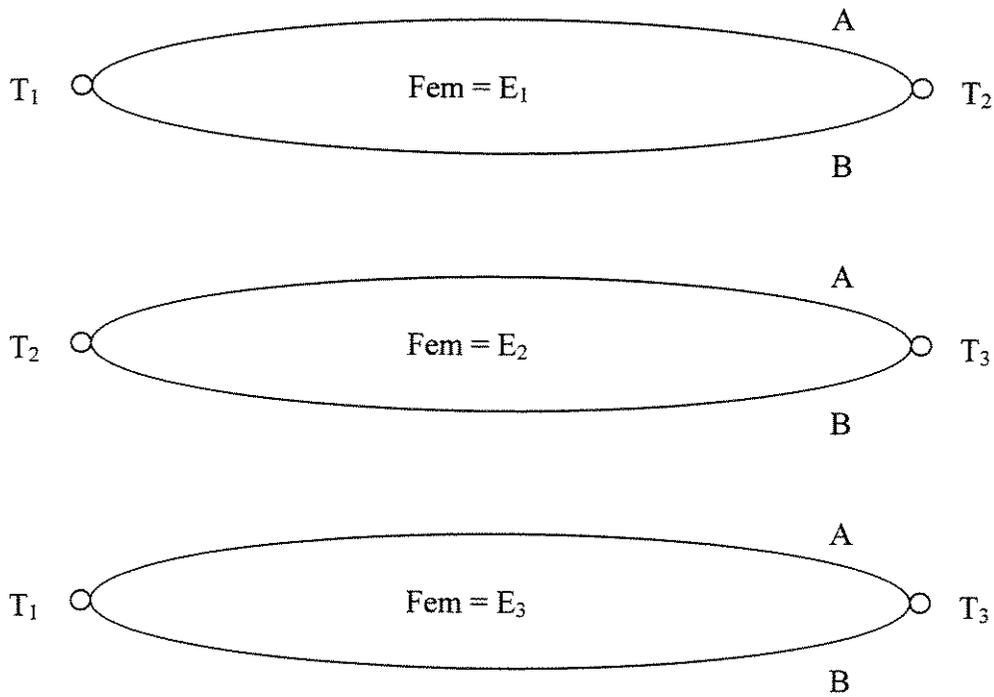


$$E_{ac} = E_{ab} + E_{bc} \tag{3.8}$$

Figura 3.6 – Propriedades aditivada das fem de materiais diferentes

3.3.3 Terceira Lei Termoelétrica

A terceira lei termoelétrica estabelece que se dois metais homogêneos, A e B, produzem uma fem E_1 , quando suas junções estão à temperatura T_1 e T_2 , e uma fem E_2 quando as junções estão à temperatura T_2 e T_3 , a fem E_3 produzida quando as extremidades estão à temperatura T_1 e T_3 , será igual à soma $E_1 + E_2$. Tal lei é ilustrada pela figura 3.7.



$$E_3 = E_1 + E_2$$

(3.9)

Figura 3.7 – Terceira Lei Termoelétrica

Nesse ponto, seria de interesse que se percebesse a íntima relação que existe entre as leis e seus efeitos, com relação à aplicação prática dos termopares no sistema de controle de temperatura. O funcionamento dos termopares baseia-se na medição da fem produzida entre seus terminais. Torna-se fácil, portanto, ver que a extremidade “fria” do termopar é aquela situada

junto ao registrador, ao passo que a extremidade “quente” é colocada no forno ou onde a temperatura está sendo medida. É de uso comum a utilização das expressões fria e quente para identificar as junções dos fios do termopar. Apesar de serem largamente usadas, essa prática é desaconselhável, pois pode constituir uma fonte de erros, pois nem sempre a junção mais fria é a chamada “junção fria”. Aconselhável seria a utilização das expressões junção de referência e junção de medida para identificar os lados do termopar.

Um fato que ilustra a importância dessa lei resulta da propriedade aditiva das fem produzidas pelos termopares. Trata-se da ligação em série ou paralelo de termopares como mostra a figura 3.8.

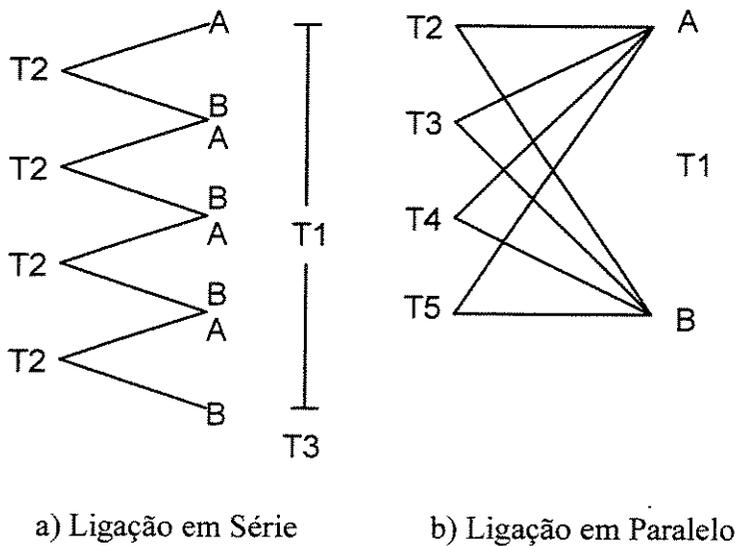


Figura 3.8 – Ligação em Série e em Paralelo de Termopares

A fem da ligação em série é dada pela seguinte expressão:

$$fem = \sum_{i=1}^n E_i . \tag{3.10}$$

A fem da ligação em paralelo é dada pela seguinte expressão:

$$fem = \sum_{i=1}^n E_i / n. \quad (3.11)$$

Assim, observa-se que a teoria que fundamenta o funcionamento dos termopares está relacionada às três leis e aos três efeitos apresentados. Contudo, a seleção de um termopar para uma determinada medida é obtida da experiência acumulada, ou seja, do domínio do conhecimento adquirido e obediência restrita a uma série de critérios que limitam o uso deste ou daquele termopar. As considerações acerca desses fatores serão apresentadas na próxima seção.

3.4 Critérios de seleção de termopares

A escolha de um termopar para uma determinada medida tem que ser realizada de forma criteriosa. Existem várias normas que restringem a aplicação de um termopar. Talvez a mais importante delas seja a faixa de temperaturas na qual ele vai trabalhar. Portanto, um dos primeiros passos na seleção do termopar é o estabelecimento da faixa de temperaturas de medição.

Em seguida, analisam-se outras características desejáveis dos termopares que devem ser levadas em conta quando da sua seleção.

O funcionamento do termopar baseia-se na variação da fem produzida pela diferença de temperaturas. Portanto essa fem deve ser suficientemente grande para possibilitar leituras nos aparelhos de medição. Por outro lado, requer-se uma estabilidade na fem produzida pelo material e para isso este deve ser homogêneo em sua estrutura, ou seja, livre de impurezas que ocasionam uma discrepância nos valores da fem gerada.

Materiais de boa qualidade para termopares devem apresentar alta potência termoelétrica, ou seja, possuir alto rendimento de fem por grau de variação de temperatura. Outro fator fundamental para ser levado em consideração é o ambiente de trabalho, ao qual estará submetido o termopar. Neste particular deve-se atentar para a atmosfera de serviço, que pode atacar o material do fio, provocando uma corrosão, que certamente vai influir na fem produzida pelo termopar. Nesses casos, visando a proteção do fio, são fabricados termopares com materiais isolantes. Porém da mesma forma, deve-se ter conhecimento da atmosfera de trabalho para saber-se qual o isolante a ser usado.

Ainda referindo-se ao ambiente, os termopares devem possuir suficiente resistência mecânica para suportar esforços ou vibrações quando em serviço. Deve-se levar em conta a

facilidade de substituição do termopar que, por possuir vida limitada, deve ser facilmente substituível.

Um outro fator especialmente importante para quem adquire um termopar é o seu custo/desempenho. A maior economia será feita quando a escolha do termopar for acertada, ou seja, quando os critérios de seleção forem obedecidos, pois dessa forma evita-se a degradação do material e o prejuízo associado.

3.5 Termopares mais usados

Será apresentada uma relação dos termopares mais empregados em aplicações industriais, bem como uma descrição de suas principais características.

Os tipos usuais possuem uma identificação feita por meio de letras (S, R, J, T, K). Tal procedimento foi estabelecido pela “Instrument Society of America” (I.S.A) e, mais tarde, adotado pela “U. S.A Standard Institute” (USASI) com o acréscimo dos tipos E e B.

3.5.1 Tipo S – Pt 90% Rh 10% - Pt

Termopares tipo S são constituídos de dois condutores metálicos, sendo que um deles é formado de platina e o outro de 90% de platina e 10% de ródio. Apresenta-se a seguir algumas de suas propriedades:

- a) É usado para medidas precisas na faixa entre -50 a 1768°C.
- b) É usado para definir a Escala Internacional Prática de Temperatura de 630,74 a 1064,43°C.
- c) É usado na calibração de outros termopares e em medidas de alta precisão.
- d) Possui uma ampla escala de temperatura.
- e) É quimicamente inerte e estável a altas temperaturas, mesmo em atmosfera oxidante.
- f) O uso do Rh justifica-se ao invés do Ir, pois, este tende a evaporar em altas temperaturas.
- g) Reduz-se muito facilmente em atmosferas redutoras.
- h) Não deve ser usado para temperatura abaixo de -50°C, pois sua potência elétrica cai tornando-se 0 a -138°C.
- i) É homogêneo, não apresentando histerese.

- j) Possui excelentes propriedades mecânicas.
- k) É usado na indústria para temperaturas altas, onde não se aplicam os termômetros de resistência, outros termopares e pirômetros ópticos.
- l) Depois de submetido a uma alta temperatura o termopar deve ser cuidadosamente verificado pois o uso contínuo nesta condição pode ocasionar falhas no seu desempenho.
- m) Possui valor aquisitivo relativamente alto.

3.5.2 Tipo R - Pt 87% Rh 13% - Pt

Termopares tipo R são constituídos de dois condutores metálicos, sendo que um deles é formado de platina e o outro de 87% de platina e 13% de ródio. Apresenta-se a seguir algumas de suas propriedades:

- a) É usado para medidas precisas na faixa entre -50 a 1768°C .
- b) É um termopar menos caro que o tipo S por causa da menor quantidade de platina contida no seu condutor positivo.
- c) São recomendados para uso contínuo em atmosferas oxidantes ou inertes.
- d) Depois de submetido a uma alta temperatura o termopar deve ser cuidadosamente verificado pois o uso contínuo nessa condição pode ocasionar falhas no seu desempenho.

3.5.3 Tipo B - Pt 70% Rh 30% - Pt 94%.Rh 6%

Termopares tipo B são constituídos de dois condutores metálicos, sendo que um deles é formado de 70% de platina e 30% de ródio e o outro de 94% de platina e 6% de ródio. Apresenta-se a seguir algumas de suas propriedades:

- a) É usado para medidas precisas na faixa entre 0 a 1820°C .
- b) São recomendados para uso contínuo em atmosferas oxidantes ou inertes.
- c) São adequados para a utilização de curta duração em vácuo.
- d) São menos sensíveis a altas temperaturas do que os termopares tipo S e R.

3.5.4 Tipo J – Ferro – Constantan

Constantan é uma liga de cobre e níquel compreendida no intervalo [Cu₅₀Ni₅₀ - Cu₆₅Ni₃₅]. Para uso termoeétrico juntamente com o ferro, é usada a composição: Cu₅₇ Ni₄₃. Apresenta-se a seguir algumas de suas propriedades:

- a) É usado para medidas precisas na faixa entre -210 a 1200°C.
- b) É o termopar mais usado na indústria.
- c) Possui alta potência termoeétrica.
- d) Adaptável tanto a atmosferas oxidantes como redutoras.
- e) Não é homogêneo.
- f) Possui baixo custo relativo.

3.5.5 Tipo T – Cobre – Constantan

O constantan usado na liga com o cobre possui uma combinação diferente daquele usado com o ferro. Este tipo de constantan é conhecido como Adams Constantan e é reconhecido pela ASTM. Apresenta-se a seguir algumas de suas propriedades:

- a) É usado para medidas precisas na faixa entre -270 a 400°C.
- b) Na faixa de -200 a 350°C é mais satisfatório do que o termopar de platina, devido a sua alta potência termoeétrica.
- c) É também mais indicado que o ferro constantan devido a maior homogeneidade.
- d) O cobre de termopar oxida acima de 350°C.

3.5.6 Tipo K – Cromel – Alumel

Nesse caso, estudam-se primeiramente algumas propriedades de cada um dos materiais que constituem o termopar, para em seguida tratar-se das características próprias do par.

- a) É usado para medidas precisas na faixa entre -270 a 1372°C.

- b) Cromel P é uma liga níquel-cromo na proporção Ni₉₀ Cr₁₀ e possui uma potência elétrica bem elevada qual seja: 35μV/°C a 400°C.
- c) É resistente à oxidação mesmo em altas temperaturas.
- d) O alumel, que também é uma liga, apresenta a seguinte constituição: Ni₉₄ Mn₃ Al₂ Si. Sua potência elétrica é expressa por -7μV a 9μV/°C no intervalo de 200 a 1300°C.
- e) O par é resistente à oxidação podendo trabalhar à temperatura de 1200°C sem rápida deterioração e a 1300°C em tempo limitado.
- f) A potência termoelétrica do par (cerca de 40μV/°C de 250 a 1000°C e mesmo acima de 1300°C) não cai abaixo de 35μV/°C.
- g) É sensível a ambientes redutores sendo indicado para atmosferas oxidantes.
- h) O par pode ser usado para temperaturas abaixo de 0°C onde, a -200°C, a potência termoelétrica é 15μV/°C. A -100°C a potência termoelétrica é de 30μV/°C; a 0°C é de 40μV/°C.
- i) A mais importante aplicação do tipo K ocorre na faixa de 700 a 1260°C. O par deteriora –se rapidamente a altas temperaturas em atmosfera que contém H₂, S, CO.

3.5.7 Tipo E – Cromel – Constantan

Os termopares tipo E são recomendados para uso em altas temperaturas. Apresenta as mesmas limitações de utilização dos termopares tipo K. Apresenta-se a seguir algumas de suas propriedades:

- a) É usado para medidas precisas na faixa entre -270 a 1000°C.
- b) Possui grande potência termoelétrica: 68μV/°C, a 100°C; 81μV/°C, a 500°C; e 77μV/°C, a 900°C.
- c) A característica de grande potência termoelétrica torna-o muito usado em medidas de diferença de temperaturas devido à fácil amplificação. Por isso também é usado em termopilhas para pirômetro de radiação.
- d) Possui uma alta estabilidade de fem.

3.6 Fabricação dos termopares

O cuidado, a técnica e o procedimento exatos na construção do termopar principiam bem antes de fazer a soldagem das extremidades e a colocação dos isolantes. Normas devem ser obedecidas desde o momento em que se retira o fio do carretel, pois este deve ser cuidadosamente trabalhado evitando-se aquecimento, torções e esforços durante a operação. Tais fatores podem causar variações na fem característica do metal. Nesse serviço procura-se evitar ao máximo as trepidações.

A cerca de 24,5mm da extremidade da junção os fios devem ser perfeitamente limpos. O processo de limpeza por sua vez deve desenvolver-se com muito cuidado. Aconselha-se apenas o uso de papel abrasivo durante a limpeza da superfície do fio, embora fios de metais mais comuns não se prejudicam demasiadamente se forem ligeiramente limados.

O manuseio de fio de platina e platina ródio deve ter esmerado procedimento. Qualquer depósito de gordura ou sal sobre o fio compromete seriamente a precisão das medidas a serem feitas. Por isso, o contato manual deve ser abolido, e se isso for inevitável, recomenda-se após ter havido o contato, lavar-se o fio com álcool e em seguida enxugá-lo com papel de filtro.

Depois que os fios já estiverem devidamente preparados e a junção estar para ser formada, vários processos podem ser usados dependendo do tipo de termopar, tamanho e aplicação. Os tipos mais usados são a solda de torção e a solda de topo. A razão principal que motiva o uso da solda de torção é a resistência mecânica adicional que ela fornece à junta e também o melhor formato que é obtido na junção quando se trata de pequenos diâmetros de fio. Essa solda, contudo, cria um problema: a junção não se dá necessariamente no ponto de soldagem. Ela pode estar naquele ponto onde primeiramente os fios se encontram. Por exemplo, supondo-se um fio de ferro e outro de cobre ambos perfeitamente limpos, se for empregado torção a junção entre eles não se dará na extremidade dos fios, principiando-se no ponto onde se inicia a torção. Se o comprimento da parte torcida dos fios for muito grande e houver aí uma variação de temperatura, isso poderá trazer sérios erros na qualidade de fabricação.

Uma boa soldagem em ferro-constantan ou cromel-alumel pode ser feita sem grandes dificuldades por meio do método simples de arco de carbono ao invés de chama de gás. Este método é especialmente recomendado àqueles que não possuem experiência em soldagem da junção de termopares. A chama de gás é preferível ao uso do arco de carbono principalmente

quando se trata de fios mais delgados. O processo oxiacetilênico é comumente usado na soldagem de cromel-alumel e ferro-constantan. Em laboratórios onde os fios freqüentemente possuem diâmetros muito pequenos torna-se óbvio que o uso da solda a gás ou em arco não pode ser usado. Nesse caso, sugere-se a soldagem por meio de descarga de capacitor. Esse procedimento é particularmente usado na fabricação de termopares com fios muito finos de cobre constantan.

3.7 Proteção dos termopares

As condições de operação dos termopares são comumente altas temperaturas e atmosferas diversas, sofrendo por vezes pressões muito acima da ambiente. Devido a isso, desenvolveu-se uma gama de isolantes que visam a proteção do termopar Nepomuceno (1990).

Esses isolantes possuem as mais variadas características e não raros os casos de um mesmo termopar possuir mais de um isolante com propriedades diferentes. A utilização correta dessa proteção é fundamental. Na tabela 3.1 são apresentadas uma série de aplicações e a correspondente proteção indicando a natureza do serviço. Na primeira coluna tem-se o tipo de indústria, na Segunda, a aplicação dentro dessa; na terceira, o termopar mais recomendado dentro de uma análise de custo desempenho; e na Quarta, o tubo de proteção mais recomendado para o termopar escolhido.

O trabalho de modelagem de dados e análises baseiam-se em termopares com cápsula de proteção.

