

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE E MODELAMENTO DE DISPARADORES BIMETÁLICOS DE  
SOBRECARGA DE DISJUNTORES-MOTORES DE BAIXA TENSÃO

Dissertação submetida à

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

para a obtenção do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

EDUARDO GRÜTZMACHER

Florianópolis, julho de 2003



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE E MODELAMENTO DE DISPARADORES BIMETÁLICOS DE SOBRECARGA DE  
DISJUNTORES-MOTORES DE BAIXA TENSÃO

EDUARDO GRÜTZMACHER

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de

MESTRE EM ENGENHARIA  
ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA

sendo aprovada em sua forma final.

---

Prof. Carlos Alberto Martin, Dr.-Ing. - Orientador

---

Prof. Júlio César Passos, Dr. - Coorientador

---

Thomas Roschke, Dr.-Ing. - Coorientador

---

Prof. José Antônio Bellini da Cunha Neto, Dr. - Coordenador do Curso

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Vicente de Paulo Nicolau, Dr. - Presidente

---

Prof. Hary Bruno Mohr, D.Sc.

---

Prof. Marco Antônio Martins Cavaco, Ph.D.

---

Prof. Saulo Güths, Dr.



*A minha família.*



# AGRADECIMENTOS

Ao Prof. C. A. Martin, pela orientação, apoio e aconselhamento dedicados na realização deste trabalho.

Ao Prof. Julio Passos, pela inestimável ajuda proporcionada nas correções e sugestões sobre o texto referente aos ensaios experimentais, e cujo constante interesse sobre esta dissertação tornou-se um dos mais importantes fatores impulsionadores da conclusão do trabalho.

A minha namorada Raquel Regina Bonelli, pelo carinho, apoio e incentivo dados incondicionalmente em todos os momentos, especialmente nos mais difíceis.

À Weg Acionamentos pelo material e sugestão de tema, especialmente nas pessoas de Reinaldo Stuart, Ridi, Ivo, Gabriel e Reinaldo Medeiros.

Ao Dr.-Ing. Thomas Roschke, que gentilmente me ofereceu espaço em sua sala, tornando-se para mim um grande conselheiro, e cuja defesa de tese tive a oportunidade de presenciar, logo em meu primeiro dia no Ifwt.

Ao Dr.-Ing. Hartmut Kühn, pela indispensável ajuda, material e intelectual, no planejamento e execução dos inúmeros ensaios realizados sob sua tutela, e pela ótima noite de ano novo que me proporcionou ao lado de sua família.

A Klaus, Heike e Ines Böedrich por uma maravilhosa noite de natal.

Aos amigos que fiz em minha curta passagem pelo Ifwt-TUD: Elger, Jörg, Hans, Holger, Michael, Sebastian, entre tantos outros. Agradecimentos especiais para Thomas Bödrich, colega de sala que veio a tornar-se constante companheiro, e hoje traduz-se em saudosa amizade.

Aos colegas do LHW, David, Winderson, Geóvio e Anderson, que, em momentos distintos, se mostraram valiosos companheiros.

À Capes pelo apoio financeiro.



# SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS</b>	<b>xi</b>
<b>SUMÁRIO</b>	<b>ix</b>
<b>LISTAS</b>	<b>xii</b>
<b>RESUMO</b>	<b>xxi</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>xxiii</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1 Contexto	2
1.2 Motivação e Justificativas	3
1.3 Objetivos	4
1.4 Estrutura do Texto	5
<b>2. REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>7</b>
2.1 Revisão de Conceitos Relacionados à Aplicação e Especificação de Dispositivos de Comando e Proteção	7
2.1.1 Dispositivos de Manobra e Proteção de Baixa Tensão	9
2.1.2 Proteção	12
2.1.3 Proteção de Motores	13
2.1.4 Proteção contra Sobrecarga	15
2.1.5 Grandezas e Características dos Dispositivos de Proteção Contra Sobrecarga	16
2.1.6 Características de Disjuntores e Relês de Sobrecarga para Proteção de Motores	18
2.2 Normas	21
2.3 Termobimetais	23
2.3.1 Propriedades	23
<b>3. O DISPARADOR TÉRMICO DE SOBRECARGA</b>	<b>27</b>
3.1 Princípio de Funcionamento	28
3.2 Sistema de Compensação de Temperatura Ambiente	31
3.3 Sistema de Regulagem da Corrente de Ajuste	32
3.4 Sistema de Sensibilidade à Falta de Fase	33

3.5	Correção dos Efeitos de Variações Dimensionais de Fabricação nos Tempos de Desarme	35
4.	DISCUSSÃO DOS PROBLEMAS ENVOLVIDOS NO PROJETO DE DISPARADORES	39
5.	ANÁLISE DO DISPARADOR	43
5.1	Bimetais de Operação	45
5.2	Sistema de Sensibilidade à Falta de Fase	49
5.3	Conjunto Bimetal de Compensação - Sistema de Ajuste de Corrente	50
5.4	Sistema de Liberação do Mecanismo	53
5.5	O Sistema Completo	55
6.	MODELO SIMPLIFICADO	57
6.1	Simplificações	57
6.2	A Configuração do Sistema Simplificado	58
6.3	Modelo Térmico	60
6.4	A Análise para $I_e = I_r$	65
6.5	A Análise para $I_e$ Qualquer	70
6.6	Análise dos Efeitos das Variações Dimensionais	75
6.7	Análise da Correção da Curva	76
6.8	Discussão	85
6.9	Correspondência do Modelo com as Relações Definidas	93
6.10	Conclusões	94
7.	MONTAGEM EXPERIMENTAL	97
7.1	Os Disjuntores de Estudo	97
7.2	Descrição da Bancada	98
7.2.1	LASER	99
7.2.2	Termoresistores e Cola Térmica	102
7.2.3	Unidade de Aquisição de Dados	103
7.2.4	Fonte de Corrente	104
7.2.5	A Bancada Completa	105
7.3	Posicionamento dos Transdutores de Temperatura	106
8.	LEVANTAMENTO DE CURVAS DE AQUECIMENTO DOS BIMETAIS	109

8.1	Procedimento de Ensaio _____	109
8.2	Planejamento dos Ensaios _____	110
	8.2.1 Condições a Serem Ensaçadas _____	110
	8.2.2 Tabela de Ensaios Realizados _____	112
8.3	Resultados _____	112
8.4	Discussão dos Resultados Experimentais _____	121
8.5	Conclusões _____	131
9.	ESTUDO SOBRE SIMULAÇÃO DE DISPARADORES _____	133
9.1	Particularidades dos Disparadores Térmicos de Sobrecarga _____	133
9.2	Métodos de Simulação _____	135
	9.2.1 Método de Elementos Finitos _____	136
	9.2.2 Diferenças Finitas/Modelo de Rede _____	137
9.3	Sugestões de Estratégia para Elaboração de um Modelo para o Disparador _____	139
10.	CONCLUSÕES _____	141
10.1	Discussão do Problema de Projeto de Disparadores _____	141
10.2	Análise do Disparador _____	141
10.3	Modelo Simplificado _____	142
10.4	Comportamento Térmico dos Bimetálicos Verificado no Procedimento Experimental _____	143
10.5	Estudo sobre Simulação de Disparadores _____	144
10.6	Sugestões para Trabalhos Futuros _____	144
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS _____	1
	ANEXO _____	149

# LISTAS

## *Lista de Figuras*

Figura 2.1: carga admissível de um componente para não ultrapassar seu aquecimento admissível /SIE90/ _____	15
Figura 2.2: exemplo de curva característica de desarme de um disparador térmico de sobrecarga /WAC90/ _____	18
Figura 2.3: restrições à forma da curva característica de disjuntores impostas pela norma IEC 947-4-1, por classe de disparo _____	22
Figura 2.4: aplicação de termobimetals /RAU89/ _____	24
Figura 3.1: disparador e relê de sobrecarga. Modificado de /SIE90/ _____	28
Figura 3.2: disposição física dos componentes do DTS _____	29
Figura 3.3: o conjunto bimetal - enrolamento de aquecimento de disparadores de três faixas de correntes diferentes _____	30
Figura 3.4: exemplo de análise de forças envolvidas em disparadores /KAŠ60/ _____	31
Figura 3.5: bimetal de compensação de temperatura ambiente _____	32
Figura 3.6: alteração do ponto de disparo _____	32
Figura 3.7: detalhe do <i>dial</i> de ajuste _____	33
Figura 3.8: funcionamento do sistema de sensibilidade à falta de fase _____	34
Figura 3.9.: sistema de sensibilidade à falta de fase dos disjuntores Siemens _____	35
Figura 5.1: o disparador como um bloco-diagrama _____	44
Figura 5.2: representação dos subsistemas em bloco-diagrama _____	45
Figura 5.3: sistema dos bimetals, variáveis e suas relações _____	46
Figura 5.4: sistema de sensibilidade à falta de fase e variáveis envolvidas _____	49
Figura 5.5: conjunto bimetal de compensação - sistema de ajuste de corrente e variáveis envolvidas _____	51
Figura 5.6: sistema de liberação do mecanismo e variáveis envolvidas _____	54
Figura 5.7: o sistema completo e sua complexidade _____	56

Figura 6.1: configuração simplificada do disparador real _____	59
Figura 6.2: definição das distâncias $a$ , $c$ , $o$ e $r$ _____	60
Figura 6.3: representação simplificada do sistema térmico do bimetal _____	61
Figura 6.4: diagrama de rede de resistências do sistema térmico _____	61
Figura 6.5: aumento da temperatura e deslocamento do bimetal no tempo para diversas correntes _____	67
Figura 6.6: tempos para atingir temperatura limite $\theta_g$ e deslocamento $d + c$ limite _____	68
Figura 6.7: definição das correntes $I_r$ , $I_v$ e $I_g$ _____	69
Figura 6.8: curva característica obtida graficamente, para $I_r$ _____	70
Figura 6.9: deslocamento do ponto de disparo _____	71
Figura 6.10: obtenção da curva característica para $I_e = k.I_r$ _____	73
Figura 6.11: condição do disparador com variação dimensional adicionada _____	76
Figura 6.12: a atuação do processo de correção _____	77
Figura 6.13: o diagrama de quatro quadrantes de um DTS _____	80
Figura 6.14: o efeito das variações dimensionais de fabricação _____	81
Figura 6.15: o efeito da correção sobre a curva característica _____	82
Figura 6.16: o efeito da correção, visto com o deslocamento do eixo $\alpha$ _____	83
Figura 6.17: o diagrama para relação linear entre $\alpha$ e $s$ _____	84
Figura 6.18: a correção para o caso $\alpha$ proporcional a $s$ _____	85
Figura 6.19: a influência dos parâmetros $g$ e $\tau$ sobre a curva característica de DTS's _____	88
Figura 6.20: curvas características ideais _____	90
Figura 6.21: exemplo prático do uso do gráfico de quatro quadrantes _____	92
Figura 7.1: foto de um disjuntor da série Sirius 3R /SIE00/ _____	98
Figura 7.2: dimensões dos disjuntores da série Sirius /SIE00/ _____	98
Figura 7.3: a bancada de ensaios _____	105
Figura 7.4: o bimetal do disparador 3,5 - 5,0 com termoresistores _____	107
Figura 7.5: os termoresistores montados no disjuntor _____	108
Figura 8.1: resultado dos ensaios, disparador 0,14 - 0,20, $1,5 \times I_{base}$ _____	114

Figura 8.2: resultado dos ensaios, disparador 0,14 - 0,20, $1,5 \times I_{base}$	114
Figura 8.3: resultado dos ensaios, disparador 3,5 - 5,0, $1,0 \times I_{base}$	115
Figura 8.4: resultado dos ensaios, disparador 3,5 - 5,0, $1,5 \times I_{base}$	115
Figura 8.5: resultado dos ensaios, disparador 5,5 - 8,0, $1,0 \times I_{base}$	116
Figura 8.6: resultado dos ensaios, disparador 5,5 - 8,0, $1,5 \times I_{base}$	116
Figura 8.7: resultado dos ensaios, disparador 5,5 - 8,0, $1,0 \times I_{base}$ , sem carcaça	117
Figura 8.8: resultado dos ensaios, disparador 5,5 - 8,0, $1,5 \times I_{base}$ , sem carcaça	117
Figura 8.9: ajuste das curvas levantadas	118
Figura 8.10: gráfico dos valores de regime permanente para o DTS 0,14 - 0,20	121
Figura 8.11: gráfico dos valores de regime permanente para o DTS 3,5 - 5,0	122
Figura 8.12: gráfico dos valores de regime permanente para o DTS 5,5 - 8,0	122
Figura 8.13: gráfico comparativo entre disparadores, por corrente	123
Figura 8.14: gráfico comparativo entre disparadores, por posição	125
Figura 8.15: gráfico da influência da carcaça nos valores de regime permanente	126
Figura 8.16: gráfico comparativo entre as constantes de tempo, com e sem carcaça	126
Figura 8.17: gráfico comparativo entre bimetais do mesmo disparador	127
Figura 8.18: ajuste das curvas do deslocamento em regime permanente	129
Figura 8.19: gráfico dos valores da potência $n$ para os três disparadores	130
Figura 10.1: avaliação da estabilidade do laser	151
Figura 10.2: avaliação da acuracidade do laser	151
Figura 10.3: dimensões do laser	152

## ***Lista de Tabelas***

<b>Tabela 2.1:</b>	<b>correntes convencionais de não atuação e de atuação para os principais dispositivos de proteção contra sobrecorrentes de baixa tensão</b>	<b>17</b>
<b>Tabela 2.2:</b>	<b>tempos convencionais para os principais dispositivos de proteção contra sobrecorrentes de baixa tensão</b>	<b>17</b>
<b>Tabela 2.3:</b>	<b>tempos de disparo, <math>t_p</math>, definidos pela norma IEC 947-4-1</b>	<b>21</b>
<b>Tabela 6.1:</b>	<b>condições de contorno para determinação de <math>g</math> e <math>\tau</math></b>	<b>89</b>
<b>Tabela 6.2:</b>	<b>valores adequados para <math>g</math> e <math>\tau</math>, por classe de disparo</b>	<b>89</b>
<b>Tabela 7.1:</b>	<b>vantagens e desvantagens do LASER não-interferométrico como transdutor em sistemas de medição de distâncias (características gerais)</b>	<b>100</b>
<b>Tabela 7.2:</b>	<b>principais características da unidade LASER utilizada</b>	<b>101</b>
<b>Tabela 7.3:</b>	<b>valor dos parâmetros dos Pt's</b>	<b>102</b>
<b>Tabela 7.4:</b>	<b>características da resina térmica empregada</b>	<b>103</b>
<b>Tabela 7.5:</b>	<b>principais características da unidade de aquisição de dados</b>	<b>103</b>
<b>Tabela 7.6:</b>	<b>principais características da fonte de corrente</b>	<b>104</b>
<b>Tabela 7.7:</b>	<b>configuração dos canais da unidade de aquisição de dados</b>	<b>106</b>
<b>Tabela 8.1:</b>	<b>lista dos ensaios principais realizados</b>	<b>112</b>
<b>Tabela 8.2:</b>	<b>ensaios adicionais realizados</b>	<b>112</b>
<b>Tabela 8.3:</b>	<b>parâmetros dos ensaios 1,0 e <math>1,5 \times I_{base}</math></b>	<b>119</b>
<b>Tabela 8.4:</b>	<b>média e intervalo de confiança do parâmetro <math>y_\infty</math></b>	<b>119</b>
<b>Tabela 8.5:</b>	<b>constantes de tempo e <math>\beta</math>, para o disparador 3,5 - 5,0</b>	<b>120</b>
<b>Tabela 8.6:</b>	<b>parâmetros das curvas do disparador 5,5 - 8,0, com e sem carcaça</b>	<b>120</b>
<b>Tabela 8.7:</b>	<b>comparação de taxas de calor transferido e produzido no enrolamento</b>	<b>128</b>
<b>Tabela 8.8:</b>	<b>parâmetros das curvas ajustadas dos valores de regime permanente</b>	<b>130</b>
<b>Tabela 10.1:</b>	<b>parâmetros das curvas ajustadas do disparador 0,14 - 0,20</b>	<b>153</b>

<b>Tabela 10.2: parâmetros das curvas ajustadas do disparador 3,5 - 5,0</b>	<b>_____ 153</b>
<b>Tabela 10.3: parâmetros das curvas ajustadas do disparador 5,5 - 8,0</b>	<b>_____ 154</b>
<b>Tabela 10.4: parâmetros das curvas ajustadas dos ensaios com o bimetal isolado</b>	<b>_____ 155</b>

## Lista de Símbolos

$1/r$	curvatura do bimetá defletido	$[\text{mm}^{-1}]$
$a$	deslocamento do bimetá devido à temperatura ambiente	$[\text{mm}]$
$\alpha$	flexão térmica específica	$[\text{°C}^{-1}]$
$A$	medida da deflexão do bimetá	$[\text{mm}]$
$A$	área de transferência de calor	$[\text{m}^2]$
$c$	deslocamento do bimetá de compensação devido à temperatura ambiente	$[\text{mm}]$
$C$	capacidade térmica	$[\text{J/°C}]$
$c_p$	calor específico	$[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{°C})]$
$d$	distância até o ponto de disparo quando os bimetá se encontrarem à temperatura $T_n$	$[\text{mm}]$
$e$	deslocamento do bimetá devido a variações dimensionais de fabricação	$[\text{mm}]$
$F$	força	$[\text{N}]$
$g$	menor múltiplo da corrente de ajuste que provoca o disparo	$[\text{<adm>}]$
$h$	coeficiente de transferência convectiva de calor	$[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{°C})]$
$I_a$	corrente convencional de atuação	$[\text{A}]$
$I_b$	corrente elétrica que atravessa o disparador	$[\text{A}]$
$I_{base}$	corrente usada como valor de base nos ensaios realizados	$[\text{A}]$
$I_e$	corrente de ajuste	$[\text{A}]$
$I_{marcação}$	valor de corrente que indica a posição em que deve ser feita a impressão da marca de indicação do valor de corrente ajustada	$[\text{A}]$
$I_n$	corrente nominal	$[\text{A}]$
$I_{na}$	corrente convencional de não atuação	$[\text{A}]$
$I_{teste}$	valor de corrente utilizada no método de correção do tempo de desarme de um disjuntor	$[\text{A}]$
$k$	relação entre a corrente ajustada $I_e$ e a de referência, $I_r$	$[\text{<adm>}]$
$k$	curvatura específica do bimetá	$[\text{°C}^{-1}]$
$k$	condutividade térmica	$[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{°C})]$
$L$	comprimento do bimetá	$[\text{mm}]$
$L$	largura característica para cálculo de transferência de calor por convecção	$[\text{m}]$
$Nu$	número de Nusselt	$[\text{<adm>}]$

$o$	deslocamento inicial do bimetálico	[mm]
$p$	múltiplo da corrente de ajuste (sobrecorrente)	[<adm>]
$p_{correção}$	múltiplo da corrente de ajuste corrigida	[<adm>]
$P$	potência elétrica gerada por efeito Joule	[W]
$Pr$	número de Prandtl	[<adm>]
$q$	taxa de transferência de calor	[W]
$\dot{q}_{acum}$	taxa da variação da energia térmica acumulada	[W]
$\dot{q}_g$	taxa de geração de calor	[W]
$r$	valor de deslocamento de referência do bimetálico	[mm]
$r$	raio de curvatura do bimetálico defletido	[mm]
$R$	resistência térmica	[W/°C]
$Ra$	número de Rayleigh	[<adm>]
$R_{elét}$	resistência elétrica	[Ω]
$s$	espessura da lâmina bimetálica	[mm]
$t$	tempo	[s]
$t_{correção}$	tempo decorrido após aplicação de corrente até o início do movimento do <i>dial</i> , durante a correção do tempo de desarme	[s]
$t_p$	tempo de desarme	[s]
$T$	temperatura	[°C]
$T_n$	temperatura em que o bimetálico não apresenta curvatura	[°C]
$v$	condição de sobrecorrente inicial	[<adm>]
$V$	volume	[m <sup>3</sup> ]
$\alpha$	coeficiente de temperatura médio de resistividade	[°C <sup>-1</sup> ]
$\beta$	coeficiente da equação de sistemas de 2 <sup>a</sup> ordem	[<adm>]
$\rho$	massa específica	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\tau$	constante de tempo	[s]
$\theta$	diferença em relação à temperatura ambiente ( $T - T_a$ )	[°C]

### **Eixos**

$q$	deslocamentos do bimetálico relativos à temperatura ambiente
$s$	deslocamento do ponto de disparo
$x$	eixo longitudinal do bimetálico
$y$	eixo transversal do bimetálico
$z$	eixo dos deslocamentos do bimetálico
$\alpha$	ângulo de giro do <i>dial</i>
$\gamma$	ângulo das posições das marcas de correntes impressas na tampa do disjuntor

### **Subscritos**

$1$	referente a um determinado estado 1
$2$	referente a um determinado estado 2
$a$	referente à temperatura ambiente
$alav$	referente à alavanca diferencial
$ar$	referente a uma propriedade do ar ambiente
$b$	referente aos bimetálicos de operação
$bc$	referente ao bimetálico de compensação de temperatura
$c$	referente ao bimetálico do centro
$cond$	referente à condução de calor
$conv$	referente à convecção de calor
$d$	referente ao bimetálico da direita
$e$	referente ao bimetálico da esquerda
$e$	referente a erro
$n$	valor nominal
$o$	referente à condição inicial
$r$	valor de referência
$ret$	referente ao retentor
$tot$	referente a um valor total
$w$	referente ao enrolamento de aquecimento
$\infty$	referente à condição de regime permanente



## RESUMO

Um dos principais métodos de proteção contra sobrecarga de instalações elétricas é realizado por meio de disparadores de sobrecarga, os quais são parte integrante de dispositivos de comando e proteção.

Apesar da sua enorme aplicação, poucas são as publicações que tratam da análise e do projeto destes disparadores. Mesmo em se tratando de sua aplicação, as várias bibliografias, devido a existência de diferentes normas são, muitas vezes, confusas e contraditórias.

Este trabalho apresenta uma contribuição no estudo de tais elementos. O funcionamento do disparador foi estudado através da análise de seus componentes e das variáveis que regem seu comportamento. Um modelo simplificado de seu funcionamento foi proposto, a fim de correlacionar tais variáveis, e as conclusões obtidas foram discutidas.

Uma metodologia experimental para a obtenção das curvas de aquecimento dos elementos bimetálicos dos disparadores foi desenvolvida e aplicada. Através destas curvas, foi possível confirmar algumas suposições feitas no modelo proposto, e verificar a forma da transmissão de calor existente entre os vários componentes do sistema.



# ABSTRACT

One of the most important methods for overload protection of electrical installations is carried through by means of overload releases, which are integrant part of circuit breakers and other protection devices.

Despite its huge application, there are just few publications that deal with the analysis and design of overload releases. Even taking into account the works that just deal with its application, one can realise some confusion and contradiction among this publications.

This work presents a contribution in the study of such elements. The functioning of the release was studied, by means of the analysis of its components and the variables that describe its behavior. A simplified model was proposed, in order to correlate such variables, and the conclusions obtained had been discussed.

An experimental methodology to obtain the heating curves of the bimetallic elements of overload releases was developed and applied. With these curves, it was possible to confirm some assumptions made in the proposed model, and to verify the way heat is transmited between the diferent components of the system.



# 1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, os dispositivos de comando e proteção de baixa tensão têm sido desenvolvidos até um grau inesperado. Exigências maiores nas propriedades elétricas e mecânicas destes dispositivos e em sua adaptabilidade e economia têm acelerado este processo, enquanto considerável esforço adicional foi dado por avanços em racionalização e automação. Melhorias decisivas em dispositivos de comutação foram alcançadas através de um maior conhecimento dos princípios básicos do fenômeno do arco elétrico, de materiais e técnicas de isolamento e através de avanços nas técnicas de fabricação /SCH76/.

A forma de atuação da função de proteção contra sobrecarga em disjuntores e relês de sobrecarga de baixa tensão está baseada em um elemento bimetálico. A corrente que alimenta a carga que o dispositivo deve proteger passa em torno do elemento bimetálico do disparador. Esta corrente aquece o elemento bimetálico, cuja velocidade de aquecimento e valor de temperatura final são dependentes do nível de corrente consumida pela carga protegida. A variação da temperatura do bimetal provoca sua deflexão e deslocamento de sua ponta livre, que ao atingir uma distância limite, faz atuar o mecanismo de desarme do dispositivo.

Ainda hoje relês e disjuntores com disparadores bimetálicos de sobrecarga são os principais dispositivos utilizados na indústria para proteção de motores. Apesar de estes dispositivos serem utilizados há anos, o completo entendimento sobre seu projeto e dimensionamento é de domínio de apenas alguns grandes fabricantes.

Este fato se verifica quando se procura alguma referência bibliográfica sobre o tema. Apenas poucas publicações são encontradas, as quais, em geral, são antigas. Mesmo nas existentes, estas publicações geralmente se limitam a descrever o funcionamento do disparador, sem se deter a um equacionamento envolvendo suas diferentes variáveis, ou então em responder a questões relevantes, como a exata influência das variações dimensionais de fabricação ou então do procedimento

de correção da corrente de ajuste sobre o desempenho do dispositivo.

Este trabalho vem contribuir para preencher tais lacunas, buscando um entendimento sobre o funcionamento de disparadores bimetálicos de sobrecarga e, principalmente, dando subsídios no desenvolvimento de novos dispositivos baseados nestes componentes. O trabalho tem ainda o intuito de servir como uma base para um estudo mais completo de todo o dispositivo, que só será concluído com um modelamento refinado de cada um dos componentes integrantes do disparador.

## **1.1 Contexto**

Dispositivos de comando e proteção de circuitos elétricos de baixa tensão fazem parte de um conjunto especial de sistemas dentro da área da engenharia. As funções desempenhadas por estes dispositivos são executadas por elementos que atuam sob princípios mecânicos, térmicos, elétricos e magnéticos, interagindo entre si. Estes elementos têm em comum algumas características, como por exemplo: os componentes são de pequenas dimensões, a necessidade de precisão é elevada e as forças presentes são de pequena intensidade. Trata-se portanto de uma área da engenharia intrinsecamente multidisciplinar, onde os limites entre fenômenos mecânicos e elétricos já não se reconhecem facilmente. Este campo da engenharia é a chamada Engenharia (ou Mecânica) de Precisão.

Com o intuito de desenvolver pesquisas nesta área em nossa universidade, foi iniciado na UFSC, a partir do ano de 1991, um programa destinado a formar alunos de engenharia mecânica com conhecimentos na área de Mecânica de Precisão, área até então pouco explorada no país e de grande demanda de profissionais.

Neste intermédio, a partir 1998 foi iniciado pela empresa Weg Acionamentos, situada em Jaraguá do Sul, SC, um programa de desenvolvimento para sua nova linha de disjuntores, com o objetivo de desenvolver tais dispositivos

com tecnologia própria e obter total conhecimento sobre os processos de desenvolvimento e produção de seus produtos. Para tanto, além de investimentos em equipamento e pessoal, foi realizada uma parceria com o Instituto de Engenharia de Precisão (“Institut für Feinwerktechnik”, Ifwt) da Universidade Tecnológica de Dresden (“Technische Universität – Dresden”, TUD), Alemanha, para apoiar tal esforço. O trabalho de desenvolvimento foi dividido em alguns pontos específicos de pesquisa. Uma equipe de desenvolvimento foi criada, para a qual, com o intuito de proporcionar sua qualificação, foi concebido um programa de treinamento específico para seus integrantes, a cargo da Universidade Federal de Santa Catarina.

O presente trabalho está inserido neste contexto, tendo o intuito de contribuir para a pesquisa na área de Engenharia de Precisão em nossa universidade e auxiliar no trabalho de desenvolvimento realizado na Indústria. O foco desta pesquisa recai sobre uma das várias partes resultantes da divisão do amplo trabalho de desenvolvimento, qual seja, a análise do disparador bimetálico de sobrecarga, um dos componentes integrantes de disjuntores.

## 1.2 Motivação e Justificativas

Como principais argumentos motivadores para a realização deste trabalho destacam-se os seguintes pontos:

- ✓ os resultados do trabalho têm aplicação na indústria, ou melhor, existe o interesse direto da indústria neste trabalho;
- ✓ as considerações teóricas aqui levantadas vêm suprir um pouco a deficiência de trabalhos publicados sobre o projeto e modelamento de tais dispositivos;
- ✓ trata-se de uma oportunidade que proporciona o intercâmbio Universidade-Empresa;
- ✓ engloba também intercâmbio internacional entre a UFSC e a TUD.

### 1.3 Objetivos

O presente trabalho tem o objetivo de fazer uma análise de disparadores bimetálicos de sobrecarga, de forma a entender seu funcionamento e os problemas relacionados ao seu projeto, e servir de base para um posterior modelamento mais rigoroso de seu comportamento dinâmico.

Para se atingir este objetivo, foram definidos os seguintes pontos como objetivos específicos:

- ✓ investigar o funcionamento de disparadores de sobrecarga;
- ✓ discutir o problema associado ao estudo e desenvolvimento de disparadores de sobrecarga;
- ✓ obter uma análise do disparador térmico de sobrecarga e do conjunto de variáveis envolvidas neste dispositivo;
- ✓ propor um modelo simplificado que simule seu funcionamento, sirva de base para novos modelos mais refinados, com o qual se possa avançar no entendimento do funcionamento e interdependência das variáveis envolvidas, e que esclareça dúvidas e forneça conclusões a respeito do projeto de tais dispositivos;
- ✓ propor uma metodologia de ensaio a ser aplicada aos bimetais do disparador para o levantamento de curvas de aquecimento e deslocamento em função do tempo;
- ✓ obter as curvas de temperatura e deslocamento, em função do tempo, durante o processo de aquecimento dos bimetais para diversas condições e comparar seus resultados com os obtidos com o modelo simplificado;
- ✓ fazer uma breve avaliação dos métodos de modelamento e simulação de sistemas dinâmicos para se poder visualizar uma estratégia de elaboração de um futuro modelo para disparadores térmicos de sobrecarga.

## 1.4 Estrutura do Texto

Este texto, resultante do trabalho de pesquisa, é apresentado de acordo com a seguinte estrutura:

No presente capítulo (1) enfoca-se a origem, objetivos e a importância do trabalho, além de apresentar as etapas do seu desenvolvimento.

O capítulo 2 apresenta uma pequena revisão da literatura. Devido à extrema dificuldade de se encontrar referências bibliográficas atuais sobre o tema, a revisão manteve seu foco no intuito de localizar o objeto de estudo do trabalho no contexto industrial e acadêmico. Esta revisão foi realizada sobre dispositivos eletromecânicos de comando e proteção de circuitos elétricos de baixa tensão, suas definições, características e propriedades; sobre proteção de circuitos, especialmente contra sobrecarga; sobre os dispositivos utilizados para cumprir esta função, especialmente relês de sobrecarga e disjuntores dotados de disparadores de sobrecarga. Um breve resumo sobre termobimetálicos também está apresentado.

O capítulo 3 apresenta em maior profundidade o disparador térmico de sobrecarga e seu princípio de funcionamento. Apresenta também uma análise de normas relacionadas a estes componentes.

O capítulo 4 apresenta uma breve discussão sobre o problema relacionado ao projeto de disparadores de sobrecarga, do ponto de vista do fabricante destes dispositivos. Sob esta ótica, uma definição para o problema é proposta e uma série de perguntas sobre como o dispositivo executa a sua função são levantadas, a fim de se clarear o entendimento sobre este sistema.

No capítulo 5 faz-se uma análise das variáveis e parâmetros envolvidos no funcionamento de um disparador térmico de sobrecarga típico. O disparador é dividido em subsistemas e o fluxo de sinais e as relações destes com as variáveis internas dos subsistemas é analisado. Ao final, tem-se uma visão geral da complexidade de todo o sistema.

No capítulo 6 um modelo simplificado do funcionamento do sistema é proposto. Inicialmente, simplificações nas relações entre variáveis analisadas no capítulo anterior são propostas. O modelamento inicia com o sistema térmico do bimetálico e a definição do sistema simplificado. A seguir é analisado como a curva característica do disparador é determinada para uma dada corrente de trabalho, e como ela é determinada após o ajuste para um novo valor genérico de corrente de ajuste. Os efeitos de variações dimensionais no disparador, assim como os efeitos do procedimento de correção da curva do disparador, são vistos em seguida. Uma discussão sobre o modelo obtido é feita, onde procura-se responder as perguntas levantadas no capítulo 4, e a aplicabilidade das conclusões alcançadas com o modelo em disparadores reais também é discutida. Finalmente, a relação entre o modelo simplificado proposto e as funções definidas no capítulo 5 são levantadas.

O material, o equipamento e o procedimento experimental utilizados na determinação de curvas de aquecimento dos bimetálicos são apresentados no capítulo 7. Os resultados dos ensaios e sua discussão estão apresentados no capítulo 8. Através destas curvas, foi possível confirmar algumas suposições feitas no modelo proposto.

Com o entendimento conquistado com a análise e o modelo elaborados nos capítulos 5 e 6, respectivamente, e das conclusões acerca do comportamento térmico e dinâmico do sistema alcançado com os ensaios experimentais registrados nos capítulos 7 e 8, faz-se no capítulo 9 uma avaliação de métodos de análise utilizados na simulação de sistemas dinâmicos, e apresenta-se uma sugestão de estratégia para a elaboração de um modelo a ser desenvolvido posteriormente para o disparador, que reproduza com devida precisão seu comportamento, de forma a ser utilizado no desenvolvimento e otimização de disparadores térmicos de sobrecarga.

E finalmente, o capítulo 10 traz as conclusões finais obtidas com o trabalho de pesquisa aqui apresentado e sugestões para trabalhos futuros.

## **2. REVISÃO DA LITERATURA**

Durante o estudo de disjuntores de sobrecarga, deparou-se com uma grande falta de referências bibliográficas atuais sobre o tema. As referências encontradas são em geral muito antigas, a maioria delas tratando apenas da apresentação dos disjuntores, sem entrar na discussão de seu projeto. Mesmo em publicações que citam tais detalhes, verifica-se que a abordagem é feita levando em conta os recursos de análise e projeto disponíveis na época. Este fato fez com que esta revisão mantivesse seu foco em localizar o objeto de estudo do trabalho no contexto de sua aplicação industrial e normas relacionadas.

### **2.1 Revisão de Conceitos Relacionados à Aplicação e Especificação de Dispositivos de Comando e Proteção**

São apresentados nesta seção alguns conceitos básicos de instalações elétricas, e que estão relacionados com o tema do presente trabalho. Os conceitos listados a seguir estão de acordo com as normas NBR 5459, NBR 5460 e NBR 5473.

Uma “instalação elétrica” é o conjunto de componentes elétricos associados e com características coordenadas entre si, constituído para uma finalidade determinada. As instalações de baixa tensão são instalações cuja tensão nominal é igual ou inferior a 1000 V em corrente alternada, ou a 1550 V em corrente contínua.

Um “equipamento elétrico” é uma unidade funcional completa e distinta, que exerce uma ou mais funções elétricas relacionadas com geração, transmissão, distribuição ou utilização de energia elétrica. Numa instalação elétrica, pode-se ter os seguintes tipos de equipamentos:

- ✓ equipamentos relacionados com a alimentação da instalação, que são os

transformadores, os geradores e as baterias;

- ✓ dispositivos de comando (manobra) e de proteção, tais como disjuntores, fusíveis, relês, contadores, seccionadores, etc.;
- ✓ equipamentos de utilização, que são os equipamentos elétricos destinados a converter energia elétrica em outra forma de energia, e que podem ser classificados em equipamentos não industriais, equipamentos industriais e aparelhos de iluminação.

Observa-se que equipamentos envolvendo motores elétricos constituem a maior parte dos equipamentos industriais e boa parte dos equipamentos não-industriais.

Um “dispositivo elétrico” é a unidade (produto unitário) que utiliza energia eletromagnética para desempenhar uma função especificada. Via de regra, o termo é utilizado para designar um componente que consome um mínimo de energia eletromagnética no exercício de sua função (geralmente comando, manobra ou proteção).

“Manobra” é a mudança na configuração elétrica de um circuito, feita manual ou automaticamente por dispositivos adequados e destinados a essa finalidade. Comando funcional é a ação destinada a garantir o desligamento, a ligação ou variação da alimentação de energia elétrica de toda ou parte de uma instalação, em condições de funcionamento normal. Na prática, os termos “comando” e “manobra” são freqüentemente confundidos; no entanto, a rigor, pelas definições apresentadas, “comando” é a ação (causa) que provoca a “manobra” (efeito).

“Proteção” é a ação automática provocada por dispositivos sensíveis a determinadas condições anormais que ocorrem num circuito, no sentido de evitar danos às pessoas e aos animais e/ou evitar ou limitar danos a um sistema ou equipamento elétrico.

Um “dispositivo de manobra” é um dispositivo destinado a estabelecer ou interromper corrente, em um ou mais circuitos. Via de regra, os dispositivos de manobra são mecânicos, isto é, destinam-se a fechar e abrir circuito através de

contatos separáveis.

Um “dispositivo de proteção” é um dispositivo que exerce uma ou mais funções de proteção em um sistema ou equipamento elétrico.

### **2.1.1 Dispositivos de Manobra e Proteção de Baixa Tensão**

Os dispositivos de manobra (ou de comando) e de proteção podem ser classificados em:

- ✓ dispositivos de baixa tensão, quando projetados para emprego onde a tensão de linha é inferior ou igual a 1000 V; e
- ✓ dispositivos de alta tensão, quando projetados para emprego onde a tensão de linha é superior a 1000 V.

No caso mais geral, podemos distinguir num dispositivo de manobra três tipos de circuitos:

- ✓ o circuito principal, que é o conjunto das partes condutoras inseridas no circuito que o dispositivo tem por função fechar ou abrir;
- ✓ o circuito de comando, que é um circuito, diferente do principal, que comanda a operação de fechamento, abertura ou ambas;
- ✓ o circuito auxiliar, que é um circuito diferente do principal e dos circuitos de comando, e pode servir, por exemplo, para sinalização.

Dentre os principais dispositivos de comando e de proteção, destacam-se:

- ✓ contatores;
- ✓ fusíveis;
- ✓ relês;
- ✓ disjuntores.

Um “contator” é um dispositivo de manobra (mecânico) de operação não manual (geralmente eletromagnética), que tem uma única posição de repouso e é capaz de estabelecer, conduzir e interromper correntes em condições normais de circuito, inclusive sobrecargas.

Um “fusível” é um dispositivo de proteção que, pela fusão de uma parte especialmente projetada, abre o circuito no qual se acha inserido e interrompe a corrente, quando esta excede um valor especificado durante um tempo especificado.

Um “relê” é um dispositivo elétrico destinado a produzir modificações súbitas e predeterminadas em um ou mais circuitos elétricos de saída, quando dadas condições são satisfeitas nos circuitos de entrada que controlam o dispositivo. Os relês são associados eletricamente aos disjuntores e contadores, provocando sua abertura quando da detecção de alguma condição anormal (sobrecorrente, subtensão, desequilíbrios, etc.) ou por comando externo. Existem vários tipos de relês, cada um destinado a uma função específica. Entre as e definições a respeito de relês contidas na norma NBR 5465, deseja-se destacar:

- ✓ relê de tempo especificado – relê no qual um ou mais dos tempos que o caracterizam devem satisfazer a requisitos especificados, sobretudo quanto à exatidão;
- ✓ relê de tempo não especificado – relê para cujos tempos que o caracterizam não se especificam quaisquer exigências relativas à exatidão;
- ✓ relê de medição – relê destinado a comutar quando sua grandeza característica alcança, sob condições e com exatidão especificadas, seu valor de operação. Pode ser de dois tipos:
  - ✓ a tempo dependente – relê a tempo especificado para o qual os tempos dependem, de maneira especificada, do valor da grandeza característica;
  - ✓ a tempo independente – relê a tempo especificado para o qual o tempo especificado pode ser considerado como independente do valor da grandeza característica, dentro dos limites especificados desta.
- ✓ relê térmico – relê de medição a tempo dependente que protege um equipamento contra danos térmicos de origem elétrica, pela medição da corrente que percorre o equipamento protegido e utilizando uma curva característica que simula seu comportamento térmico;
- ✓ relê estático – relê no qual a operação lógica é produzida por componentes eletrônicos, magnéticos, ópticos, ou outros, sem movimento mecânico.

Um “disjuntor” é um dispositivo de manobra (mecânico) e de proteção, capaz de estabelecer, conduzir e interromper correntes em condições normais do

circuito, assim como estabelecer, conduzir por tempo especificado e interromper correntes em condições anormais especificadas do circuito, tais como as de curto-circuito. Disjuntores em geral podem estar integrados com um ou mais disparadores, que são dispositivos associados mecanicamente a um disjuntor, e que liberam os órgãos de retenção dos contatos principais, provocando seu fechamento (e/ou sua abertura). Dentre os diferentes tipos de disparadores, destacam-se:

- ✓ disparadores eletromagnéticos de sobrecorrente, instantâneos ou com retardo definido, para proteção contra curtos-circuitos e sobrecargas;
- ✓ disparadores térmicos de sobrecarga;
- ✓ disparadores de subtensão.

Um “disparador de sobrecorrente” é aquele que provoca a abertura de um disjuntor, com ou sem retardo intencional, quando a corrente no disparador excede um valor predeterminado, em condições especificadas. No que diz respeito ao retardo, o disparador pode ser:

- ✓ instantâneo, quando opera sem qualquer retardo intencional;
- ✓ com retardo definido, quando opera com um retardo definido, que pode ser ajustável, mas que é independente do valor de sobrecorrente;
- ✓ a tempo inverso, quando opera após um retardo inversamente dependente do valor da sobrecorrente.

Um “disparador de sobrecarga” é um disparador de sobrecorrente destinado à proteção contra sobrecargas. Um disparador térmico de sobrecarga é um disparador de sobrecarga a tempo inverso que depende, para sua operação (incluindo seu retardo), da ação térmica da corrente que circula no disparador.

Os disjuntores equipados com disparadores térmicos e eletromagnéticos são chamados de “disjuntores termomagnéticos”.

Não se deve confundir relê com disparador. Muito embora ambos possam funcionar sob o mesmo princípio e realizar funções análogas, o relê é associado eletricamente ao dispositivo de manobra, ao passo que o disparador é integrado mecanicamente ao disjuntor.

A abreviação DTS será usada daqui para adiante neste texto em

substituição do termo disparador térmico de sobrecarga.

### 2.1.2 Proteção

A NB-3 (Instalações Elétricas de Baixa Tensão – Procedimento, também conhecida segundo seu código de registro no Inmetro, NBR 5410) tem por objetivo definir as condições em que as instalações elétricas de baixa tensão devem ser estabelecidas (isto é, projetadas e executadas) e mantidas, a fim de garantir seu funcionamento adequado, a segurança das pessoas e de animais domésticos e a conservação dos bens. A norma fixa nove prescrições fundamentais destinadas a garantir a segurança contra os perigos e danos que possam resultar da utilização das instalações em condições previsíveis. Dentre elas, é de especial interesse para este trabalho a segunda prescrição, que diz respeito à proteção contra sobrecorrentes, e cuja redação é:

“Todo circuito deve ser protegido por dispositivo que interrompa a corrente, quando esta, em pelo menos um dos condutores do circuito, atingir um valor superior ao da capacidade de condução de corrente respectiva, seja por sobrecarga, seja por curto-circuito. A interrupção da corrente deverá ocorrer num tempo suficientemente curto para evitar a deterioração dos condutores.”

Devido à obrigatoriedade da proteção contra sobrecorrentes tem-se a enorme importância dada aos dispositivos de proteção contra sobrecorrentes. A seguir lista-se alguns conceitos relacionados à proteção de circuitos.

“Sobrecorrente” é uma corrente que excede um valor nominal, que, no caso de condutores elétricos, é a capacidade de condução de corrente. Nas instalações elétricas, as sobrecorrentes podem ser de dois tipos:

- ✓ corrente de falta, que é a corrente que flui de um condutor para outro e/ou para a terra, no caso de uma falta e no local desta;
- ✓ corrente de sobrecarga, que é a sobrecorrente num circuito sem que haja falta elétrica.

“Sobrecarga” é a parte da carga existente num circuito ou equipamento

que excede a carga nominal (projetada).

Uma “falta” (elétrica) é o contato ou arco acidental entre partes sob potenciais diferentes, e/ou de uma ou mais dessas partes para a terra, num sistema ou equipamento energizado. As faltas são sempre causadas por falha de isolamento entre as partes, podendo ser a impedância entre elas considerável ou desprezível.

Um “curto-circuito” é uma ligação intencional ou acidental entre dois ou mais pontos de um circuito, através de uma impedância desprezível. Quando o curto-circuito for acidental e os pontos estiverem sob potenciais diferentes, fala-se em falta direta.

A chamada “corrente de curto-circuito”, caso particular de corrente de falta, é a sobrecorrente que resulta de uma falta direta entre condutores vivos que apresentam uma diferença de potencial em funcionamento normal.

A “proteção contra sobrecorrentes” tem como objetivo limitar as conseqüências destrutivas das sobrecorrentes e separar o restante da instalação da parte em que ocorreu o problema. Comporta a detecção de correntes de sobrecarga e de falta (principalmente de curto-circuito) e o seccionamento automático sob carga do circuito protegido.

### **2.1.3 Proteção de Motores**

As cargas constituídas por motores elétricos apresentam características peculiares, que são as seguintes:

- ✓ a corrente absorvida durante a partida é bastante superior à de funcionamento normal em carga;
- ✓ carga elétrica indutiva;
- ✓ a potência absorvida em funcionamento é determinada pela potência mecânica do eixo, solicitada pela carga acionada, o que pode resultar em sobrecarga no circuito de alimentação, desde que não haja proteção adequada.

É importante observar que as prescrições das normas referem-se

exclusivamente à proteção dos condutores, o que não garante, necessariamente, a proteção dos equipamentos ligados aos circuitos /COT92/.

Como a grande maioria dos equipamentos industriais utiliza motores elétricos, e devido às características especiais de suas cargas, recomendações especiais são feitas para a sua proteção:

- ✓ todo motor deve ser protegido contra correntes de sobrecarga por um dispositivo independente ou por um dispositivo integrante do motor;
- ✓ os motores devem ser protegidos por dispositivos que assegurem, também, proteção contra falta de fase.

Em geral, dispositivos destinados à proteção de motores apresentam requisitos distintos dos dispositivos de proteção de condutores.

Para proteção de motores existem dispositivos dependentes da corrente – bimetálicos ou eletrônicos – e dispositivos dependentes da temperatura.

Dispositivos de proteção dependentes da corrente são:

- ✓ disparadores de sobrecarga, integrante de disjuntores; e
- ✓ relês de sobrecarga, como componentes de combinações com fusíveis e contator, bem como com disjuntor e contator.

Dispositivos bimetálicos dependentes da corrente são disparadores e relês térmicos de sobrecarga que operam segundo o princípio de uma lâmina bimetálica que, aquecida pela corrente que flui pelo equipamento protegido, desloca a sua ponta livre de uma distância proporcional a esta corrente.

Dispositivos de proteção, do tipo eletrônico, dependentes da corrente são disparadores e relês de sobrecarga estáticos.

Dispositivos dependentes da temperatura utilizam sensores de temperatura semicondutores (PTC's e NTC's) embutidos nos enrolamentos dos motores.

A escolha da forma de proteção ideal de um motor depende de fatores como a forma da instalação, tipo de falha ou anormalidade prevista no

funcionamento, potência do motor, custo, etc.

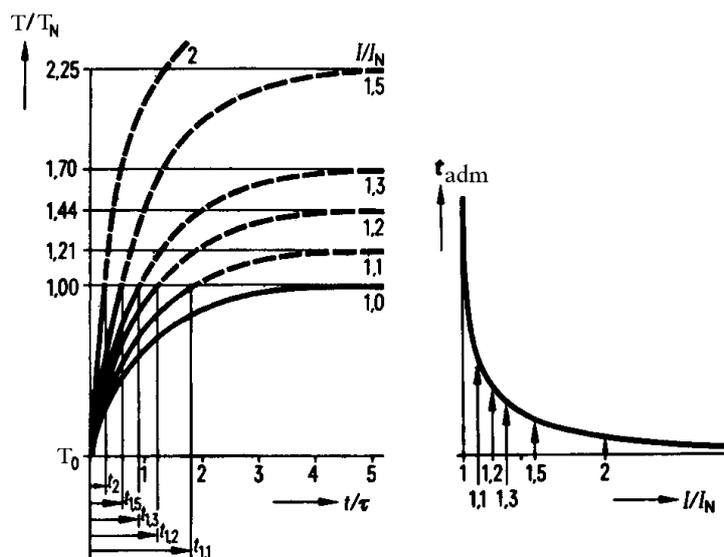
Os relês térmicos bimetálicos são os dispositivos (independentes) mais utilizados na proteção de motores contra corrente de sobrecarga /COT92/.

### 2.1.4 Proteção contra Sobrecarga

A estabilidade dos materiais empregados para isolamento de condutores elétricos depende muito das solicitações térmicas a que estes foram submetidos em funcionamento. Correntes de sobrecarga podem vir a aquecer as bobinas dos motores e os cabos condutores a níveis inadmissíveis, reduzindo a vida útil de sua isolação.

