

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

*MODELAMENTO DE UM MINIDISJUNTOR SOB
CURTO-CIRCUITO*

Dissertação submetida à

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

para a obtenção do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

IVO DETLEV GÜNTHER

Florianópolis, Fevereiro de 2005.

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

MODELAMENTO DE UM MINIDISJUNTOR SOB
CURTO-CIRCUITO

IVO DETLEV GÜNTHER

Esta tese ou 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. José A. Bellini Cunha Neto, Dr. - Coordenador do Curso

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jonny Carlos da Silva - Presidente

Prof. Dr. Daniel Martins

Prof. Dr. Hari Bruno Mohr

Escolha um trabalho que você ame
e não terá que trabalhar um único dia em sua vida.
Confúcio

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Professor Dr. Carlos Alberto Martin sempre presente com colaborações insofismáveis para a qualidade do trabalho.

Aos meus colegas de trabalho no Setor de Engenharia de Produtos da Weg Acionamentos, pelo grande auxílio na troca de idéias e experiências durante a execução do trabalho.

Aos professores que por várias vezes se esforçaram em atender às demandas de um grupo especial de alunos oriundos da Weg Acionamentos, adequando seus horários e até as ementas das matérias às necessidades deste grupo.

À Weg Acionamentos por proporcionar a oportunidade deste enriquecimento em minha qualificação profissional e pessoal.

Aos colegas do laboratório de Pesquisa & Desenvolvimento da Weg Acionamentos, pelo esforço e dedicação quando da execução de diversos ensaios e medições.

À UFSC e ao POSMEC através de seus funcionários e professores sempre dispostos a ajudar.

I - SUMÁRIO

I - SUMÁRIO	vi
II- Lista de Figuras	viii
1 Introdução	1
2 Revisão bibliográfica e apresentação detalhada do problema	6
2.1 Introdução	6
2.2 O curto-circuito	6
2.3 Dispositivos de proteção contra curtos-circuitos	9
2.3.1 O fusível	9
2.3.2 O disjuntor	10
2.4 Coordenação e Seletividade em curto-circuito	11
2.4.1 Coordenação	11
2.4.2 Seletividade	12
2.4.2.1 Definição	12
2.4.2.2 Tipos de seletividade	14
2.5 O processo de limitação de corrente	18
2.5.1 Razões para limitar a corrente de curto-circuito	18
2.5.2 Como obter a limitação de curto-circuito	21
2.5.3 Como é produzida a tensão u_a	23
2.5.4 O arco elétrico	24
3 Equacionamento e modelamento de um minidisjuntor sob curto-circuito	29
3.1 Introdução	29
3.2 O Objeto em estudo	29
3.3 Recursos computacionais utilizados para o modelamento	32
3.3.1 Razões para a escolha da linguagem de modelamento “Modelica”	33
3.4 Sistemas que devem ser modelados	35
3.5 O modelo sólido em 3D e em desenho 2D	38
3.6 Obtenção do modelo dinâmico do mecanismo do minidisjuntor	41
3.6.1 Apresentação	41
3.6.2 Resultados	43
3.7 As etapas e suas transições no fenômeno de curto-circuito em um disjuntor ...	46
3.8 O equacionamento das etapas e transições num curto-circuito em um disjuntor	54
3.8.1 Etapa FECHADO “FE” e transições	55
3.8.2 Etapa de IGNIÇÃO DE ARCO “IA” e transições	55
3.8.3 Etapa de PROLONGAMENTO DO ARCO “PA” e transições	58
3.8.4 Etapa do ARCO NA CÂMARA “AC” e transições	59
3.8.5 Etapa de EXTINÇÃO DO ARCO “EA” e transições	61
3.8.6 Etapa ABERTO “AB” e transições	63
3.9 Etapas e transições do Disparador Magnético	64
3.10 Código fonte do modelo do minidisjuntor em Modelica	65
3.11 Modelo do disparador magnético do minidisjuntor MBW	65
4 Resultados das simulações e ajustes dos parâmetros do modelo	71
4.1 Calibração do modelo da rede e carga em função dos circuitos de ensaio	71
4.1.1 Análise de erros e incertezas	77
4.2 Simulação e ensaios de curto-circuito	77

4.2.1	Simulação e ensaio do minidisjuntor MBW B 16 em 3kA	77
4.2.2	Simulação e ensaio do minidisjuntor MBW B16 em 1kA	81
4.2.3	Simulação e ensaio do minidisjuntor MBW C2 em 3kA	84
4.2.4	Simulação e ensaio do minidisjuntor MBW C2 em 1kA	87
4.3	Simulação de seletividade entre dois minidisjuntores MBW	89
5	Discussão dos resultados	93
5.1	Comparação, avaliação e crítica dos resultados.	93
5.2	Manipulação do modelo para simulação de alterações no circuito ou projeto ...	97
5.2.1	Variação da resistência do modelo	97
5.2.2	Variação do número de chapas da câmara de extinção	100
5.3	Questões e problemas para desenvolvimento em próximos trabalhos	103
6	Conclusões.....	105

II- Lista de Figuras

Figura 1-1 - Característica I_t do disjuntor-motor MPW25.....	3
Figura 1-2 - Diagrama representativo da estrutura da revisão bibliográfica	4
Figura 1-3 - Diagrama representativo da estrutura do equacionamento e modelamento do minidisjuntor	4
Figura 1-4 - Diagrama representativo da estrutura das simulações e ajustes no modelo do minidisjuntor	5
Figura 2-1 - Curto-circuito trifásico modelado no Software Dymola/Modelica	7
Figura 2-2 - Resultado da simulação do circuito da figura anterior	8
Figura 2-3 - Resultado da Simulação - detalhe da fase 1	8
Figura 2-4 - Coordenação entre disjuntor e condutor. Fonte:[39].....	11
Figura 2-5 - Exemplo de um circuito de distribuição radial típico. Fonte: [27]	13
Figura 2-6 - Dois exemplos de circuitos: sem e com seletividade. Fonte:[32].....	14
Figura 2-7 - Seletividade por corrente. Fonte:[32].....	15
Figura 2-8 - Seletividade por tempo. Fonte:[32].....	16
Figura 2-9 - Seletividade por zona ou sinal . Fonte: [26].....	17
Figura 2-10- Representação das correntes de curto-circuito presumida e limitada. Fonte:[31]	18
Figura 2-11- Circuito monofásico representando uma falha. Fonte: [31]	21
Figura 2-12 - curvas $i=f(t)$ e $u=f(t)$ a formação da tensão de arco e a consequência na corrente de curto-circuito Fonte: [31]	22
Figura 2-13 - Representação esquemática do arco elétrico. Fonte: [22]	25
Figura 2-14 - Representação do arco elétrico evidenciando o estrangulamento na região do catodo. Fonte: [35]	26
Figura 2-15 - Técnicas de aumento de tensão de arco. Fonte: [22].....	27
Figura 2-16 - O efeito da divisão do arco elétrico. Fonte: [22]	28
Figura 3-1 - Disjuntores MBW - monopolar, bipolar e tripolar. Fonte:[9]	29
Figura 3-2 - Visualização do disjuntor MBW - componentes internos	30
Figura 3-3 - Curvas Características dos minidisjuntores WEG modelo MBW. Fonte:[9].....	31
Figura 3-4 - Interação entre os Softwares utilizados	32
Figura 3-5 - Modelo de um circuito elétrico em Modelica. Fonte [13].....	34
Figura 3-6 - Modelo do mesmo circuito acima em diagrama de blocos. Fonte [13].....	34
Figura 3-7 Contato móvel com atuação direta do disparador magnético. Fonte: [31]	36
Figura 3-8 O efeito de levitação dos contatos. Fonte:[31]	38
Figura 3-9 - visualização do minidisjuntor representado em 3D - contatos fechados	39
Figura 3-10 - Visualização do minidisjuntor em representação 2D conforme Figura 3-9	40
Figura 3-11 - Representação do minidisjuntor na posição "desligado"	41
Figura 3-12 - Modelo em Working Model 2D do minidisjuntor desligado.....	42
Figura 3-13- Modelo em Working Model 2D do minidisjuntor ligado.....	43
Figura 3-14- Resultado da simulação do mecanismo de disparo em Working Model 2D - Rastro.....	44
Figura 3-15- Resultado da simulação do mecanismo de disparo em Working Model 2D - Gráfico	45
Figura 3-16- Detalhe do resultado da simulação do mecanismo de disparo em Working Model 2D	45
Figura 3-17 - Representação do arco elétrico e suas etapas. Fonte: [28].....	46
Figura 3-18 - Tensão e corrente em um disjuntor durante um curto-circuito. Fonte: [28].....	47
Figura 3-19 - Comportamento dinâmico de elementos elétricos e mecânicos num disjuntor em curto-circuito. Fonte:[28]	50
Figura 3-20 Etapas da interrupção de um curto-circuito num disjuntor (representação como rede de Petri).....	51
Figura 3-21 - Circuito do disjuntor na etapa "Fechado" FE	55
Figura 3-22 - Circuito do disjuntor na etapa de "ignição do arco" IA.....	56
Figura 3-23 - Circuito do disjuntor na etapa de "prolongamento do arco" PA.....	58
Figura 3-24 - Circuito do disjuntor na etapa "Arco na Câmara" AC.....	60
Figura 3-25- Circuito do disjuntor na etapa "Extinção do Arco" EA.....	62
Figura 3-26-Circuito do disjuntor na etapa "Aberto" AB.....	63
Figura 3-27 - Modelo gráfico do disparador magnético do disjuntor MBW modelado em Modelica.....	66
Figura 3-28 - Modelo de ajuste dos parâmetros do disparador magnético do minidisjuntor MBW.....	67
Figura 3-29 - Resultado da simulação do disparador com 110% I_{mag}	67
Figura 3-30 - Torque do disparador magnético (detalhe até 500A)	68
Figura 3-31 - Torque do disparador magnético (até 100 kA).....	68
Figura 3-32 - Malha de elementos finitos do disparador magnético do disjuntor MBW	69
Figura 3-33 - Representação gráfica da indução calculada no modelo da figura anterior.....	70
Figura 4-1 - Modelo do circuito de calibração - 1kA e f.p. 0,3	72

Figura 4-2- Medição e resultado da simulação da calibração 1kA/f.p.0,3	75
Figura 4-3 - Circuito de calibração do curto circuito de 3kA e f.p. 0,93.....	76
Figura 4-4- Resultado da simulação e medição da calibração 3kA/f.p.0,93	76
Figura 4-5 - Circuito de ensaio do curto-circuito no disjuntor MBW B16 em 3kA e f.p. 0,93.....	78
Figura 4-6 - Quadro de parâmetros do disjuntor MBW 16A - curva B - ensaio em 3kA/f.p.0,93	78
Figura 4-7 - Ensaio e resultado da simulação curto-circuito 3kA, f.p. 0,93	79
Figura 4-8 - Detalhe das etapas do modelo do disjuntor na simulação	80
Figura 4-9 - Circuito de ensaio do curto-circuito no disjuntor MBW B16 – 1kA – f.p. 0,3.....	82
Figura 4-11 - Ensaio e resultado da simulação curto-circuito 1kA, f.p. 0,3	83
Figura 4-12 - Circuito de ensaio do curto-circuito no disjuntor MBW C2 – 3kA – f.p. 0,93.....	85
Figura 4-13 - Quadro de parâmetros do disjuntor MBW 2A - curva C - ensaio em 3kA/f.p.0,93	85
Figura 4-14 - Ensaio e resultado da simulação curto-circuito 3kA, f.p. 0,93 em disjuntor MPW C2	87
Figura 4-15 - Circuito de ensaio do curto-circuito no disjuntor MBW C2 – 1kA – f.p. 0,3.....	88
Figura 4-16 - Ensaio e resultado da simulação curto-circuito 3kA, f.p. 0,93 em disjuntor MPW C2	89
Figura 4-17 - Modelo do circuito de simulação de seletividade com 2 disjuntores ligados em série.....	90
Figura 4-18 - Simulação da seletividade entre dois disjuntores MBW	91
Figura 5-1 - Simulação da integral de Joule do minidisjuntor MBW B16 em 3kA e f.p. 0,93	96
Figura 5-2 - Ensaio da integral de Joule do minidisjuntor MBW B16 em 3kA e f.p. 0,93	96
Figura 5-3 - Simulação de curto-circuito com desvio da corrente na etapa "AC"	98
Figura 5-4 - Simulação de curto-circuito sem desvio da corrente na etapa "AC"	99
Figura 5-5 - Corrente e tensão simulada em minidisjuntor com 12 chapas na câmara de extinção	101
Figura 5-6 - Corrente e tensão simulada em minidisjuntor com 4 chapas na câmara de extinção	101
Figura 5-7 - Integral de Joule e energia no disjuntor com 12 chapas na câmara.	102
Figura 5-8 - Integral de Joule e energia no disjuntor com 4 chapas na câmara.	103

III- Descrição de Variáveis, Simbologia e Abreviaturas.

2D: bidimensional
 3D: tridimensional
 CA: Corrente Alternada
 CAD: Computer Aided Design – Projeto assistido por computador
 CB, CB1, CB2, CBN: Disjuntor, Disjuntor e número
 CC: Corrente Contínua
 C_{DR} : Constante de amortecimento rotacional
 C_{FR} : Constante de mola rotacional
 D, D1, D2, DN: Disjuntor, Disjuntor e número
 d: distância
 DPCC: Dispositivos de proteção para curtos-circuitos
 f: frequência
 f.p.: fator de potência
 F: Força
 FEM: Finite Element Method – Método dos elementos finitos
 I ou i: corrente elétrica
 I_n : Corrente nominal
 I_p : Corrente de curto-circuito presumida
 I^2t : Integral de Joule
 L: Indutância, comprimento.
 MCB: Miniature circuit breaker - minidisjuntor
 MCCB: molded case circuit breaker – disjuntor em caixa moldada
 R: Resistência
 RMS: Root Mean Square – valor eficaz
 s: área da secção transversal
 S: Potência Aparente
 SCPD: Short-circuit protective devices - Dispositivos de proteção para curto-circuito
 t: tempo (s)
 T: temperatura, período
 t_b : tempo de disparo
 u_a : queda de tensão ou força eletromotriz reversa que se opõe à corrente de curto-circuito
 U_{ARCO} : Tensão de arco elétrico
 U_B : Tensão de arco elétrico (do alemão B de Bogen =Arco)
 x: deslocamento linear
 X: Reatância
 Z: Impedância
 μ_0 : permeabilidade magnética do ar
 ΔT ou $\Delta \theta$: elevação de temperatura
 Δt : intervalo de tempo

IV-RESUMO

Este trabalho apresenta um modelo computacional de um minidisjuntor de maneira a simular o comportamento deste dispositivo quando submetido a curto-circuito. O processo de interrupção do circuito proporcionado pelo disjuntor em estudo foi modelado neste trabalho como formado por diversas etapas. Aspectos da física do arco elétrico são revistos e modelados de maneira simples, mas sem perda de qualidade no modelo. O modelo permite ao usuário uma fácil compreensão dos fenômenos envolvidos em cada etapa e o fácil ajuste dos parâmetros permite ao projetista prever o comportamento de vários disjuntores de construção semelhante. Comparações de simulações efetuadas no modelo e alguns ensaios são apresentados e validam a qualidade do modelo. Inferências sobre a integral de Joule e seletividade entre disjuntores também se tornaram possíveis através da utilização do modelo e seus resultados de simulações.

IV -ABSTRACT

This work presents a computational model of a miniature circuit breaker making possible to simulate the behavior of this device when submitted to a short circuit. The process of interruption of the circuit breaker in study was modeled in this work and divided in various steps. Aspects of the physics of the electric arc was reviewed and modeled in simple way but without loss of quality in the model. The model permits to the user an easy understanding of the involved phenomena in each step and an easy adjustment of the parameters that allows the designer to predict the behavior of breakers of similar execution. Comparisons of simulations made in the model and some tests are presented and that certify the quality of the model. Inferences on the Joule's integral and selectivity between breakers had also become possible through the use of the model and its simulation results.

Modelamento de um minidisjuntor sob curto-circuito.

1 Introdução

Disjuntores são dispositivos eletromecânicos utilizados largamente em instalações elétricas, mais comumente como dispositivos de proteção contra curto-circuito e sobrecargas. A proteção é possível, pois os disjuntores possuem sensores (integrados ou não aos mesmos) que monitoram a corrente que flui no circuito e através de critérios que dependem da finalidade para o qual o disjuntor foi concebido, fazem com que elementos disparadores comandem a abertura dos contatos do disjuntor, removendo a alimentação do circuito sempre que houver alguma anomalia.

Este trabalho faz referência a disjuntores para uso em instalações elétricas de baixa tensão, de aplicação industrial, comercial ou residencial. Mais detalhes sobre o objeto em estudo serão apresentados no item 3.2.

Disjuntores em geral são introduzidos em um circuito elétrico como elementos de proteção contra sobrecargas e curto-circuito. Alguns disjuntores possuem ainda mecanismos de detecção de outras falhas no circuito como sub ou sobretensões, ou ainda disparadores que podem ser acionados por qualquer evento ou comando externo (automático ou manual), conforme for conveniente ao usuário.

Para que um disjuntor possa ser comercializado deve ser testado em todos os requisitos que as normas aplicáveis exigem. Os dados informados pelo fabricante devem, portanto, ser ensaiados, inclusive a sua capacidade de interrupção de curto-circuito.

Ensaio em disjuntores na condição de curto-circuito são muito onerosos e de difícil execução, além de serem, em geral, destrutivos. Por isso o objetivo central deste trabalho de dissertação é o desenvolvimento de um modelo computacional de um minidisjuntor para simulação de seu comportamento e desempenho quando submetido à condição de curto-circuito. Este modelo permitirá que seja feita a simulação de ensaios de curto-circuito praticamente sem custo, alterando-se poucos parâmetros no modelo.

O modelo deverá permitir também a análise de futuros projetos antes de sua execução na fábrica, o que permitirá enorme economia em fabricação de ferramental, pois o ensaio em curto-circuito só pode ser feito após a conclusão da fabricação das ferramentas, quando pode ser muito tarde para alterações e otimizações no projeto.

Alguns parâmetros de desempenho de disjuntores são de difícil predição, como por exemplo, o valor da energia específica que o disjuntor permite passar pela instalação em que está instalado (I^2t – também conhecida como integral de Joule¹) ou a característica de limitação de corrente de curto-circuito do disjuntor. No contexto atual a melhor maneira de se obter esta informação é através de ensaios em curto-circuito.

A Figura 1-1 a seguir mostra a curva característica I^2t do disjuntor-motor MPW25 produzido pela Weg Acionamentos. Cada curva representa a integral de Joule de uma faixa de ajuste de corrente de disparo do referido disjuntor em função da capacidade de curto-circuito da instalação e apenas em uma tensão (no caso em 415 V).

É grande a quantidade de ensaios necessários para se levantar os dados para preencher um gráfico com esta família de curvas. Supondo que sejam realizados apenas cinco ensaios por curva chega-se ao valor de 80 ensaios de curto-circuito e isso para apenas uma tensão! O custo de um ensaio de curto-circuito nos laboratórios brasileiros gira em torno de US\$ 300,00 por aplicação (valor baseado em um orçamento do CEPTEL/RJ de agosto/2004). Obtém-se então a quantia nada desprezível de US\$ 24000,00 somente para levantar os dados desta família de curvas. Para se levantar os dados em outras tensões, este processo se repete. Se for necessária, por exemplo, a determinação das famílias de curvas apenas para as quatro tensões mais usuais no mercado de atuação da Weg Acionamentos (Brasil, América Latina EUA e Europa), o custo se aproximaria rapidamente dos US\$100.000,00.

Um programa de simulação de disjuntores em curto-circuito poderia reduzir drasticamente estes custos, pois com apenas alguns poucos ensaios seria possível realizar o ajuste dos parâmetros do modelo usado na simulação e a obtenção das famílias de curvas seria muito simplificada. A realização de ensaios continua sendo necessária o programa permitiria a redução do número de ensaios que seriam necessários.

¹ I^2t : Integral de Joule: Representa a integral do quadrado da corrente que circula por um circuito elétrico por um determinado período. Normalmente o período em questão é a duração de um curto-circuito. Em inglês freqüentemente é chamada de “Let-through Energy” que expressa melhor o seu significado se traduzida literalmente para “Energia que se permite passar”

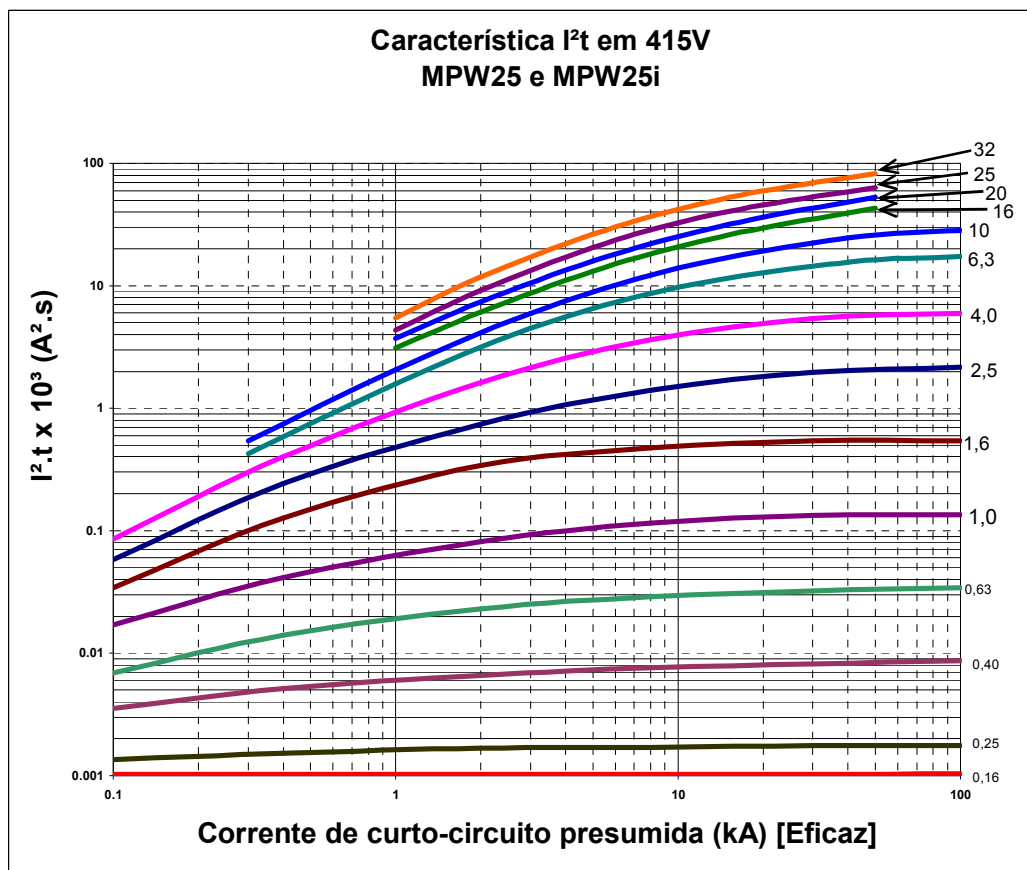


Figura 1-1 - Característica I^2t do disjuntor-motor MPW25

Além das características I^2t e de limitação de corrente, os fabricantes de disjuntores devem fornecer ainda para os usuários, extensas tabelas onde é informada a coordenação e seletividade entre componentes de sua fabricação (veja item 2.4). Dependendo da extensão da linha de produtos do fabricante estas tabelas tornam-se realmente de muito difícil execução e o ensaio completo das mesmas em todas as combinações de produtos e tensões é trabalho de meses em laboratório de curto-circuito, o que representa custos altíssimos, que poderiam ser drasticamente reduzidos ao ser utilizado um software que fosse capaz de simular um disjuntor em condição de curto-circuito.

As figuras a seguir apresentam a estrutura de como foi organizado o presente trabalho.

A Figura 1-2 representa a estrutura da revisão bibliográfica e a interação entre os vários fenômenos envolvidos em um processo de interrupção de um curto-circuito. No trabalho esta parte está detalhada no capítulo 2.

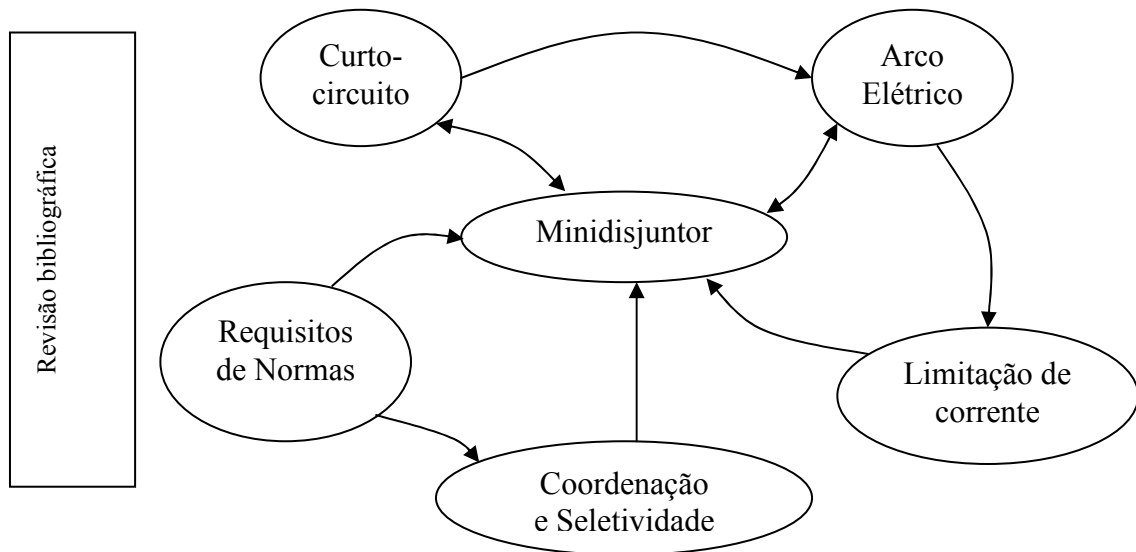


Figura 1-2 - Diagrama representativo da estrutura da revisão bibliográfica

A Figura 1-3 representa o modo como foi realizado o equacionamento e modelamento do minidisjuntor desde a escolha dos softwares até a combinação de seus resultados. A simulação dos componentes eletromagnéticos e mecânicos que fornecem parâmetros para o modelo completo também está representada aqui. No trabalho, esta parte está descrita no capítulo 3.

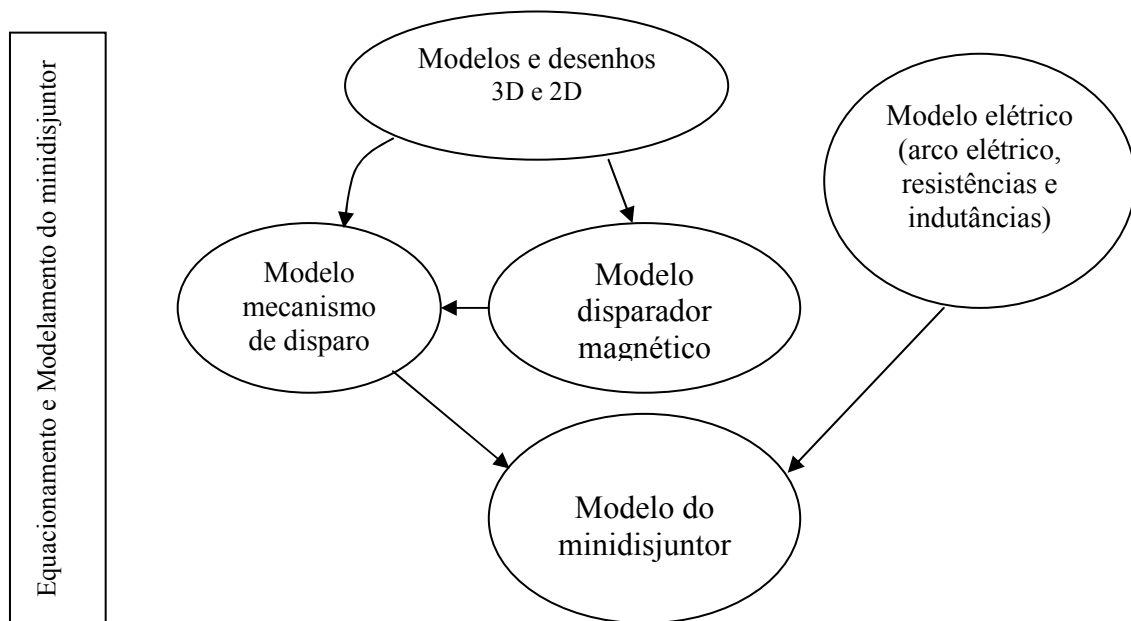


Figura 1-3 - Diagrama representativo da estrutura do equacionamento e modelamento do minidisjuntor

A Figura 1-4 representa a execução de simulações no modelo e a comparação com resultados de ensaios e ajustes no modelo. Esta parte está descrita no capítulo 4.