Tabela 3.1 – Tubos de Proteção de Termopares em Aplicações Específicas

INDÚSTRIA	APLICAÇÃO	TERMOPAR	TUBO DE PROTEÇÃO
Tratamento Térmico	Recozimento até 700°C	Ferro-Constantan	Ferro
	Acima de 700°C	Cromel-Alumel	Inconel ou Aço 446
	Cementação	Cromel-Alumel	Inconel

Tratamento Térmico	Têmpera até 700°C	Ferro-Constantan	Ferro
	De 700°C a 1000 C	Cromel-Alumel	Inconel ou Aço 446
	Acima de 1000°C	Pt, Pt 10% Ródio	Cerâmico 610 ou 710
	Nitretação	Cromel-Alumel	Aço 446
	Banhos de Sal	Cromel-Alumel	Inconel ou Aço446 ou Perlítico
Cimento/Cal	Conduto de Fumaça	Cromel-Alumel	Inconel ou Aço 446
Usinas de Força	Gases de Combustão	Ferro-Constantan	Ferro
	Pré-aquecedores	Ferro-Constantan	Ferro
	Linha de Vapor	Ferro-Constantan	Aço Inox 304
	Linha de Água	Ferro-Constantan	Ferro
Ferro e Aço	Alto Forno	Cromel-Alumel ou Ferro-Constantan	Inconel ou Aço 446
	Tubo Vertical		
	Abóbada	Pt, Pt 10% Ródio	Cerâmico 610 ou 710
	Saídas de Gases	Cromel-Alumel	Ferro ou Aço 446
	Forno Siemens Martin	Cromel-Alumel	Inconel
	Gases de Combustão		
Forno tipo poço	Cromel-Alumel	Inconel	
Até 1100°C			
	Acima de 1100°C	Pt, Pt 10% Ródio	Carboneto de Silício
Vidros	Alimentadores	Pt, Pt 10% Ródio	Platina ou Rayotube
	Tanques Abóbadas	Pt, Pt 10% Ródio	Cerâmico 710
	Bicas	Pt, Pt 10% Ródio	Cerâmico 710 ou Platina
Cerâmica	Forno Rotativo	Pt, Pt 10% Ródio	Dupla Proteção Cerâmica
	Secadores	Ferro-Constantan	Ferro
	Esmaltagem	Cromel-Alumel	Inconel ou Aço 446
Fundição(Al, Cu eLatão)	Para imersão em cadinhos	Ferro-Constantan ou Cromel-Alumel	Perlítico ou Carboneto de Silício

3.8 Calibração dos termopares

O objetivo na calibração de termopares é determinar a relação entre a fem e a temperatura. A calibração pode ser realizada de duas maneiras: a ponto fixo ou por comparação com instrumentos padrões como termopares ou termômetros de resistências Ripple (1994).

A magnitude da fem desenvolvida por um termopar depende da temperatura medida, da junção de referência e da composição do fio na região do gradiente de temperatura.

Um fator importante na precisão da calibração do termopar é a precisão do instrumento usado para medir a fem.

Para se obter um alto grau de precisão com um termopar o fio precisa ser estável.

Na fabricação dos termopares um dos pontos mais delicados é aquele que se refere à calibração dos fios que constituem o termopar. Essa calibração é feita baseada num fio de platina contra o qual os outros fios são comparados.

A escolha de tal fio como padrão encontra a sua razão de ser nas excelentes propriedades da platina que são: estabilidade de fem, resistência à oxidação e homogeneidade. O fio padrão por sua vez é calibrado em temperaturas fixas, como por exemplo, o ponto de ebulição do oxigênio, o ponto triplo da água e o ponto de congelamento do ouro.

Em casos onde se exigem medições de temperatura com elevada precisão, torna-se necessário a calibração de cada termopar após sua confecção. A técnica sugerida para esse caso requer equipamentos especiais como termopares padrão e fornos de calibração.

O forno caracteriza-se por ter sua temperatura precisamente controlada e por conter no seu centro de aquecimento um bloco de cobre ou alumínio com diversas cavidades. O termopar-padrão e os outros termopares a serem calibrados são então imersos nessas cavidades. Quando o forno e o seu bloco metálico atingem a estabilidade térmica e o equilíbrio numa dada temperatura, esta pode ser rigorosamente determinada pelo termopar padrão e os necessários dados de correção registrados para cada termopar.

O princípio contido nessa concepção é que a temperatura do forno pode ser controlada dentro de limites bastante estreitos e a existência do bloco metálico proporciona uma inércia térmica adicional de tal forma que as temperaturas nas cavidades sejam constantes dentro de milésimos de grau, e o que é mais importante, o gradiente de temperaturas entre as cavidades permanece também na ordem de milésimos de grau.

Um termopar padrão pode ser calibrado a ponto fixo. Na seleção de pontos para calibrar um termopar padrão, algumas vezes tem-se que escolher entre um ponto de ebulição ou um ponto de congelamento. Na determinação da fem do termopar no ponto de congelamento, o tempo em que as observações devem ser feitas é limitado ao período de congelamento, no caso de pontos de ebulição, não há limite de tempo.

A fem produzida por um termopar no ponto de congelamento de um metal é constante e possui repetibilidade se as seguintes condições forem seguidas:

- a) O termopar deve ser protegido de contaminações.
- b) O termopar deve ser imerso na amostra de ponto de congelamento durante um tempo suficientemente longo para eliminar o aquecimento ou refrigeração da junção devido ao fluxo de calor ao longo dos fios e tubos de proteção.
- c) As junções de referências devem ser mantidas a uma temperatura constante.
- d) As amostras do ponto de congelamento devem ser puras.
- e) O metal deve ser mantido essencialmente a uma temperatura uniforme durante o congelamento.

A fem do termopar no ponto de fusão do metal pode ser obtida de maneira semelhante ao ponto de congelamento. Pontos de fusão são usados quando uma quantidade limitada de material está disponível. Um método de obtenção da fem de um termopar no ponto de fusão com uma pequena quantidade de material é o método do fio. Nesse método, os fios do termopar são colocados em um tubo de isolamento de dois furos e uma amostra do material na forma e no mesmo diâmetro do fio é soldado nas suas extremidade Após a soldagem, o material deve se levado ao forno e a fem deve ser medida quando o ponto de fusão é obtido. O ouro é o metal mais usado na calibração de termopares pelo método do fio.

Utilizam-se os pontos de ebulição na definição de valores da “International Temperature Scale”. O ponto de ebulição da água, entretanto, é o mais utilizado na calibração de termopares.

A calibração de um termopar, por comparação com um termopar-padrão, é suficientemente precisa para a maioria dos propósitos e pode ser feita convenientemente nas indústrias e laboratórios técnicos. O sucesso desse método depende da habilidade do observador em levar a junção do termopar à mesma temperatura do elemento padrão. A precisão obtida é limitada pela precisão do padrão. O método usado para levar a junção do termopar à mesma

temperatura do padrão depende do tipo de termopar, do tipo de padrão e do método de aquecimento.

3.9 Resumo do capítulo

Neste capítulo foram apresentados, inicialmente, os efeitos termoelétricos e as leis termoelétricas que conceituam a teoria dos termopares. Mostrou-se que os termopares podem estar ligados em série ou em paralelo conforme a necessidade de sua utilização. Expôs-se que o critério de seleção de um termopar deve ser feito de uma forma bastante cuidadosa e apresentou-se os tipos mais utilizados. Analisou-se a fabricação dos termopares, discutindo-se as técnicas e procedimentos exatos para a construção destes. Mostrou-se as técnicas de proteção dos termopares, pois de uma maneira geral, esses trabalham em condições adversas de temperatura e pressão. Considerou-se a calibração de termopares cujo objetivo é determinar a relação entre a fem e a temperatura. Finalmente, mostrou-se que a calibração pode ser realizada de duas maneiras, a ponto fixo ou por comparação.

Capítulo 4

Modelagem das Curvas de Calibração e da Confiabilidade

4.1 Introdução

Qualquer instrumento de medida utilizado em linhas de produção sofre desgastes, seja devido ao tempo de uso ou à operação em ambientes agressivos. Os primeiros indícios de desgastes que aparecem estão relacionados com a perda de precisão do instrumento, que são corrigidas fazendo-se uma nova calibração. Um problema que surge é saber com que frequência deve ser feito esse ajuste ou, em outras palavras, determinar quanto tempo de uso levará para que o instrumento perca a sua calibração.

Quando é requerida alta precisão pelo tempo de vida útil do termopar, ocorrem mudanças na precisão que devem ser consideradas.

Em muitos processos industriais, termopares que estão sendo utilizados apresentam uma falha mecânica ou sérios erros nas temperatura indicadas; mas antes disso ocorrer o termopar pode ter apresentado uma grande variação na precisão da temperatura medida.

As mudanças nas características termoeletricas dos materiais do termopar devido às condições adversas de trabalho, são gradativas, cumulativas e dependem de fatores como temperatura, tempo de duração do serviço e a atmosfera em que está envolvido.

Seebeck mostrou que num circuito formado por dois condutores metálicos diferentes, se uma das junções estiver a temperatura T_1 e a outra à temperatura T_2 , uma corrente percorrerá o circuito formado pelos dois condutores. Tal corrente existirá enquanto houver essa diferença de temperatura entre as junções. A fem que dá origem a essa corrente é diretamente proporcional à diferença de temperatura entre as junções. As variações da difusão de elétrons nas junções ao longo do tempo provoca desvio de leitura dos termopares. É extremamente difícil e impreciso fazer uma modelagem dos desvios de calibração através do estudo da difusão de elétrons, pois

envolve um grande número de variáveis e estudo de fenômenos termoelétricos e químicos que não são facilmente controláveis. Dentro dessa premissa, neste trabalho fez-se a opção de elaborar critérios de modelagem do desvio baseado na análise de dados experimentais. Andrew (1968) e Kamal (1998) realizaram trabalhos em laboratório com o objetivo de elaborar modelos de desvio de calibração baseado em dados experimentais e mostram que as curvas de desvio de calibração tem tendência a exponencial.

Neste trabalho usa-se o critério de obtenção de curvas de desvio a partir de dados experimentais e que essas apresentam uma distribuição exponencial. Após a determinação dos pontos de desvio traçam-se as curvas exponenciais do desvio de calibração em função do tempo para cada temperatura específica. Com a obtenção das curvas exponenciais é necessário estabelecer os seus limites. Após o estudo das medidas de estatística foi definido a utilização da distribuição qui-quadrado para a determinação dos limites das curvas de calibração, a um certo nível de confiança. Na análise da confiabilidade foi admitida que a taxa de falha do termopar é constante, ou seja, a distribuição de probabilidade de falha obedece a um modelo exponencial.

4.2 Curvas de calibração

O trabalho de Andrew (1968) , mostra a estabilidade de termopares a cromel-alumel. As temperaturas foram medidas em relação a um termopar padrão Pt 90% Rh 10% - Pt calibrados de acordo com as especificações do “International Temperature Scale”. O par de fios sob teste foi isolado por isoladores de porcelana de dois furos e o termopar de platina-rodio foi protegido por um tubo de porcelana. O forno usado neste trabalho foi do tipo de resistência enrolado com fio de platina-rodio.

Foi realizado um estudo nos desvios de fem de termopares cromel-alumel aquecidos em uma atmosfera oxidante a várias temperaturas e por vários tempos. Foram utilizadas temperaturas de: 426, 537, 648, 759, 870, 981, 1092°C e tempos de: inicial, 200, 400, 600, 800 e 1000 horas.

Dos gráficos apresentados neste trabalho foi montada a tabela 4.1 que relaciona os desvios de calibração com o tempo para cada temperatura. Após a determinação dos desvios, calcula-se o logaritmo neperiano de tais dados. Em seguida, traçam-se as retas interpolantes dos logaritmos dos desvios em função do tempo, para as várias temperaturas. Com esses valores determinam-se as curvas exponenciais de desvio de calibração em função do tempo para diversas temperaturas.

Um resultado típico do modelo de desvio de calibração de um termopar operando à temperatura T_1 , em função do tempo, é dado pela expressão:

$$D_1 = \exp(a_1) \cdot \exp(b_1 t). \quad (4.1)$$

onde os valores a_1 e b_1 são expoentes da condição inicial de desvio e taxa de variação temporal, respectivamente. Diferentes temperaturas de operação induzem diferentes condições iniciais de desvio, bem como taxas de variação temporal diversas. Assim, a expressão de desvio de calibração para uma condição de temperatura T_k é dada por:

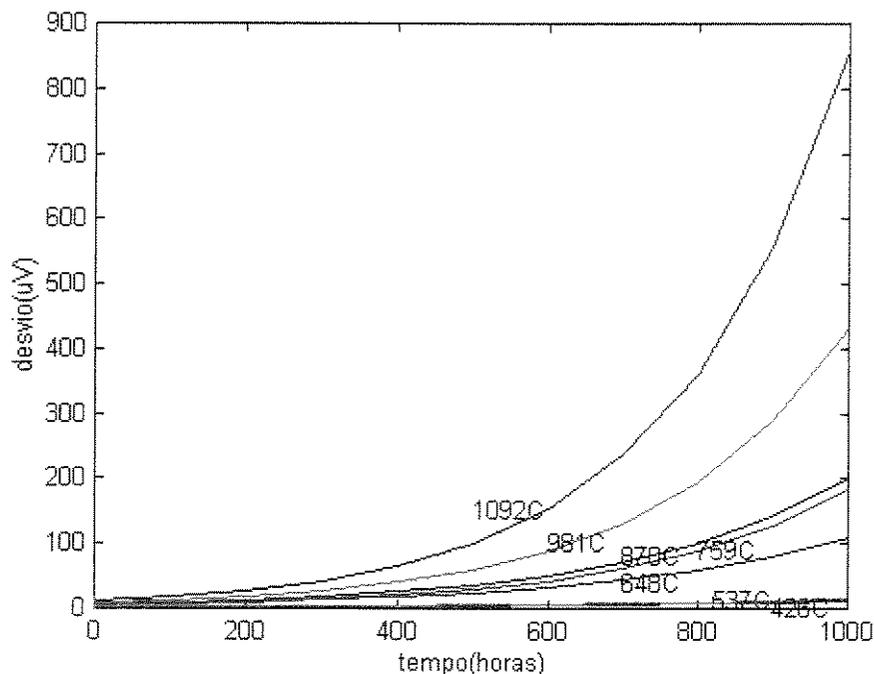
$$D_k = \exp(a_k) \cdot \exp(b_k.t). \quad (4.2)$$

Tabela 4.1- Desvio de Termopares Cromel-Alumel em função do tempo e temperatura

Temperatura(°C)	Tempo(horas)	Desvio(μ V)	ln desvio
426	0	1	0,00
426	200	2	0,69
426	400	4	1,39
426	600	6	1,79
426	800	8	2,08
426	1000	10	2,30
537	0	1	0
537	200	3	1,10
537	400	5	1,61
537	600	8	2,08
537	800	10	2,30
537	1000	12	2,48
648	0	1	0,00

648	200	28	3,33
648	400	30	3,40
648	600	32	3,47
648	800	34	3,53
648	1000	36	3,58
759	0	1	0,00
759	200	41	3,71
759	400	45	3,81
759	600	46	3,83
759	800	48	3,87
759	1000	57	4,04
870	0	1	0,00
870	200	57	4,04
870	400	60	4,09
870	600	62	4,13
870	800	65	4,17
870	1000	67	4,20
981	0	1	0,00
981	200	102	4,62
981	400	120	4,79
981	600	120	4,79
981	800	160	5,08
981	1000	193	5,26
1092	0	1	0,00
1092	200	198	5,29
1092	400	260	5,56

1092	600	330	5,80
1092	800	380	5,94
1092	1000	443	6,09



Conforme os dados apresentados na tabela 4.1, determinam-se os gráficos da figura 4.1.

Figura 4.1 - Gráfico Desvio x Tempo para Termopares Cromel-Alumel.

Analisando as curvas nota-se um aumento de desvio com o tempo. Um método para análise dessas curvas é estabelecer uma condição limite de desvio permitido e verificar em que tempo cada curva de uma determinada temperatura alcança esse limite.

Kamal (1998), testou um conjunto de diversos termopares (tipo K,T e J) sob diferentes condições de trabalho com o objetivo de elaborar técnicas e critérios confiáveis para serem utilizados na manutenção de sensores de temperatura. O método de calibração empregado foi de comparação, utilizando-se um conjunto padrão de termômetros de vidro cuja precisão é da ordem de 0,1°C. O sistema de calibração consiste de um banho líquido com agitador, sendo que o líquido utilizado foi óleo. As leituras dos termopares foram feitas com um Data Logger

programável da marca Omega do laboratório de termometria da UNICAMP. Cada termopar foi devidamente calibrado para cinco pontos diferentes de temperatura. Em seguida o termopar foi submetido a um regime de trabalho periódico com uma duração de oito horas, após o qual o termopar foi novamente calibrado. Esse procedimento foi estendido por um período de aproximadamente seis meses. O regime de trabalho ao qual o termopar foi submetido simulou diversas condições de operação, tais como colocar o termopar a uma temperatura de 200°C constante durante um período de oito horas, e a ciclos de temperaturas de 200°C e 0°C a cada uma hora por um período total de oito horas.

Todos os termopares testados foram fabricados e calibrados no laboratório de termometria da UNICAMP, seguindo as normas correspondentes. Os testes foram realizados em uma bancada de teste montada no laboratório e que permite calibrar o sensor de forma adequada e com o máximo controle. Na mesma área de teste foi montado um dispositivo que permite submeter o termopar a um regime de trabalho que simula as diversas condições de operação consideradas anteriormente.

Os gráficos mostrados nas figuras 4.2 a 4.4 representam curvas de desvios em função do tempo, para termopares tipo K, T e J obtidas de sucessivas calibrações.