Quanto mais alta a corrente de sobrecarga, mais rapidamente é alcançada a temperatura-limite suportável dos condutores e/ou do equipamento, e tanto menor é o período de carga admissível. Desenhando-se uma linha pelos tempos de carga admissíveis em um diagrama *tempo x corrente*, obtém-se a curva de carga admissível de um equipamento (Figura 2.1).

A função da proteção contra sobrecarga é portanto permitir certa



a) Aquecimento para carga com corrente nominal ( $1,0 I_N$ ) e com diversas sobrecorrentes (1,1 - 1,2 - 1,3 - 1,5 e 2 vezes  $I_N$ )

b) Curva de carga admissível

$T_N$  Temperatura-limite suportável

$T_0$  Temperatura do meio refrigerante

$t_{adm}$  Período de carga admissível

$\tau$  Constante de tempo térmica

**Figura 2.1: carga admissível de um componente para não ultrapassar seu aquecimento admissível /SIE90/**

sobrecarga durante certo tempo do funcionamento do equipamento (como por exemplo, as correntes que ocorrem durante as partidas dos motores de indução), mas interrompê-las a tempo, antes que ultrapassem o período de carga admissível.

### **2.1.5 Grandezas e Características dos Dispositivos de Proteção Contra Sobrecarga**

Para um disparador de sobrecorrente, define-se “corrente de operação” como o valor acima do qual o disparador deve atuar. “Corrente de ajuste” (ou de ajustagem) é o valor da corrente de operação para o qual o disparador é ajustado e são definidas as suas condições de operação. “Faixa de corrente de ajuste” (ou de ajustagem) é a faixa compreendida entre os valores máximo e mínimo da corrente de ajuste.

Para um dispositivo de proteção, define-se “corrente convencional de atuação” como o valor especificado de corrente que provoca a atuação do dispositivo dentro de um tempo especificado (o “tempo convencional”), estando os tempo e valores de corrente definidos pelas normas apropriadas. A “corrente convencional de não atuação” é o valor especificado de corrente que pode ser suportado pelo dispositivo durante um tempo especificado (o “tempo convencional”). O tempo convencional varia de acordo com o tipo e a corrente nominal do dispositivo. Por sua vez, as correntes convencionais de atuação e de não atuação são superiores à corrente nominal ou de ajuste do dispositivo.

A Tabela 2.1 e a Tabela 2.2 apresentam respectivamente os valores das correntes convencionais e dos tempos convencionais dos principais dispositivos de proteção contra sobrecorrentes /COT92/. As definições acima estão de acordo com as normas NBR 5459, NBR 5361 e IEC-157-I.

**Tabela 2.1: correntes convencionais de não atuação e de atuação para os principais dispositivos de proteção contra sobrecorrentes de baixa tensão**

Dispositivo	Corrente nominal $I_n$ (A)	Corrente convencional de não atuação $I_{na}$ (A)	Corrente convencional de atuação $I_a$ (A)	Norma
Fusíveis	$I_n \leq 4$	$1,5 I_n$	$2,1 I_n$	IEC 269 (1973)
	$4 < I_n \leq 10$	$1,5 I_n$	$1,9 I_n$	
	$10 < I_n \leq 25$	$1,4 I_n$	$1,75 I_n$	
	$25 < I_n \leq 100$	$1,3 I_n$	$1,6 I_n$	
	$100 < I_n \leq 1000$	$1,2 I_n$	$1,6 I_n$	
Fusíveis gII	Todas	$1,2 I_n$	$1,6 I_n$	IEC 269 (1973)
Fusíveis gG	Todas	$1,25 I_n$	$1,6 I_n$	IEC 269 (1986)
Disjuntores em caixa moldada tipo L	$I_n \leq 10$	$1,5 I_n$	$1,9 I_n$	VDE 0641 / 6.78 CEE Publ. 19
	$10 < I_n \leq 25$	$1,4 I_n$	$1,75 I_n$	
	$I_n > 25$	$1,3 I_n$	$1,6 I_n$	
Disjuntores em caixa moldada tipo G	Todas	$1,05 I_n$	$1,35 I_n$	CEE Publ. 19
Disjuntores em geral	$I_n \leq 63$	$1,05 I_n$	$1,35 I_n$	IEC 157-I NBR 5361
	$I_n > 63$	$1,05 I_n$	$1,25 I_n$	
Relês de sobrecarga	Todas	$1,05 I_n$	$1,2 I_n$	VDE 0660 IEC 947

**Tabela 2.2: tempos convencionais para os principais dispositivos de proteção contra sobrecorrentes de baixa tensão**

Dispositivo	Corrente nominal $I_n$ (A)	Tempo convencional (h)
Fusíveis gl, gII e gG	$I_n \leq 63$	1
	$63 < I_n \leq 160$	2
	$160 < I_n \leq 400$	3
	$400 < I_n \leq 1000$	4
Disjuntores	$I_n \leq 63$	1
	$I_n > 63$	2
Relês de sobrecarga	Todas	2

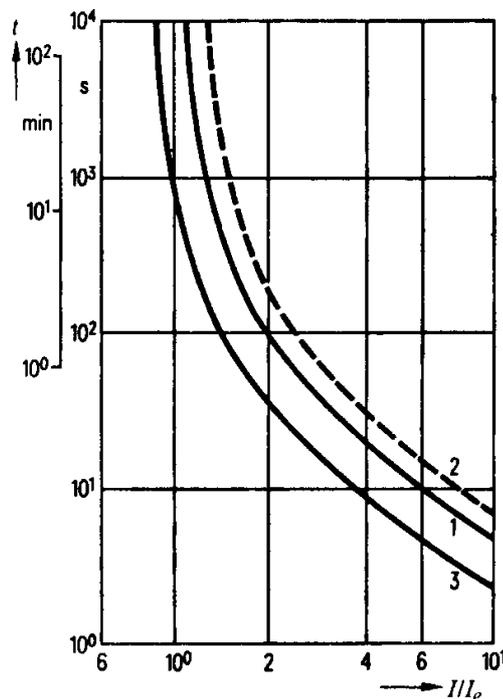
## 2.1.6 Características de Disjuntores e Relês de Sobrecarga para Proteção de Motores

A seguir discute-se as principais características de disjuntores e relês de sobrecarga.

### 2.1.6.1 Curva Característica

A relação tempo-corrente de desarme de disparadores e relês térmicos de sobrecarga é conhecida como curva característica. É geralmente apresentada num gráfico em escala logarítmica, onde no eixo horizontal (abscissas) encontram-se os valores múltiplos da corrente de ajuste ( $I / I_e$ ) e no eixo vertical (ordenadas), o tempo de desarme ( $t_p$ ), como mostra o exemplo da Figura 2.2. Sua forma é muito semelhante a uma curva de carga admissível (Figura 2.1). Realmente, a curva característica de relês e disparadores de sobrecarga tenta espelhar uma curva de carga admissível, e a partir desta imagem criada, determinar elevações de temperatura acima do admissível.

As formas da curva característica de diferentes disparadores podem ser diferentes, mas todas devem restringir sua forma em alguns pontos que possuem prescrições de norma, como por



- 1 Carga tripolar equilibrada
  - 2 Carga bipolar, relê sem proteção contra falta de fase
  - 3 Carga bipolar, relê com proteção contra falta de fase
- $I_e$  Corrente de ajuste do relê de sobrecarga

**Figura 2.2: exemplo de curva característica de desarme de um disparador térmico de sobrecarga /WAC90/**

exemplo as correntes convencionais de atuação e não atuação para o tempo convencional. As normas VDE 0660 e IEC 947-4-1, além do tempo convencional e das correntes convencionais de atuação e de não atuação, prescrevem também outros valores de correntes de operação para tempos diferentes do tempo convencional. Prescrevem também valores distintos de atuação quando o dispositivo opera em condições de falta de fase, quando opera no estado quente, e no caso de o dispositivo possuir compensação de variação da temperatura ambiente.

### 2.1.6.2 Ajuste da Corrente de Operação

Disparadores e relês de sobrecarga são dotados de um botão rotativo ou de um cursor, com os quais o valor da corrente de ajuste  $I_e$ , pode ser continuamente ajustado dentro da faixa de ajuste do dispositivo. Um mesmo modelo de relê é encontrado com diferentes faixas de ajuste de corrente. As faixas de ajuste devem ser consultadas nos catálogos técnicos.

Ajusta-se um valor  $I_e$ , geralmente igual à corrente nominal do sistema protegido; em casos nos quais a partida do motor permitir, ajusta-se um valor mais baixo, equivalente à corrente de serviço do sistema. Já a NBR 5410 admite limites de ajuste mais altos, a saber:

- ✓ 25 % acima da corrente nominal do motor, para motores com fator de serviço  $\geq 1,15$  ou com elevação de temperatura  $\leq 40$  °C;
- ✓ 15 % acima da corrente nominal do motor, para os demais tipos de motor.

Os ajustes deverão ser iguais ou inferiores aos valores assim obtidos.

### 2.1.6.3 Proteção Contra Falta de Fase

No caso de falta de uma fase do circuito, os motores podem ficar sobrecarregados, sendo necessário desligá-los. Isto pode ser realizado por disparadores e relês de sobrecarga que também possuam a capacidade de proteger motores contra a falta de fase. Na condição de falta de fase, estes dispositivos reduzem a corrente mínima de operação a menos de 1,05 vez do valor ajustado  $I_e$ .

#### 2.1.6.4 Compensação de Variação da Temperatura Ambiente

A potência útil do motor refere-se a uma temperatura do meio refrigerante de +40 °C. Se esta temperatura variar, altera-se de igual forma a potência útil admissível.

A corrente mínima de operação e a curva característica dependem igualmente da temperatura ambiente. Ambas são determinadas para a temperatura de +20 °C. Em temperaturas ambientes variáveis, uma proteção confiável contra sobrecarga só estaria assegurada se o motor e o dispositivo de proteção não apenas se encontrassem sob a mesma temperatura ambiente, mas também se o aquecimento limite referido à curva característica fosse igual ao aquecimento do motor. Ambos os requisitos, em geral, não são satisfeitos. Portanto, em temperaturas variáveis, deveriam ser considerados, continuamente, fatores de correção para a corrente de ajuste  $I_e$  do dispositivo de proteção /SIE90/.

Disparadores e relês de sobrecarga podem apresentar a capacidade de compensar variações na temperatura ambiente, sendo que nestes casos, correções da corrente de ajuste podem ser dispensadas. Em disparadores e relês térmicos bimetálicos esta compensação é, em geral, realizada por meio de um elemento bimetálico adicional.

#### 2.1.6.5 Desempenho no Estado Quente

Um motor, aquecido pelo funcionamento normal, pode receber menor quantidade de calor, antes que a temperatura de seus enrolamentos atinja a temperatura limite, do que quando parte do estado frio. Esse fato é levado em conta no desempenho da curva característica. Quando o dispositivo de proteção é carregado com corrente de ajuste  $I_e$  por longo tempo, a curva característica desloca-se para baixo. Os tempos de operação se reduzem a cerca de 1/4 (valor orientativo) dos tempos no estado frio /SIE90/.

## 2.2 Normas

Várias normas tratam de DTS's, definindo características, requisitos e restrições destes disparadores. Dentre estas diversas normas, algumas se aplicam a países específicos e outras estão relacionadas ao tipo do equipamento protegido. Portanto, para cada instalação que necessite de proteção, deve-se utilizar dispositivos de proteção que se baseiem na norma mais adequada ao caso em questão.

Para o caso de um disjuntor para proteção de motores (conhecido no mercado como disjuntor-motor), classe de dispositivos de proteção abordada neste trabalho, suas características baseiam-se nas atribuições da norma IEC 947-4-1. Ela aplica-se a disparadores de sobrecarga térmicos, magnéticos de tempo retardado, e de estado sólido, com ou sem sensibilidade à falta de fase, e com ou sem compensação de variações da temperatura ambiente.

**Tabela 2.3: tempos de disparo,  $t_p$ , definidos pela norma IEC 947-4-1**

Classe de disparo	Múltiplos da corrente ajustada, $I_e$					
	Com as três fases balanceadas				Com desbalanceamento em uma fase	
	$1,05 \times I_e$	$1,2 \times I_e$	$1,5 \times I_e$	$7,2 \times I_e$	2 fases: 1,00 3ª fase: 0,9	2 fases: 1,15 3ª fase: 0
10A	$t_p \geq 2$ hrs	$t_p < 2$ hrs	$t_p < 2$ min	$2 < t_p \leq 10$ s	$t_p \geq 2$ hrs	$t_p < 2$ hrs
10	$t_p \geq 2$ hrs	$t_p < 2$ hrs	$t_p < 4$ min	$4 < t_p \leq 10$ s	$t_p \geq 2$ hrs	$t_p < 2$ hrs
20	$t_p \geq 2$ hrs	$t_p < 2$ hrs	$t_p < 8$ min	$6 < t_p \leq 20$ s	$t_p \geq 2$ hrs	$t_p < 2$ hrs
30	$t_p \geq 2$ hrs	$t_p < 2$ hrs	$t_p < 12$ min	$9 < t_p \leq 30$ s	$t_p \geq 2$ hrs	$t_p < 2$ hrs
A partir do estado <sup>1</sup>	Frio	Quente	Quente	Frio	Frio	Quente
Corrente inicial <sup>1</sup>	$0 \times I_e$	$1,05 \times I_e$	$1 \times I_e$	$0 \times I_e$	$0 \times I_e$	2 fases: 1,00 3ª fase: 0,9

<sup>1</sup> A linha da tabela onde se lê "A partir do estado" indica o estado no qual o disparador se encontrava antes de ele ser energizado com as correntes indicadas no alto das colunas. Assim, "frio" significa que este se encontrava a temperatura ambiente (e nenhuma corrente elétrica passava por ele), e "quente", que por ele passava a corrente indicada na linha "Corrente inicial". Em ambos os casos, deve-se considerar que o disparador encontrava-se em regime térmico permanente.

Em relação a disjuntores de sobrecarga, a norma IEC 947-4-1 define quatro classes de disparo, 10A, 10, 20 e 30; e limita o tempo de desarme dos disjuntores,  $t_p$ , em faixas de valores permitidos, para diversos valores de sobrecorrente e para cada classe de disparo. A Tabela 2.3 resume estes valores, para disjuntores com compensação de variações da temperatura ambiente e sensibilidade à falta de fase.

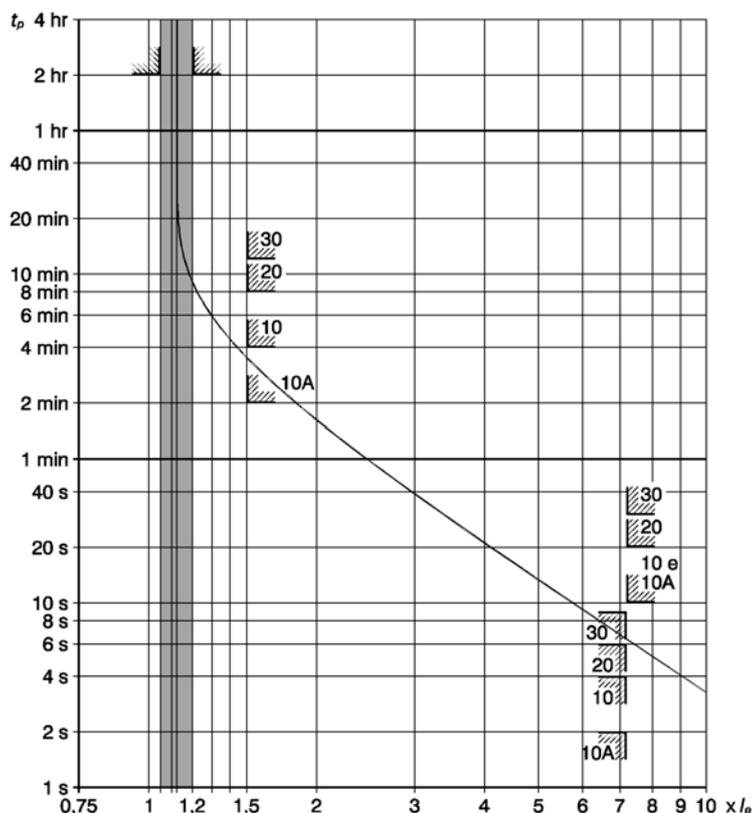
Em disjuntores com ajuste de corrente, os valores da tabela devem ser obedecidos para a menor e para a maior corrente da faixa de ajuste.

De constatações práticas, sabe-se que os DTS's atingem a situação de regime térmico permanente em menos de 2 horas; e portanto as restrições  $t_p \geq 2$  hrs para  $1,05 \times I_e$ , e  $t_p < 2$  hrs para  $1,2 \times I_e$ , em todas as classes de disparo, indicam que o menor valor de corrente que provoque o desarme do disjuntor deve estar situado entre  $1,05 \times I_e$  (corrente convencional de não-atuação) e  $1,2 \times I_e$  (corrente convencional de atuação).

Pela análise da tabela, pode-se dizer que a norma impõe restrições à forma da curva característica dos disjuntores. Estas restrições podem ser colocadas em um gráfico *tempo de desarme x sobrecorrente*, como apresentado na Figura 2.3.

Vale lembrar que as restrições para  $1,5 \times I_e$  referem-se a uma condição a partir do estado quente.

As curvas características podem tomar



**Figura 2.3: restrições à forma da curva característica de disjuntores impostas pela norma IEC 947-4-1, por classe de disparo**

qualquer forma, desde que não ultrapassem os limites impostos pelas restrições. Na figura, a curva mostrada é um exemplo de curva característica, para a classe de disparo 10, que atende a norma.

## 2.3 Termobimetais

O termobimetal, ou simplesmente bimetal, é composto de, no mínimo, dois componentes, dispostos em camadas, ligados inseparavelmente um ou outro, e cujos coeficientes de expansão térmica de seus materiais constituintes são distintos. Como durante o aquecimento um componente se expande mais do que o outro, o termobimetal curva-se com o aquecimento, em maior grau quanto maior for a diferença da expansão térmica entre os componentes.

O encurvamento dos termobimetais em função da temperatura e, dependendo da forma de aplicação, também do tempo, permite a sua aplicação, sob a forma de elemento de medição e regulagem, especialmente em dispositivos simples de fácil fabricação, nas áreas da eletrotécnica, na engenharia térmica, na fabricação automotiva, na técnica de medição, etc.

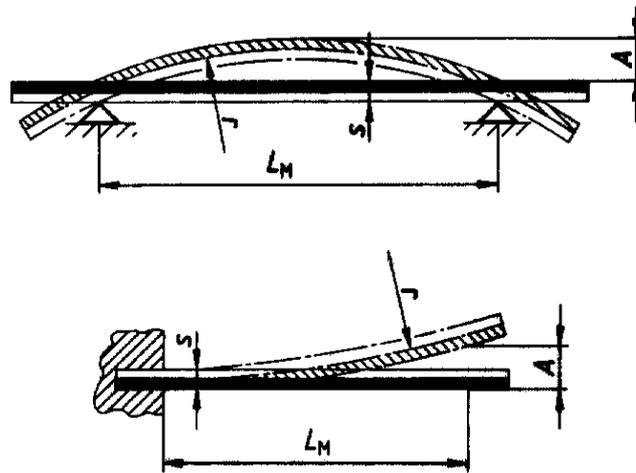
Para se obter características especiais, como por exemplo uma determinada resistência elétrica ou uma maior resistência à corrosão, utilizam-se freqüentemente lâminas bimetálicas compostas de mais de dois componentes.

### 2.3.1 Propriedades

A curvatura  $1/r$  de uma lâmina bimetálica é o valor inverso de seu raio de curvatura  $r$ . A curvatura, à temperatura  $T_2$ , de um bimetal de espessura  $s$  que à temperatura  $T_1$  não se apresenta curvado, é calculada por:

$$\frac{1}{r} = \frac{k}{s} \cdot (T_2 - T_1)$$

A curvatura específica  $k$  é um coeficiente de material que depende sobretudo da diferença dos coeficientes de dilatação de ambos os componentes. É dado em termos de  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ .



**Figura 2.4: aplicação de termobimetals /RAU89/**

A curvatura específica de um termobimetal é determinada, na prática, medindo-se o deslocamento  $A$  provocado por uma diferença de temperatura  $T_2 - T_1$  num termobimetal de espessura  $s$  apoiado em dois pontos espaçados de uma distância  $L$ , conforme o desenho superior da Figura 3, segundo a fórmula:

$$k = \frac{8 \cdot A \cdot s}{L^2 + 4 \cdot A^2 + 4 \cdot A \cdot s} \cdot \frac{1}{T_2 - T_1}$$

Na prática, a forma de aplicação mais freqüente de termobimetals é com uma ponta da tira engastada. Neste caso, a propriedade mais corretamente utilizável é a flexão térmica específica,  $a$ , calculada a partir do deslocamento  $A$  produzido no bimetal de espessura  $s$ , medido à uma distância  $L$  desde o ponto de engaste, conforme o desenho inferior da Figura 3, segundo a fórmula:

$$a = \frac{A \cdot s}{(L^2 + A^2 + A \cdot s)} \cdot \frac{1}{T_2 - T_1}$$

O termo de correção  $A \cdot s$  no denominador é pequeno em relação aos termos quadráticos; desprezá-lo significa um erro inferior a 0,5 %. Se  $A \leq 0,1 L$ ,

então **a** pode ser calculado simplificadaamente, com suficiente precisão, pela fórmula:

$$\mathbf{a} = \frac{A \cdot s}{(T_2 - T_1) \cdot L^2}$$

Daí resulta para a flexão de uma tira reta de termobimetal engastada de um lado, a equação simples:

$$A = \frac{L^2 \cdot (T_2 - T_1)}{s} \cdot \mathbf{a} \tag{2.1}$$



### 3. O DISPARADOR TÉRMICO DE SOBRECARGA

A função de proteção contra sobrecarga de disjuntores é realizada por um componente destes dispositivos, chamado disparador de sobrecarga. Nesta parte do trabalho, apresenta-se uma análise funcional de disparadores de sobrecarga, mantendo o enfoque principalmente sobre seu princípio de funcionamento.

A diferença entre relê e disparador de sobrecarga situa-se unicamente na natureza do sinal resultante do desarme. Segundo a norma VDE 0660, entende-se como disparador um componente que é parte integrante de dispositivos de chaveamento, o qual é acionado através de variações de grandezas físicas, principalmente elétricas, e desarmam as chaves mecanicamente. Relês são chaves de comando, as quais são acionadas através de variações de grandezas físicas e comandam eletricamente outros equipamentos e dispositivos /KAŠ60/.

Disparadores térmicos utilizam quase sem exceção como princípio de funcionamento o efeito da deflexão de termobimetais devido ao aumento de sua temperatura. O campo de maior utilização de disparadores bimetalicos é o de proteção de motores contra sobrecarga /BUR90/.

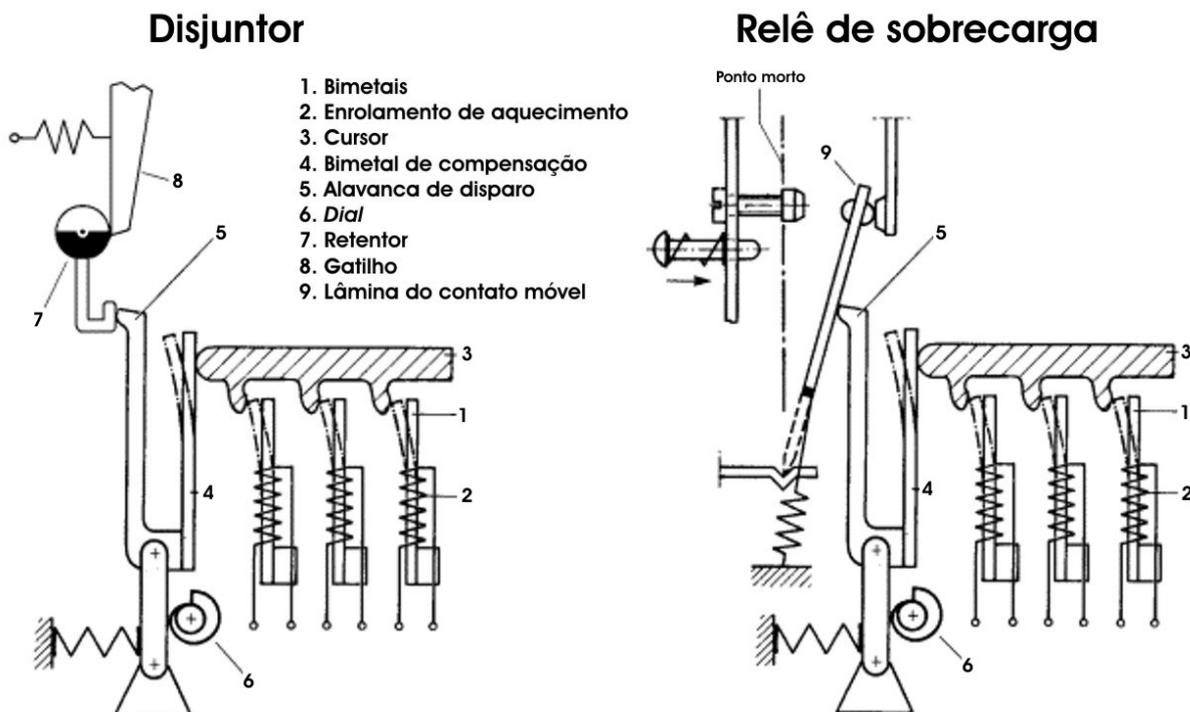
Alguns fatores tornam os bimetais especialmente adequados para a utilização para fins de proteção de circuitos e equipamentos elétricos /KAŠ60/:

- ✓ a intrínseca e precisa proporcionalidade entre deflexão e temperatura;
- ✓ a possibilidade de usar a mesma corrente elétrica que alimenta o equipamento a ser protegido para o aquecimento do bimetal;
- ✓ sua forma construtiva simples;
- ✓ sua massa térmica própria, propriedade que pode ser usada para provocar um retardo do aquecimento e, por conseguinte, da deflexão do bimetal.

Devido a estes fatores, disparadores bimetalicos têm a capacidade de espelhar o aquecimento interno produzido por uma sobrecarga nas instalações a serem protegidas, e assim prever uma eventual situação de risco para o equipamento /KAŠ60/.

### 3.1 Princípio de Funcionamento

A Figura 3.1 mostra um disparador térmico de sobrecarga, DTS, de um disjuntor, e um relê de sobrecarga, onde pode-se visualizar melhor seu princípio de funcionamento e a diferença entre os dois dispositivos.

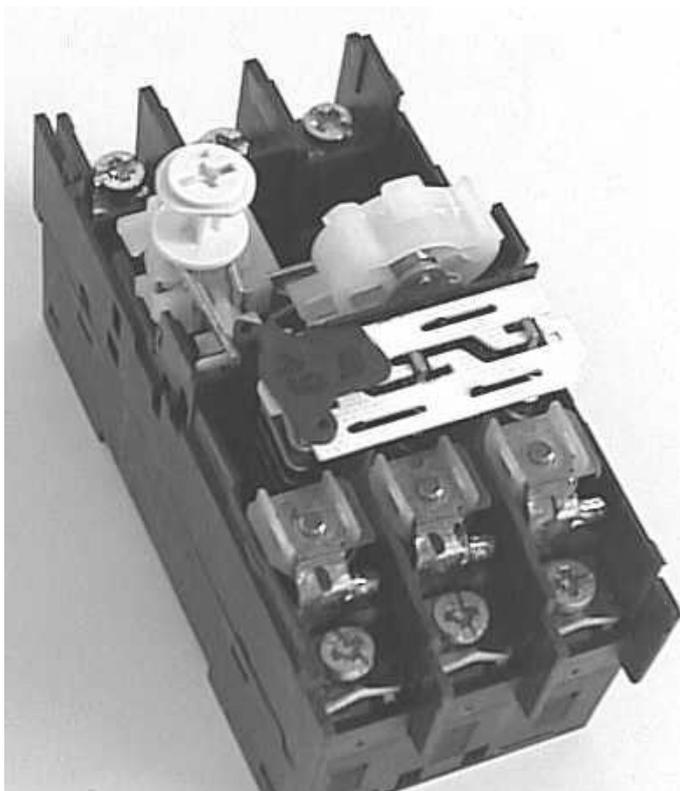


**Figura 3.1: disparador e relê de sobrecarga. Modificado de /SIE90/**

Disjuntores e relês de sobrecarga possuem um conjunto de bimetal - enrolamento de aquecimento para cada pólo (fase) do dispositivo. As correntes de cada fase do circuito principal, que alimentam o equipamento a ser protegido, passam pelos enrolamentos de aquecimento (2) dos bimetálicos (1). Estes se aquecem e se defletem, causando o deslocamento do cursor (3). Este deslocamento provoca a rotação da alavanca de disparo (5). O bimetal (4) atua na compensação de temperatura ambiente. No caso dos disjuntores, o desarme ocorre quando o aquecimento dos bimetálicos leva a alavanca (5) a atingir o detentor (7), o qual se rotaciona e libera o gatilho (8), que por sua vez aciona o restante do mecanismo (não mostrado). Nos relês de sobrecarga, o desarme ocorre quando a alavanca de

disparo empurra a lâmina do contato móvel (9) além de seu ponto morto. Por meio do giro do botão (6), representado por um elemento tipo came, faz-se a regulagem da corrente de ajuste  $I_e$ , em ambos os casos.

Como o aquecimento dos bimetálicos não é imediato e a rapidez do aumento de sua temperatura é tanto maior quanto maior for o valor da corrente que aquece os bimetálicos, o desarme ocorre tanto mais cedo quanto maior for o nível de sobrecorrente, que é a característica desejada para proteção contra sobrecarga.



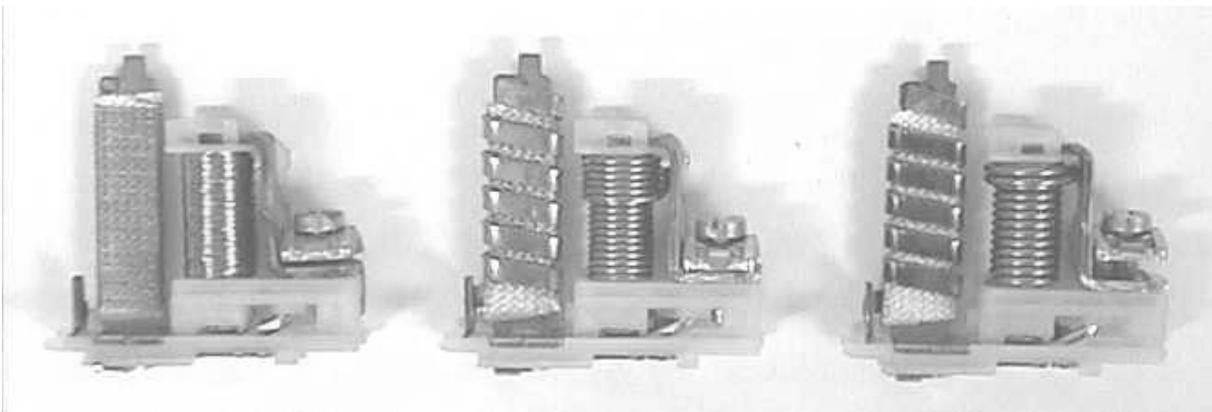
**Figura 3.2: disposição física dos componentes do DTS**

Observando a figura, nota-se que existe uma posição determinada até a qual o cursor deve se deslocar para provocar o disparo. Esta posição do cursor pode ser chamada de “ponto de disparo”.

A Figura 3.1 é apenas uma representação gráfica simplificada. Evidentemente, a disposição física de DTS's reais pode ser muito diferente. Ao lado, a Figura 3.2 mostra como os vários componentes que fazem parte de DTS de um disjuntor estão dispostos espacialmente. Trata-se de um disjuntor trifásico (ou tripolar), e na figura pode-se observar os três conjuntos bimetálicos lado a lado, sob os cursores (de cor branca) do sistema de proteção contra falta de fase.

Os bimetálicos são os principais componentes de DTS's. Em geral, têm a forma de tiras e apresentam-se engastados em uma ponta, deixando-se livre a outra, a qual se desloca proporcionalmente à temperatura do bimetálico. É o deslocamento da ponta livre que proporciona o movimento necessário para provocar o disparo.

Os bimetais, em geral, são aquecidos indiretamente através de um enrolamento de aquecimento. A corrente elétrica flui através destes, estes se aquecem e, por sua vez, aquecem os bimetais. Entre o enrolamento de aquecimento e o bimetal, existe um material isolante, que proporciona certa resistência térmica. Os enrolamentos de aquecimento empregados apresentam diferentes formas para disparadores de diferentes faixas de ajuste de corrente, como mostrado na Figura 3.3 (os bimetais de cada uma das três fases de um mesmo disjuntor trifásico são, naturalmente, iguais). Nesta figura, além do conjunto bimetal - enrolamento de aquecimento (a esquerda, em cada um dos três componentes), pode-se observar também o conjunto do disparador eletromagnético para proteção contra curto-circuito (centro) e o terminal da carga (direita).



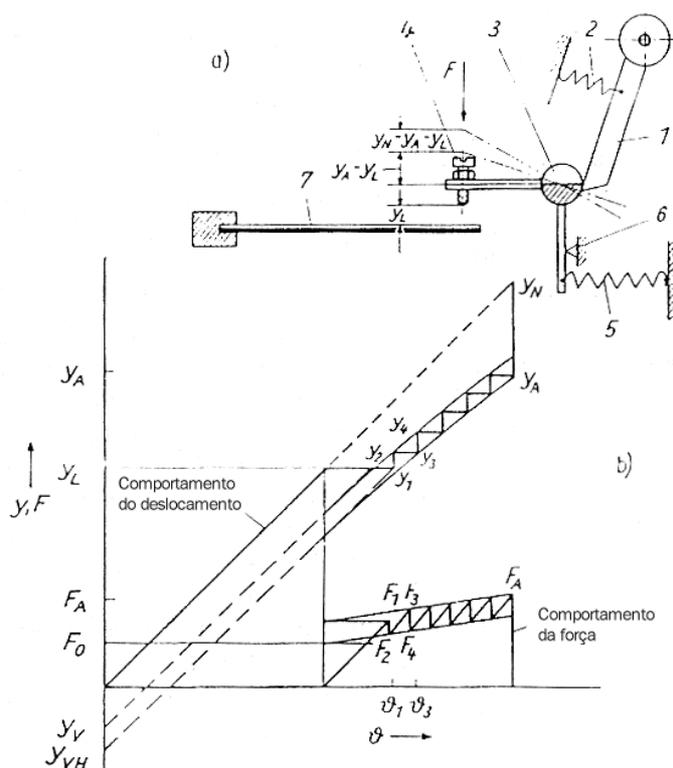
**Figura 3.3: o conjunto bimetal - enrolamento de aquecimento de disparadores de três faixas de correntes diferentes**

O conceito de ponto de disparo pode sugerir que o desarme ocorra apenas devido ao deslocamento dos bimetais. Na realidade, o disparo ocorre devido à força que os bimetais aplicam contra o elemento responsável pela liberação do mecanismo. Isto significa que, quando se verifica a posição do ponto de disparo, deve ser levado em conta que é necessário não só um determinado deslocamento dos bimetais para que o desarme ocorra, mas também que estes produzam uma força suficiente para provocar o disparo.

A análise do deslocamento necessário para o bimetal provocar o disparo pode ficar ainda mais complicada se forem consideradas as forças que surgem devido ao atrito entre os componentes e o efeito *stick-slip* proveniente do conjunto

destas forças com as das molas, conforme mostrado na Figura 3.4.

Se o atrito entre os componentes puder ser desprezado, e se a força necessária para provocar o disparo for sempre a mesma - independentemente da posição, temperatura ou tempo em que ocorre o disparo - e de pequeno valor quando se compara o deslocamento que esta provoca em relação ao deslocamento total, a análise segundo a Figura 3.4 torna-se de menor importância.



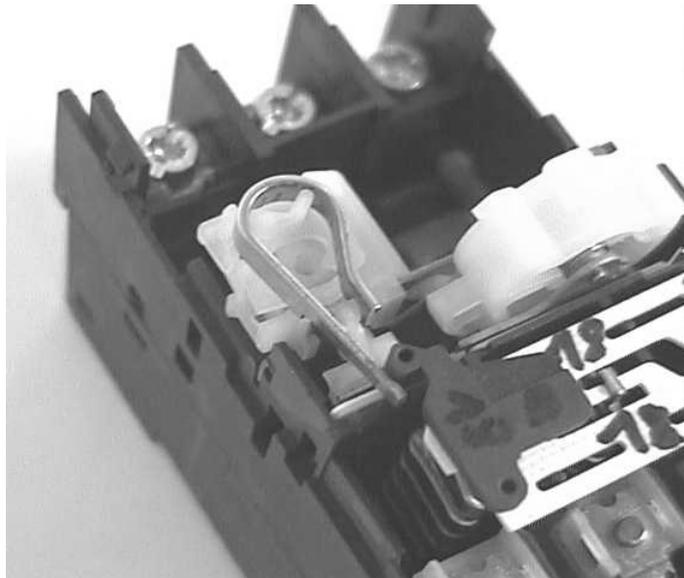
**Figura 3.4: exemplo de análise de forças envolvidas em disparadores /KAŠ60/**

## 3.2 Sistema de Compensação de Temperatura Ambiente

Não só o aquecimento provocado pela corrente elétrica tem influência sobre a deflexão dos bimetais, mas também a própria temperatura ambiente. A influência das variações da temperatura ambiente é em geral indesejável, pois acarreta uma variação no tempo de disparo.

A compensação de temperatura se faz, em geral, com um elemento bimetalico adicional, chamado bimetalo de compensação, o qual não possui enrolamentos de aquecimento como os bimetais de operação, e se situa entre estes últimos e o elemento que transfere o movimento destes ao componente que realiza diretamente o disparo. No exemplo da Figura 3.1, o bimetalo de compensação se encontra entre o cursor e a alavanca de disparo. Quando um aumento da

temperatura ambiente diminui a distância entre o cursor (3) e a alavanca (5) pela deflexão dos bimetálicos de operação, o bimetálico de compensação deflete-se de igual maneira na mesma direção, compensando assim a variação na distância de disparo provocada pela alteração da temperatura ambiente /BUR90/.



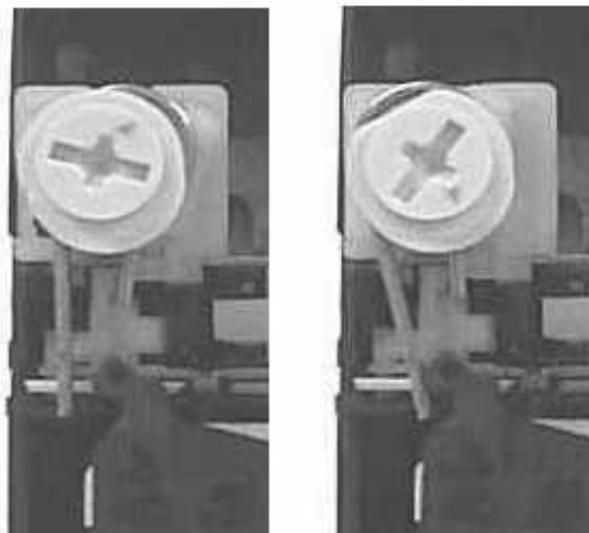
**Figura 3.5: bimetálico de compensação de temperatura ambiente**

Em geral o bimetálico de compensação de temperatura ambiente não é retilíneo, mas tem a forma de um “U”, conforme pode ser visto na Figura 3.5.

### 3.3 Sistema de Regulagem da Corrente de Ajuste

Um sistema de regulagem para a corrente de ajuste em DTS's pode ser realizada de diversos modos /KAŠ60/:

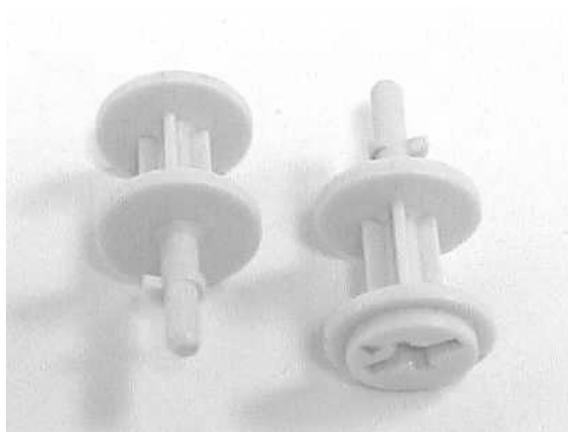
- ✓ pela alteração da distância de disparo;
- ✓ pela ligação em paralelo sobre o bimetálico de uma resistência elétrica variável, através da qual uma parte da corrente elétrica é desviada e não atravessa o bimetálico;
- ✓ pela mudança da relação de



**Figura 3.6: alteração do ponto de disparo**

transformação em disparadores onde os enrolamentos de aquecimento dos bimetálicos estão ligados ao circuito elétrico principal através de transformadores;

- ✓ por uma pré-tensão mecânica ajustável nos bimetálicos, usando molas, por exemplo.



**Figura 3.7: detalhe do *dial* de ajuste**

O modo de regulação representado na Figura 3.1 é o da variação da distância de disparo, sendo o princípio de regulação da corrente de ajuste mais usado na prática.

Na Figura 3.1, o giro do botão (6) faz alterar a distância do ponto onde o cursor toca o bimetálico de compensação de temperatura até o ponto onde a alavanca de disparo toca no detentor (7). A alteração desta distância altera também a distância que o cursor - e por conseqüência os bimetálicos - deve percorrer até que o disparo ocorra, ou seja, o giro do botão (6) altera o ponto de disparo. A Figura 3.6 mostra a alteração ocorrida na posição de disparo com o giro do *dial*.

Em geral utiliza-se, como no exemplo da Figura 3.1, um componente com um perfil tipo came para o elemento que produz a variação do ponto de disparo. A Figura 3.7 mostra o detalhe do came do *dial* de um disjuntor.

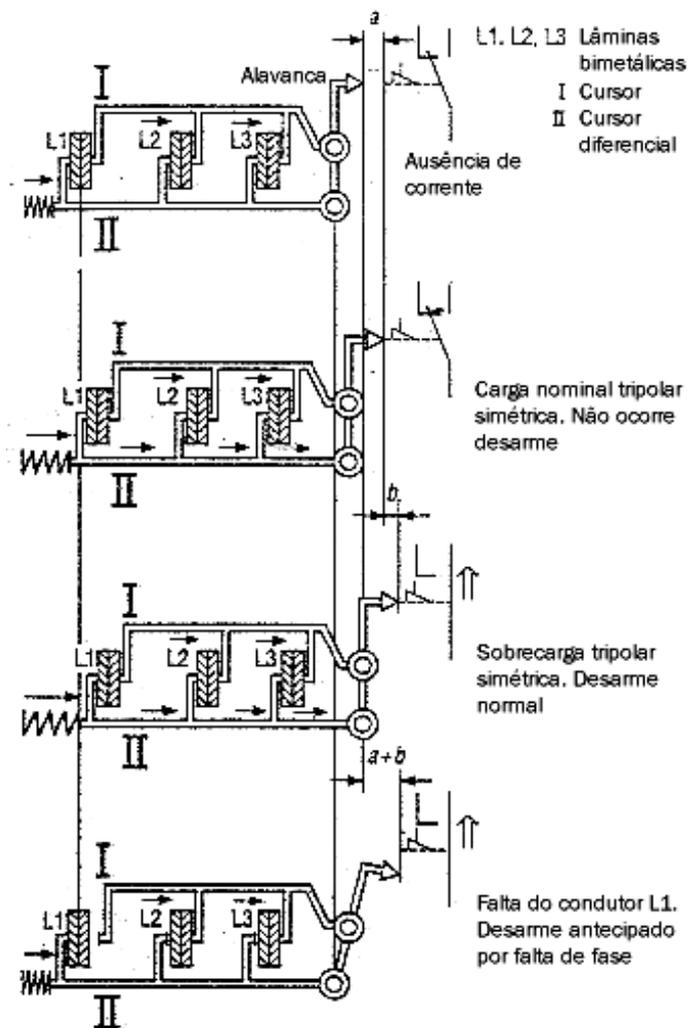
### **3.4 Sistema de Sensibilidade à Falta de Fase**

A Figura 3.1 mostra apenas um cursor responsável por transferir o movimento dos bimetálicos à alavanca de disparo. DTS's com sensibilidade à falta de fase utilizam em geral um sistema de dois cursores em conjunto com uma alavanca diferencial, conforme mostra a Figura 3.8 (onde os bimetálicos estão vistos de topo). O funcionamento do sistema está explicado a seguir.

No estado frio, os bimetálicos de um DTS encontram-se não defletidos, conforme se observa no primeiro desenho da figura.

Em condições de carga tripolar simétrica (correntes de igual valor nas três fases, segunda ilustração da figura) de valor igual à corrente ajustada,  $I_e$ , os três bimetálicos defletem-se igualmente de um afastamento  $a$ . Os dois cursores se movimentam ao mesmo tempo da mesma distância  $a$ , de maneira que a alavanca se mantém sem inclinação. Não ocorre o desarme.

Em condição de sobrecarga tripolar simétrica (terceira ilustração), acima da corrente ajustada, os bimetálicos deslocam-se de uma distância  $b$  além do deslocamento  $a$  resultante da

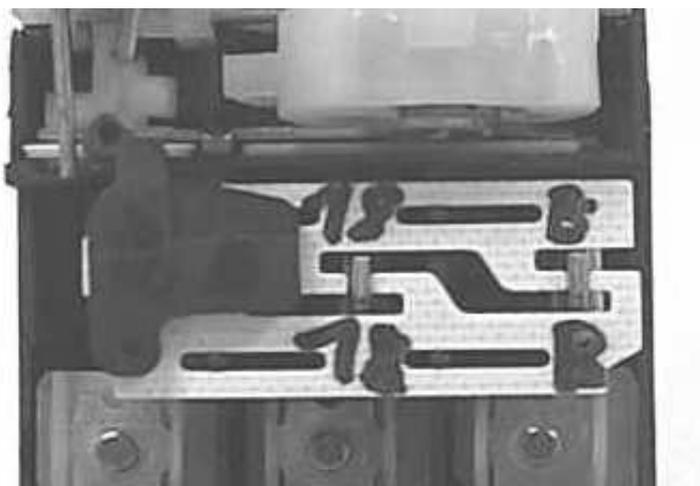


deslocamento  $a$  resultante da condição  $I_b = I_e$ . A alavanca se mantém sem inclinação devido à existência de carga equilibrada nas três fases. O disparo acontece, devido à sobrecarga.

Supondo agora que o disparador originalmente se encontrasse em condição de regime permanente em carga tripolar simétrica e nominal ( $I_b = I_e$ ), e a linha L1, por exemplo, sofresse falta de fase, não passaria mais corrente pelo bimetálico correspondente. Este bimetálico se esfria e se desloca na direção da posição de equilíbrio em que este se encontra em sua condição fria (sem corrente). Tal movimento leva o cursor inferior, e com ele o ponto de articulação inferior da alavanca, também à

**Figura 3.8: funcionamento do sistema de sensibilidade à falta de fase. Modificado de**

posição de equilíbrio para o estado frio. Os bimetálicos L2 e L3 mantêm o cursor superior na mesma posição, de carga nominal, e a alavanca se rotaciona sobre o ponto de articulação superior. A ponta da alavanca se desloca na direção de disparo com seu movimento amplificado pela relação das distâncias entre os pontos de articulação e a ponta da alavanca, como se



**Figura 3.9: sistema de sensibilidade à falta de fase dos disjuntores Siemens**

observa no último desenho da Figura 3.8. O desarme ocorre quando a ponta da alavanca ultrapassa a distância de disparo  $a + b$  /SIE91/.

A Figura 3.9 mostra o sistema de cursores de um disjuntor. A mola que impulsiona o cursor II na Figura 3.8 está ausente no disjuntor (não é necessária na prática).

### **3.5 Correção dos Efeitos de Variações Dimensionais de Fabricação nos Tempos de Desarme**

Os componentes utilizados em DTS's também apresentam tolerâncias de fabricação em suas dimensões. Estas tolerâncias, ou variações dimensionais, provocam alteração no desempenho do produto. Se o desempenho do produto ficar aquém do esperado, medidas corretivas devem ser realizadas, tanto no processo de produção quanto no produto em si.

No caso de DTS's, mesmo que a fabricação dos componentes seja feita dentro de uma estreita faixa de tolerância, estas ainda provocam grande alteração

no desempenho do produto, e a correção destas alterações deve ser realizada individualmente em cada produto produzido.

Na indústria, o processo de correção do erro produzido nos DTS's pelas variações dimensionais de fabricação é conhecido, não muito corretamente, pelo termo "calibração". Neste trabalho, para designar o processo, utilizou-se o termo "correção"<sup>1</sup> simplesmente.

A alteração do desempenho de disparadores reflete-se na alteração da curva característica, que passa a se situar fora da posição desejada. Qualquer método que traga a curva característica novamente para a posição correta pode ser empregado.