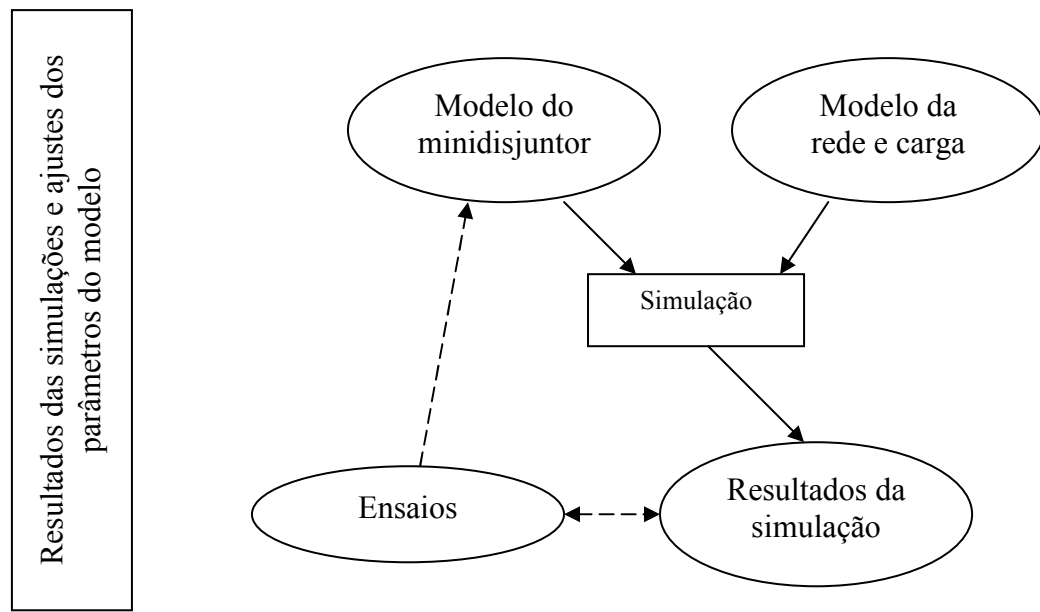


Figura 1-4 - Diagrama representativo da estrutura das simulações e ajustes no modelo do minidisjuntor

Os capítulos 5 e 6 trazem, por fim, a discussão dos resultados, conclusões e sugestões para próximos trabalhos.

2 Revisão bibliográfica e apresentação detalhada do problema

2.1 Introdução

Para a necessária compreensão do assunto sob dissertação, neste capítulo será feita uma breve revisão bibliográfica e serão definidos os objetos em estudo, quais sejam: o disjuntor e o curto-circuito.

Além disso, serão relacionadas também as condições de curto-circuito que os disjuntores devem suportar de acordo com as normas internacionais aceitas no Brasil.

2.2 O curto-circuito

De acordo com a norma IEC 60947-1 [17], curto-circuito é a “conexão acidental ou intencional, através de uma impedância ou resistência relativamente baixa, de dois ou mais pontos em um circuito que estão normalmente em tensões diferentes”.

A norma IEC 60898-1 [16] acrescenta ainda uma nota: “Uma corrente de curto-circuito pode ser resultado de uma falha ou de uma conexão errada”

As normas generalizam a definição do curto-circuito, que é - do ponto de vista deste trabalho - uma condição anômala de sobrecarga extrema em um circuito elétrico que pode trazer danos importantes ao sistema elétrico e até às instalações em geral. Em uma instalação elétrica normal o curto-circuito é uma condição indesejada e é necessário proteger o sistema elétrico dos seus danos através de dispositivos que interrompam o circuito quando da ocorrência desta anomalia.

Não é pretensão deste trabalho trazer em detalhes a análise do curto-circuito, seu equacionamento e sua dinâmica, uma vez que este tema já é bastante explorado no âmbito da engenharia elétrica. Mais detalhes sobre o assunto podem ser obtidos na literatura especializada [18], [20] e [30].

A Figura 2-1 apresenta a representação gráfica de um circuito na condição de curto-circuito conforme é comumente usada em ensaios de verificação de desempenho de dispositivos de chaveamento conforme as normas da série IEC60947 [1][17][18] e IEC60898-1 [16].

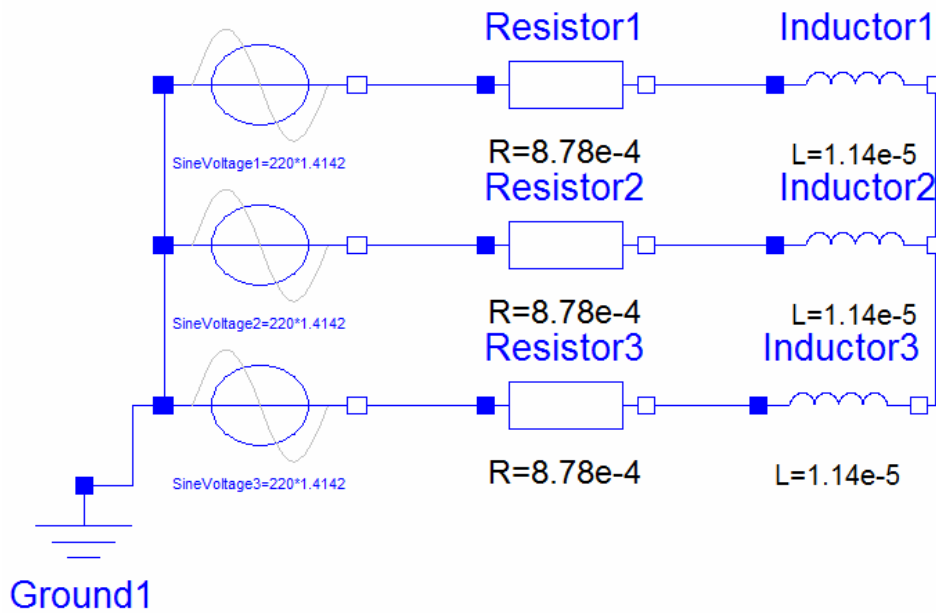


Figura 2-1 - Curto-circuito trifásico modelado no Software Dymola/Modelica

A Figura 2-2 e a Figura 2-3 a seguir representam o resultado da simulação do circuito da figura anterior calibrado no modelo para proporcionar um curto-circuito de 50 kA e fator de potência 0,2 (valores indicados pelas normas como usuais para ensaio de curto-circuito). Nestas figuras podem ser observadas no primeiro gráfico, as três correntes em cada fase do curto-circuito e no gráfico seguinte um detalhe da corrente na primeira fase onde pode ser vista a componente transitória do curto-circuito que proporciona valores de pico no primeiro semiciclo muito maiores que em regime. Este valor de pico transitório depende do ângulo de fechamento² do curto-circuito e do fator de potência da instalação e pode atingir valores de até 2,2 vezes o valor da corrente eficaz de curto-circuito (Tabela 2 da IEC 60947-2 [18]). Portanto um disjuntor (ou fusível) deve suportar, além do valor em regime do curto-circuito, este valor de corrente de pico transitório.

² Ângulo de fechamento: representa o instante de tempo em que é fechado o circuito relativamente à curva senoidal que representa a tensão no circuito. Um ângulo de fechamento “0°” representa, por exemplo, o fechamento na passagem por zero e com tensão crescente.

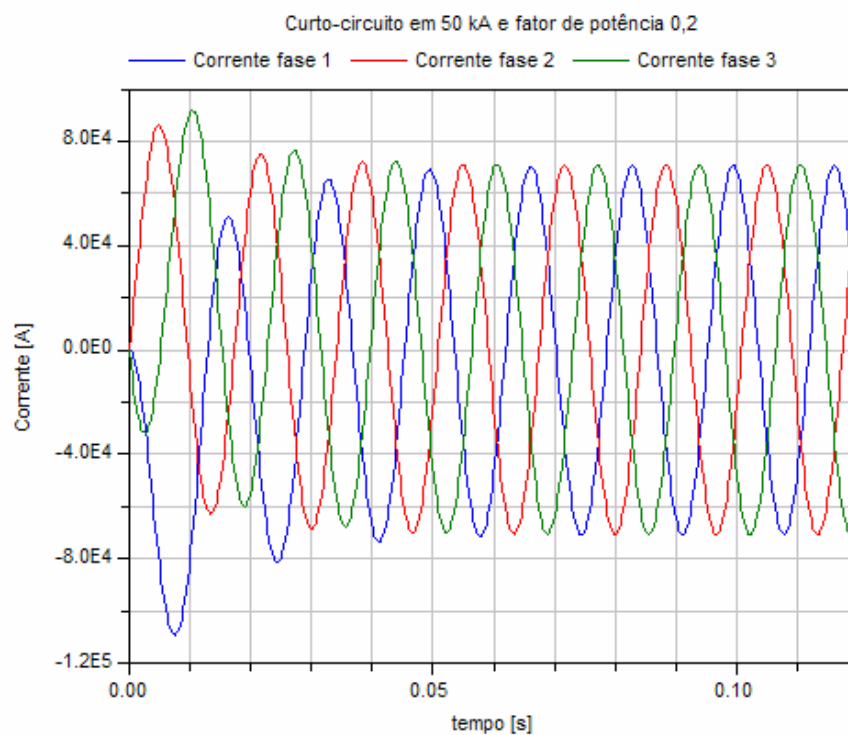


Figura 2-2 - Resultado da simulação do circuito da figura anterior

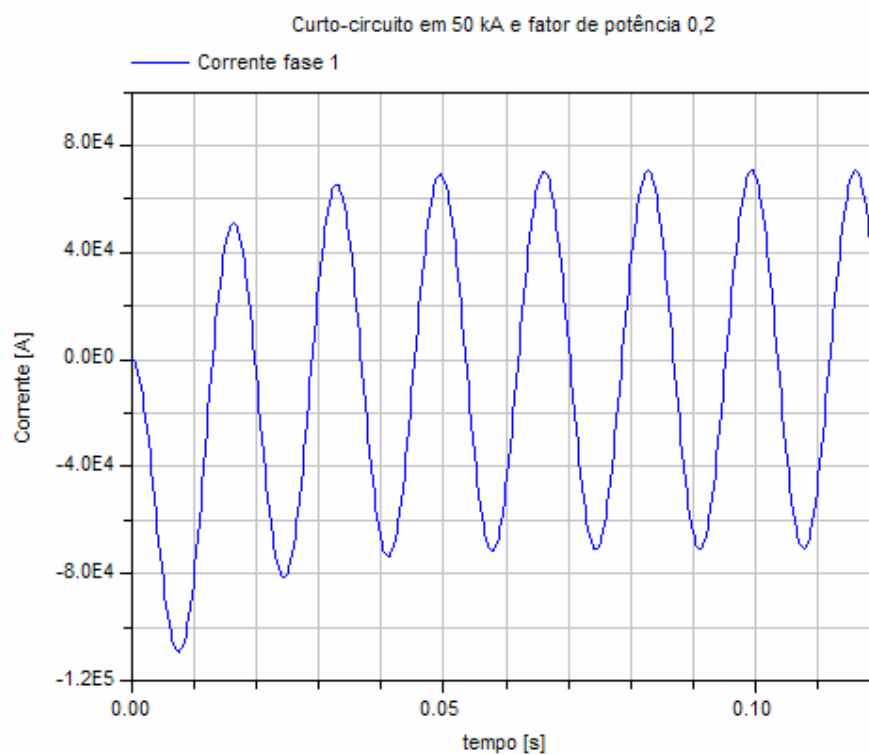


Figura 2-3 - Resultado da Simulação - detalhe da fase 1

2.3 Dispositivos de proteção contra curtos-circuitos

O curto-circuito, por ser normalmente uma condição indesejada em uma instalação elétrica, deve ser evitado sempre que possível e seus efeitos devem ser minimizados ou suprimidos. Para realizar esta função em um circuito elétrico foram concebidos dispositivos capazes de interromper um circuito quando este está sob estas condições. Alguns comentários sobre o fusível e o disjuntor serão apresentados aqui.

Tais componentes são denominados “Dispositivos de proteção para curtos-circuitos” cuja sigla é DPCC, no entanto são internacionalmente denominados pela sigla SCPD, do inglês “Short-circuit protective devices”, sendo a sigla em português de uso muito pouco difundido.

2.3.1 O fusível

O primeiro dispositivo concebido para a função de interromper um curto-circuito foi o fusível, que praticamente nasceu junto com a eletricidade, pois nas suas versões mais simples não passa de um condutor pelo qual circula a corrente do circuito e que quando submetido à corrente de curto-circuito se aquece por efeito Joule atingindo a temperatura de fusão do material e rompendo desta maneira o circuito.

Pela definição da IEC60898-1 [16] “o fusível é um dispositivo de chaveamento que, pela fusão de um ou mais de seus componentes especialmente projetados e ponderados, abre o circuito em qual está inserido e interrompe a corrente quando esta excede um determinado valor por um tempo suficiente”.

O fusível por muito tempo mostrou ser eficiente, mas, devido à sua grande desvantagem de ser um dispositivo que se danifica após cada evento de curto-circuito vem rapidamente sendo substituído pelos disjuntores. O grande problema que ocorria nos circuitos protegidos por fusíveis era a freqüente substituição dos fusíveis ao “queimar” por fusíveis de maior corrente nominal ou até por artifícios como pedaços de fios de cobre, por exemplo. Isso fazia com que muitas instalações elétricas erroneamente protegidas viessem a ser a causa de muitos incêndios. O advento do disjuntor possibilitou o religamento do circuito com o mesmo disjuntor e, não sendo necessária a sua substituição, não se faz o sobredimensionamento errôneo da proteção. Além disso, o uso de disjuntores dificultou a substituição do mesmo por artifícios “provisórios” perigosos, desencorajando usuários não instruídos a instalar proteções sobredimensionadas.

2.3.2 O disjuntor

O disjuntor é um aparelho de chaveamento e proteção de sistemas elétricos. A norma NBR IEC 60947-2:1998 [1] define disjuntor como:

“Dispositivo de manobra³ 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”.

A nova versão da norma internacional IEC 60947-2:2003 [17] (ainda sem versão oficialmente traduzida) e a norma IEC60898-1 [16] (específica de minidisjuntores) não alteram esta definição.

A norma NBR IEC 60947-2:1998 [1] define vários tipos de disjuntores, quais sejam:

- Disjuntor com fusível incorporado,
- Disjuntor limitador de corrente,
- Disjuntor de encaixe (tipo plug-in),
- Disjuntor extraível,
- Disjuntor em caixa moldada,
- Disjuntor seco (air circuit-breaker),
- Disjuntor a vácuo,
- Disjuntor a gás.

O objeto de estudo deste trabalho é o disjuntor limitador de corrente, em uma versão de tamanho reduzido denominada minidisjuntor, cuja definição é a seguinte:

Minidisjuntor (de acordo com a norma IEC60898-1 [16] e NBR NM 60898 [3]):

- Disjuntor com interrupção no ar de corrente alternada em 50 ou 60Hz, tendo uma tensão nominal até 440V (entre fases), uma corrente nominal até 125A e uma capacidade de curto-circuito nominal até 25000A.
- Estes disjuntores são destinados à proteção contra sobrecorrentes de instalações de instalações elétricas de edifícios e aplicações similares; eles são projetados para uso por pessoas não qualificadas e para não sofrerem manutenção.

Disjuntor limitador de corrente (de acordo com a norma IEC 60947-2:2003 [17])::

- Disjuntor cujo tempo de interrupção seja suficientemente curto, de forma a impedir que a corrente de curto-circuito atinja o seu valor de crista.

³ Dispositivo de manobra: Em eletrotécnica é qualquer dispositivo capaz de mudar o estado de um circuito de aberto para fechado ou vice-versa.

2.4 Coordenação e Seletividade em curto-circuito.

2.4.1 Coordenação

Disjuntores sempre estão presentes em um circuito como componentes para proteção de outro(s) componente(s) do sistema. A situação mais simples é na qual após o disjuntor só exista a fiação e a carga propriamente dita. As mais complexas podem envolver vários níveis de distribuição de energia ou ramais, além de outros dispositivos de chaveamento ou de proteção, fusíveis, disjuntores, contadores, etc.

Um disjuntor ou um conjunto deve trabalhar em harmonia com os componentes de todo o circuito, provendo uma proteção adequada em qualquer condição de sobrecarga ou curto-circuito. Esta característica desejável é o que é denominado genericamente de coordenação do circuito.

A coordenação de disjuntores com condutores, em geral, é feita sobrepondo-se as curvas de I^2t dos dois componentes. Se a curva I^2t do disjuntor for menor que a curva do condutor, significa que a coordenação está de acordo com o desejado, ou seja, não haverá a possibilidade de danos ao condutor quando protegido pelo disjuntor dentro dos limites em que a curva I^2t do disjuntor for menor que a do condutor.

A Figura 2-4 apresenta um exemplo da superposição de duas curvas de I^2t de disjuntor e condutor. A proteção está garantida até o ponto de intersecção “A” das curvas, ou seja, até a intersecção o disjuntor protege o condutor sob o aspecto da energia.

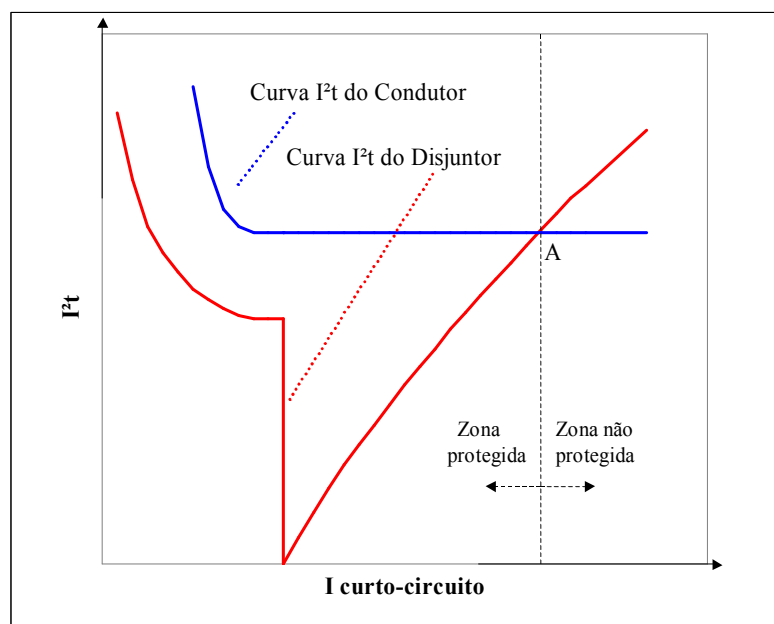


Figura 2-4 - Coordenação entre disjuntor e condutor. Fonte:[39]

Valores de curto-circuito acima da intersecção “A” vão levar o condutor a um aquecimento excessivo e conseqüente degradação de seu material isolante.

Dispositivos de proteção para curtos-circuitos (DPCC ou SCPD) também devem prover coordenação entre si quando conectados em série em um mesmo circuito. Um dos aspectos de sua coordenação é a seletividade, que, por sua importância, será mais bem discutida no item seguinte e o outro aspecto é a proteção de retaguarda.

A proteção de retaguarda acontece sempre que se associa SCPD's que tenham característica de limitar a corrente de curto-circuito (vide item 2.5) em série. A tensão de interrupção do circuito (u_a) obtida no dispositivo limitador quando se apresenta em dispositivos ligados em série provoca uma redução drástica dos danos quando comparados aos que aconteceriam em um circuito onde só houvesse um dispositivo protegendo o circuito. O modelamento de disjuntores, proposto neste trabalho visa também possibilitar, no futuro, a simulação do comportamento de disjuntores em tal configuração de circuito, de forma a poder prever como seria o desempenho dos mesmos quando associados em série.

Grandes fabricantes mundiais de disjuntores fornecem extensas tabelas de proteção de retaguarda (“backup protection” no jargão dos especialistas em proteção elétrica) com a combinação de disjuntores em série e sua capacidade de interrupção combinada quando assim ligados. A exemplo das tabelas de coordenação, a concepção destas tabelas demanda grandes esforços e recursos, uma vez que exige ensaios em todas as combinações, tensões e capacidades de curto-circuito, essa demanda pode então ser reduzida de maneira significativa com a aplicação de um modelo computacional para simulação do comportamento dos disjuntores em curto-circuito.

2.4.2 Seletividade

2.4.2.1 Definição

Circuitos elétricos apresentam diversos níveis de distribuição de energia elétrica e em cada um destes níveis as quantidades de energia envolvidas são diferentes. Um exemplo pode ser o circuito onde há um disjuntor ligado logo após o transformador, no primeiro nível, um nível seguinte com vários quadros de distribuição e seus respectivos disjuntores e um terceiro nível com vários disjuntores, cada um junto à sua carga, como pode ser visualizado na Figura 2-5.

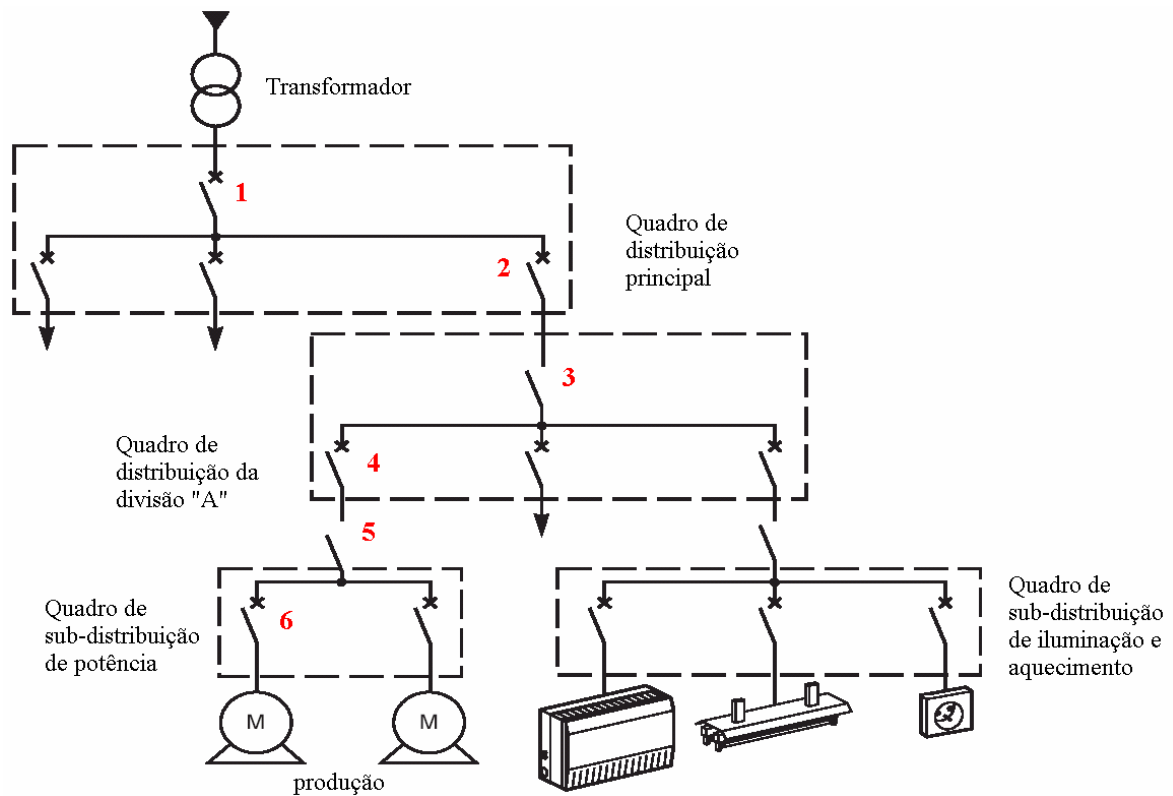


Figura 2-5 – Exemplo de um circuito de distribuição radial típico. Fonte: [27]

É desejável que quando um curto-circuito ocorrer em determinado ponto do sistema, os disjuntores sejam tão rápidos quanto necessário para limitar a falha e reduzir seus danos. Mas se apenas este requisito for levado em consideração, ao ser detectado um curto-circuito junto a uma carga, todos ou vários disjuntores envolvidos em sua alimentação disparariam e a alimentação de todo ou parte do circuito seria cortada desnecessariamente, provocando prejuízos que poderiam ser evitados, além de dificultar a localização da falha que provocou o curto-circuito.

Por exemplo, no circuito da Figura 2-5, se um curto-circuito ocorrer no motor que está sendo alimentado pelo disjuntor de número 6 é desejável que apenas o disjuntor de número 6 dispare, abrindo desta forma apenas o circuito deste motor. Ocorreu desta forma uma coordenação da seletividade ideal entre todos os disjuntores do circuito. Se, por exemplo, o disjuntor 4 desarmou isso poderia indicar “a priori”, uma falha em algum ponto da instalação entre este disjuntor e o próximo (uma linha de transmissão neste caso, por exemplo), fazendo com que a ação corretiva para manutenção do sistema voltasse sua atenção para pontos isentos de falha, o que provocaria retardos na correção do problema e conseqüentes prejuízos. Além disso, o desarme do disjuntor de número 4 provocaria a

parada dos demais motores ligados ao circuito, aumentando assim os prejuízos provocados pela falha. Situações ainda mais inadequadas seriam provocadas se disjuntores de níveis mais altos (3, 2 ou 1) tivessem disparado.

Para evitar-se este tipo de situação a rapidez da resposta e a sensibilidade ao curto-circuito de cada disjuntor em cada nível devem ser ajustadas ou combinadas de maneira permitir uma discriminação do curto-circuito. Essa discriminação de curto-circuito em seus diversos níveis é denominada coordenação de seletividade [7][21][26][32][37].

O termo mais usado para seletividade em inglês é “discrimination” ou “selectivity” e em alemão é “Selektivität”.

2.4.2.2 Tipos de seletividade

A Figura 2-6 apresenta dois circuitos onde a seletividade se comportou de maneira diferente. No circuito à esquerda o curto-circuito foi interrompido pelos dois disjuntores e no circuito à direita apenas pelo disjuntor CB2. A seletividade foi efetiva apenas no segundo circuito.

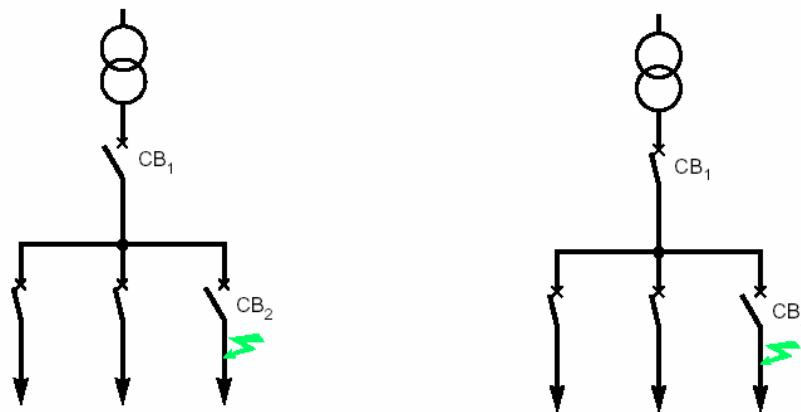


Figura 2-6 - Dois exemplos de circuitos: sem e com seletividade. Fonte:[32]

Existem várias maneiras de se obter a seletividade em um circuito. Algumas acontecem naturalmente, outras precisam que alguns artifícios sejam empregados no dimensionamento do circuito ou dos SCPD's ou ainda de disjuntores especialmente preparados para executar tarefas de seletividade, como será apresentado logo a seguir.