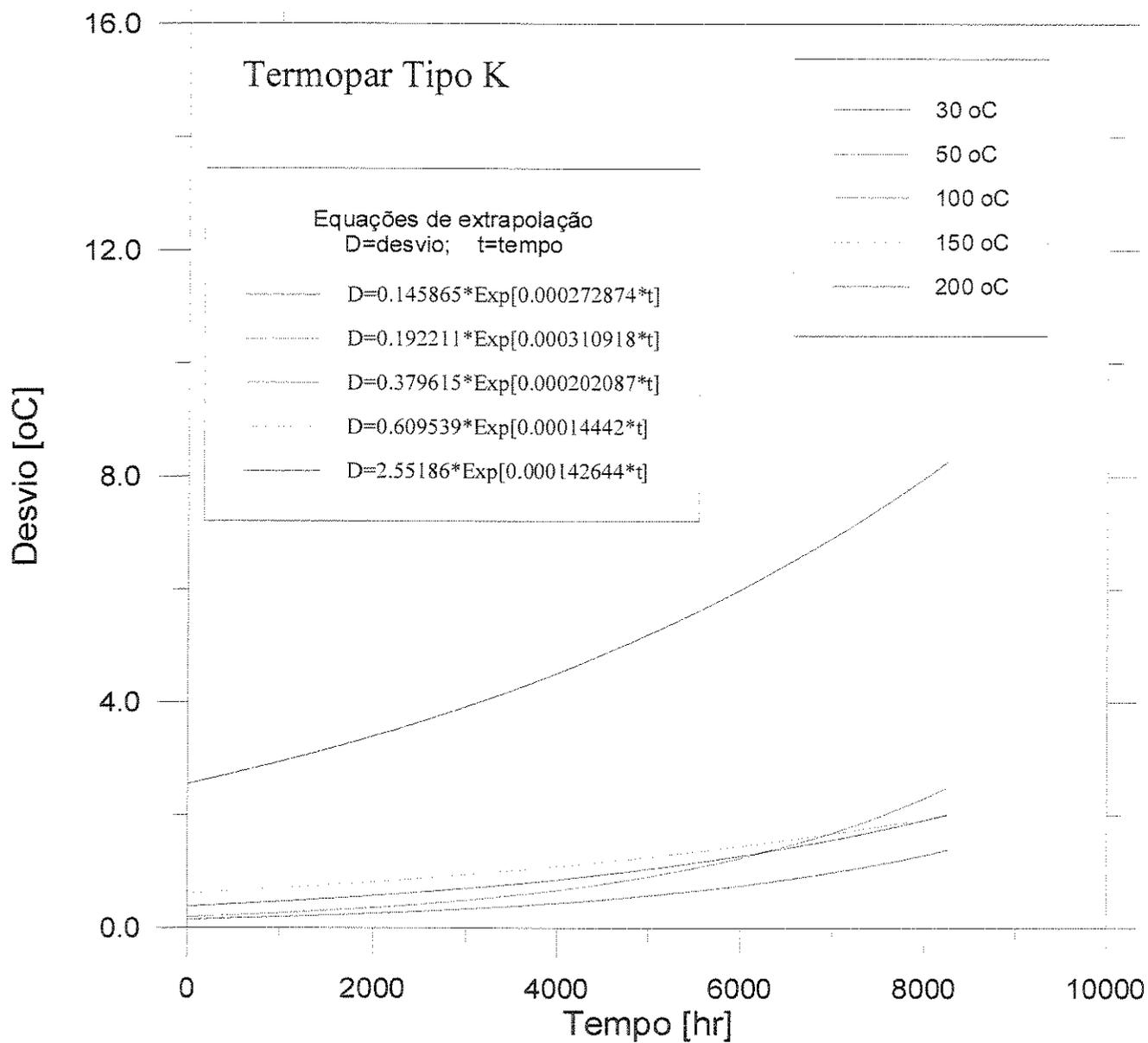


Figura 4.2 – Curvas de Calibração de Desvio x Tempo para Termopares Tipo K

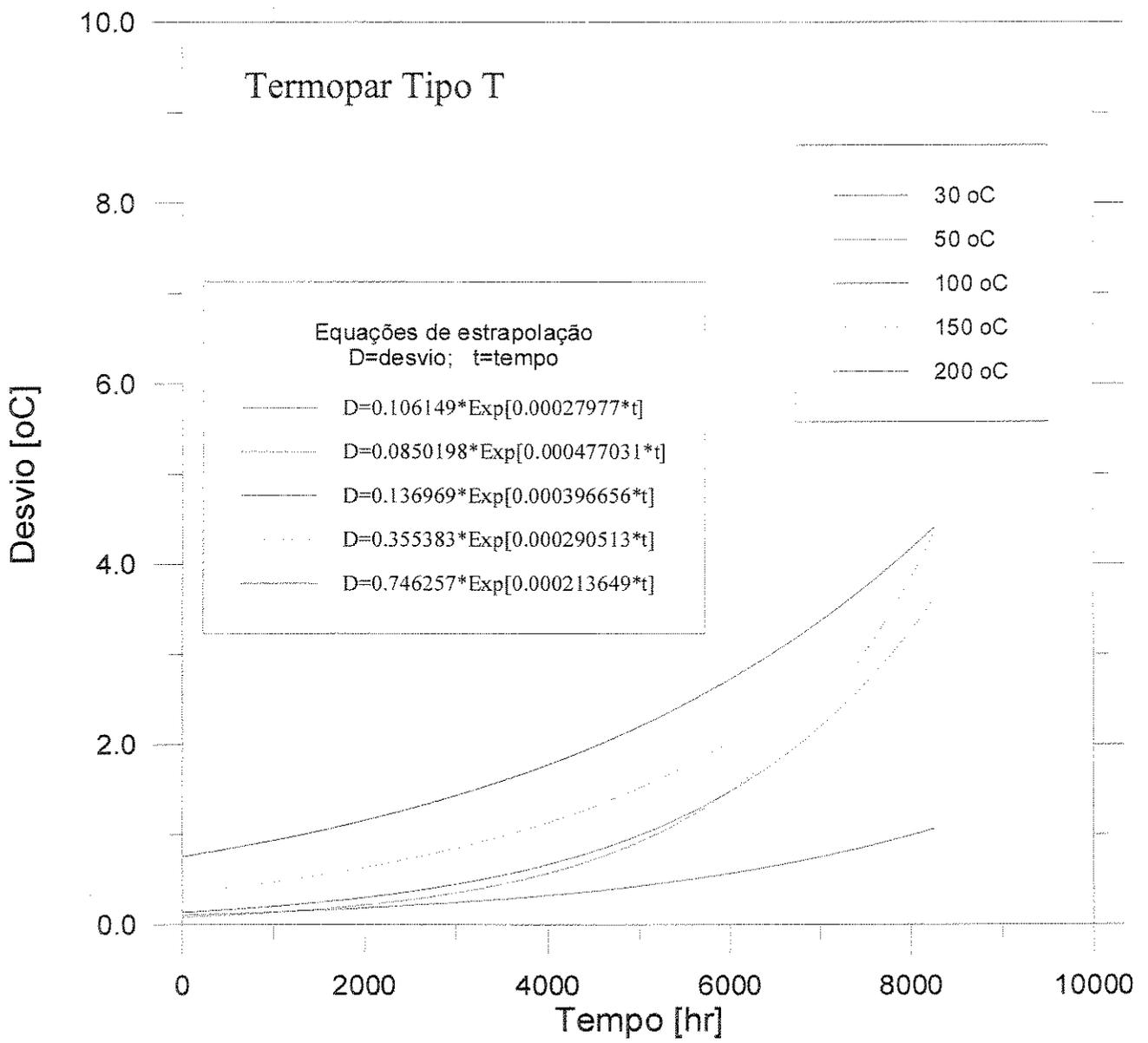


Figura 4.3 – Curvas de Calibração de Desvio x Tempo para Termopares Tipo T

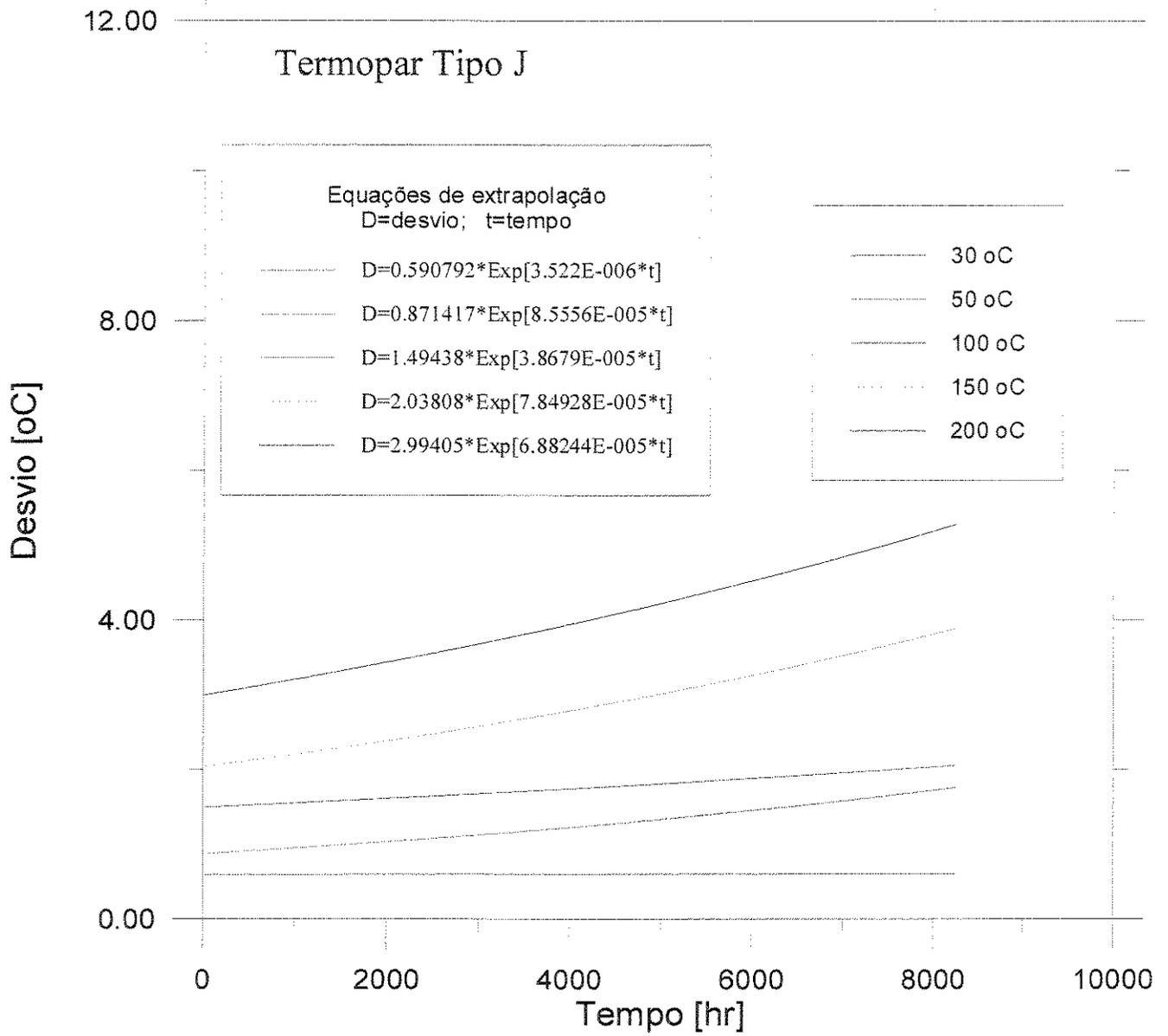


Figura 4.4 - Curvas de Calibração de Desvio x Tempo para Termopares Tipo J

Analisando-se as curvas nota-se um aumento de desvio com o passar do tempo. Esse aumento de desvio deve ser associado ao uso do termopar em condições severas de regime de trabalho nas quais o termopar perde a sua calibração original, sofrendo desvios cada vez maiores em relação à leitura real de temperatura. Nota-se que, para os três tipos analisados, os desvios são maiores para os termopares tipo K quando comparados com os desvios dos termopares tipo T e J. Outro fator importante é que o desvio obedece a uma lei exponencial de variação, critério que será seguido nas análises de desvios de temperaturas em função do tempo, realizadas neste trabalho.

4.3 Cálculo dos limites das curvas de calibração

Após a determinação das curvas de calibração é necessário especificar os seus limites. Inicialmente, calcula-se a distância entre os pontos originais de desvio e a curva determinada para cada temperatura. Em seguida elevam-se essas distâncias ao quadrado e calcula-se a variância pela fórmula.

$$s^2 = \sum_{i=1}^n d_i^2 / n - 1. \quad (4.3)$$

onde d_i é a distância entre os pontos originais de desvio e a curva determinada para cada temperatura e n é o número desses pontos.

Para um nível de confiança de $1-\alpha$ e n pontos analisados calcula-se o limite do intervalo de confiança para o desvio-padrão populacional pela distribuição qui-quadrado.

Implementam-se as curvas de desvio em relação ao tempo para cada temperatura com o intervalo de confiança determinado pela eq (2.21). Determina-se o tempo no qual os limites superior e inferior cortam a reta do desvio permitido para cada temperatura. A figura 4.5 ilustra esse procedimento.

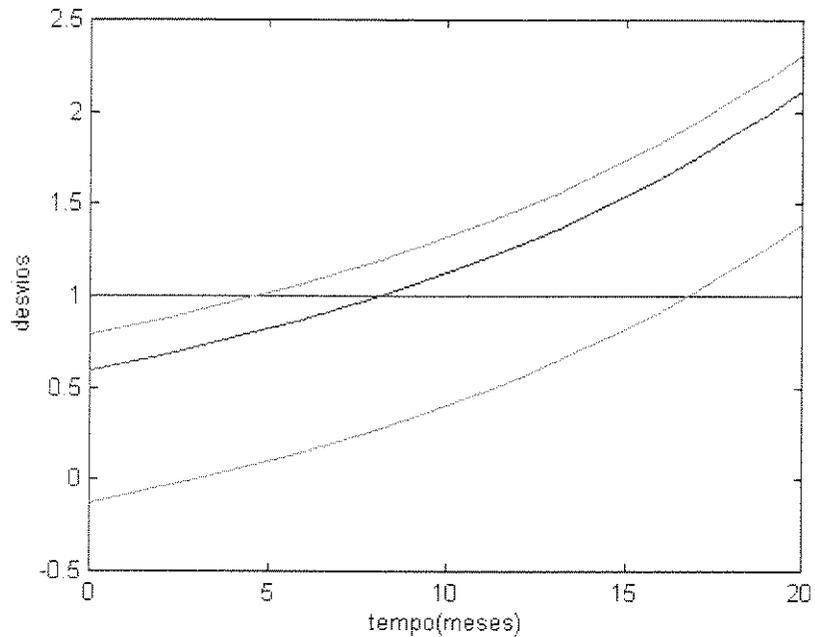


Figura 4.5 - Curva dos Limites dos Desvios x Tempo.

4.4 Cálculo da confiabilidade de termopares

Identificando os instantes em que as curvas dadas pelo intervalo de confiança cortam a reta do desvio permitido, calculam-se as curvas de confiabilidade utilizando esses tempos.

Análises experimentais verificaram que a curva de confiabilidade em função do tempo de equipamentos complexos adaptam-se a uma distribuição exponencial, independente do tipo de distribuição da vida de seus componentes.

Se a taxa de falha de um componente é constante (período de vida útil do componente) a expressão (2.37) mostra que a curva da confiabilidade ao longo do tempo responde a uma distribuição exponencial.

Neste trabalho pretende-se determinar os instantes nos quais o termopar possa ser substituído ainda no seu período de vida útil sem causar medidas incorretas nos processos que estão sendo analisados. Admite-se, então, que a distribuição de probabilidade obedece a uma lei exponencial. Logo, a confiabilidade para as curvas limite é determinada pelas equações:

$$R_I(t) = \exp(-\lambda_I \cdot t) = \exp(-t/m_I), e \quad (4.4)$$

$$R_S(t) = \exp(-\lambda_S t) = \exp(-t/m_S). \quad (4.5)$$

Nas expressões, $R_I(t)$ é a confiabilidade dada pelo limite inferior, $R_S(t)$ é a confiabilidade dada pelo limite superior, t é o tempo, λ_I e λ_S são as taxas de falha para os limites inferior e superior e m_I e m_S são os MTTFs para os limites inferior e superior.

m é determinado pelo instante em que a curva dada pelo intervalo de confiança corta a reta do desvio permitido (t), tem-se:

$$m_I = t_I, e \quad (4.6)$$

$$m_S = t_S. \quad (4.7)$$

Com essas equações determinam-se as curvas exponenciais da confiabilidade para cada limite como mostra a figura 4.6:

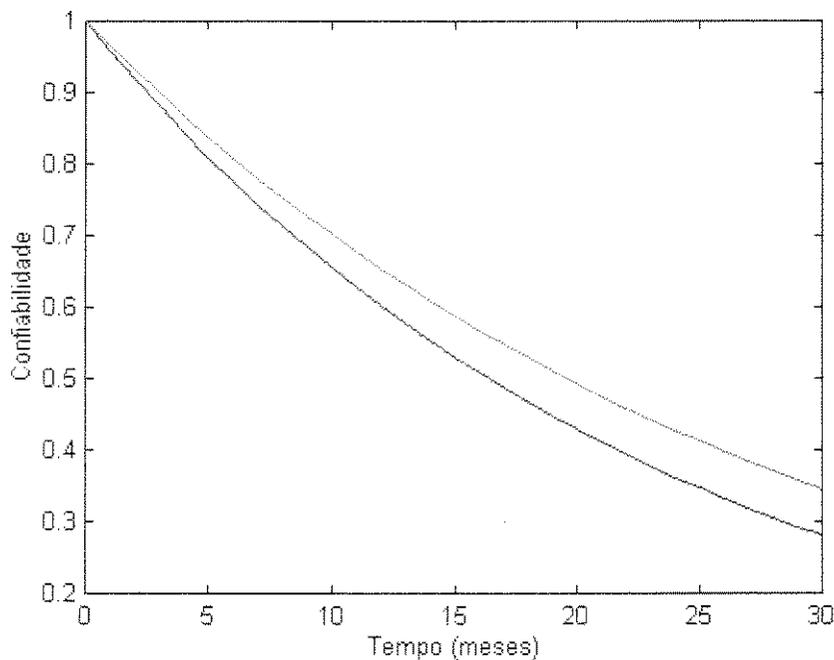


Figura 4.6 - Curva de Confiabilidade x Tempo

Essas curvas apresentam o desempenho da confiabilidade do termopar ao longo do tempo, ou seja, a probabilidade de um termopar funcionar sem falhas. Analisando a figura 4.6, pode-se determinar esse ponto a um nível de confiança de $1-\alpha$.

4.5 Resumo do capítulo

Considerou-se que é extremamente impreciso fazer uma modelagem dos desvios de calibração baseado na variação da difusão de elétrons. Foi proposta a obtenção das curvas de calibração a partir dos dados experimentais.

Foi proposta uma sistemática para determinar os limites do desvio-padrão nas curvas do desvio em função do tempo para diversos tipos de termopares em cada temperatura específica.

Propôs-se considerar o período de vida útil do termopar, ou seja, a faixa na qual a taxa de falha é aproximadamente constante, resultando que o modelo de confiabilidade segue uma distribuição exponencial.

Determinou-se os pontos nos quais os limites das curvas de desvio em função do tempo para diversos tipos de termopares em cada temperatura específica alcançam o desvio permitido.

Com a consideração de distribuição exponencial e com os pontos determinados pelos limites das curvas de desvio determina-se a confiabilidade que é a função probabilidade do termopar funcionar sem falhas em função do tempo, a um nível de confiança de $1-\alpha$.

Capítulo 5

Resultados da Análise Experimental

5.1 Introdução

Os resultados experimentais são analisados empregando-se a metodologia desenvolvida no capítulo 4, ou seja, a obtenção das curvas de calibração baseadas na análise de dados experimentais.

Os dados referentes a tempos, temperaturas e desvios dos termopares tipo T do cliente A, tipo J dos clientes B, C e D são tabulados de acordo com os valores fornecidos pelo banco de dados AFER - CEMAN (1998).

Com esses valores, determinam-se as curvas exponenciais de desvio de calibração em cada temperatura e verifica-se para um desvio permitido, qual será o tempo de funcionamento aceitável até atingir a condição limite.

São calculados as variâncias e os desvios-padrão entre os dados experimentais e as curvas interpolantes dos desvios para termopares do tipo T e J.

Os desvios-padrão das amostras são relacionados a desvios-padrão populacionais definidos por uma distribuição do tipo qui-quadrado, representativa do comportamento de populações, cuja disponibilidade de amostras são pequenas. Foi efetuada a associação de um nível de confiança a aplicações de distribuição qui-quadrado. No presente trabalho foi mantido um nível de confiança de 90%.

Assim chega-se, para cada conjunto de dados de calibração, a valores inferiores e superiores de tolerância quanto à chegada das condições limites de desvio.

O instante de atingimento das condições limites, nas diferentes temperaturas de calibração, são utilizados para a construção de um gráfico de confiabilidade em função do tempo.

Tal gráfico, de característica exponencial, representa um importante indicador prático para a atividade de manutenção de sensores.

5.2 Tabelas

As tabelas apresentam os tempos, as temperaturas e os desvios fornecidos pelo banco de dados AFER - CEMAN (1998). Na quarta coluna tem-se o logaritmo neperiano dos valores apresentados na terceira coluna. A tabela 5.1 apresenta os dados para termopares tipo T. Esses valores são utilizados na construção dos gráficos desvio x tempo apresentados na figura 5.1.

5.2.1 Termopares Tipo T - Cliente A

Tabela 5.1 - Desvios de Temperatura × Tempo para Termopares Tipo T

Tempo (Meses)	Temperatura (°C)	Desvio Absoluto (°C)	ln (DA)
0	-0,08	0,15	-1,90
6	-0,08	0,03	-3,51
6	-0,08	0,03	-3,51
12	-0,08	0,08	-2,53
19	-0,08	0,15	-1,90
0	50	0,22	-1,51
6	50	0,06	-2,81
6	50	0,04	-3,22
12	50	0,08	-2,53
19	50	0,24	-1,43
0	100	0,36	-1,02

6	100	0,06	-2,81
6	100	0,06	-2,81
12	100	0,04	-3,21
19	100	0,43	-0,84

5.2.2 Termopares Tipo J – Cliente B

A tabela 5.2 apresenta os dados para termopares tipo J – B. Estes valores são utilizados na construção dos gráficos desvio x tempo apresentados na figura 5.6.