Em geral, utiliza-se na indústria uma variante do método de correção que está descrito no pedido de patente DE 196 19 295 A 1, /DPA97/. Estão apresentados abaixo, resumidamente, os passos para se efetuar a correção, segundo a patente citada:

1. as marcações de corrente de ajuste se encontram impressas sobre a tampa de cobertura do disjuntor/relê, mas a seta que indica o valor de corrente ajustado ainda não está impressa sobre o *dial*;
2. dispositivo deve encontrar-se em regime térmico permanente, estabilizado à temperatura ambiente;
3. posiciona-se o *dial* na posição de maior afastamento entre os bimetálicos e o ponto de disparo;
4. faz-se circular no disjuntor ou relê uma corrente elétrica de valor  $I_{teste}$ , a qual depende da faixa de ajuste de corrente do disparador;
5. após um tempo  $t_{correção}$  o *dial* é girado rapidamente até provocar o disparo, quando o movimento é imediatamente encerrado;
6. faz-se a impressão, no *dial*, da seta de indicação do valor de corrente na posição que indique a corrente  $I_{marcação}$ .

---

<sup>1</sup> A literatura alemã utiliza, neste sentido, o termo "Justierung", que se traduz por "ajuste". Este termo não é empregado aqui para não haver confusão com o ato de ajustar o disparador para o valor correspondente ao nível da corrente de serviço do equipamento protegido.

Os valores  $I_{teste}$ ,  $t_{correção}$  e  $I_{marcação}$  estão assim relacionados: a corrente  $I_{teste}$  é um valor de sobrecorrente de  $I_{marcação}$ , ou seja:  $I_{teste} = p_{correção} \cdot I_{marcação}$ . O ponto definido por  $(p_{correção}, t_{correção})$  do gráfico de *tempo de desarme x sobrecorrente* é um ponto da curva característica do DTS. O giro do *dial* até o disparo após o tempo  $t_{correção}$ , faz trazer a curva característica do disparador em teste para o ponto  $(p_{correção}, t_{correção})$ .



## 4. DISCUSSÃO DOS PROBLEMAS ENVOLVIDOS NO PROJETO DE DISPARADORES

O princípio de funcionamento relativamente simples dos DTS's não deve ocultar o fato de que eles apresentam uma grande quantidade de problemas, e as opiniões sobre as avaliações destes problemas nem sempre são uniformes /KAŠ60/.

Neste capítulo pretende-se levantar algumas questões para possibilitar a visualização da problemática envolvida, e que deve ser levada em conta, quando se discute o desenvolvimento de uma nova linha de DTS's para disjuntores.

Pode-se dizer que todo o trabalho de desenvolvimento de produtos deve, em geral, estar focado na obtenção de um produto que atende a principalmente dois pontos:

- ✓ satisfaça sua função;
- ✓ seja economicamente viável.

Ambos os pontos devem ser satisfeitos para DTS's. Neste caso, sua função é proteção contra sobrecarga, e a maneira como este produto deve fazê-lo é descrita pela sua curva característica de desarme, cuja forma está estabelecida por norma. Ou seja, satisfazer a função de DTS's é garantir que sua curva característica esteja de acordo com as restrições impostas por norma. Já em um produto economicamente viável, dois princípios - entre outros - devem ser observados:

- ✓ projetá-lo para ser usado em uma ampla faixa de aplicação;
- ✓ projetar os produtos de forma seriada.

Diversas questões surgem quando se levam estes princípios para a área de DTS's. Estas, e outras questões, relacionadas à problemática envolvida no projeto de disparadores, ante as quais se deparou no decorrer do trabalho, estão enumeradas adiante:

1. Projetar para ampla faixa de aplicação significa projetar para menor número de disjuntores com faixas de ajuste de corrente diferentes. Mas como se deseja que a linha completa de disjuntores abranja uma determinada faixa de valores de

corrente, isto implica em projetar os DTS's para terem as maiores faixas de ajuste de corrente possíveis.

- ✓ O que, então, limita o tamanho da faixa de ajuste de corrente de um disparador?
- 2. Projetar produtos de forma seriada significa projetar para a maior quantidade de componentes iguais entre produtos que atendam diferentes faixas de aplicação, ou seja, projetar de forma que DTS's de todas as diferentes faixas de corrente tenham a maior quantidade possível de componentes iguais entre si. Isto pode não ser uma tarefa fácil, e provavelmente algumas condições devem ser estabelecidas para que se possa atingir este princípio.
- ✓ Que condições deve-se satisfazer para que somente um pequeno número de componentes sejam diferentes entre disparadores de faixas de correntes diferentes?
- 3. Para que a função do DTS seja cumprida, a forma da curva característica de desarme de disparadores deve obedecer aos valores de norma, e esta forma é função das propriedades térmicas e elétricas dos seus componentes constituintes, assim como de suas dimensões. Para se projetar um DTS que esteja de acordo com as restrições de alguma norma específica, é importante saber como, alterando-se propriedades dos componentes do disparador, pode-se ajustar a forma da sua curva característica.
- ✓ Como cada uma destas propriedades e dimensões afetam a forma da curva característica, para que esteja situada dentro das restrições de norma?
- 4. Para DTS's com ajuste de nível de corrente, a curva característica deve obedecer aos valores de norma para todas as posições ajustáveis. Quando se procede com o ajuste, está se alterando a posição onde ocorre o desarme do disparador, portanto, os bimetais devem se defletir até uma posição diferente para que o disparo ocorra. Este ajuste não altera a velocidade nem o valor da deflexão final do bimetal; ou seja, a deflexão do bimetal, para valores de corrente iguais, processa-se sempre da mesma forma, independentemente da posição do *dial* de ajuste.
- ✓ A forma da curva característica é mesma em todas as posições do *dial* de ajuste?
- 5. O posicionamento das marcações impressas na tampa de cobertura dos disjuntores e relés de sobrecarga não é aleatório, não podendo ser atribuído arbitrariamente pelos projetistas. Provavelmente este posicionamento está determinado por diversos fatores ligados ao dimensionamento dos DTS's.

- ✓ Como se determinam as posições das marcações dos valores de corrente impressas na tampa de cobertura do disjuntor?
- 6. Alguns fabricantes utilizam marcações com espaçamento constante e outros com espaçamento irregular.
- ✓ A forma do espaçamento é indiferente no desempenho dos DTS's, ou uma delas é melhor? Qual é a melhor? E por que?
- 7. As variações dimensionais de fabricação provocam alteração no desempenho esperado do produto. Faz-se a correção destas alterações pelo processo descrito anteriormente (3.4). Pela descrição do método, nota-se que a correção é feita para apenas um valor de sobrecorrente ( $p_{correção}$ ) / tempo de desarme ( $t_{correção}$ ). Não se sabe se para outros valores, ou seja, outros pontos da curva característica, os erros são automaticamente corrigidos.
- ✓ O processo de correção do tempo de disparo corrige o erro em todos os pontos da curva característica?
- 8. Além de o processo de correção ser realizado em apenas um ponto da curva característica, ele também se realiza para apenas um ponto da faixa de ajuste de corrente ( $I_{marcação}$ ). Idealmente, os erros devem ser corrigidos para todos os pontos da faixa de corrente de ajuste.
- ✓ O processo de correção elimina o erro em todos os pontos da faixa de corrente ajustável?
- 9. É interessante notar que a correção dos DTS's é feita por meio do mesmo componente usado para se efetuar o ajuste de nível de corrente elétrica, o *dial* de ajuste. Contudo, o ajuste do nível de corrente, no momento da aplicação, não deve comprometer a correção do erro, realizada no momento da fabricação. Mas para que ambos os processos possam ser considerados independentemente, talvez certas condições na configuração do disparador tenham que ser atendidas, já que ambos os processos se valem do mesmo princípio.
- ✓ Que condições tornam possível a correção do erro gerado pelas variações dimensionais de fabricação através do mesmo princípio utilizado para se ajustar o nível de corrente?



## 5. ANÁLISE DO DISPARADOR

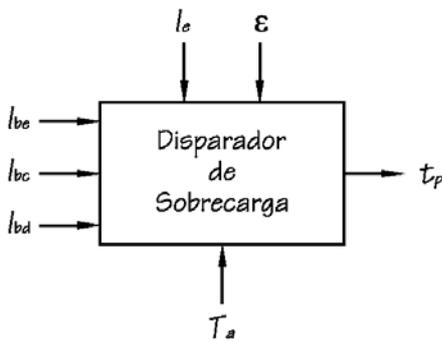
No capítulo anterior, o DTS foi analisado do ponto de vista funcional; nenhuma relação entre as variáveis físicas envolvidas em seu funcionamento foi apresentada. Nesta seção, a análise do sistema é ampliada, incluindo tais relações. Aqui pretende-se dividir o sistema do DTS em subsistemas, e, para cada subsistema, apenas indicar quais variáveis se relacionam, a partir de observações experimentais e conhecimentos prévios. A determinação de *como* as variáveis se relacionam, ou seja, encontrar por exemplo uma equação analítica que relaciona as variáveis de um subsistema, é tarefa para trabalhos posteriores. No capítulo 6, algumas destas relações são determinadas a partir do (ou para o) modelo simplificado desenvolvido, e no capítulo 8, outras relações são determinadas a partir dos dados experimentais obtidos.

Um sistema físico pode ser representado na forma de diagramas de blocos. Neste sentido, considera-se o sistema como um agente que transforma os sinais externos (mais conhecidos como sinais de entrada) a que este está sujeito, em outros sinais, de amplitudes (frequências, fases) e mesmo natureza diferente, conhecidos como sinais de saída. O sistema representa a função que relaciona os sinais de saída com os sinais de entrada.

No caso de DTS's, os sinais de entrada, ou seja, os sinais externos que influem no funcionamento do sistema, são:

- ✓ as correntes elétricas,  $I_{be}$ ,  $I_{bc}$  e  $I_{bd}$ , que percorrem os três bimetálicos de operação;
- ✓ o valor  $I_e$  do nível de corrente ajustada no *dial*;
- ✓ a temperatura ambiente,  $T_a$ .

A posição da seta de indicação, impressa sobre o *dial*, definida pelo processo de correção da corrente de ajuste, também pode ser incluída como sinal de entrada, considerando que a localização desta depende do método de correção da corrente de ajuste empregado, e portanto considera-se a posição da seta um fator de influência externa ao funcionamento do sistema. As variações dimensionais de fabricação também podem ser consideradas fatores de influência externa, e



**Figura 5.1: o disparador como um bloco-diagrama**

portanto, sinais de entrada. Estes dois sinais entram explicitamente na análise mais adiante.

DTS's têm como único sinal de saída, o tempo de disparo,  $t_p$ . A Figura 5.1 ilustra o disparador representado na forma de um bloco único.

A função que relaciona os sinais de entrada e o sinal de saída de DTS's, e representa o sistema, é:

$$t_p = f_1(I_{be}, I_{bc}, I_{bd}, I_e, T_a) \quad (5.1)$$

O desempenho de DTS's é descrito pela sua curva característica, já que todas as suas informações mais importantes estão resumidas na forma desta curva e, muitas vezes, ela é a única informação necessária. As correntes  $I_{be}$ ,  $I_{bc}$  e  $I_{bd}$  são variáveis no tempo (ou seja,  $I_{be}(t)$ ,  $I_{bc}(t)$  e  $I_{bd}(t)$ ). Contudo, na determinação da curva característica, as correntes  $I_{be}$ ,  $I_{bc}$  e  $I_{bd}$  têm valores constantes (ainda que possivelmente distintos), e são aplicadas imediata e simultaneamente no instante  $t_o = 0$ . Antes do instante  $t_o$ , o dispositivo encontra-se em regime térmico permanente, sendo que possivelmente um mesmo valor de corrente  $I_o$  constante atravessa os três bimetais.

Portanto, um DTS pode também ser visto como um sistema que gera uma curva característica (relação entre  $t_p$  e  $I_b/I_e$ ) como resultado dos valores de entrada, neste caso  $I_{be}$ ,  $I_{bc}$ ,  $I_{bd}$ ,  $I_o$ ,  $I_e$  e  $T_a$ ; ou seja, o disparador pode ser descrito por uma função do tipo:

$$(t_p, I_b/I_e) = f_2(I_{be}, I_{bc}, I_{bd}, I_o, I_e, T_a) \quad (5.2)$$

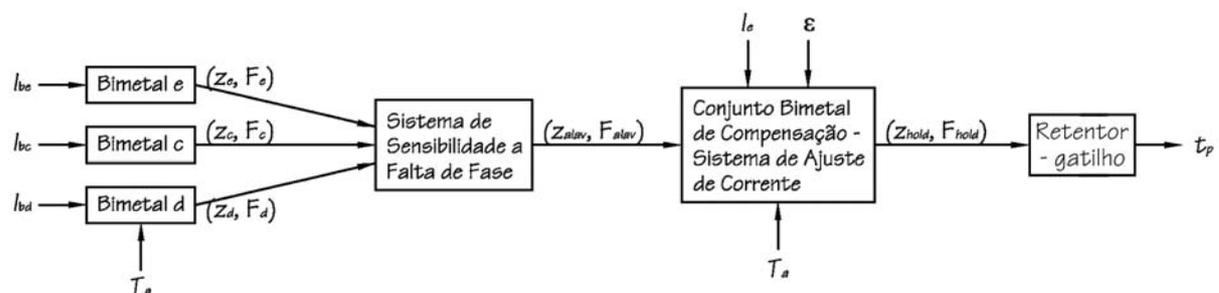
Estas duas relações são efetivamente determinadas por parâmetros do disparador, como: dimensões de seus componentes, relações geométricas, propriedades dos materiais, etc. Determinar a forma dessas funções é saber como estes diversos parâmetros se relacionam entre si e entre as variáveis e sinais do sistema.

A análise subsequente do sistema é facilitada pela divisão deste em subsistemas menores e mais simples, devidamente interligados via fluxo de sinais. Estes também apresentam sinais saindo e entrando neles, de maneira que cada subsistema representa uma relação entre estes sinais. Os sinais de saída de um subsistema são os de entrada do posterior, o que produz um fluxo de sinal no interior do sistema.

O sistema do DTS pode ser dividido em quatro subsistemas:

- ✓ bimetais de operação;
- ✓ sistema de sensibilidade à falta de fase;
- ✓ conjunto bimetálico de compensação - sistema de ajuste de corrente; e
- ✓ sistema de liberação do mecanismo.

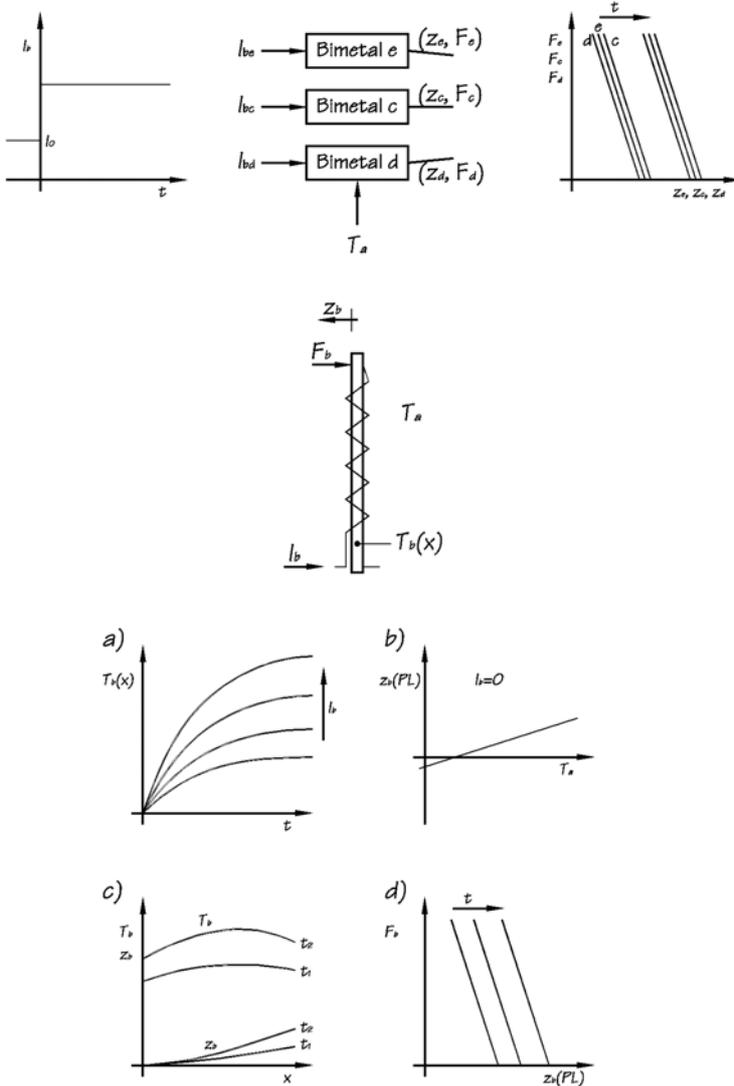
A Figura 5.2 apresenta as subdivisões do sistema e o fluxo interno de sinais entre os subsistemas. Segue-se a análise de cada um dos subsistemas, seu funcionamento básico, suas variáveis, sinais de entrada e saída, e relações entre variáveis.



**Figura 5.2: representação dos subsistemas em bloco-diagrama**

## 5.1 Bimetálicos de Operação

Este trabalho trata mais especificamente de disparadores de sobrecarga de disjuntores de baixa tensão para aplicação em motores. Estes são em geral trifásicos e por isto este subsistema não é representado por apenas um, mas por três conjuntos de bimetálicos de operação idênticos, identificados pelas letras *e*, *c* e *d*,



**Figura 5.3: sistema dos bimetals, variáveis e suas relações**

a corrente  $I_b$ . A temperatura do bimetals não é uniforme, e varia ao longo do eixo  $x$  do bimetals ( $T_b(x)$ ). A temperatura do bimetals é também influenciada pela temperatura ambiente: quanto maior a segunda, maior a primeira. Descrevendo estas relações na forma de uma função, a equação resulta:

$$T_b(x, t) = f_3(I_b(t), t, T_a) \tag{5.3}$$

A variação da temperatura de um ponto do bimetals com o tempo, quando uma corrente constante é aplicada, tem a forma do gráfico a) da Figura 5.3. A

referentes a esquerda, centro e direita, respectivamente. Basicamente, as relações entre as variáveis internas de cada um dos três sistemas de bimetals podem ser descritas como exposto adiante. A Figura 5.3 ilustra o sistema e as variáveis envolvidas.

A variável de entrada deste sistema é a corrente elétrica  $I_b$  que passa pelo enrolamento de aquecimento e pelo próprio bimetals de cada fase. O valor da corrente é variável com o tempo ( $I_b(t)$ ), mas é mantida constante quando se trabalha na determinação da curva característica do DTS. Esta corrente passa a aquecer o bimetals, cuja temperatura  $T_b$  passa a subir tão mais rapidamente quanto maior for

temperatura varia rapidamente no início, tendendo ao final a um valor finito de temperatura,  $T_{\infty b}(x)$ . Pode se dizer que este valor de regime permanente é uma função relacionada com a anterior (ou que deriva da anterior), pois é a mesma considerando apenas a parte estática da equação, do nível de corrente elétrica aplicada e da temperatura ambiente:

$$T_{\infty b}(x) = f_3'(I_b, T_a) \quad (5.4)$$

Os parâmetros do DTS que estão envolvidos com as duas funções anteriores estão relacionados às dimensões e propriedades térmicas dos componentes desse subsistema, além de parâmetros ligados à transferência convectiva e condutiva de calor.

A cada instante de tempo, o bimetálico apresenta um perfil de temperatura,  $T_b(x)$ . Este perfil provoca a deflexão do bimetálico, e cada ponto sobre o eixo  $x$  do bimetálico se desloca de um valor  $z_b(x)$ . Isto é representado na Figura 5.3 pelo gráfico c), e por uma função:

$$z_b(x) = f_4'(T_b(x)) \quad (5.5)$$

$z_b(x)$  representa a forma que o bimetálico tomou depois da deflexão. Se agora uma força  $F_b$  atuar sobre a ponta livre do bimetálico, o deslocamento da ponta livre,  $z_b(PL_b)$ , será alterado, como o gráfico d) da Figura 5.3 sugere. Isto implica mais uma relação:

$$z_b(PL_b) = f_4''(F_b) \quad (5.6)$$

O bimetálico sofre uma deflexão devido a um efeito de mola quando submetido a uma força, de onde surge a relação acima.

Dimensões e parâmetros de natureza mecânica estão incluídos nas duas funções acima, principalmente o módulo de elasticidade dos materiais do bimetálico. Na primeira delas, tem vital importância ainda a relação entre os coeficientes de dilatação térmica dos dois metais que constituem o elemento bimetálico. Os enrolamentos de aquecimento dos bimetálicos de operação de alguns DTS's, especialmente os de faixa de ajuste de corrente maiores, apresentam elevada

rigidez. Esta rigidez pode influenciar no valor da equação anterior e neste caso deve ser computada para a determinação da relação entre  $F_b$  e  $z_b(PL_b)$ .

As duas funções anteriores sugerem que tanto a força  $F_b$  quanto o perfil de temperatura  $T_b(x)$  influem independentemente sobre o deslocamento da ponta livre do bimetal. Mas estas relações só valem independentemente se, em cada equação, mantiver-se constante a variável que não entra na equação em questão, e portanto, é mais adequado reunir as duas funções anteriores em uma única:

$$z_b(x) = f_4(T_b(x), F_b) \quad (5.7)$$

A força e a posição da ponta livre do bimetal são os sinais transmitidos aos cursores do sistema de sensibilidade à falta de fase. Estes dois sinais não são independentes, mas estão relacionados pela função  $f_4''$  da equação (5.6), e esta por sua vez é dependente do perfil de temperatura do bimetal: o aumento da temperatura do bimetal faz a curva que representa a função  $f_4''$  se deslocar, como visto na Figura 5.3. O sinal de saída deste subsistema é portanto o par ordenado  $(z_b(PL_b), F_b)$ .

Apesar de os três bimetais do mesmo disjuntor serem intrinsecamente semelhantes, os sinais de saída (ou seja, os deslocamentos) gerados por eles podem diferir entre si, mesmo que os sinais de entrada (as correntes  $I_b$ ) sejam de mesmo valor. Verifica-se que as propriedades de transferência de calor nos três bimetais não são as mesmas. A transmissão de calor para o ar ambiente no bimetal central é comprometida por ele estar entre os dois restantes, o que provoca o maior aquecimento verificado neste bimetal. Além disso, diferenças causadas pelas tolerâncias de fabricação presentes nas dimensões e propriedades físicas dos componentes destes subsistemas também provocam variações nos resultados dos três sistemas bimetálicos. Isto significa que existe uma função (5.3) (e possivelmente uma função (5.7) também) não exatamente igual para cada um dos bimetais.

## 5.2 Sistema de Sensibilidade à Falta de Fase

Este subsistema transmite um sinal de força e deslocamento da ponta da alavanca diferencial ao subsistema seguinte, em função dos sinais de força e posição que recebe de cada um dos bimetais de operação. Esta relação pode ser descrita, considerando que os deslocamentos  $z$  de cada bimetal correspondem à posição da ponta livre de cada um dos bimetais, da seguinte forma:

$$(Z_{alav}, F_{alav}) = f_5((z_e, F_e), (z_c, F_c), (z_d, F_d)) \quad (5.8)$$

A relação  $f_5$  acima depende essencialmente das distâncias dos pontos de articulação dos cursores na alavanca.

As variáveis envolvidas são apresentadas na Figura 5.4.

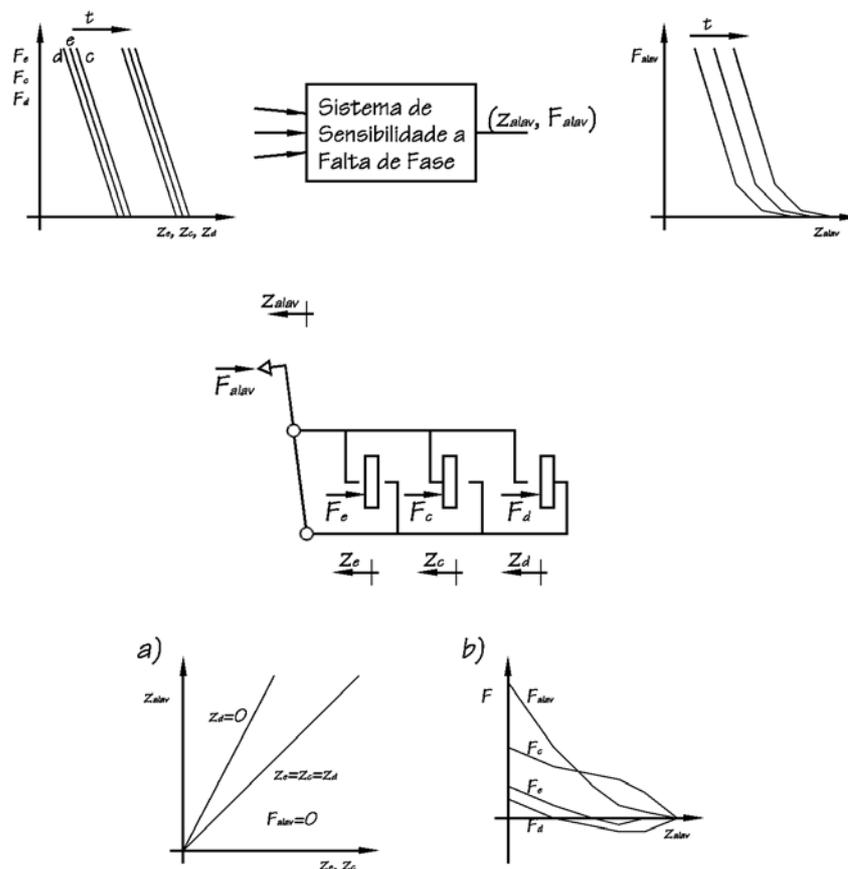


Figura 5.4: sistema de sensibilidade à falta de fase e variáveis envolvidas

O sistema executa sua função ampliando o deslocamento da alavanca quando há falta de corrente em uma das fases, (ou seja, não há deslocamento do respectivo bimetal), conforme ilustra o diagrama a) da Figura 5.4.

A equação (5.8) teria uma relação de forma muito simples se, em condições normais, ou seja, sem falta de fase, os deslocamentos dos bimetais fossem de igual valor (considerando que não haja força aplicada), ou seja, as curvas  $z_b(PL_b) \times F_b$  dos três bimetais fossem coincidentes. Como em geral elas não são coincidentes, pelos motivos expostos na seção anterior, a relação entre os sinais de saída,  $z_{alav} \times F_{alav}$ , apresenta-se normalmente com uma forma bastante complexa. Quando a curva  $z_b(PL_b) \times F_b$  dos três bimetais não é coincidente, suas pontas não tocam simultaneamente os cursores, o que só ocorre quando a força sobre a alavanca aumenta, como o diagrama b) da Figura 5.4 tenta mostrar. Este fato provoca as diferentes inclinações da curva  $z_{alav} \times F_{alav}$ .

Como as curvas  $z_b(PL_b) \times F_b$  dos bimetais se deslocam com o tempo, a curva do sinal de saída do sistema de sensibilidade à falta de fase,  $z_{alav} \times F_{alav}$ , movimenta-se inteiramente também.

### 5.3 Conjunto Bimetal de Compensação - Sistema de Ajuste de Corrente

A Figura 5.5 ilustra o sistema e suas variáveis. Neste sistema, quando a ponta da alavanca diferencial do sistema de sensibilidade à falta de fase encosta-se ao bimetal de compensação, transfere a estas informações de força e posição. A relação entre as variáveis que resultam nestas informações é uma função do tipo:

$$(z_{bc}, F_{alav}) = f_6(\alpha, T_{bc}, z_{ret}, F_{ret}) \quad (5.9)$$

Nesta função entram a geometria do sistema, a rigidez e a deflexão térmica do bimetal de compensação. Uma simplificação possível de ser feita é considerar que esta relação de forças vale para qualquer posição do bimetal de

compensação, resultando na função mais simples:

$$F_{alav} = f_6'(F_{ret}) \tag{5.10}$$

Esta função está representada pelo gráfico a) da Figura 5.5, e nela entram apenas as relações geométricas do bimetetal de compensação.

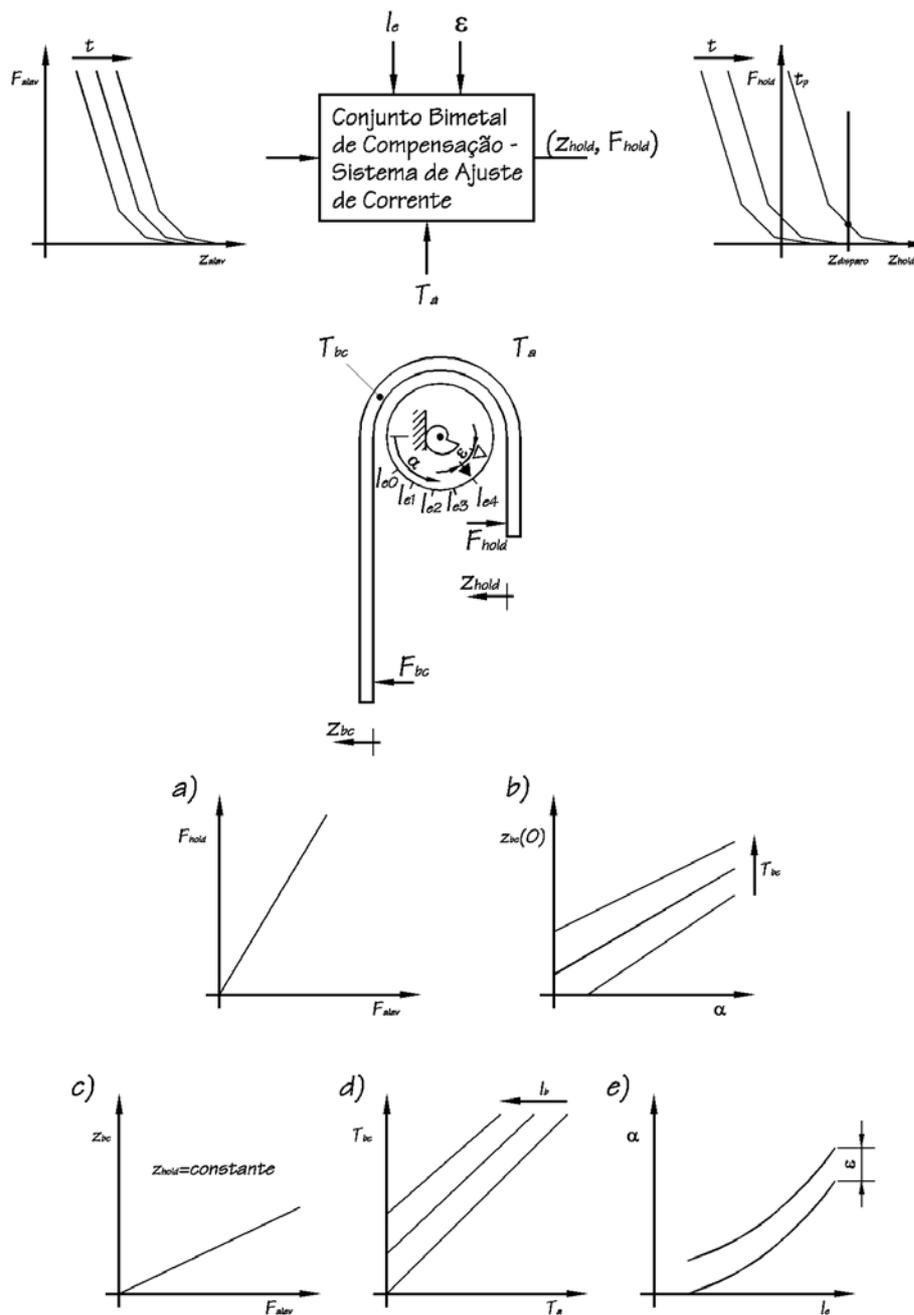


Figura 5.5: conjunto bimetetal de compensação - sistema de ajuste de corrente e variáveis envolvidas

Supondo que o bimetal de compensação esteja sempre encostado no retentor, o primeiro nem sempre está encostado na alavanca diferencial. A mola do retentor produz a força  $F_{ret}$  que atua no bimetal de compensação. Definindo  $z_{bc}(0)$  como a posição que a ponta do bimetal de compensação ocupa quando sua outra ponta está apenas encostada no retentor, sem provocar força, verifica-se que esta não é uma posição fixa, mas varia em função do ângulo de giro do *dial* e da temperatura do bimetal de compensação:

$$z_{bc}(0) = f_6^{II}(\alpha, T_{bc}) \quad (5.11)$$

Na relação anterior entram em cena apenas as relação geométricas entre os componentes do sistema e as propriedades de deflexão térmica do bimetal de compensação. Ela está representada graficamente no diagrama b) da Figura 5.5. Esta função indica que possivelmente a posição  $z_{bc}(0)$  do bimetal de compensação seja dependente de uma relação dos fatores giro do *dial*  $\alpha$ , e temperatura do bimetal de compensação  $T_{bc}$ . Idealmente estes dois fatores deveriam alterar independentemente a posição  $z_{bc}(0)$ , como numa função:

$$z_{bc}(0) = f_6^{III}(\alpha) + f_6^{IV}(T_{bc}) \quad (5.12)$$

Porém, pela geometria do sistema, provavelmente a influência das duas variáveis sobre o deslocamento não é independente.

A equação (5.11) considera que não há força atuando sobre o bimetal de compensação, ou seja,  $F_{alav} = 0$ . Quando uma força atua sobre este, o deslocamento  $z_{bc}$  é alterado, da seguinte forma:

$$z_{bc} = f_6^V(F_{alav}), \text{ para } z_{ret} = \text{constante} \quad (5.13)$$

Isto é devido à elasticidade do bimetal, e está representado no gráfico c) da Figura 5.5.

Poderia-se aceitar que a temperatura do bimetal de compensação fosse igual à temperatura ambiente, devido à função deste, ou seja:

$$T_{bc} = T_a \quad (5.14)$$

Mas experimentalmente verifica-se que isto não é verdade (como nos ensaios realizado, descritos no capítulo 8). Na realidade verifica-se que o calor gerado nos bimetais de operação chega ao bimetálico de compensação, elevando a sua temperatura significativamente. Ou seja, a temperatura do bimetálico de compensação não é apenas função da temperatura ambiente, mas também indiretamente das correntes em cada um dos bimetálicos de operação:

$$T_{bc} = f_7(T_a, I_{be}, I_{bc}, I_{bd}, t) \quad (5.15)$$

Nesta função estão incluídos os efeitos de escoamento e aquecimento do ar e da capacidade térmica do bimetálico de compensação, além de todo o equacionamento térmico do sistema dos bimetálicos. A variação da temperatura do bimetálico de compensação com o tempo está representado no diagrama d) da figura anterior.

O ângulo de giro do *dial*,  $\alpha$ , muitas vezes é considerado como uma variável independente, considerando-se que ela pode girar livremente. Porém quando se considera que o DTS deva ser ajustado para uma dada corrente de trabalho, o ângulo do *dial* fica definido. Outro fator que tem influência sobre o ângulo  $\alpha$  é o ângulo  $\varepsilon$  que representa o giro realizado durante o processo de correção das variações dimensionais de fabricação. Os dois fatores geram uma relação, mostrada no gráfico e) da Figura 5.5, e que em forma de uma equação fica:

$$\alpha = f_8(I_e) + \varepsilon \quad (5.16)$$

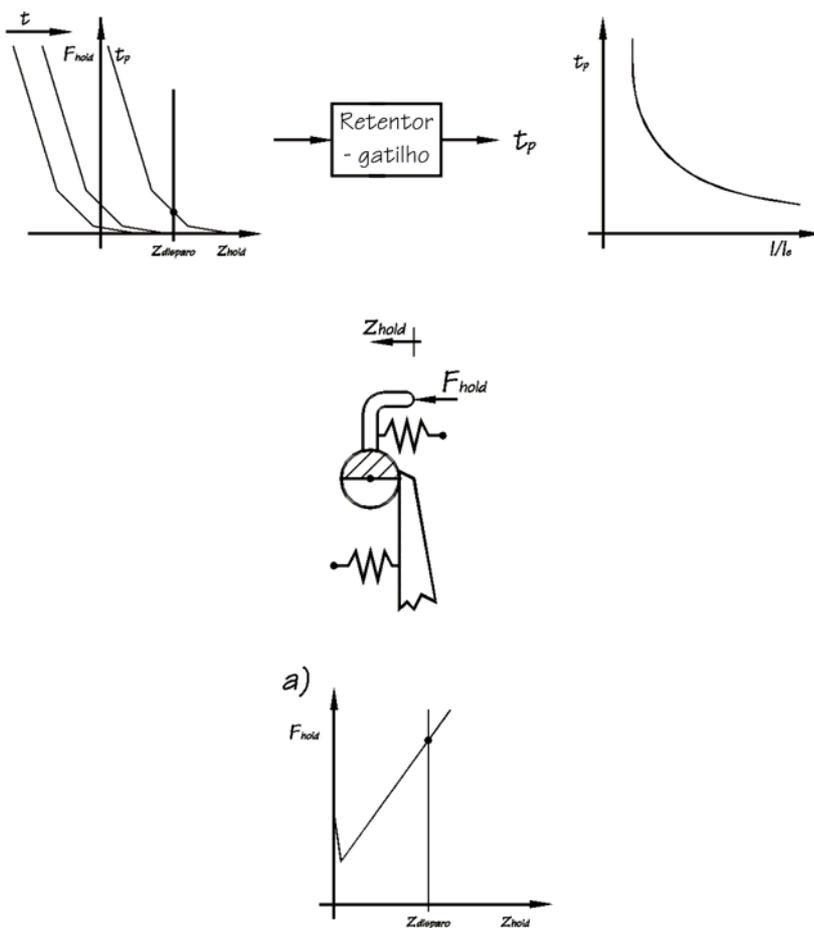
A posição das marcações de corrente na tampa do disjuntor é que definem esta função.

## 5.4 Sistema de Liberação do Mecanismo

O sistema de liberação do mecanismo produz o sinal de disparo de acordo com as informações de força e posição que recebe do subsistema anterior. Como resultado, obtém-se a informação do tempo em que ocorre o disparo, a partir

do início da aplicação da corrente elétrica. Esta relação tempo de disparo x corrente aplicada é a própria curva característica do disparador que, ao final, é a informação que se procura. Existe uma relação entre posição e força do retentor conforme uma função:

$$F_{ret} = f_9(Z_{ret}) \tag{5.17}$$



A Figura 5.6 mostra os componentes integrantes do sistema assim como a relação entre  $F_{ret}$  x  $Z_{ret}$ . Nesta função estão incluídos o efeito da força da mola e do atrito existente entre o retentor e o gatilho. Esta combinação de efeitos provoca um deslocamento irregular do retentor na forma de degraus, como o apresentado na Figura 3.4.

O disparo é um sinal binário, pois possui apenas dois níveis, armado e desarmado. Ele ocorre

quando o retentor atinge uma certa posição, a qual libera o gatilho, e pode ser colocado na forma de uma função da maneira:

$$\begin{aligned} \text{disparo} = f_{10}(Z_{ret}) = \text{armado}, & \quad \text{se } Z_{ret} < Z_{desarme}; \\ \text{desarmado}, & \quad \text{se } Z_{ret} \geq Z_{desarme} \end{aligned} \tag{5.18}$$

**Figura 5.6: sistema de liberação do mecanismo e variáveis envolvidas**

## 5.5 O Sistema Completo

A Figura 5.7 resume a análise do sistema conforme realizada nas seções anteriores, reproduzindo o diagrama de blocos dos subsistemas, os desenhos descritivos dos subsistemas, a forma dos sinais que interligam os subsistemas, e as relações entre os sinais e variáveis internas dos subsistemas.

A Figura 5.7 revela o quanto a análise de DTS's pode ser complexa, quando todas as variáveis e suas inter-relações são levadas em conta. Uma análise completa do disparador significa encontrar a forma matemática da função  $f_1$  da equação (5.1), que representa o funcionamento do dispositivo. Isto significa encontrar a forma que descreva matematicamente cada uma das funções, de  $f_3$  a  $f_{10}$ , definidas anteriormente, as quais representam as relações entre as variáveis e sinais de cada um dos subsistemas.

No próximo capítulo um modelo térmico simples foi proposto para determinar a expressão da função  $f_3$ , e várias simplificações foram incluídas no modelo, de forma a simplificar as relações de variáveis restantes. Como resultado obteve-se um modelo simplificado para o qual foi possível encontrar uma descrição analítica para a função  $f_1$ , a qual representa o comportamento de todo o sistema.

O único subsistema que possui dinâmica é o dos bimetálicos de operação. Mais especificamente, a única relação entre variáveis dentro deste subsistema que possui dinâmica é a relação entre  $I_b$  e  $T_b(x, t)$  que corresponde a função  $f_3$ . Todas as outras relações são funções estáticas, independentes do tempo. Esta é a relação de variáveis mais importante do estudo de DTS's.

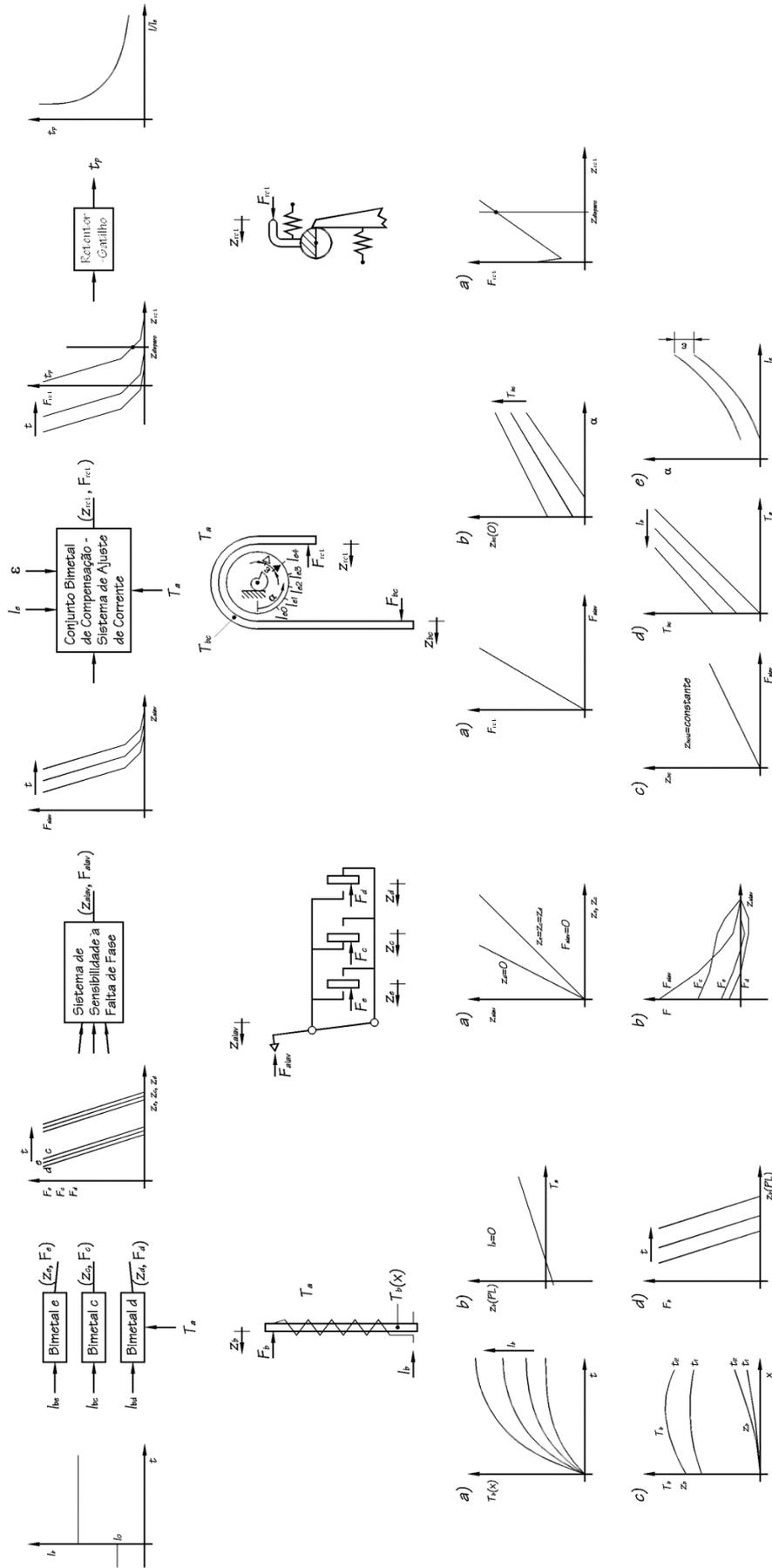


Figura 5.7: o sistema completo e sua complexidade

## 6. MODELO SIMPLIFICADO

No estudo de um sistema é de grande utilidade a elaboração de um modelo que represente seu comportamento, com o qual seja possível prever seu desempenho em diferentes condições de funcionamento e as conseqüências geradas por alterações no seu projeto, além de esclarecer dúvidas gerais sobre o próprio sistema, como as questões levantadas no capítulo 4.

A análise do DTS apresentada no capítulo 5 serve de base para a elaboração de um modelo que descreva o disparador. Nesta análise, relações entre as variáveis encontradas no sistema são sugeridas, não sendo apresentado, contudo, de que forma elas se dão.

Assim, buscou-se elaborar um modelo simplificado para o funcionamento do sistema, onde várias hipóteses simplificativas foram sugeridas e utilizadas na descrição do seu funcionamento e das relações entre as variáveis, de forma a reduzir sua complexidade original; e de maneira que as perguntas levantadas anteriormente pudessem ser esclarecidas.

### 6.1 Simplificações

As simplificações nas quais o modelo básico proposto está baseado estão relacionadas abaixo:

1. os componentes envolvidos no equacionamento térmico possuem temperatura uniforme;
2. o sistema térmico do bimetálico se comporta como um sistema dinâmico de primeira ordem, ou seja, somente o bimetálico possui capacidade térmica;
3. os valores das propriedades térmicas dos componentes não variam com a temperatura dos mesmos;
4. o deslocamento da ponta livre dos bimetálicos é linearmente proporcional à

temperatura deste;

5. no modelo considera-se que não há desbalanceamento entre as fases, e que os bimetais de cada uma das fases tem um comportamento dinâmico idêntico para uma mesma corrente imposta;
6. as forças envolvidas são desprezíveis, de forma que a elasticidade dos bimetais pode ser desconsiderada;
7. o enrolamento de aquecimento não apresenta rigidez e não altera as propriedades elásticas do bimetal;
8. o valor do deslocamento do ponto de disparo que o bimetal de compensação produz ao se defletir devido a uma mudança na temperatura ambiente é sempre o mesmo, independentemente da posição em que o *dial* de ajuste se encontre;
9. a temperatura ambiente varia muito lentamente quando comparada à variação de temperatura nos bimetais que a corrente elétrica provoca; desta maneira pode-se considerar que qualquer variação na temperatura ambiente provoca instantaneamente a mesma variação na temperatura destes;
10. o deslocamento causado por uma variação da temperatura ambiente é de mesmo valor nos bimetais de operação e no de compensação;
11. o fluxo de calor que passa através do isolamento, entre o enrolamento de aquecimento e o bimetal é proporcional a diferença de temperatura entre estes dois pontos;
12. o enrolamento de aquecimento tem temperatura própria (não é a mesma que a do bimetal), mas não tem capacidade térmica;
13. não há corrente passando pelo interior do bimetal e/ou a geração de calor no interior deste é nula.

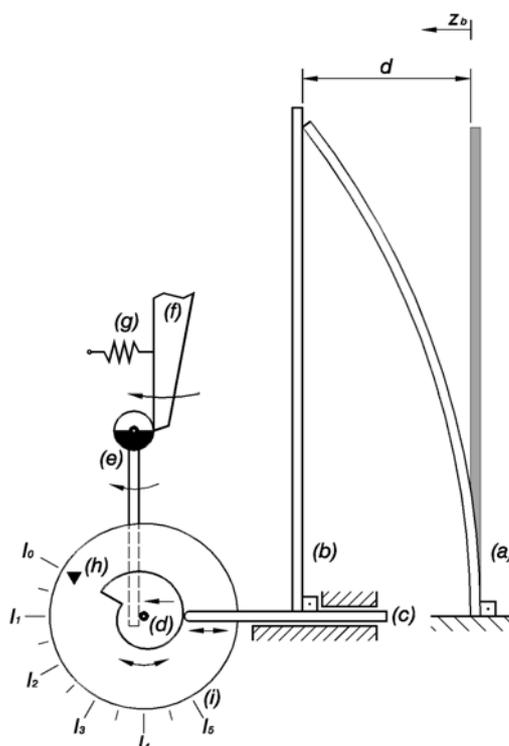
## 6.2 A Configuração do Sistema Simplificado

O sistema simplificado se resume em um único bimetal (a), no qual o desarme ocorre quando a ponta livre do bimetal atinge (encosta) o bimetal de compensação (b). Estas suposições podem ser tomadas devido às simplificações 5 e 6. A ponta livre do bimetal, atingindo o bimetal de compensação, empurra consigo

o *dial* de ajuste (d) (por meio do apalpador c), o qual provocará o movimento do retentor (e) e a liberação do mecanismo (pelo gatilho, f). O ponto de disparo nesta configuração é portanto o ponto onde o bimetetal de trabalho toca o bimetetal de compensação. O *dial* de ajuste faz o bimetetal de compensação avançar ou recuar, alterando com isso o ponto de desarme.