A **seletividade por corrente** é a seletividade que ocorre naturalmente entre dois dispositivos cujos valores de correntes de atuação têm uma grande diferença. Um múltiplo de 1,6 entre as correntes de disparo térmico ou lento e 2,5 no disparo magnético ou

instantâneo é em geral usado como valor orientativo para as relações entre as correntes dos disjuntores a jusante e montante em um circuito [32]. Este critério é válido infelizmente apenas para valores de corrente de curto-circuito presumida pouco maior que a corrente de disparo instantânea do maior disjuntor, tanto que a maioria dos fabricantes de disjuntores, por segurança, informa que o limite de seletividade é a corrente de disparo instantânea do maior disjuntor. Os aspectos dinâmicos dos disparadores magnéticos ou instantâneos e suas tolerâncias de fabricação fazem com que estes limites não sejam precisos e ensaios devam ser feitos para correntes de curto-circuito presumidas maiores.

Novamente (ver capítulo 1), um modelo computacional dos disjuntores ligados em um circuito pode ser uma ferramenta de grande utilidade para a redução da quantidade de ensaios necessária para se determinar a seletividade relativa.

A Figura 2-7 mostra as curvas de disparo de dois disjuntores ligados conforme a Figura 2-6. Observa-se neste caso que a seletividade por corrente ocorre naturalmente até o valor de disparo instantâneo do disjuntor maior (a montante).

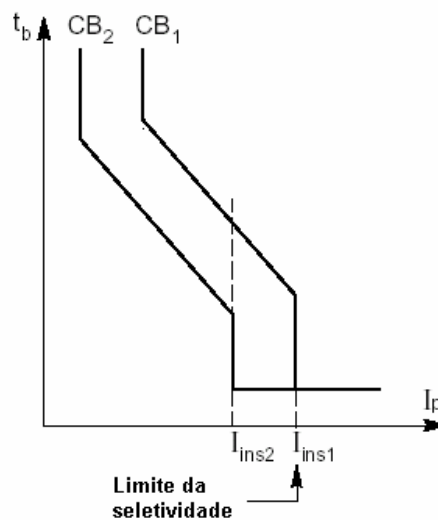


Figura 2-7 - Seletividade por corrente. Fonte:[32]

Outro tipo de seletividade é a seletividade por tempo (vide Figura 2-8). Esta ocorre quando, além da diferença entre as correntes de disparo, o disjuntor a montante têm uma característica de tempo de disparo maior que a do disjuntor a jusante na região de disparo por curto-circuito (valores de corrente acima de I_{ins1} no gráfico à esquerda da Figura 2-8). Este atraso na resposta em curto-circuito pode ser intencional (em geral implementado por disparadores eletrônicos), ou pode ocorrer naturalmente devido às próprias inércias do

disjuntor maior à montante ou às características limitadoras de corrente do disjuntor a jusante que, através da redução da intensidade da corrente durante o curto-circuito, provoca um atraso na resposta do disjuntor instalados em níveis acima (à direita na Figura 2-8).

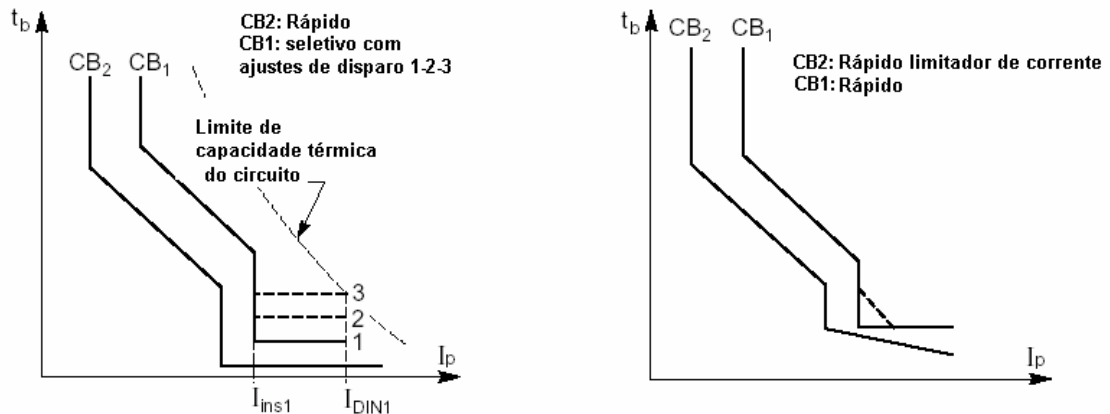


Figura 2-8 - Seletividade por tempo. Fonte:[32]

Além das duas possibilidades de implementação de seletividade acima citadas, pode-se ainda citar como importante a seletividade por zona ou por sinal. As instalações industriais mais sofisticadas que possuem a interligação de seus processos por redes permitem que os disjuntores de vários circuitos se comuniquem entre si e quando estiverem em condição de detecção de um curto-circuito enviem um sinal para o disjuntor imediatamente acima para que este não abra o circuito, desta forma garante-se a seletividade (veja a Figura 2-9). Este processo só é possível com disjuntores cujo disparo seja eletrônico e apresenta o inconveniente de precisar de uma rede extremamente confiável e rápida.

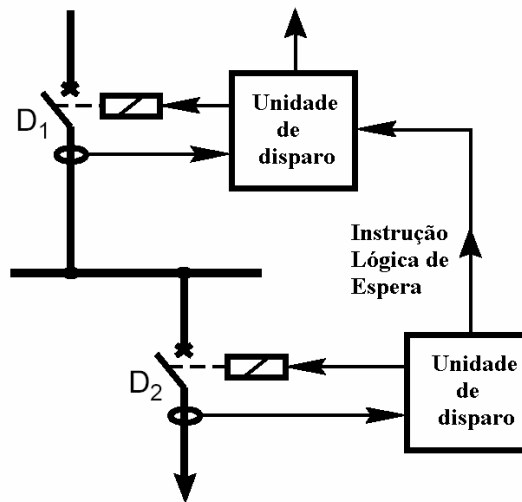


Figura 2-9 - Seletividade por zona ou sinal. Fonte: [26]

Os tipos de seletividades em função do nível de distribuição em que se aplicam, podem ser visualizados na Tabela 2-1. Esta tabela, que foi, em parte, inspirada no artigo de Serpinet [32], representa apenas a tendência do uso do tipo de seletividade e tipo de disjuntor nos diversos níveis, não sendo necessariamente proibido ou inadequado o uso fora dos limites estabelecidos na mesma.

Nível de distribuição	Tipo de discriminação (coordenação de seletividade)			Tipo de disjuntor
	Por Zona	Por Tempo	Por corrente	
Distribuição principal				Com atraso de tempo ou lógico/ não-limitador de corrente
Distribuição de potência				Com atraso de tempo ou Instantâneo / limitador ou não de corrente
Distribuição final				Instantâneo/ limitador ou não de corrente

Tabela 2-1 - Tipos de seletividade. Fonte: [26]

2.5 O processo de limitação de corrente

Como já definido anteriormente no item 2.3.2, um disjuntor limitador de corrente é um disjuntor cujo tempo de interrupção é suficientemente curto, de forma a impedir que a corrente de curto-circuito atinja o seu valor de crista.

Essa definição merece uma complementação conforme feita por Schueller em [31]:

“Um dispositivo é dito limitador quando a corrente que passa através do mesmo durante um curto-circuito tem uma amplitude consideravelmente menor que a corrente presumida”

E, complementada ainda com:

“No caso de disjuntor limitador, essa redução é acompanhada de uma redução no tempo T de condução da corrente comparado com o tempo de um disjuntor não-limitador”.

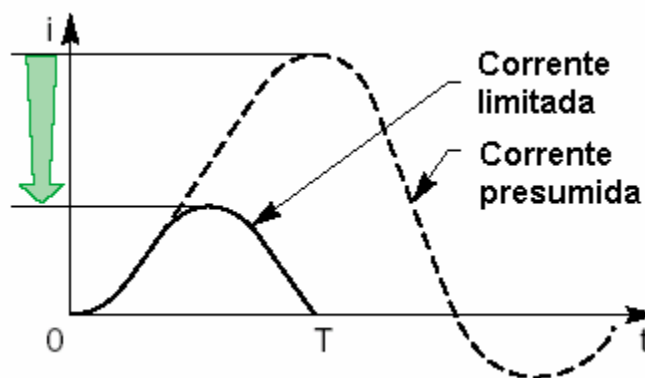


Figura 2-10- Representação das correntes de curto-circuito presumida e limitada. Fonte:[31]

2.5.1 Razões para limitar a corrente de curto-circuito.

Duas razões principais podem ser enumeradas para justificar o esforço em limitar as correntes de curto-circuito:

- Reduzir custos e dimensões dos dispositivos de proteção e
- Reduzir os efeitos indesejáveis dos curtos-circuitos nas instalações.

A redução da corrente que flui no curto-circuito obviamente reduz a corrente que flui também no disjuntor. Isso minimiza a dificuldade que o mesmo teria em interromper a corrente que o perpassa além de reduzir drasticamente os efeitos danosos nele provocados pela corrente elevada.

Disjuntores de pequenas correntes nominais podem então interromper circuitos de grande capacidade de curto-circuito, sem terem que ser sobredimensionados para suportar

os esforços de uma elevada corrente fluindo em seus circuitos. A limitação da corrente de curto-circuito permite, dessa maneira, uma significativa redução dos custos de disjuntores de pequena corrente nominal.

Disjuntores de grandes correntes nominais (correntes em torno de 1000 A e acima - que não são objeto deste estudo) já têm, por necessidade funcional, um circuito robusto e capaz de suportar correntes elevadas em regime. Nestes disjuntores, portanto, um curto-circuito da ordem de 25kA ou 50kA não é tão danoso quanto em um disjuntor de pequena corrente nominal.

Os efeitos indesejáveis de um curto-circuito em uma instalação são a interferência eletromagnética, os efeitos dos esforços mecânicos e os efeitos térmicos.

Os efeitos eletromagnéticos podem causar perturbações em equipamentos eletrônicos que estiverem por perto da instalação pela qual circular a corrente de curto-circuito.

A uma distância “d” de um condutor pelo qual circula uma corrente “I” estabelece-se uma indução magnética “B” conforme a fórmula:

$$B = 2 \times 10^{-7} \cdot \frac{I}{d} \text{ [Tesla]} \quad \text{Equação 2-1}$$

Ex: A 5 cm de um cabo de circuito onde circula 25 kA, obtém-se uma indução de 0,1T – suficiente para provocar perturbações consideráveis em equipamentos eletrônicos.

Os efeitos dos esforços mecânicos na instalação durante o curto-circuito são a ruptura ou a deformação de partes do circuito e adjacências.

Se a uma distância “d” de um condutor pelo qual circula uma corrente “I” há um outro condutor pelo qual circula uma corrente “I’”, este condutor é submetido a uma força “F” (atração se o sentido das correntes for o mesmo e repulsão se não) que é igual a (por unidade de comprimento):

$$\frac{F}{L} = B \cdot I' \text{ [N/m]} \quad \text{Equação 2-2}$$

Se a mesma corrente flui através dos dois condutores a fórmula fica [15]:

$$\frac{F}{L} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I^2}{d} \text{ [N/m]} \quad \text{Equação 2-3}$$

Exemplo: Em uma instalação com uma corrente de 25kA e distância entre condutores de 5 centímetros,

$$\frac{F}{L} = 2500 \text{ N/m.}$$

O que é uma força nada desprezível que pode trazer sérios danos a qualquer instalação.

Por último, mas não menos importante, o efeito térmico da corrente de curto-circuito pode provocar aquecimento nos condutores e adjacências danificando a isolação da instalação provocando assim uma reação em cadeia levando toda a instalação ao curto-circuito com o irromper de novos focos de curto-circuito e arco elétrico.

Durante o curto-circuito ocorre uma elevação de temperatura adiabática “ $\Delta\theta$ ” no material do condutor de seção “s”, conforme a equação a seguir:

$$\Delta\theta = \frac{k}{s^2} \cdot \int_T i^2 \cdot dt \quad [\text{K ou } ^\circ\text{C}] \quad \text{Equação 2-4}$$

onde:

$\int_T i^2 \cdot dt$ é a integral de Joule ou $I^2 \cdot t$ (já apresentada no capítulo 1, Figura 1-1) e

k é um coeficiente que depende do tipo do condutor (aproximadamente $6 \times 10^{-3} \text{ K} \cdot \text{mm}^4 / \text{A}^2 \cdot \text{s}$ para o cobre).

Exemplo: Em um condutor de cobre de $1,5 \text{ mm}^2$ pelo qual circula 3000 A por um semiperíodo em 60Hz ($8,3$ milissegundos), a elevação de temperatura atinge 200K .

Em função desta elevação de temperatura, é de se esperar que possam surgir problemas como a destruição do isolamento e até risco de fogo e choque elétrico.

Se, no entanto, fosse usado um disjuntor limitador de corrente de $6,3 \text{ A}$, como o que gerou o gráfico da Figura 1-1, curva 6,3, o valor de $I^2 \cdot t$ seria limitado em $12000 \text{ A}^2 \cdot \text{s}$ e a elevação de temperatura do cabo seria de apenas 32K – plenamente suportável por qualquer cabo comercial.

A planilha a seguir mostra o cálculo acima citado.

CÁLCULO DA ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA EM UM CABO DE COBRE (PROCESSO ADIABÁTICO)

Corrente (RMS)	3000	A
seção do cabo	1.5	mm ²
Freqüência	60	Hz
I^2t limitado pelo disjuntor	12000	A ² .s
ΔT 1° semiciclo	200	(°C ou K)
ΔT c/ I^2t limitado pelo disjuntor	32	(°C ou K)

2.5.2 Como obter a limitação de curto-circuito

Tome-se um circuito monofásico em CA com potência aparente “S” e tensão “e”, alimentando uma carga “Z” através de um dispositivo de proteção “A” representando uma impedância desprezível antes da abertura (veja Figura 2-11). Sendo “R” a resistência e “L” a indutância da fonte+ linha + falta.

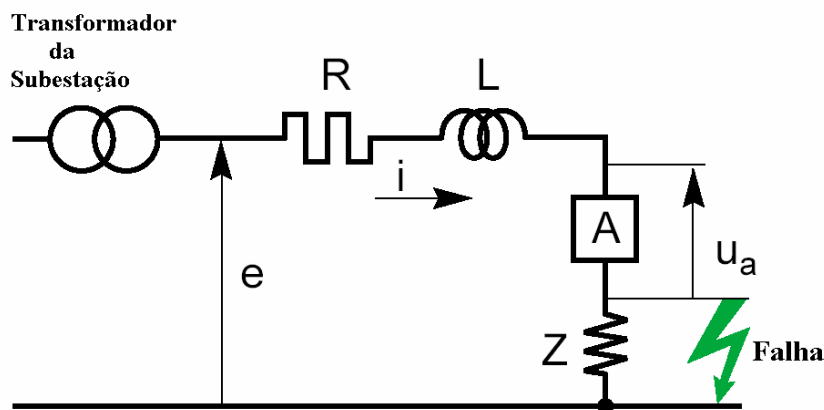


Figura 2-11- Circuito monofásico representando uma falha. Fonte: [31]

Quando uma falha ocorre nos terminais da carga “Z”, antes que “A” seja ativado (dessa maneira “ u_a ” é desprezível) o circuito é alimentado por uma força eletromotriz “e” tal que:

$$e = R \cdot i + L \frac{di}{dt} \quad [\text{V}] \quad \text{Equação 2-5}$$

Supondo-se que a falha ocorreu no momento da passagem da corrente por zero essa mesma corrente é então estabelecida com uma taxa de variação no tempo (derivada) inicial de:

$$\left(\frac{di}{dt} \right)_0 = \frac{e}{L} \quad [\text{V/s}] \quad \text{Equação 2-6}$$

Essa derivada é maior quando a tensão de alimentação é maior.

Exemplo: fonte de tensão “e” com tensão de linha de 380V em 60 Hz, com capacidade de curto-circuito de 100kA RMS (que pode atingir 220kA de pico – vide Figura 2-3).

Para evitar o crescimento de tais correntes e proteger-se de seus efeitos um dispositivo limitador de corrente “A” deve ser inserido no circuito (Figura 2-11). Quando ocorrer um curto-circuito, este dispositivo rapidamente provoca uma queda de tensão ou tensão eletromotriz reversa “ u_a ” que se opõe à corrente.

A malha do circuito de falta da Figura 2-11 leva à equação:

$$e = R.i + L \frac{di}{dt} + u_a \quad \text{[V]} \quad \text{Equação 2-7}$$

Se for considerado ainda o circuito como praticamente puramente indutivo como é quando há curtos-circuitos de alta capacidade (correntes de curto-circuito presumida da ordem de 10 kA ou mais e resistência do circuito de alguns miliohms), o termo $R.i$ pode ser desprezado e a equação se resume a:

$$e = L \frac{di}{dt} + u_a \quad \text{[V]} \quad \text{Equação 2-8}$$

Então a corrente limitada atingirá seu valor de pico quando $di/dt=0$ ou, a força eletromotriz “ e ” for igual a “ u_a ” (Figura 2-12).

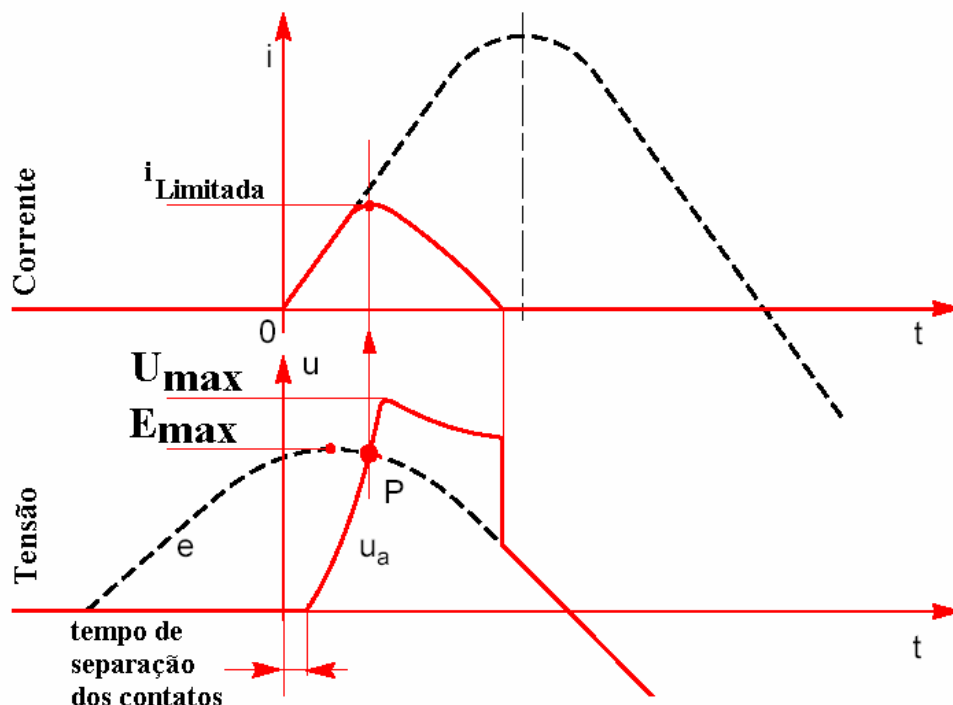


Figura 2-12 - curvas $i=f(t)$ e $u=f(t)$ a formação da tensão de arco e a consequência na corrente de curto-circuito Fonte: [31]

Pode-se então concluir que o pico da corrente limitada é obtido quando a tensão “ u_a ” se iguala à tensão da fonte “ e ” (veja a Figura 2-12, ponto “P”). Uma das primeiras conseqüências é a limitação da corrente que é mais fácil de obter quando a tensão de alimentação “ e ” é mais baixa ou quando “ u_a ” é maior.

No caso particular de minidisjuntores a simplificação feita acima, quando é desprezada a resistência no circuito, não é mais verdadeira, uma vez que os curtos-circuitos neste caso são normalmente em circuitos abaixo de 10kA e o fator de potência é em geral maior que 0,5. Por isso quando a corrente limitada atinge seu valor mais elevado a seguinte equação pode ser escrita:

$$u_a = E_{\max} - R.i \quad [\text{V}] \quad \text{Equação 2-9}$$

que mostra que a tensão “ u_a ” pode permanecer menor que a tensão da fonte para se atingir a limitação da corrente.

Por exemplo: Em um circuito com tensão de fase $V=240$ V RMS (ou seja, $E_{\max}=340$ V), se a corrente presumida de curto-circuito (I_p) é 6 kA com fator de potência de 0,6, sabendo que $R=(V/I_p) \cos \varphi$ e supondo uma corrente de pico limitada em 4kA, o cálculo leva a:

$$u_a = 340 - \frac{240}{6000} \cdot 0,6 \cdot 4000$$

$u_a = 244$ V: aproximadamente 100 V menor que a tensão de alimentação máxima.

2.5.3 Como é produzida a tensão u_a

Ficou demonstrado no item anterior que, para haver uma efetiva redução da corrente de pico em um curto-circuito, é necessário que se forme uma tensão “ u_a ” (queda de tensão ou força eletromotriz reversa que se opõe à corrente de curto-circuito) maior possível e o mais rápido possível. Isso pode ser intuído novamente ao se referir à Figura 2-12 acima.

Várias técnicas podem ser usadas para se inserir uma tensão “ u_a ” no circuito, entre elas, as seguintes podem ser mencionadas pela sua relevância:

- -aumento da resistência com mudança de estado
 - é assim que funciona o fusível: os gases formados após a fusão tem resistência muito maior que o elemento metálico antes da fusão.
- -introdução de resistências:

- Resistor permanentemente instalado: para correntes pequenas, abaixo de 100 A, sendo normalmente usado também como resistência de aquecimento.
- Resistor variável formado pelo arco elétrico (tensão de arco)
 - Este é o método mais conveniente de se promover a tensão “ u_a ” em dispositivos de interrupção em baixa tensão. Será mais bem descrito adiante, mas já pode ser adiantado, que se comporta como uma resistência que pode ser aumentada por resfriamento. O uso de meios de resfriamento adequados pode otimizar seu desempenho e dessa forma auxiliar na limitação da corrente. Uma vantagem adicional do arco elétrico é que ele tem tensão máxima praticamente independente da corrente de curto-circuito, o que protege o circuito contra sobretensões. Além disso, o arco elétrico é automaticamente gerado sempre que se abrem contatos conduzindo alta corrente.

2.5.4 O arco elétrico

Como já comentado no item 2.5.3, o arco elétrico é o principal responsável pela limitação de corrente em dispositivos de chaveamento de baixa tensão. Aqui serão apresentados, alguns aspectos da física e do comportamento do arco elétrico e os seus usos em dispositivos de chaveamento.

A Figura 2-13 apresenta a representação esquemática de um arco elétrico em suas partes e a respectiva queda de tensão em cada uma delas. Na parte superior da figura pode ser visto o par de contatos elétricos representados pelo anodo e pelo catodo e entre estes a região do arco elétrico com a região de dispersão de cargas de anodo e catodo e a coluna de plasma. O gráfico na parte de baixo da figura representa qualitativamente o comportamento da queda de tensão “U” em cada região.

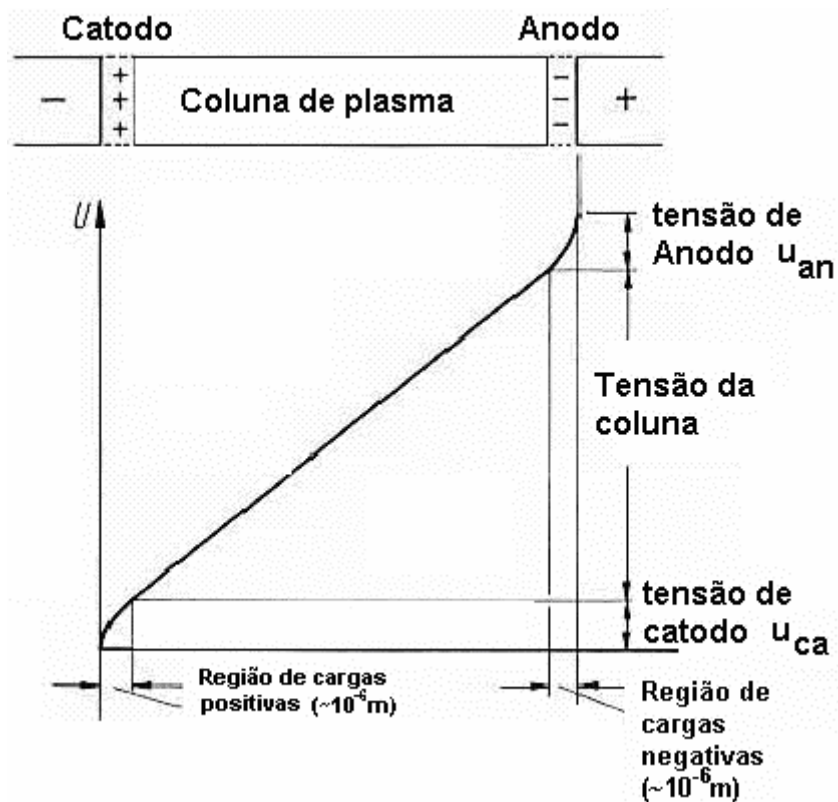


Figura 2-13 - Representação esquemática do arco elétrico. Fonte: [22]

As regiões próximas aos eletrodos são chamadas regiões de queda de tensão de anodo e queda de tensão de catodo respectivamente e suas tensões giram em torno de 8 a 20 V para o anodo e 1 a 12 V para o catodo [35]. Estas regiões são extremamente finas (aproximadamente 1 micrometro [22]) e o campo elétrico nesta região, portanto, é muito intenso.

Na região da coluna de plasma encontram-se íons e elétrons que formam o plasma que conduz a corrente. Como a mobilidade dos elétrons é maior que a dos íons (de maior massa) a coluna do anodo é mais espessa que a do catodo formando uma região de menor estrangulamento, o que justifica a diferença de tensões entre estes eletrodos. Essa característica pode ser visualizada na Figura 2-14.

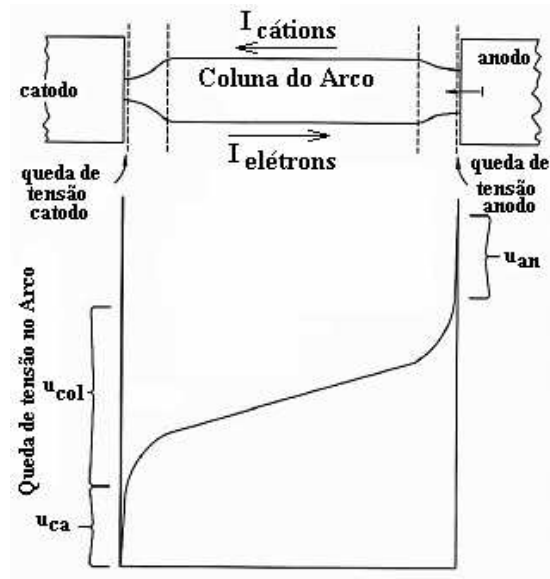


Figura 2-14 - Representação do arco elétrico evidenciando o estrangulamento na região do catodo.
Fonte: [35]

Várias técnicas podem ser usadas para se obter maiores tensões de arco. As mais comuns são o prolongamento e resfriamento do arco aumentando assim a tensão da coluna do arco e a divisão do arco em partes, essa última bem mais efetiva que a primeira, pois usa as tensões de anodo e catodo para compor a tensão total do arco.

A Figura 2-15 mostra as técnicas acima citadas onde no item “e” pode-se observar a técnica da divisão do arco em partes.