Tabela 5.2 - Desvios de Temperatura x Tempo para Termopares Tipo J – B

Tempo (Meses)	Temperatura (°C)	Desvio Absoluto (°C)	ln (DA)
0	78	0,07	-2,66
0	78	0,29	-1,24
0	78	0,15	-1,90
9	78	0,71	-0,34
9	78	0,91	-0,09
0	163	0,38	-0,97
0	163	0,42	-0,87
0	163	1,05	-0,05
9	163	0,77	-0,26
9	163	1,13	-0,12
0	250	0,42	-0,87

0	250	0,42	-0,87
0	250	1,22	-0,20
9	250	0,99	-0,01
9	250	1,13	-0,12

5.2.3 Termopares Tipo J – Cliente C

A tabela 5.3 apresenta os dados para termopares tipo J – C. Estes valores são utilizados na construção dos gráficos desvio x tempo apresentados na figura 5.11.

Tabela 5.3 - Desvios de Temperatura x Tempo para Termopares Tipo J - C

Tempo (Meses)	Temperatura (°C)	Desvio Absoluto (°C)	ln (DA)
0	0,20	0,02	-3,91
5	0,20	0,14	-1,97
23	0,20	0,16	-1,83
33	0,20	0,31	-1,17
33	0,20	0,26	-1,35
36	0,20	0,36	-1,02
38	0,20	0,71	-0,34
38	0,20	0,70	-0,36
5	5	0,00	-4,61
36	5	0,34	-1,08
5	10	0,07	-2,66
36	10	0,27	-1,31

38	10	0,35	-1,05
0	25	0,10	-2,30
38	25	0,38	-0,97
0	75	0,06	-2,81
23	75	0,24	-1,43
23	75	0,30	-1,20
33	75	0,24	-1,43
33	75	0,60	-0,51
0	150	0,10	-2,30
23	150	0,43	-0,84
33	150	0,58	-0,54
33	150	0,41	-0,89

5.2.4 Termopares Tipo J – Cliente D

A tabela 5.4 apresenta os dados para termopares tipo J – D. Estes valores são utilizados na construção dos gráficos desvio x tempo apresentados na figura 5.19.

Tabela 5.4 - Desvios de Temperatura x Tempo para Termopares Tipo J - D

Tempo (Meses)	Temperatura (°C)	Desvio Absoluto (°C)	ln (DA)
0	67	0,17	-1,77
2	67	0,20	-1,61
3	67	0,39	-0,94

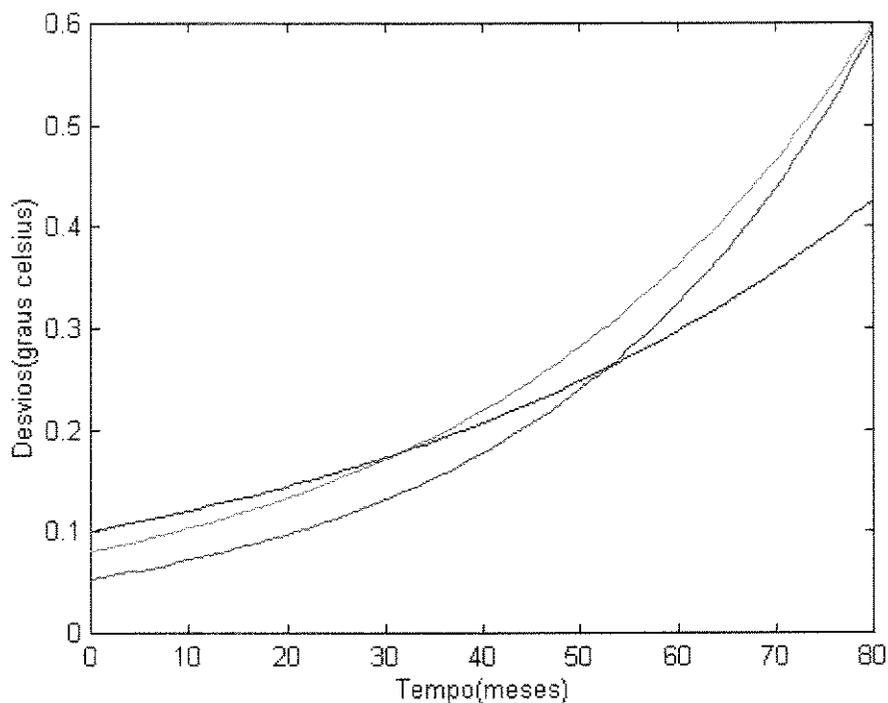
6	67	0,39	-0,94
7	67	0,67	-0,40
10	67	0,71	-0,34
0	78	0,05	-3,00
3	78	0,13	-2,04
6	78	0,15	-1,90
7	78	0,16	-1,83
10	78	0,34	-1,08
11	78	0,64	-0,45
0	110	0,07	-2,66
0	110	0,09	-2,41
2	110	0,24	-1,43
2	110	0,27	-1,31
3	110	0,42	-0,87
6	110	0,44	-0,82
7	110	0,58	-0,54
8	110	0,72	-0,33
11	110	0,78	-0,25
0	142	0,02	-3,91
2	142	0,16	-1,83
3	142	0,29	-1,24
3	142	0,29	-1,24
6	142	0,41	-0,89
7	142	0,48	-0,73
7	142	0,50	-0,69
10	142	0,54	-0,62
10	142	0,54	-0,62

11	142	0,57	-0,56
2	155	0,30	-1,20
2	155	0,22	-1,51
3	155	0,33	-1,11
3	155	0,24	-1,43
6	155	0,40	-0,92
6	155	0,72	-0,33
7	155	0,43	-0,84
7	155	0,76	-0,27
10	155	0,83	-0,19
10	155	0,86	-0,15
11	155	0,90	-0,11
11	155	0,87	-0,14
13	155	0,96	-0,04
13	155	0,96	-0,04
0	190	0,34	-1,08
2	190	0,38	-0,97
3	190	0,54	-0,62
3	190	0,54	-0,62
6	190	0,59	-0,53
7	190	0,70	-0,36
11	190	0,89	-0,12
13	190	0,90	-0,11

5.3 Resultados

5.3.1 Termopares Tipo T

Com os dados apresentados na tabela 5.1 para termopares tipo T, determina-se a figura 5.1 do desvio de calibração em função do tempo.



Curva vermelha = 0,08°C

Curva verde = 50°C

Curva azul = 100°C

Figura 5.1 - Curva de Desvio de Calibração dos Termopares Tipo T

Com os dados da tabela 5.1, determina-se a figura 5.1 e utilizando a equação (2.2) determina-se a variância $s^2(x)$ para cada temperatura. Com o valor de $s^2(x)$, n que é o número de dados para cada temperatura a ser analisada, a equação (2.21) e escolhendo um nível de confiança igual a $1-\alpha$ determinam-se os limites do intervalo de confiança para o desvio-padrão populacional σ .

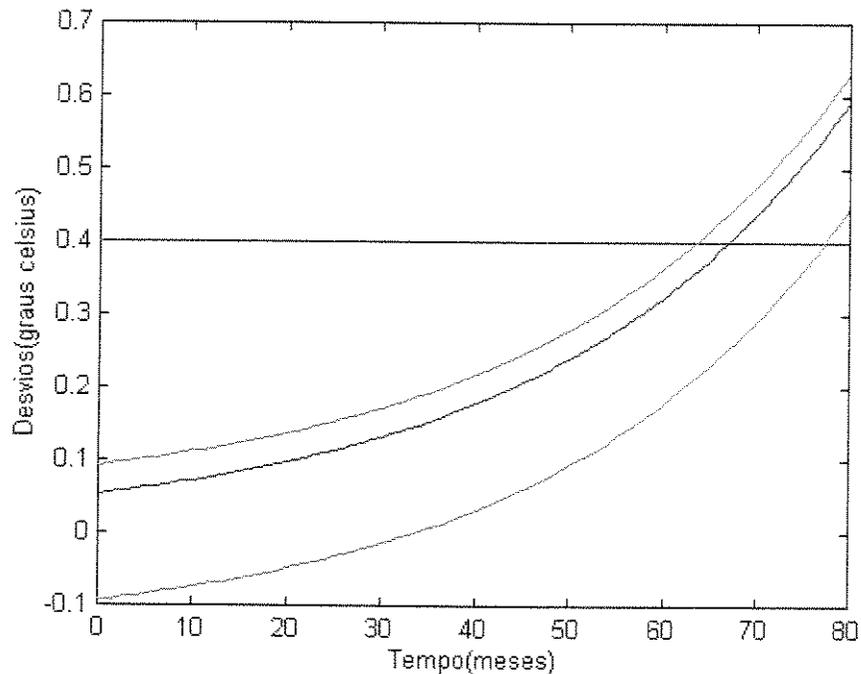
Para termopares tipo T e temperatura $T = 0,08^{\circ}\text{C}$ têm-se:

$$s^2(x) = 0,0038;$$

$$n = 5;$$

$$1-\alpha = 0,90; e$$

$$0,0398 \leq \sigma \leq 0,11462.$$



Com esses valores de σ e a curva original, determina-se o gráfico da figura 5.2, para termopares tipo T e temperatura $T = 0,08^{\circ}\text{C}$.

Curva vermelha = original

Curvas verdes = limites

Figura 5.2 - Curva de Limites dos Desvios de Termopares Tipo T, $T=0,08^{\circ}\text{C}$

Da figura 5.2 pode-se afirmar que o valor estimado de σ está no intervalo compreendido entre 0,0398 e 0,11462 para um nível de confiança de 90% para termopares Tipo T na temperatura de $0,08^{\circ}\text{C}$.

A curva dos limites alcança o desvio permitido nos seguintes tempos:

limite inferior = 62 meses; e
limite superior = 75 meses.

Para termopares tipo T e temperatura $T = 50^{\circ}\text{C}$ têm-se:

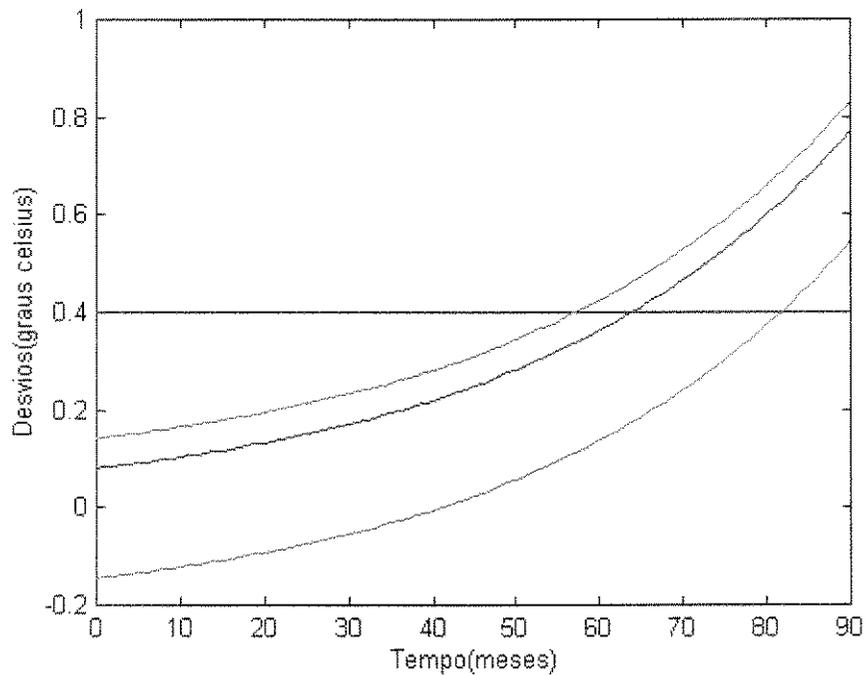
$$s^2(x) = 0,0090;$$

$$n = 5;$$

$$1 - \alpha = 0,90; \text{ e}$$

$$0,0616 \leq \sigma \leq 0,2250.$$

Com esses valores de σ e a curva original, determina-se o gráfico da figura 5.3, para termopares tipo T e temperatura $T = 50^{\circ}\text{C}$.



Curva vermelha = original

Curvas verdes = limites

Figura 5.3 - Curva de Limites dos Desvios de Termopares Tipo T, $T = 50^{\circ}\text{C}$

Da figura 5.3 pode-se afirmar que o valor estimado de σ está no intervalo compreendido entre 0,0616 e 0,2250 para um nível de confiança de 90%, para termopares Tipo T na temperatura de 50°C.

A curva dos limites alcança o desvio permitido nos seguintes tempos:

limite inferior = 55 meses; e

limite superior = 80 meses.

Para termopares tipo T e temperatura $T = 100^\circ\text{C}$ têm-se:

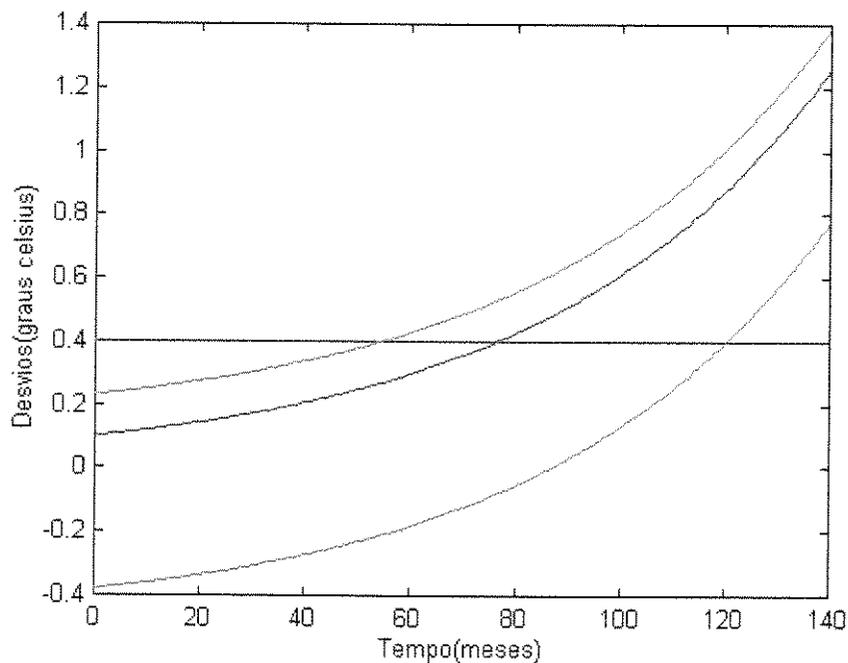
$$s^2(x) = 0,0408;$$

$$n = 5;$$

$$1 - \alpha = 0,90; \text{ e}$$

$$0,1310 \leq \sigma \leq 0,4789.$$

Com esses valores de σ e a curva original, determina-se o gráfico da figura 5.4, para termopares tipo T e temperatura $T = 100^\circ\text{C}$.



Curva vermelha = original

Curvas verdes = limites

Figura 5.4 - Curva de Limites dos Desvios de Termopares Tipo T, $T = 100^\circ\text{C}$

Da figura 5.4 pode-se afirmar que o valor estimado de σ está no intervalo compreendido entre 0,1310 e 0,4789 em um nível de confiança de 90% para termopares Tipo T na temperatura de 100°C.

A curva dos limites alcança o desvio permitido nos seguinte tempos:

limite inferior = 58 meses; e

limite superior = 120 meses.

Para um desvio permitido de 0,4°C e um nível de confiança de 90%, têm-se os limites inferiores e superiores do MTTF para cada temperatura, que são apresentados na tabela 4.5.

Tabela 5.5 - MTTF para Termopares Tipo T

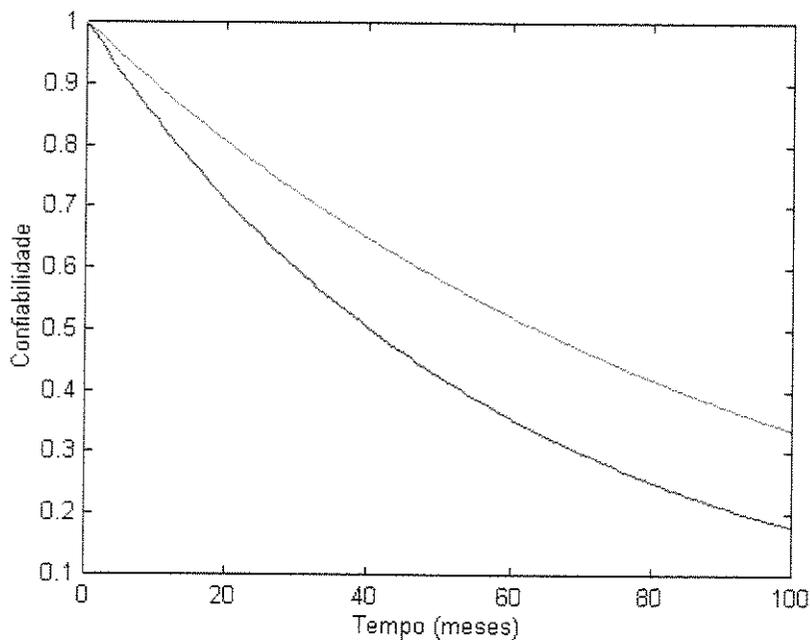
Temperatura (°C)	Limite Inferior (meses)	Limite Superior (meses)
0,08	62	75
50	55	80
100	58	120
Média	58	92

Após determinar o MTTF, calcula-se a confiabilidade com os valores médios dos limites inferiores e superiores para termopares Tipo T, utilizando as equações apresentadas a seguir:

$$R_I(t) = \exp(-t/m_I) = \exp(-t/58); \text{ e}$$

$$R_S(t) = \exp(-t/m_S) = \exp(-t/92).$$

Com essa equações determina-se o gráfico da figura 5.5, curvas de confiabilidade em função do tempo para os limites médios inferiores e superiores.



Curva vermelha = Limite Inferior

Curva verde = Limite Superior

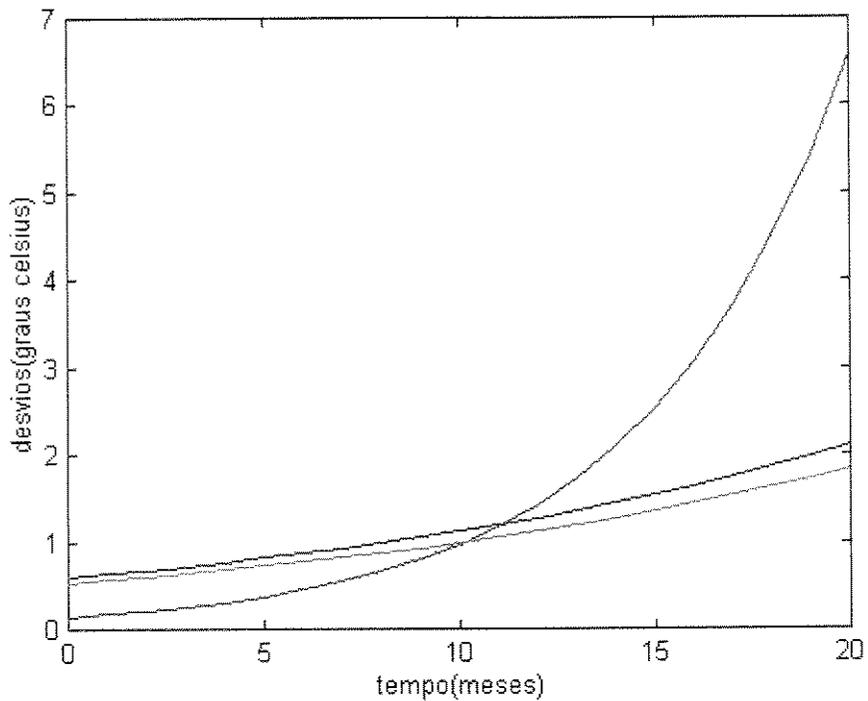
Figura 5.5 - Confiabilidade x Tempo dos Termopares Tipo T

A probabilidade de um termopar funcionar sem falhas durante um período igual ao seu MTTF é de 37%. Analisando a figura 5.5, nota-se que para o pior caso esse ponto é igual a 58 meses e, no melhor caso, é de 92 meses a um nível de confiança de 90%.