Uma corrente de referência, de valor  $I_r$ , é definida para ser usada como um valor base de corrente na análise. Ela pode ser vista como um valor qualquer de corrente dentro da faixa de ajuste do disparador que está sendo analisado.

Considerando que o DTS está ajustado para a corrente de referência, define-se ainda a distância “ $d$ ” como sendo a distância entre o ponto de disparo e a ponta livre do bimetetal quando este se encontra à temperatura (uniforme) na qual ele não apresenta curvatura. É a distância que o bimetetal deve percorrer a partir do estado não curvado para provocar o desarme, quando o DTS está ajustado para a corrente  $I_r$ . A Figura 6.1 ilustra todas as informações anteriores.

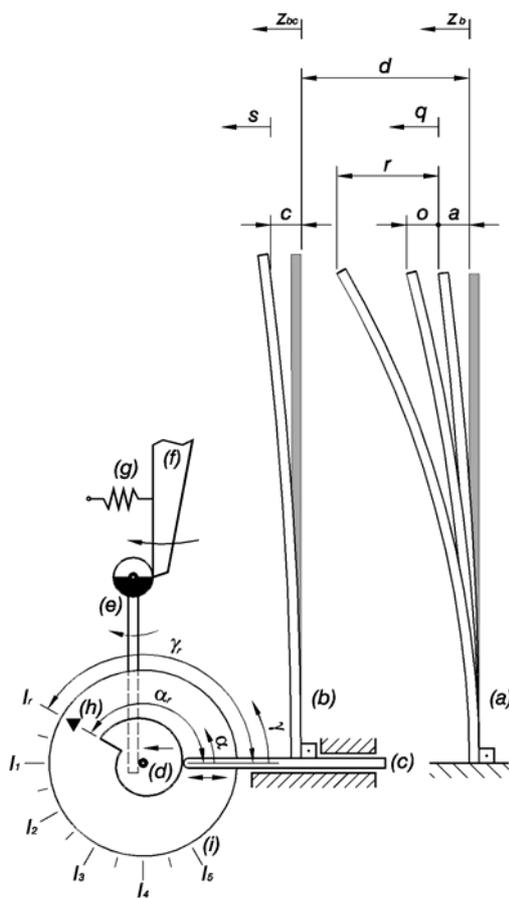


**Figura 6.1: configuração simplificada do disparador real**

O bimetetal de compensação tem, no desenho, as mesmas dimensões e propriedades do bimetetal de trabalho, para sugerir que uma alteração na temperatura ambiente provoca o mesmo deslocamento em ambos bimetais, conforme a simplificação 10.

Outras distâncias serão definidas aqui para a análise proposta. O DTS poderá funcionar em temperaturas ambiente diferentes da que provoca ausência de curvatura no bimetetal, e por isso este pode apresentar um deslocamento “ $a$ ” devido à temperatura ambiente. Esta também provoca um deslocamento “ $c$ ” no bimetetal de compensação.

A temperatura inicial do bimetetal



**Figura 6.2: definição das distâncias  $a$ ,  $c$ ,  $o$  e  $r$**

temperatura ambiente. Este pode estar pré-aquecido, o que provocaria um deslocamento inicial na sua ponta livre, de valor definido por “ $o$ ”.

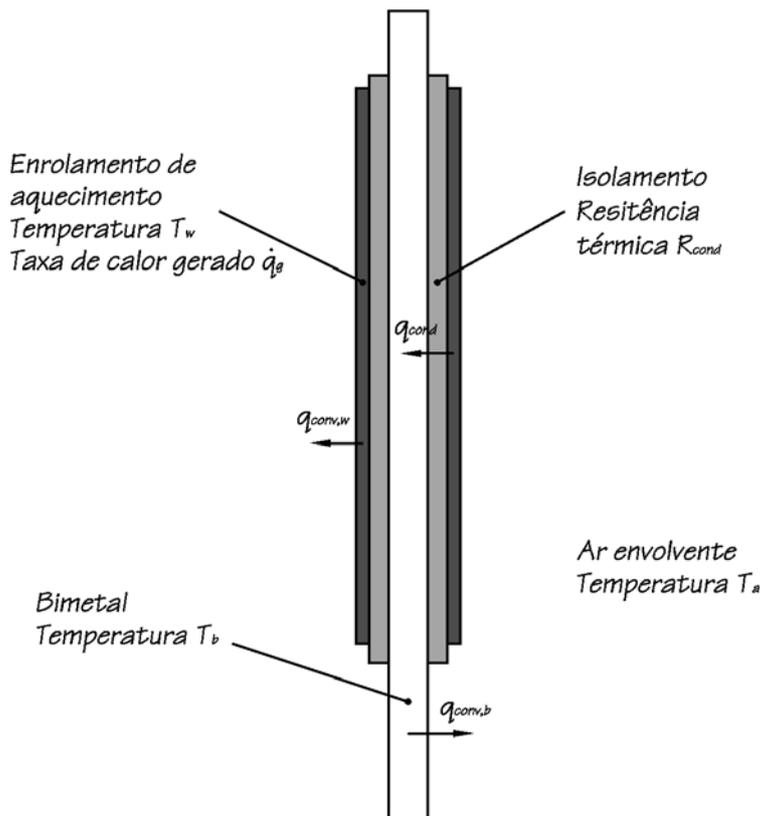
Supondo que a corrente de valor  $I_r$  percorra o bimetálico, é provocado, em regime permanente, um deslocamento final de valor “ $r$ ”.

Todas estas novas distâncias estão representadas na Figura 6.2.

Também estão definidos na figura os eixos  $z$ ,  $q$ ,  $s$ ,  $\alpha$  e  $\gamma$ .  $z$  refere-se ao deslocamento do bimetálico de trabalho a partir da posição onde não apresenta curvatura.  $q$  também se refere ao deslocamento do bimetálico de trabalho, mas a partir da posição onde este se encontra quando está à temperatura ambiente.  $s$  refere-se ao deslocamento de ponto de disparo provocado pelo giro do *dial*.  $\alpha$  é o ângulo referente à posição do *dial* de ajuste, a partir do ponto onde o cursor ( $c$ ) encosta-se ao came.  $\gamma$  refere-se às posições angulares das marcações de corrente ( $i$ ) sobre a tampa de cobertura do disjuntor, a partir do mesmo ponto inicial de  $\alpha$ . O ângulo  $\gamma_r$  é a posição da marcação da corrente  $I_r$  na escala de correntes ( $i$ ).

### 6.3 Modelo Térmico

Esta seção descreve a obtenção do modelo térmico para o modelo que se baseia nas simplificações 1, 2, 3, 9, 11, 12 e 13 anteriores. A obtenção do modelo inicia com um modelo térmico correspondente à função  $f_3$  da equação (5.3). Este

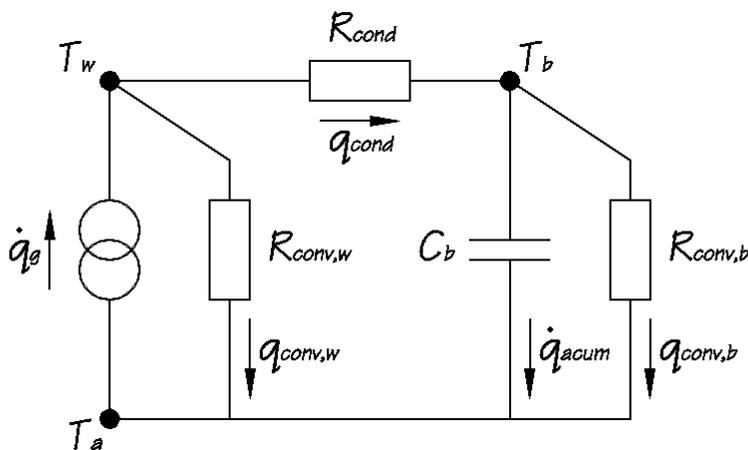


**Figura 6.3: representação simplificada do sistema térmico do bimetálico**

modelo envolve a determinação da temperatura do bimetálico em função da corrente que o aquece.

A Figura 6.3 apresenta um croqui do sistema do bimetálico depois de aplicadas as simplificações enumeradas anteriormente. A Figura 6.4 mostra a representação deste sistema em forma de um circuito equivalente de rede de resistências térmicas.

Para o esquema vale:



**Figura 6.4: diagrama de rede de resistências do sistema térmico**

$$q_{conv,b} = \frac{T_b - T_a}{R_{conv,b}}$$

$$q_{conv,w} = \frac{T_w - T_a}{R_{conv,w}}$$

$$q_{cond} = \frac{T_w - T_b}{R_{cond}}$$

$$\dot{q}_{acum,b} = C_b \cdot \frac{dT_b}{dt}$$

$$\dot{q}_g = P$$

onde

$$R_{conv,b} = \frac{1}{h_b \cdot A_b}$$

$$R_{conv,w} = \frac{1}{h_w \cdot A_w}$$

$$C_b = \rho_b \cdot c_{p,b} \cdot V_b$$

$$P = R_{elét} \cdot I_b^2$$

A resistência de condução,  $R_{cond}$ , poderia ser calculada a partir das propriedades físicas do material do isolamento. Porém, no sistema real seu valor não depende apenas destas propriedades, mas também de variáveis do processo de fabricação (por exemplo, a pressão com que o enrolamento de aquecimento é envolvido e fixado em torno do bimetal), e seu valor exato deve ser determinado experimentalmente. Contudo, para esta análise simplificada considera-se que seu valor é conhecido.

Aplicando a 1ª lei de Kirchhoff nos dois nós, tem-se:

$$q_{cond} - q_{conv,b} = \dot{q}_{acum,b} \quad (6.1)$$

e

$$q_{cond} + q_{conv,w} = \dot{q}_g \quad (6.2)$$

Designando  $\theta$  como a diferença de temperatura em relação à temperatura ambiente:

$$\theta_b = T_b - T_a$$

$$\theta_w = T_w - T_a$$

$$\theta_o = T_o - T_a$$

Substituindo os termos de taxa de transferência de calor ( $q$ 's) em (6.1) e (6.2), tem-se:

$$\begin{aligned}\frac{\theta_w - \theta_b}{R_{cond}} - \frac{\theta_b}{R_{conv,b}} &= C_b \cdot \frac{d\theta_b}{dt} \\ \frac{\theta_w - \theta_b}{R_{cond}} + \frac{\theta_w}{R_{conv,w}} &= P\end{aligned}\quad (6.3)$$

Arranjando os termos de modo a isolar as variáveis independentes  $\theta_b$  e  $\theta_w$ , obtém-se as duas equações diferenciais que regem o comportamento das temperaturas do bimetal e do enrolamento:

$$\begin{aligned}R_{tot,b} \cdot \frac{d\theta_b}{dt} + \frac{\theta_b}{C_b} &= \frac{R_{b,w}}{C_b} \cdot P \\ R_{tot,b} \cdot \frac{d\theta_w}{dt} + \frac{\theta_w}{C_b} &= \frac{R_{tot,w}}{C_b} \cdot P\end{aligned}\quad (6.4)$$

onde

$$\begin{aligned}R_{tot,b} &= \frac{R_{conv,b} \cdot (R_{conv,w} + R_{cond})}{R_{conv,b} + R_{conv,w} + R_{cond}} \\ R_{tot,w} &= \frac{R_{conv,w} \cdot (R_{conv,b} + R_{cond})}{R_{conv,b} + R_{conv,w} + R_{cond}} \\ R_{b,w} &= \frac{R_{conv,b} \cdot R_{conv,w}}{R_{conv,b} + R_{conv,w} + R_{cond}}\end{aligned}$$

As soluções das equações diferenciais têm a seguinte forma:

$$\begin{aligned}T_b &= \theta_{\infty b} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) + T_a \\ T_w &= \theta_{\infty w} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) + T_a\end{aligned}\quad (6.5)$$

ou então, considerando apenas o aumento de temperatura em relação a temperatura ambiente, para um pré-aquecimento dos bimetais de valor  $\theta_0$ :

$$\begin{aligned}\theta_b &= \theta_{\infty b} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) + \theta_o \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \\ \theta_w &= \theta_{\infty w} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) + \theta_o \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}\end{aligned}\tag{6.6}$$

onde

$$\begin{aligned}\theta_{\infty b} &= R_{b,w} \cdot R_{el\acute{e}t} \cdot I_b^2 \\ \theta_{\infty w} &= R_{tot,w} \cdot R_{el\acute{e}t} \cdot I_b^2 \\ \tau &= R_{tot,b} \cdot C_b\end{aligned}\tag{6.7}$$

As equações descrevem a variação da temperatura dos bimetais e dos enrolamentos de aquecimento para uma determinada corrente elétrica  $I_b$ , que passa a fluir pelo sistema a partir do tempo inicial  $t = 0$ , quando a temperatura de ambos, o enrolamento de aquecimento e o bimetal, estão à temperatura inicial  $T_o$ . A função  $f_3$  da equação (5.3) tem a forma da equação (6.6), num sistema onde as simplificações enumeradas se aplicam.

Abaixo estão relacionadas algumas observações referentes ao que foi visto acima:

- ✓ os valores dos parâmetros  $\theta_{\infty}$  e  $\tau$  estão vinculados à geometria do conjunto do bimetal, às propriedades físicas dos componentes deste e às condições de transferência de calor, como pode ser visto na equação (6.7);
- ✓ todos os fatores dimensionais, de transferência de calor e propriedades físicas dos componentes do sistema estão resumidos apenas nestes dois parâmetros,  $\theta_{\infty}$  e  $\tau$ , na equação do aumento da temperatura do bimetal (6.6);
- ✓ o parâmetro  $\theta_{\infty}$  é a temperatura final alcançada quando se atinge o regime permanente, e o parâmetro  $\tau$  é a chamada constante de tempo do sistema, e indica a rapidez com que a temperatura atinge este valor final;
- ✓ a temperatura final atingida  $\theta_{\infty}$  é diretamente proporcional à potência elétrica consumida no enrolamento de aquecimento, e com isso, proporcional ao quadrado da corrente elétrica que passa pelo enrolamento;

- ✓ a potência elétrica entra apenas no valor de  $\theta_{\infty}$ , ou seja, o valor da corrente elétrica altera apenas a temperatura final atingida em regime permanente, sem alterar a rapidez relativa com que a temperatura aumenta;
- ✓ a relação  $\theta_{\infty} = R_{b,w} \cdot R_{elét} \cdot I_b^2$  das equações (6.7) é a forma da função  $f_3'$  da equação (5.4) para o modelo obtido aqui.

O modelo térmico simplificado do bimetal, visto nesta seção, apenas relaciona a corrente que circula nos bimetais com a elevação de sua temperatura. A relação entre esta temperatura e o deslocamento dos bimetais e destas com o tempo decorrido até o disparo é visto a seguir. As influências do giro do *dial*, das variações dimensionais de fabricação e do método de correção destas variações sobre o tempo de disparo são vistas nas seções subseqüentes.

#### 6.4 A Análise para $I_e = I_r$

A simplificação 4, em conjunto com a 1 e a 7, faz com que se possa utilizar a equação (2.1) para o cálculo do deslocamento do bimetal, ou seja:

$$z = \frac{\mathbf{a}_b \cdot L_b^2 \cdot (T_b - T_n)}{s_b}$$

onde  $T_n$  é a temperatura na qual o bimetal não apresenta curvatura, e “z”, o deslocamento da ponta livre do bimetal quando este se encontra a temperatura  $T_b$ . Assim, os deslocamentos devidos à temperatura ambiente do bimetal de trabalho e do bimetal de compensação ficam:

$$a = c = \frac{\mathbf{a}_b \cdot L_b^2 \cdot (T_a - T_n)}{s_b}$$

já que, pela simplificação 10, ambos apresentam as mesmas propriedades, e que, pela simplificação 9, o último sempre se encontra à temperatura ambiente.

Designando  $\theta$  como a diferença de temperatura em relação à temperatura ambiente, o deslocamento “q”, medido a partir do deslocamento “a” causado pela

temperatura ambiente, tem-se:

$$q = \frac{\mathbf{a}_b \cdot L_b^2 \cdot \theta_b}{s_b} \quad (6.8)$$

e o valor do deslocamento inicial “o”, tem-se:

$$o = \frac{\mathbf{a}_b \cdot L_b^2 \cdot \theta_o}{s_b}$$

Substituindo-se a equação (6.5), encontrada no modelo térmico simplificado que descreve a variação da temperatura do bimetal  $T_b$ , quando uma corrente  $I_b$  passa pelo enrolamento de aquecimento deste, na equação (6.8), tem-se:

$$z = q_\infty \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) + a$$

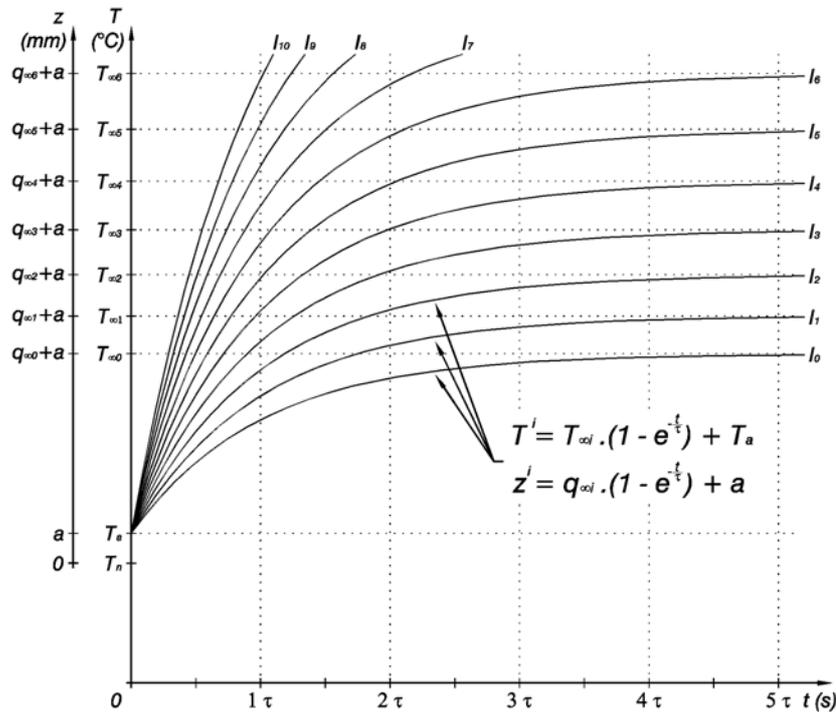
onde  $q_\infty$  é o deslocamento final, atingido em regime permanente a partir da temperatura ambiente, e vale:

$$q_\infty = \frac{\mathbf{a}_b \cdot L_b^2 \cdot \theta_{\infty b}}{s_b} = \frac{\mathbf{a}_b \cdot L_b^2 \cdot R_{b,w} \cdot R_{elét} \cdot I_b^2}{s_b} \quad (6.9)$$

Baseado no resultado obtido com o modelo térmico, as curvas da elevação da temperatura dos bimetais em função do tempo e para diferentes valores de correntes aplicada, têm as formas semelhantes às da Figura 6.5. No gráfico, as curvas representam tanto a temperatura do bimetal quanto seu deslocamento, devido à relação linear entre estas duas variáveis.

Para o deslocamento de um bimetal pré-aquecido a partir da temperatura ambiente, a equação anterior torna-se:

$$q = q_\infty \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) + o \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$



**Figura 6.5: aumento da temperatura e deslocamento do bimetal no tempo para diversas correntes**

Reescrevendo esta equação, pode-se determinar o tempo  $t_p$  em que um bimetal, de parâmetros característicos  $\tau$  e  $q_{\infty}$ , que parte de um deslocamento inicial  $o$ , e atinge um determinado deslocamento  $d$ :

$$t_p = \tau \cdot \ln \frac{q_{\infty} - o}{q_{\infty} - d} \quad (6.10)$$

A Figura 6.6 ilustra graficamente esta informação.

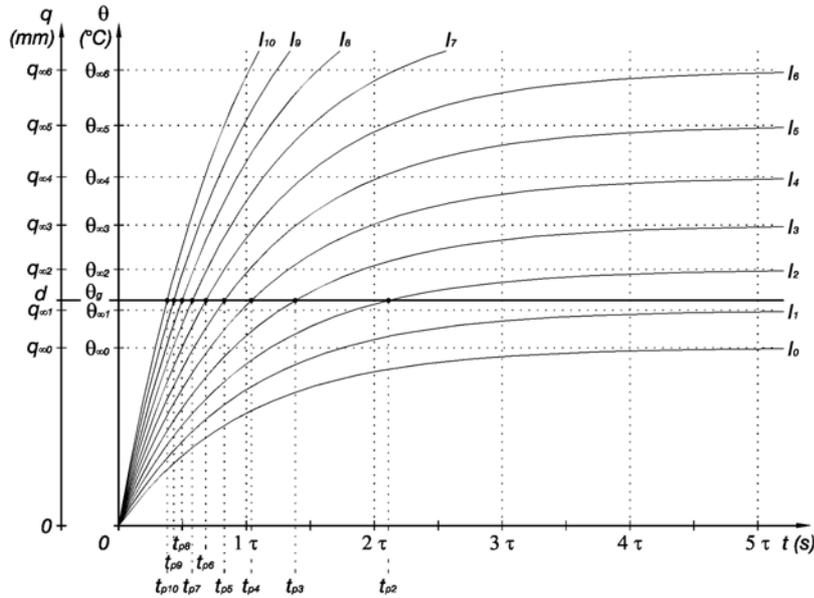
A equação (6.9) indica que o deslocamento  $r$  alcançado pelo bimetal em regime permanente, quando aplicada uma corrente  $I_r$ , vale:

$$r = q_{\infty r} = \frac{\mathbf{a}_b \cdot L_b^2 \cdot R_{b,w} \cdot R_{elét} \cdot I_r^2}{S_b} \quad (6.11)$$

Já o deslocamento final  $q_{\infty}$  atingido em regime permanente a partir da temperatura ambiente quando um valor de corrente  $I_b = p' \cdot I_r$  for aplicado no bimetal será:

$$q_{\infty} = \frac{a_b \cdot L_b^2 \cdot R_{b,w} \cdot R_{elét} \cdot I_b^2}{s_b} = \frac{a_b \cdot L_b^2 \cdot R_{b,w} \cdot R_{elét} \cdot (p' \cdot I_r)^2}{s_b}$$

$$= p'^2 \cdot \left( \frac{a_b \cdot L_b^2 \cdot R_{b,w} \cdot R_{elét} \cdot I_r^2}{s_b} \right) = p'^2 \cdot r$$



**Figura 6.6: tempos para atingir temperatura limite  $\theta_g$  e deslocamento  $d + c$  limite**

A distância  $d$  pode ser vista como associada a uma corrente  $I_g = g' \cdot I_r$ , a qual provoca um deslocamento deste valor em regime permanente, ou seja:

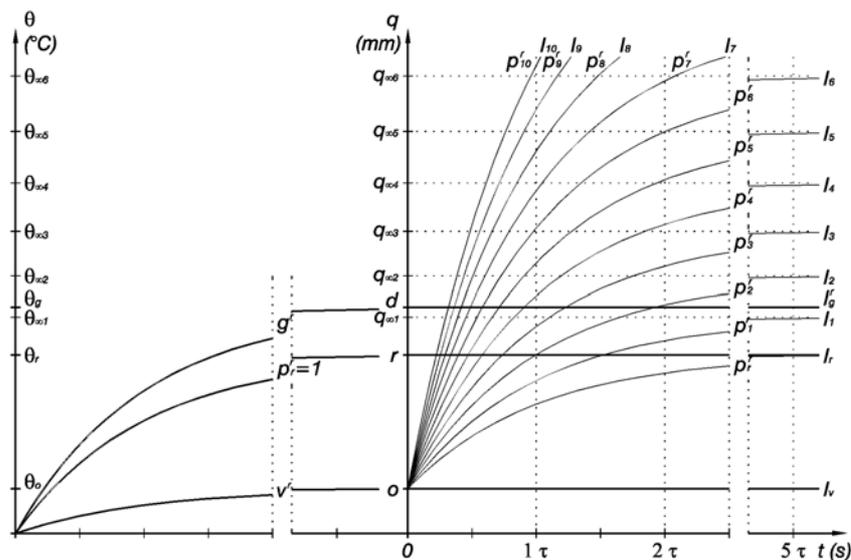
$$d = q_{\infty}(I_g) = \frac{a_b \cdot L_b^2 \cdot R_{b,w} \cdot R_{elét} \cdot I_g^2}{s_b} = \frac{a_b \cdot L_b^2 \cdot R_{b,w} \cdot R_{elét} \cdot (g' \cdot I_r)^2}{s_b}$$

$$= g'^2 \cdot \left( \frac{a_b \cdot L_b^2 \cdot R_{b,w} \cdot R_{elét} \cdot I_r^2}{s_b} \right) = g'^2 \cdot r$$

Da mesma forma, supondo-se agora que uma corrente  $I_v = v' \cdot I_r$  passava inicialmente pelo enrolamento antes de  $t = 0$ , fazendo com que o bimetal atingisse em regime permanente o deslocamento inicial  $o$ , tem-se:

$$o = v'^2 \cdot r$$

A Figura 6.7 ilustra estas definições:



**Figura 6.7: definição das correntes  $I_r$ ,  $I_v$  e  $I_g$**

Substituindo estas expressões de deslocamento na equação (6.10), vem:

$$t_p = \tau \cdot \ln \frac{p'^2 \cdot r - v'^2 \cdot r}{p'^2 \cdot r - g'^2 \cdot r}$$

ou

$$t_p = \tau \cdot \ln \frac{p'^2 - v'^2}{p'^2 - g'^2} \quad (6.12)$$

Para o caso de um determinado DTS, do qual se deseja conhecer a curva característica, e cuja corrente de ajuste do DTS no *dial* esteja ajustado para o valor  $I_r$  (ou seja,  $I_e = I_r$ ), os valores  $p'$ ,  $v'$  e  $g'$  têm os seguintes significados:

- ✓  $p'$  representa valores de sobrecorrente ( $I_b/I_e$ ) do valor  $I_r$  de corrente ajustada;
- ✓  $v' \cdot I_r$  representa a corrente que estava passando pelo enrolamento (e levou o bimetal a uma temperatura estacionária diferente da ambiente) antes do momento  $t = 0$ , quando então uma nova corrente  $p' \cdot I_r$  passa a fluir por este. Assim  $v' = 0$  significa que não havia corrente elétrica aplicada antes de  $t = 0$ , ao passo que  $v' = 1$ , indica que circulava corrente nominal (ou seja,  $I_r$ ) pelo disparador;
- ✓  $g'$  representa o valor de sobrecorrente que faz o DTS atuar para um tempo  $t \rightarrow \infty$ , o qual está definido em normas, e que, para o caso da norma IEC 947-4-1, deve

estar situado entre 1,05 e 1,2.

A fórmula (6.12) representa então a curva característica do DTS, quando ajustado para uma corrente de  $I_r$ . A Figura 6.8 ilustra graficamente a obtenção da curva característica para esta corrente de ajuste. A curva abaixo do eixo de tempos é a própria curva característica (para  $I_e = I_r$ ), rotacionada de 90°.

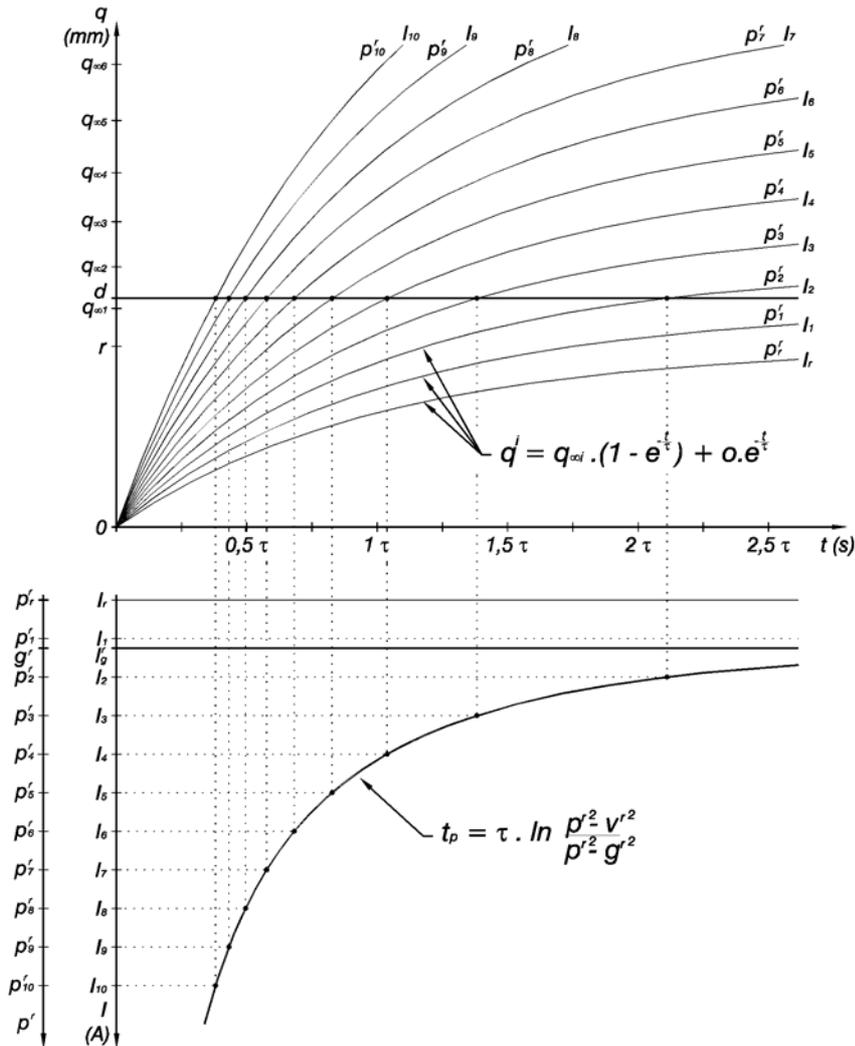


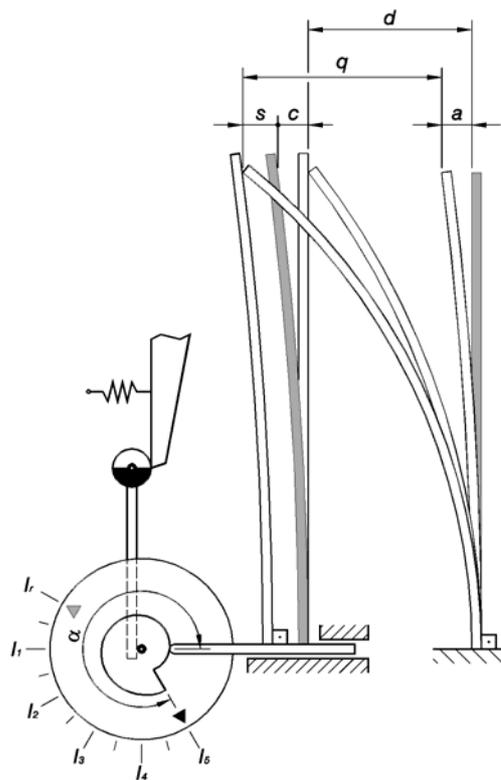
Figura 6.8: curva característica obtida graficamente, para  $I_r$

### 6.5 A Análise para $I_e$ Qualquer

Nesta seção considera-se o caso em que o DTS é ajustado para uma

corrente de valor  $I_e$  qualquer.

Quando o *dial* é girado para um valor  $\alpha$ , correspondente a uma corrente de ajuste  $I_e = k \cdot I_r$  qualquer, o ponto de disparo é deslocado de um valor  $s$ , e o bimetetal deve agora se deslocar de um valor  $q$ , a partir do repouso à temperatura ambiente, para provocar o disparo. A Figura 6.9 ilustra a informação anterior.



**Figura 6.9: deslocamento do ponto de disparo**

Deseja-se agora obter a curva característica do DTS quando ajustado para a corrente  $I_e = k \cdot I_r$ . Define-se então:

$$p = \frac{I_b}{I_e}, \quad g = \frac{I_g}{I_e} \quad e \quad v = \frac{I_v}{I_e} \quad (6.13)$$

Com isto tem-se:

$$p' = \frac{I_b}{I_r} = \frac{I_b}{\left(\frac{I_e}{k}\right)} = k \cdot \frac{I_b}{I_e} = k \cdot p$$

$$g' = k \cdot g$$

$$v' = k \cdot v$$

Substituindo estas relações em (6.12):

$$t_p = \tau \cdot \ln \frac{(k \cdot p)^2 - (k \cdot v)^2}{(k \cdot p)^2 - (k \cdot g)^2} = \tau \cdot \ln \frac{k^2 \cdot p^2 - k^2 \cdot v^2}{k^2 \cdot p^2 - k^2 \cdot g^2}$$

ou

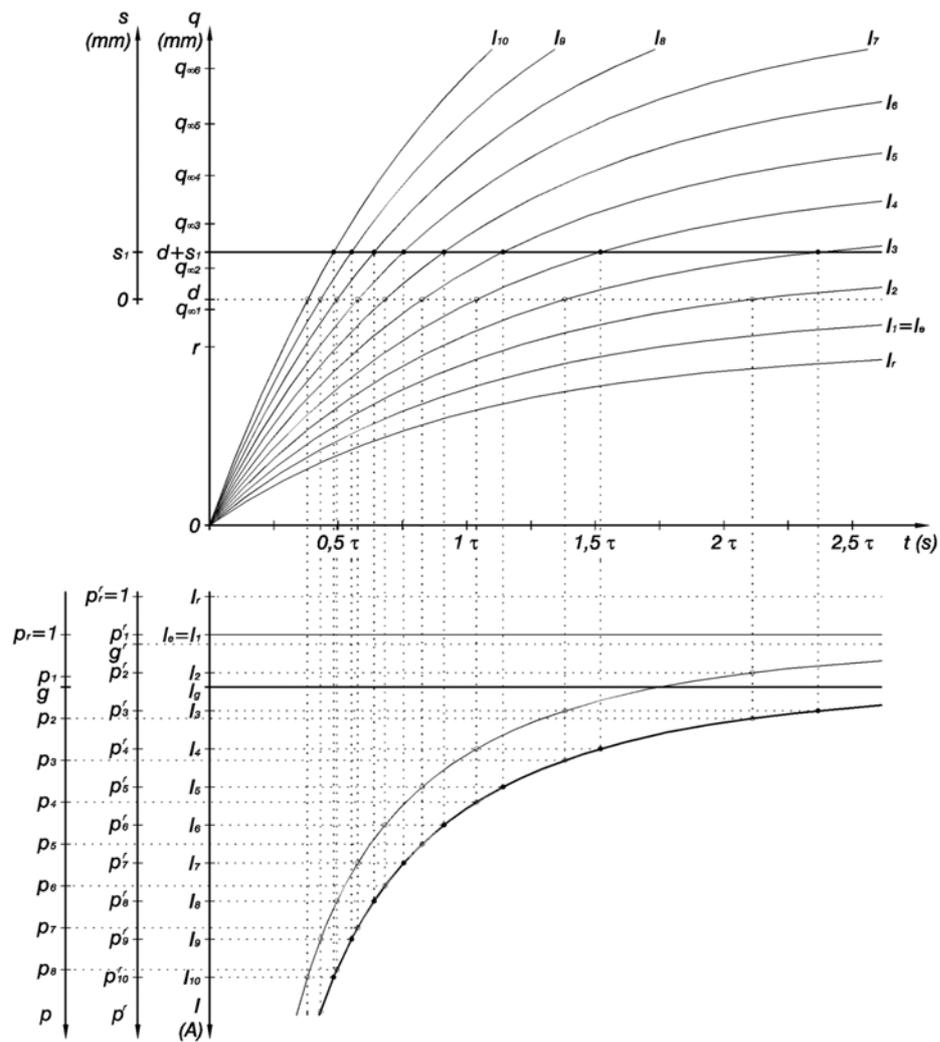
$$t_p = \tau \cdot \ln \frac{p^2 - v^2}{p^2 - g^2} \quad (6.14)$$

Os valores  $p'$ ,  $v'$  e  $g'$  estão relacionados a  $I_r$ , e os valores  $p$ ,  $v$  e  $g$ , a  $I_e$ . Se o DTS for ajustado para a corrente  $I_r$ , ou seja,  $I_e = I_r$ , então  $p' = p$ ,  $v' = v$  e  $g' = g$ . Por isso utiliza-se daqui para frente apenas os termos  $p$ ,  $v$  e  $g$ , a menos que se deseje explicitar a relação com  $I_r$ .

A Figura 6.10 mostra o desenvolvimento para este caso.

Na equação (6.14) os termos  $k$  foram eliminados. Isto significa que a forma da curva característica não muda para diferentes valores de correntes de ajuste  $I_e$ , mudando apenas a escala do eixo, que era  $p'$  e passa a ser  $p$ . A equação então vale para qualquer corrente de ajuste, e representa a forma da curva característica, que era o que se queria determinar. Este fato também responde a questão 4 levantada no capítulo 4. Pode-se dizer que a curva característica mantém-se a mesma se, para o disparador em consideração, as simplificações listadas anteriormente forem válidas. Como num DTS real dificilmente todas as simplificação valem, é esperada uma variação na sua forma para diferentes correntes de ajuste.

Deseja-se agora encontrar relações entre o ângulo de giro  $\alpha$ , e a distância  $s$ , assim como a função que define a posição das marcações, ou seja, a relação entre a posição angular  $\gamma$  e os valores de corrente  $I_e$  marcadas na tampa de disjuntor.



**Figura 6.10: obtenção da curva característica para  $I_e = k \cdot I_r$**

Pela Figura 6.9 vale a seguinte relação:

$$d + c + s = q + a$$

Anteriormente foi visto que  $d$  está relacionado a distância  $r$  através do fator  $g'$ , por:

$$d = g'^2 \cdot r \tag{6.15}$$

Os deslocamentos devido à temperatura ambiente,  $a$  e  $c$ , são considerados iguais, e eliminam-se mutuamente.

A distância  $q$  define o novo ponto de disparo quando o DTS está ajustado

para a corrente  $I_e$ . O desarme deve ocorrer apenas a partir de uma corrente  $g \cdot I_e$  acima da corrente ajustada, assim como no caso em que a corrente ajustada era  $I_r$ . Ou seja,  $q$  representa o valor de deslocamento final atingido em regime permanente para uma corrente aplicada de valor  $g \cdot I_e$ , e portanto:

$$\begin{aligned} q = q_\infty(I_g) &= \frac{\mathbf{a}_b \cdot L_b^2 \cdot R_{b,w} \cdot R_{elét} \cdot I_g^2}{s_b} = \frac{\mathbf{a}_b \cdot L_b^2 \cdot R_{b,w} \cdot R_{elét} \cdot (g \cdot I_e)^2}{s_b} \cdot \frac{I_r^2}{I_r^2} \\ &= \frac{\mathbf{a}_b \cdot L_b^2 \cdot R_{b,w} \cdot R_{elét} \cdot (g \cdot I_r)^2}{s_b} \cdot \frac{I_e^2}{I_r^2} = d \cdot \frac{I_e^2}{I_r^2} \end{aligned} \quad (6.16)$$

Esta é a expressão que relaciona a distância ao ponto de disparo  $q$ , e o valor de corrente  $I_e$  impresso na tampa do disjuntor.

O valor  $s$  é a distância que o ponto de disparo avança em função de um giro  $\alpha$  no *dial*, ou seja,  $s(\alpha)$ . As marcações  $I_e$  estão impressas sobre a tampa do disjuntor em uma certa disposição  $I_e(\alpha)$ . Ambas são funções do ângulo  $\alpha$ .

Substituindo estas expressões na equação (6.16) e rearranjando:

$$s(\alpha) = d \cdot \left( \frac{I_e^2(\alpha)}{I_r^2} - 1 \right) \quad (6.17)$$

Esta expressão relaciona a distância  $s$  e a corrente marcada na tampa do disjuntor.  $s(\alpha)$  representa a função que descreve o perfil do came, e sua forma pode ser escolhida livremente, desde que esteja de acordo com a expressão anterior, que a relaciona com as marcações  $I_e$ . Isto significa que, ou se arbitra o perfil do came  $s(\alpha)$ , tornando a disposição das marcações  $I_e(\alpha)$  sobre a tampa do disjuntor determinada, ou se arbitra estas últimas, fazendo com que o perfil do came esteja definido.

Observa-se que os fabricantes atribuem uma função linear para uma das expressões, da seguinte forma:

$$s(\alpha) = \frac{m}{\alpha_r} \cdot \alpha - m \quad \text{resultando } l_e(\alpha) = l_r \cdot \sqrt{\frac{m}{d \cdot \alpha_r} \cdot \alpha - \frac{m}{d} + 1} \quad (18)$$

ou

$$l_e(\gamma) = \frac{(l_r - l_o)}{\gamma_r} \cdot \gamma + l_o \quad \text{resultando } s(\alpha) = d \cdot \left( \frac{\left( \frac{l_r - l_o}{\alpha_r} \cdot \alpha + l_o \right)^2}{l_r^2} - 1 \right) \quad (19)$$

A escolha entre uma forma e outra é o tema da questão 6 do capítulo 4, e é respondida na seção 6.7.

## 6.6 Análise dos Efeitos das Variações Dimensionais

Tolerâncias de fabricação podem introduzir alterações no valor de cada um dos parâmetros relacionados às propriedades físicas, geométricas ou de transferência de calor, das equações anteriores. Porém é nas dimensões que seus efeitos se mostram mais importantes.

Nesta seção descreve-se a análise realizada no caso de tolerâncias de fabricação introduzirem uma variação dimensional no ponto de disparo.

Para esta análise, considera-se que erros de fabricação adicionaram à distância  $d$  um valor  $e$ , ou seja, para o valor  $d$  de projeto definido por  $d = g^2 \cdot r$ , soma-se mais um termo de valor  $e$ , resultando para a distância ao ponto de disparo um novo valor  $d_e$ . Em termos algébricos:

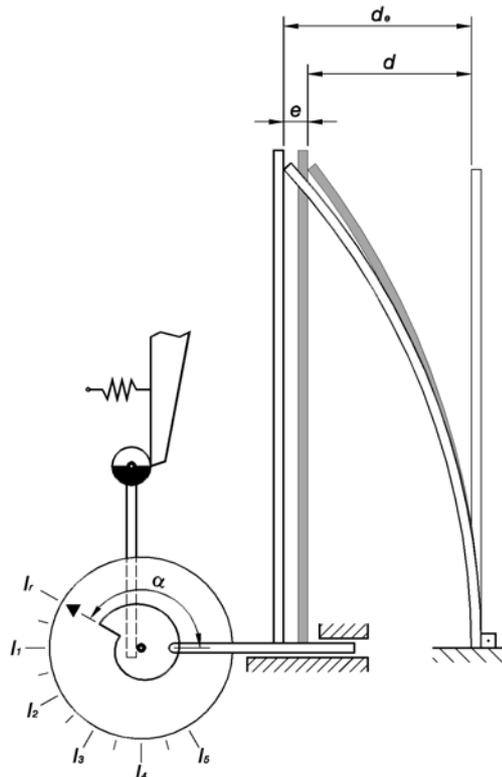
$$d_e = g^2 \cdot r + e \quad (6.20)$$

A Figura 6.11 ilustra a nova condição.

Esta mudança provoca uma alteração na curva característica. Sua expressão continua sendo a da equação (6.14), mas o fator  $g^2$  muda para um valor

$g'_e{}^2$ , pois, pela equação (6.20):

$$g'_e{}^2 = \frac{d_e}{r} = \frac{g'^2 \cdot r + e}{r} = g'^2 + \frac{e}{r}$$



**Figura 6.11: condição do disparador com variação dimensional adicionada**

A alteração do fator  $g'^2$  significa que a menor corrente que provoca o desarme se altera, deslocando a curva característica como um todo no sentido vertical, da mesma forma que ocorre para o caso de uma mudança na corrente  $I_e$  ajustada, como se vê na Figura 6.10.

## 6.7 Análise da Correção da Curva

A operação de correção da curva procura reduzir os efeitos das variações dimensionais de fabricação sobre a curva característica. Nesta seção analisa-se a forma como o método de correção atua sobre estes efeitos, para o modelo proposto.

Nesta análise considera-se que a correção é realizada para uma corrente ajustada  $I_r$ , ou seja,  $I_{\text{marcação}} = I_r$ . Como visto na seção 3.5, pode-se resumir a ação do processo de correção da seguinte maneira: a atuação ocorre sobre o *dial*, que é girado até que a distância adicional introduzida pelas variações dimensionais seja eliminada. Neste ponto é feita a impressão da seta de indicação de corrente ajustada ( $h$ ) sobre o *dial*. A Figura 6.12 ilustra o processo para o disparador simplificado.

Pela figura, verifica-se que a seta é posicionada a um ângulo  $\varepsilon$  do ponto para o caso em que não há distâncias adicionais introduzidas por variações dimensionais de fabricação. Este giro produz um recuo do ponto de disparo equivalente a  $s(\alpha_r - \varepsilon)$ , e o novo ponto de disparo situa-se agora a uma distância  $d_c$ .

Pela figura vale:

$$d_c = d + e - s(\alpha_r - \varepsilon) \quad (6.21)$$

e

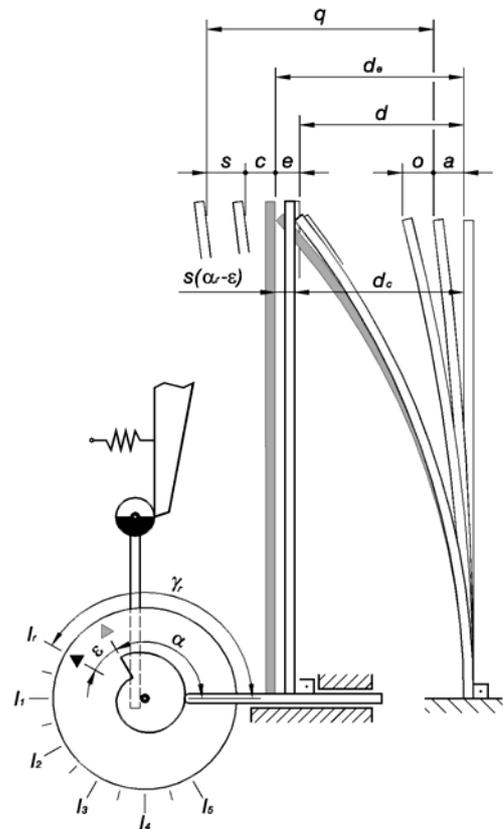
$$q + a = s + c + s(\alpha_r - \varepsilon) + d_c \quad (6.22)$$

Se a correção for bem realizada, o recuo deverá eliminar o erro:

$$s(\alpha_r - \varepsilon) = e$$

e portanto

$$d_c = d$$



**Figura 6.12: a atuação do processo de correção**

que é o valor inicial de projeto, e o DTS fica corrigido para esta corrente ajustada ( $I_r$ ). A questão levantada anteriormente pergunta se o procedimento de correção elimina o erro para todos os valores de correntes ajustáveis. Para elucidar o caso, seguiu-se o raciocínio a seguir.

Para ajustar o DTS para uma determinada corrente de ajuste  $I_e$ , o *dial* é girado até a seta apontar para este valor. O *dial* fica posicionado a um ângulo  $\alpha - \varepsilon$ , e o ponto de disparo desloca-se de um valor  $s(\alpha - \varepsilon)$  a partir do valor não corrigido  $s(\alpha)$ . O mesmo recuo  $s(\alpha_r - \varepsilon)$ , provocado pela correção para uma corrente de ajuste  $I_r$ , deve ser introduzido em todas as posições de corrente de ajuste, ou seja:

$$s(\alpha - \varepsilon) = s(\alpha) + s(\alpha_r - \varepsilon)$$

A equação anterior é satisfeita para todos os valores de  $I_e$  dependendo da função do came. Para o caso de uma função linear para o came, tem-se:

$$s(\alpha_r - \varepsilon) = \frac{m}{\alpha_r} \cdot (\alpha_r - \varepsilon) - m = -\frac{m \cdot \varepsilon}{\alpha_r}$$

e

$$s(\alpha - \varepsilon) = \frac{m}{\alpha_r} \cdot (\alpha - \varepsilon) - m = \frac{m \cdot \alpha}{\alpha_r} - m - \frac{m \cdot \varepsilon}{\alpha_r} = s(\alpha) + s(\alpha_r - \varepsilon)$$

e portanto o erro é eliminado para todas as posições de corrente de ajuste.