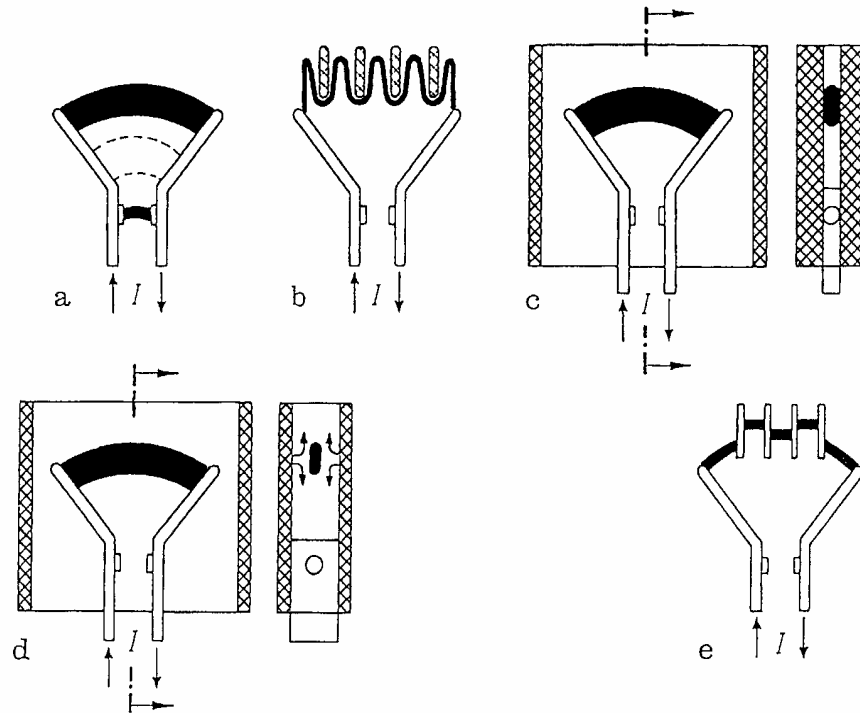


Figura 2-15 - Técnicas de aumento de tensão de arco. Fonte: [22]

A referida figura ilustra ainda nos itens “a” e “b” os artifícios de prolongamento do arco e nos itens “c” e “d” as técnicas de refrigeração do arco pela passagem do arco próximo às paredes da câmara de extinção, provocando assim transferência de calor do arco para as paredes. O efeito do aumento da tensão de arco pela divisão em pequenos arcos (câmara de extinção com várias chapas, como no item “e” da Figura 2-15) pode ser visualizado na Figura 2-16, onde pode ser reconhecida a eficiência da divisão do arco elétrico pela diferença da magnitude da tensão de arco em um mesmo espaço (fonte: [22]).

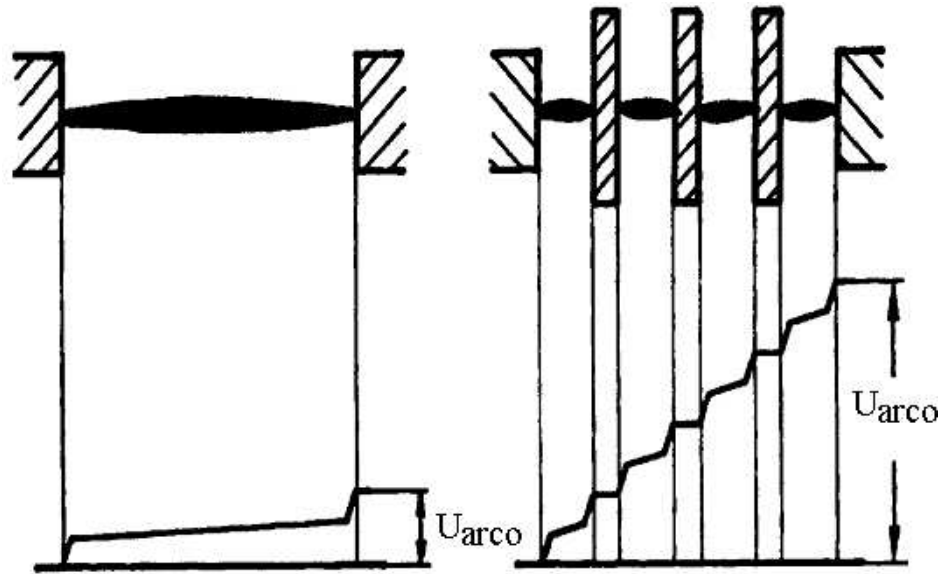


Figura 2-16 - O efeito da divisão do arco elétrico. Fonte: [22]

Observa-se na figura que para um mesmo espaço físico, consegue-se uma tensão de arco resultante mais elevada quando se é introduzido chapas condutoras separadoras entre os condutores abertos para interromper o circuito.

Disjuntores de baixa tensão de alto desempenho não raramente apresentam câmaras de extinção com tensão de arco de algumas de centenas de volts. Ensaios realizados com o disjuntor motor WEG modelo MPW25 (já citado no item 2.1) apresentaram valores de 560 até 900V de tensão de arco. Este referido disjuntor tem dupla interrupção de arco e possui 18 chapas de extinção por caminho, o que proporciona 20 pequenos arcos elétricos, com isso chega-se a valores de aproximadamente 28 a 45 V de queda de tensão por arco elétrico.

O minidisjuntor objeto deste estudo tem abertura simples e apenas 4 chapas de extinção proporcionando apenas 5 pequenos arcos e uma tensão de arco apenas entre 120 e 180 V. O efeito de limitação de corrente não será sempre suficiente, especialmente quando a tensão de alimentação for mais elevada.

3 Equacionamento e modelamento de um minidisjuntor sob curto-circuito

3.1 Introdução

O objetivo maior deste trabalho de dissertação é obter o modelo computacional de minidisjuntores em condição de curto-circuito para conhecimento de seu comportamento dinâmico e para possibilitar o perfeito dimensionamento destes quando ainda em fase de projeto buscando a concepção de uma completa linha de disjuntores perfeitamente compatíveis entre si do ponto de vista da seletividade e coordenação em curto-circuito.

3.2 O Objeto em estudo

Para realização dessa pesquisa foi escolhido o minidisjuntor atualmente comercializado pela WEG no Brasil, cujo projeto é de origem alemã e é fabricado na Argentina. O ANEXO 2 apresenta o catálogo na íntegra do produto que pode ser encontrado na internet no site www.weg.com.br.

A denominação do produto é MBW que é uma contração dos termos em inglês “Miniature circuit-Breaker Weg”.

Os minidisjuntores MBW têm correntes nominais que vão de 2 a 63 A e podem ser monopolares, bipolares ou tripolares. A tensão nominal máxima é de 440V em 50 ou 60Hz. Sua capacidade de curto-circuito é de apenas 3 kA (de acordo com as exigências da norma IEC60898-1 [16]).



Figura 3-1 – Disjuntores MBW – monopolar, bipolar e tripolar. Fonte:[9]

A figura a seguir apresenta o disjuntor MBW de 2A aberto, onde se observam seus componentes e uma breve descrição.

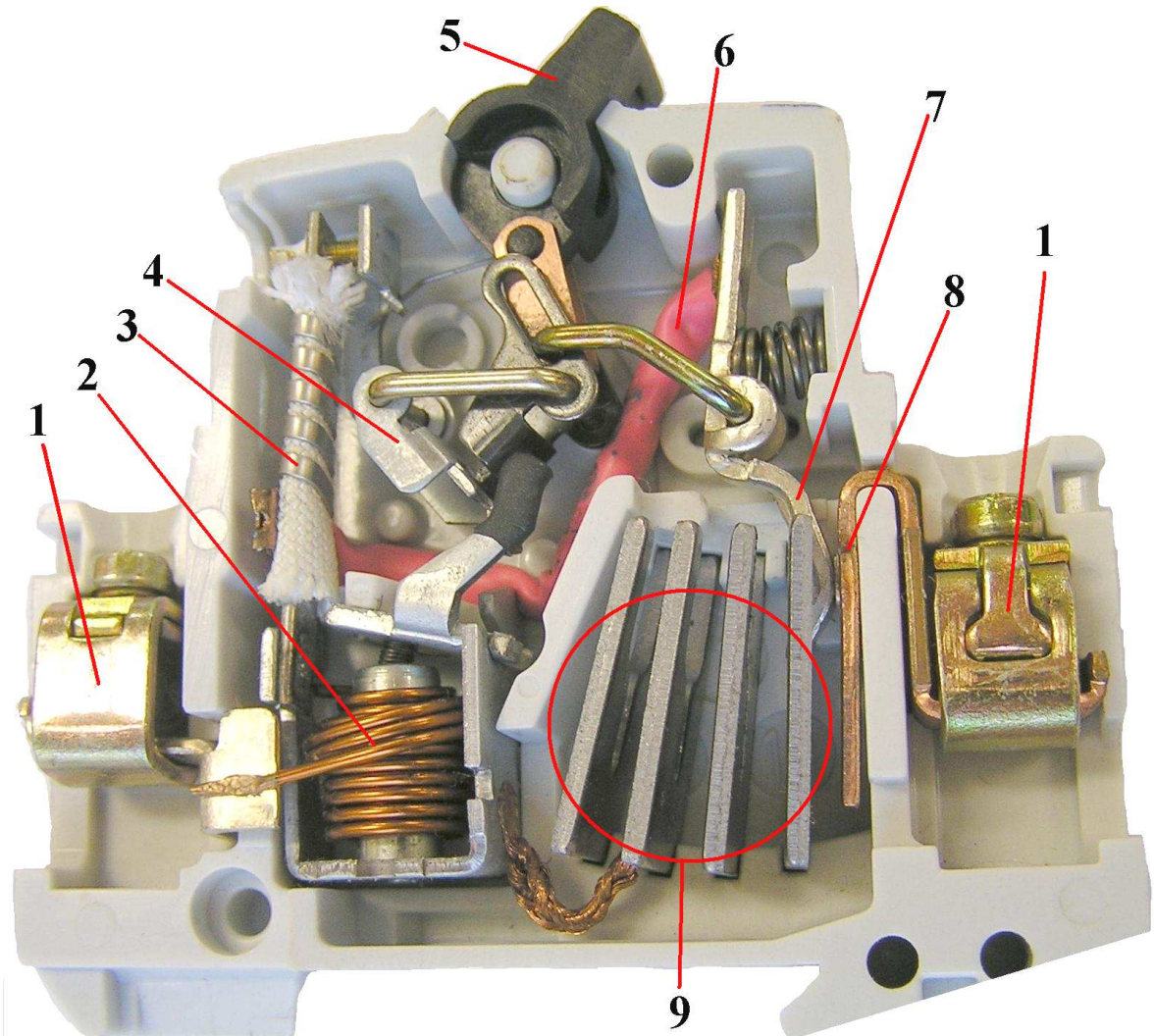


Figura 3-2 - Visualização do disjuntor MBW - componentes internos

- 1- Terminais
- 2- Bobina de disparo magnético
- 3- Elemento bimetálico envolto pela resistência de aquecimento
- 4- Gatilho do mecanismo de disparo
- 5- Manopla
- 6- Cordoalha
- 7- Contato móvel
- 8- Contato fixo
- 9- Câmara de extinção

As características de disparo instantâneo do MBW podem ser do tipo B ou C conforme a norma IEC 60898-1, ou seja:

Curva B

O minidisjuntor de curva B tem como característica principal o disparo instantâneo para correntes entre 3 a 5 vezes a corrente nominal. Sendo assim, são aplicados principalmente na proteção de circuitos com características resistivas ou com grandes distâncias de cabos envolvidas. Ex: Lâmpadas incandescentes, chuveiros, aquecedores elétricos, etc.

Curva C

O minidisjuntor de curva C tem como característica o disparo instantâneo para correntes entre 5 a 10 vezes a corrente nominal. Sendo assim, são aplicados para a proteção de circuitos com instalação de cargas indutivas. Ex: Lâmpadas fluorescentes, geladeiras, máquinas de lavar etc.

A Figura 3-3 a seguir apresenta as curvas de disparo dos minidisjuntores MBW.

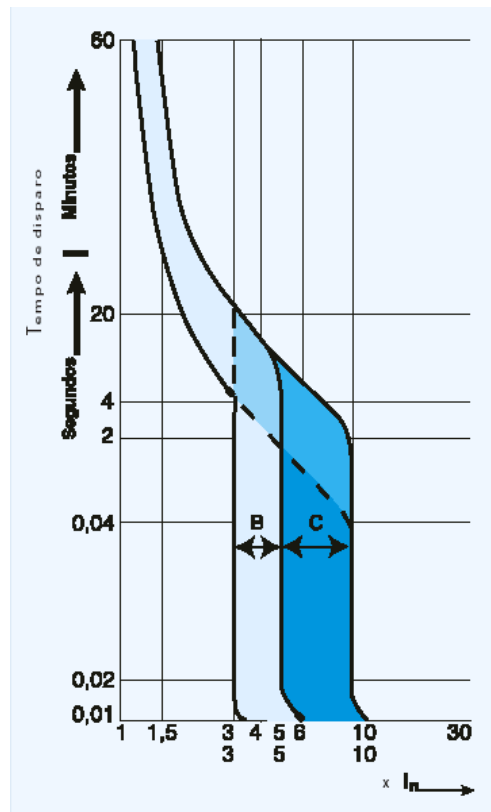


Figura 3-3 – Curvas Características dos minidisjuntores WEG modelo MBW. Fonte:[9]

3.3 Recursos computacionais utilizados para o modelamento

Para a concepção dos modelos computacionais do minidisjuntor serão usados vários recursos computacionais atualmente disponíveis na WEG Acionamentos. Entre estes recursos podem ser citados quatro softwares imprescindíveis (em parêntesis a versão comercial utilizada):

- Software de projeto mecânico tridimensional (SolidWorks-
www.solidworks.com);
- Software de simulação de mecanismos (Working Model 2D [38]);
- Software de análise de elementos finitos - eletromagnetismo (ANSYS/EMAG [34]);
- Software de simulação de sistemas multifísicos (Modelica/Dymola [10]);

Outras versões comerciais de softwares compatíveis poderiam ser usadas com resultados satisfatórios. O uso destes programas deve-se ao fato de estes estarem disponíveis para uso no dia-a-dia de projeto e desenvolvimento na empresa e, portanto, serem amplamente acessíveis à necessidade de produzir conhecimento útil para o desenvolvimento de um novo produto.

A Figura 3-4 apresenta a interligação entre os softwares utilizados. O fluxo de informações é sempre no sentido das setas e a informação que é levada de um software para outro é indicada junto às setas.

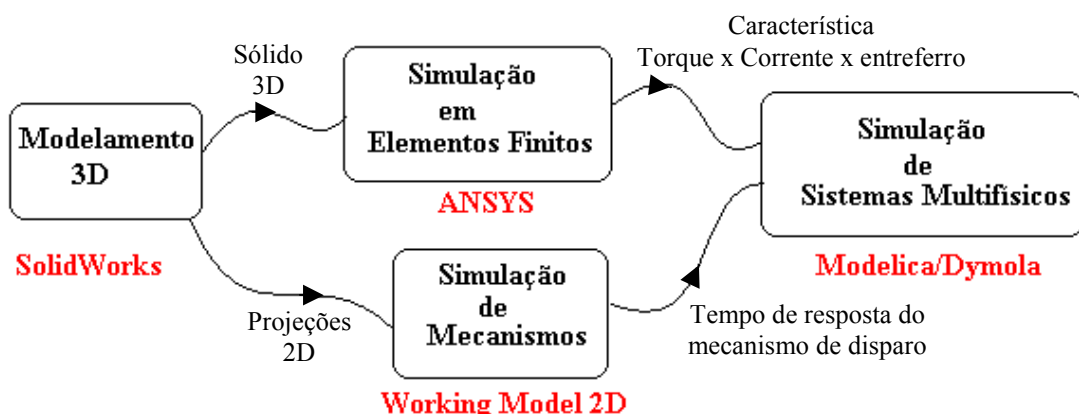


Figura 3-4 - Interação entre os Softwares utilizados

3.3.1 Razões para a escolha da linguagem de modelamento “Modelica”

Para viabilizar a utilização do modelo criado neste trabalho é desejável que o sistema ou software de simulação seja de fácil uso e apresente uma interface amigável ao usuário. Vários são os softwares disponíveis no mercado que poderiam atender esta demanda e cada um deles têm suas vantagens e desvantagens, o que torna difícil o uso deste critério para escolha do software.

A experiência de outros pesquisadores é, com certeza, uma excelente diretriz para a tomada de decisão na escolha do software. Roschke [28], em seu trabalho de modelamento de um disjuntor-motor junto a um contator em curto-circuito, utilizou com sucesso a linguagem Modelica [10] na sua versão 1.0. Apesar do modelo se tratar de um disjuntor com características totalmente diferentes na aplicação e concepção, os princípios físicos envolvidos são os mesmos. Este foi o principal motivo que levou à escolha da linguagem Modelica na execução do modelo deste trabalho.

A linguagem Modelica é ainda pouco difundida no Brasil, sendo mais conhecida e usada na Europa (Suécia e Alemanha) e EUA. O software Omola do “Lund Institute of Technology” da Suécia é certamente o software que mais inspirou a criação do código do Modelica. Hoje o “Lund Institute of Technology” oferece uma versão gratuita do modelica sob denominação “Open Modelica” e encoraja pesquisadores a utilizá-lo.

Modelica é uma linguagem genérica de código aberto, criada em um esforço internacional em busca de um padrão para projetos de modelos de sistemas físicos. A linguagem lida com multi-formalismos e multi-domínios.

Como brevemente citado acima, a linguagem permite que se façam simulações em formalismos diversos, como circuitos, equações algébricas diferenciais, diagramas de blocos, redes de Petri, diagramas de estados, Bond Graphs entre outros. Além disso, os vários domínios da Física também podem ser modelados, permitindo muitas vezes uma aproximação melhor do modelo (graficamente) com a realidade.

É uma linguagem orientada a objetos e permite a reutilização dos modelos em outros projetos. A descrição do modelo pode ser feita tanto em alto nível (uso de objetos gráficos) como através da escrita direta do código para equacionamento do modelo.

O modelamento orientado a objetos permite o uso de gabaritos ou “templates”, que facilitam a criação de novos modelos e permitem a evolução dos modelos de maneira simplificada.

O modelamento em Modelica é não-causal, ou seja é feito por equações e não por atribuições de valores às variáveis, o que permite a reutilização dos modelos com mais facilidade, uma vez que as equações permitem o fluxo de dados não-direcional. Ainda assim, a linguagem permite o modelamento causal se necessário for, a critério do usuário.

A vantagem do modelamento não causal pode ser verificada com o exemplo a seguir, onde um circuito simples é modelado em Modelica e comparado com o método de diagramas de blocos.

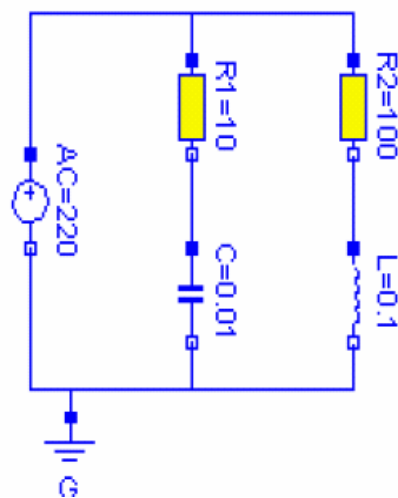


Figura 3-5 - Modelo de um circuito elétrico em Modelica. Fonte [13]

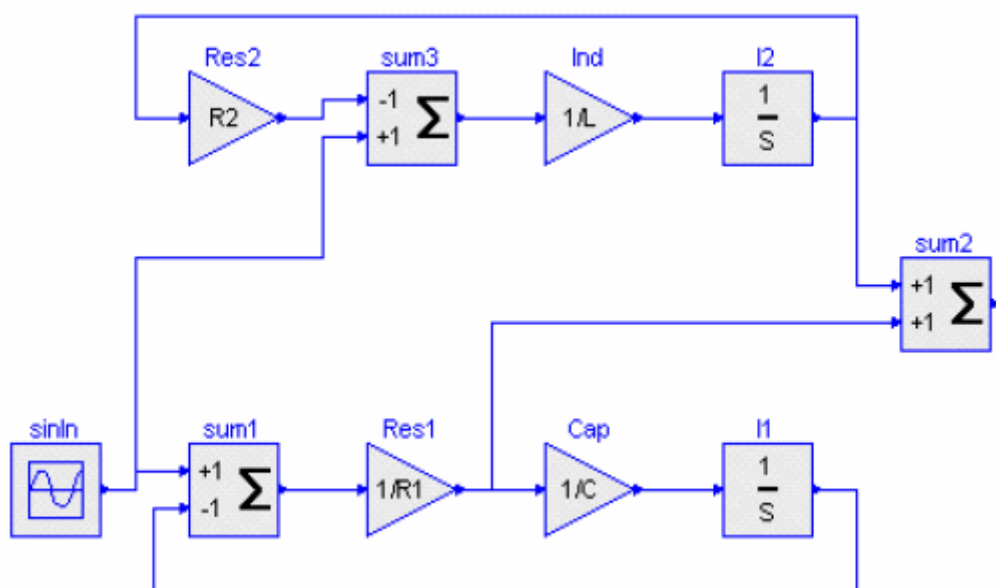


Figura 3-6 - Modelo do mesmo circuito acima em diagrama de blocos. Fonte [13]

As desvantagens do modelo causal do diagrama de blocos são evidentes, entre elas pode-se citar a perda da informação da topologia física do circuito, e a modelagem do resistor ser dependente de como ele é inserido no circuito. O circuito da figura acima poderia ser representado também em diagrama de blocos por apenas um bloco, mas a informação quanto à topologia do circuito seria desta forma definitivamente perdida.

Outro aspecto importante já citado é a possibilidade maior da reutilização dos modelos devido à não causalidade. Uma equação não causal escrita em Modelica para um resistor pode ser assim escrita:

$$R \cdot i = V \quad \text{Equação 3-1}$$

e é interpretada internamente pelo software pelas duas expressões unidirecionais:

$$i := \frac{V}{R} \quad \text{ou} \quad V := R \cdot i$$

logo, o mesmo modelo em Modelica pode representar mais de uma situação. Aqui representa um resistor que quando a ele é aplicada tensão, este responde com a corrente e quando é aplicada a corrente, este responde com a tensão.

Vários são os softwares comerciais que oferecem suporte à linguagem Modelica, o mais largamente difundido é o Dymola (www.dymola.se) que foi escolhido para execução do modelamento deste trabalho.

Mais informações sobre a linguagem Modelica pode ser facilmente obtida em sua página na Internet: www.modelica.org.

3.4 Sistemas que devem ser modelados

Apesar de ser um dispositivo de custo relativamente baixo, um minidisjuntor compreende vários dispositivos que interagem entre si, formando sistemas de complexidade considerável que abrangem fenômenos mecânicos, magnéticos, elétricos, térmicos e fluídicos.

Além de aquecimento por efeito Joule, a passagem de corrente pelos condutores provoca outros fenômenos como a força de interação eletromagnética com os componentes que o cercam.

Os efeitos térmicos de um curto-circuito no sistema de disparo por elementos bimetálicos, que podem provocar o desarme do disjuntor [13], também poderiam ser considerado em um refinamento futuro do modelo em estudo. Este trabalho não levará em

consideração os efeitos térmicos da corrente no disjuntor, mas o modelo criado permitirá que se façam estudos destes efeitos no futuro.

Bobinas de disparo por curto-circuito são normalmente construídas com elementos ferromagnéticos e possuem entreferro variável durante o processo de disparo. Estes componentes, feitos de materiais ferromagnéticos, sofrem conhecidamente o efeito da saturação, especialmente quando o disjuntor é submetido ao curto-circuito e este efeito não pode ser desprezado. Este processo dinâmico em que a corrente varia ao mesmo tempo em que o entreferro e em que a saturação também varia, será estudado com modelos em elementos finitos, através do programa de elementos finitos denominado ANSYS/EMAG (já citado acima). Seus resultados serão confrontados com medições para validar os modelos.

Na maioria das concepções de minidisjuntores a bobina de disparo magnético atua apenas no mecanismo de disparo do disjuntor. Algumas concepções de minidisjuntores, no entanto, utilizam o recurso de adaptar uma conexão mecânica direta entre a bobina de disparo por curto-circuito e o contato móvel. As patentes citadas nas referências [2] e [24] ilustram esta solução. O disjuntor em análise neste trabalho não emprega este recurso assim também não o apresenta o modelo proposto neste trabalho. Com apenas pequenas alterações no modelo também será possibilitada a análise dessa versão, o que poderá ser usado como uma ferramenta para decisão da implantação da característica no projeto ou não, uma vez que pode representar um valor considerável na composição do custo do disjuntor. A Figura 3-7 ilustra essa concepção de projeto.

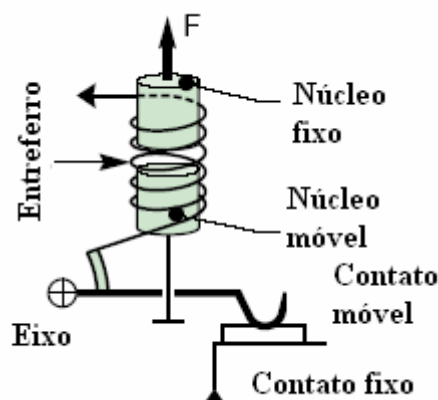


Figura 3-7 - Contato móvel com atuação direta do disparador magnético. Fonte: [31]

O mecanismo de disparo de um minidisjuntor determina a rápida resposta a um comando na bobina de disparo por curto-circuito. Após este receber o comando através de seu gatilho deve abrir o circuito o mais rapidamente possível através da abertura do par de contatos. Para se conhecer o desempenho deste mecanismo será utilizado o software Working Model 2D, que possibilita a obtenção dos dados de tempos de respostas bem confiáveis.

Para que o circuito seja interrompido não basta apenas que os contatos se abram. Devido às energias armazenadas no circuito elétrico (normalmente indutivo) é impossível interromper a corrente imediatamente. Em condições usuais de utilização de um disjuntor, sempre que houver a abertura de um par de contatos pelo qual esteja circulando uma corrente, haverá a formação de um arco elétrico entre os contatos, que perdurará até que a corrente cesse de circular no circuito. Um bom modelo de arco elétrico é indispensável para a perfeita compreensão do processo de interrupção de corrente que ocorre em um disjuntor.

A primeira vista o arco elétrico se apresenta como um efeito nocivo ao disjuntor, mas paradoxalmente, o arco elétrico tem um papel fundamental no processo de interrupção de corrente. Pois, enquanto o arco elétrico danifica enormemente tudo à sua volta é “dentro” do arco elétrico que se forma a “tensão de arco” responsável pela limitação de corrente e interrupção do circuito antes da passagem natural da corrente senoidal por zero (ver item 2.5).

Outro fenômeno interessante que ocorre em disjuntores é o efeito de levitação de contatos obtido através de uma geometria de contatos, tal que a corrente que circula pelo par de contatos, circula em um dos contatos em sentido contrário ao do outro. A força de levitação é sempre contrária às forças elásticas das molas que pressionam os contatos na posição fechada e é proporcional ao quadrado da corrente que circula pelo disjuntor, além de depender muito da geometria do par de contatos. A exposição feita no item 2.5.1 sobre o fenômeno de atração ou repulsão entre condutores, vale também aqui. A Figura 3-8 ilustra um método de se obter a repulsão (ou levitação) dos contatos quando submetidos às altas correntes de curto-circuito.

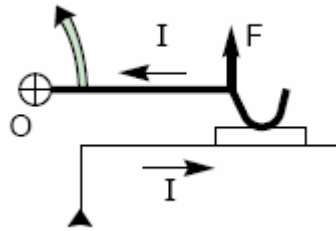


Figura 3-8 - O efeito de levitação dos contatos. Fonte:[31]

A levitação dos contatos, a rápida abertura do mecanismo de disparo e a atuação direta do disparador magnético sobre os contatos e o arco elétrico são fenômenos que ocorrem simultaneamente no disjuntor e precisam por isso ser todos modelados em conjunto para se obter uma informação completa sobre suas interações. São estes fenômenos combinados que definem a característica mais desejável nos disjuntores modernos, que é a limitação de corrente conforme já visto no item 2.5.1.

3.5 O modelo sólido em 3D e em desenho 2D

Para viabilizar o modelamento do disjuntor em softwares de simulação dinâmica de mecanismos como o Working Model 2D e em softwares de cálculo em elementos finitos como o ANSYS/EMAG, é de grande utilidade a utilização dos modelos tridimensionais obtidos em software especializado no modelamento tridimensional como o SolidWorks, que permite a exportação de seus modelos para os outros softwares (vide Figura 3-4).