Em aplicações onde se deseja garantir um alto nível de confiabilidade da leitura do termopar, o índice do MTTF é um indicador inadequado. Nessas aplicações pode-se estabelecer, por exemplo o critério de 90% de confiabilidade o que resulta em tempos de 7 e 10 meses para o pior e melhor caso de operação sem falhas, respectivamente, para os termopares tipo T.

5.3.2 Termopares Tipo J – Cliente B

Com os dados apresentados na tabela 5.2 para termopares tipo J - B, determina-se a figura 5.6 do desvio de calibração em função do tempo.



Curva vermelha = 78°C

Curva verde = 163°C

Curva azul = 250°C

Figura 5.6 - Curvas de Desvio de Calibração dos Termopares Tipo J - B

Repetindo-se os procedimentos propostos; para termopares tipo J -B e temperatura T =78°C tem-se:

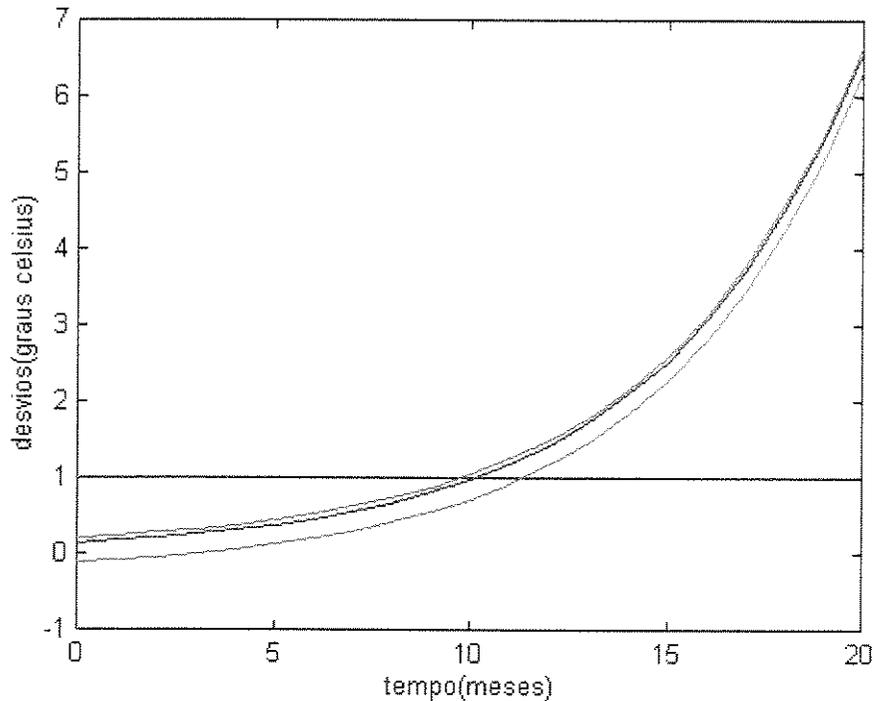
$$s^2(x) = 0,0116;$$

$$n = 5;$$

$$1-\alpha = 0,90; e$$

$$0,0700 \leq \sigma \leq 0,2557.$$

Com esses valores de σ e a curva original, determina-se o gráfico da figura 5.7, para termopares tipo J - B e temperatura $T = 78^\circ\text{C}$.



Curva vermelha = original

Curvas verdes = limites

Figura 5.7 - Curva de Limites dos Desvios de Termopares Tipo J - B, $T=78^\circ\text{C}$

Da figura 5.7 pode-se afirmar que o valor estimado de σ está no intervalo compreendido entre 0,0700 e 0,2557 para um nível de confiança de 90%, para termopares Tipo J-B na temperatura de 78°C .

A curva dos limites alcança o desvio permitido nos seguintes tempos:

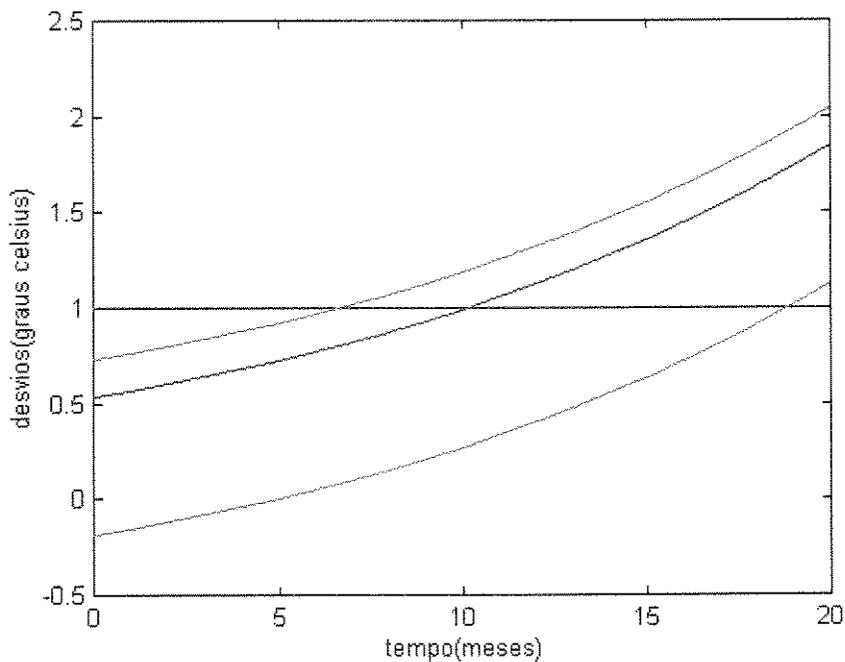
limite inferior = 10 meses; e

limite superior = 11,3 meses.

Para termopares tipo J - B e temperatura $T = 163^\circ\text{C}$ tem-se:

$s^2(x) = 0,0923;$
 $n = 5;$
 $1 - \alpha = 0,90;$ e
 $0,1972 \leq \sigma \leq 0,7205.$

Com esses valores de σ e a curva original, determina-se o gráfico da figura 5.8, para termopares tipo J-B e temperatura $T = 163^\circ\text{C}$.



Curva vermelha = original

Curvas verdes = limites

Figura 5.8 - Curva de Limites dos Desvios de Termopares Tipo J - B, $T=163^\circ\text{C}$

Da figura 5.8 pode-se afirmar que o valor estimado de σ está no intervalo compreendido entre 0,1972 e 0,7205 para um nível de confiança de 90%, para termopares Tipo J-B na temperatura de 163°C .

A curva dos limites alcança o desvio permitido nos seguintes tempos:

limite inferior = 07 meses; e

limite superior = 18 meses.

Para termopares tipo J-B e temperatura $T = 250^{\circ}\text{C}$ tem-se:

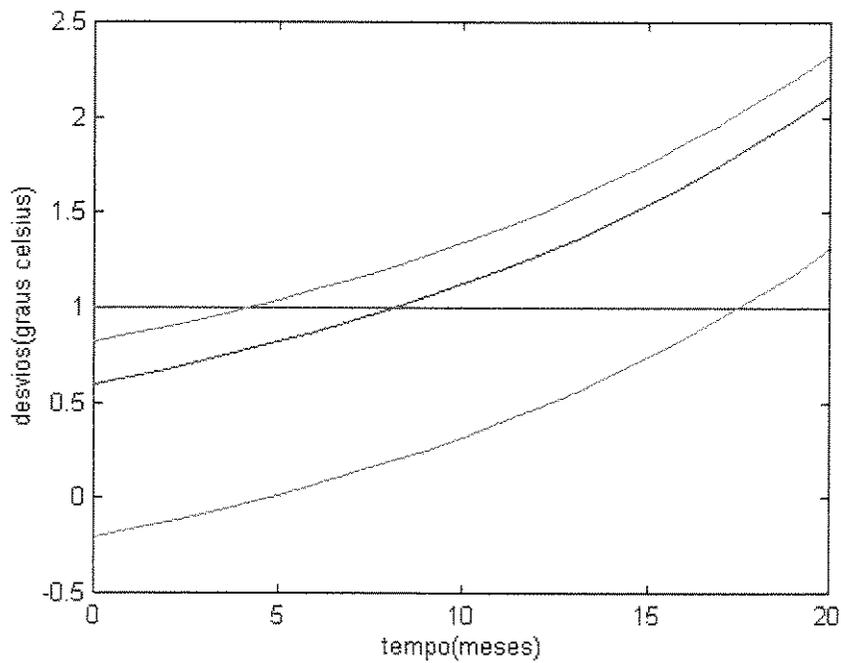
$$s^2(x) = 0,1150;$$

$$n = 5;$$

$$1 - \alpha = 0,90; \text{ e}$$

$$0,2201 \leq \sigma \leq 0,8043.$$

Com esses valores de σ e a curva original, determina-se o gráfico da figura 5.9, para termopares tipo J - B e temperatura $T = 250^{\circ}\text{C}$.



Curva vermelha = original

Curvas verdes = limites

Figura 5.9 – Curva de Limites do Desvio de Termopares Tipo J – B, $T = 250^{\circ}\text{C}$

Da figura 5.9 pode-se afirmar que o valor estimado de σ está no intervalo compreendido entre 0,2201 e 0,8043 para um nível de confiança de 90%, para termopares Tipo J-B na temperatura de 250°C.

A curva dos limites alcança o desvio permitido nos seguintes tempos:

limite inferior = 05 meses; e

limite superior = 17 meses.

Para um desvio permitido de 1,0°C e um nível de confiança de 90%, têm-se os limites inferiores e superiores do MTTF para cada temperatura, que são apresentados na tabela 4.6.

Tabela 5.6 - MTTF dos Termopares Tipo J-B

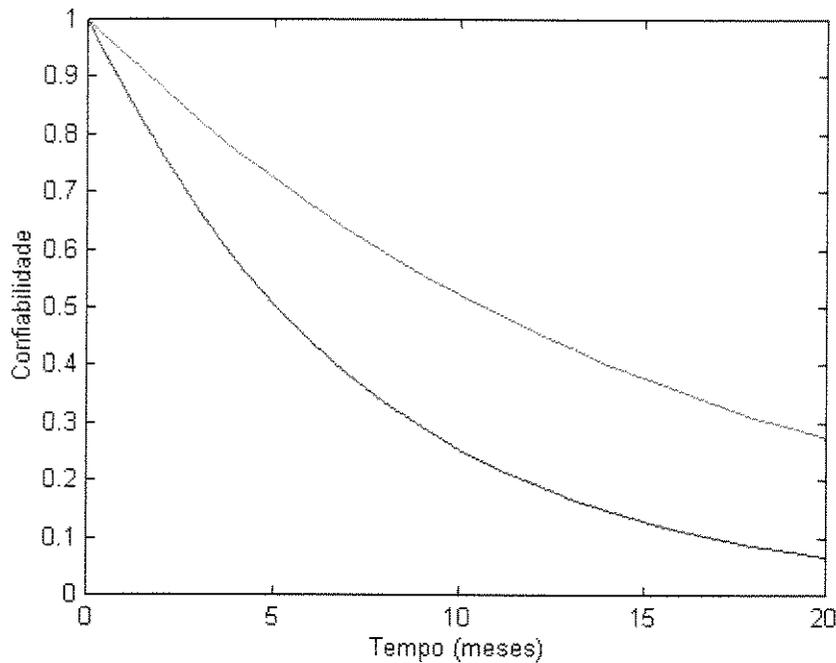
Temperatura (°C)	Limite Inferior (meses)	Limite Superior (meses)
78	10	11,3
163	07	18
250	05	17
Média	7,3	15,4

Após determinar o MTTF, calcula-se a confiabilidade com os valores médios dos limites inferiores e superiores para termopares Tipo J - B, utilizando as seguintes equações:

$$R_I(t) = \exp(-t/m_I) = \exp(-t/7,3); \text{ e}$$

$$R_S(t) = \exp(-t/m_S) = \exp(-t/15,4).$$

Com essas equações determina-se o gráfico da figura 5.10, curvas de confiabilidade em função do tempo para os limites médios inferiores e superiores.



Curva vermelha = Limite Inferior

Curva verde = Limite Superior

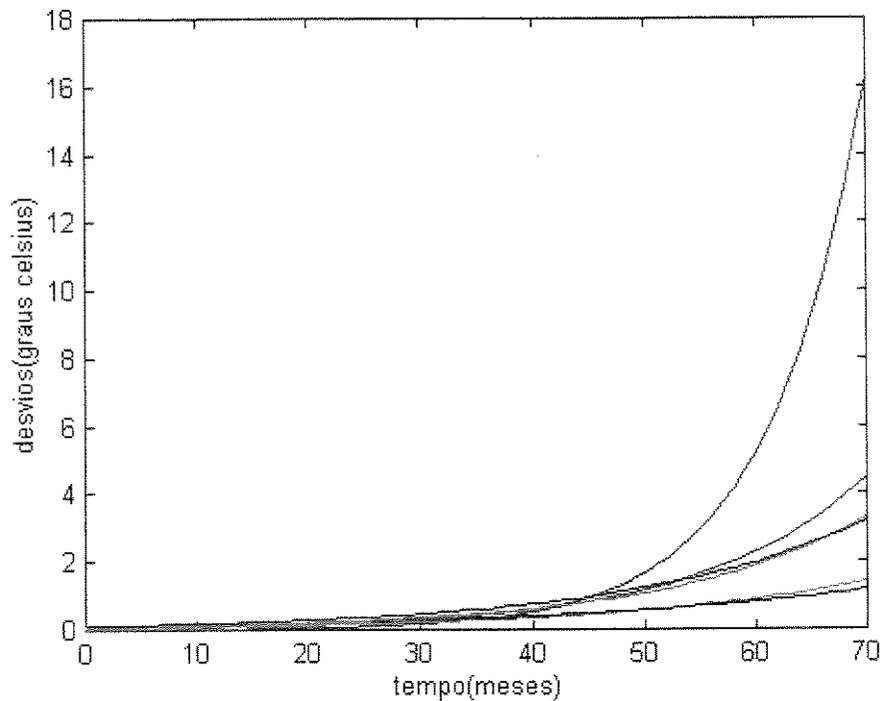
Figura 5.10 - Confiabilidade x Tempo dos Termopares Tipo J - B

A probabilidade de um termopar funcionar sem falhas durante um período igual ao seu MTTF é de 37%. Analisando a figura 5.10, nota-se que para o pior caso esse ponto é igual a 7,3 meses e, no melhor caso, é de 15,4 meses a um nível de confiança de 90%.

O critério de confiabilidade de 90% nesse caso está associado aos tempos de 1 e 2 meses para o melhor e pior caso respectivamente.

5.3.3 Termopares Tipo J – Cliente C

Com os dados apresentados na tabela 5.3 para termopares tipo J - C, determina-se o gráfico 5.11 do desvio de calibrações em função do tempo.



Curva vermelha = 0,20°C

Curva azul = 5°C

Curva verde = 10°C

Curva preta = 25°C

Curva azul claro = 75°C

Curva violeta = 150°C

Figura 5.11 - Curva de Desvio de Calibração dos Termopares Tipo J – C

Repetindo-se os procedimentos propostos, para termopares tipo J-C e temperatura $T = 0,20^\circ\text{C}$ tem-se:

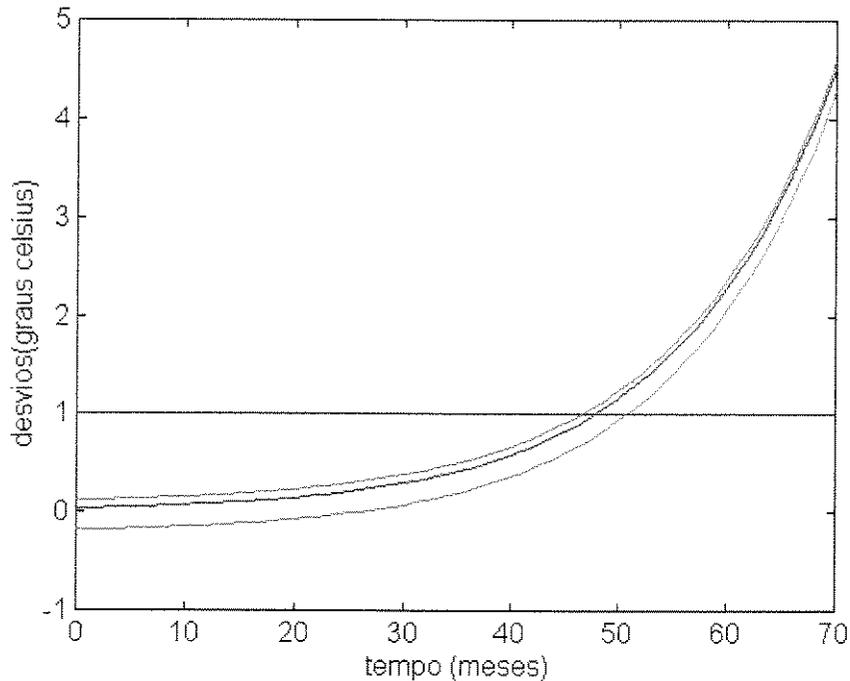
$$s^2(x) = 0,0147;$$

$$n = 8;$$

$$1-\alpha = 0,90; e$$

$$0,0856 \leq \sigma \leq 0,2181.$$

Com esses valores de σ e a curva original, determina-se o gráfico da figura 5.12, para termopares tipo J - C e temperatura $T = 0,20^{\circ}\text{C}$.



Curva vermelha = original

Curvas verdes = limites

Figura 5.12 – Curva de Limites do Desvio de Termopares Tipo J – C, $T = 0,20^{\circ}\text{C}$

Da figura 5.12 pode-se afirmar que o valor estimado de σ está no intervalo compreendido entre 0,0856 e 0,2181 para um nível de confiança de 90%, para termopares Tipo J-C na temperatura de $0,20^{\circ}\text{C}$.

A curva dos limites alcança o desvio permitido nos seguintes tempos:

limite inferior = 47 meses; e

limite superior = 51 meses.

Para termopares tipo J-C e temperatura $T = 5^{\circ}\text{C}$ tem-se:

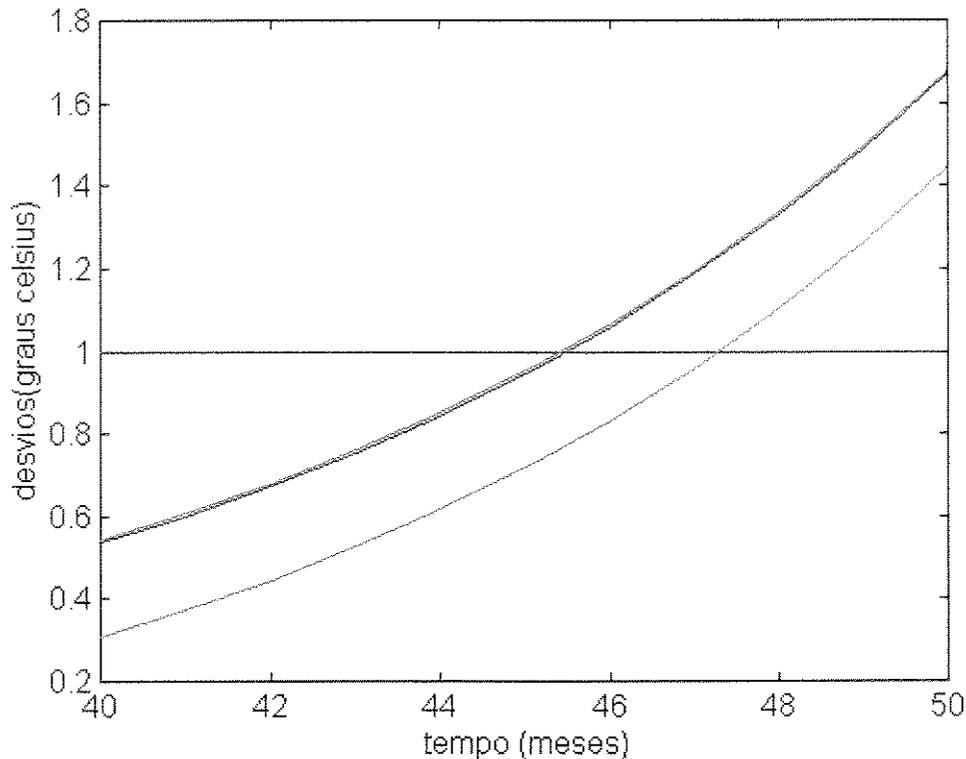
$$s^2(x) = 0,0002;$$

$$n = 2;$$

$$1 - \alpha = 0,90; \text{ e}$$

$$0,0072 \leq \sigma \leq 0,2264.$$

Com esses valores de σ e a curva original, determina-se o gráfico da figura 5.13, para termopares tipo J - C e temperatura $T = 5^\circ\text{C}$.