Para o caso de uma disposição linear das marcações sobre a tampa, tem-se:

$$s(\alpha_r - \varepsilon) = d \cdot \left( \frac{(\alpha_r \cdot I_r - \varepsilon \cdot I_o + \varepsilon \cdot I_o)^2}{\alpha_r^2 \cdot I_r^2} - 1 \right)$$

e

$$s(\alpha - \varepsilon) = d \cdot \left( \frac{(\alpha \cdot (I_r - I_o) - \varepsilon \cdot (I_r - I_o) + \alpha_r \cdot I_r)^2}{\alpha_r^2 \cdot I_r^2} - 1 \right) \neq s(\alpha) + s(\alpha_r - \varepsilon)$$

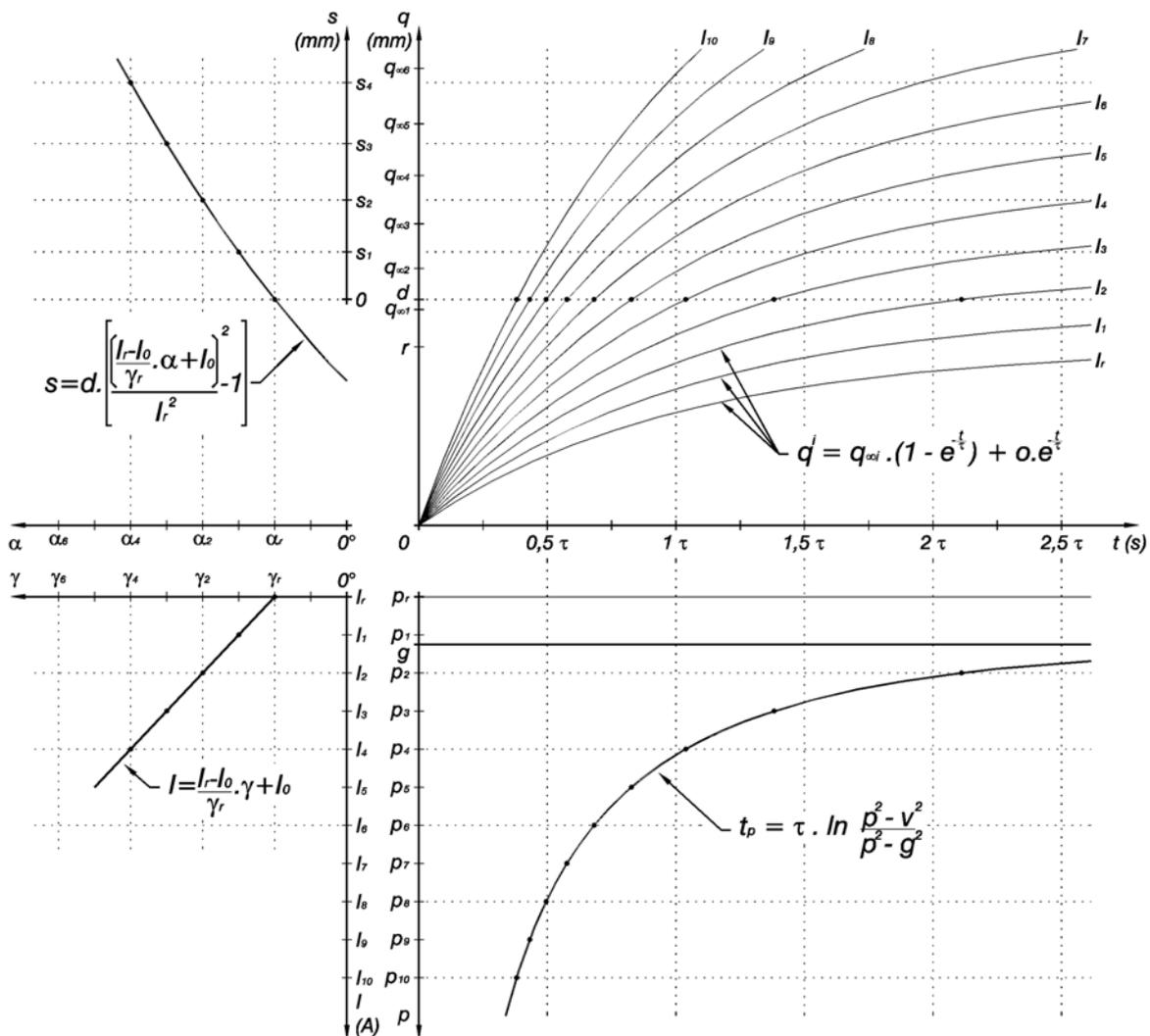
Portanto, neste caso, não ocorre eliminação do erro para todos os pontos. Este fato responde também a questão 9, na qual se pergunta se é necessária

alguma condição para que a correção da curva fosse feita com o *dial*. Pelo visto aqui, existe uma condição necessária: que o perfil do came seja uma função linear.

A questão 6 a respeito da melhor configuração para as marcações também fica respondida, visto que para marcações igualmente espaçadas, o procedimento de correção da curva característica não elimina o erro para todas as posições de correntes de ajuste. Uma outra razão bastante convincente para não se utilizar esta configuração é que o uso de marcações igualmente espaçadas pode levar a necessidade de criar *dial*'s com um perfil de came específico para cada DTS de faixa de corrente diferente, tornando o produto menos econômico.

Para que seja melhor entendido o efeito causado pela correção da curva, pode-se adicionar aos gráficos de obtenção da curva característica (Figura 6.8), outros dois, idealizando um diagrama formado de quatro gráficos dispostos um em cada quadrante. No primeiro quadrante estão desenhadas as curvas do deslocamento do bimetal em função do tempo. No segundo, está desenhada a relação entre o deslocamento  $s$  produzido pelo *dial* e seu ângulo de giro  $\alpha$ . No terceiro, apresenta-se a relação angular com que as correntes  $I_e$  são impressas sobre a tampa do disjuntor. E finalmente, no quarto quadrante, a curva característica resultante. A Figura 6.13 apresenta o diagrama para o caso de marcações igualmente espaçadas.

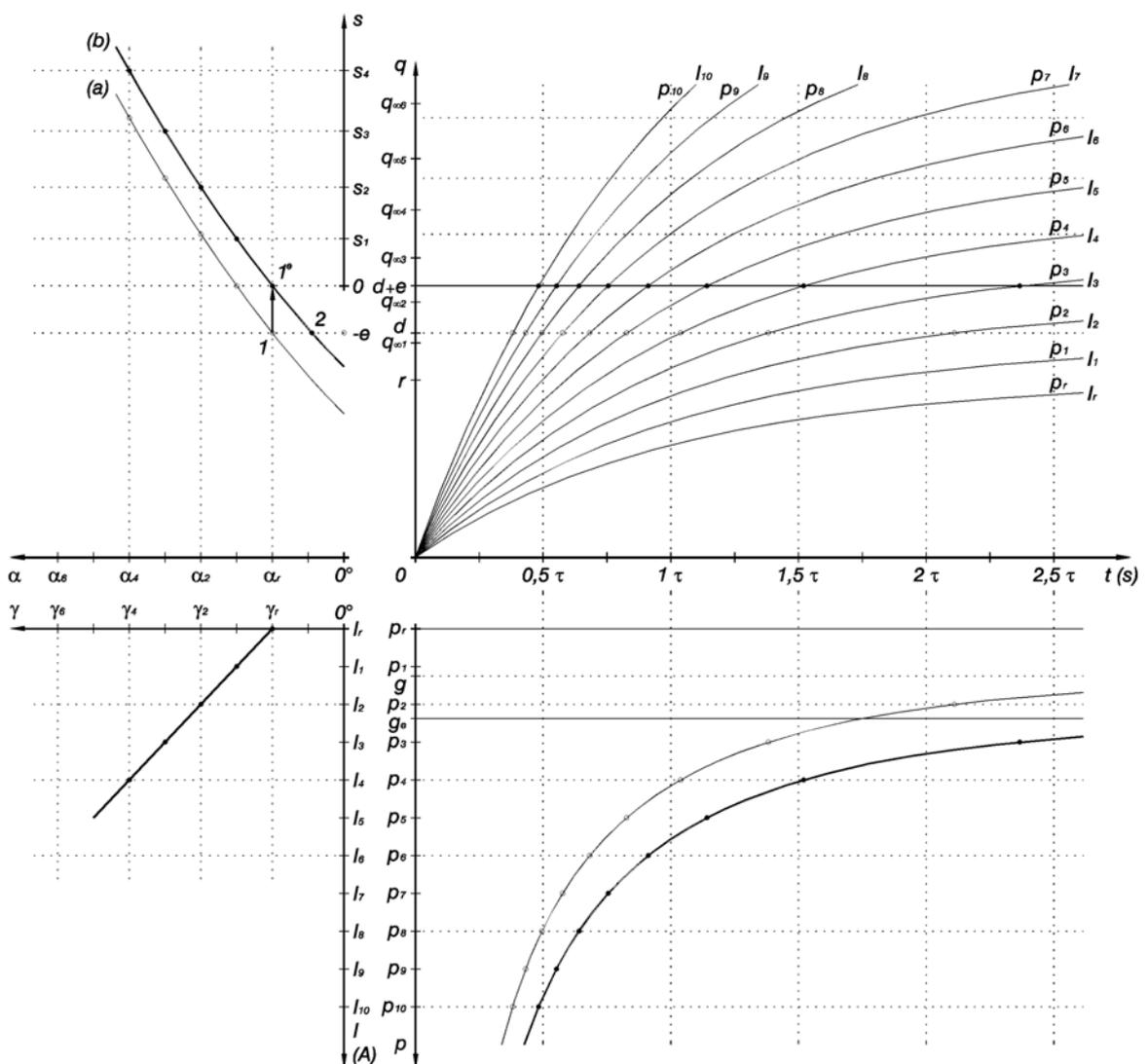
O diagrama permite uma visualização gráfica dos efeitos do ajuste da corrente, da introdução de erros causados por variações dimensionais de fabricação e do procedimento de correção da curva característica.



**Figura 6.13: o diagrama de quatro quadrantes de um DTS**

Quando o ajuste da corrente  $I_e$  é feito, o valor desta corrente é escolhido no eixo das correntes do 3º quadrante, o que pela curva deste quadrante também define o ângulo onde a marcação impressa desta corrente se localiza sobre a tampa do disjuntor. O *dial* deve ser girado para este mesmo ângulo, expresso agora pelo eixo dos ângulos  $\alpha$  do 2º quadrante. A curva deste quadrante define um deslocamento  $s$  do ponto de disparo, o qual define o novo ponto de disparo no eixo dos deslocamentos  $q$ , do gráfico do 1º quadrante. Com este ponto de disparo definido, e a partir das curvas de deslocamento, determina-se a curva característica do DTS como anteriormente, no gráfico do 4º quadrante.

O efeito causado por variações dimensionais de fabricação está ilustrado no gráfico da Figura 6.14. Pelo gráfico, quando a distância ao ponto de disparo sofre uma alteração de um valor  $e$ , as curvas de deslocamento têm agora um novo deslocamento-limite  $d + e$ , provocando uma variação na curva característica. Além disso, a curva que relaciona o giro do *dial* ao deslocamento  $s$  move-se inteiramente verticalmente (movimento mostrado pelas curvas original (a) e alterada (b)), seguindo a mudança provocada pelo erro  $e$ , e deslocando o ponto 1 - que é o ponto de ajuste de corrente para  $I_e = I_r$  - para um novo ponto,  $1^e$ .



**Figura 6.14: o efeito das variações dimensionais de fabricação**

O processo de correção produz um recuo no ângulo do *dial*, de forma que agora quando este é ajustado para uma determinada corrente, ele é posicionado a

um ângulo  $\varepsilon$  do ponto onde se encontraria sem a correção. Isto é demonstrado no gráfico da Figura 6.15 pelo deslocamento do eixo  $\gamma$ , levando consigo a curva do 3º quadrante da posição (d) para (e).  $\varepsilon$  é o ângulo entre os pontos 3 e 3<sup>e</sup>, sendo que este último é o ponto desta curva que correspondente com o ponto 2 por onde a curva do giro do *dial* passa pelo ponto limite  $d$  original, e a curva característica volta a sua posição inicial.

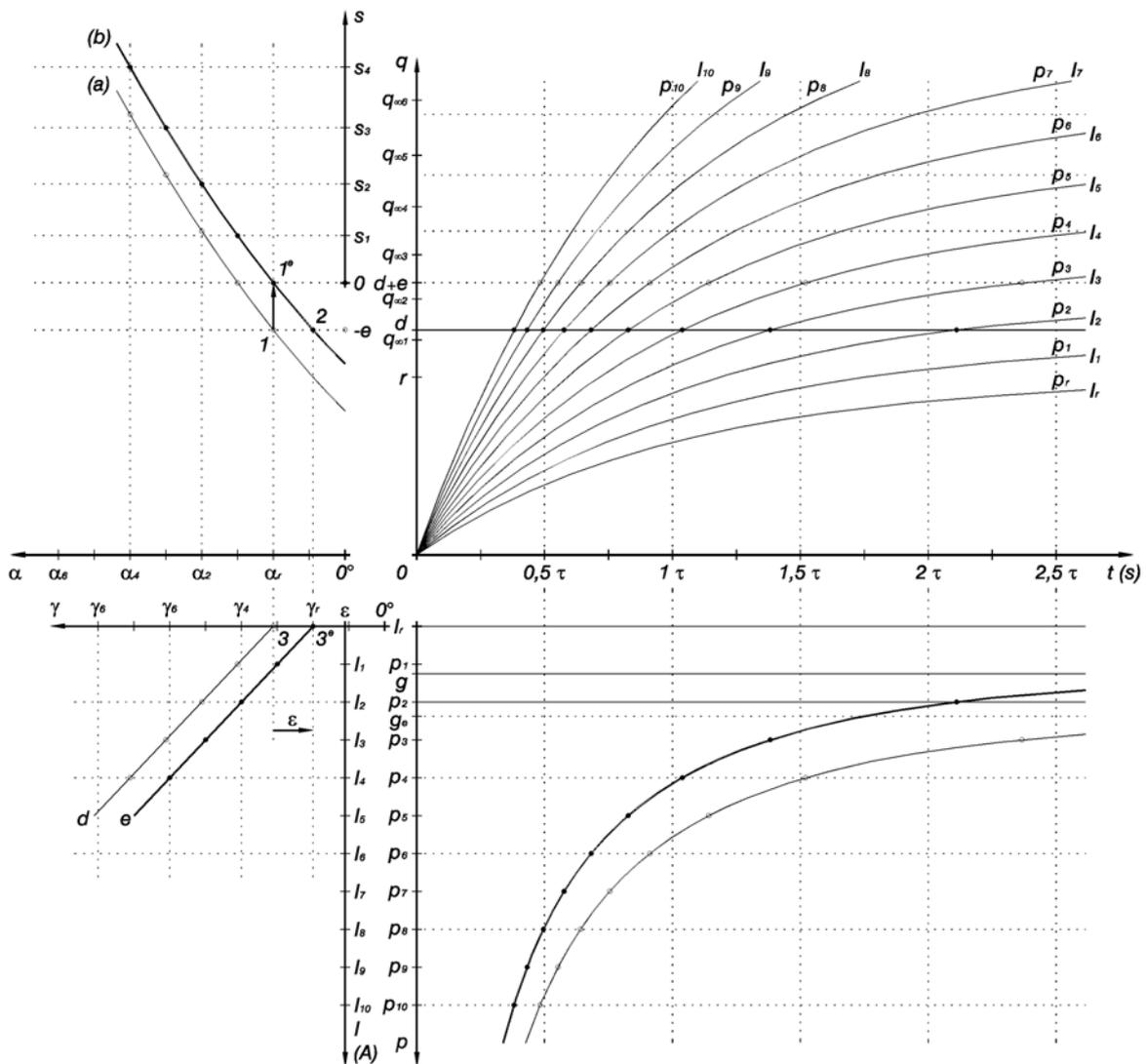


Figura 6.15: o efeito da correção sobre a curva característica

As conseqüências do processo de correção podem ser melhor avaliadas se o deslocamento do eixo, relativo ao recuo do *dial*, for realizado com o eixo  $\alpha$ , ao invés do eixo  $\gamma$ , conforme ilustrado na Figura 6.16. Nesta figura, o deslocamento do eixo  $\alpha$  leva a curva (b) para a posição (c), para posicionar o ponto 2 em  $2^\circ$ , sobre o ponto 1 original. A nova curva do giro do *dial* (c), não coincide com a curva (a) original, indicando que para valores de corrente ajustada  $I_e$  diferentes de  $I_r$ , o posicionamento do ponto de disparo não é o correto.

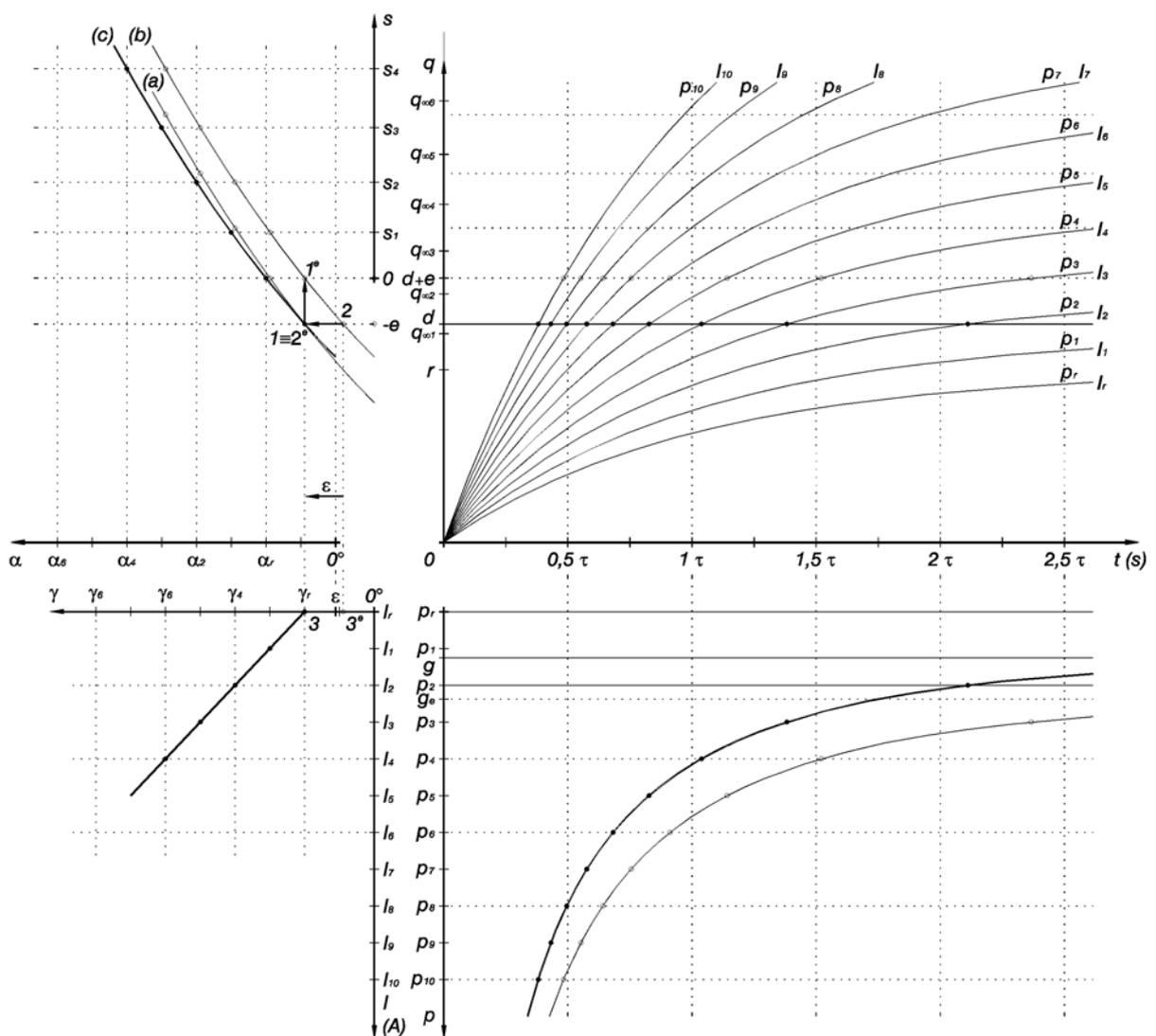


Figura 6.16: o efeito da correção, visto com o deslocamento do eixo  $\alpha$

A mesma análise gráfica pode ser feita para o caso de relação linear entre o giro do *dial* e o deslocamento do ponto de disparo, que o gráfico da Figura 6.17 ilustra.

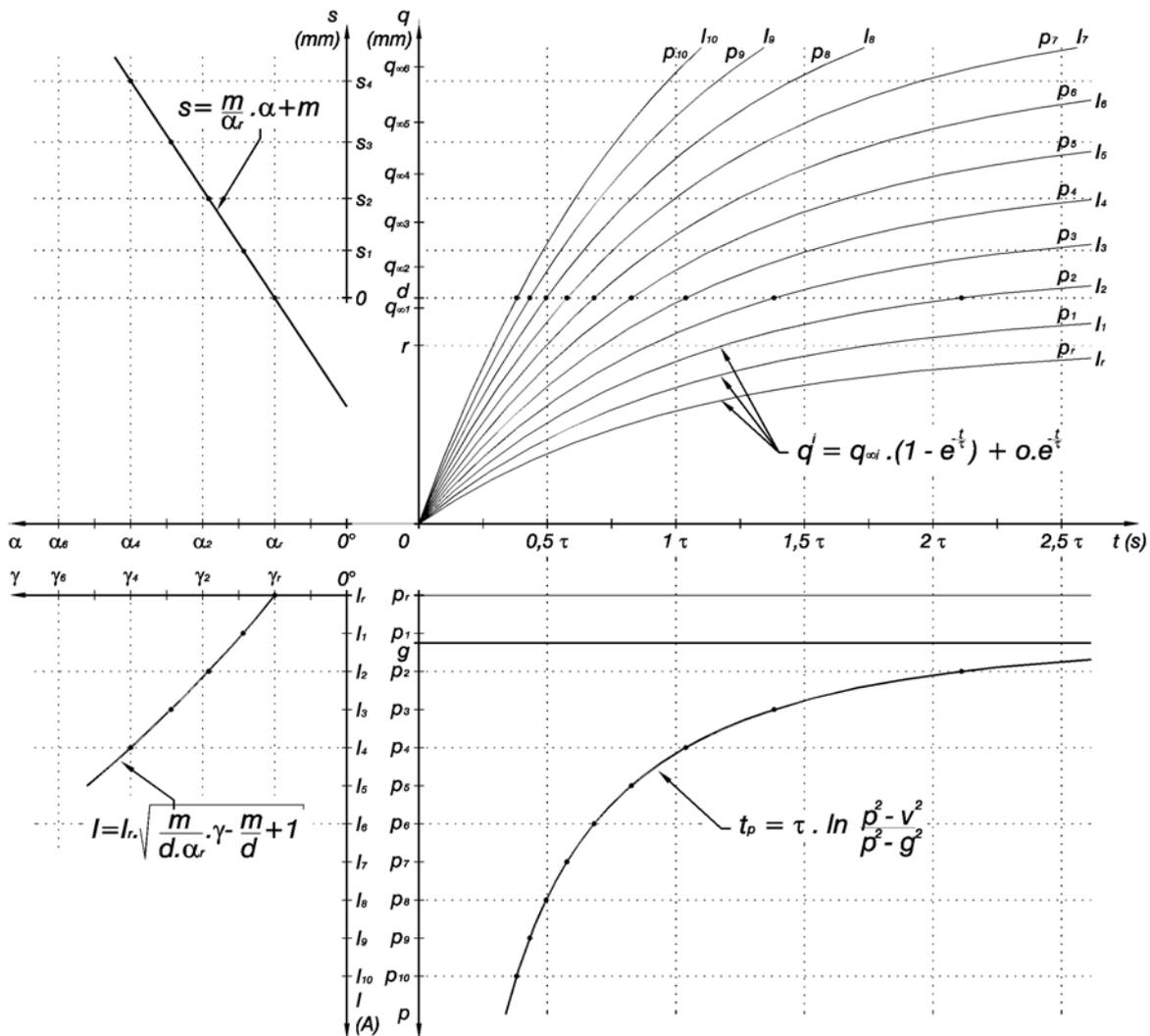


Figura 6.17: o diagrama para relação linear entre  $\alpha$  e  $s$

Neste caso, um erro e no posicionamento do ponto de disparo faz a curva (a) do giro do dial se situar em (b), e o ponto 1 em 1<sup>o</sup>, conforme a Figura 6.18 ilustra. A correção faz o ponto 2, que é o ponto onde a nova curva passa pela posição do deslocamento  $d$  inicial, passar para 2<sup>o</sup>, coincidindo com o ponto 1 original. Como a posição da nova curva coincide em todos os pontos da curva original, a correção faz todas as marcações ficarem em sua posições corretas, e nenhum erro remanesce em toda a faixa de ajuste de corrente.

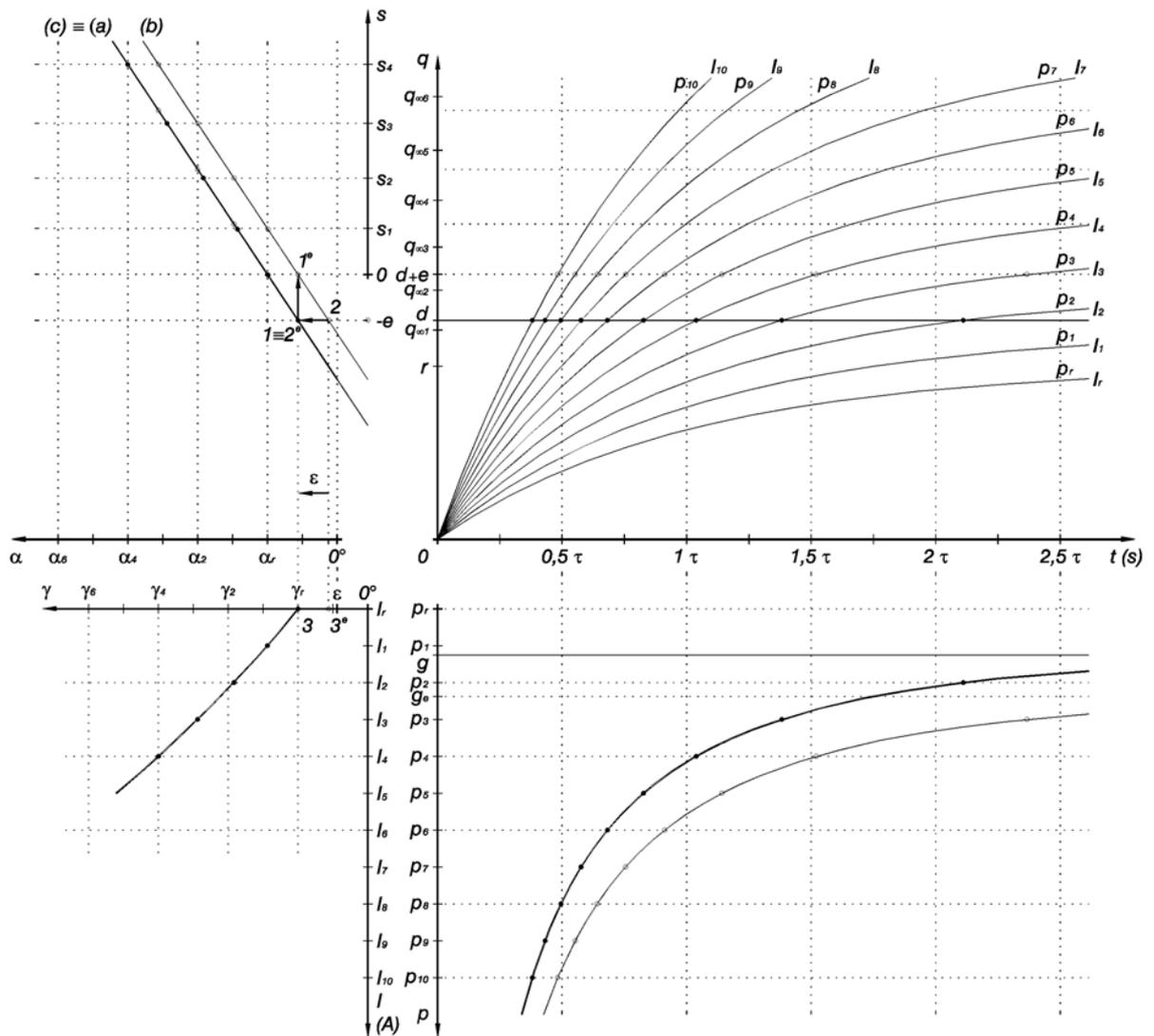


Figura 6.18: a correção para o caso  $\alpha$  proporcional a  $s$

### 6.8 Discussão

A partir de algumas simplificações, chegou-se a um modelo que descreve basicamente o funcionamento de um DTS. Deste modelo simplificado pôde-se extrair a sua curva característica numa forma algébrica, pela equação (6.14), reproduzida abaixo.

$$t_p = \tau \cdot \ln \frac{p^2 - v^2}{p^2 - g^2}$$

Nesta equação, os termos têm os seguintes significados:

- ✓  $p$  é a variável independente, e representa o valor de sobrecorrente da corrente de ajuste, ou seja,  $I_b/I_e$  (valor adimensional);
- ✓  $t_p$  é a variável dependente e representa o tempo decorrido desde a aplicação da corrente até o momento do desarme, para um dado valor de sobrecorrente  $p$ ;
- ✓ o termo  $v$  representa uma condição de pré-aquecimento do bimetálico: se o DTS parte do estado frio, ou seja, os bimetálicos estavam anteriormente a temperatura ambiente,  $v$  vale 0; se o disparador parte do estado quente, ou seja, pelos bimetálicos passava corrente nominal  $I_e$ , então  $v$  tem valor 1;
- ✓ o termo  $\tau$  é um parâmetro relacionado às propriedades dos materiais e à geometria do conjunto do bimetálico, origina diretamente da equação (6.6) do modelo térmico, e representa a constante de tempo térmica das curvas de aquecimento do bimetálico;
- ✓  $g$  é o valor da menor sobrecorrente  $I_b/I_e$  que faz o DTS desarmar, ou seja, é a corrente limite.

O termo  $g$ , apesar de representar um valor que se deseja manter restrito dentro dos valores prescritos por norma, e portanto pode ser visto como tendo seu valor já determinado, também pode ser considerado como um parâmetro da geometria do DTS, pois pelas equações (6.16), (6.21) e (6.22):

$$g^2 = \frac{s + d + e - s(\alpha_r - \varepsilon) + c - a}{r \cdot I_e^2 / I_r^2} \quad (6.23)$$

Na equação, os parâmetros estão assim definidos:

- ✓  $s$  é o avanço provocado pelo giro do *dial*, medido a partir do ponto onde as variações dimensionais de fabricação levaram o ponto de disparo para um ajuste  $I_e = I_r$ , antes da correção;
- ✓  $d$  é a distância até o ponto de desarme quando o DTS está ajustado para  $I_r$ ;
- ✓  $e$  é o erro no deslocamento introduzido por variações dimensionais de fabricação;
- ✓  $s(\alpha_r - \varepsilon)$  é o recuo provocado pelo procedimento de correção, e que procura

eliminar o erro  $e$ ;

- ✓  $c$  e  $a$  são os deslocamentos provocados pela temperatura ambiente nos bimetálicos de operação e de compensação, respectivamente;
- ✓  $r$  é o deslocamento final atingido para uma corrente  $I_r$ , e está definido pela equação (6.11), a partir de valores dimensionais e de propriedades dos materiais do bimetálico e de transmissão de calor.

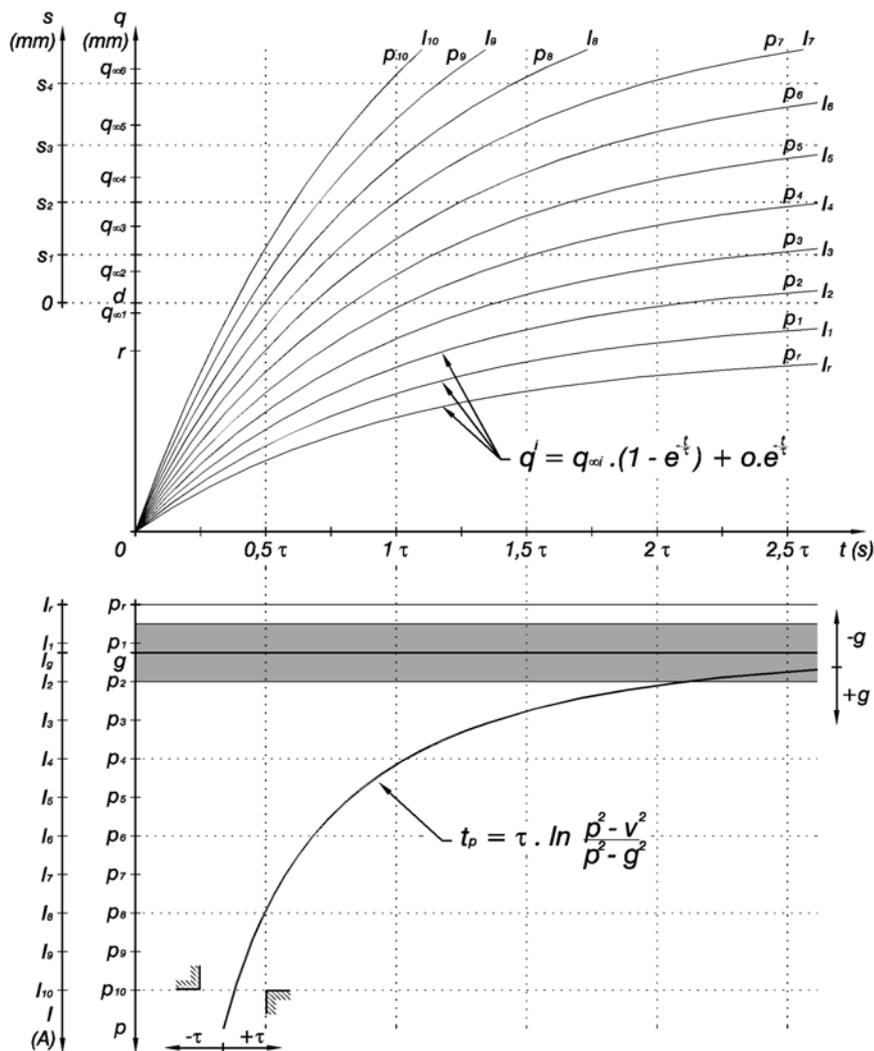
Influem no valor de  $g$ , portanto, parcelas devido a variações dimensionais de fabricação, ao método de correção, a dimensões e a propriedades do material do bimetálico. Desta forma o parâmetro  $g$  pode ser visto como definido pela equação (6.23), e cujo valor deve ser mantido dentro do limite normalizado (1,05 a 1,2, pela IEC 947-4-1) pela correta manipulação dos valores dos parâmetros anteriores.

Considerando os termos  $g$  e  $\tau$  como parâmetros relacionados à geometria e às propriedades do sistema, é relevante analisar a maneira através da qual estes parâmetros alteram a forma da curva característica do DTS, para que se tenha conhecimento de onde atuar para ajustá-la aos limites de norma, tanto em projeto quanto no procedimento de correção da curva, depois da montagem do disjuntor.

Neste sentido, a Figura 6.10 da seção 6.5 mostrou o que ocorre com a curva característica quando se altera a corrente limite. Visto que  $g$  representa a corrente limite do DTS, conclui-se que a curva característica se desloca da esquerda para a direita (verticalmente pela figura), quando o valor de  $g$  é alterado. Já a influência na curva característica pode ser percebida na mesma Figura 6.10, observando-se o eixo dos tempos  $t$ . Neste eixo, as marcações são em termos de  $\tau$ , e portanto, se este parâmetro for alterado, a escala do eixo dos tempos seria alterada da mesma forma, e isto significa que o parâmetro  $\tau$  modifica a curva característica do disparador deslocando-a no sentido vertical (horizontal pela figura). A Figura 6.19 mostra graficamente como estes dois parâmetros alteram a forma da curva característica.

Variações no posicionamento do ponto de disparo, causadas por variações dimensionais de fabricação afetam o valor de  $g$ , conforme indica a equação (6.23). Pela mesma fórmula, nota-se que o termo relacionado à correção da curva,  $s(\alpha_r \varepsilon)$ , entra apenas na fórmula do parâmetro  $g$ , não atuando sobre o valor

de  $\tau$ . Isto significa que, se por falha na fabricação do disjuntor o valor de  $g$  é diferente do ideal, este pode ser ajustado depois da montagem do produto. O mesmo não acontece com  $\tau$ , que está relacionado apenas a propriedades dos materiais e a fatores ligados à transmissão de calor do sistema, e portanto não pode receber ajuste em seu valor depois do produto montado. O processo de correção atua apenas sobre o valor de  $g$ , e apenas ele será alterado para adequar a curva a limites normalizados. Se  $\tau$  não tiver um valor aceitável depois do conjunto bimetálico ser fabricado, há poucas chances deste componente ser utilizado num DTS.



**Figura 6.19: a influência dos parâmetros  $g$  e  $\tau$  sobre a curva característica de DTS's**

Para o modelo desenvolvido, a curva característica pôde ser expressa

algebricamente, na forma da equação (6.14). A partir dos limites relacionados em normas, pode-se calcular os valores ideais e a faixa de valores aceitável para os dois parâmetros  $\tau$  e  $g$ , considerando estes limites como condições de contorno, que entram na equação da curva característica, resultando nos valores procurados. A Tabela 6.1 relaciona as condições de contorno originadas dos limites da norma IEC 947-4-1 listados na Tabela 6.1, para todas as classes de disparo.

**Tabela 6.1: condições de contorno para determinação de  $g$  e  $\tau$**

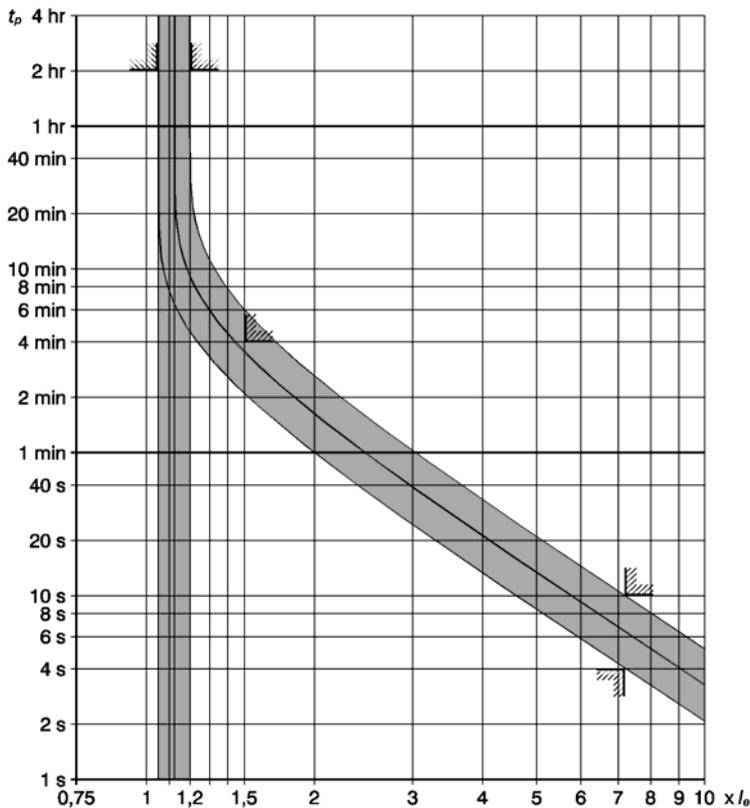
Para:	Classe de disparo	Condição
$\frac{dt}{dp} \rightarrow \infty$	Todas	$1,05 < p \leq 1,2$
$p = 1,5$ e $v = 1$	10A 10 20 30	$t < 2$ min $t < 4$ min $t < 8$ min $t < 12$ min
$p = 7,2$ e $v = 0$	10A 10 20 30	$2 < t \leq 10$ s $4 < t \leq 10$ s $6 < t \leq 20$ s $9 < t \leq 30$ s

A primeira condição reflete o fato de que a assíntota  $\frac{dt}{dp} \rightarrow \infty$ , da equação da curva característica, deve estar dentro de um valor de sobrecorrente  $p$ , de 1,05 a 1,2.

Substituindo estes valores de  $p$ ,  $v$  e  $t_p$  na equação da curva característica, pode-se obter os valores adequados para os parâmetros  $\tau$  e  $g$ . Os valores obtidos estão listado na Tabela 6.2.

**Tabela 6.2: valores adequados para  $g$  e  $\tau$ , por classe de disparo**

Parâmetro	Classe de disparo	Faixa de valores adequados	Valor ideal
$g$	Todas	$1,05 < g \leq 1,2$	$g = 1,125$
$\tau$	10A	$1,55 < \tau < 4,61$	$\tau = 2,67$ min
	10	$3,10 < \tau \leq 5,92$	$\tau = 4,28$ min
	20	$4,65 < \tau \leq 11,83$	$\tau = 7,42$ min
	30	$6,98 < \tau \leq 17,75$	$\tau = 11,13$ min



**Figura 6.20: curvas características ideais**

valores-limite encontrados. A Figura 6.20 apresenta este gráfico para DTS's da classe 10.

A obtenção da forma algébrica para a curva característica deste modelo só foi possível porque a equação (6.6), que descreve o modelo térmico, pode ser reescrita isolando-se o termo  $t$ . Para modelos térmicos mais refinados não será possível ter a curva característica expressa na forma algébrica. O mesmo pode ser dito sobre a determinação da influência dos parâmetros sobre a forma da curva característica, que deverá ser muito difícil de determinar.

Para o modelo desenvolvido, a curva característica não se altera com a corrente ajustada, e isto se deve a dois fatores: a constante de tempo  $\tau$  não varia com a corrente aplicada, o único parâmetro que varia são os deslocamentos finais atingidos em regime permanente  $q_{\infty}$ ; e estes deslocamentos finais variam com a corrente por uma função:

Os valores limites de  $g$  já eram conhecidos, e seu valor ideal foi calculado pela média dos dois valores. O valor ideal para  $\tau$  foi calculado pela média geométrica dos dois valores-limite encontrados.

Com estes valores pode-se, inclusive, gerar um gráfico com a forma da curva característica ideal para o caso deste modelo simplificado, assim como da faixa de curvas que podem ser geradas com a variação dos parâmetros dentro dos

$$q_{\infty} = m \cdot I_b^n \quad (6.24)$$

de forma que o quociente  $q_{\infty}(I_b)/q_{\infty}(I_e)$  resulte num valor que dependa apenas do quociente  $I_b/I_e$ , e não dependa das correntes  $I_b$  e  $I_e$  isoladamente.

No modelo desenvolvido foi encontrado, para a potência  $n$  da fórmula (6.24), o valor 2, originado do modelo térmico na equação (6.9). O valor desta potência entra diretamente na equação da curva característica (6.14), e na relação entre o deslocamento  $s$  e a posição das marcações  $I_e$  sobre a tampa do disjuntor, equação (6.17). Isto significa que o posicionamento destas marcações é definida pela relação da equação (6.24).

A análise efetuada neste capítulo foi baseada no modelo elaborado com as simplificações listadas inicialmente. É certo que o sistema real não suporta estas simplificações, e elas não podem ser usadas numa análise refinada mais completa. Mas as conclusões anteriores obtidas por meio delas são válidas, ainda que até certo ponto, para modelos mais próximos ao real e estas conclusões podem ser usadas como princípio para o entendimento do sistema e para a elaboração de modelos mais refinados.

Modelos mais refinados terão mais parâmetros do que o modelo desenvolvido neste capítulo, e a determinação da influência individual de cada parâmetro será muito difícil ou mesmo impossível; porém, ainda assim, pode-se afirmar que, por princípio, constantes de tempo movem a curva característica no sentido vertical, e fatores ligados à distância do bimetálico ao ponto de disparo movem a curva no sentido horizontal. Também como um princípio, pode-se afirmar que, se o único parâmetro que variar com a corrente nas curvas de deslocamento do bimetálico for o deslocamento final atingido e esta dependência puder ser expressa como uma equação semelhante à (6.24), então é de se esperar que a curva característica tenha a mesma forma para todos os pontos de ajuste de corrente.

O gráfico de quatro quadrantes apresentado na Figura 6.13, também pode ser usado na verificação prévia da forma da curva característica de DTS's reais, a partir de dados experimentais, quando se desconsidera o efeito das outras fases e das forças envolvidas. A Figura 6.21 mostra um exemplo de sua aplicação.

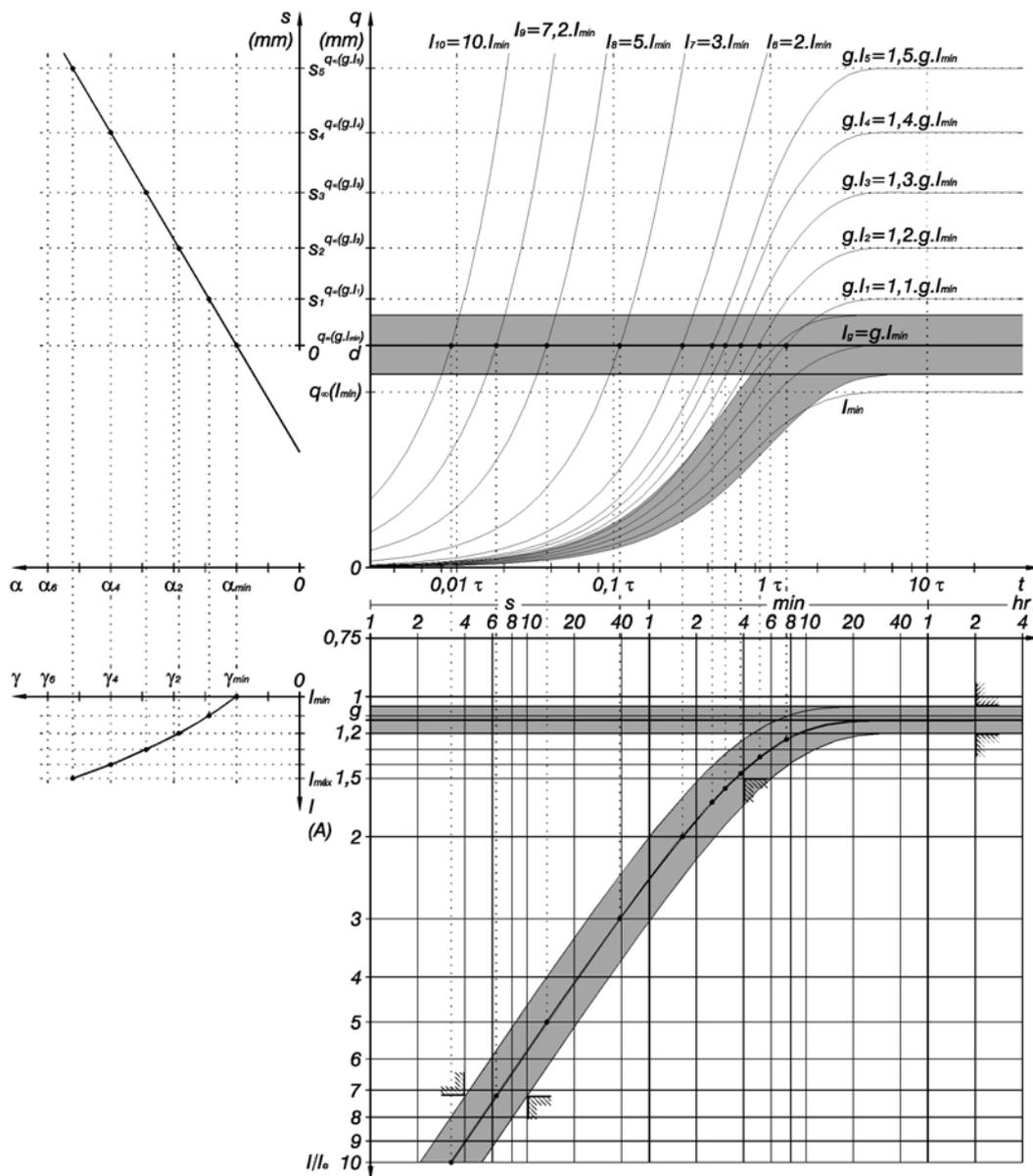


Figura 6.21: exemplo prático do uso do gráfico de quatro quadrantes

Abaixo estão listados resumidamente os passos seguidos nesta análise:

1. verificaram-se as restrições impostas por norma à forma da curva característica;
2. um modelo matemático foi idealizado, o qual descreve o comportamento térmico do conjunto bimetálico, e no qual as propriedades geométricas e dos materiais estão representadas;
3. através deste modelo obteve-se a forma da curva característica. Neste caso a forma da curva pöde ser expressa algebricamente, na forma da equação (6.14), onde os parâmetros que representam as propriedades geométricas e dos

- materiais ( $g$  e  $\tau$ , neste caso) estão incluídos;
4. verificou-se a influência dos parâmetros geométricos e de materiais na forma da curva característica. Neste caso  $g$  desloca a curva horizontalmente e  $\tau$ , verticalmente;
  5. encontraram-se as faixas de valores adequados para cada um dos parâmetros e também seus valores ideais, que satisfaçam os requisitos da norma;
  6. verificou-se de que maneira as variações dimensionais de fabricação podem alterar a curva característica;
  7. verificou-se de que forma a correção das variações dimensionais de fabricação pode atuar sobre a forma da curva característica, de maneira que ela passe a respeitar restrições de norma.