Os softwares de simulação (FEM-ANSYS/EMAG, dinâmica de mecanismos - Working Model 2D), até permitem o modelamento dos componentes do sistema em estudo em suas plataformas, mas a importação dos modelos 3D em formato IGES e 2D no formato DXF é muito mais cômoda, pois permite a construção e atualização dos modelos com muito mais facilidade e rapidez.

A Figura 3-9 e a Figura 3-10 a seguir representam o subconjunto montado do disjuntor MBW na situação em que o disjuntor está fechado quando modelado no software SolidWorks (modelo tridimensional). Os valores dimensionais funcionais foram obtidos por medição de um conjunto montado através de microscópio metrológico com resolução de 0,01 mm.

Saliente-se que nem todas as peças estão representadas aqui, como por exemplo, as molas, a bobina do disparador magnético, o bimetal e a cordoalha que interliga o bimetal e o contato móvel. Nesta representação foram incluídos somente os elementos que desempenham função mecânica ou eletromagnética e que devem ser exportados para os softwares de simulação dos respectivos sistemas. As peças não representadas executam funções no disjuntor que não estão relacionadas ao desempenho do disjuntor em curto-circuito, desta forma se torna desnecessária sua inclusão no modelo.

Para a simulação dinâmica do mecanismo são utilizadas as representações bidimensionais (2D) das peças que realizam função mecânica no disjuntor. O software Working Model 2D permite que certas interfaces tridimensionais (3D) sejam simuladas através da possibilidade de fazer com que corpos sofram ou não colisões. As forças elásticas das molas, as massas, inércias e atritos são levados em consideração e o software apresenta boa confiabilidade em seus resultados, já comprovada em outros estudos feitos anteriormente na Weg Acionamentos.

Já a simulação dos circuitos magnéticos em ANSYS/EMAG utiliza os modelos em 3D para a partir destes gerar as malhas de elementos finitos que vão possibilitar o cálculo das forças geradas no circuito magnético da bobina de disparo do disjuntor.

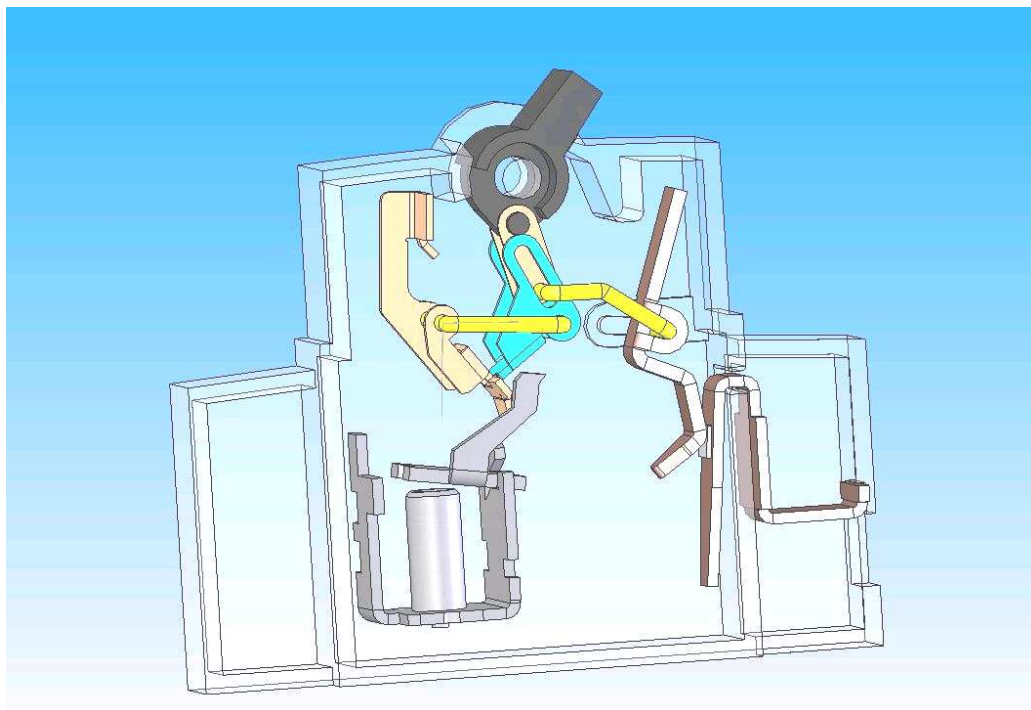


Figura 3-9 - visualização do minidisjuntor representado em 3D – contatos fechados

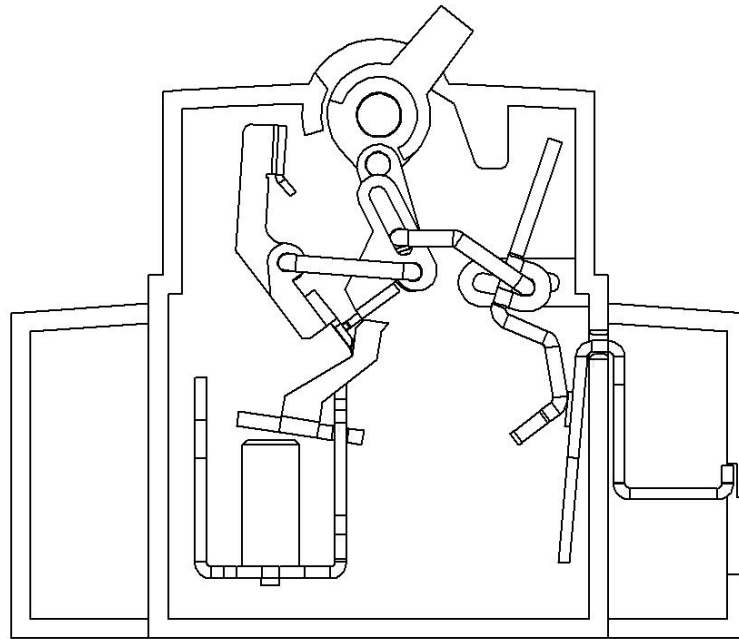


Figura 3-10 - Visualização do minidisjuntor em representação 2D conforme Figura 3-9

A Figura 3-9 mostra o disjuntor quando modelado e montado na posição “ligado”. O software de projeto em 3D SolidWorks permite que certas simulações cinemáticas e suas animações sejam geradas. A Figura 3-11 representa o minidisjuntor em sua posição “aberta” (desligado) e com uma pequena mudança de ângulo para melhorar a visualização de seus componentes. Tanto esta situação de montagem quanto a anterior foram obtidas através de simulação cinemática da montagem dentro do software SolidWorks nas duas condições-limite “ligado” e “desligado”.

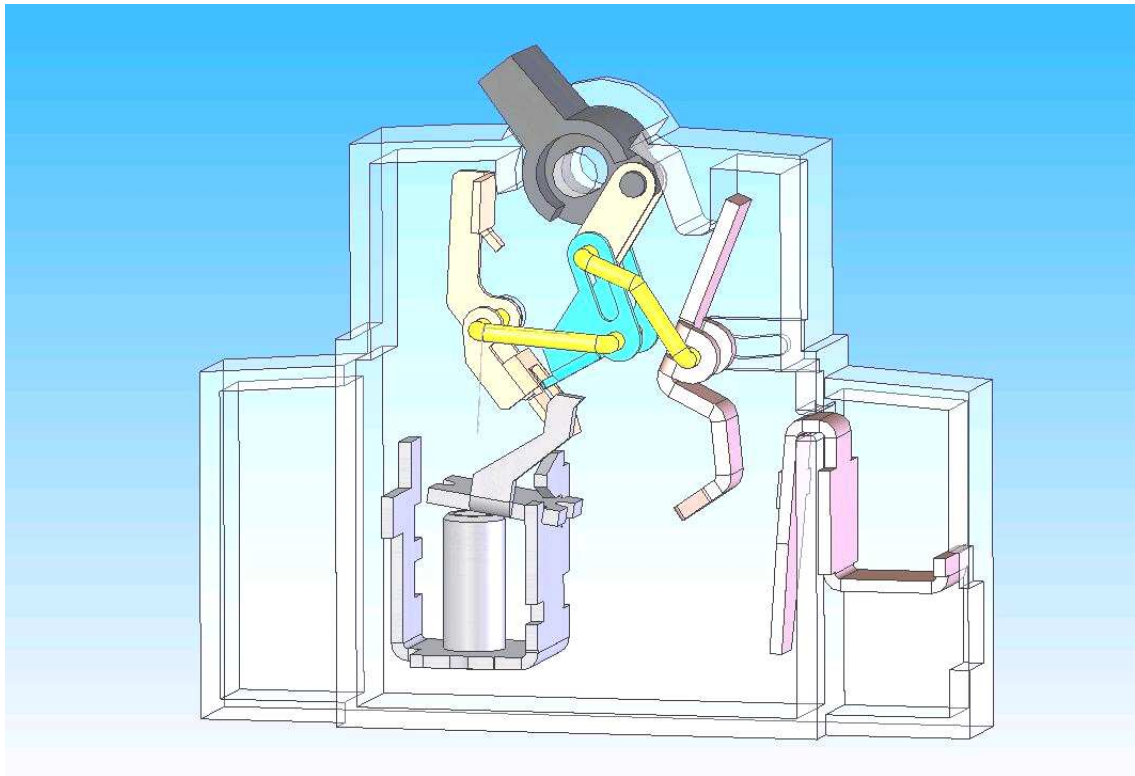


Figura 3-11 - Representação do minidisjuntor na posição "desligado"

3.6 Obtenção do modelo dinâmico do mecanismo do minidisjuntor

3.6.1 Apresentação

A partir das projeções bidimensionais dos modelos tridimensionais (expostos no item anterior), foi possível implementar o modelo do disjuntor no software de simulação dinâmica 2D denominado Working Model 2D.

Este software permite modelar a dinâmica de sistemas mecânicos levando em consideração todos os parâmetros necessários para uma simulação deste tipo, exceto a deformação das peças. Como neste caso as deformações das peças são desprezíveis (exceto pelas molas que o software modela como entidades com esta função específica), o software atende perfeitamente todas as necessidades neste quesito.

É possível mencionar alguns dos parâmetros que o software leva em consideração: massa, constante elástica, inércia (geometria e massa), coeficientes de atrito estático e dinâmico, viscosidade do ambiente (αr) e gravidade.

O sistema permite que sejam colocadas as molas e aplicadas forças ou atuadores nos pontos adequados e todos os parâmetros do modelo podem ser medidos ponto a ponto.

A Figura 3-12 representa o modelo em Working Model 2D do minidisjuntor na posição “desligado”.

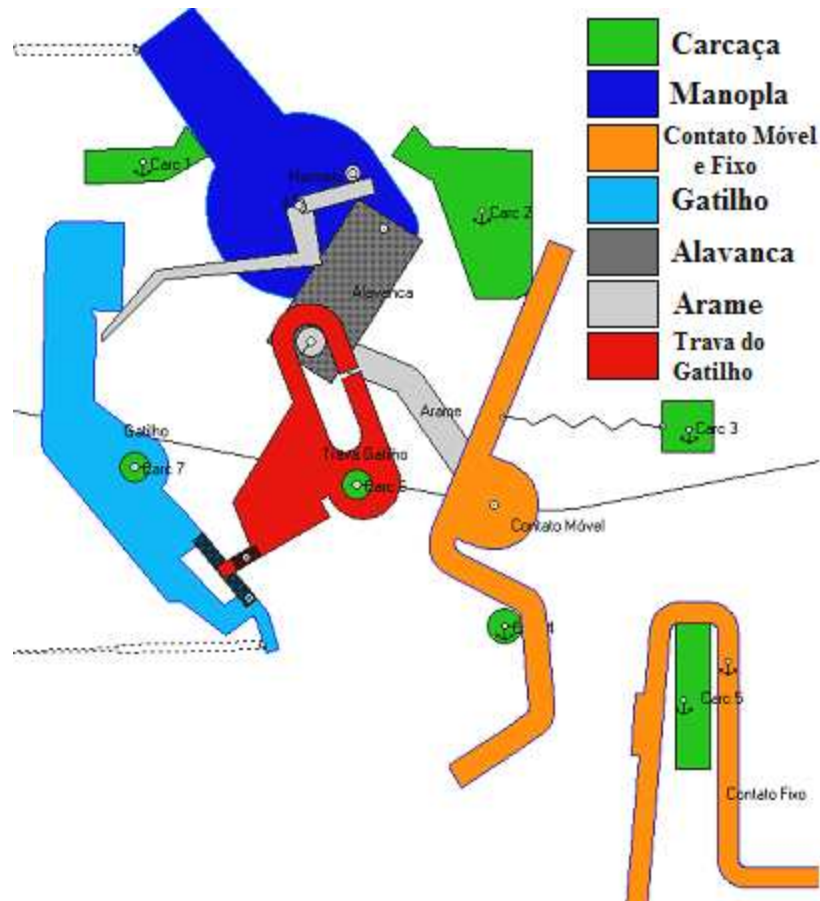


Figura 3-12 - Modelo em Working Model 2D do minidisjuntor desligado

As partes em verde representam na verdade uma única peça, que é a carcaça do disjuntor e a pequena âncora representada nelas significa que estas partes serão estáticas durante a simulação. As peças em alaranjado são os contatos, sendo o móvel inteiramente representado na figura e atrelado a uma mola que o mantém na posição aberta em relação ao contato fixo. Em azul escuro, encontra-se a manopla, que é a interface com o usuário, ou seja, o ponto onde este aplica o comando de ligar e desligar o disjuntor. A ação do usuário está representada pela pequena haste branca tracejada à esquerda da manopla, que é um atuador que pode tanto empurrar a manopla à direita como puxá-la à esquerda quando estiver ligado. Em cinza claro, ligados ao mesmo eixo da manopla estão representados os braços de uma mola de torção que tem a finalidade de manter a manopla em sua posição de repouso e também determinar a posição do gatilho (em azul claro)

sempre exercendo uma pequena força em direção à trava do gatilho (em vermelho). As peças remanescentes em cinza, que foram nomeadas de alavanca e arame perfazem a função de transferência e transformação do movimento da manopla e trava do gatilho para o contato móvel.

Portanto, com este software podem ser modeladas as ações de ligar e do desligar do disjuntor ao se aplicar atuadores nos devidos pontos. A Figura 3-13 mostra a seguir o minidisjuntor na posição ligado.

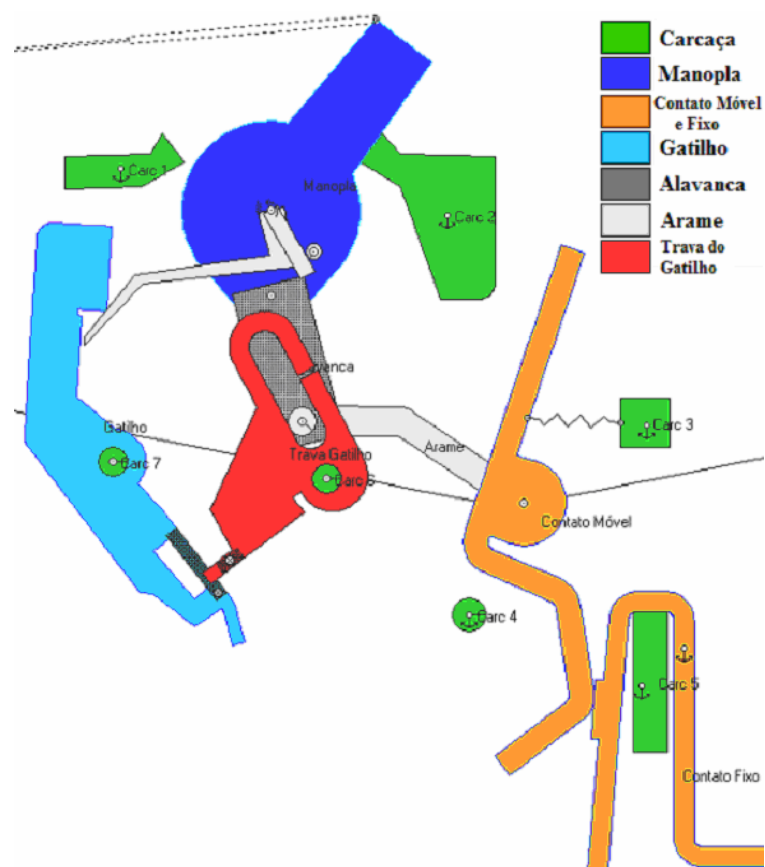


Figura 3-13- Modelo em Working Model 2D do minidisjuntor ligado

3.6.2 Resultados

O objetivo maior do modelamento nesta seção é possibilitar a determinação do tempo de disparo do objeto em estudo quando se lhe aplica um comando de disparo através do disparador por curto-circuito. Este evento foi simulado e o resultado pode ser visto na Figura 3-14, que representa o rastro deixado pelas peças do mecanismo e na Figura 3-15 que representa os valores de forças em função do tempo. Do gráfico é possível

então obter o intervalo de tempo entre o comando de disparo e o instante em que os contatos se abrem. O intervalo inicia, na simulação em $t=0,0213$ s quando há um declíneo acentuado na variável F_{gatilho} (força de contato entre as peças “Gatilho” e “Trava do gatilho”) e se encerra em $t= 0,0230$ s, quando a F_{contatos} se anula (força de contato entre as peças “Contato móvel” e “Contato fixo”). Portanto da simulação obtém-se um tempo de disparo do mecanismo de 0,0017 segundo, ou:

$$t_{\text{RDM}} = 1,7 \quad [\text{ms}] \quad \text{Equação 3-2}$$

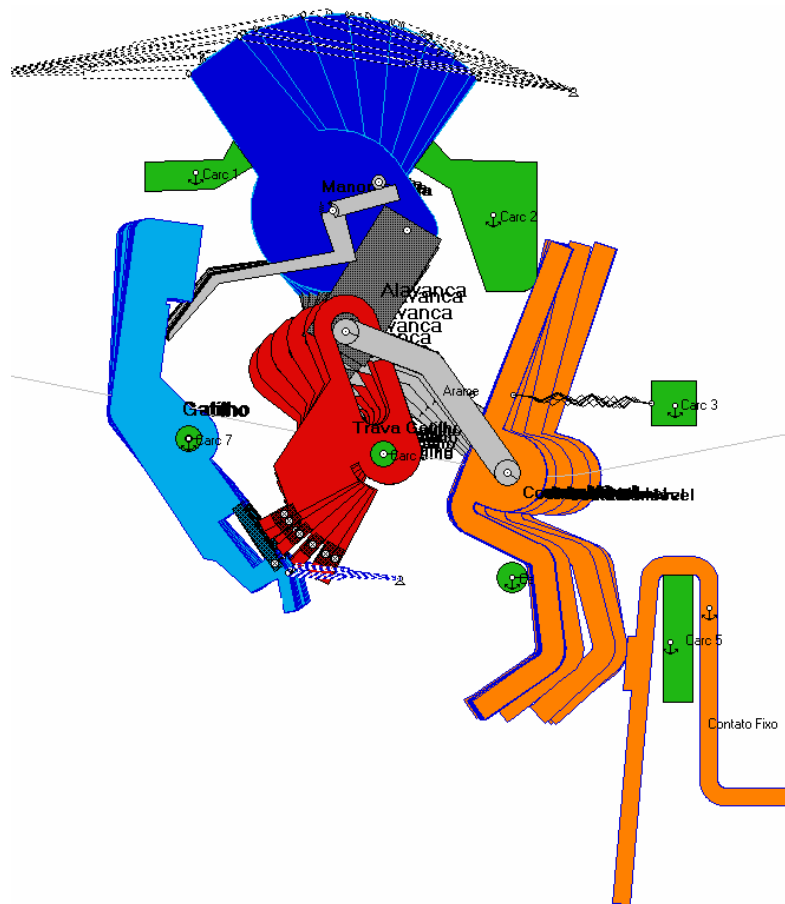


Figura 3-14- Resultado da simulação do mecanismo de disparo em Working Model 2D - Rastro

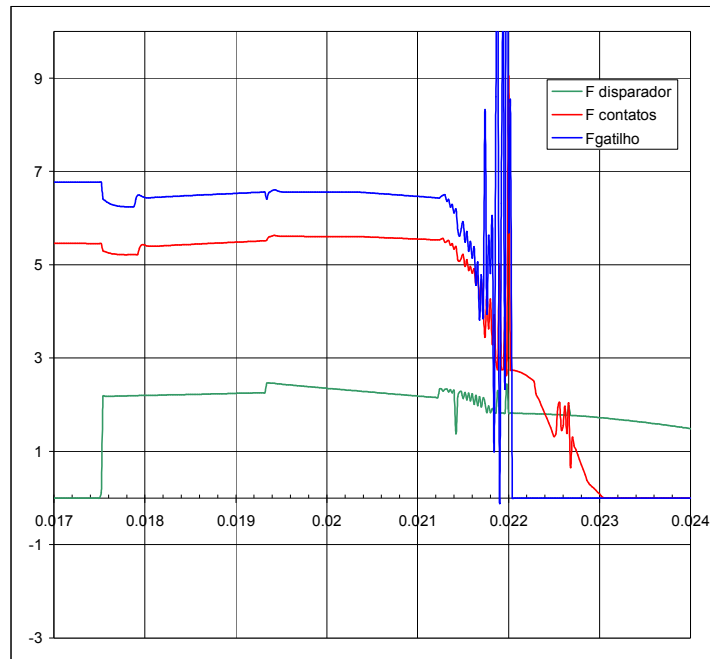


Figura 3-15- Resultado da simulação do mecanismo de disparo em Working Model 2D - Gráfico

A Figura 3-16 apresenta um detalhe do intervalo de tempo de maior interesse da simulação do mecanismo.

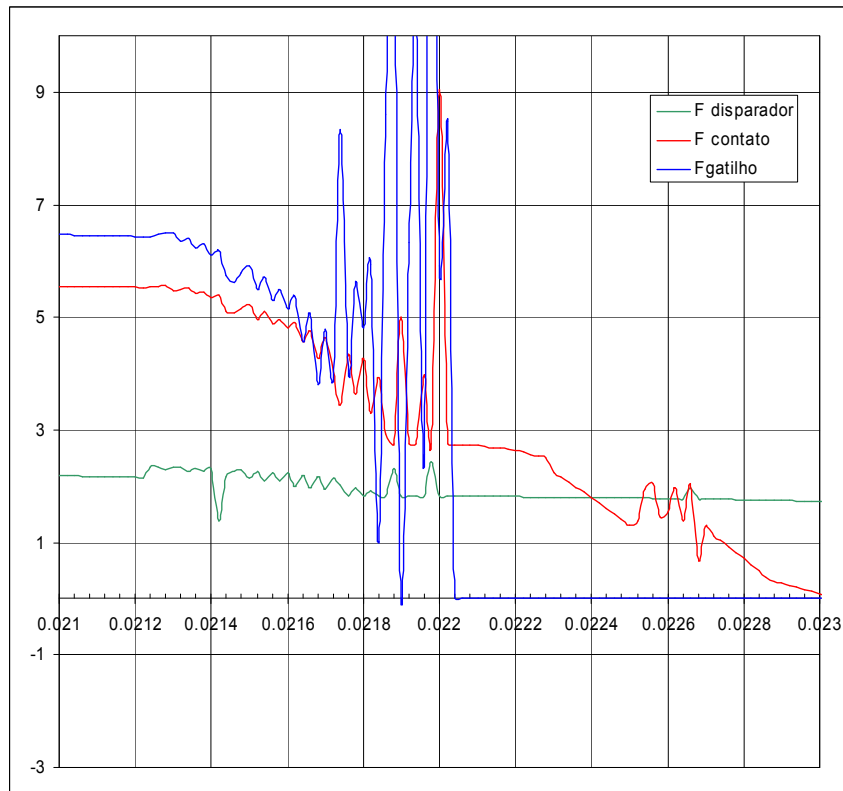


Figura 3-16- Detalhe do resultado da simulação do mecanismo de disparo em Working Model 2D

3.7 As etapas e suas transições no fenômeno de curto-circuito em um disjuntor

A função principal de um disjuntor é a proteção de circuitos elétricos e equipamentos ligados a ele através da interrupção da corrente que passa por ele quando em sobrecarga ou curto-circuito.

Este processo de interrupção pode ser dividido em várias etapas. Esta subdivisão é comum em trabalhos de simulação de arco elétrico e pode ser encontrada na literatura em Roschke [28] e Lindmayer [23]:

- Etapa fechado (FE: “FECHADO”)
- Abertura dos contatos e ignição do arco (etapa IA: “IGNIÇÃO DO ARCO”: vide Figura 3-17 e Figura 3-18)
- Prolongamento do arco (etapa PA: “PROLONGAMENTO DO ARCO”: vide Figura 3-17 e Figura 3-18)
- Movimentação do arco para dentro da câmara de extinção (etapa AC: “ARCO NA CÂMARA”: vide Figura 3-17 e Figura 3-18)
- Extinção do arco (etapa EA: “EXTINÇÃO DO ARCO”: vide Figura 3-18)
- Etapa Aberto (“ABERTO”)

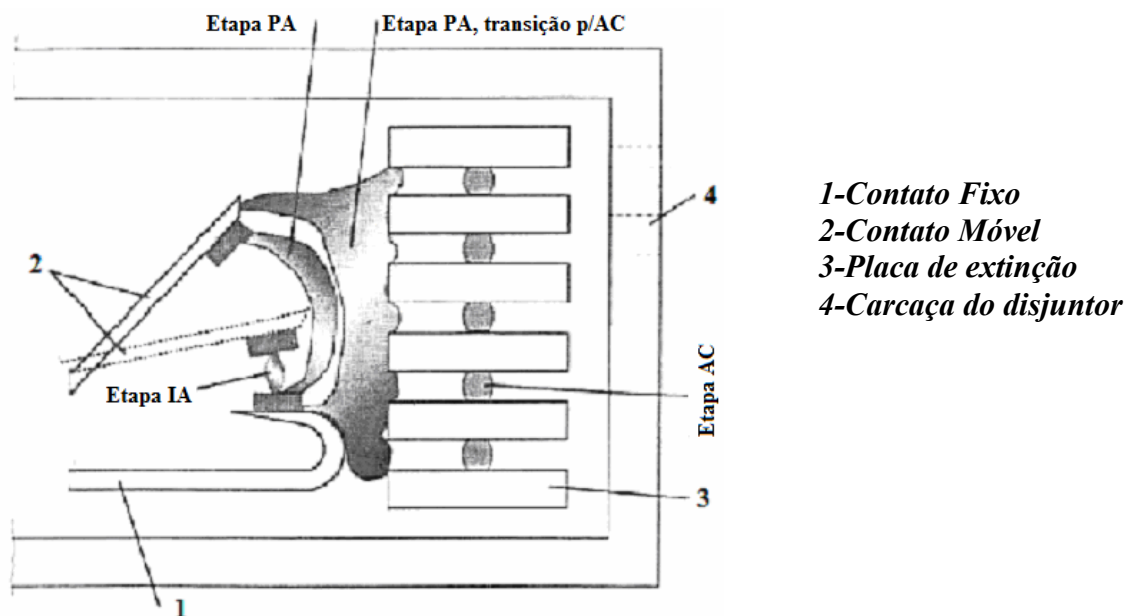


Figura 3-17 - Representação do arco elétrico e suas etapas. Fonte: [28]

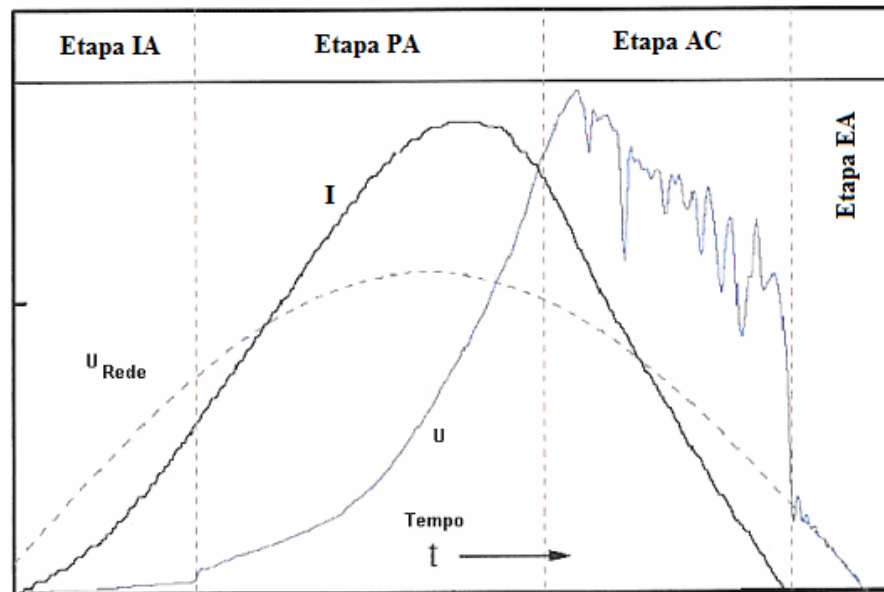


Figura 3-18 - Tensão e corrente em um disjuntor durante um curto-circuito. Fonte: [28]

Na Figura 3-18 as etapas definidas são mostradas em termos de correntes e tensões através do disjuntor. As etapas em que o arco elétrico está presente contém a letra “A” e podem ser assim melhor descritas:

- Abertura dos contatos e ignição do arco (etapa IA)
 - Se contatos elétricos nos quais está circulando uma corrente são abertos, um arco elétrico é, em condições normais, estabelecido. A abertura dos contatos pode acontecer por atuação do mecanismo de disparo, por atuação direta do disparador magnético ou pela levitação dos contatos. Uma queda de tensão de aproximadamente 20 V se estabelece imediatamente: é a assim-chamada tensão de arco de anodo e catodo. No caso em estudo, o minidisjuntor apresenta apenas um par de contatos, ou seja, a interrupção é simples.
- Prolongamento do arco (etapa PA)
 - Devido a forças geradas pelas correntes que ocorrem na coluna do arco, este será prolongado: primeiramente próximo aos contatos e posteriormente movido em direção à câmara de extinção. Enquanto o arco está na região próxima aos contatos, a tensão de arco cresce vagarosamente, juntamente como o crescimento do comprimento do arco, principalmente devido à

força de levitação dos contatos, na maioria das vezes. Posteriormente quando o arco se move pelos guias de arco, a queda de tensão cresce mais rapidamente, pois normalmente quando está nesta etapa, o mecanismo de retorno (mola) do contato móvel está atuando de maneira a abrir o contato, somando-se a força de repulsão natural devida à corrente que circula pelos contatos. Quando o arco finalmente se aproxima das placas de extinção a aceleração aumenta ainda mais devido à maior concentração das linhas de fluxo na câmara e conseqüentemente maiores forças eletrodinâmicas sobre o mesmo.