Curva vermelha = original

Curvas verdes = limites

Figura 5.13 - Curva dos Limites de Desvios de Termopares Tipo J - C, $T = 5^\circ\text{C}$

Da figura 5.13 pode-se afirmar que o valor estimado de σ está no intervalo compreendido entre 0,0072 e 0,2264 para um nível de confiança de 90%, para termopares Tipo J-C na temperatura de 5°C .

A curva dos limites alcança o desvio permitido nos seguintes tempos:

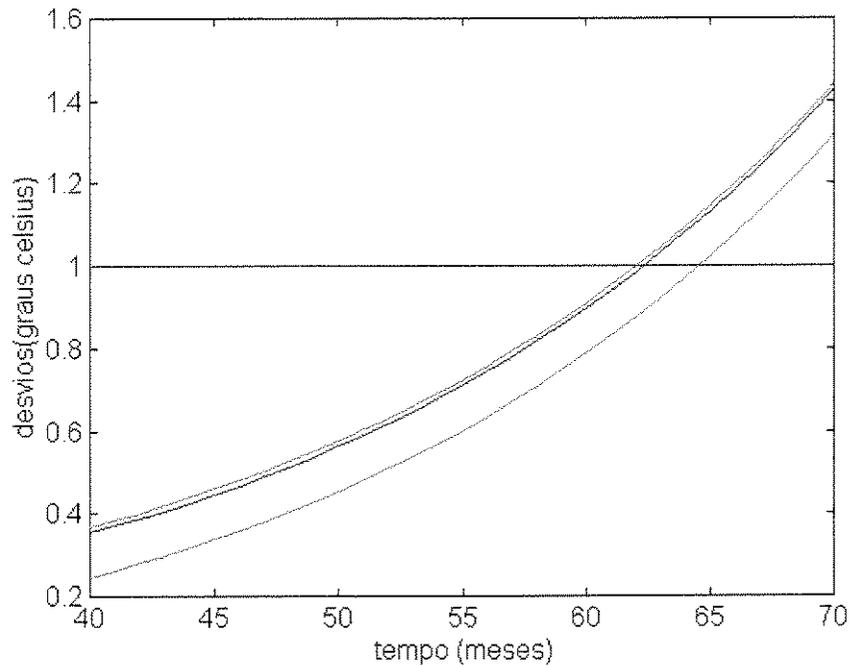
limite inferior = 45,4 meses; e

limite superior = 47 meses.

Para termopares tipo J-C e temperatura $T = 10^\circ\text{C}$ têm-se:

$s^2(x) = 0,0006;$
 $n = 3;$
 $1 - \alpha = 0,90;$ e
 $0,0142 \leq \sigma \leq 0,1081.$

Com esses valores de σ e a curva original, determina-se o gráfico da figura 5.14, para termopares tipo J - C e temperatura $T = 10^\circ\text{C}$.



Curva vermelha = original

Curvas verdes = limite

Figura 5.14 – Curva de Limite dos Desvio de Termopares Tipo J – C, $T = 10^\circ\text{C}$

Da figura 5.14 pode-se afirmar que o valor estimado de σ está no intervalo compreendido entre 0,0142 e 0,1081 para um nível de confiança de 90%, para termopares Tipo J-C na temperatura de 10°C .

A curva dos limites alcança o desvio permitido nos seguintes tempos:

limite inferior = 62 meses; e

limite superior = 64 meses.

Para termopares tipo J-C e temperatura $T = 25^{\circ}\text{C}$ tem-se:

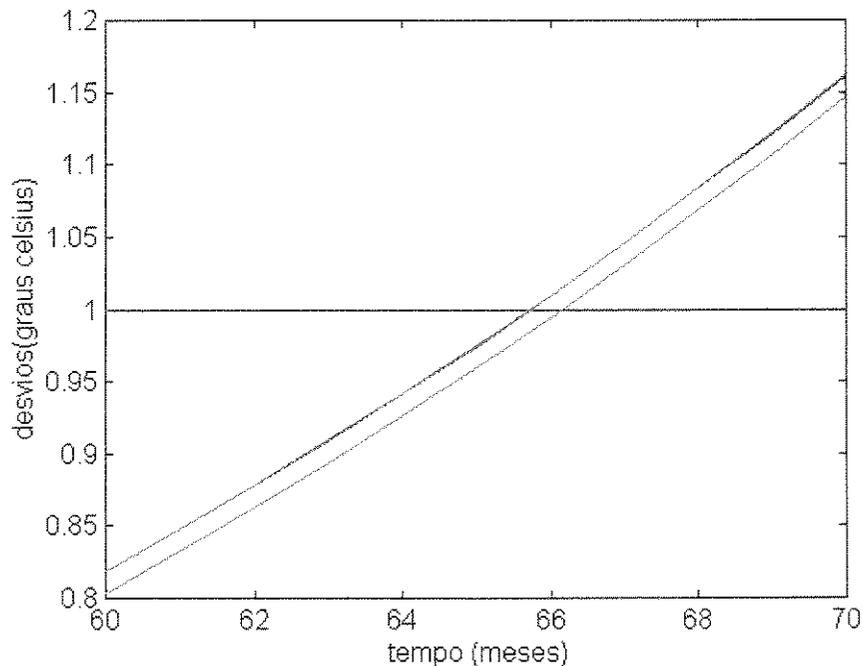
$$s^2(x) = 9,00 \times 10^{-7};$$

$$n = 2;$$

$$1-\alpha = 0,90; \text{ e}$$

$$0,0004 \leq \sigma \leq 0,0151.$$

Com esses valores de σ e a curva original, determina-se o gráfico da figura 5.15, para termopares tipo J-C e temperatura $T = 25^{\circ}\text{C}$.



Curva vermelha = original

Curvas verdes = limites

Figura 5. 15 – Curva de Limites dos Desvio de Termopares Tipo J – C, $T = 25^{\circ}\text{C}$

Da figura 5.15 pode-se afirmar que o valor estimado de σ está no intervalo compreendido entre 0,0004 e 0,0151 para um nível de confiança de 90%, para termopares Tipo J-C na temperatura de 25°C .

A curva dos limites alcança o desvio permitido nos seguintes tempos:

limite inferior = 65,7 meses; e

limite superior = 66 meses.

Para termopares tipo J-C e temperatura $T = 75^{\circ}\text{C}$ tem-se:

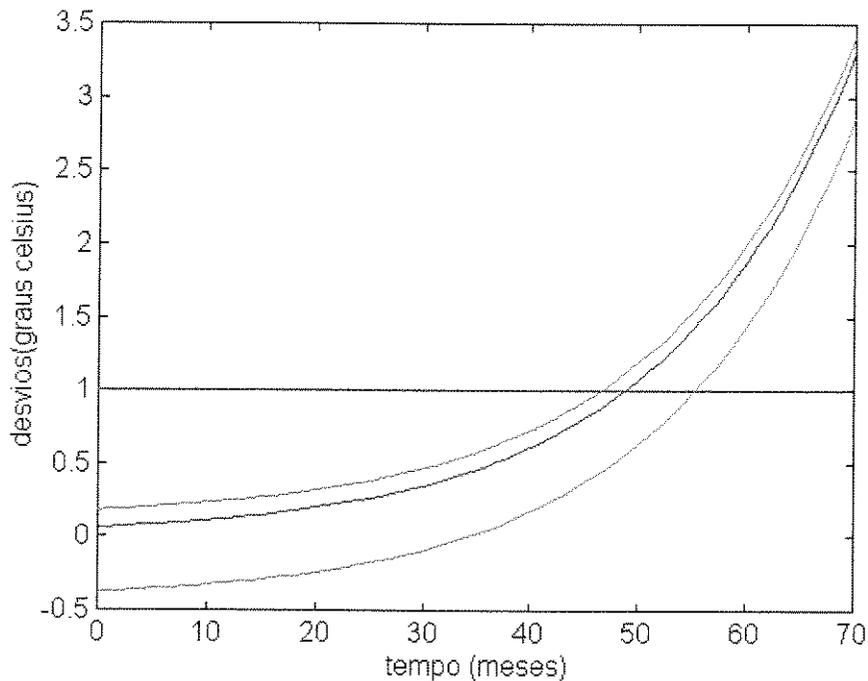
$$s^2(x) = 0,0341;$$

$$n = 5;$$

$$1-\alpha = 0,90; \text{ e}$$

$$0,1200 \leq \sigma \leq 0,4382.$$

Com esses valores de σ e a curva original, determina-se o gráfico da figura 5.16, para termopares tipo J-C e temperatura $T = 75^{\circ}\text{C}$.



Curva vermelha = original

Curvas verdes = limites

Figura 5.16 – Curva de Limites dos Desvio de Termopares Tipo J-C, $T = 75^{\circ}\text{C}$

Da figura 5.16 pode-se afirmar que o valor estimado de σ está no intervalo compreendido entre 0,1200 e 0,4382 para um nível de confiança de 90%, para termopares Tipo J-C na temperatura de 75°C .

A curva dos limites alcança o desvio permitido nos seguintes tempos:

limite inferior = 46 meses; e

limite superior = 55 meses.

Para Termopares tipo J-C e temperatura $T = 150^{\circ}\text{C}$ tem-se:

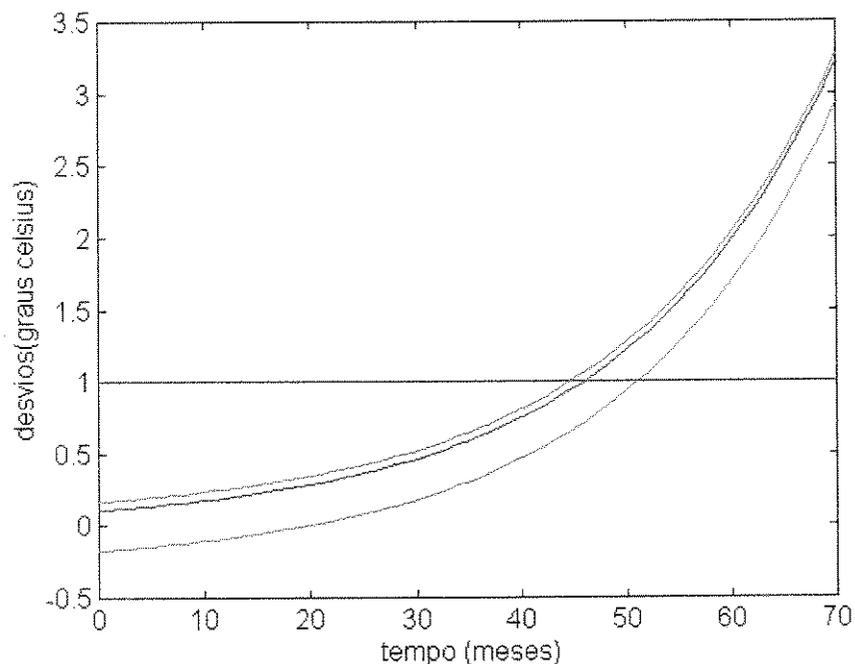
$$s^2(x) = 0,0093;$$

$$n = 4;$$

$$1-\alpha = 0,90; \text{ e}$$

$$0,0599 \leq \sigma \leq 0,2821.$$

Com esses valores de σ e a curva original, determina-se o gráfico da figura 5.17, para termopares tipo J - C e temperatura $T = 150^{\circ}\text{C}$.



Curva vermelha = original

Curvas verdes = limites

Figura 5.17 – Curva de Limites dos Desvio de Termopares Tipo J-C, $T = 150^{\circ}\text{C}$

Da figura 5.17 pode-se afirmar que o valor estimado de σ está no intervalo compreendido entre 0,0599 e 0,2821 para um nível de confiança de 90%, para termopares Tipo J-C na temperatura de 150°C .

A curva dos limites alcança o desvio permitido nos seguintes tempos:

limite inferior = 45 meses; e

limite superior = 51 meses.

Para um desvio permitido de 1,0°C e um nível de confiança de 90%, tem-se os limites inferiores e superiores do MTTF para cada temperatura, que são apresentados na tabela 5.7.

Tabela 5.7 - MTTF dos Termopares Tipo J-C

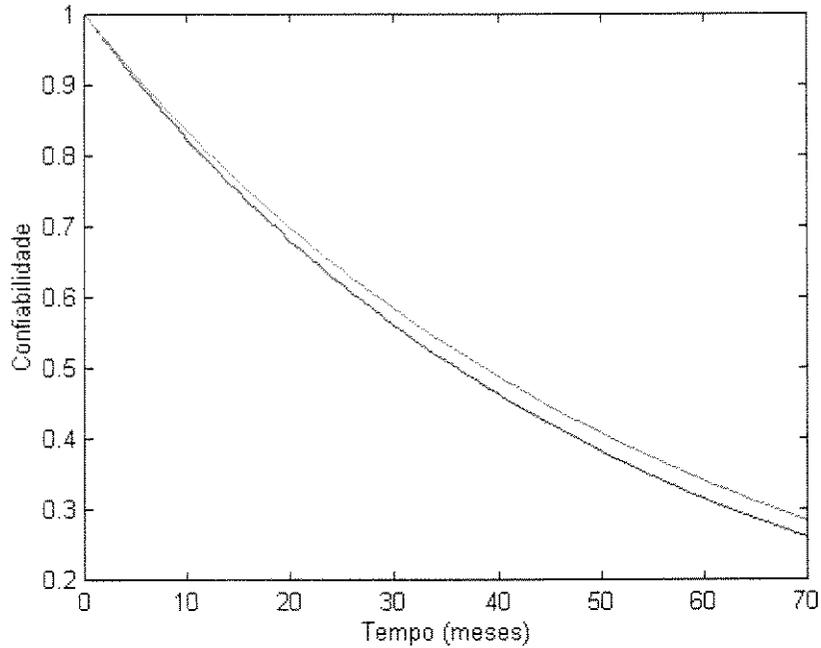
Temperatura (°C)	Limite Inferior (meses)	Limite Superior (meses)
0,20	47	51
5	45,4	47
10	62	64
25	65,7	66
75	46	55
150	45	51
Média	51,9	55,7

Após determinado o MTTF, pode-se calcular a confiabilidade com os valores médios dos limites inferiores e superiores para termopares Tipo J-C, utilizando as equações apresentadas a seguir:

$$R_I(t) = \exp(-t/m_I) = \exp(-t/51,9); \text{ e}$$

$$R_S(t) = \exp(-t/m_S) = \exp(-t/55,7).$$

Com essas equações determina-se o gráfico da figura 5.18, que são as curvas de confiabilidade em função do tempo para os limites médios inferiores e superiores.



Curva vermelha = Limite Inferior

Curva verde = Limite Superior

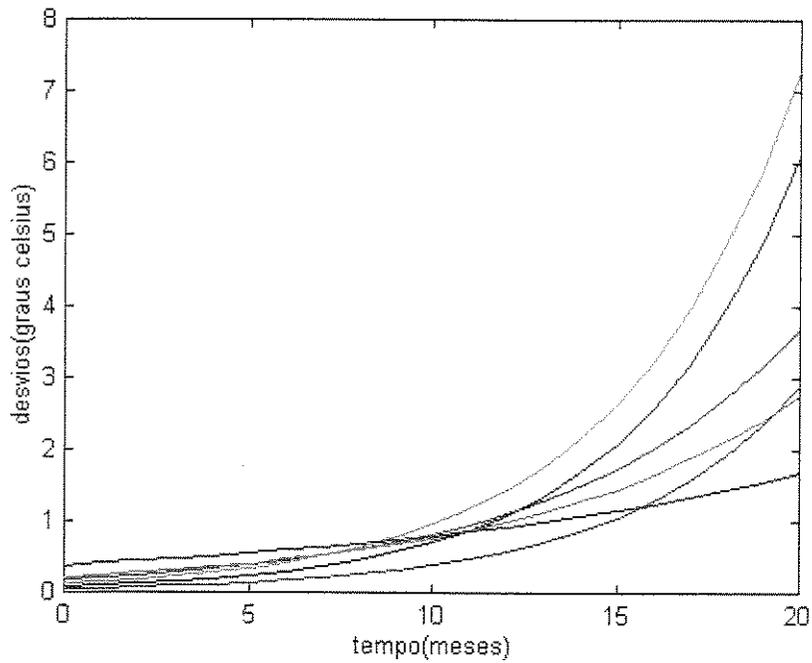
Figura 5.18 - Confiabilidade x Tempo dos Termopares Tipo J - C

A probabilidade de um termopar funcionar sem falhas durante um período igual ao seu MTTF é de 37%. Analisando a figura 5.18, nota-se que para o pior caso esse ponto é igual a 51,9 meses e, no melhor caso, é de 55,7 meses a um nível de confiança de 90%.

Nesse caso também, o tempo de 5 meses é o que corresponde a situação de 90% de confiabilidade da leitura dos termopares medidos.

5.3.4 Termopares Tipo J - Cliente D

Com os dados apresentados na tabela 5.4 para termopares tipo J - D, determina-se o gráfico 5.19 do desvio em função do tempo.



Curva vermelha = 67°C

Curva azul = 78°C

Curva verde = 110°C

Curva preta = 142°C

Curva azul claro = 155°C

Curva violeta = 190°C

Figura 5.19 - Curvas de Desvio de Calibração de Termopares Tipo J - D

Repetindo-se os procedimentos propostos; para termopares tipo J-D e temperatura $T = 67^\circ\text{C}$ tem-se:

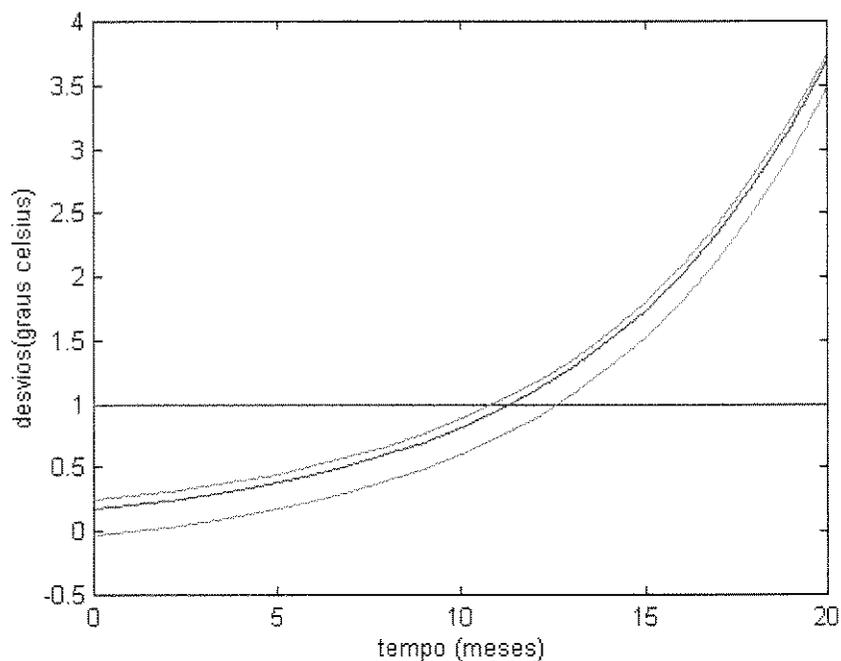
$$s^2(x) = 0,0101;$$

$$n = 6;$$

$$1-\alpha = 0,90; e$$

$$0,0675 \leq \sigma \leq 0,2093.$$

Com esses valores de σ e a curva original, determina-se o gráfico da figura 5.20, para termopares tipo J-D e temperatura $T = 67^{\circ}\text{C}$.