## 6.9 Correspondência do Modelo com as Relações Definidas

As equações e variáveis definidas no capítulo 5 estão relacionadas com as simplificações, equações e variáveis encontradas neste capítulo, conforme relacionado a seguir:

- ✓ a simplificação 5, em conjunto com a 6, faz com que se possa considerar o DTS como um dispositivo de apenas uma fase, tornando a relação  $f_5$  sem sentido, e  $z_{alav}$  torna-se  $z_b$ ;
- ✓ a simplificação 6 gera uma grande redução de funções: as relações  $f_4''$ ,  $f_6'$ ,  $f_6^V$  e  $f_9$  perdem o significado. As relações  $f_4'$  e  $f_6''$  tornam-se as expressões de  $f_4$  e  $f_6$ , respectivamente;
- ✓ a simplificação 8 faz com que a expressão de  $f_6''$  possa ser escrita na forma da equação (5.12), como a soma das funções  $f_6'''$  e  $f_6^{IV}$ ;
- ✓ a simplificação 4, em conjunto com a 1 e a 7, fazem com que se possa utilizar a equação (2.1) para o cálculo do deslocamento do bimetal, ou seja, a relação  $f_4'$

$$\text{torna-se: } z_b(PL) = \frac{L_b^2 \cdot (T_b - T_n)}{s_b} \cdot a_b ;$$

- ✓ a simplificação 9 implica que a função  $f_7$ , que determina a temperatura do bimetálico de compensação, reduz-se à forma da expressão (5.14), ou seja,  $T_{bc} = T_a$ ;
- ✓ a conclusão anterior, juntamente com as simplificações 1 e 4, implicam que a função  $f_6^{IV}$  torne-se 
$$z_{bc} = \frac{L_{bc}^2 \cdot (T_a - T_n)}{S_{bc}} \cdot a_{bc};$$
- ✓ a função  $f_3$ , que trata da relação entre a temperatura do bimetálico e da corrente aplicada, é a equação (6.5), determinada na seção 6.3. A expressão da função  $f_3^I$ , segundo o modelo desenvolvido, está na equação (6.7). As expressões de  $f_6^{III}$  e  $f_8$  foram determinadas na seção 6.5, e duas de suas possíveis formas estão apresentadas nas equações (18) e (19), onde  $z_{bc}(0)$  é expressa pela distância  $s$ .

## 6.10 Conclusões

Com o modelo desenvolvido a partir das simplificações propostas inicialmente verificou-se que:

- ✓ a forma da curva característica do DTS é dada pela fórmula (6.14);
- ✓ a curva mantém sua forma para qualquer valor de corrente de trabalho  $I_e$ ;
- ✓ nesta fórmula, o tempo de disparo  $t_p$  é a variável dependente, a sobrecorrente  $p$  é a independente, a relação de carregamento prévio  $v$ , é uma condição de pré-carregamento, e  $\tau$  e  $g$  são os únicos parâmetros ligados às propriedades físicas e geométricas do sistema;
- ✓  $\tau$  desloca a curva característica verticalmente, e  $g$ , horizontalmente;
- ✓ erros devidos a variações dimensionais de fabricação podem estar contidos nos parâmetros  $g$  e  $\tau$ , deslocando a curva conforme a influência dos respectivos parâmetros;
- ✓ a correção dos erros atua deslocando a curva apenas horizontalmente, ou seja, atuando apenas sobre  $g$ ;
- ✓ o perfil do came deve ter uma relação linear entre giro e deslocamento;
- ✓ a curva característica tem uma forma analítica se o sistema puder ser descrito por um sistema dinâmico de primeira ordem;
- ✓ a curva característica tem sempre a mesma forma se as curvas de deslocamento

do sistema puderem ser descritas como sendo igual ao comportamento de curvas de um sistema dinâmico de ordem  $n$ , onde apenas o parâmetro relacionado ao valor final atingido é dependente da corrente, e todos os outros parâmetros (constantes de tempo e respectivos coeficientes) são independentes dela.



## **7. MONTAGEM EXPERIMENTAL**

O perfeito entendimento sobre um sistema físico implica obrigatoriamente no conhecimento de seu funcionamento e dos fatores que o regem. Para tanto, faz-se necessário o levantamento de dados amostrais a fim de que se possa, a partir deles, delinear e prever comportamentos.

Os capítulos 7 e 8 descrevem o procedimento experimental desenvolvido neste trabalho. A realização destes ensaios teve por objetivo levantar dados que possam ser empregados na avaliação de um modelo para o DTS; além de sugerir uma metodologia de ensaio que possa ser empregada em futuras pesquisas nesta área.

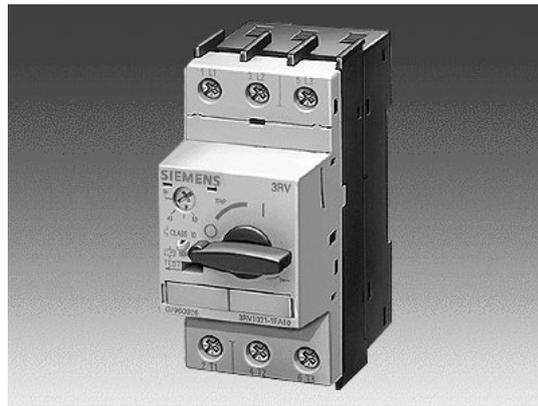
Neste capítulo é apresentada a bancada experimental utilizada no levantamento das curvas de aquecimento dos bimetálicos de operação.

### **7.1 Os Disjuntores de Estudo**

O levantamento das curvas de aquecimento foi realizado com três disjuntores diferentes (três faixas de corrente diferentes), do fabricante Siemens, série Sirius 3R, os quais foram escolhidos de forma a serem os mais representativos possíveis de todo o conjunto da série. Desta forma escolheram-se as amostras de forma que este grupo contivesse disjuntores que utilizem dois tipos diferentes de bimetálicos (condutividades térmicas diferentes) e também duas formas diferentes de enrolamento de aquecimento, ou seja, em forma de fio e em forma de fita. As faixas de ajuste de corrente dos disjuntores utilizados estão listadas abaixo:

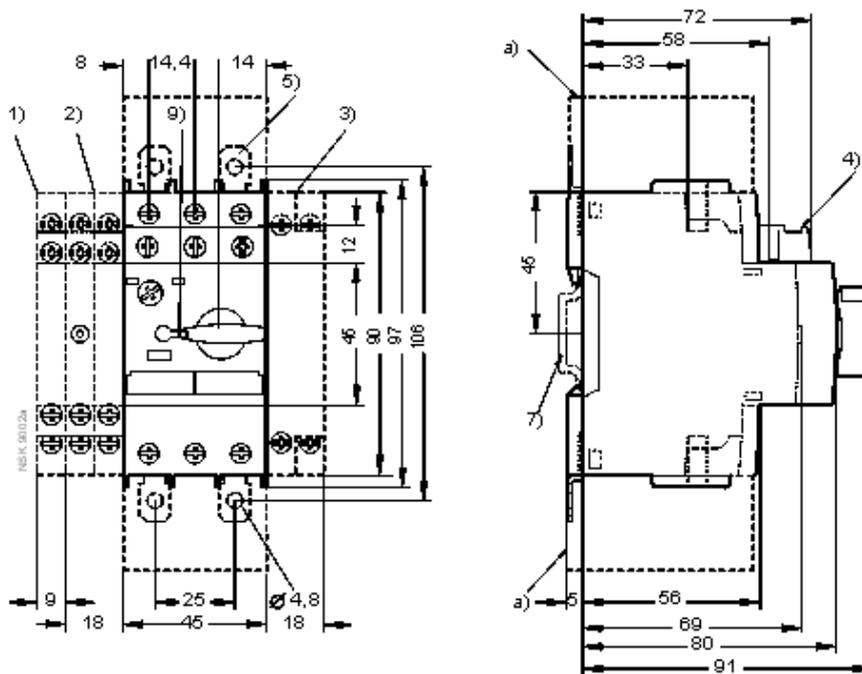
- ✓ 0,14 - 0,20 A;
- ✓ 3,5 - 5,0 A;
- ✓ 5,5 - 8,0 A.

A Figura 7.1 traz uma foto de um disjuntor desta série.



**Figura 7.1: foto de um disjuntor da série Sirius 3R /SIE00/**

A Figura 7.2 apresenta as dimensões externas de um disjuntor desta série.



**Figura 7.2: dimensões dos disjuntores da série Sirius /SIE00/**

## 7.2 Descrição da Bancada

Esta seção descreve a bancada utilizada nos ensaios experimentais deste

trabalho. Toda a parte experimental foi realizada no Instituto de Engenharia de Precisão (“Institut für Feinwerktechnik”, Ifwt) da Universidade Tecnológica de Dresden (“Technische Universität – Dresden”, TUD), Alemanha. Na bancada, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- ✓ uma unidade LASER, que serviu como transdutor de deslocamento da ponta livre dos bimetais;
- ✓ termoresistores Pt 1000, para a medição da temperatura em diversos pontos do sistema;
- ✓ uma unidade de aquisição de dados, para efetuar as medições de maneira autônoma e automaticamente;
- ✓ um microcomputador PC para programar e receber dados da unidade de aquisição; e
- ✓ uma fonte de alimentação controlada, para fornecer a corrente que aquece os bimetais.

Nas subseções a seguir apresenta-se cada um dos equipamentos da bancada isoladamente.

### **7.2.1 LASER**

Transdutores de deslocamento que utilizam um LASER não-interferométrico como princípio de medição funcionam da seguinte maneira: o transdutor produz um feixe LASER que reflete na superfície (perpendicular) do objeto para o qual o feixe aponta. A reflexão é captada por um segundo conjunto de lentes que, através da posição da reflexão, produz um sinal analógico de tensão elétrica de saída proporcional à distância à superfície do objeto.

A Tabela 7.1 resume as principais características (vantagens e desvantagens) dos sistemas de medição de distâncias que utilizam LASERs não-interferométricos como transdutores

O principal requisito para o sistema para a medição dos deslocamentos necessários para a realização dos ensaios pretendidos é a medição sem contato, o

que determinou o uso do LASER como transdutor de deslocamentos neste trabalho.

**Tabela 7.1: vantagens e desvantagens do LASER não-interferométrico como transdutor em sistemas de medição de distâncias (características gerais)**

Vantagens	Desvantagens
Medição sem contato (sem força) Precisão da ordem de 10 $\mu\text{m}$ ou menor Alta resposta em frequência Unidade compacta	Pequenos deslocamentos A distância a ser medida deve estar próxima à unidade de medição

A unidade LASER Keyence LC3 (resolução 0,5  $\mu\text{m}$ , linearidade 0,05 % *full scale*), que seria utilizada neste trabalho, apresentou problemas no início das experiências, e foi necessário substituí-la por outra. A unidade LASER utilizada foi o modelo YPO5M6UL-P24 do fabricante Wengler Sensoric GmbH. Trata-se de um sensor de distância usualmente utilizado para aplicações em equipamentos de produção (máquinas em geral); não é um sensor projetado para aplicações em instrumentação e metrologia mas que, mesmo assim, vinha sendo usado como transdutor de deslocamentos em algumas experiências. Não foram encontrados dados sobre a incerteza de medição da unidade, e portanto, foi necessário efetuar uma avaliação inicial do desempenho metrológico do sensor.

Inicialmente, verificou-se a estabilidade dos resultados da unidade, deixando o LASER imóvel por um longo período de tempo, a fim de verificar se o valor de saída se mantinha constante. A Figura 10.1 do anexo mostra como o sinal de saída se comportou em um dos ensaios. Foram comparados os valores de posição informados pelo LASER com os registrados por meio de uma mesa micrométrica. A Figura 10.2 do anexo apresenta um gráfico da diferença do valor medido ao registrado no micrômetro em alguns pontos da faixa de operação do LASER.

A Figura 10.1 mostra que existe uma oscilação de período longo no valor da saída do LASER, além de uma oscilação de alta frequência e baixa amplitude. Em todos os ensaios, porém, a oscilação não foi além de  $\pm 0,01$  mm, depois de um período de estabilização de 5 min.

Se o micrômetro for considerado adequado para avaliar o desempenho metrológico do LASER, a incerteza de medição deste último pode ser calculada pela multiplicação do desvio padrão das diferenças dos valores medidos por ambos os instrumentos ( $s = 0,01388$  mm), e o coeficiente  $t$  de Student ( $t = 2,120$ ; confiabilidade 95 % e 16 graus de liberdade), o que resulta numa incerteza de  $\pm 0,03$  mm.

Porém, o micrômetro não sendo um sistema adequado para a avaliação da incerteza do LASER, e devido à oscilação observada do sinal de saída, considerou-se que a unidade possui uma incerteza de medição esperada em torno de  $\pm 0,05$  mm. Esta faixa de incerteza corresponde a uma variação de  $\pm 2,3$  °C na temperatura dos bimetálicos dos disjuntores em estudo, calculada através da fórmula (2.1) para um deslocamento  $z = \pm 0,05$  mm. Trata-se de um valor relativamente alto, que pode prejudicar a validade dos dados experimentais obtidos para serem utilizados em certas tarefas, como por exemplo, na determinação de parâmetros exatos para desenvolvimento de um modelo térmico para o DTS. Contudo, considerou-se que para os propósitos iniciais do trabalho, esta unidade LASER poderia ser utilizada.

A Figura 10.3 do anexo traz um desenho com as dimensões da unidade. Suas principais características encontram-se resumidas na Tabela 7.2.

**Tabela 7.2: principais características da unidade LASER utilizada**

Característica	Valor
Faixa de abrangência de medição	$\pm 5$ mm
Distância ao ponto de medição	50 mm
Incerteza de medição	em torno de $\pm 0,05$ mm
Resposta em frequência	mais de 1 kHz
Dimensões básicas	50 x 50 x 20 mm
Saída	Analógica (tensão elétrica)
Sinal de saída	1 V / mm
Alimentação	18 - 30 Vcc
Modelo	YPO5M6UL-P24
Fabricante	Wengler Sensoric GmbH

## 7.2.2 Termoresistores e Cola Térmica

Neste trabalho foram utilizados termoresistores de platina (Pt), com um encapsulamento de cerâmica, de tamanho bastante reduzido (2,0 x 2,0 x 1,5 mm).

Tendo em vista que o espaço na cavidade dos bimetálicos é bastante reduzido, procurou-se utilizar a menor quantidade de fios possível para a ligação dos Pt's. Isto implicou na medição pelo método direto a 2 fios, e também na utilização de um fio comum para alguns Pt's. Foram utilizados Pt's 1000 para reduzir a influência da resistência elétrica dos fios de ligação dos termoresistores sobre os resultados de temperatura medidos. O posicionamento dos Pt's no disjuntor foi feito conforme descrito na seção 7.3, Figura 7.4.

A fórmula empregada para o cálculo das temperaturas medidas está apresentada abaixo.

$$R_t = R_o \cdot (1 + \alpha \cdot T) \quad (7.1)$$

onde  $R_o$  é a resistência elétrica do termoresistor a  $T = 0 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $\alpha$  é o coeficiente de temperatura médio de resistividade do material do sensor. A Tabela 7.3 apresenta o valor dos parâmetros da fórmula.

**Tabela 7.3: valor dos parâmetros dos Pt's**

Parâmetro	Valor
$R_o$	1000 $\Omega$
$\alpha$	0,00385055 $^\circ\text{C}^{-1}$

Segundo /NAC90/, para trabalho entre  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ , o método de cálculo das temperaturas através do valor de  $\alpha$  é bastante exato, pois  $\alpha$  é determinado neste intervalo. Por esta razão, e também visto que o interesse maior nos resultados recai sobre os aumentos de temperatura a partir da temperatura ambiente, os Pt's não foram calibrados individualmente para os ensaios realizados. O valor do parâmetro  $R_o$  de cada Pt sofreu um ajuste para compensar a influência das resistências dos fios de ligação. Este ajuste foi realizado utilizando o valor da temperatura registrada pelo termopar usado para medir a temperatura ambiente.

Os Pt's foram colados às superfícies por meio de uma cola térmica (TBS - Thermal Bonding System, Electrolube). Trata-se de uma resina epoxi cujas características principais estão assinaladas na Tabela 7.4.

**Tabela 7.4: características da resina térmica empregada**

Características	Valor
Condutividade térmica	1,1 W/mK
Resistividade elétrica em volume	$10^{14}$ a $10^{15}$ $\Omega$ /cm
Faixa de temperatura de trabalho	- 40 a + 120 °C
Tensão dielétrica	11 kV/mm

### 7.2.3 Unidade de Aquisição de Dados

A unidade de aquisição de dados usada foi uma Hydra, modelo 2620A do fabricante Fluke Corporation. A unidade possui ainda a opção de programação de dois alarmes, que podem ser utilizados para comandar outros equipamentos quando o sinal de um dos canais atinge o valor limite programado. A Tabela 7.5 apresenta as principais características da unidade.

**Tabela 7.5: principais características da unidade de aquisição de dados**

Característica	Valor
Precisão	$\pm 0,018$ % (Vcc); $\pm 0,013$ % ( $\Omega$ )
Multiplexação de canais	Por relês
Número de canais	20 internos + 1 no painel frontal
Velocidade de chaveamento entre canais	250 ms
Funções	Resistências, tensões (CC e CA), freqüências, temperaturas
Alarmes (para comando externo)	2
Comunicação	RS 232
Modelo	Hydra Data Acquisition Unit 2620A
Fabricante	Fluke Corporation

A unidade pode registrar automaticamente os valores de temperatura a partir dos sinais de termopares e termoresistores Pt 100. Como neste trabalho foram utilizados Pt 1000, a unidade foi programada para armazenar os valores de resistência elétrica dos transdutores, e os valores de temperatura foram calculados

pela fórmula (7.1).

A Hydra possui apenas memória de dados para os últimos valores adquiridos e, por isto, após cada varredura dos sinais de todos os canais, estes valores eram transferidos automaticamente para um computador PC através da porta serial, o qual armazenava os resultados em um arquivo ASCII. O mesmo computador era usado para programar, no início de cada ensaio, a configuração dos canais, o tempo entre cada leitura dos canais e a quantidade de varreduras (pontos).

Todos os canais de sinal eram ligados à unidade através do cartucho de aquisição, introduzido no painel posterior da unidade, exceto o canal 0, cuja forma de ligação se realiza por meio de conectores no painel anterior da unidade.

#### 7.2.4 Fonte de Corrente

Foi utilizada uma fonte de alimentação controlada para fornecer a corrente imposta aos bimetálicos. A Tabela 7.6 apresenta suas principais características.

**Tabela 7.6: principais características da fonte de corrente**

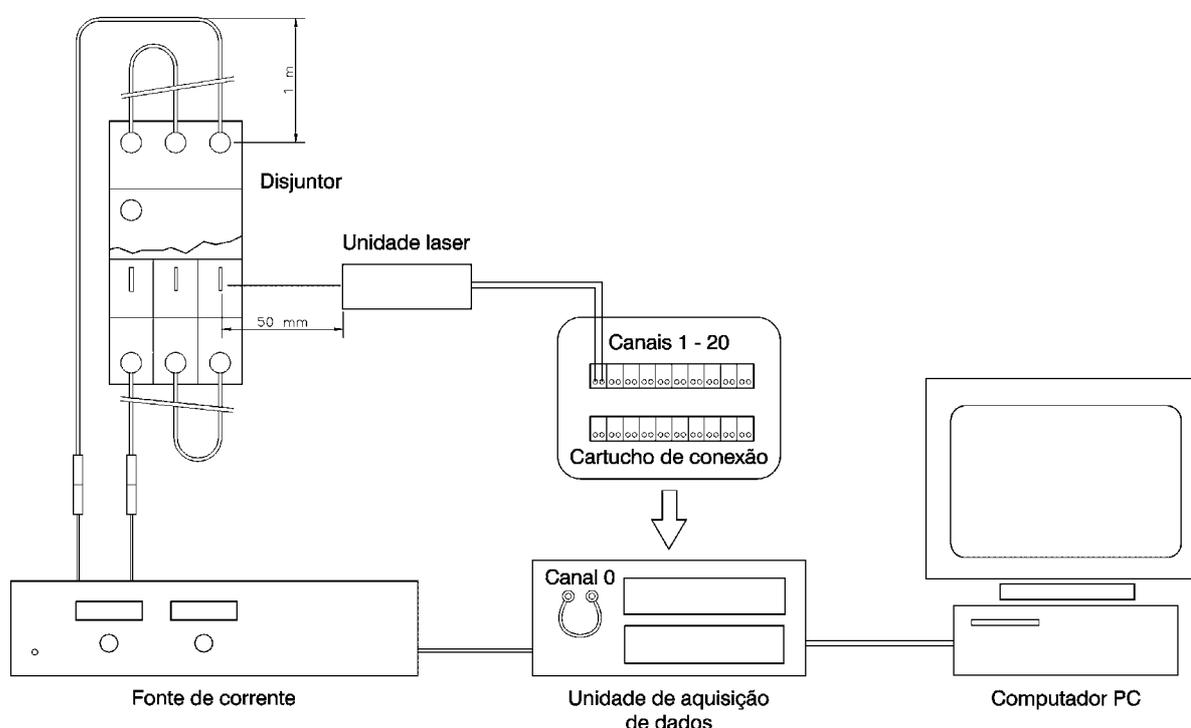
Característica	Valor
Tensão máxima	40 V
Corrente máxima	60 A
Resolução de valores de corrente	50 mA
Resolução de valores de tensão	10 mV
Entrada para comando externo	TTL
Saída para comando externo	TTL por meio de optoacoplador
Modelo	TOE 8872
Fabricante	Toellner Electronic

O valor desejado de corrente elétrica é pré-ajustado no painel frontal da fonte. Esta pode também ser comandada externamente por uma entrada de sinal de comando no painel posterior. Ela também pode ser usada para comandar outro equipamento através de uma saída TTL presente no painel posterior, que se torna ativa assim que a fonte passa a fornecer corrente.

### 7.2.5 A Bancada Completa

A Figura 7.3 mostra esquematicamente a configuração da bancada.

Uma leitura dos dados demorava 5 segundos para 8 canais e 8 segundos para 12 canais. Os sinais de cada canal não eram portanto adquiridos simultaneamente, mas sim com uma certa defasagem ente si. A Tabela 7.7 apresenta como os canais da unidade de aquisição de dados foram configurados.



**Figura 7.3: a bancada de ensaios**

Um alarme da unidade de aquisição de dados foi programado para atuar quando o canal 0 registrasse uma resistência maior que  $1 \Omega$ . A saída do alarme foi ligada à entrada de comando externo da fonte de alimentação, e os dois conectores da entrada do canal 0 foram unidos diretamente por meio de um cabo elétrico. Assim, sempre que o fio do canal 0 externo era retirado do borne, o alarme era ativado, e comandava assim a fonte de alimentação, a qual passava a fazer circular corrente elétrica através do disjuntor de ensaio. Com este método era possível registrar o instante exato em que a corrente começava a circular.

**Tabela 7.7: configuração dos canais da unidade de aquisição de dados**

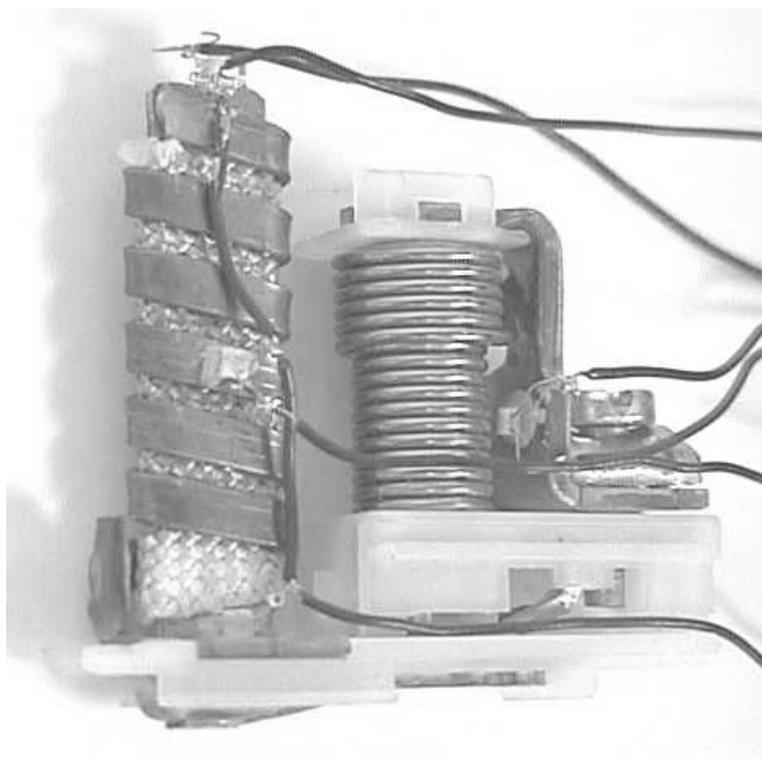
Canais	Função	Faixa	Grandeza de medição
0	Resistência	300 $\Omega$	Indicador de corrente nos bimetais
1	Tensão (CC)	30 V	Tensão do LASER
2	Tensão (CC)	3 V	Queda de tensão no enr. de aquecimento d
3	Resistência	3 k $\Omega$	Temperatura da base do bimetal d
4	Resistência	3 k $\Omega$	Temperatura do enr. de aquecimento d
5	Resistência	3 k $\Omega$	Temperatura do topo do bimetal d
6	Resistência	3 k $\Omega$	Temperatura do bimetal de compensação
7	Resistência	3 k $\Omega$	Temperatura do ar da cavidade do bimetal d
8	Resistência	3 k $\Omega$	Temperatura da base do terminal da carga
9	Resistência	3 k $\Omega$	Temperatura do contato fixo
10	Resistência	3 k $\Omega$	Temperatura da base do bimetal e
11	Resistência	3 k $\Omega$	Temperatura da base do bimetal c
12	Resistência	3 k $\Omega$	Temperatura do enr. de aquecimento c
13	Não utilizado		
14	Não utilizado		
15	Não utilizado		
16	Não utilizado		
17	Não utilizado		
18	Não utilizado		
19	Não utilizado		
20	Temperatura	Tipo K	Temperatura do ar ambiente

### 7.3 Posicionamento dos Transdutores de Temperatura

Os termoresistores foram fixados nas seguintes posições, para os três disjuntores:

- ✓ no enrolamento de aquecimento;
- ✓ no topo do bimetal;
- ✓ na base do bimetal;
- ✓ no interior da cavidade do bimetal, ou seja, no ar que envolve o bimetal;
- ✓ no bimetal de compensação.

Todas as posições, exceto o bimetal de compensação, referem-se ao bimetal da direita, cujo deslocamento foi medido pelo LASER.



**Figura 7.4: o bimetálico do disparador 3,5 - 5,0 com termoresistores**

A Figura 7.4 a seguir mostra as posições onde foram montados os termoresistores sobre o bimetálico da direita do disjuntor de faixa de ajuste de corrente 3,5 - 5,0.

A Figura 7.5 mostra como este bimetálico, além de outros termoresistores, estavam montados no mesmo disjuntor. O disjuntor era ensaiado na posição vertical e com a tampa, não mostrada na figura. É importante notar nesta figura como os bimetálicos

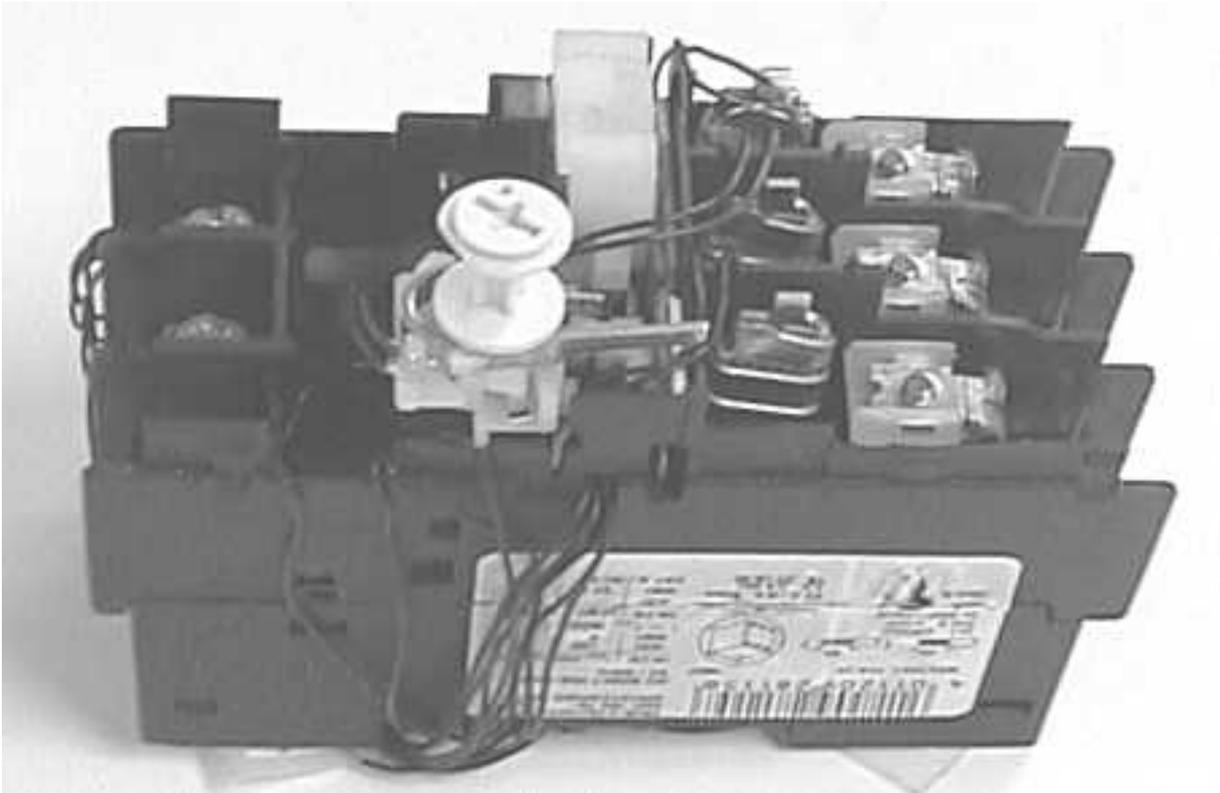
se encontram relativamente isolados entre si e em relação aos outros componentes do disjuntor, cada um inserido dentro de sua própria cavidade. Pelo fato de haver poucas aberturas nestas cavidades por onde possa haver troca de ar, supôs-se que a temperatura do ar das cavidades onde os bimetálicos estavam inseridos também se eleve e, por isso, decidiu-se colocar também um termoresistor no interior da cavidade do bimetálico da direita.

O enrolamento de aquecimento dos bimetálicos do disjuntor de faixa de corrente 0,14 - 0,20 não possui uma superfície na qual o termoresistor possa ser fixado, e portanto não foi usado nenhum Pt nesta posição.

Nos experimentos em que o bimetálico foi ensaiado fora do disjuntor (separadamente), os pontos no bimetálico de compensação e no interior da cavidade do bimetálico não foram, obviamente, medidos.

Para o caso do disjuntor de faixa de corrente de ajuste 3,5 - 5,0, também foram fixados Pt's nas seguintes posições:

- ✓ no enrolamento de aquecimento do bimetálico central;
- ✓ na base do bimetálico central;
- ✓ na base do bimetálico da esquerda;
- ✓ no contato fixo, próximo ao terminal da fonte;
- ✓ na base do terminal da carga.



**Figura 7.5: os termoresistores montados no disjuntor**

O transdutor de temperatura fixado sobre o enrolamento de aquecimento do bimetálico central apresentou problemas depois do primeiro ensaio a 1,0 vezes a corrente base, e não foi capaz de registrar a temperatura deste componente nos ensaios subsequentes.

A temperatura ambiente foi tomada por meio de um termopar tipo K, fixo a uma massa de cobre e posicionado próximo (20 cm) ao disjuntor.

## **8. LEVANTAMENTO DE CURVAS DE AQUECIMENTO DOS BIMETAIS**

Este capítulo descreve a metodologia proposta, empregada para o levantamento experimental de curvas relativas ao comportamento térmico do sistema dos bimetálicos de operação. Através do emprego desta metodologia, pretende-se obter:

- ✓ esclarecimento sobre os modos de troca de calor dos componentes envolvidos, para se fazer inferências sobre a forma de transferência de calor no sistema;
- ✓ valores reais de temperaturas alcançadas;
- ✓ dados experimentais úteis para a determinação de parâmetros de modelos térmicos.

As curvas levantadas referem-se ao deslocamento da ponta livre dos bimetálicos, e à variação das temperaturas em diversos pontos do sistema. As duas seções a seguir descrevem quais os princípios utilizados na medição destas duas grandezas.

### **8.1 Procedimento de Ensaio**

O procedimento de cada ensaio seguiu as etapas citadas abaixo:

1. os ensaios iniciavam com o bimetálico no estado frio, à temperatura ambiente, a qual era mantida o mais próximo possível de 20 °C.
2. a fonte de alimentação era preparada para a corrente elétrica planejada para o ensaio, e era mantida desligada;
3. o programa que configura a unidade de aquisição era iniciado no computador;
4. após a configuração da unidade, esta iniciava os ciclos de varredura automaticamente;
5. após alguns ciclos de varredura (de 2 a 4 ciclos), o cabo do canal 0 era retirado do borne, deixando registrado na unidade o momento em que o ensaio iniciava;

6. quando a unidade de aquisição percebia a mudança na resistência do canal 0, o alarme era acionado, ativando a fonte de alimentação;
7. a unidade de aquisição terminava os ciclos de varredura depois de coletar a quantidade de pontos programada durante a configuração da unidade;
8. os arquivos ASCII gerados pela unidade de aquisição de dados eram tratados e convertidos em gráficos para visualização.

## 8.2 Planejamento dos Ensaios

Com este procedimento experimental, quis-se investigar os seguintes pontos:

- ✓ o deslocamento da ponta livre do bimetálico e as temperaturas de diversos pontos do sistema;
- ✓ os resultados para diferentes condições de corrente elétrica, no mesmo bimetálico;
- ✓ as diferenças entre bimetálicos dos três disjuntores, para as mesmas condições;
- ✓ a diferença entre os três bimetálicos de um mesmo disjuntor;
- ✓ as variações nos resultados de um mesmo bimetálico, nas mesmas condições;
- ✓ a influência da massa térmica do disjuntor como um todo sobre o bimetálico isolado.

### 8.2.1 Condições a Serem Ensaçadas

Para que os resultados obtidos com os ensaios dos três DTS's pudessem ser comparados, era necessário ensaiá-los em condições semelhantes, e isto implica no uso de correntes que produzam a mesma taxa de geração de calor nos enrolamentos. Para tanto, foi definida uma corrente base ,  $I_{base}$ , para cada disparador, a partir da qual foram baseados os valores das correntes usadas nos ensaios. Para estes valores foram escolhidos os múltiplos da corrente base definida, correspondentes aos valores de sobrecorrente que apresentem restrições nos tempos de desarme impostos por norma, como 1,0, 1,05, 1,2 e 1,5.

Para os DTS's 3,5 - 5,0 e 5,5 - 8,0, foram definidas como corrente base as menores correntes da faixa de ajuste do disparador correspondente, que neste caso são 3,5 e 5,5 A, respectivamente. Já para o DTS 0,14 - 0,20, a resolução do ajuste de corrente da fonte de alimentação é muito grande (0,05 A), o que determinou que fosse definido para corrente base deste DTS o valor 0,15 A.

A máxima corrente usada nos ensaios não pode ultrapassar o valor da máxima corrente da faixa de ajuste do disparador em questão, multiplicado por 1,2, que é o múltiplo de corrente da norma para o qual o desarme deve ocorrer em duas horas. Para o DTS 3,5 - 5,0, este valor máximo é  $5,0 \times 1,2 = 6,0$ , que é 1,71 vez maior do que a sua corrente base, 3,5 A. Os ensaios dos disparadores 3,5 - 5,0 e 5,5 - 8,0 foram realizados até 1,5 vez a corrente base, 5,25 e 8,25 A, respectivamente. Já para o DTS 0,14 - 0,20, a falta de resolução da fonte de alimentação obrigou ao uso dos valores 0,20 e 0,25 A, 1,3 e 1,65 vez a corrente base, respectivamente.

Tendo em vista os fatores relacionados anteriormente, o planejamento dos ensaios teve a seguinte forma:

- ✓ em todos os ensaios foram medidos simultaneamente o deslocamento da ponta livre dos bimetais e a temperatura de diversos pontos do sistema (ver seção 7.3);
- ✓ todos os disjuntores foram ensaiados para correntes 1,0 e 1,5<sup>1</sup> vez a corrente base definida para o disjuntor;
- ✓ o disjuntor de faixa de ajuste 3,5 - 5,0 foi ensaiado também para as correntes 1,05; 1,125 e 1,2 vez a corrente base, além de 1,0 e 1,5 vez;
- ✓ para o DTS de faixa de ajuste 3,5 - 5,0, foram medidas simultaneamente também as temperaturas dos três bimetais do disjuntor;
- ✓ o ensaio com o DTS de faixa de ajuste 3,5 - 5,0 foi repetido três vezes para a corrente  $1,0 \times I_{base}$  deste disjuntor;
- ✓ o disparador de faixa de ajuste de corrente 5,5 - 8,0 foi ensaiado na condição normal, dentro do disjuntor, e numa condição sem carcaça, isolado; para correntes  $1,0 \times I_{base}$  e  $1,5 \times I_{base}$ ;
- ✓ em alguns casos, foram realizados ensaios adicionais com outros valores de

---

<sup>1</sup> 1,65 vez a corrente base, para o disjuntor de faixa de corrente de ajuste 0,14 - 0,20.

corrente.

## 8.2.2 Tabela de Ensaio Realizados

Todos os ensaios realizados estão listados nas tabelas abaixo.

**Tabela 8.1: lista dos ensaios principais realizados**

Disjuntor	Corrente (x corrente base)	Corrente (A)
0,14 - 0,20	1,0	0,15
	1,65	0,25
3,5 - 5,0	1,0 - 1 <sup>a</sup> repetição	3,5
	1,0 - 2 <sup>a</sup> repetição	3,5
	1,0 - 3 <sup>a</sup> repetição	3,5
	1,05	3,65
	1,125	3,95
	1,2	4,2
	1,5	5,25
5,5 - 8,0	1,0	5,5
	1,5	8,25
5,5 - 8,0 sem carcaça	1,0	5,5
	1,5	8,25

**Tabela 8.2: ensaios adicionais realizados**

Disjuntor	Corrente (x corrente base)	Corrente (A)
0,14 - 0,20	1,33	0,20
5,5 - 8,0	1,125	6,2
	1,3	7,15
0,14 - 0,20 sem carcaça	1,0	0,15

## 8.3 Resultados

As figuras a seguir apresentam os resultados obtidos para os ensaios com valores de corrente 1,0 e 1,5 vezes a corrente base, realizados com os três disjuntores, mais os ensaios do bimetálico do disjuntor 5,5 - 8,0 fora da carcaça. Em

todos os gráficos, a temperatura indicada é a diferença entre a temperatura registrada pelos termoresistores e a temperatura ambiente, registrada pelo termopar.

Todas as curvas levantadas apresentam uma forma semelhante a uma curva exponencial do tipo:

$$y = A_1 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}\right) + A_2 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_2}}\right) + \dots + A_n \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_n}}\right) \quad (8.1)$$

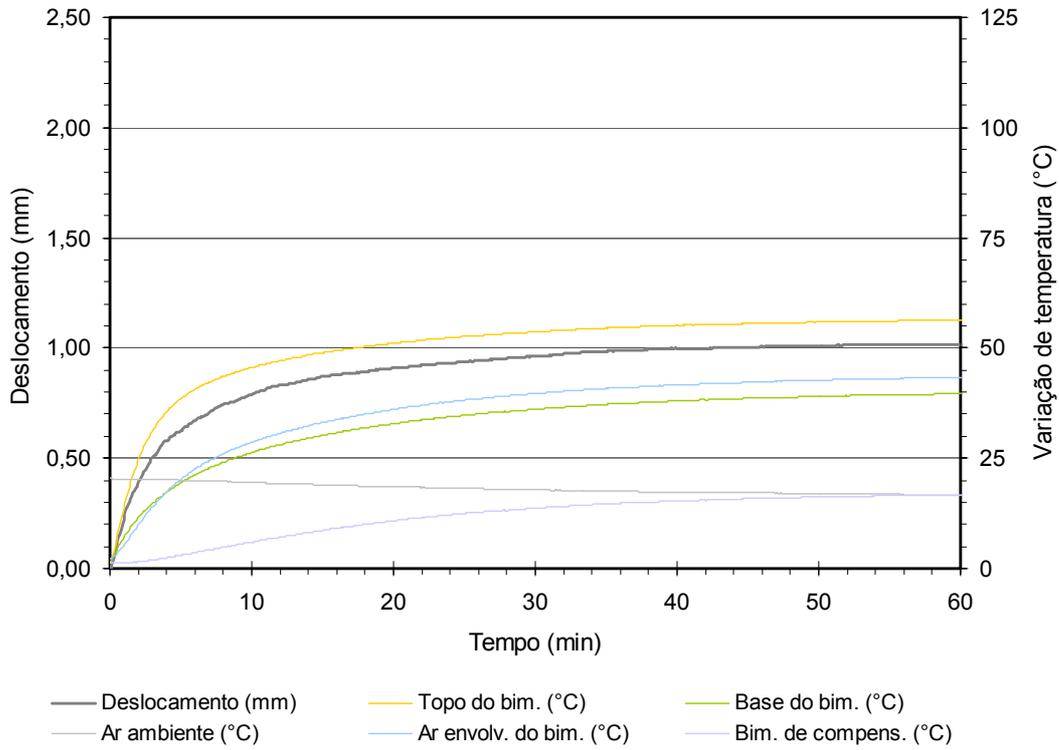
onde  $n$  é chamado de ordem da curva exponencial.

Quando se tenta ajustar as curvas levantadas à equação anterior, verifica-se que elas não se ajustam perfeitamente a uma curva de primeira ordem, como a determinada no modelo simplificado descrito na seção 6.3, mas se amoldam com extrema semelhança a uma curva de segunda ordem, principalmente para tempos acima de 1 minuto. O exemplo da Figura 8.9 demonstra o ajuste para o DTS 3,5 - 5,0 ensaiado com uma corrente de 1,5 vezes a corrente base.

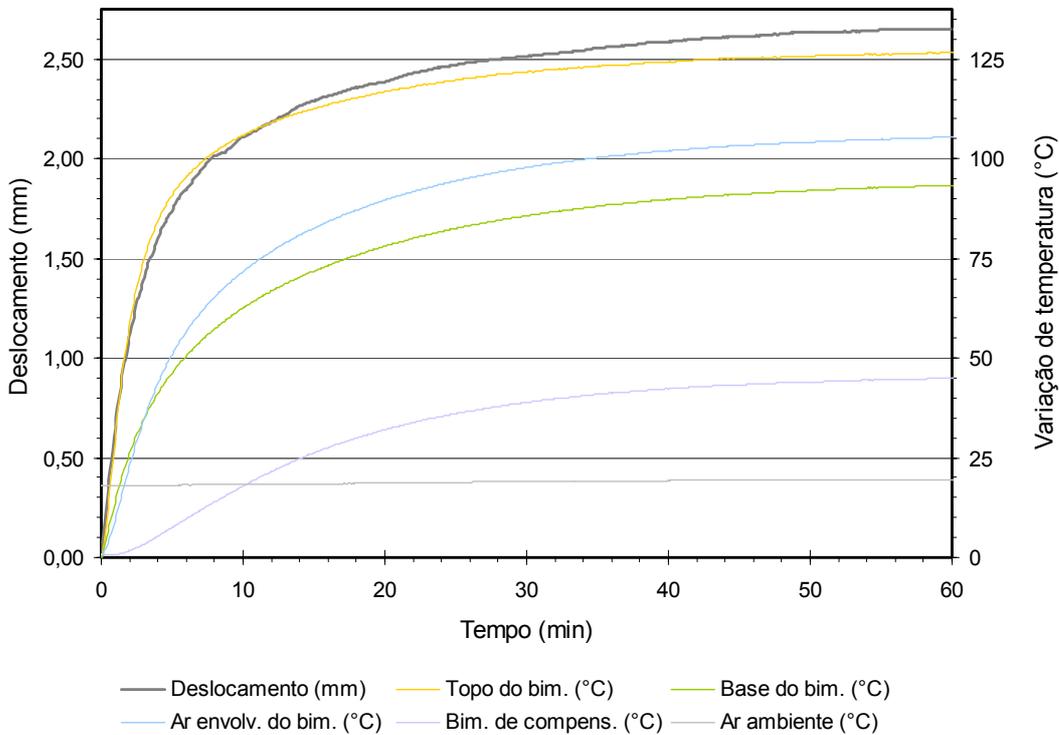
Por causa do perfeito ajuste verificado entre as curvas levantadas a uma função de segunda ordem, do tipo da equação (8.2), o mesmo ajuste foi realizado para todas as curvas, e os parâmetros da equação encontrados foram resumidos nas tabelas seguintes.

$$y = y_\infty \cdot \left(1 - \beta \cdot e^{-\frac{t}{\tau_1}} - (1 - \beta) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_2}}\right) \quad (8.2)$$

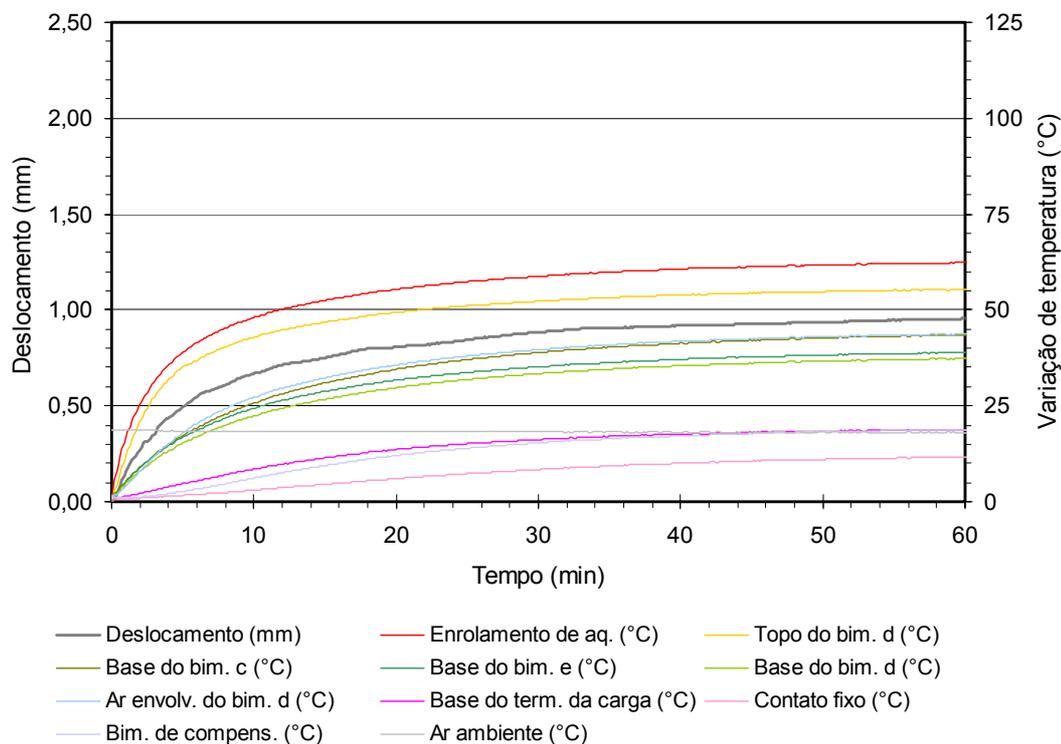
O parâmetro  $y_\infty$  é o valor final da função para  $t \rightarrow \infty$ , ou seja, o valor final atingido de temperatura ou deslocamento em regime permanente, e tem a dimensão da variável dependente medida  $y$ . Os parâmetros  $\tau_1$  e  $\tau_2$  são as constantes de tempo da curva, possuem dimensão de tempo, e revelam a rapidez com que ocorre o crescimento da curva. O parâmetro  $\beta$  indica o grau de influência relativa de cada constante de tempo.