- Movimentação do arco para dentro da câmara de extinção (etapa AC)
 - Nesta etapa ocorre a comutação do arco do espaço de fora da região das placas para a região entre as placas da câmara de extinção. O arco é então dividido em vários pequenos arcos de acordo com o número de placas + 1 (que é o número de espaços vazios entre os contatos). Nesta etapa, a tensão de arco atinge seu valor máximo. A tensão é igual à soma de todas as tensões anodo-catodo em série no circuito, além da queda de tensão na coluna do arco (que aumenta pela refrigeração da mesma nas placas de extinção) e da queda de tensão na passagem da corrente pelo material das placas. Entretanto, a já existente diminuição da corrente devido à limitação da mesma, provoca também, uma pequena redução na queda de tensão de arco.
- Extinção do arco (etapa EA)
 - O arco elétrico permanece existindo enquanto o circuito elétrico ao qual o mesmo está ligado tem energia suficiente para alimentá-lo. Em um disjuntor limitador de corrente, devido ao fato da tensão de arco ser maior que a tensão da rede a corrente decresce rapidamente até zero. Isto acontece também com o disjuntor em estudo, mas em menor intensidade, pois a tensão do arco é relativamente baixa. Quando o arco elétrico se extingue completamente um pequeno período transitório ocorre até que a tensão sobre o disjuntor se iguale à tensão da fonte.

A Figura 3-19 mostra o comportamento elétrico e mecânico de um disjuntor limitador de corrente típico. O início do curto-circuito foi propositalmente feito na

passagem da tensão por zero como é comum quando se faz desenvolvimento de dispositivos de chaveamento.

As correntes elevadas e de rápida taxa de crescimento provocam forças eletrodinâmicas nos contatos que dependem da geometria do caminho de corrente e dos pontos de constrição de contato. A mesma corrente também vai gerar elevadas forças no disparador magnético para que este dispare o mecanismo de disparo. Supondo que estas forças vençam a inércia, as forças de mola e os atritos, os contatos se abrem.

Imediatamente após este evento ocorre a ignição de um arco entre os dois contatos. O arco permanece por um curto período de tempo entre os contatos elétricos até que as forças magnéticas geradas pelos campos magnéticos (vide Figura 2-15) consigam retirá-lo. Nesta etapa uma pequena tensão de arco de apenas um par de contatos (um conjunto anodo-catodo) se estabelece entre os contatos, esta tensão é normalmente conhecida como tensão anodo-catodo ou U_{anca} . Este fenômeno pode ser observado na Figura 3-19 no gráfico da tensão.

A chegada do arco nas placas de extinção resulta na divisão do arco em várias partes e em disjuntores com forte característica limitadora de corrente a tensão chega a ser superior à tensão da rede. Dessa maneira a corrente no curto-circuito é reduzida a zero. As forças dinâmicas de repulsão são também reduzidas a zero e o mecanismo de disparo deve poder evitar a tempo o refechação dos contatos.

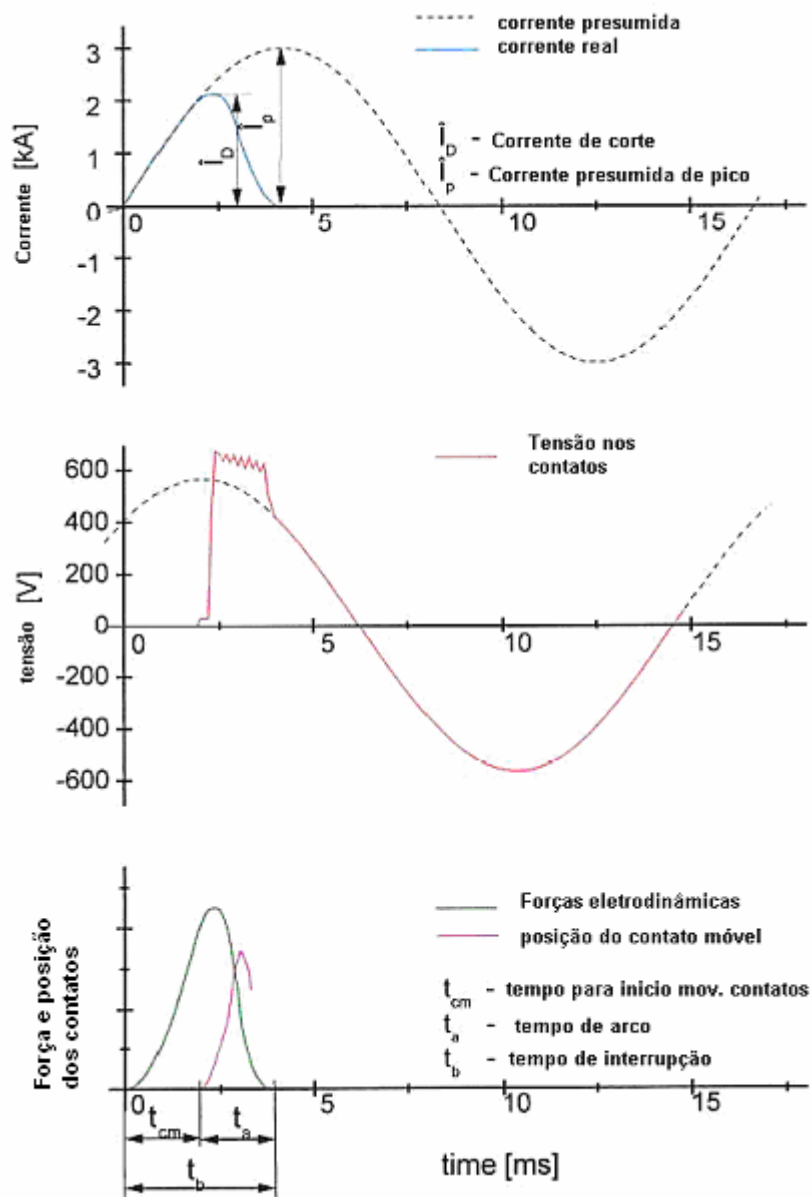


Figura 3-19 - Comportamento dinâmico de elementos elétricos e mecânicos em um disjuntor em curto-circuito. Fonte:[28]

O comportamento do arco será descrito a seguir usando as etapas previamente apresentadas com o conjunto de equações válido para cada etapa.

A Figura 3-20 mostra um diagrama na forma de rede de Petri ordinária com as etapas pré-definidas e as transições possíveis entre elas proposto por Roschke [28] para um disjuntor-motor. A representação em Rede de Petri é utilizada aqui apenas para facilitar a compreensão do mecanismo de funcionamento do minidisjuntor, não sendo usada diretamente no modelamento do mesmo.

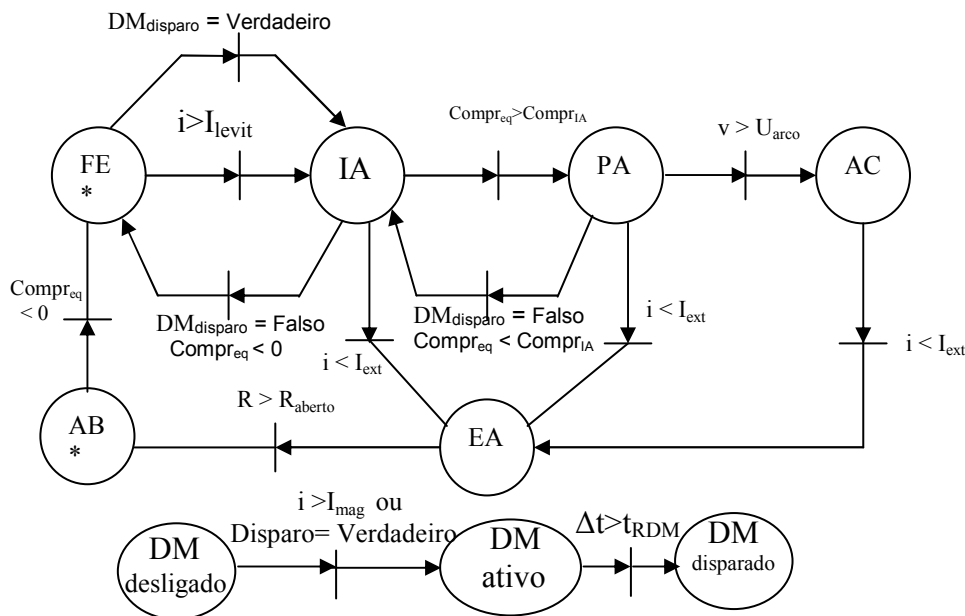


Figura 3-20 Etapas da interrupção de um curto-circuito em um disjuntor (representação como rede de Petri)

* AB= ABERTO e FE= "FECHADO"

Apesar de a rede ter sido concebida com o intuito de simular o comportamento de um disjuntor-motor trifásico, ela apresenta um comportamento plenamente satisfatório para disjuntores do tipo miniatura ou minidisjuntores monofásicos, objeto deste estudo.

A rede mostra o modelo para um disjuntor monofásico, uma representação para um sistema polifásico seria obtida apenas reproduzindo o modelo quantas vezes forem necessárias. Apenas os fenômenos relevantes em curto-circuito são levados em consideração.

A rede superior apresenta as etapas já apresentadas anteriormente que são o "FE" = Fechado, "IA" = Ignição do Arco, "PA" = Prolongamento do Arco, "AC" = Arco na Câmara, "EA" = Extinção do Arco e "AB" = Aberto, que representam as várias etapas de um disjuntor durante o curto-circuito.

A rede inferior (com as etapas em forma elíptica) representa o disparador magnético (DM) do disjuntor, onde as etapas e as transições podem ser assim descritas:

$DM_{desligado}$: representa o disparador magnético desativado, ou seja, o disjuntor está ligado e não há corrente suficiente circulando pelo disjuntor que provoque o disparo do mesmo. Nesta situação a etapa $DM_{disparo}$ é falsa.

DM_{ativo} : etapa transitória que representa a condição em que o disparador magnético já foi ativado pois a corrente de disparo foi atingida mas as inércias do mecanismo ainda não foram vencidas e os contatos ainda se apresentam fechados. Este tempo de disparo é de muito difícil medição e será usada neste modelo a simulação realizada no software Working Model 2D (veja item 3.6). Nesta situação a etapa $DM_{disparado}$ também é falsa.

$DM_{disparado}$: É a etapa em que o disjuntor sofreu disparo magnético e o mecanismo de disparo já atuou sobre os contatos forçando sua abertura, ou no caso destes já terem sido abertos por um processo de levitação, por exemplo, nesta condição os contatos permaneceriam abertos. Nesta situação a etapa $DM_{disparado}$ é verdadeira.

$i > I_{mag}$: é a condição para que haja transição entre as etapas $DM_{desligado}$ e DM_{ativo} , ou seja, é o gatilho que permite o início da contagem de tempo da etapa DM_{ativo} .

$\Delta t > t_{RDM}$: é a condição para haver a consolidação do disparo magnético, ou seja, representa a passagem de tempo necessária para que o disparador magnético efetivamente abra os contatos ou garanta a sua permanência na posição aberta.

Outros parâmetros e variáveis do modelo do minidisjuntor, dos quais alguns aparecem na Figura 3-20 são apresentados a seguir:

I_{levit} : Parâmetro do disjuntor: Corrente limiar da levitação dos contatos no disjuntor. Obtida por medição, para o exemplo de disjuntor em estudo está em torno de 300 A.

$Compr_{eq}$: Variável de cálculo. Comprimento equivalente do arco elétrico.

$Compr_{IA}$: Parâmetro do disjuntor: Comprimento do arco elétrico quando há a transição entre as etapas “IA” e “PA”. Este parâmetro é de muito difícil medição. Deve ser ajustado no modelo quando comparado com as medições.

U_{arco} : Parâmetro do disjuntor. Tensão da câmara de extinção: para o disjuntor em estudo, que apresenta 3 ou 5 pequenos arcos elétricos em série, representa a tensão anodo-catodo dessas chapas, ou seja de 18 a 30 V por arco (veja item 2.5.4) ou 54 a 150 V no total e deve ser ajustado para o modelo conforme as medições.

I_{ext} : Parâmetro de cálculo. Estabelecido normalmente como um valor baixo, em torno de 1 a 10 A, é necessário para estabilidade no cálculo do programa. É a corrente considerada mínima para que haja a extinção do arco. Apesar de ser conhecido na física que a extinção ocorre como um processo contínuo este valor é estabelecido para estabilizar o cálculo na transição entre as etapas IA, PA e AC para AE. Um valor muito menor que a corrente de curto-circuito deve ser

atribuído, o ajuste deste parâmetro não influencia o resultado, apenas pode influenciar a estabilidade matemática do modelo durante o cálculo, em geral nenhum ajuste precisa ser feito e o valor pode ser deixado com um valor fixo em 10A.

R_{disj} : Variável de cálculo. Resistência efetiva do disjuntor quando na etapa AE. Ao ser comparada com o parâmetro $R_{desligado}$, determina a transição para a etapa ABERTO.

$R_{desligado}$: Parâmetro de cálculo: É a resistência de contato após a extinção do arco. Fisicamente este valor é bem grande (da ordem de alguns MOhms), mas para um funcionamento estável da simulação um valor de 1 kOhm é necessário e suficiente para estabilizar o modelo e tem pouca influência no comportamento do mesmo em regime de curto-circuito.

R_{ligado} : É a resistência ôhmica do disjuntor. Pode ser facilmente medida por microohmímetros e abrange toda a resistência por fase do disjuntor. Inclui, portanto as resistências dos terminais, condutores, bobina de disparo magnética, bimetálico, contatos, cordoalha, etc.

$R_{ligadoARCO}$: Algumas concepções de disjuntores apresentam um artifício de se desviar a corrente que flui por algumas partes do circuito para evitar danos nos mesmos. O disjuntor em estudo apresenta para algumas faixas de corrente um desvio do caminho de corrente, que quando está na câmara de extinção não passa mais pelo bimetálico e pela bobina de disparo magnético. Isso reduz drasticamente a resistência global do disjuntor, influenciando na queda de tensão no mesmo e na característica de limitação de corrente. Este artifício pode ser observado em outros minidisjuntores conforme pode ser constatado na patente da referência [11].

I_{mag} : Parâmetro do disjuntor: é a corrente na qual ocorre o disparo do disparador magnético (DM) do disjuntor. Este parâmetro sofre grande variação: para o disjuntor de curva B vale aproximadamente 3,9 vezes a corrente nominal e para o disjuntor de curva C aproximadamente 7,1 vezes a corrente nominal a faixa de tolerância admitida pelas normas é ampla e pode ser observada no item 3.2.

O cálculo do valor médio da corrente de disparo instantânea de um disjuntor pode ser feito tanto pela média aritmética ou mais precisamente pela média geométrica entre os limites “mínimo” e “máximo” de disparo do disjuntor. O modelo deste estudo irá considerar a média geométrica como critério de projeto do disparador. A

equação a seguir mostra o cálculo da média geométrica das correntes de disparo de um disjuntor.

$$I_{mag} = \sqrt{I_{disp.mínima} \cdot I_{disp.máxima}} \quad [A] \quad \text{Equação 3-3}$$

t_{RDM} : parâmetro do disjuntor: é o tempo de resposta do mecanismo de disparo até que o contato se abra calculado para o modelo em estudo como um valor fixo em 1,7 ms (veja item 3.6.2).

I_t : Integral de Joule. Já apresentada anteriormente (vide Figura 1-1), é um resultado de cálculo que representa integral do quadrado da corrente durante o processo de curto-circuito.

Energia: integral da potência que é dissipada no disjuntor durante o processo de curto-circuito. Também é um resultado do cálculo interessante que será discutido no capítulo 5.

3.8 O equacionamento das etapas e transições em um curto-circuito em um disjuntor

O modelamento do curto-circuito neste estudo foi elaborado levando em consideração que o disjuntor quando inserido em um circuito elétrico pode ser caracterizado simplesmente como um componente que apresenta uma tensão que é função da corrente que circula por ele, esta tensão que é apresentada pelo disjuntor em seus terminais no processo de curto-circuito é que vai governar, junto com os demais componentes do circuito em que ele está ligado, o comportamento da corrente de curto-circuito.

$$u_{disjuntor} = f(i_{disjuntor}) \quad [V] \quad \text{Equação 3-4}$$

Cada uma das etapas do fenômeno de curto-circuito mostrada no item anterior possui suas próprias características que serão apresentadas aqui. O equacionamento das etapas diversas do circuito segue principalmente as diretrizes usadas no trabalho de Roschke [28], além de considerações sugeridas por Anheuser [1], Nachtigal [25], Stammberger [36]. Adaptações foram necessárias aos referidos trabalhos, pois os mesmos não foram concebidos para o estudo de minidisjuntores.

3.8.1 Etapa FECHADO “FE” e transições

A etapa inicial do curto-circuito é quando o disjuntor ainda está fechado. É a etapa definida anteriormente como “FE” ou “FECHADO”. Nesta etapa o disjuntor é simplesmente uma carga RL simples e sua equação se resume a

$$u_{\text{disjuntor}} = R_{\text{LIGADO}} \cdot i + L_{\text{LIGADO}} \cdot \frac{di}{dt} \quad \text{[V]} \quad \text{Equação 3-5}$$

A Figura 3-21 representa o circuito do disjuntor (quadro em azul) ligado à rede e à carga, na etapa “Fechado” FE.

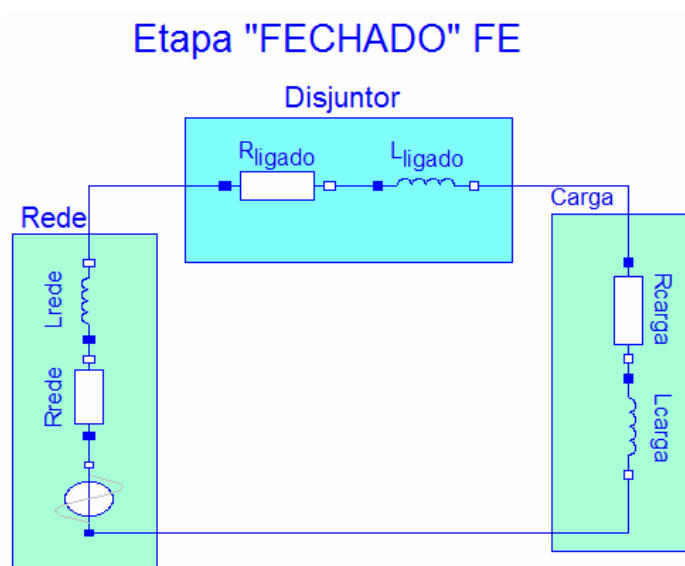


Figura 3-21 - Circuito do disjuntor na etapa "Fechado" FE

As indutâncias de um disjuntor são frequentemente muito pequenas e podem ser desprezadas sem perda de qualidade do modelo. No intuito de tornar o modelo mais genérico quanto possível, as indutâncias foram consideradas.

As transições desta etapa serão apresentadas nas etapas ignição do arco “IA” e aberto “AB”, que têm conexão direta com ela.

3.8.2 Etapa de IGNIÇÃO DE ARCO “IA” e transições

Esta etapa ocorre imediatamente quando os contatos se abrem e perdura enquanto o arco permanece em uma região próxima à pastilha de contato. No modelamento computacional aqui proposto esta etapa perdura até que o arco tenha o comprimento

equivalente a um valor estimado na simulação. No modelo este comprimento de arco ($Compr_{IA}$) foi estimado com valores de 1 a 5 milímetros, e deve ser ajustado para cada tipo de disjuntor. A característica do material da pastilha de contato tem uma forte influência no comportamento deste parâmetro [22].

Os eventos que podem promover a transição para essa etapa são o tempo do disparo magnético ter decorrido ($\Delta t > t_{RDM}$ logo $DM_{disparado}$ é verdadeiro) ou a corrente de levitação dos contatos tenha sido excedida. Ainda pode ocorrer um retorno a esta etapa da etapa seguinte "PA" se houver uma redução no comprimento do arco de forma que este se situe novamente na região da pastilha de contato (ou menor que $Compr_{IA}$).

O circuito do disjuntor nesta etapa é apresentado no quadro azul na Figura 3-22.

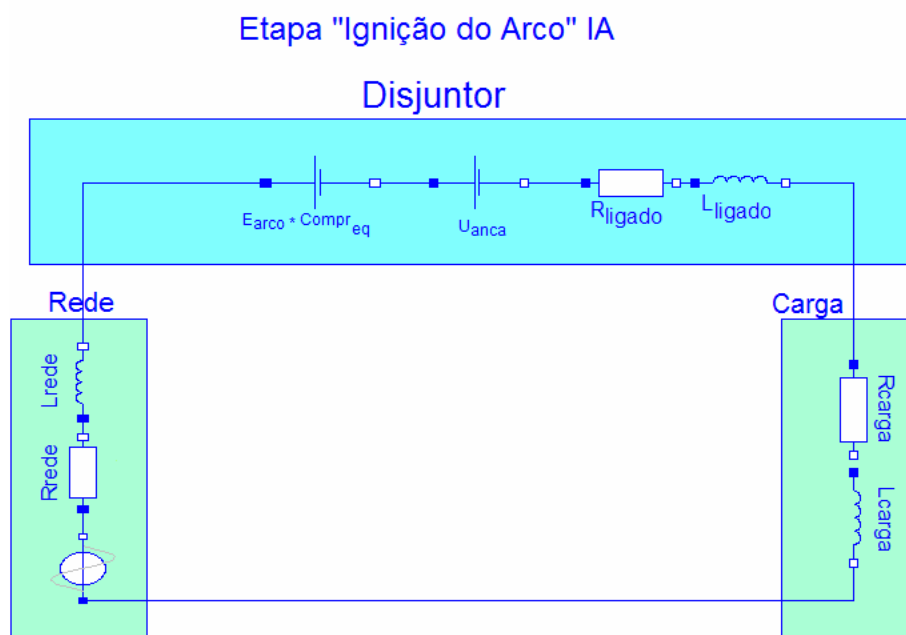


Figura 3-22 - Circuito do disjuntor na etapa de "ignição do arco" IA

O equacionamento da tensão sobre o disjuntor nesta etapa é o seguinte:

$$u_{disjuntor} = E_{ARCO} * Compr_{eq} + U_{anca} + R_{LIGADO} \cdot i + L_{LIGADO} \cdot \frac{di}{dt} \quad [V] \quad \text{Equação 3-6}$$

Onde:

E_{ARCO} : É o campo elétrico no arco, que é um parâmetro de entrada no modelo e pode ser estimado entre 8000 a 12000 V/m (valor já conhecido como normal em arcos elétricos) [35].

U_{anca} : Tensão de anodo-catodo. Valor fixo de 15 a 35 V. Também um parâmetro a ser arbitrado no modelo entre estes limites em função das medições.

$Compr_{eq}$: Comprimento do arco elétrico. Nesta etapa e na etapa PA a seguir pode ser equacionado conforme as equações seguintes.

Se o disparador magnético ainda não atuou, a velocidade de crescimento de $Compr_{eq}$ é:

$$\frac{dCompr_{eq}}{dt} = ConstA \cdot [|i| - I_{levit}] \quad [V] \quad \text{Equação 3-7}$$

Por outro lado, se o disparador magnético já atuou a força da mola de abertura dos contatos vence a I_{levit} e seu efeito aditivo deve ser levado em consideração.

$$\frac{dCompr_{eq}}{dt} = ConstA \cdot [|i| + I_{eqmec}] \quad [V] \quad \text{Equação 3-8}$$

Cabe agora uma breve explicação do significado da $ConstA$ introduzida aqui. Esta constante é um parâmetro que depende da geometria de cada disjuntor e é proporcional à velocidade com que o arco elétrico cresce no disjuntor. Uma análise dimensional das equações acima traz a dimensão [(m/s) / A] que permite com facilidade interpretar que um aumento desta constante torna maior a velocidade de crescimento do arco para uma mesma corrente e vice-versa.

O parâmetro I_{eqmec} entra como simulação do efeito de aceleração do crescimento do arco em função da força exercida pela mola de abertura dos contatos. Também é um parâmetro que depende da geometria e da concepção de cada disjuntor e deve ser ajustado para cada modelo.

Os fenômenos que podem provocar transições nesta etapa e que podem levar o disjuntor para outra etapa são os seguintes:

$Compr_{eq} > Compr_{IA}$: o arco elétrico atingiu o comprimento crítico estabelecido ($Compr_{IA}$) de transição para a próxima etapa natural que é o prolongamento do arco ou etapa “PA”.

$DM_{disparado} = \text{falso}$ e $Compr_{eq} < 0$: quando o disparo magnético não se efetivou e o arco elétrico tem prolongamento nulo há o fechamento do disjuntor e ele reassume a etapa “FECHADO”

$|i| < I_{ext}$: quando a corrente circulando pelo disjuntor é tão baixa quanto a corrente considerada suficiente para que ocorra a extinção do arco ocorre a transição direta para a etapa “EA” (Extinção do Arco).

3.8.3 Etapa de PROLONGAMENTO DO ARCO “PA” e transições

Esta etapa ocorre invariavelmente após a etapa de ignição do arco “IA” e a variável que determina a transição para essa etapa é o comprimento equivalente do arco ($Compr_{eq}$), que deve ultrapassar o parâmetro $Compr_{IA}$ previamente descrito.

Esta etapa se diferencia da anterior pela componente de subida da tensão de ordem quadrática governada pelo parâmetro $Const_B$ e pela variação também quadrática da resistência determinada pelo parâmetro $dRadt$.

A Figura 3-23 representa o circuito do disjuntor (quadro em azul) ligado à rede e à carga na etapa em discussão.