Curva vermelha = original

Curvas verdes = limites

Figura 5.20 – Curva de Limites dos Desvio de Termopar Tipo J – D, $T = 67^{\circ}\text{C}$.

Da figura 5.20 pode-se afirmar que o valor estimado de σ está no intervalo compreendido entre 0,0675 e 0,2093 para um nível de confiança de 90%, para termopares Tipo J-D na temperatura de 67°C .

A curva dos limites alcança o desvio permitido nos seguintes tempos:

limite inferior = 11 meses; e

limite superior = 12,6 meses.

Para termopares tipo J-D e temperatura $T = 78^{\circ}\text{C}$ tem-se:

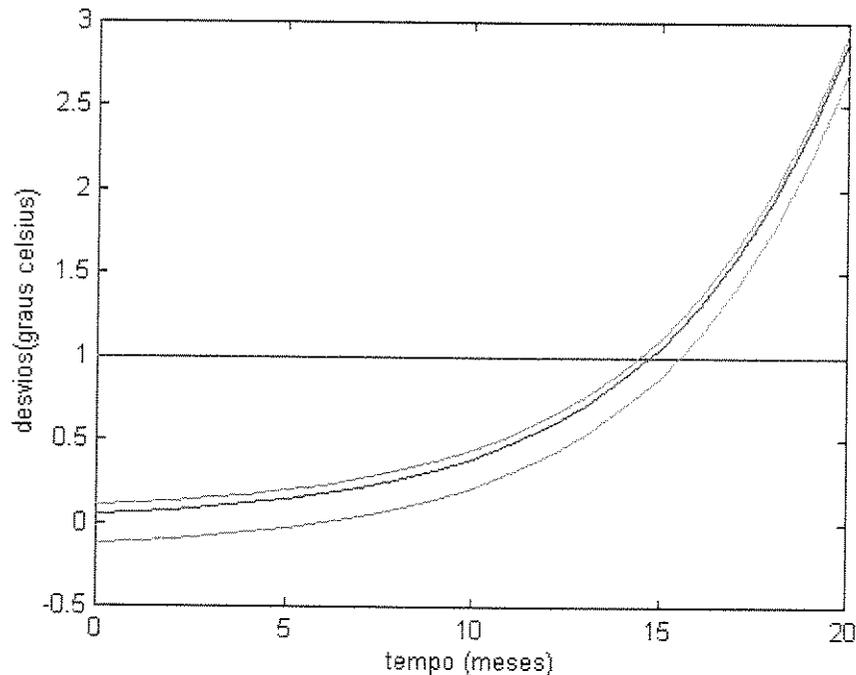
$$s^2(x) = 0,0068;$$

$$n = 6;$$

$$1-\alpha = 0,90; \text{ e}$$

$$0,0555 \leq \sigma \leq 0,1724.$$

Com esses valores de σ e a curva original, determina-se o gráfico da figura 5.21, para termopares tipo J-D e temperatura $T = 78^{\circ}\text{C}$.



Curva vermelha = original

Curvas verdes = limites

Figura 5.21 – Curva de Limites do Desvio de Termopar Tipo J – D, $T = 78^{\circ}\text{C}$

Da figura 5.21 pode-se afirmar que o valor estimado de σ está no intervalo compreendido entre 0,0555 e 0,1724 para um nível de confiança de 90%, para termopares Tipo J-D na temperatura de 78°C .

A curva dos limites alcança o desvio permitido nos seguintes tempos:

limite inferior = 14,5 meses; e

limite superior = 15,4 meses.

Para termopares tipo J-D e temperatura $T = 110^{\circ}\text{C}$ tem-se:

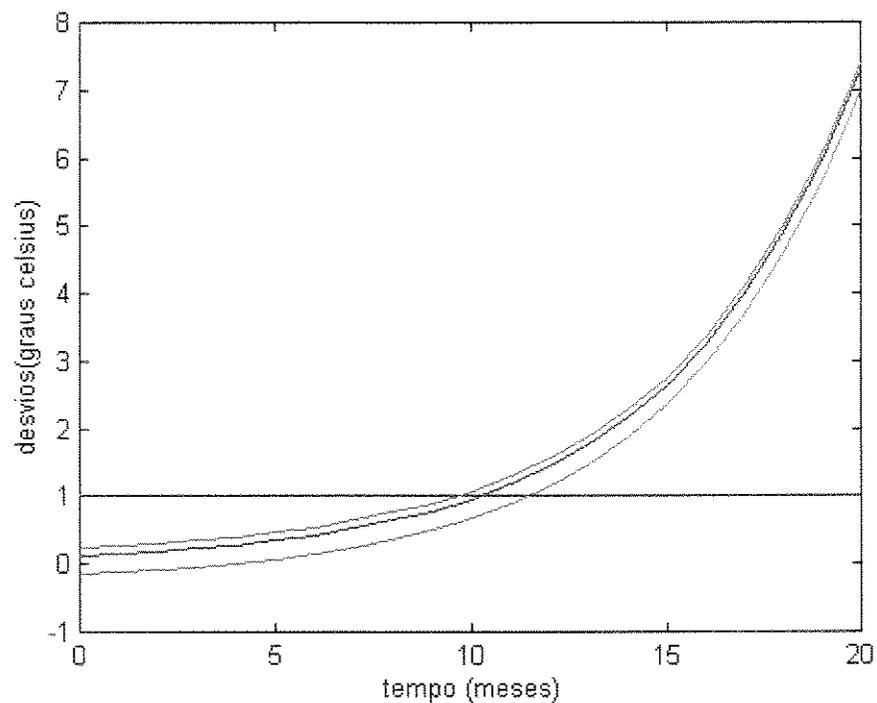
$$s^2(x) = 0,0272;$$

$$n = 9;$$

$$1-\alpha = 0,90; e$$

$$0,1185 \leq \sigma \leq 0,2825.$$

Com esses valores de σ e a curva original, determina-se o gráfico da figura 5.22, para termopares tipo J - D e temperatura $T = 110^\circ\text{C}$.



Curva vermelha = original

Curvas verdes = limites

Figura 5.22 – Curva de Limite do Desvio de Termopar Tipo J – D, $T = 110^\circ\text{C}$

Da figura 5.22 pode-se afirmar que o valor estimado de σ está no intervalo compreendido entre 0,1185 e 0,2825 para um nível de confiança de 90%, para termopares Tipo J-D na temperatura de 110°C .

A curva dos limites alcança o desvio permitido nos seguintes tempos:

limite inferior = 9,7 meses; e

limite superior = 11,6 meses.

Para termopares tipo J-D e temperatura $T = 142^{\circ}\text{C}$ tem-se:

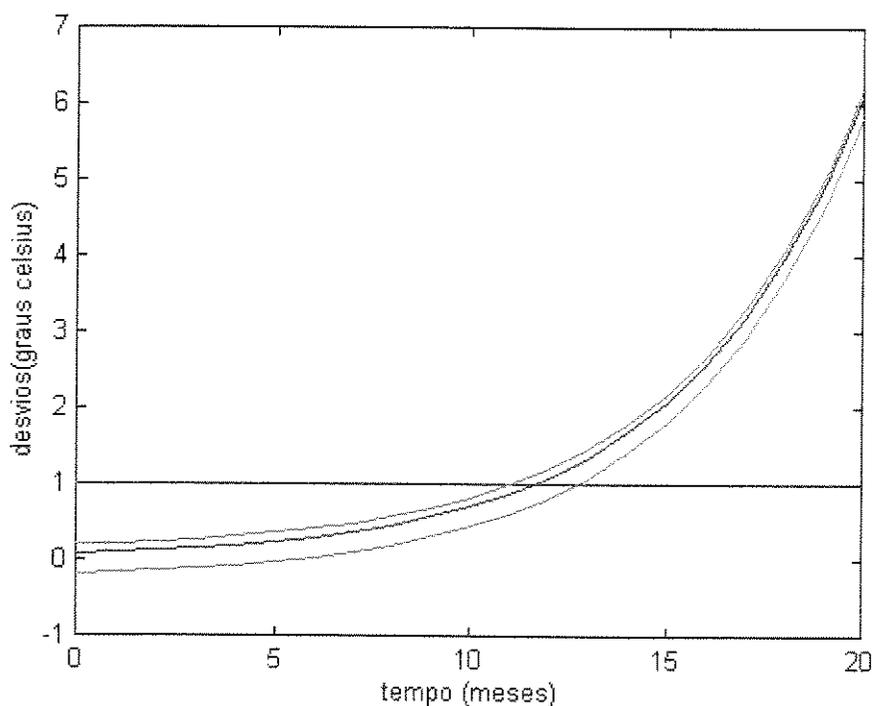
$$s^2(x) = 0,0257;$$

$$n = 10;$$

$$1-\alpha = 0,90; \text{ e}$$

$$0,1168 \leq \sigma \leq 0,2634.$$

Com esses valores de σ e a curva original, determina-se o gráfico da figura 5.23, para termopares tipo J-D e temperatura $T = 142^{\circ}\text{C}$.



Curva vermelha = original

Curvas verdes = limites

Figura 5.23 – Curva de Limite do Desvio de Termopar Tipo J-D, $T = 142^{\circ}\text{C}$

Da figura 5.23 pode-se afirmar que o valor estimado de σ está no intervalo compreendido entre 0,1168 e 0,2634 para um nível de confiança de 90%, para termopares Tipo J-D na temperatura de 142°C .

A curva dos limites alcança o desvio permitido nos seguintes tempos:

limite inferior = 11 meses; e
limite superior = 12,6 meses.

Para termopares tipo J-D e temperatura $T = 155^{\circ}\text{C}$ tem-se:

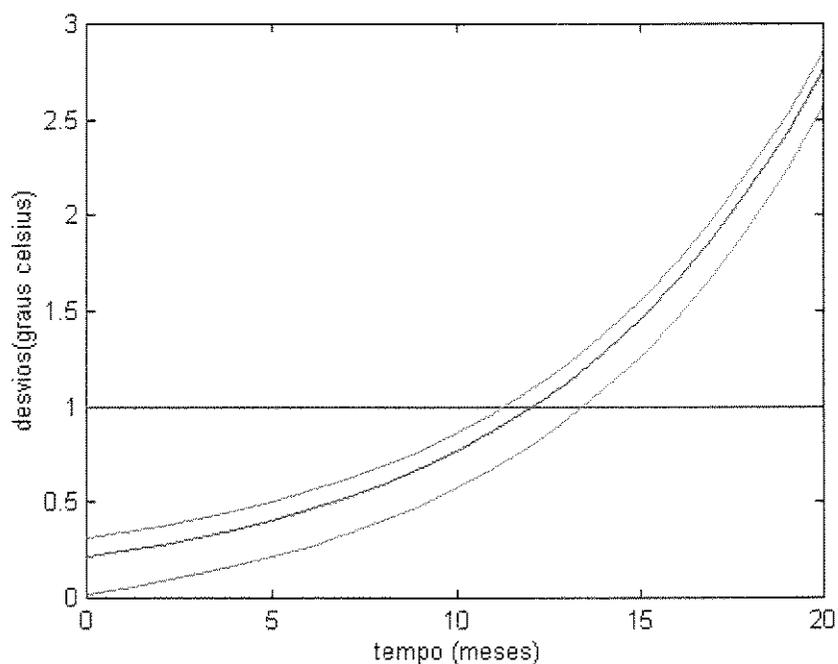
$$s^2(x) = 0,0165;$$

$$n = 14;$$

$$1-\alpha = 0,90; \text{ e}$$

$$0,0979 \leq \sigma \leq 0,1907.$$

Com esses valores de σ e a curva original, determina-se o gráfico da figura 5.24, para termopares tipo J-D e temperatura $T = 155^{\circ}\text{C}$.



Curva vermelha = original

Curvas verdes = limites

Figura 5.24 – Curva de Limite do Desvio de Termopar Tipo J-D, $T = 155^{\circ}\text{C}$

Da figura 5.24 pode-se afirmar que o valor estimado de σ está no intervalo compreendido entre 0,0979 e 0,1907 para um nível de confiança de 90%, para termopares Tipo J-D na temperatura de 155°C .

A curva dos limites alcança o desvio permitido nos seguintes tempos:

limite inferior = 11,2 meses; e

limite superior = 13,4 meses.

Para termopares tipo J-D e temperatura $T = 190^{\circ}\text{C}$ tem-se:

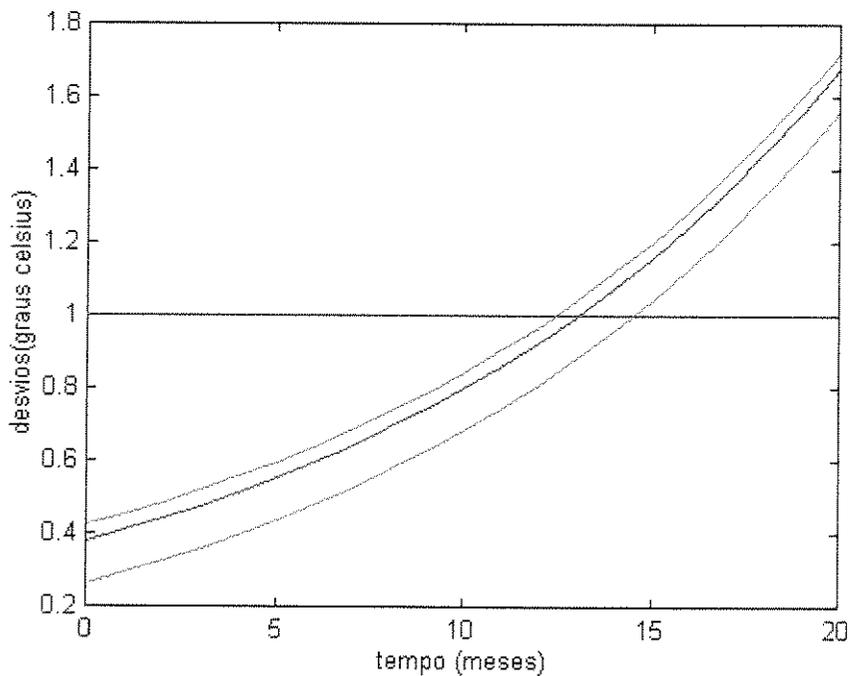
$$s^2(x) = 0,0041;$$

$$n = 8;$$

$$1-\alpha = 0,90; \text{ e}$$

$$0,0452 \leq \sigma \leq 0,1152.$$

Com esses valores de σ e a curva original, determina-se o gráfico da figura 5.25, para termopares tipo J-D e temperatura $T = 190^{\circ}\text{C}$.



Curva vermelha = original

Curvas verdes = limites

Figura 5.25 – Curva de Limite do Desvio de Termopar Tipo J-D, $T = 190^{\circ}\text{C}$

Da figura 5.25 pode-se afirmar que o valor estimado de σ está no intervalo compreendido entre 0,0459 e 0,1152 para um nível de confiança de 90%, para termopares Tipo J-D na temperatura de 190°C.

A curva dos limites alcança o desvio permitido nos seguintes tempos:

limite inferior = 12,3 meses; e

limite superior = 14,6 meses.

Para um desvio permitido de 1,0°C e um nível de confiança de 90%, tem-se os limites inferiores e superiores do MTTF para cada temperatura, que são apresentados na tabela 5.8.

Tabela 5.8 - MTTF dos Termopares Tipo J-D

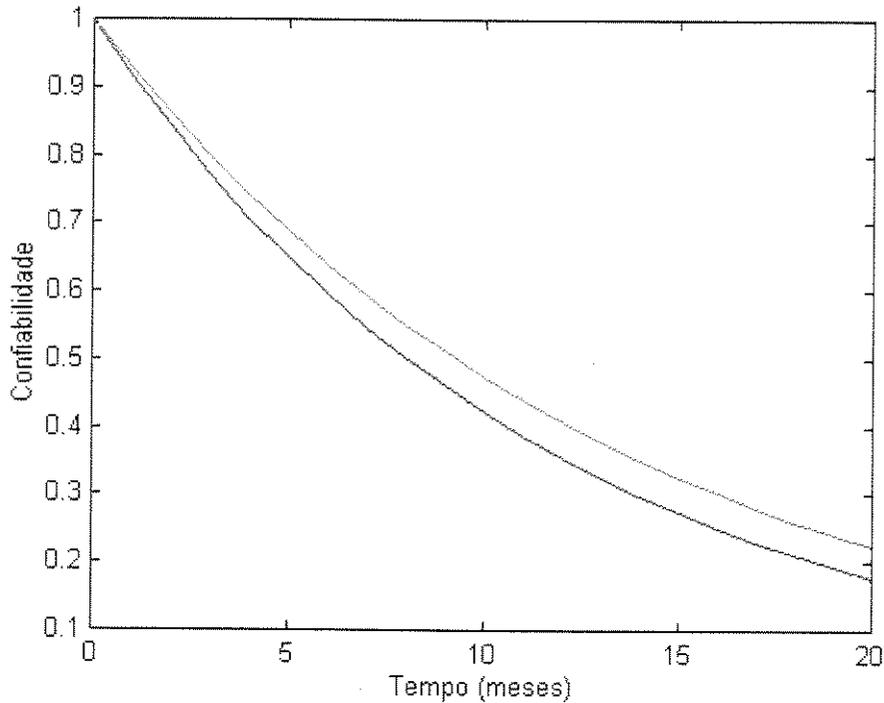
Temperatura (°C)	Limite Inferior (meses)	Limite Superior (meses)
67	11	12,6
78	14,5	15,4
110	9,7	11,6
142	11	12,6
155	11,2	13,4
190	12,3	14,6
Média	11,6	13,4

Após determinado o MTTF, pode-se calcular a confiabilidade com os valores médios dos limites inferiores e superiores para termopares Tipo J - D, utilizando as equações apresentadas a seguir:

$$R_I(t) = \exp(-t/m_I) = \exp(-t/11,6); \text{ e}$$

$$R_S(t) = \exp(-t/m_S) = \exp(-t/13,4).$$

Com essas equações determina-se o gráfico da figura 5.26, curvas de confiabilidade em função do tempo para os limites médios inferiores e superiores.



Curva vermelha = Limite Inferior

Curva verde = Limite Superior

Figura 5.26 - Confiabilidade x Tempo dos Termopares Tipo J - D

A probabilidade de um termopar funcionar sem falhas durante um período igual ao seu MTTF é de 37%. Analisando a figura 5.26, nota-se que para o pior caso este ponto é igual a 11,6 meses e no melhor caso é de 13,4 meses a um nível de confiança de 90%.