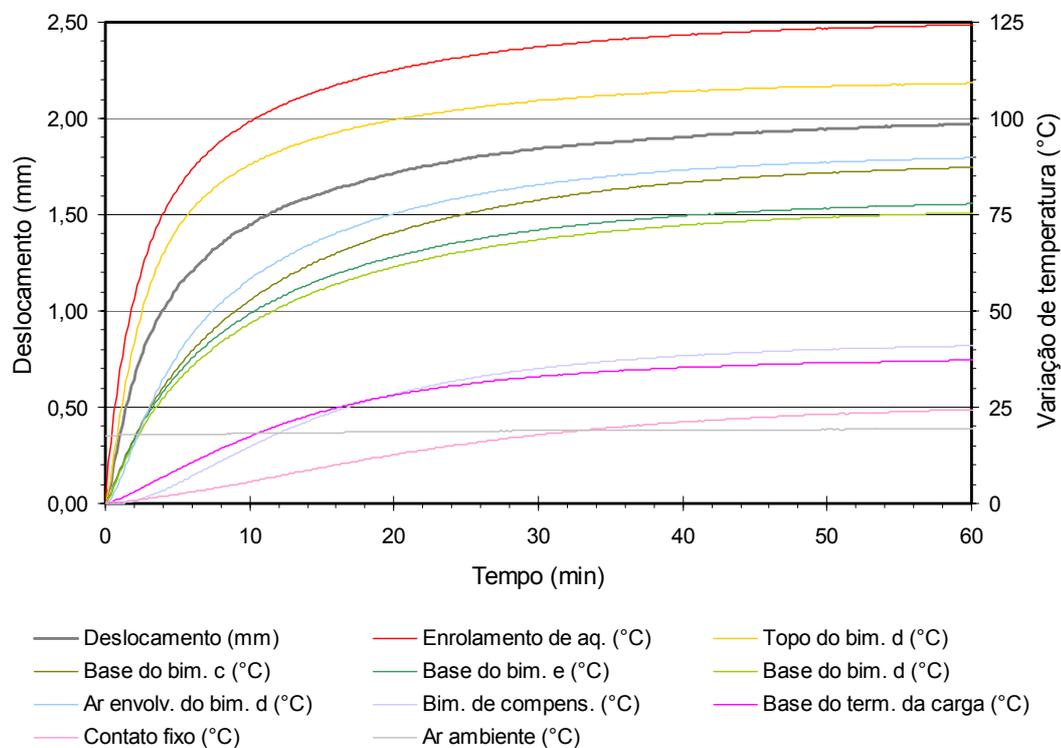
**Figura 8.1: resultado dos ensaios, disparador 0,14 - 0,20,  $1,5 \times I_{base}$**



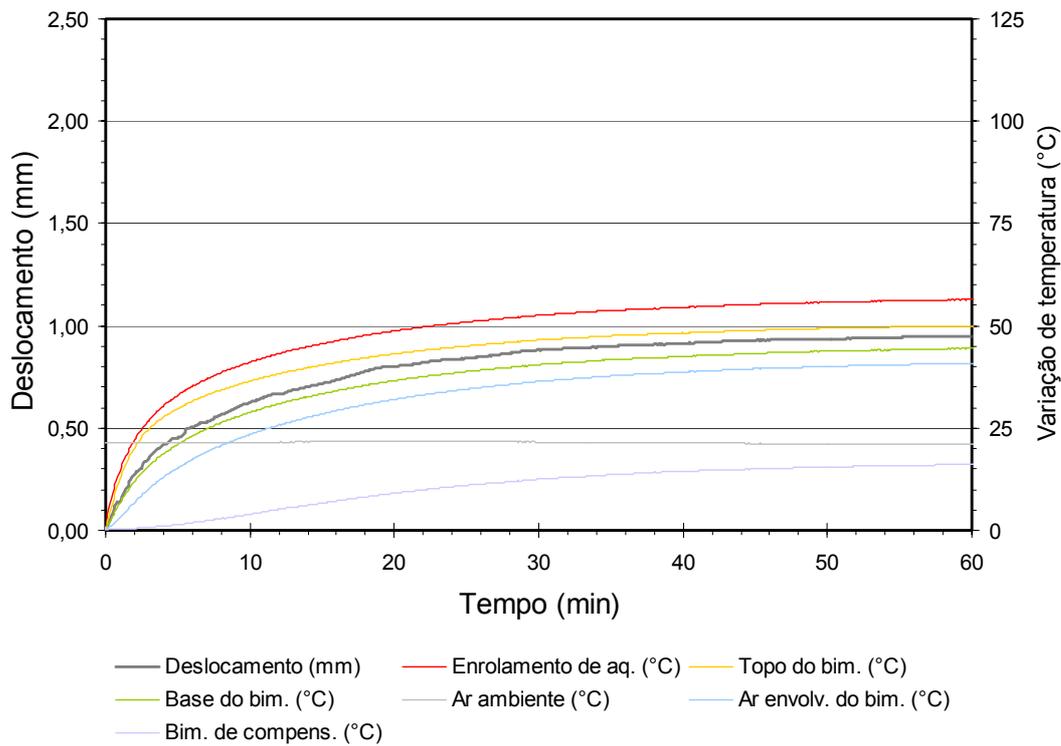
**Figura 8.2: resultado dos ensaios, disparador 0,14 - 0,20,  $1,5 \times I_{base}$**



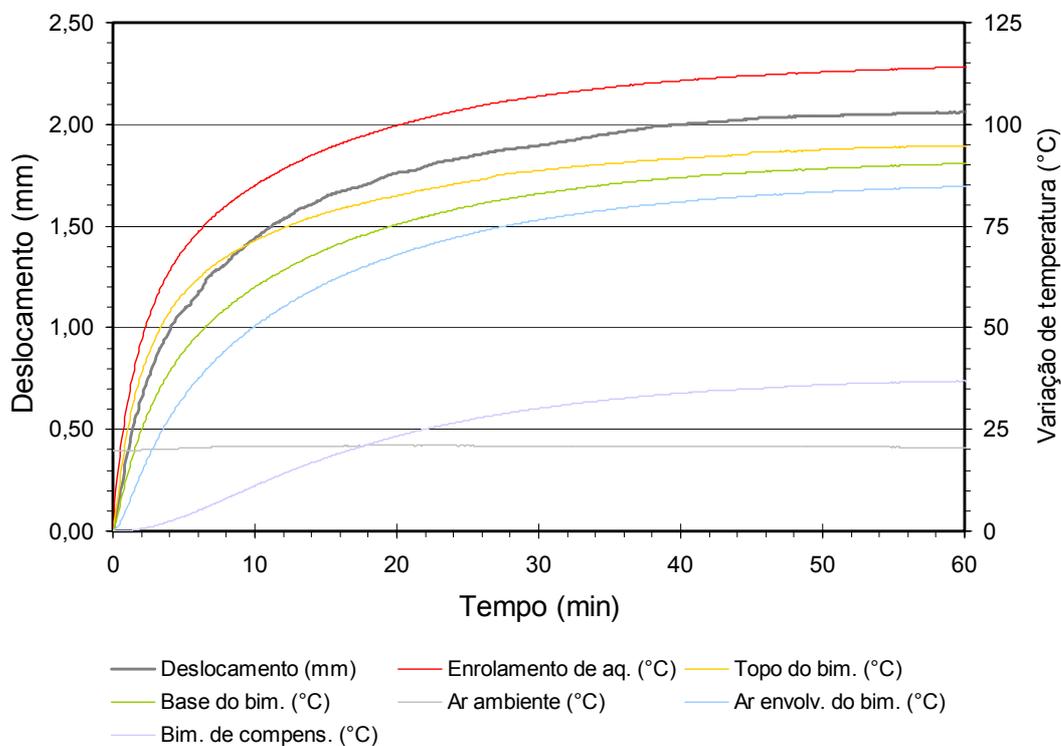
**Figura 8.3: resultado dos ensaios, disparador 3,5 - 5,0, 1,0 x  $I_{base}$**



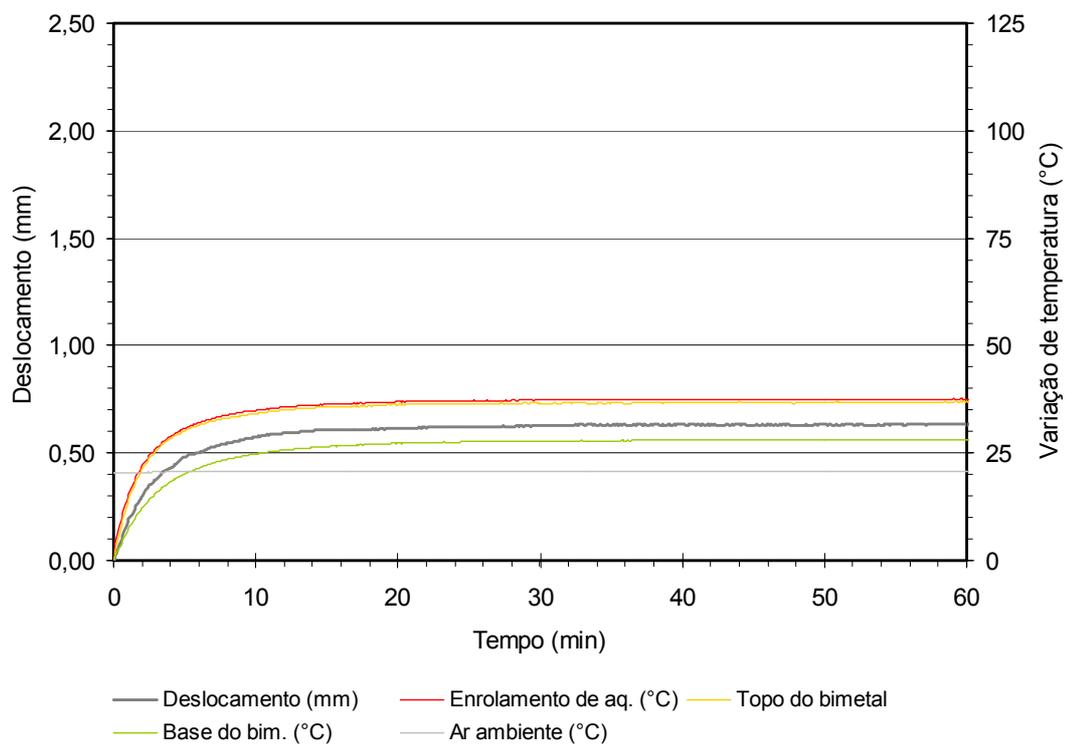
**Figura 8.4: resultado dos ensaios, disparador 3,5 - 5,0, 1,5 x  $I_{base}$**



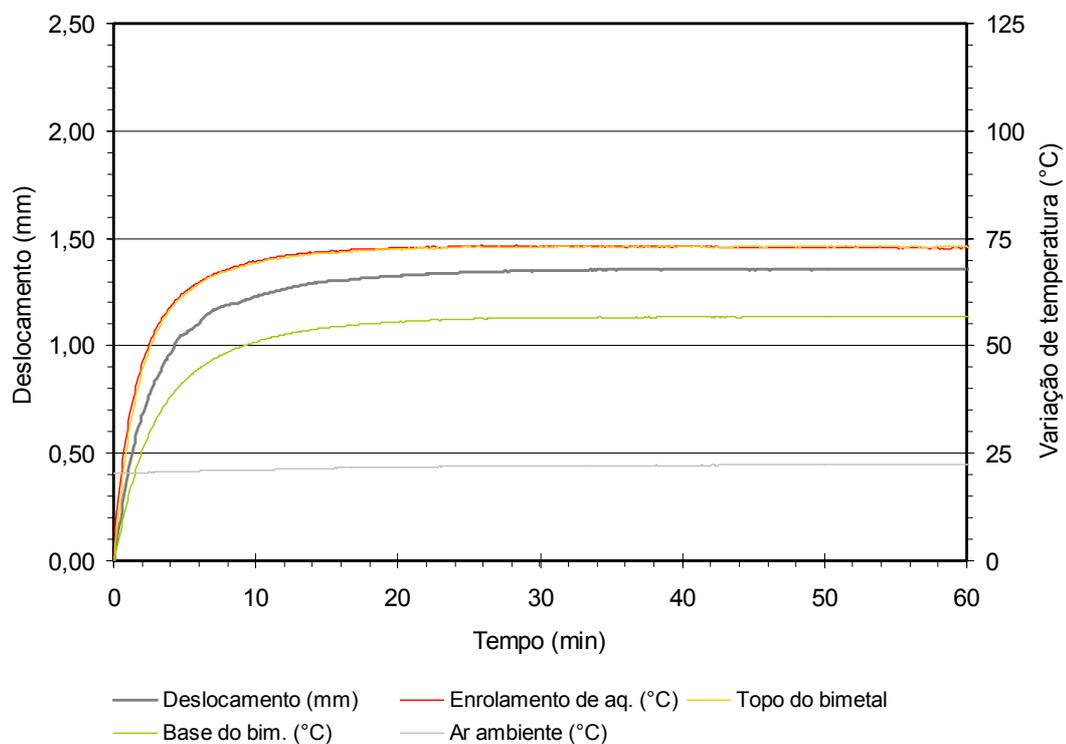
**Figura 8.5: resultado dos ensaios, disparador 5,5 - 8,0, 1,0 x  $l_{base}$**



**Figura 8.6: resultado dos ensaios, disparador 5,5 - 8,0, 1,5 x  $l_{base}$**

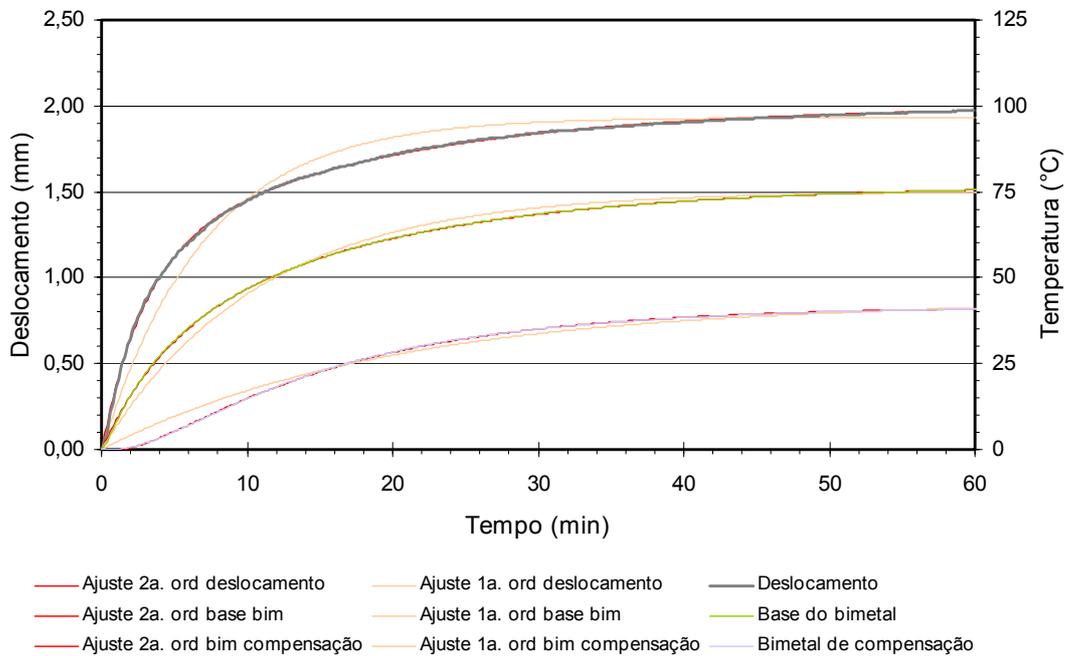


**Figura 8.7: resultado dos ensaios, disparador 5,5 - 8,0, 1,0 x  $l_{base}$ , sem carcaça**



**Figura 8.8: resultado dos ensaios, disparador 5,5 - 8,0, 1,5 x  $l_{base}$ , sem carcaça**

### Ajuste de Curvas



**Figura 8.9: ajuste das curvas levantadas**

A Tabela 8.3 resume os parâmetros da equação para as curvas levantadas nos ensaio com corrente 1,0 e 1,5 vezes a corrente base, para os três DTS's.

O ensaio com o DTS 3,5 - 5,0 e corrente  $1 \times I_{base}$  foi repetido três vezes a fim de verificar a existência de variações nos resultados. O parâmetro  $y_{\infty}$  se mostrou muito estável nos três ensaios.

Se os valores obtidos puderem ser considerados uma amostragem aleatória de uma população normalmente distribuída, então o valor

$$t = \frac{\bar{y} - \mu}{S/\sqrt{n}} \quad (8.3)$$

é distribuído como uma distribuição estatística  $t$  com  $n - 1$  graus de liberdade /MON97/. Desta forma pode-se calcular um intervalo de confiança para a média da população, estimada pela média da amostra.

**Tabela 8.3: parâmetros dos ensaios 1,0 e 1,5<sup>1</sup> x I<sub>base</sub>**

Parâmetros (por corrente)		$y_{\infty}$		$\tau_1$ (min)		$\tau_2$ (min)		$\beta$ (<adm>)	
Posição	Disparador	1,0	1,5	1,0	1,5	1,0	1,5	1,0	1,5
Deslocamento	0,14 - 0,20	1,024	2,67	2,41	2,23	14,7	15,4	0,565	0,613
	3,5 - 5,0	0,981	2,00	2,95	2,87	16,1	17,0	0,452	0,539
	5,5 - 8,0	0,956	2,08	1,86	2,41	13,8	15,3	0,282	0,419
Enrolamento de aquecimento	0,14 - 0,20	-	-	-	-	-	-	-	-
	3,5 - 5,0	63,1	125,0	2,17	1,97	15,9	14,0	0,544	0,580
	5,5 - 8,0	57,1	115,1	1,73	1,60	15,7	14,9	0,461	0,482
Topo do bimetálico	0,14 - 0,20	57,0	127,7	2,39	2,30	17,1	16,7	0,656	0,712
	3,5 - 5,0	56,1	109,9	2,84	2,76	17,0	15,5	0,597	0,659
	5,5 - 8,0	50,6	95,9	1,73	1,92	16,2	16,5	0,477	0,534
Base do bimetálico	0,14 - 0,20	40,5	94,8	3,06	2,83	17,5	16,3	0,383	0,395
	3,5 - 5,0	38,5	77,0	4,37	4,28	18,1	17,0	0,313	0,354
	5,5 - 8,0	45,2	91,7	2,89	2,71	16,8	15,9	0,354	0,370
Ar envolvente	0,14 - 0,20	44,4	107,1	5,35	4,72	20,0	17,6	0,506	0,523
	3,5 - 5,0	44,6	91,5	6,77	6,38	19,9	19,8	0,502	0,593
	5,5 - 8,0	41,8	86,5	5,37	5,42	17,8	17,3	0,297	0,354
Bimetálico de compensação	0,14 - 0,20	17,5	45,8	3,36	2,36	17,9	14,3	-0,28	-0,25
	3,5 - 5,0	19,2	41,7	4,06	2,87	16,6	14,2	-0,41	-0,32
	5,5 - 8,0	17,0	38,2	5,70	3,84	17,4	16,0	-0,55	-0,37

Os valores de  $y_{\infty}$  dos três ensaios, sua média e intervalo de confiança da média,  $U_{95\%}$ , calculada para um nível de significância de 0,05, estão listados na Tabela 8.4.

**Tabela 8.4: média e intervalo de confiança do parâmetro  $y_{\infty}$** 

Posição	Repetição			Média	$U_{95\%}$
	1	2	3		
Deslocamento	1,010	0,964	0,968	0,981	$\pm 0,110$
Contato fixo	12,8	12,5	12,5	12,6	$\pm 0,7$
Enrolamento de aquecimento	63,0	63,0	63,4	63,1	$\pm 1,0$
Enrolamento de aquecimento c	72,5	-	-	72,5	-
Topo do bimetálico	56,0	56,0	56,1	56,1	$\pm 0,2$
Base do bimetálico	38,9	38,3	38,2	38,5	$\pm 1,8$
Base do bimetálico c	45,8	44,6	44,5	45,0	$\pm 3,1$
Base do bimetálico e	41,2	39,8	39,7	40,2	$\pm 3,6$
Base do terminal da carga	19,6	19,4	19,4	19,4	$\pm 0,6$
Bimetálico de compensação	18,6	19,5	19,5	19,2	$\pm 2,2$
Ar envolvente	44,4	44,7	44,5	44,6	$\pm 0,7$

<sup>1</sup> 1,65 vezes a corrente base, para o disparador de faixa de ajuste de corrente 0,14 - 0,20.

Já os valores das constantes de tempo e do parâmetro  $\beta$  apresentam uma variância muito maior, porém não demonstram ter uma correlação com o valor da corrente ensaiada. Na Tabela 8.5 as médias e intervalos de confiança foram calculados com os valores obtidos nos ensaios do DTS 3,5 - 5,0 para todas as correntes.

**Tabela 8.5: constantes de tempo e  $\beta$ , para o disparador 3,5 - 5,0**

Parâmetros	$\tau_1$ (min)		$\tau_2$ (min)		$\beta$ (<adm>)	
	Média	$U_{95\%}$	Média	$U_{95\%}$	Média	$U_{95\%}$
Posição						
Deslocamento	2,43	± 0,90	16,9	± 6,0	0,403	± 0,130
Contato fixo	18,5	± 13,6	19,8	± 12,9	-2321	± 2742
Enrolamento de aquecimento	2,06	± 0,19	14,4	± 1,7	0,528	± 0,041
Enrolamento de aquecimento c	2,34	-	15,5	-	0,509	-
Topo do bimetálico	2,76	± 0,28	15,9	± 1,6	0,589	± 0,047
Base do bimetálico	4,27	± 0,46	17,3	± 0,9	0,314	± 0,037
Base do bimetálico c	4,72	± 0,56	17,2	± 1,2	0,303	± 0,052
Base do bimetálico e	4,23	± 0,51	17,1	± 1,1	0,346	± 0,047
Base do terminal da carga	3,70	± 3,32	13,8	± 2,2	-349	± 896
Bimetálico de compensação	3,41	± 0,74	14,9	± 1,4	-0,323	± 0,087
Ar envolvente	6,42	± 0,61	22,5	± 6,3	0,534	± 0,049

As curvas para as posições “contato fixo” e “base do terminal da carga”, não puderam ser devidamente ajustadas e por isso seus parâmetros apresentam valores com grande dispersão.

**Tabela 8.6: parâmetros das curvas do disparador 5,5 - 8,0, com e sem carcaça**

Parâmetros (por corrente)		$\gamma_\infty$		$\tau_1$ (min)		$\tau_2$ (min)		$\beta$ (<adm>)	
Posição	Carcaça	1,0	1,5	1,0	1,5	1,0	1,5	1,0	1,5
Deslocamento	Não	0,633	1,36	2,45	2,13	8,52	7,83	0,735	0,699
	Sim	0,956	2,08	1,86	2,41	13,8	15,3	0,282	0,419
Enrolamento de aquecimento	Não	37,5	72,9	1,32	1,03	5,72	4,08	0,593	0,515
	Sim	57,1	115,1	1,73	1,60	15,7	14,9	0,461	0,482
Topo do bimetálico	Não	36,8	73,1	1,68	1,57	7,03	5,69	0,709	0,707
	Sim	50,6	95,9	1,73	1,92	16,2	16,5	0,477	0,534
Base do bimetálico	Não	28,1	56,8	2,81	2,46	8,66	7,00	0,689	0,623
	Sim	45,2	91,7	2,89	2,71	16,8	15,9	0,354	0,370

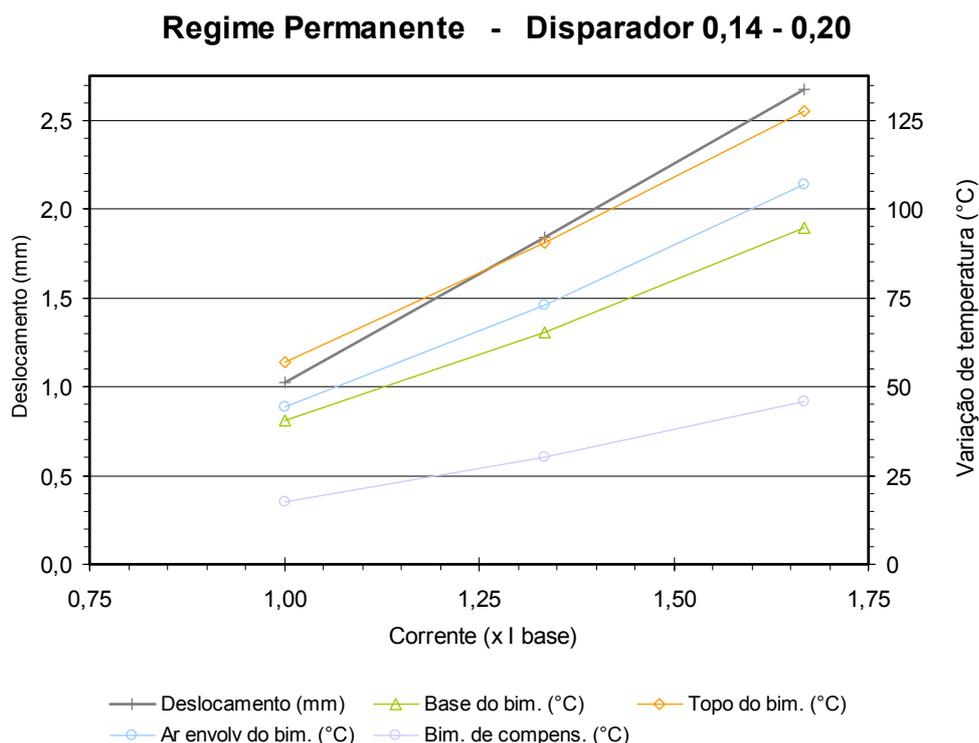
Os parâmetros das curvas ajustadas obtidas nos ensaios do DTS de faixa de ajuste de corrente 5,5 - 8,0, realizados com o disjuntor completo e apenas um

bimetal isolado, estão listados na Tabela 8.6.

Todos os valores dos parâmetros das curvas ajustadas obtidas em todos os ensaios, inclusive as não listadas aqui, encontram-se em tabelas no anexo.

## 8.4 Discussão dos Resultados Experimentais

Os três gráficos seguintes apresentam os valores finais de regime permanente para os três DTS's, em função da corrente ensaiada. O gráfico da Figura 8.13 é um comparativo entre os três disparadores.



**Figura 8.10: gráfico dos valores de regime permanente para o DTS 0,14 - 0,20**

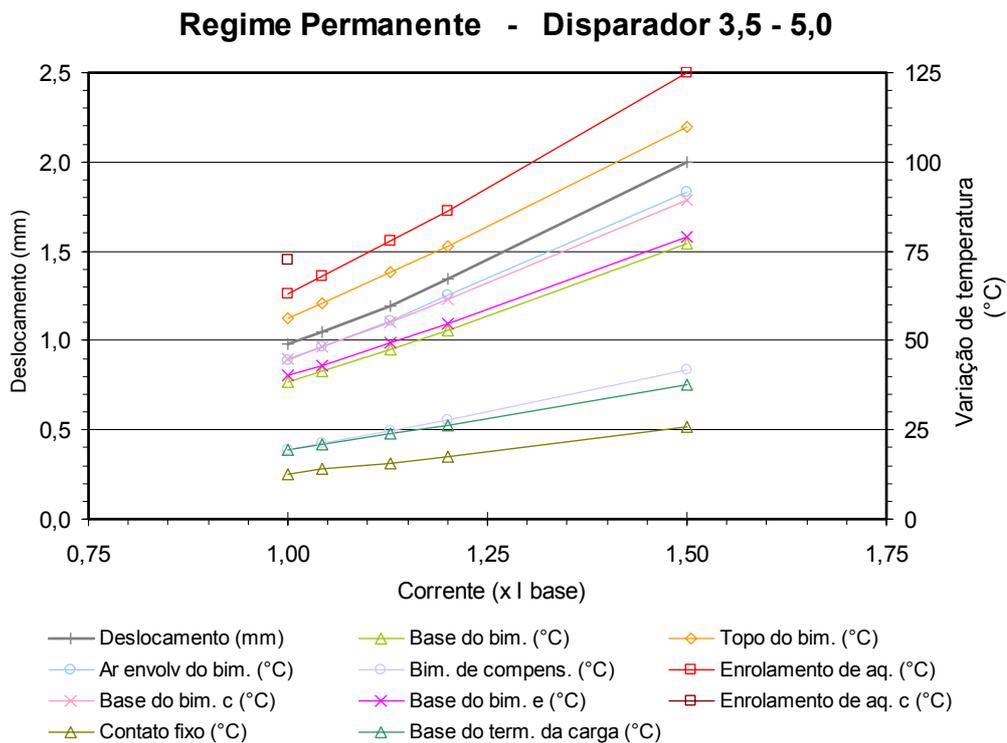


Figura 8.11: gráfico dos valores de regime permanente para o DTS 3,5 - 5,0

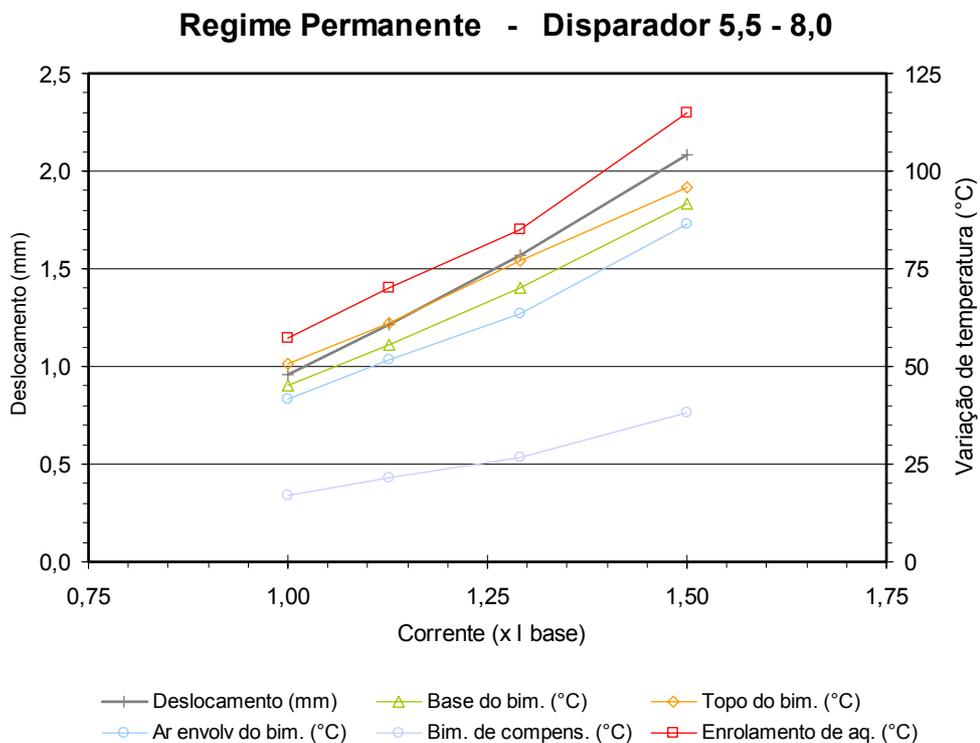
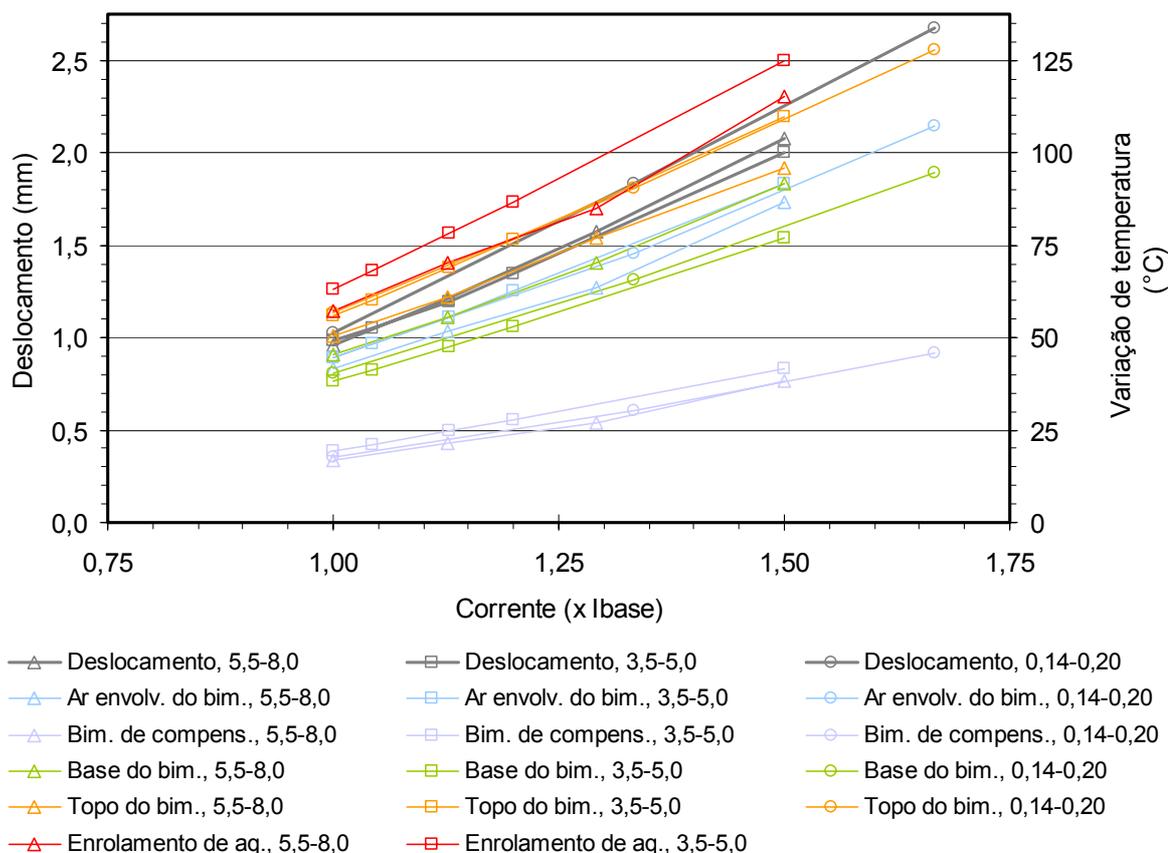


Figura 8.12: gráfico dos valores de regime permanente para o DTS 5,5 - 8,0



**Figura 8.13: gráfico comparativo entre disparadores, por corrente**

Em todos os ensaios verificou-se que a maior temperatura observada é, como era de se esperar, do enrolamento de aquecimento. Em seguida vem a temperatura do topo do bimetálico, seguida da temperatura da base juntamente com a temperatura do ar da cavidade do bimetálico. O fato de se observar temperaturas diferentes no topo e na base do bimetálico revela que existe um gradiente de temperatura ao longo do eixo longitudinal dos bimetálicos.

O fato de a temperatura do ar no interior da cavidade do bimetálico ser do mesmo nível da temperatura da base do bimetálico indica que o calor gerado no enrolamento é também, em grande parte, conduzido para fora do bimetálico por sua base, ou seja, pelos componentes que formam o caminho elétrico por onde passa a corrente que alimenta o equipamento sob proteção.

Verifica-se que mesmo a base do terminal da carga e o contato fixo, componentes nos quais os terminais e os fios condutores são fixados ao disjuntor,

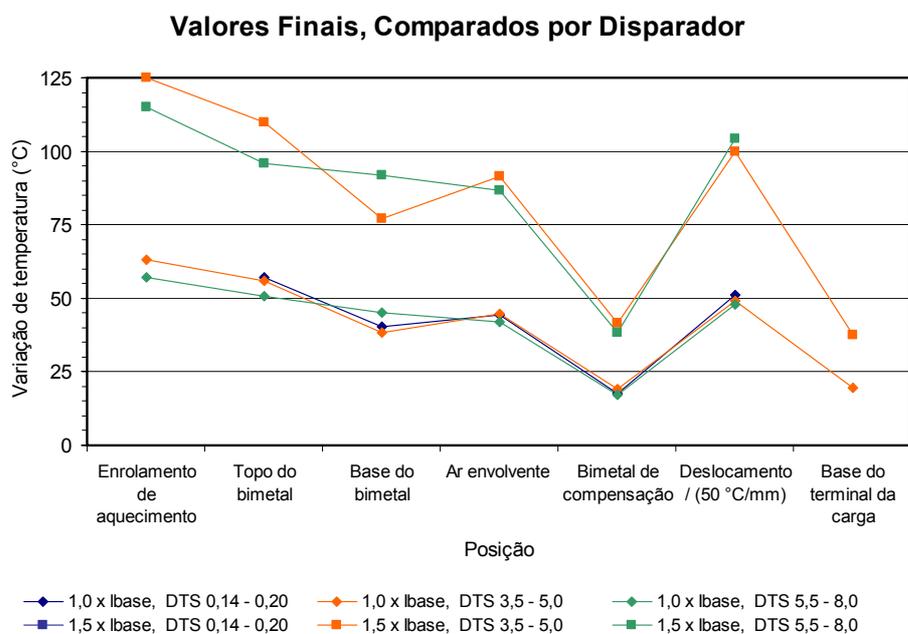
têm sua temperatura aumentada durante o funcionamento do dispositivo. Isto indica que a temperatura da ponta do fio condutor fixada ao terminal também aumenta, o que por sua vez implica que uma parcela do calor gerado nos bimetálicos chega aos cabos e sai do dispositivo através do mesmo. Em uma simulação rápida, verificou-se que se a ponta de um cabo condutor isolado de  $1 \text{ mm}^2$  de seção condutora e 2,5 mm de diâmetro externo, for mantida a  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ , uma quantidade de calor entra no cabo a uma taxa em torno de  $0,75 \text{ W}$ , o que é muito quando comparado à taxa de calor gerada nos bimetálicos. Deste fato pode-se concluir que o cabo condutor utilizado na instalação do disjuntor também pode influenciar no desempenho do dispositivo.

A análise das temperaturas dos componentes revela também um fato muito importante, relativo à temperatura do bimetálico de compensação. Aparentemente sua temperatura deveria refletir única e exclusivamente a temperatura ambiente, mas os ensaios revelaram o contrário: a temperatura do bimetálico de compensação varia significativamente no decorrer do ensaio. Isto implica em duas conseqüências:

- ✓ como a variação da temperatura do bimetálico de compensação provoca uma deflexão no mesmo, é de se esperar uma alteração no ponto de disparo, conforme a temperatura varia. Conclui-se que para ser possível prever o tempo de desarme de um DTS, através de um modelo matemático, é necessário que este modelo tenha condições de determinar a temperatura do bimetálico de compensação;
- ✓ o bimetálico de compensação é um componente que não faz parte do caminho elétrico do dispositivo, ou seja, é um componente isolado, e que recebe por convecção o calor gerado nos sistemas bimetálicos. Como ele, todos os outros componentes do disjuntor recebem uma parcela do calor gerado através do ar circundante. Pode-se concluir que para um modelo térmico ter maior exatidão, é necessário que ele leve em conta as parcelas de calor que cada componente recebe, e isto implica que o escoamento do ar no interior do disjuntor também seja conhecido.

O gráfico da Figura 8.14 compara as temperaturas atingidas e o deslocamento do bimetálico em diferentes posições e para correntes  $1,0$  e  $1,5 \times I_{base}$ . É interessante notar como os DTS's  $0,14 - 0,20$  e  $3,5 - 5,0$  apresentam valores de

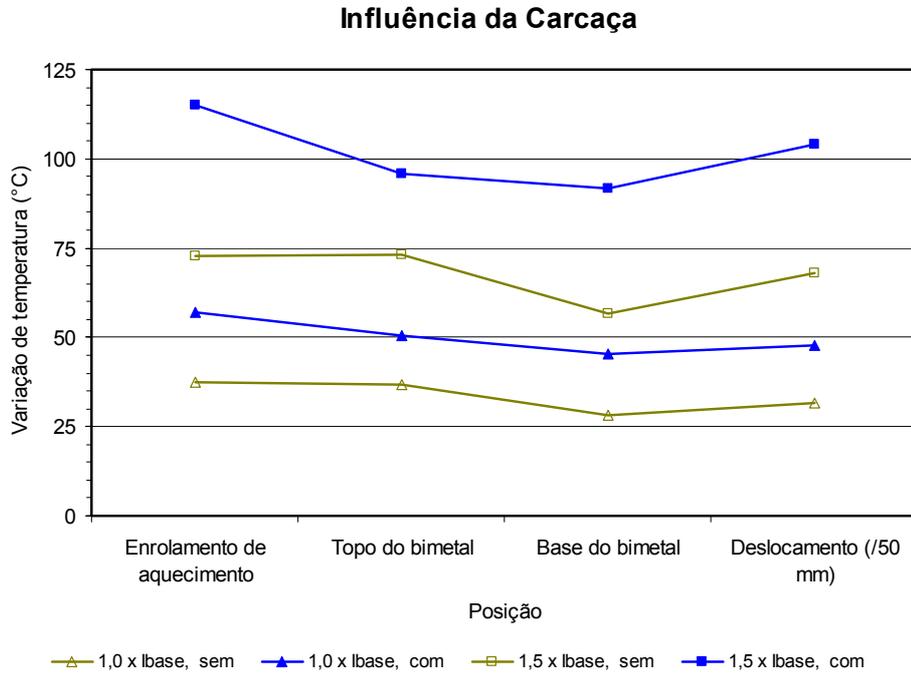
temperaturas e deslocamento finais muito próximos em todas as posições, mas o disparador 5,5 - 8,0 apresenta temperaturas inferiores no enrolamento de aquecimento e no topo do bimetal, mas superiores na base. As propriedades do bimetal deste disparador não são iguais às dos outros dois. O disparador 5,5 - 8,0 é fabricado com um bimetal cuja resistência elétrica longitudinal é consideravelmente menor do que a dos bimetais dos outros disparadores. Provavelmente este fato deve ser o responsável pela diferença observada, pois uma resistência elétrica menor significa uma condutividade térmica maior, o que provoca uma diferença de temperatura menor entre dois pontos de um mesmo componente (no caso, o topo e a base do bimetal), exatamente como o observado.



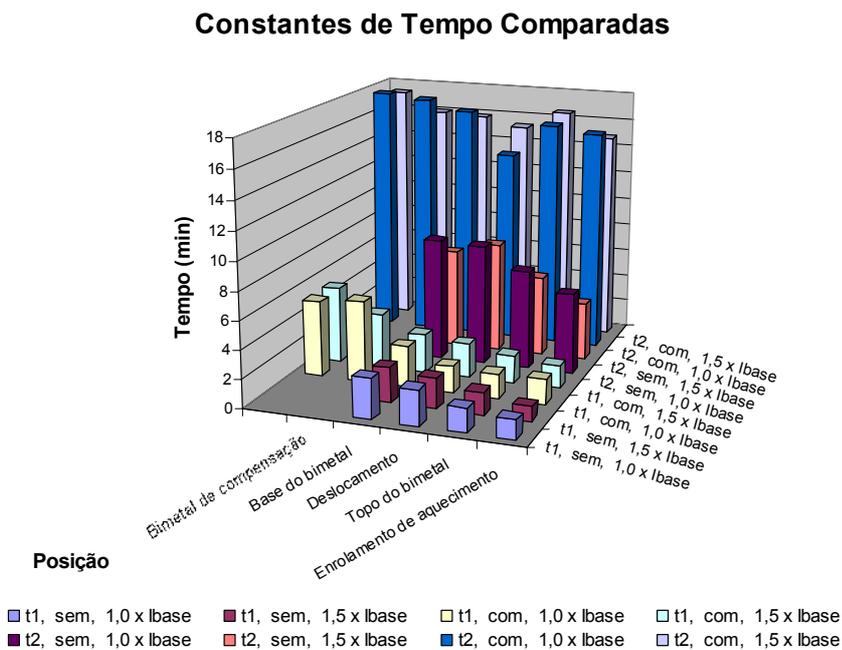
**Figura 8.14: gráfico comparativo entre disparadores, por posição**

O gráfico da Figura 8.15 mostra a diferença nos resultados quando o bimetal é ensaiado em sua condição normal, no interior do disjuntor, e quando este é ensaiado separadamente, fora do dispositivo. Uma grande diferença nas constantes de tempo também é observada, conforme a Figura 8.16. A grande discrepância nos valores finais de temperatura atingidos e nas constantes de tempo revela a grande influência da massa térmica do disjuntor no comportamento térmico dos bimetais. Disto, novamente, conclui-se que qualquer modelo térmico para o DTS deve necessariamente levar em conta o disjuntor como um todo, seus componentes e sua

geometria.



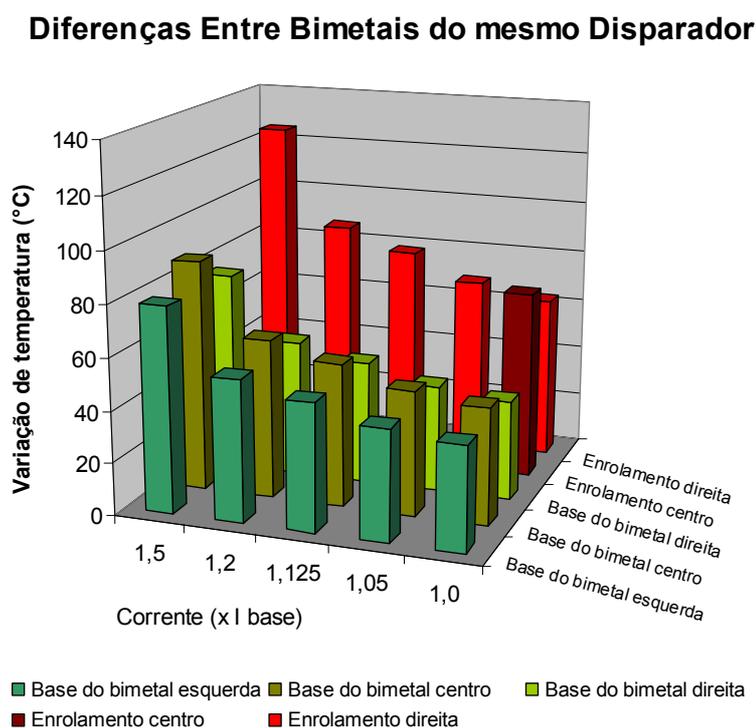
**Figura 8.15: gráfico da influência da carcaça nos valores de regime permanente**



**Figura 8.16: gráfico comparativo entre as constantes de tempo, com e sem carcaça**

Uma observação interessante deste ensaio é o fato de o enrolamento de aquecimento e o topo do bimetálico apresentarem a mesma temperatura quando o bimetálico é ensaiado fora da carcaça. Também é interessante notar a menor temperatura relativa que a base do bimetálico apresenta nesta condição. Isto indica que o calor trocado por convecção e através da base do bimetálico deve ter suas parcelas modificadas nas duas condições de ensaio.

Os ensaios com o DTS 3,5 - 5,0 revelaram diferenças significativas nos valores de temperatura dos três bimetálicos deste disparador, conforme ilustrado pelo gráfico da Figura 8.17. Este fato implica que o deslocamento dos três bimetálicos de um disjuntor não é igual, mesmo quando pelos três bimetálicos passam correntes de igual valor. A mesma diferença foi encontrada no enrolamento de aquecimento do bimetálico central em relação ao do bimetálico da direita.



**Figura 8.17: gráfico comparativo entre bimetálicos do mesmo disparador**

Os resultados das curvas de aquecimento permitem fazer inferências acerca dos fluxos de calor entre componentes e destes para o ar, através da convecção livre. Pode-se, por exemplo, determinar a taxa de transferência de calor

transmitido por convecção do enrolamento de aquecimento para o ar da cavidade do bimetálico, no regime permanente, através das temperaturas finais medidas para os dois pontos, pela seguinte equação:

$$q_{conv} = h \cdot A \cdot (T_w - T_{ar})$$

O coeficiente de convecção térmica  $h$  pode ser obtido através de uma correlação de transferência convectiva livre de calor para uma placa plana vertical, como a encontrada em /IW92/, a seguir:

$$Nu = 0,68 + \frac{0,670 \cdot Ra_L^{1/4}}{\left[1 + (0,492/Pr)^{9/16}\right]^{4/9}} \quad e \quad h = \frac{Nu \cdot k_{ar}}{L}$$

onde, neste caso,  $L$  é a largura do enrolamento de aquecimento.

A Tabela 8.7 apresenta o calor transferido por convecção calculado da forma indicada para os DTS's 3,5-5,0 e 5,5-8,0, para as correntes 1,0 e 1,5  $I_{base}$ , e comparados com o calor total produzido nos enrolamentos.

**Tabela 8.7: comparação de taxas de calor transferido e produzido no enrolamento**

Corrente	Disparador	Calor transferido (W)	Calor produzido(W)
1,0	3,5 - 5,0	0,117	0,829
	5,5 - 8,0	0,095	0,819
1,5	3,5 - 5,0	0,217	1,866
	5,5 - 8,0	0,182	1,844

Pelos valores calculados acima, verifica-se que a troca de calor por convecção entre o enrolamento de aquecimento e o ar da cavidade do bimetálico representa somente de 10 a 15 % do calor total gerado. Isto indica que a maior parte do calor deve deixar a cavidade do bimetálico por outros meios, como por exemplo, por condução térmica para outros componentes do caminho elétrico do disparador.

Os valores de deslocamento finais obtidos com os ensaios permitem que se chegue à função que relaciona a posição angular das marcações da corrente de ajuste à distância percorrida pelo ponto de disparo, com o giro do *dial* (relação entre

as funções  $f_6'''$  e  $f_8$  das equações (5.12) e (5.16), respectivamente).