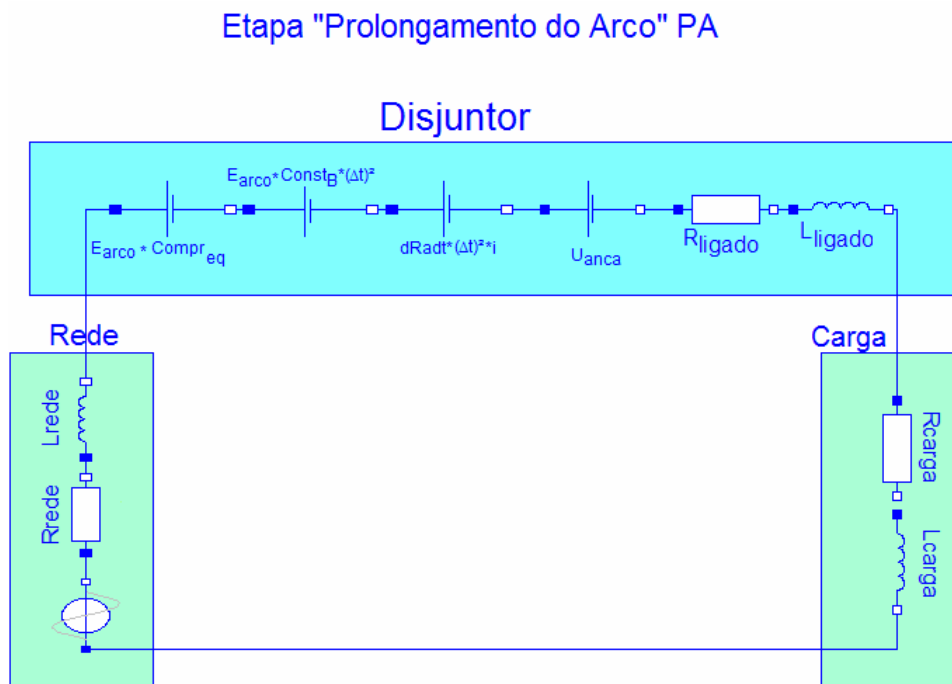


Figura 3-23 - Circuito do disjuntor na etapa de "prolongamento do arco" PA

O equacionamento da tensão sobre o disjuntor nesta etapa é o seguinte:

$$u_{disjuntor} = E_{ARCO} * Compr_{eq} + E_{ARCO} * Const_B * (\Delta t)^2 + U_{anca} + R_{LIGADO} \cdot i + L_{LIGADO} \cdot \frac{di}{dt} + dRadt * (\Delta t)^2 * i$$

[V] Equação 3-9

As variáveis e parâmetros aqui apresentados são os mesmos da etapa anterior exceto por $Const_B$ e $dRad_t$ que são os parâmetros que modelam o comportamento quadrático da subida da tensão de arco nesta etapa. Enquanto o parâmetro $Const_B$ simula o crescimento quadrático da tensão de arco devido ao aumento do campo elétrico, o parâmetro $dRad_t$ modela uma variação quadrática na resistência do arco elétrico. A variável Δt representa o intervalo de tempo decorrido dentro da etapa em processo.

Esta etapa pode sofrer três tipos de transições que façam o disjuntor mudar de etapa. Os fenômenos que podem provocar transições nesta etapa e que podem levar o disjuntor para outra etapa são os seguintes:

$DM_{disparado} = \text{falso}$ e $Compr_{eq} < Compr_{IA}$: situação já brevemente comentada no item anterior. Representa a condição em que o processo de disparo e abertura dos contatos através do acionamento pelo disparador magnético não ocorreu ou ainda não finalizou, dessa maneira a redução do comprimento do arco pela redução da distância entre os contatos se torna possível. A condição $Compr_{eq} < Compr_{IA}$ representa a transição entre os equacionamentos nas duas etapas. Se estas condições são satisfeitas o disjuntor retorna à etapa IA.

$i < I_{ext}$: condição em que a corrente instantânea que circula no disjuntor é suficientemente pequena para que haja a extinção do arco. Neste caso ocorre a transição para a etapa “extinção do arco” EA.

$u_{disjuntor} > U_{ARCO}$: esta é transição mais importante e mais freqüente nesta etapa. Representa o evento em que a tensão no arco cresceu o suficiente através do prolongamento ou resfriamento, de forma a poder se estabelecer o arco elétrico entre as chapas da câmara de extinção, ou seja, foi vencida a barreira de potencial para que o arco se estabeleça na câmara. Esta transição leva o disjuntor à etapa “arco na câmara” AC.

3.8.4 Etapa do ARCO NA CÂMARA “AC” e transições

Esta etapa representa talvez o fenômeno mais importante que ocorre em um processo de limitação de corrente e interrupção de um circuito por um disjuntor. O único processo que pode ocorrer antes desta etapa é o prolongamento do arco “PA” descrito no item anterior, onde está descrito também o processo de transição.

A Figura 3-24 representa o circuito do disjuntor (quadro em azul) ligado à rede e à carga na etapa em discussão.

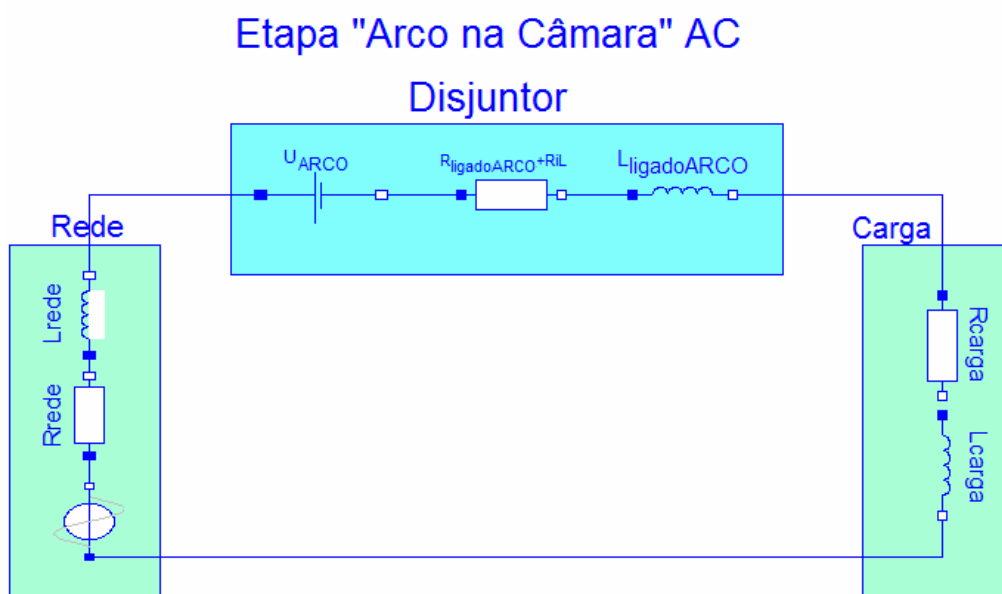


Figura 3-24 - Circuito do disjuntor na etapa "Arco na Câmara" AC

O equacionamento da tensão sobre o disjuntor nesta etapa é o seguinte:

$$u_{\text{disjuntor}} = U_{\text{ARCO}} + (R_{\text{ligadoARCO}} + RiL)i + L_{\text{ligadoARCO}} \cdot \frac{di}{dt} \quad [\text{V}] \quad \text{Equação 3-10}$$

Novos parâmetros foram introduzidos aqui e são descritos a seguir:

$R_{\text{ligadoARCO}}$: é a resistência ôhmica do disjuntor quando a corrente está circulando pela câmara de extinção, ou seja, quando a etapa AC está em processo. Este parâmetro representa a mudança do caminho de corrente que algumas versões do disjuntor MBW apresentam em seu projeto com o provável objetivo de reduzir os danos causados pela corrente de curto circuito no elemento de disparo térmico (bimetal e resistência de aquecimento).

A foto da Figura 3-2 (vide página 30) apresenta este desvio do caminho de corrente que pode ser visualizado como uma cordoalha não isolada ligando a armadura do disparador magnético a uma das chapas da câmara de extinção.

Os motivos que levaram os projetistas a realizar tal conexão não são totalmente claros, e esta informação não é acessível, mas a probabilidade é grande que seja para realmente minimizar os danos provocados pela corrente de curto-circuito aos elementos responsáveis pelo disparo térmico na ocasião de um curto-circuito.

Essa conexão é observada no disjuntor de 2A e não no disjuntor de 16A. Esta característica reforça a suposição de que a conexão foi feita para preservar a integridade

do sistema de disparo térmico, pois esta é muito mais frágil no disjuntor de menor corrente, pois por necessidade de projeto, tem resistência muito maior e, portanto sofre maior aquecimento quando submetida à corrente de curto-circuito.

Durante os ensaios realizados em laboratório foi observado que os disjuntores de 2A necessitavam de tempos de resfriamento muito maiores que os de 16A, mesmo tendo o desvio da corrente implementado. É de se supor que se a corrente fluísse durante todo o processo de curto-circuito, provavelmente haveria algum dano aos elementos do disparador térmico.

Em disjuntores em que não se evidencie este desvio, ao valor do parâmetro $R_{\text{ligadoARCO}}$ deve ser simplesmente atribuído o mesmo de R_{LIGADO} .

$L_{\text{ligadoARCO}}$: é a indutância do disjuntor quando a corrente está circulando pela câmara de extinção, ou seja, quando a etapa AC está em processo. De maneira semelhante à da resistência acima descrita, há uma variação na indutância do disjuntor quando este apresenta o desvio acima descrito. Novamente cabe a observação da pequena contribuição da indutância do disjuntor no modelo: se a informação estiver disponível, deve ser introduzida, mas não deve produzir efeitos perceptíveis no resultado.

Novamente, em disjuntores em que não se evidencie este desvio, ao valor do parâmetro $L_{\text{ligadoARCO}}$ deve ser simplesmente atribuído o mesmo de L_{LIGADO} .

R_{iL} : dado pela equação a seguir, representa o aumento da resistência durante o processo de extinção do arco na câmara. É governado pela mesma constante $dRad_t$ já apresentada na etapa “PA” e representa principalmente o efeito do resfriamento do arco dentro da câmara de extinção.

$$R_{iL} = dRad_t * \Delta t^2 \quad [V] \quad \text{Equação 3-11}$$

Esta etapa pode sofrer apenas um tipo de transição de saída. O fenômeno que pode provocar essa transição é o seguinte:

$i < I_{\text{ext}}$: a corrente que circula no disjuntor é menor que a corrente necessária para a extinção do arco (I_{ext}). Neste caso o disjuntor muda de etapa para a etapa extinção do arco “EA”.

3.8.5 Etapa de EXTINÇÃO DO ARCO “EA” e transições

Várias são as etapas que podem trazer o modelo do disjuntor à etapa de extinção do arco “EA”. Estas transições já foram apresentadas anteriormente nas descrições das etapas

ignição do arco “IA”, prolongamento do arco “PA” e arco na câmara “AC” e não se faz necessária a reapresentação das mesmas aqui.

A Figura 3-25 representa o circuito do disjuntor ligado à rede e à carga nesta etapa.

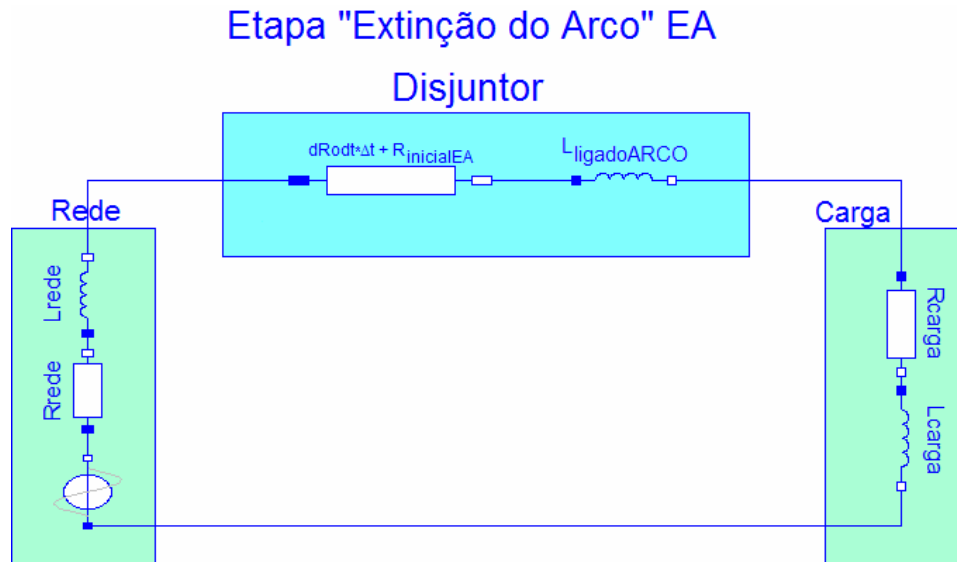


Figura 3-25 - Circuito do disjuntor na etapa "Extinção do Arco" EA

O equacionamento da tensão no disjuntor nesta etapa é o seguinte:

$$u_{disjuntor} = (dR_{odt} * \Delta t + R_{inicialEA})i + L_{ligadoARCO} \cdot \frac{di}{dt} \quad [V] \quad \text{Equação 3-12}$$

Uma variável nova e um novo parâmetro devem ser apresentados:

dR_{odt} : parâmetro que governa a taxa de variação da resistência do modelo quando ocorre a transição da etapa de extinção do arco “EA” para a etapa aberto “AB” seu valor não altera de forma significativa o comportamento da simulação, valores muito altos podem provocar uma transição muito rápida entre um passo e outro da simulação produzindo um ruído indesejável nos resultados da simulação. Um valor de 200 kOhm/segundo mostrou ser eficiente na maioria das simulações. Novamente, o termo Δt representa o intervalo de tempo decorrido nesta etapa.

Esta etapa pode sofrer apenas um tipo de transição de saída. O fenômeno que pode provocar essa transição é o seguinte:

$R_{disjuntor} > R_{aberto}$: Quando resistência instantânea do disjuntor, calculada pela equação a seguir, é maior que o parâmetro resistência em aberto. Na ocorrência deste evento há a transição para a etapa aberto “AB”

$$R_{disjuntor} = (dRodt * \Delta t + R_{inicialEA}) \quad [V] \quad \text{Equação 3-13}$$

Onde $R_{inicialEA}$, já presente também na equação anterior, é o valor da resistência no início da etapa extinção de arco "EA". Este valor de resistência é determinado pelo quociente da tensão e da corrente sobre o disjuntor no instante imediatamente anterior à transição para a etapa extinção de arco "EA".

3.8.6 Etapa ABERTO "AB" e transições

Esta é a última etapa do processo de interrupção do curto-circuito, sua transição sempre ocorre da etapa extinção do arco "EA" e já foi devidamente explanada anteriormente. Seu equacionamento é simplesmente representado pela tensão que surge nos terminais em aberto devido à queda de tensão na resistência do disjuntor desligado.

A Figura 3-26 e a equação a seguir representam esta etapa.

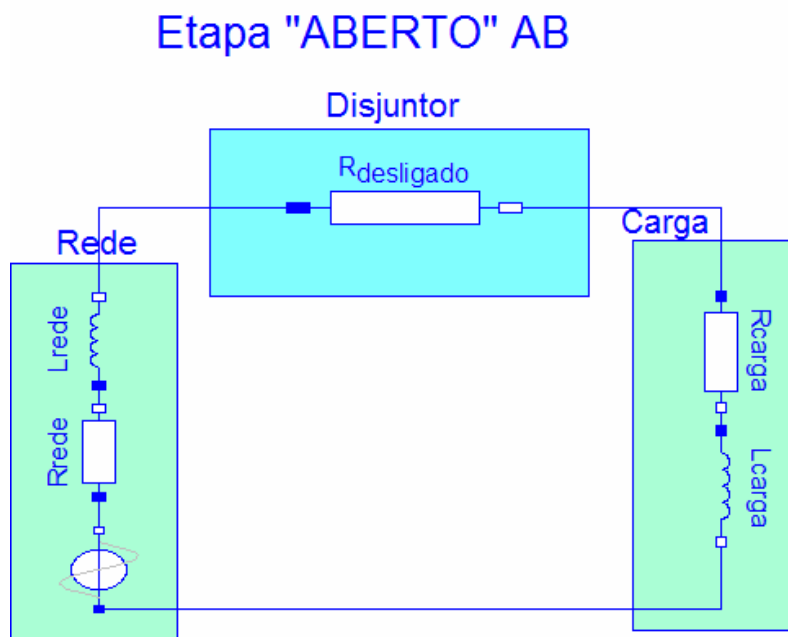


Figura 3-26 - Circuito do disjuntor na etapa "Aberto" AB

$$u_{disjuntor} = R_{desligado} . i \quad [V] \quad \text{Equação 3-14}$$

A única transição de saída desta etapa que seria possível é a reignição do arco por alguma falha imprevisível de isolamento ou o fechamento falho dos contatos por alguma falha no mecanismo de disparo. Estes eventos não fazem parte deste modelo.

3.9 Etapas e transições do Disparador Magnético

O disparador magnético no modelo do disjuntor possui três etapas que podem ser visualizadas na rede inferior exposta na Figura 3-20, quais sejam:

DM_{desligado}: etapa em que o disparador magnético se encontra desativado, ou seja, não ocorreu o evento de corrente suficiente para disparar o gatilho do mecanismo de disparo. Um sinal vindo de um modelo externo ao modelo do disjuntor foi implementado de forma a se levar em consideração a inércia, forças de mola e atritos do mecanismo do disjuntor.

A transição desta etapa para a seguinte (DM_{ativo}) se dá portanto por dois mecanismos: o primeiro ocorre imediatamente quando a corrente no modelo suplanta o valor do parâmetro I_{mag} ($i > I_{mag}$) o outro evento que pode provocar a transição é o sinal de entrada “Disparo” tornar-se verdadeiro. Este sinal no modelo provém do modelo do disparador executado em separado. Esta parte do disjuntor (disparador) foi modelada em separado para permitir a complementação do modelo em trabalhos futuros, substituindo este disparador, por exemplo, por um disparador térmico, eletrônico ou por um acessório qualquer de disparo.

DM_{ativo}: etapa em que o disparador magnético está em processo de desarme e abertura do contato móvel. Como já apresentado anteriormente no modelamento em Working Model 2D, este intervalo de tempo é constante e neste modelo vale 1,7 ms.

DM_{disparado}: etapa em que o tempo necessário para a abertura dos contatos do disjuntor já decorreu e o mecanismo do disjuntor garante a abertura dos contatos. O efeito deste evento tem diferentes conotações em algumas etapas do modelo do disjuntor. Se o disjuntor estiver na etapa fechado “FE” a ocorrência do sinal DM_{disparado} verdadeiro provoca a transição para a etapa de ignição do arco “IA”. Se o disjuntor estiver em qualquer outra etapa, a influência da variável DM_{disparado} se expressa na diferença no cálculo da velocidade de prolongamento do arco, conforme pode ser constatado nas equações a seguir.

Se a variável DM_{disparado} for falsa:

$$\frac{dCompr}{dt} = Const_A * (|i| - i_{levit}) \quad [m/s] \quad \text{Equação 3-15}$$

O que significa dizer que a velocidade de abertura do arco elétrico é proporcional à diferença entre a corrente instantânea no disjuntor e o parâmetro que representa a corrente de levitação dos contatos. Note-se aqui a possibilidade do valor da velocidade de

prolongamento do arco ser negativo quando a corrente instantânea for menor do que a corrente necessária para levitação dos contatos. Este fenômeno permite a redução do comprimento do arco e até possibilitar, por exemplo, o refechação dos contatos.

Já se a variável $DM_{\text{disparado}}$ for verdadeira:

$$\frac{dCompr}{dt} = Const_A * (|i| + i_{eqmec}) \quad [\text{m/s}] \quad \text{Equação 3-16}$$

A Equação 3-16 evidencia que a velocidade de abertura do arco será sempre positiva, ou seja, haverá sempre um prolongamento do arco, o que leva ao modelo caminhar em direção à abertura do arco elétrico seguindo a seqüência lógica $IA \rightarrow PA \rightarrow AC$, ou seja partir da ignição do arco para o prolongamento do arco e então para o arco na câmara.

3.10 Código fonte do modelo do minidisjuntor em Modelica

O código fonte do modelo do arco elétrico do minidisjuntor MBW se encontra no ANEXO 1 . Este código é baseado no código fonte elaborado por Roschke [28] para simulação do comportamento em curto-circuito de um disjuntor-motor ligado a um contator.

Alterações significativas se fizeram necessárias para compatibilizar o código concebido originalmente para um disjuntor-motor e para atualização para a nova versão do Modelica, uma vez que o código original (em Modelica 1.0) é incompatível com a versão atual da linguagem (Modelica 1.6).

O modelo leva em consideração as etapas apresentadas no item 3.7 além de permitir a interligação ao disparador magnético como bloco em separado (cuja descrição do modelo e código são apresentados no item 3.11).

Ainda pode ser citada como modificação fundamental, a inclusão das indutâncias e a introdução da resistência e da indutância do disjuntor variáveis quando o processo de interrupção se encontra na fase “Arco na Câmara”, sem a qual o modelo jamais representaria fielmente o comportamento que será apresentado no item 4.2.3.

3.11 Modelo do disparador magnético do minidisjuntor MBW

Em busca da melhoria da qualidade do modelo foi necessário implantar uma interface mecânica entre a corrente que circula pelo disjuntor e o sistema de disparo do

disjuntor. Após o comando de disparo ser emitido, o tempo de abertura dos contatos é constante, conforme mostrado na simulação do mecanismo em Working Model 2D (vide item 3.6), no entanto o comando do disparo precisa de um melhor modelamento, levando em consideração, por exemplo, as forças das molas, atritos e inércias do elemento eletromagnético e do gatilho do disjuntor. A Figura 3-27 apresenta o modelo do disparador do disjuntor MBW conforme modelado no software Dymola/Modelica.

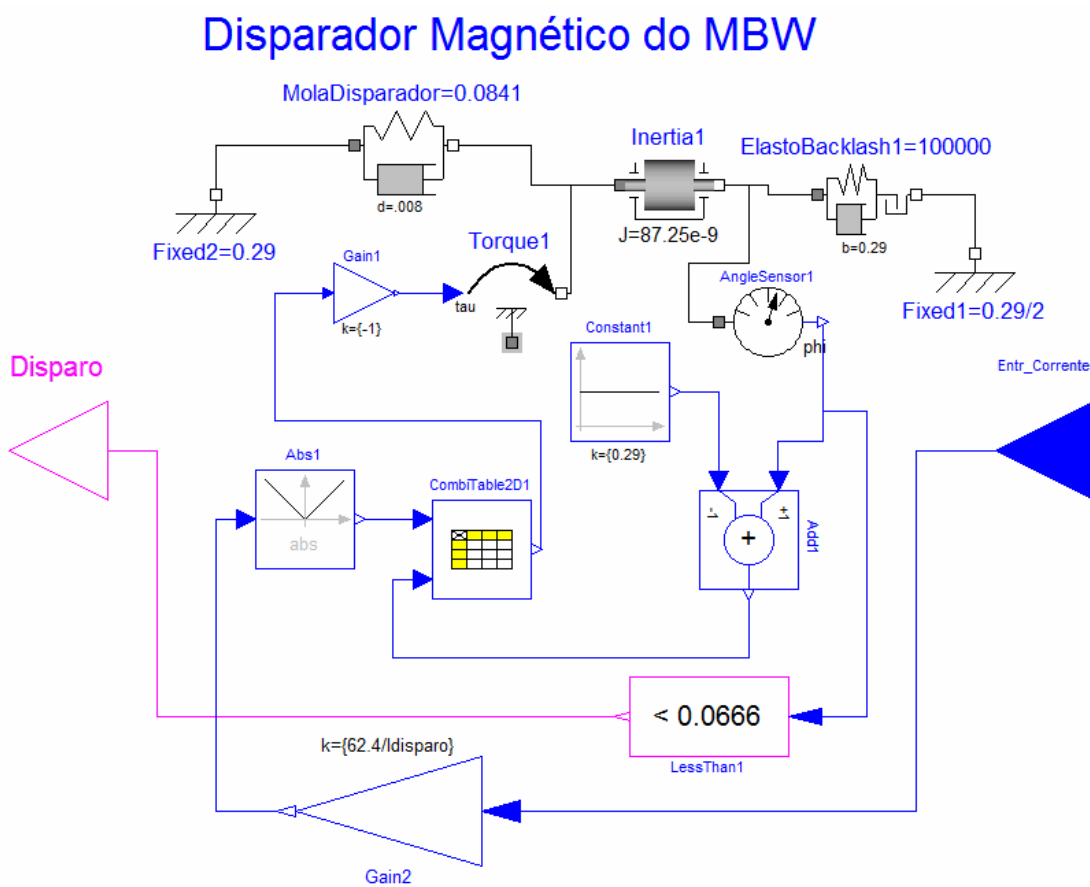


Figura 3-27 – Modelo gráfico do disparador magnético do disjuntor MBW modelado em Modelica

Os parâmetros deste modelo, como por exemplo, o ganho do objeto “Gain2” acima, devem então ser ajustados para que o disparador atenda os requisitos de norma e de projeto, ou seja, o disparo deve ser centrado na corrente de disparo (I_{mag}) do disjuntor e não deve haver disparo com corrente de $0,8 \times I_{mag}$ e o disparo deve ser em tempo menor que 200ms quando uma corrente de $1,2 \times I_{mag}$ circula pelo disjuntor.

O modelo da Figura 3-28 mostra o circuito utilizado para ajuste dos parâmetros do disparador magnético.

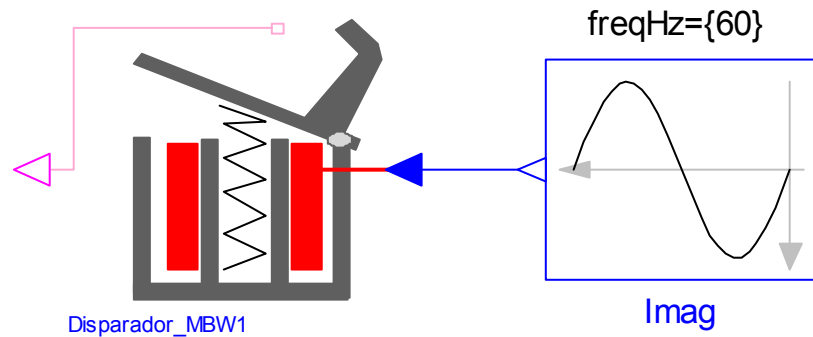


Figura 3-28 - Modelo de ajuste dos parâmetros do disparador magnético do minidisjuntor MBW

Variações na corrente de entrada trazem aos resultados do disparo no disparador do disjuntor MBW. Na Figura 3-29 é mostrado o comportamento do modelo do disparador do minidisjuntor MBW quando submetido a uma corrente equivalente a 110% da corrente de disparo magnético (I_{mag}). A resposta em torno de 100 ms é a ideal para o comportamento dinâmico adequado do disjuntor em um processo de curto-circuito.