Nesse caso, o tempo de 1,5 meses é o que corresponde a situação de 90% de confiabilidade da leitura dos termopares medidos.

5.3.4 Média entre os termopares Tipo J

Após determinado o MTTF, pode-se calcular a confiabilidade com os valores médios dos limites inferiores e superiores para termopares Tipo J, utilizando as equações apresentadas a seguir:

$$R_I(t) = \exp(-t/m_I) = \exp(-t/23,6); e$$

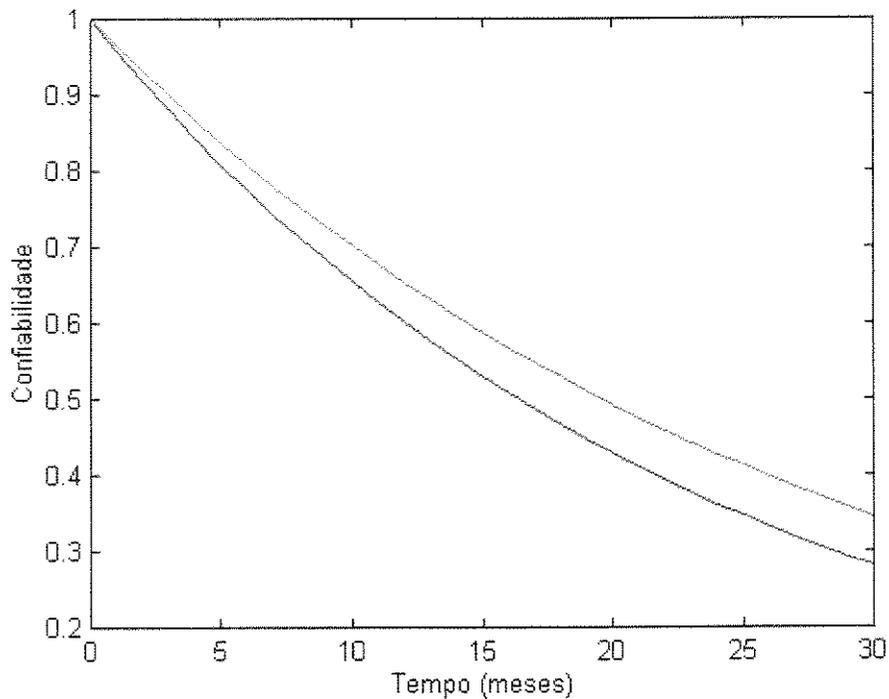
$$R_S(t) = \exp(-t/m_s) = \exp(-t/28,2).$$

A seguir determina-se os limites médios inferiores e superiores para os termopares tipo J.

Tabela 5.9 - MTTF Termopares Tipo J

Cliente	Lim. Inferior Médio meses)	Lim. Superior Médio (meses)
B	7,3	15,4
C	51,9	55,7
D	11,6	13,4
Média	23,6	28,2

Com essas equações determina-se o gráfico da figura 5.27, curvas de confiabilidade em função do tempo para os limites médios inferiores e superiores para termopares tipo J.



Curva vermelha = Limite Inferior

Curva verde = Limite Superior

Figura 5.27 - Confiabilidade x Tempo para Termopares Tipo J

A probabilidade de um termopar funcionar sem falhas durante um período igual ao seu MTTF é de 37%. Analisando a figura 5.27, nota-se que para o pior caso esse ponto é igual a 23,6 meses e, no melhor caso, é de 28,2 meses a um nível de confiança de 90%.

O critério de 90% de confiabilidade das leituras de termopares tipo J é portanto de 2,6 e 3 meses para o pior e melhor caso respectivamente.

5.3.6 Conclusões

O comportamento exponencial das curvas de calibração torna-se crítico para o cálculo de valores extrapolados. As medidas disponíveis que estavam dentro de um prazo menor (de 10 ou 20 meses) apresentaram instantes de tempo bem menores do que os casos similares em que as medidas disponíveis eram de maior tempo (38 meses).

Pode-se, em consequência do exposto anteriormente, dizer de uma forma geral que os resultados obtidos são todos de natureza mais conservativa do que os comportamentos de desvios que se observam no campo. Isso faz com que os presentes resultados sejam adequados para o estabelecimento de critérios de tempo de calibração e inspeção de termopares, sobretudo quando os tempos praticados são muito inferiores aos obtidos no estudo.

Uma análise comparativa das curvas de confiabilidade dos termopares tipo T e J (figuras 5.5 e 5.27) indica que os primeiros apresentam menor taxa de decaimento da confiabilidade. Isto é devido a melhor homogeneidade do material do termopar tipo T (Cobre-Constantan) comparado ao material do termopar tipo J (Ferro-Constantan).

Capítulo 6

Conclusões e Sugestões para Próximos Trabalhos.

6.1 Conclusões

Neste trabalho demonstram-se a importância da precisão e a confiabilidade nas medidas de temperatura em processos industriais. Considerando-se que os instrumentos perdem a sua precisão de leitura devido ao tempo de uso ou a operação em ambientes agressivos, faz-se necessária a criação de uma metodologia que permita analisar e construir um modelo matemático de variação dessa precisão. O objetivo de elaborar um trabalho com técnicas e critérios confiáveis para a manutenção preventiva dos termopares foi alcançado pois conseguiu-se estabelecer um método que se mostra confiável, preciso e que utiliza dados obtidos em campo.

A análise das curvas de desvios de calibração de termopares foi realizada, propondo-se o uso de medidas experimentais. Supõe-se que tais desvios seguem uma lei exponencial de variação ao longo do tempo. Nesse modelo, os índices a_K e b_K de uma curva exponencial [dada pela expressão $D_K = \exp(a_K) \cdot \exp(b_K \cdot t)$] definem o comportamento do desvio de calibração para um tipo de termopar em uma determinada temperatura. A aplicação dessa metodologia em resultados experimentais verifica que tal suposição é válida e modela as variações do desvio em relação ao tempo, para diversos tipos de termopares, a várias temperaturas.

Depois da definição do modelo matemático da variação das curvas de desvio, o trabalho estabeleceu uma relação entre a distribuição amostral do desvio-padrão e qui-quadrado. Esta é uma distribuição utilizada para uma população com um número pequeno de amostras (menor que 30). Da análise desta relação obtém-se um intervalo de confiança a um certo nível determinado.

O modelo fornece dados coerentes, sendo preciso e o mais adequado na determinação dos limites das curvas de desvio de calibração obtidas experimentalmente.

O modelo probabilístico fornece dados coerentes e compatíveis com a qualidade dos termopares e consegue realizar uma análise da sua dispersão, permitindo uma previsão do comportamento e funcionamento dos termopares ao longo do tempo.

A distribuição de probabilidades escolhida para o estudo da confiabilidade foi a exponencial. Tal distribuição mostra-se compatível com a variação das falhas dos termopares. O modelo conseguiu estimar os valores reais da confiabilidade ao longo do tempo, permitindo uma predição correta dentro de um certo nível de qualidade exigido.

Nesse trabalho foram determinadas as curvas de confiabilidade, com os valores médios dos limites inferiores e superiores (média entre as diversas temperaturas). Outros critérios que não o de valores médios podem também ser empregados para o estudo da confiabilidade. Cita-se, por exemplo o critério dos limites inferiores e superiores para cada temperatura e a verificação do instante de tempo para o pior caso, no MTTF ou outro ponto mais rigoroso de aceitação de confiabilidade.

Este trabalho disponibiliza dados experimentais para a realização de futuras pesquisas e desenvolvimento na área de sensores de temperatura.

Na literatura estudada não foi encontrado um método semelhante ao aqui apresentado, fato que torna esta contribuição relevante no estudo de termopares. A metodologia, além de ser inédita, revelou-se adequada e precisa para o estudo das curvas de desvio de calibração e da confiabilidade de termopares.

6.2 Sugestões para próximos trabalhos

Após a elaboração deste trabalho, apresentam-se alguns temas para futuras investigações:

A realização do atual procedimento, empregando-se um número maior de experimentos de laboratório, com condições mais variadas de temperaturas e tempo de operação.

A análise dos desvios das curvas de calibração foi feita com a suposição que esses seguem uma distribuição exponencial. Sugere-se tomar os desvios das curvas obedecendo uma lei de variação diferente da exponencial e os resultados obtidos comparados com os do presente trabalho.

A distribuição de probabilidades escolhida para o estudo da confiabilidade foi a exponencial. Pode ser realizado um trabalho supondo que a distribuição probabilidade de falhas obedece à lei de Weibull, ou seja, admitindo-se que a taxa de falha não é constante ao longo do tempo.

Um outro trabalho que pode ser realizado, baseado na metodologia da análise desenvolvida, é o estudo da confiabilidade de processos que utilizam transdutores de outra natureza (sensores de pressão, velocidade, fluxo, etc.).

Referências Bibliográficas

Adade, A.F. Matlab Básico, São José dos Campos: ITA, 1996.

Adade, A.F. Matlab: Aplicações em Análise de Sistemas Dinâmicos. São José dos Campos: ITA, 1996.

AFER - CEMAN - Programa Computacional - 1998.

Aggarwal, K.K. A New Concept in Reliability Modelling - Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium, 1989.

Alven, W.H. Reliability Engineering. New Jersey: Prentice - Hall, 1964.

Andrew I. Dahl. Stability of Base Metal Thermocouple in Air from 800 to 2,200 F. Precision Measurement and Calibration Temperature. Washington, D.C. volume 2: 263-289, August, 1968.

Araújo Filho, B.S. Calculo da Confiabilidade de Redes de Porte Médio: Análise e Implementação de Método Eficiente. São José dos Campos: ITA, 1982. Tese de Mestrado.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR-5462 Confiabilidade, Rio de Janeiro, Setembro, 1981.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, TB-396 Termopar. Rio de Janeiro, Out, 1991.

ASTM, American Society for Testing and Materials Standard E1159-87, 1992 Annual Book of ASTM Standards, Vol 14, N° 3, Philadelphia: ASTM, p 388-389, 1992.

Bazovsky, I. Reliability Theory and Practice New Jersey Englewood Cliffs, Prentice Hall, 1961.

Benedict, R.P. Fundamental of Temperature, Pressure, and Flow Measurements. New York: John Wiley & Sons, 1984.

Benedict, R.P. Manual on the Use of Thermocouples in Temperature Measurement- American Society for Testing and Materials, STP 470 B. Philadelphia, PA, April 1987.

Bentley, R.E. "Optimising the Thermoelectric Stability of ID-MIMS Type K Thermocouples by Adjusting the Levels of Mn and Al" in Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry, Vol 6, Part 1, New York: American Institute of Physics, p 591-594. 1992.

Bergamo Filho, V. Confiabilidade Básica e Prática São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1979.

Billinton, Junpan. Optimal Maintenance Scheduling in a Two Identical Component Parallel Redundant System, Reliability Engineering and System Safety 59, p 309-316. 1998.

Billinton, R., Allan, R. N. Reliability Evaluation of Engineering Systems. New York: Plenum Press, 1987.

Bogue, Robert. Advanced Sensors Control and Instrumentation, Vol 26, p 21-23, September 1994.

Burns, G.W., Gallacher. Reference Tables for the PT-30. Percent RH Versus PT-6 Percent Rh Thermopcouple - Journal of Research NBS, Vol 70, N° 2, April, 1966.

Burns, G.W., Scroger, M.G. The Calibration of Thermocouples and Thermocouple Materials, NIST Special Publication 250-35, U.S. Government Printing Office, Washington, DC, 1989.

Burns, G.W., Scroger, M.G., Strouse, M C., Croarkin M.C., Guthrie W.F. Temperature - Elettromotive Force Reference Functions and Tables for the Letter - Designated Thermocouple Types Based on the ITS -90- NIST, Washington, D.C. Apr. 1993.

Burns, G.W., Strouse, G.F., Liu, B.M., Mangum, B.W. "Gold versus Platinum Thermocouples Performance Data ITS-90 Based Reference Function", in Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry, Vol 6, New York: American Institute of Physics, 1992.

Casela, G., Berger, R.L. Statistical Inference. Belmont: Duxbury Press, 1990.

Charles, J. Fiabilite. São José dos Campos, IFI, 1988.

Corlieu, J. Fiabilite des Systemes. Toulouse: ENSAE, 1971.

Costa Neto, P.L.D. Estatística. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1992.

Denson, W. The History of Reliability Prediction. IEEE Transactions on Reliability, Vol 47, N° 3-SP, p SP-321–328. , September,1998.

Dhillon, B.S., Rayapati, S.N. Human Performance Reliability Modelling - Microeletron Reliability, Vol 29, N° 4, p 573–580. 1988.

Dhillon,B.S. Mechanical Reliability Theory, Models and Applications. Washington, D.C, AIAA, 1988.

Etter, D.M. Engineering Problem Solving with Matlab. New Jersey: Prentice Hall, 1997.

Evans, R. A Electronics Reliability: A Personal View. IEEE Transactions on Reliability, Vol 47, N° 3-SP, p SP 329-332. , September,1998.

Fuqua, N.B. Reliability Engineering for Electronic Design. New York: Marcel Dekker, Inc., 1990.

Furniss, C.P. Improved Temperature Measurement in Heat Treatment Furnaces Using Special Sensors, Industrial Heating, Vol 60, N° 3, p 86-89. March, 1993.

Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, ISO, Geneve, 1993.

Hameury, G. Qualite-Composants. Paris: CNES, 1990.

Hameury, G. Segurança de Funcionamento, Confiabilidade e Disponibilidade. São José dos Campos: PROPESA-CTA, 1989.

Henry, M.P., Clarke, D.W. The Self-Validating Sensor: Rationale Definitions and Examples, Control Eng Practice, Vol 1, N° 4, p 585-10, 1993.

Howell, L. Probabilistic Risk Analysis of Flying the Space Shuttle With or Without Fuel Turbine Discharge Temperature Redline Protection. NASA TP 2759, August, 1987.

Huang, H.L. Redundant-System Demonstrated-Reliability Approximation Using Piece-part Failure Rates, IEEE Transactions on Reliability, Vol 40, N° 1, p 15-19 April, 1991.

Huang, Hsien - Lu. Reliability Consideration of Thin - Film Temperature Sensors in Future Space Shuttle Propulsion Systems. Journal of Space and Rockets. Volume 31, No 1, 145-149, February, 1994.

Ireson, W.G. Reliability Handbook. New York: McGraw-Hill, 1966.

Janice, C.Y., David, W.C. A Self-Validating Thermocouple, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol 5, N° 2, March 1997.

- Kamal, A R. I., Gonçalves, M. M., Benevenuto, F. S. Instrumentação Básica para Engenharia, Campinas: Editora do Autor, 1998.
- Kamal, A.I. Relatório Técnico. Campinas: CEMAN-UNICAMP, 1998.
- Kim, S.H. Statistics and Decisions. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992.
- Kim, W.S. Progress on Thin Film Sensors for Space Propulsion Technology, NASA CP-2471, May, 1987.
- La Sala, K. P. Human Performance Reliability: A Historical Perspective, IEEE Transactions on Reliability, Vol 47, N° 3-SP, p SP365-371 , September,1998.
- Levitin, G., Lisnianski, A, Bee-Haim, H., Elmakis, D. Redundancy Optimization for Serie-Paralel Multi-State System, IEEE Transactions on Reliability, Vol 47, N° 2, p 165-172. June,1998.
- Lipschutz, S. Probabilidade. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1972.
- Mangum, B.W., Furukawa, G.T. Guidelines for Realizing the International Temperature Scale of 1990 (ITS-90), Natl. Inst. Stand. Technolog. Technote 1265, Philadelphia, p 190, 1990.
- Marcovici, C. Fiabilite des Equipements. São José dos Campos, CTA, FIAS, 1992.
- Martins, C. M., Von Ellenreider, A. R. Confiabilidade, Manutenibilidade e Segurança do Produto. São Bernardo do Campo: Associação Brasileira de Controle de Qualidade - Módulo 4, 1990.
- McGee, T.D. Principles and Methods of Temperature Measurement. New York: John Wiley & Sons, 1988.

McLaren, E.H., Murdock, E.G. "Properties of Some Noble and Base Metal Thermocouples at Fixed Points in the Range 0-1100 °C", in Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry, Vol 5, New York: American Institute of Physics, p 953. 1982.

Medanic, J.V. Design of Reliable Controllers Using Redundant Control Elements Proceeding of the 1993, American Control Conference, 1993.

Meyer, P.L. - Probabilidade Aplicações a Estatística Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1978.

Nepomuceno, R.F. Termometria. São Paulo: Ecil, 1990.

Nieto, A , Paul, F. Mesures de Temperature. Paris: Editions Radio, 1977.

O'Connor, P.D.T Practical Reliability Engineering. New York: John Wiley & Sons, 1994.

Ogunyemi, O T., Nelson, P. I. Prediction of Gama Failure Time, IEEE Transactions on Reliability, Vol 46, N° 3, p 400-405 , September,1997.

Pollock, D.A Thermocouples: Theory and Properties - CRC Press, Inc, Boca Raton, 1991.

Preston-Thomas, H. "The International Temperature Scale of 1990", Metrologia 27, 3, 1990.

Reliability Prediction Methodologies for Electronic Equipment,AIR 5286, 31, SAE, p-11, Committes: Electronic Reliability Prediction.,1998.

Ripple, D., Burns, G.W., Scroger, M. G. Assessment of Uncertainties of Thermocouple Calibrations at NIST - NISTIR 5340, January, 1994.

Rodrigues, R.S. Confiabilidade e Controle de Qualidade. São Paulo: MIC, 1990.

- Roeser, Wm. F. Thermoelectric Thermometry - Precision Measurement and Calibration Temperature - Washington, D.C. volume 2 : 213-232, August, 1968.
- Roeser, Wm.F., Lonberger, S.T. Methods of Testing Thermocouples and Thermocouple Materials - Precision Measurement and Calibration Temperature. Washington, D.C. volume 2 : 233-255, August, 1968.
- Schooley, J.F. Thermometry. Flórida: CRC Press, Inc, 1988.
- Schwob, M, Peyrache, G. Traité de Fiabilité. Masson, Paris, 1969.
- Shooman, M. L. Probabilistic Reliability - An Engineering Approach. New York: McGraw-Hill, 247-249, 1968.
- Spiegel, M.R. Estatística. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1972.
- Taylor, B.N., Kuyatt, C.E. Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results, NIST Technical Note 1297, U.S. Government Printing Office, Washington, DC, 1990.
- Tobias, P.A., Trindade, D.C. Applied Reliability. New York: Van Nostrand Reinhold, 1986.
- Vieira, S. Automatização, Recurso para Ganho de Produtividade e Qualidade na Medição de Temperatura. IPEM 47, p 9.01-9.22. 1991
- Wang, T.P., Bediones, D. "10,000 hr Stability Test of Types K, N and a Ni-Mo/Ni-Co Thermocouple in Air and Short Term Tests in Reducing Atmospheres" in Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry, Vol 6, Part 1, New York: American Institute of Physics, p 595-600. 1992.

Wroe, J. O Avançado Termopar Tipo N Totalmente Revestido e de Elevadíssima Estabilidade Termoelétrica. Seminário de Medição e Calibração. São Paulo, p 6.01-6.16. 1991.

Yan, J.H., Mazundar, M. A Component Testing Procedure for a Parallel System with Type LL Sensing, IEEE Transactions on Reliability, Vol R 36, N° 4, October, 1978.

Yang, J.C., Clarke, D.W. A Self-Validating Thermocouple, IEEE Transactions of Control Systems Tecnology, Vol 5, N° 2, March, 1997.

Yang, J.C., Clarke, D.W. Control Using Self-Validating Sensors, TRNS INST MC, Vol 18, N° 1, 1996.