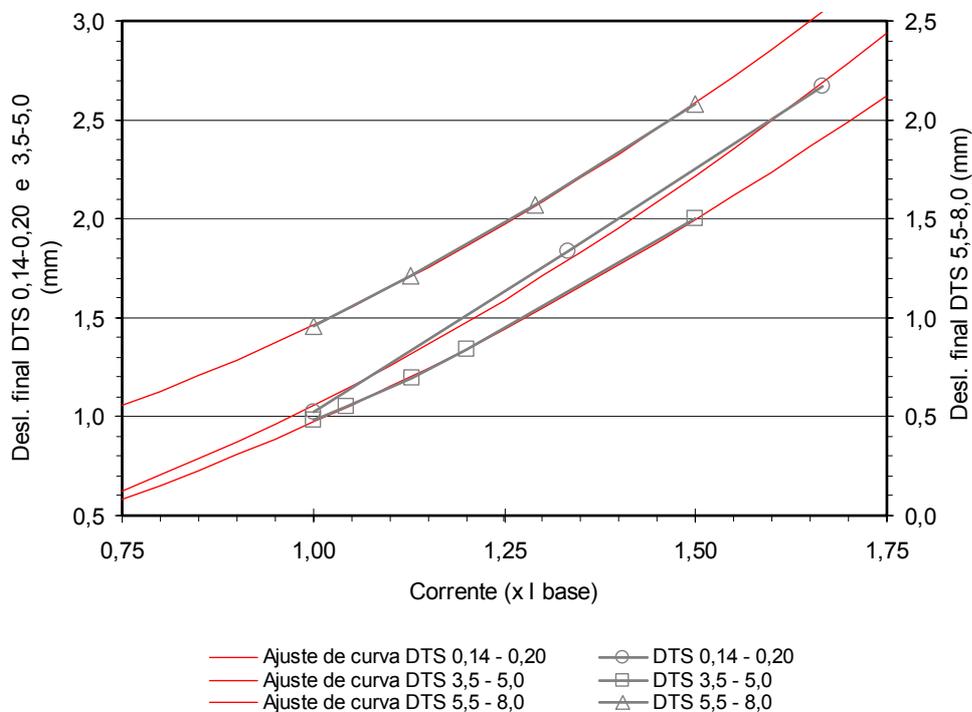
Segundo o modelo simplificado deduzido no capítulo 6, a função que relaciona o deslocamento final do bimetal com a corrente elétrica tem a forma:

$$q_{\infty} = \frac{\mathbf{a}_b \cdot L_b^2 \cdot R_{b,w} \cdot R_{elét} \cdot I_b^2}{S_b}$$

Isto sugere que as curvas de temperatura e deslocamento alcançados em regime permanente em função da corrente tenham a seguinte forma:

$$y_{\infty} = m \cdot I_b^n \quad (8.4)$$

As curvas de deslocamento e temperatura dos diversos pontos, obtidas para os três DTS's, foram ajustadas segundo a função anterior, gerando os parâmetros apresentados na Tabela 8.8. A Figura 8.18 mostra o ajuste para as curvas de deslocamento.

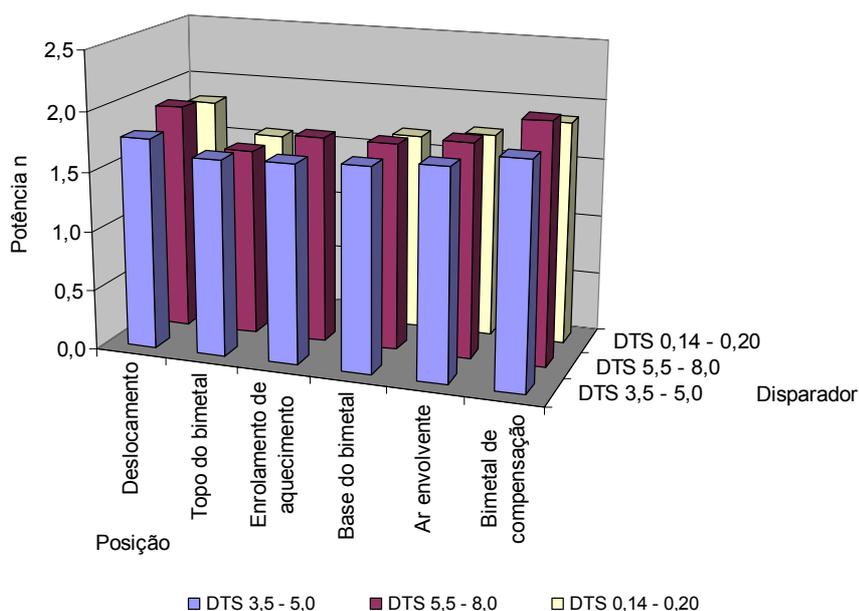


**Figura 8.18: ajuste das curvas do deslocamento em regime permanente**

**Tabela 8.8: parâmetros das curvas ajustadas dos valores de regime permanente**

Disparador	Posição	$m$	$n$
0,14 - 0,20	Deslocamento	1,059	1,82
	Topo do bimetel	57,2	1,57
	Base do bimetel	40,5	1,67
	Ar envolvente	44,4	1,73
	Bimetel de compensação	17,5	1,88
3,5 - 5,0	Deslocamento	0,972	1,77
	Contato fixo	12,8	1,73
	Topo do bimetel	56,4	1,65
	Enrolamento de aquecimento	63,5	1,67
	Base do bimetel	38,6	1,71
	Base do bimetel c	45,0	1,69
	Base do bimetel e	40,2	1,67
	Base do terminal da carga	19,5	1,62
	Ar envolvente	44,9	1,76
Bimetel de compensação	19,6	1,87	
5,5 - 8,0	Deslocamento	0,963	1,91
	Topo do bimetel	50,8	1,58
	Enrolamento de aquecimento	56,3	1,74
	Base do bimetel	45,1	1,74
	Ar envolvente	41,2	1,81
	Bimetel de compensação	16,6	2,03

**Comparação dos Valores da Potência  $n$**



**Figura 8.19: gráfico dos valores da potência  $n$  para os três disparadores**

A análise da tabela revela que a potência  $n$  tem em geral um valor entre 1,6 e 1,8. A Figura 8.19 compara o valor deste parâmetro das curvas de temperatura de diferentes posições, nos três disjuntores. O gráfico revela muita disparidade nos valores para diferentes posições, e valores mais altos no disparador 5,5 - 8,0.

## 8.5 Conclusões

O procedimento experimental aqui descrito possibilitou chegar às seguintes conclusões:

- ✓ o bimetal apresenta um perfil de temperatura ao longo de seu eixo longitudinal (eixo  $x$ );
- ✓ o calor é extraído do bimetal tanto pelo o ar circundante, por convecção natural, quanto pelos elementos que compõem o caminho da corrente elétrica, por condução térmica;
- ✓ o fio de cobre usado na conexão do disjuntor ao circuito externo influi no desempenho do DTS;
- ✓ a temperatura do bimetal de compensação eleva-se durante o período de aplicação de corrente, chegando a ter sua temperatura elevada em 40 °C para uma corrente de 1,5 vez a corrente base;
- ✓ o disjuntor como um todo se aquece quando a corrente é introduzida, formando um complexo sistema térmico; todos os componentes têm sua parcela de influência na determinação da temperatura dos bimetais;
- ✓ a temperatura de um bimetal influi na dos seus vizinhos; a temperatura do bimetal central é em geral superior à dos outros dois;
- ✓ a maior condutividade térmica do bimetal do DTS 5,5 - 8,0 produz uma mudança significativa em seu perfil de temperatura, quando comparado aos resultados obtidos pelos outros dois disparadores;
- ✓ as curvas de deslocamento e temperatura dos diversos pontos do disjuntor assemelham-se muito a curvas de sistemas dinâmicos de segunda ordem;
- ✓ as constantes de tempo também variam com as correntes aplicadas;
- ✓ quando se ajusta as curvas dos deslocamentos e das temperaturas finais

(alcançados em regime permanente) em uma função  $y_{\infty} = m \cdot l_b n$ , os valores da potência  $n$  estão em geral entre 1,6 e 1,8, menores portanto que o valor encontrado no modelo térmico simplificado, desenvolvido anteriormente, que é 2;

- ✓ a metodologia de ensaio usada mostra-se apropriada para o levantamento de curvas de aquecimento dos bimetálicos de DTS's.

## **9. ESTUDO SOBRE SIMULAÇÃO DE DISPARADORES**

No capítulo 6 foi proposto um modelo a partir de simplificações. Este modelo permitiu obter algumas das respostas para as perguntas feitas no capítulo 4. Em relação à questão 3, sobre a maneira com que os diferentes parâmetros, geométricos e de material, dos componentes do disparador influem sobre a sua curva característica, pôde-se avaliar qualitativamente que: fatores relacionados à distância ao ponto de disparo deslocam a curva característica horizontalmente; e fatores relacionados à rapidez com que os bimetais se aquecem, deslocam a curva verticalmente.

Porém, para que esta influência possa ser avaliada quantitativamente, torna-se necessário elaborar um modelo mais refinado, capaz de descrever o comportamento do sistema com maior exatidão. Tal modelo certamente não terá uma forma analítica como a apresentada no capítulo 6, mas sim uma forma muito mais complexa, sendo desenvolvido com a utilização de técnicas específicas de simulação sobre as quais pretende-se discorrer mais adiante neste capítulo.

### **9.1 Particularidades dos Disparadores Térmicos de Sobrecarga**

Antes, contudo, é importante destacar algumas particularidades observadas no comportamento térmico de um DTS; elas serão fundamentais para a escolha das técnicas a serem utilizadas na determinação de um modelo que o descreva. Através dos ensaios realizados e de constatações práticas, pôde-se perceber que:

- ✓ o material isolante introduzido entre o bimetal e seu enrolamento de aquecimento constitui uma resistência térmica que a princípio não pode ser determinada por cálculo, pois seu valor depende também de outros fatores além da sua condutividade térmica, como por exemplo a intensidade da pressão aplicada

sobre o enrolamento de aquecimento durante o processo de fabricação dos conjuntos bimetálicos;

- ✓ o ar do interior do disjuntor troca calor com os componentes sólidos do disparador por convecção natural. O coeficiente de convecção, entretanto, varia de um ponto para outro dentro do DTS, inclusive com o tempo, graças às variações de temperatura já citadas. Contudo, devido à geometria complexa do interior do disjuntor, a determinação dos coeficientes de convecção livre das superfícies de seus componentes é bastante difícil, seja experimentalmente ou através de cálculo;
- ✓ o ar do interior do disjuntor comporta-se como um componente térmico do sistema: ele tem temperatura e capacidade térmica própria, recebe e transmite calor de e para outros componentes. Mais do que isto, o ar da cavidade de cada um dos bimetálicos e também a cavidade do resto do mecanismo do disjuntor parecem comportar-se como componentes distintos, tendo suas próprias temperaturas;
- ✓ provavelmente a troca de calor entre o ar das cavidades internas do disjuntor se dá em grande parte pelo fluxo de massa entre elas, e não apenas por condução entre as paredes que as separam, apesar das pequenas aberturas que as separam;
- ✓ para a determinação exata do tempo de disparo é necessário conhecer a temperatura do bimetálico de compensação, componente que se encontra na cavidade principal do disjuntor e se aquece apenas através do ar aquecido desta cavidade; a determinação da temperatura do bimetálico de compensação corresponde à determinação da relação  $f_7$  do capítulo 5;
- ✓ a deflexão dos bimetálicos é determinada a partir do perfil de temperatura do bimetálico, e é uma função do diferente coeficiente de expansão térmica dos materiais constituintes da lâmina bimetálica; sendo que este problema mecânico (correspondente à relação  $f_4$  do capítulo 5) está acoplado intrinsecamente ao problema térmico de determinação do perfil de temperatura do bimetálico (relação  $f_3$ );
- ✓ em disparadores que possuam enrolamentos de aquecimento que apresentam elevada rigidez, a deformação do bimetálico pode não refletir apenas a geometria e o material do bimetálico, mas também ter influência do enrolamento;

- ✓ a curva característica - que é a representação do sistema e, em última análise, é a informação que se deseja obter do modelo de um disparador - é fundamentalmente produzida pela dinâmica do sistema e, portanto, o método de cálculo da simulação deve permitir conhecer os estados intermediários do processo de aquecimento do sistema, e não apenas seu estado final;
- ✓ o tempo de cálculo necessário para a simulação do disparador em uma determinada condição é um aspecto muito importante quando se discute o método de simulação, principalmente quando se prevê que o modelo criado será usado em análises que necessitam grande número de simulações;
- ✓ os sistemas térmicos de cada um dos três bimetálicos devem ser simulados simultaneamente, apesar de possuírem geometrias idênticas, o que irá aumentar ainda mais o tempo de cálculo.

## 9.2 Métodos de Simulação

Foi realizado um breve estudo sobre dois métodos de simulação muito utilizados, considerados previamente adequados para este caso, com a intenção de avaliar o método de análise mais apropriado para a elaboração de um modelo matemático para o DTS. São eles: o método de elementos finitos (Finite Elements Method, FEM) e o de diferenças finitas. Foram realizadas inclusive pequenas experiências com o auxílio de softwares específicos, a fim de verificar a potencialidade do uso de tais métodos na elaboração de um modelo matemático para DTS's.

Ambos os métodos são bastante conhecidos e, por este motivo, não serão feitas aqui explicações sobre seus procedimentos. A seguir estão relacionadas as observações relativas à aplicabilidade de ambos os métodos encontradas durante o estudo feito.

### 9.2.1 Método de Elementos Finitos

- ✓ a análise por FEM permite cálculos dinâmicos com tempo de execução razoavelmente curto apenas para cálculos térmicos onde a temperatura do ar ambiente for constante ou tiver uma variação pré-definida. Para simulação em situações em que o ar ambiente comporta-se como um componente do sistema - alterando sua temperatura de acordo com a quantidade de calor recebida/transferida - e principalmente, onde há transferência de calor também pelo fluxo de massa de ar entre as cavidades do disjuntor, é necessário incluir no conjunto de equações a serem resolvidas também equações de mecânica dos fluidos. Tais equações permitem calcular a variação de temperatura, o fluxo de ar entre cavidades e os coeficientes de convecção de calor nas paredes e superfícies dos componentes do disjuntor. Apesar de ser possível o cálculo da dinâmica do fluido, o tempo de execução é muitas vezes maior do que apenas o do cálculo da dinâmica térmica dos sólidos;
- ✓ o cálculo da deformação e, em consequência, da deflexão do bimetal é relativamente simples com FEM; podendo inclusive ser acoplado diretamente ao das temperaturas;
- ✓ a geometria do modelo é obtida, em geral, com base em um modelo tridimensional do disjuntor, a partir do qual é necessário apenas criar a malha de elementos, para em seguida efetuar a análise propriamente dita;
- ✓ a geometria dos três conjuntos bimetálicos é idêntica; um único modelo tridimensional pode ser criado para gerar o modelo matemático dos três bimetais. Apesar de facilitar a etapa de modelagem, a similaridade dos três conjuntos não ajuda na etapa de cálculo, pois ainda é necessário o cálculo dos três conjuntos simultaneamente;
- ✓ a determinação da variação dos deslocamentos da ponta livre dos três bimetais não determina ainda o tempo de disparo. Apesar desta determinação ser a mais importante, e de seu cálculo ser o único que envolve a dinâmica do disparador, é necessário ainda avaliar o comportamento que estes deslocamentos provocam nos outros subsistemas, como o sistema de sensibilidade à falta de fase, por exemplo. A resolução das relações mecânicas por FEM, ainda que possível, não é conveniente, visto que, em geral, são relações algébricas. Além disso, é difícil

contemplar o cálculo de atrito com FEM, encontrado na relação  $f_8$ .

### 9.2.2 Diferenças Finitas/Modelo de Rede

Como em toda a análise por diferenças finitas, inicialmente deve ser realizada a discretização do domínio do problema. O bimetal e demais componentes envolvidos na análise devem ser discretizados em pequenas porções individuais, as quais apresentam temperatura própria e trocam calor com as partes vizinhas, sendo esta troca feita por meio de uma resistência térmica, de valor determinado pelas propriedades dos materiais envolvidos. Cada porção individual tem uma capacidade térmica e pode ter uma segunda resistência térmica – neste caso, de convecção – com o ar ambiente. O conjunto final é um grande modelo de rede de resistências e capacidades térmicas.

Este modelo de rede deve ser calculado para gerar resultados quantitativos, o que pode ser feito de forma semelhante ao método das diferenças finitas, que numa análise mais simplificada, traduz-se na resolução de um grande sistema de equações lineares. Sobre a utilização deste mecanismo para a simulação de DTS's, fez-se as observações abaixo:

- ✓ é necessário criar manualmente todo o conjunto de equações para calcular o sistema;
- ✓ o analista tem o completo domínio sobre as equações, já que o conjunto das equações é criado por ele próprio, podendo portanto controlar fatores como convergência, precisão, etc.;
- ✓ é difícil refinar o modelo, pois neste caso todo o sistema de equações deveria ser reescrito;
- ✓ com o auxílio de um software com recursos de manipulação de matrizes, a simulação de um sistema dinâmico - representado por um modelo de rede de elementos distribuídos - a partir do cálculo de seu sistema de equações lineares, é relativamente rápida. O cálculo da dinâmica do sistema é ainda mais rápido se a matriz de coeficientes do sistema de equações lineares não mudar (o que significa que as propriedades dos materiais não devem se alterar com a variação

da temperatura).

- ✓ pode-se facilmente juntar os outros subsistemas do disparador, pois as funções que descrevem seus comportamentos são, a princípio, relações algébricas;

A simulação por diferenças finitas apresenta dois mecanismos de cálculo: o explícito e o implícito. Ambos foram avaliados e observações de sua aplicabilidade estão relacionadas abaixo.

### ***Método explícito:***

- ✓ a resolução das equações é feita de maneira iterativa, resolvendo-se o sistema de elemento em elemento;
- ✓ apresenta problemas de convergência de resultados. Para contornar este problema, utiliza-se, geralmente, nos problemas simples, quando se trabalha com apenas um corpo discretizado, um índice de convergência. Como, neste caso, trata-se de vários componentes de materiais diversos, a determinação deste índice é muito difícil, dificultando o uso deste método.

### ***Método implícito:***

- ✓ sempre converge;
- ✓ não é um processo iterativo; necessita a resolução de um sistema de equações lineares, e por isso o método só é resolvido com ajuda de um software com recursos de manipulação de matrizes;
- ✓ a precisão final da análise pode ser controlada pela administração do valor do intervalo de tempo.

Para chegar a estas conclusões, foi elaborado um modelo de rede de resistências para o bimetal do DTS 3,5 - 5,0. O bimetal em si foi discretizado longitudinalmente em 30 partes, e o isolamento e o enrolamento de aquecimento, em 12 partes cada um. Como condições de contorno, fixou-se as temperaturas da base do bimetal e da ponta final do enrolamento de aquecimento, além da temperatura do ar. A transferência de calor entre os elementos e o ar foi considerado convecção livre. Equações para as taxas de transferência de calor entre cada um dos elementos foram determinadas manualmente, gerando um sistema de 54 equações e 54

incógnitas.

Para a resolução do sistema foram testados ambos os métodos, implícito e explícito. Apenas um conjunto bimetálico foi simulado. Com o método explícito não foi possível encontrar um índice de convergência, nem foi possível fazer com que o sistema convergisse, mesmo com passos de iteração extremamente pequenos. Já o método implícito forneceu resultados coerentes, mas cujos valores quantitativos ainda não correspondem ao verificados na prática (variações de temperatura finais cerca de 50 % menores), provavelmente devido às condições de contorno (temperaturas fixas).

### 9.3 Sugestões de Estratégia para Elaboração de um Modelo para o Disparador

Com as conclusões alcançadas, pode-se definir mais claramente uma estratégia para a continuação do estudo de DTS's.

Encontrar um modelo que descreva o DTS significa encontrar a forma da relação  $f_1$  apresentado no capítulo 5, relação esta que, conforme proposto naquele capítulo, pode ser dividida em relações mais simples ( $f_3$  a  $f_9$ ). A determinação de uma forma para cada uma destas relações leva a determinação de um modelo para o DTS. Abaixo, sugere-se uma forma de determinação destas relações.

- ✓ as relações  $f_5$ ,  $f_6$ ,  $f_8$  e  $f_9$  podem ser obtidas apenas pela verificação da geometria do sistema, e escritas em uma forma analítica;
- ✓ o cálculo das deformações mecânicas provocadas pela variação da temperatura do bimetal, correspondente à relação  $f_4$ , pode ser realizado por FEM, levando em conta o efeito da rigidez do enrolamento de aquecimento. Para obter melhor exatidão na determinação desta relação, é importante comparar estes resultados com ensaios mecânicos e estabelecer uma relação entre a temperatura do bimetal e o deslocamento de sua ponta livre;
- ✓ a determinação das relações  $f_3$  e  $f_7$  é a mais trabalhosa, pois tais relações além

de apresentarem dinâmica, também envolvem a determinação do escoamento do ar entre as cavidades. O cálculo destas relações pode ser determinado tanto por FEM quanto por diferenças finitas, mas prevê-se que o tempo de execução de uma simulação por FEM seria muito maior. Por isso sugere-se o método de diferenças finitas, devendo ser elaborado um modelo de rede de resistências e capacidades térmicas, discretizando os componentes do disjuntor; estabelecendo as equações de troca de calor entre estas porções discretizadas, e arranjando-as em forma de um sistema de equações lineares;

- ✓ para determinar os fluxos de ar entre as cavidades do disjuntor sugere-se o uso do cálculo por FEM em condições estáticas, verificando posteriormente a relação entre as temperaturas do ar do interior de cada cavidade com a taxa de transferência de calor entre elas;
- ✓ o valor da resistência térmica proporcionada pelo material isolante entre o bimetal e o enrolamento de aquecimento pode ser determinado através da análise de dados experimentais;

A união de todas relações algébricas determinadas com o sistema de equações lineares representando as relações  $f_3$  e  $f_7$ , gera assim um modelo matemático final para o DTS, capaz de determinar o tempo de desarme de um disparador em função da corrente que circula nos bimetais.

## 10. CONCLUSÕES

As conclusões do trabalho estão reunidas abaixo, separadas em tópicos.

### 10.1 Discussão do Problema de Projeto de Disparadores

De maneira geral, três princípios básicos podem ser tomados para guiar a etapa de projeto de disparadores térmicos de sobrecarga:

- ✓ deve-se garantir que a curva característica do DTS esteja de acordo com as restrições impostas pelas normas aplicáveis;
- ✓ deve-se projetá-lo de forma que sua faixa de aplicação seja a maior possível, ou seja, deve-se maximizar a faixa de corrente de ajuste do DTS;
- ✓ o disparador deve ser projetado de forma que um mínimo de componentes seja diferente entre DTS's de faixas de ajuste de corrente diferentes.

### 10.2 Análise do Disparador

- ✓ o sistema pode ser representado como um diagrama de blocos, cujos sinais de entrada são as correntes elétricas aplicadas aos bimetálicos, o valor do nível de corrente ajustada no *dial* e a temperatura ambiente, e o sinal de saída é o tempo em que ocorre o disparo;
- ✓ o disparador pode ser dividido em quatro subsistemas: bimetálicos de operação, sistema de sensibilidade a falta de fase, conjunto bimetal de compensação - sistema de ajuste de corrente, e sistema de liberação do mecanismo;
- ✓ cada subsistema apresenta seus próprios sinais de entrada e saídas, e as relações entre estes e as variáveis internas destes devem ser determinadas para a representação completa do sistema;
- ✓ a relação mais importante entre as variáveis é a relação entre as correntes

aplicadas e as elevações das temperaturas dos bimetais, pois é a relação que confere a dinâmica ao sistema.

### 10.3 Modelo Simplificado

- ✓ a forma da curva característica do DTS é dada pela fórmula (6.14);
- ✓ a curva mantém sua forma para qualquer valor de corrente de trabalho  $I_e$ ;
- ✓ na fórmula (6.14), o tempo de disparo  $t_p$  é a variável dependente, a sobrecorrente  $p$  é a independente, a relação de carregamento prévio  $v$  é uma condição de pré-carregamento, e  $\tau$  e  $g$  são os únicos parâmetros ligados a propriedades físicas e geométricas do sistema;
- ✓  $\tau$  desloca a curva característica verticalmente e  $g$ , horizontalmente;
- ✓ erros devidos a tolerâncias de fabricação podem estar contidos nos parâmetros  $g$  e  $\tau$ , deslocando a curva correspondentemente conforme a influência dos respectivos parâmetros;
- ✓ a correção dos erros atua deslocando a curva apenas horizontalmente, ou seja, atuando apenas sobre  $g$ ;
- ✓ o perfil do came deve ter uma relação linear entre giro e deslocamento;
- ✓ a curva característica tem uma forma algébrica se o sistema apresentar um comportamento de um sistema dinâmico de primeira ordem;
- ✓ a curva característica tem sempre a mesma forma se as curvas de deslocamento do sistema puderem ser descritas como sendo igual ao comportamento de curvas de um sistema dinâmico de ordem  $n$ , onde apenas o parâmetro relacionado ao valor final atingido é dependente da corrente, e todos os outros parâmetros (constantes de tempo e respectivos coeficientes) são independentes dela.

## 10.4 Comportamento Térmico dos Bimetais Verificado no Procedimento Experimental

- ✓ o bimetal apresenta um perfil de temperatura ao longo de seu eixo longitudinal (eixo  $x$ );
- ✓ o calor é extraído do bimetal tanto pelo o ar circundante, por convecção natural, quanto pelos elementos que compõem o caminho da corrente elétrica, por condução térmica;
- ✓ o fio condutor utilizado na conexão do disjuntor ao circuito externo influi no desempenho do DTS;
- ✓ a temperatura do bimetal de compensação eleva-se durante o período de aplicação de corrente, chegando a ter sua temperatura elevada em 40 °C para uma corrente de 1,5 vez a corrente base;
- ✓ o disjuntor como um todo se aquece quando a corrente é introduzida, formando um complexo sistema térmico; todos os componentes têm sua parcela de influência na determinação da temperatura dos bimetais;
- ✓ a temperatura de um bimetal influi na dos seus vizinhos; a temperatura do bimetal central é em geral superior à dos outros dois;
- ✓ a maior condutividade térmica do bimetal do DTS 5,5 - 8,0 produz uma mudança significativa em seu perfil de temperatura, quando comparado aos resultados obtidos pelos outros dois disparadores;
- ✓ as curvas de deslocamento e temperatura dos diversos pontos do disjuntor assemelham-se muito a curvas de sistemas dinâmicos de segunda ordem;
- ✓ as constantes de tempo também variam com as correntes aplicadas;
- ✓ quando se ajustam as curvas dos deslocamentos e das temperaturas finais (alcançados em regime permanente) em uma função  $y_{\infty} = m \cdot I_b^n$ , os valores da potência  $n$  estão em geral entre 1,6 e 1,8, menores portanto que o valor encontrado no modelo térmico simplificado, desenvolvido anteriormente, que é 2;
- ✓ a metodologia de ensaio usada mostra-se adequada para o levantamento de curvas de aquecimento dos bimetais de DTS's.

## 10.5 Estudo sobre Simulação de Disparadores

A estratégia sugerida no capítulo 9 segue os pontos abaixo:

- ✓ encontrar relações algébricas para as relações  $f_5$ ,  $f_6$ ,  $f_8$  e  $f_9$ , pela verificação da geometria do sistema;
- ✓ calcular os fluxos de ar entre as cavidades do disjuntor por FEM em condições estáticas, verificando posteriormente a relação entre as temperaturas do ar do interior de cada cavidade com a taxa de transferência de calor entre elas;
- ✓ calcular as deformações mecânicas provocadas pela variação da temperatura do bimetal por FEM, levando em conta o efeito da rigidez do enrolamento de aquecimento; comparar estes resultados com ensaios mecânicos e estabelecer uma relação entre a temperatura do bimetal e o deslocamento de sua ponta livre;
- ✓ através da análise de dados experimentais, verificar o valor da resistência térmica proporcionada pelo isolamento entre o bimetal e o enrolamento de aquecimento;
- ✓ elaborar um modelo de rede de resistências e capacidades térmicas, discretizando os componentes do disjuntor; estabelecer as equações de troca de calor entre estas porções discretizadas, arranjando-as em forma de um sistema de equações lineares, onde a matriz de coeficientes é gerada a partir de parâmetros retirados das propriedades dos materiais ou das relações descritas nos pontos anteriores;
- ✓ unir as relações algébricas encontradas para  $f_4$ ,  $f_5$ ,  $f_6$ ,  $f_8$  e  $f_9$ , com o sistema de equações lineares anterior, gerando assim um modelo matemático capaz de determinar o tempo de desarme de um disparador em função da corrente que circula nos bimetais

## 10.6 Sugestões para Trabalhos Futuros

Este trabalho pretende ser um estudo inicial sobre disparadores térmicos de sobrecarga, não um trabalho completo. Por isso sugere-se aqui alguns temas

para a continuação do estudo sobre estes dispositivos. Como o maior interesse no estudo do DTS recai sobre a determinação da curva característica do disparador, a elaboração de um modelo, que possa ser usado para obter esta curva, é a principal assunto para trabalhos futuros. Neste sentido, sugere-se os seguintes temas:

- ✓ estudo do uso do método de elementos finitos para o modelamento do sistema térmico do disparador, incluindo no modelo o ar interno do disjuntor;
- ✓ estudo pelo método de elementos finitos da deflexão dos bimetálicos e da influência do enrolamento de aquecimento sobre a mesma;
- ✓ elaboração de um modelo de redes de resistência mais elaborado e abrangente para o DTS;
- ✓ determinação das relações estáticas do sistema do disparador;
- ✓ estudo para encontrar respostas para as perguntas do capítulo 4 ainda não respondidas;
- ✓ obtenção experimental de curvas de aquecimento para correntes maiores (por exemplo,  $7,2 \times I_{base}$ ).



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- /BUR90/ BURKHARD. **Schaltgeräte der Elektroenergietechnik.** [S.l.: s.n.], [199-?].
- /CAR93/ CARAMANO, D. M. **Procedimentos aplicáveis à garantia da qualidade metrológica na termometria automatizada com termopar e sensores resistivos.** Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 1993. 129 p. Dissertação de mestrado.
- /CON87/ CONSIDINE, D. M. **Process instruments and control handbook.** 3ª Edição. New York: McGraw-Hill, 1987.
- /COT92/ COTRIM, A. A. M. B. **Instalações elétricas.** 3ª Edição. São Paulo: Makron Books do Brasil Ltda., 1992. 887 p.
- /DPA97/ DEUTSCHES PATENTAMT, Siemens AG. **Justierverfahren für thermische Überlastauslöser,** Int. Cl.<sup>6</sup> H 01 H 71/74. DE 196 19 295 A 1. 13 maio 1996, 20 nov. 1997.
- /RAU89/ G.RAU. **Thermobimetalle:** Grundlagen, Berechnug, Gestaltung, Auswahl. Pforzheim: [s.n.], 1989. 208 p.
- /IW92/ INCROPERA, F. P.; WITT, D. P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa.** 3ª edição. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1992. 455 p.
- /KAŠ60/ KAŠPAR, F. **Thermobimetalle in der Elektrotechnik.** Berlin: VEB-Verlag Technik, 1960. 371 p.
- /KI99/ KAWASE, Y.; ICHIHASHI T. Heat analysis of thermal overload relays using 3-D finite element method. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 35, n. 3, p. 1658-1661, maio 1999.
- /MON97/ MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments.** 4ª Edição. Tempe: John Wiley & Sons, 1997. 704 p.
- /NAC90/ NACHTIGAL, C. L. **Instrumentation and control: fundamentals and applications** New York: Wiley-Interscience publication, 1990. 890 p.
- /SCH76/ SCHMELCHER, T. **Low voltage switchgear.** Londres: Heyden, 1976. 134 p.

- /SIE90/ SIEMENS AG. **Manual de baixa tensão:** Informações técnicas para aplicação de dispositivos de manobra, comando e proteção. 2ª edição revisada. São Paulo: Livraria Nobel, 1990. v. 1, 337 p.
- /SIE00/ SIEMENS AG. Products & Solutions. Automation and Drives. Protection Devices. Circuit-Breaker SIRIUS. Disponível em: <[www.siemens.com](http://www.siemens.com)>. Acesso em: fevereiro 2000.
- /SIE91/ SIEMENS AG. **Schalten, Schutzen, Verteilen in Niederspannungsnetzen.** [S.l.: s.n.], [199-?].
- /WAC90/ WEG ACIONAMENTOS LTDA. **Manual de contadores e relés de sobrecarga.** Jaraguá do Sul.: [s.n.], [199-?].

## ANEXO



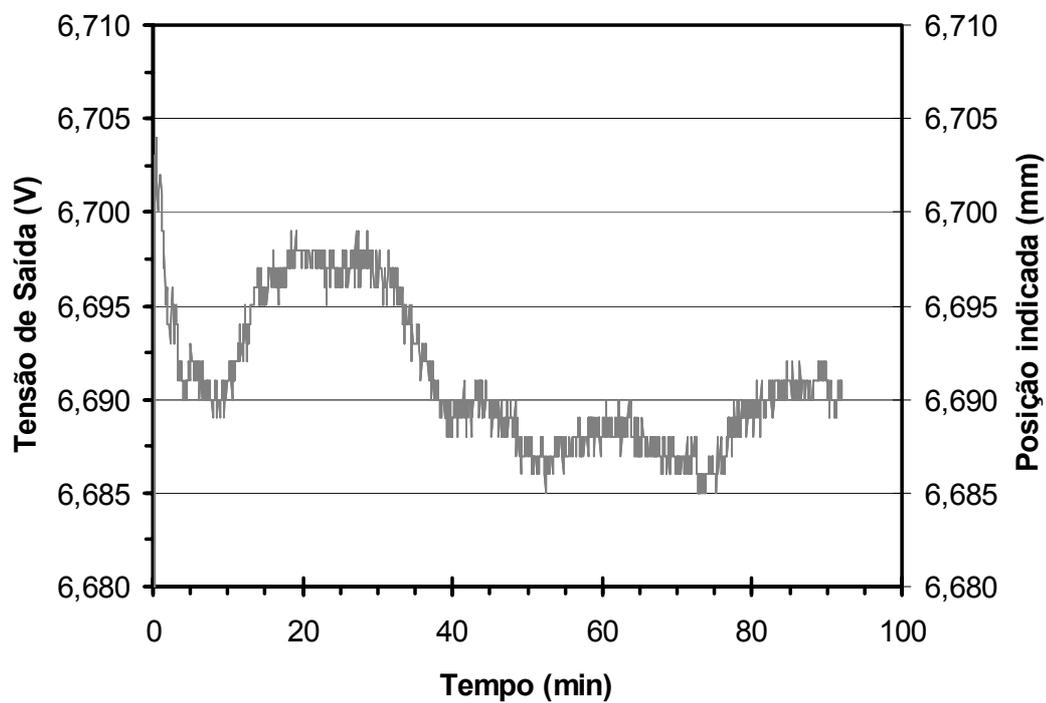


Figura 10.1: avaliação da estabilidade do laser

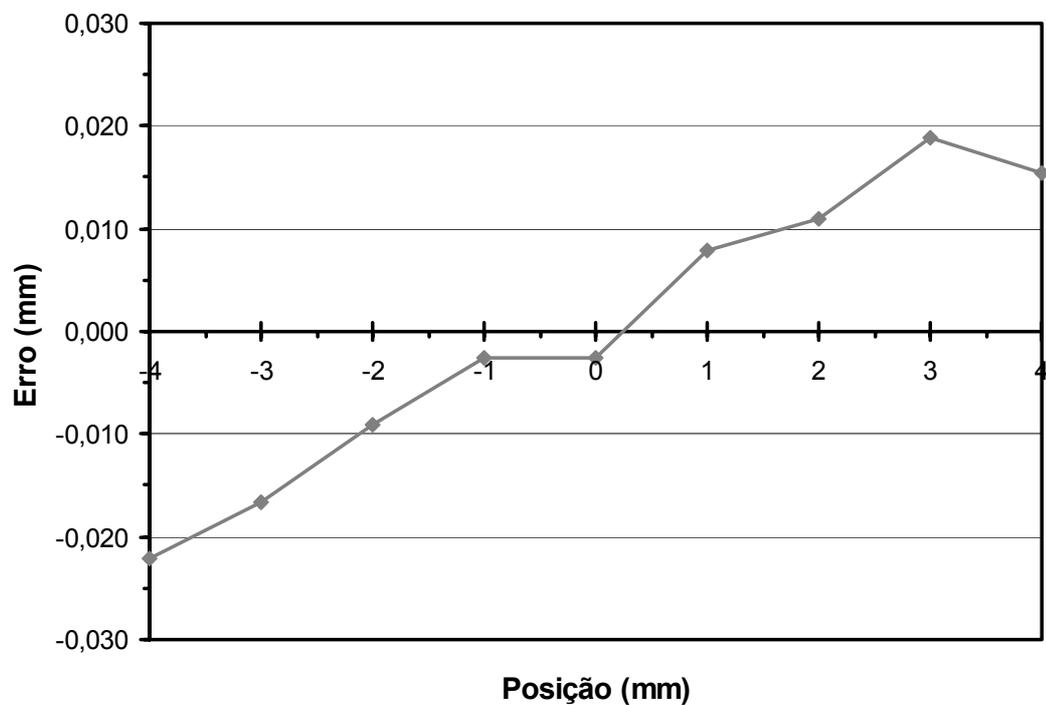
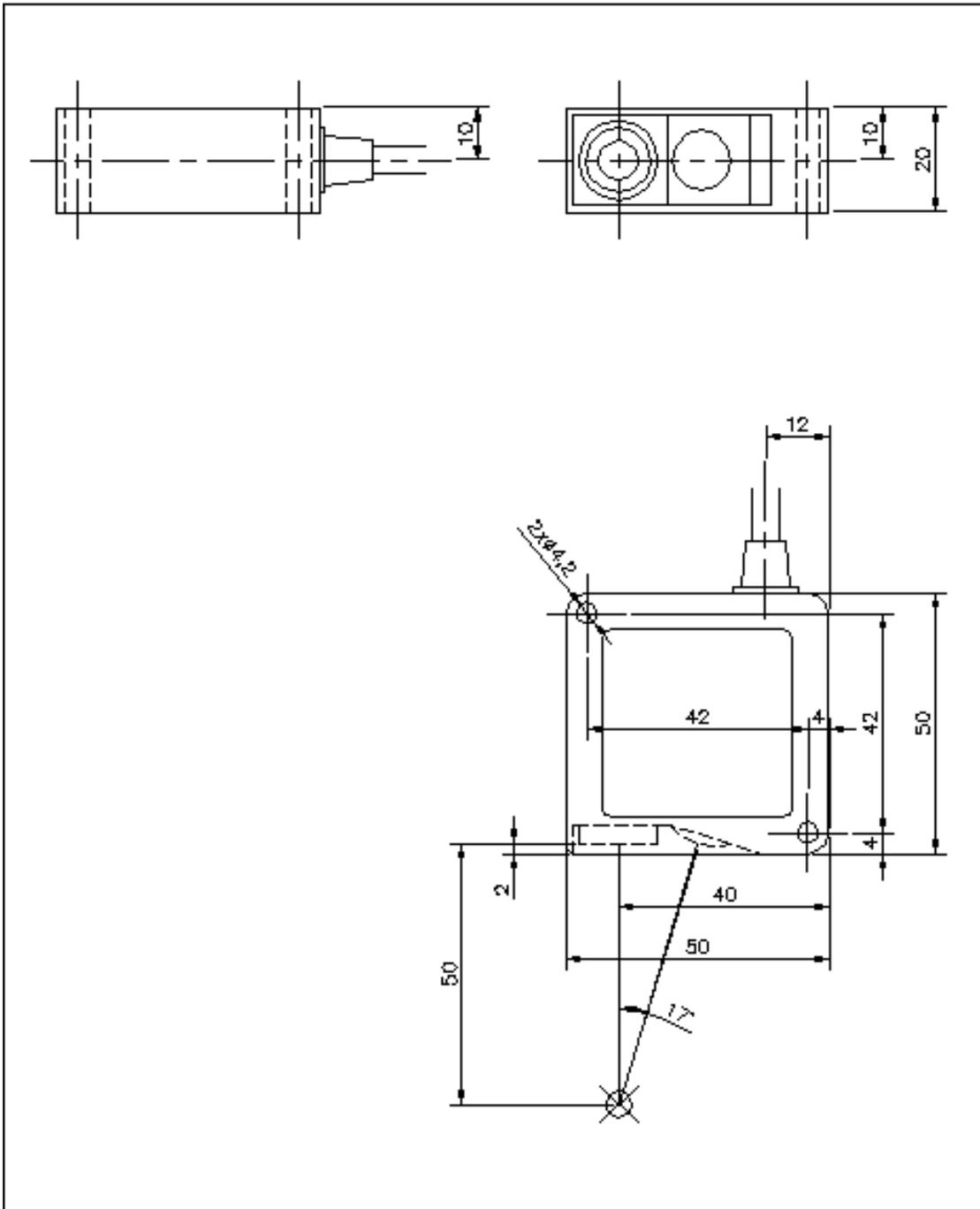


Figura 10.2: avaliação da acuracidade do laser



[Verwendungsbereich]		[Zul. Abw.]	[Oberfl.]	Maßstab 1:1	[Gewicht]
				[Werkstoff, Halbzeug] [Rohteil-Nr] [Modell- oder Gesenk-Nr]	
			Datum	Name	Laser
			Bearb. 14.11.99	EDG	
			Gepr. 11.01.10	XXX	
			Norm		
					XXX
					Blatt
					Blätter
Zust	Änderung	Datum	Name	Ursprung	Ersatz für
					Ersatz durch

Figura 10.3: dimensões do laser

**Tabela 10.1: parâmetros das curvas ajustadas do disparador 0,14 - 0,20**

Parâmetros	Posição	Corrente ( $\times I_{base}$ )		
		1,0	1,3	1,65
$y_{\infty}$	Deslocamento	1,024	1,837	2,670
	Base do bimetálico	40,5	65,4	94,8
	Bimetálico de compensação	17,5	30,2	45,8
	Topo do bimetálico	57,0	90,4	127,7
	Ar envolvente	44,4	72,8	107,1
$\tau_1$ (min)	Deslocamento	2,41	2,14	2,23
	Base do bimetálico	3,06	2,90	2,83
	Bimetálico de compensação	3,36	2,91	2,36
	Topo do bimetálico	2,39	2,29	2,30
	Ar envolvente	5,35	4,77	4,72
$\tau_2$ (min)	Deslocamento	14,7	16,8	15,4
	Base do bimetálico	17,5	16,8	16,3
	Bimetálico de compensação	17,9	15,5	14,3
	Topo do bimetálico	17,1	15,8	16,7
	Ar envolvente	20,0	18,0	17,6
$\beta$ (adm)	Deslocamento	0,565	0,539	0,613
	Base do bimetálico	0,383	0,394	0,395
	Bimetálico de compensação	-0,276	-0,268	-0,247
	Topo do bimetálico	0,656	0,685	0,712
	Ar envolvente	0,506	0,493	0,523

**Tabela 10.2: parâmetros das curvas ajustadas do disparador 3,5 - 5,0**

Parâmetros	Posição	Corrente ( $\times I_{base}$ )				
		1,0	1,05	1,125	1,2	1,5
$y_{\infty}$	Deslocamento	0,981	1,051	1,193	1,342	1,999
	Contato fixo	12,6	14,1	15,7	17,6	25,9
	Enrolamento de aquecimento	63,1	68,0	78,0	86,4	125,0
	Enrolamento de aquecimento c	72,5	-	-	-	-
	Topo do bimetálico	56,1	60,3	69,2	76,5	109,9
	Base do bimetálico	38,5	41,3	47,5	52,8	77,0
	Base do bimetálico c	45,0	48,1	55,3	61,4	89,1
	Base do bimetálico e	40,2	42,9	49,3	54,8	79,2
	Yoke	19,4	20,8	23,9	26,4	37,7
	Ar envolvente	44,6	48,2	55,6	62,7	91,5
	Bimetálico de compensação	19,2	21,2	24,8	27,8	41,7

$\tau_1$ (min)	Deslocamento	2,95	3,04	1,73	1,03	2,87
	Contato fixo	14,4	44,7	13,9	14,2	9,24
	Enrolamento de aquecimento	2,17	2,02	2,26	1,77	1,97
	Enrolamento de aquecimento c	2,34	-	-	-	-
	Topo do bimetal	2,84	2,47	3,14	2,50	2,76
	Base do bimetal	4,37	3,55	4,81	4,23	4,28
	Base do bimetal c	4,70	4,02	5,31	4,95	4,65
	Base do bimetal e	4,43	3,50	4,60	4,16	4,27
	Yoke	2,09	3,02	2,95	10,1	1,94
	Ar envolvente	6,77	5,67	7,13	5,81	6,38
Bimetal de compensação	4,06	2,43	3,36	3,68	2,87	
$\tau_2$ (min)	Deslocamento	16,1	27,5	14,3	10,4	17,0
	Contato fixo	14,4	44,7	13,9	14,2	17,2
	Enrolamento de aquecimento	15,9	13,8	14,8	11,6	14,0
	Enrolamento de aquecimento c	15,5	-	-	-	-
	Topo do bimetal	17,0	16,0	17,0	13,0	15,5
	Base do bimetal	18,1	15,9	17,4	17,5	17,0
	Base do bimetal c	17,7	15,2	17,2	18,3	17,3
	Base do bimetal e	17,6	15,7	17,0	17,8	16,7
	Yoke	15,9	13,5	13,8	10,1	13,7
	Ar envolvente	19,9	19,4	21,3	34,7	19,8
Bimetal de compensação	16,6	14,3	14,2	13,5	14,2	
$\beta$ (adm)	Deslocamento	0,452	0,472	0,287	0,218	0,539
	Contato fixo	-2055	-1,041	-7074	-2741	-1,010
	Enrolamento de aquecimento	0,544	0,470	0,533	0,494	0,580
	Enrolamento de aquecimento c	0,509	-	-	-	-
	Topo do bimetal	0,597	0,544	0,600	0,536	0,659
	Base do bimetal	0,313	0,250	0,321	0,336	0,354
	Base do bimetal c	0,308	0,212	0,303	0,340	0,344
	Base do bimetal e	0,362	0,278	0,330	0,363	0,379
	Yoke	-0,102	-0,116	-0,154	-2091	-0,114
	Ar envolvente	0,502	0,481	0,581	0,544	0,593
Bimetal de compensação	-0,409	-0,208	-0,294	-0,295	-0,324	

**Tabela 10.3: parâmetros das curvas ajustadas do disparador 5,5 - 8,0**

Parâmetros	Posição	Corrente ( $\times I_{base}$ )			
		1	1,125	1,3	1,5
$y_\infty$	Deslocamento	0,956	1,213	1,573	2,081
	Base do bimetal	45,2	55,7	70,2	91,7
	Bimetal de compensação	17,0	21,5	26,9	38,2
	Enrolamento de aquecimento	57,1	70,1	85,1	115,1
	Topo do bimetal	50,6	61,0	77,0	95,9
	Ar envolvente	41,8	51,8	63,5	86,5

$\tau_1$ (min)	Deslocamento	1,86	2,64	2,74	2,41
	Base do bimetálico	2,89	2,90	2,96	2,71
	Bimetálico de compensação	5,70	5,24	5,92	3,84
	Enrolamento de aquecimento	1,73	1,71	1,62	1,60
	Topo do bimetálico	1,73	1,87	2,16	1,92
$\tau_2$ (min)	Ar envolvente	5,37	5,63	6,15	5,42
	Deslocamento	13,8	17,7	18,5	15,3
	Base do bimetálico	16,8	17,0	17,0	15,9
	Bimetálico de compensação	17,4	17,1	15,4	16,0
	Enrolamento de aquecimento	15,7	15,4	15,3	14,9
$\beta$ (adm)	Topo do bimetálico	16,2	15,5	16,3	16,5
	Ar envolvente	17,8	18,7	18,7	17,3
	Deslocamento	0,282	0,401	0,406	0,419
	Base do bimetálico	0,354	0,372	0,375	0,370
	Bimetálico de compensação	-0,548	-0,496	-0,713	-0,372
	Enrolamento de aquecimento	0,461	0,473	0,448	0,482
	Topo do bimetálico	0,477	0,489	0,468	0,534
	Ar envolvente	0,297	0,349	0,342	0,354

**Tabela 10.4: parâmetros das curvas ajustadas dos ensaios com o bimetálico isolado**

Parâmetros	Posição	Disparador (por corrente x $l_{base}$ )		
		0,14 - 0,20	5,5 - 8,0	
		1,0	1,0	1,5
$y_\infty$	Deslocamento	0,715	0,633	1,358
	Base do bimetálico	23,8	28,1	56,8
	Enrolamento de aquecimento	-	37,5	72,9
	Topo do bimetálico	35,2	36,8	73,1
$\tau_1$ (min)	Deslocamento	1,25	2,45	2,13
	Base do bimetálico	2,48	2,81	2,46
	Enrolamento de aquecimento	-	1,32	1,03
	Topo do bimetálico	1,92	1,68	1,57
$\tau_2$ (min)	Deslocamento	4,75	8,52	7,83
	Base do bimetálico	10,3	8,66	7,00
	Enrolamento de aquecimento	-	5,72	4,08
	Topo do bimetálico	20,0	7,03	5,69
$\beta$ (adm)	Deslocamento	0,601	0,735	0,699
	Base do bimetálico	0,695	0,689	0,623
	Enrolamento de aquecimento	-	0,593	0,515
	Topo do bimetálico	0,038	0,709	0,707