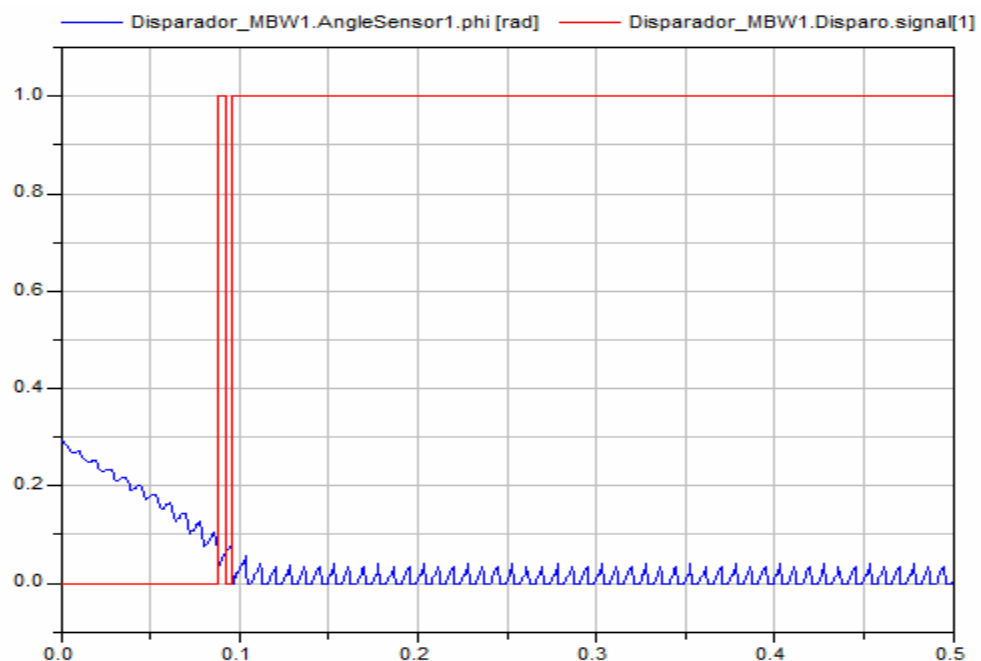


Figura 3-29 - Resultado da simulação do disparador com 110% I_{mag}

Os gráficos da Figura 3-30 e da Figura 3-31 apresentam o torque no disparador magnético do disjuntor MBW de 16 A curva B em função do entreferro e da corrente.

Medições de força com corrente de excitação de até 100 A em corrente contínua foram realizadas em um disjuntor MBW de 2 A curva C e extrapoladas para o disjuntor MBW de 16 A curva B, o que equivale a 525 A no disjuntor de 16 A devido à relação no número de espiras (21 espiras no disjuntor de 2A e 4 espiras no disjuntor de 16A). Valores de torque com correntes acima não podem ser medidos pois provocam a queima da bobina do disparador magnético. Estes pontos de corrente acima foram estimados através de cálculo por elementos finitos (ANSYS/EMAG).

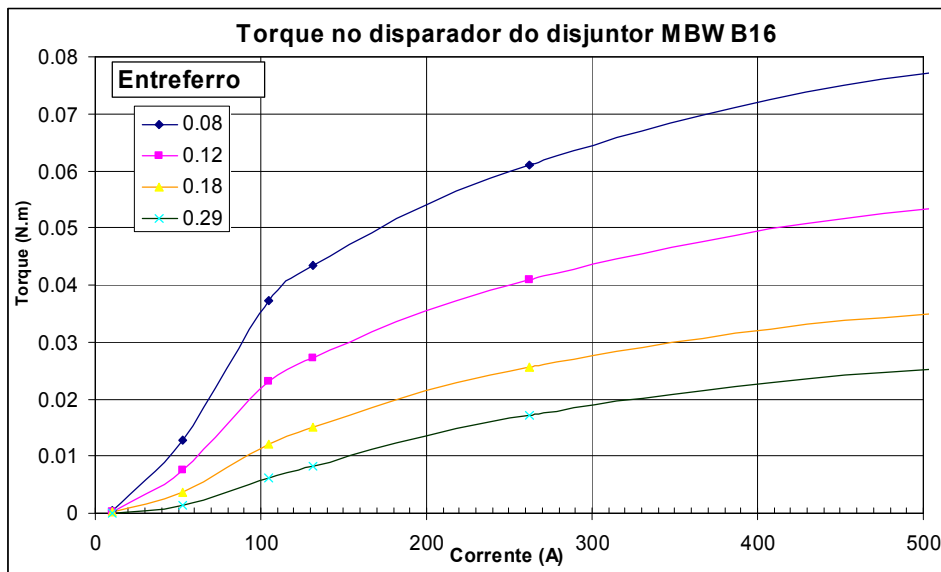


Figura 3-30 - Torque do disparador magnético (detalhe até 500A)

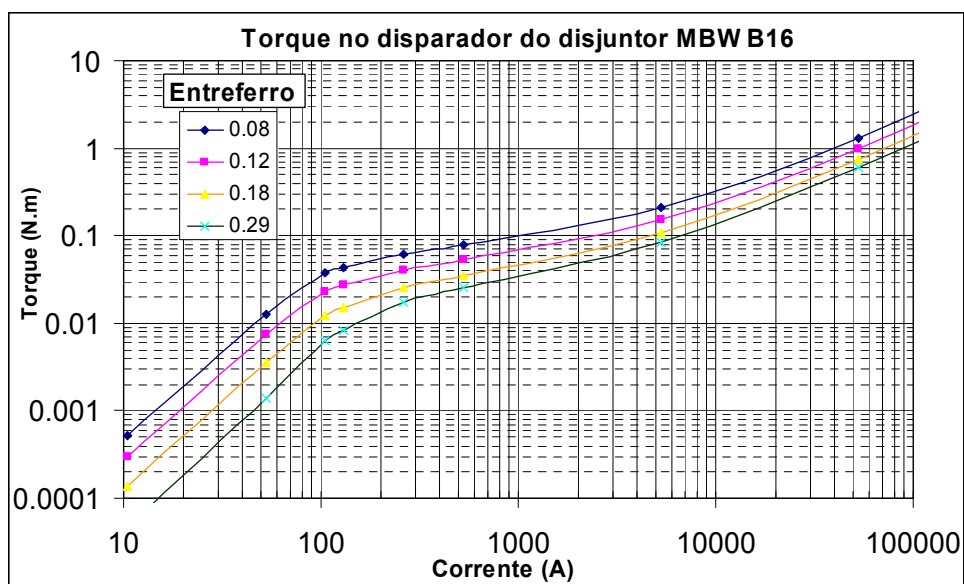


Figura 3-31 - Torque do disparador magnético (até 100 kA)

O entreferro referenciado nos gráficos da Figura 3-30 e da Figura 3-31 representa o ângulo de abertura do disparador. O valor de 0,29 radianos (aproximadamente 16°) representa a abertura máxima do entreferro que é limitada pela carcaça do disjuntor e o valor 0,08 radianos (aproximadamente $4,5^\circ$), representa uma posição em que o entreferro se apresenta próximo de sua posição fechada. A representação esquemática do disparador na Figura 3-28 e o item 2 na foto do disjuntor representada na Figura 3-2 auxiliam na interpretação do funcionamento e geometria do disparador.

Apenas a título ilustrativo as figuras a seguir (Figura 3-32, Figura 3-33) apresentam o modelo do disparador implementado no ANSYS/EMAG. O modelo representa a metade do disparador (para simplificação do cálculo) e as figuras representam a situação em que o disparador está aberto (máximo entreferro), e quando está submetido à força magnetomotriz de 2100 ampere-espiras.

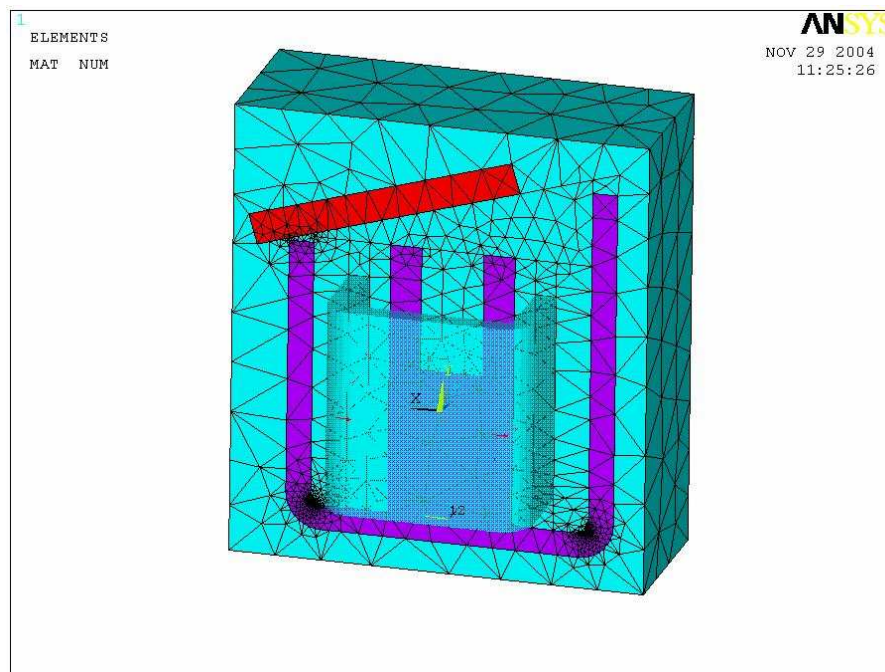


Figura 3-32 - Malha de elementos finitos do disparador magnético do disjuntor MBW

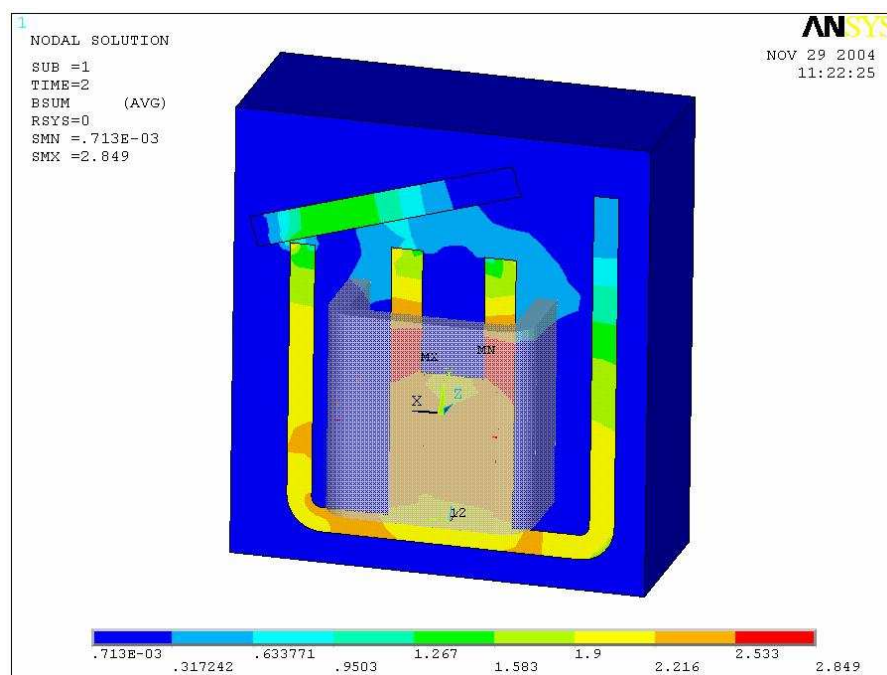


Figura 3-33 - Representação gráfica da indução calculada no modelo da figura anterior

4 Resultados das simulações e ajustes dos parâmetros do modelo

Neste capítulo serão apresentados os resultados das simulações executadas no modelo em estudo comparadas com resultados de medições.

O laboratório utilizado para execução dos ensaios está em fase de implantação e, estes ensaios são os primeiros ensaios de curto-circuito realizados neste laboratório.

Atualmente a capacidade de curto-circuito deste laboratório não é exatamente conhecida, principalmente em função das atuações das proteções em média tensão. O valor estimado da capacidade de curto-circuito do laboratório é de 7,5 kA. Os ensaios para análise do modelo, por segurança, e pelo próprio fato de esta ser a capacidade de interrupção do disjuntor, serão conduzidos em, no máximo 3kA.

Os ensaios vão permitir o ajuste dos parâmetros do disjuntor na condição de curto-circuito. Ensaios foram executados em 1kA e 3kA, com carga altamente indutiva e resistiva respectivamente, de forma a submeter o modelo a ajuste em situações claramente diversas e obter assim uma melhor qualidade na determinação dos parâmetros do modelo.

4.1 *Calibração do modelo da rede e carga em função dos circuitos de ensaio*

O modelo do disjuntor, citado no capítulo anterior, deve ser introduzido em um circuito global em que se verifique o fenômeno de curto-circuito para que se possa dessa forma avaliar sua validade para curto-circuito.

Antes de introduzir um disjuntor no circuito, faz-se necessário executar a calibração do circuito (rede e carga) para que se conheça a real condição à qual o disjuntor está submetido.

Os ensaios foram ajustados de maneira a fazer ensaios em 1 kA e fator de potência 0,3 e 3 kA com fator de potência 0,93. O valor de corrente de 3 kA e fator de potência entre 0,9 e 1,0 é indicado pela norma IEC60898[16] e sua equivalente brasileira ABNT NBR NM 60898[3]. Já o valor de 1kA e fator de potencia 0,3 foi arbitrado para que se possa validar o modelo em uma condição de ensaio em que tanto a intensidade da corrente como o fator de potência tenham valores claramente distintos. Ensaios em outras

condições de curto-circuito certamente não são necessários, pois estas duas condições cobrem a demanda das normas aplicáveis com folga, pois as normas não exigem ensaios com fatores de potência diferentes de 0,9, como feito neste trabalho.

A seguir (Figura 4-1) é apresentado o modelo em Modelica do circuito de ajuste para o curto-circuito em 1kA e fator de potência 0,3.

Ensaio de calibração - 1 kA / $\cos \phi = 0,30$

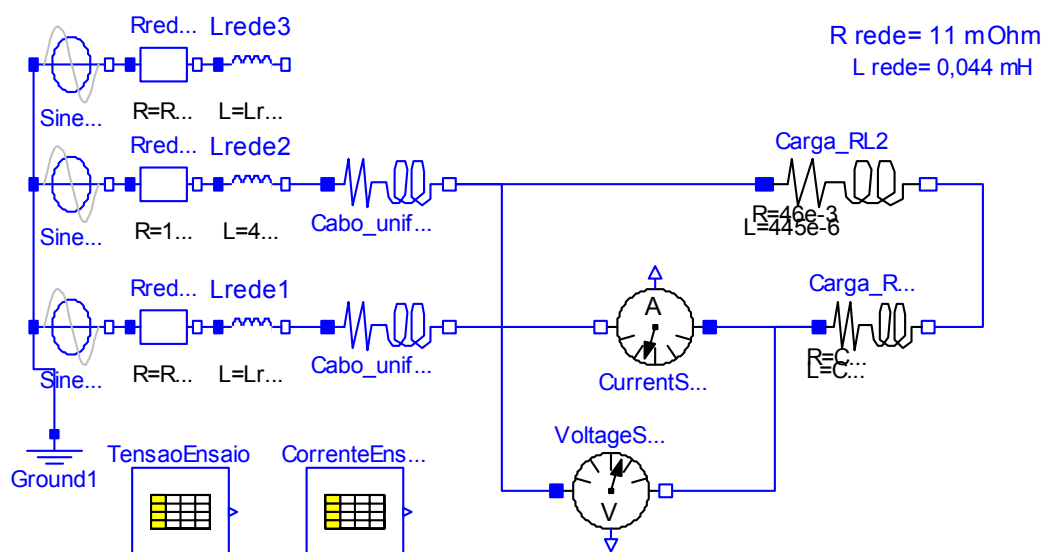


Figura 4-1 - Modelo do circuito de calibração - 1kA e f.p. 0,3

Apesar de o circuito mostrar uma fonte trifásica, a conexão usada para o circuito é a monofásica, pois apenas as fases 1 e 2 estão conectadas ao circuito. Os elementos deste modelo são, na maioria, partes integrantes da biblioteca do software, exceto os elementos “Cabo_unifilar” e “CargaRL” concebidos principalmente para simplificar a visualização do modelo.

O componente “CargaRL” nada mais é do que um resistor ligado em série com um indutor. Seus parâmetros de entrada são a Resistência e a Indutância. A seguir pode ser visualizado o seu código.

```

model Carga_RL "Resistencia e Indutancia de cabo unifilar"
  parameter Real R=1 "Resistência (Ohm)";
  parameter Real L=1 "Indutância (Henry)";
  extends Modelica.Electrical.Analog.Interfaces.OnePort;
  equation

```

```
L*der(i)+R*i = v;
end Carga_RL;
```

Já o componente “Cabo_unifilar” é mais elaborado, pois permite a simulação de qualquer cabo diretamente no modelo, pois não exige do usuário que este entre com os valores de resistência e indutância do cabo, permitindo a entrada de parâmetros de fácil obtenção, como a resistividade do material condutor (ρ_0), a área da seção transversal (Sec), o comprimento (comp) do cabo e a distância média (dist) entre cabos adjacentes. O componente é válido para cabos de seção transversal circular e nos quais a distância entre cabos adjacentes seja muito maior que o raio do condutor. Além da determinação da resistência e indutância do cabo, este modelo também fornece a informação da elevação de temperatura estimada no cabo, se for considerado como parte de um sistema adiabático, usando a formulação apresentada no item 2.5.1. O quadro a seguir apresenta o código-fonte deste elemento.

```
model Cabo_unifilar "Resistencia e Indutancia de cabo unifilar"

parameter Real ro=0.0172 "Resistividade do material (Ohm.mm²/m)";
parameter Real Sec=2.5 "Seção do cabo (mm²)";
parameter Real comp=1 "comprimento do cabo (m)";
parameter Real dist=0.3 "distancia até o cabo adjacente (m)";
parameter Real kappa=6e-3
  "Constante de aquecimento adiabático do cabo [K.mm⁴/(A²s)"];

Real R(start=1);
Real L(start=1);
Real DeltaT(start=0);
algorithm
  R := ro*comp/Sec;

// Cálculo de indutância de dois cabos paralelos fonte: Hayt/Eletromagnetismo pag. 338

  L := 0.0000004*Modelica.Math.log(dist/((Sec^0.5)/Modelica.Constants.pi/1000))*comp;
equation

// Cálculo da elevação de temperatura do cabo
// fonte: SCHUELLER, Pierre. Cahier technique no. 163 - LV breaking by current limitation.
```

```
der(DeltaT)=kappa/Sec^2*i^2;  
  
// queda de tensão no cabo  
v = R*i+L*der(i);  
  
end Cabo_unifilar;
```

Para se fazer o ajuste do circuito do modelo em estudo é necessário calibrar as impedâncias da rede e da carga do modelo até que os valores medidos no ensaio coincidam satisfatoriamente com os resultados da simulação.

Os gráficos da Figura 4-2 mostram os resultados da calibração do circuito de 1kA e f.p.=0,3. Observa-se nesta figura o perfeito ajuste da simulação à condição medida.

Os ajustes no circuito permitiram chegar aos valores dos parâmetros do circuito:

Rrede= 11 mOhm

Lrede= 44 microHenry

Rcarga= 46 mOhm

Lcarga= 445 microHenry

Tensão senoidal= 222 V (tensão eficaz de fase – conhecida por medição da tensão a vazio na ocasião do ensaio)

Estes parâmetros não devem ser mudados quando se fizer a comparação dos ensaios com o disjuntor e seus resultados da simulação nessa condição de carga.

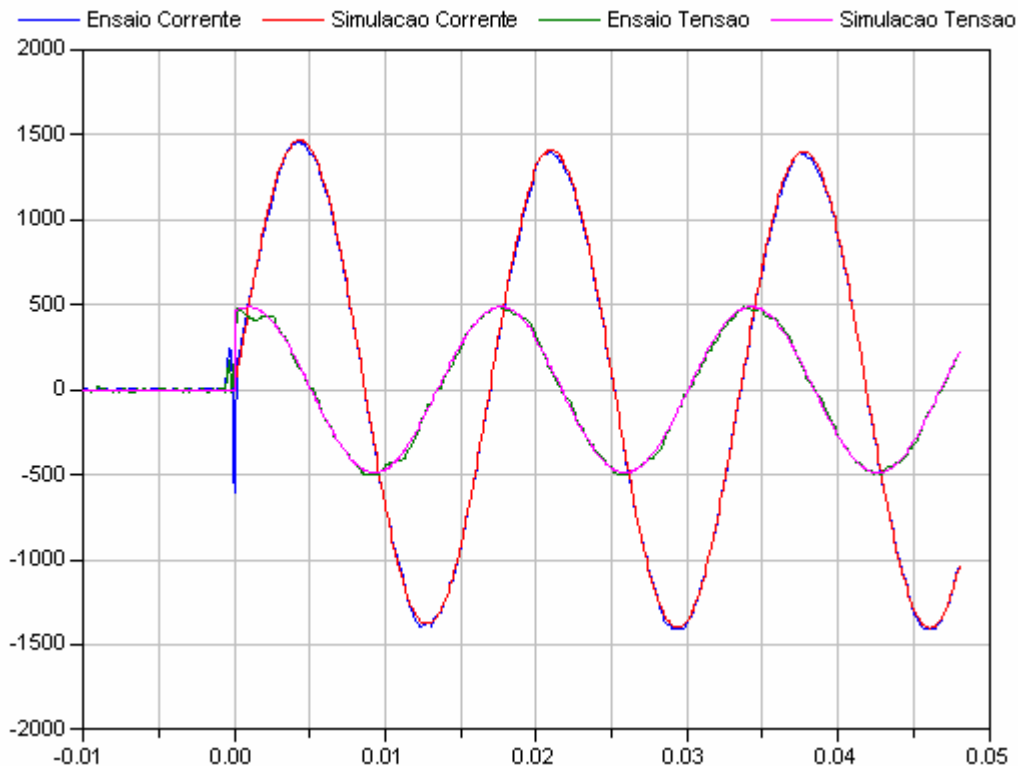


Figura 4-2- Medição e resultado da simulação da calibração 1kA/f.p.0,3

O mesmo procedimento deve ser realizado para o circuito em 3kA e f.p. 0,93. Nesta nova condição, os parâmetros de resistência e indutância da rede não podem e não devem ser alterados, pois o circuito nesta parte não sofreu alteração.

A Figura 4-3 apresenta o circuito da calibração para 3kA e f.p. 0,93. Observa-se a utilização de dois cabos em paralelo na conexão do curto circuito, que nada mais é do que se fez durante o ensaio (foram conectados 2 cabos em paralelo de 35 mm²).

Os gráficos da Figura 4-4 mostram os resultados da calibração do circuito de 3kA e f.p.=0,93. Observa-se nesta figura o perfeito ajuste da simulação à condição medida, dificultando inclusive a observação dos valores simulados no gráfico devido à superposição pelos valores medidos.

Os ajustes no circuito permitiram chegar aos seguintes valores dos parâmetros do circuito:

Rrede= 11 mOhm (já determinado no ensaio de 1 kA)

Lrede= 44 microHenry (já determinado no ensaio de 1 kA)

Rcarga= 48 mOhm

Lcarga= 18 microHenry

Tensão senoidal= 217 V (tensão eficaz de fase – conhecida por medição da tensão a vazio na ocasião do ensaio)

Ensaio de calibração - 3 kA / $\cos \phi = 0,93$

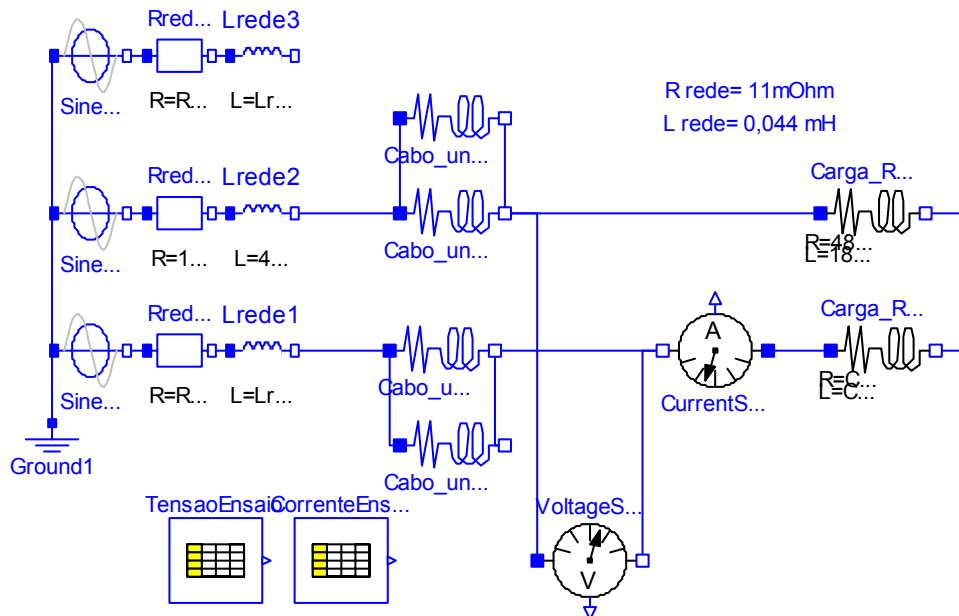


Figura 4-3 - Circuito de calibração do curto circuito de 3kA e f.p. 0,93

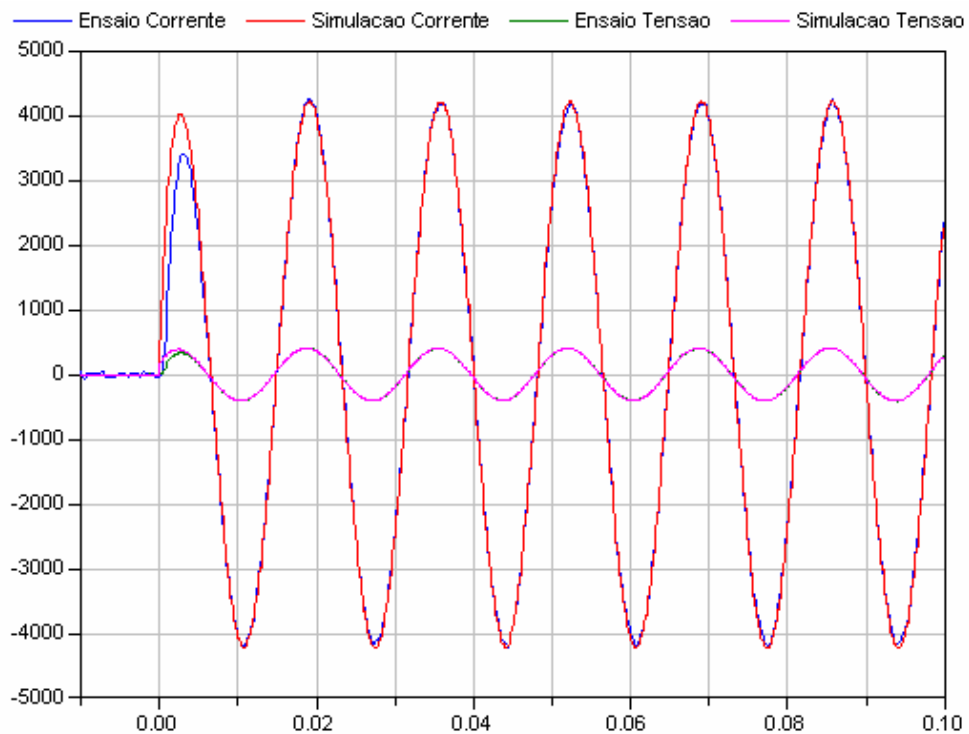


Figura 4-4- Resultado da simulação e medição da calibração 3kA/f.p.0,93

Novamente é válida aqui a observação que o modelamento do curto circuito deve usar estes mesmos parâmetros da simulação.

4.1.1 Análise de erros e incertezas

As medições efetuadas nos circuitos foram feitas com equipamentos calibrados nos laboratórios de metrologia do grupo Weg e seus certificados de calibração se encontram no ANEXO 3 deste trabalho.

As calibrações evidenciam que os erros de medição inerentes aos instrumentos são toleráveis quando comparados com a necessidade deste trabalho. O maior erro encontrado com valor de 3% para as medições do sensor de corrente em até 1000A, o que não representa fator que compromete a qualidade da medição.

Infelizmente, por limitação do laboratório de metrologia em que foi feita a calibração, não há dados disponíveis para valores acima de corrente e foi assumido o valor informado pelo fabricante de 5%. Ainda assim esse valor é suficientemente pequeno para o objetivo deste trabalho e pode ser tolerado.

4.2 Simulação e ensaios de curto-circuito

4.2.1 Simulação e ensaio do minidisjuntor MBW B 16 em 3kA

A Figura 4-5 apresenta o modelo gráfico do circuito de um curto-circuito efetivamente executado em um disjuntor MBW de 16 A e curva de disparo B. O quadro da Figura 4-6 apresenta os parâmetros introduzidos no modelo do disjuntor. O contorno quadriculado evidencia o disjuntor em suas duas partes: o modelo do arco elétrico e o modelo do disparador.

Curto-circuito MBW B16 - 3kA, f.p. 0,93 - curva 09

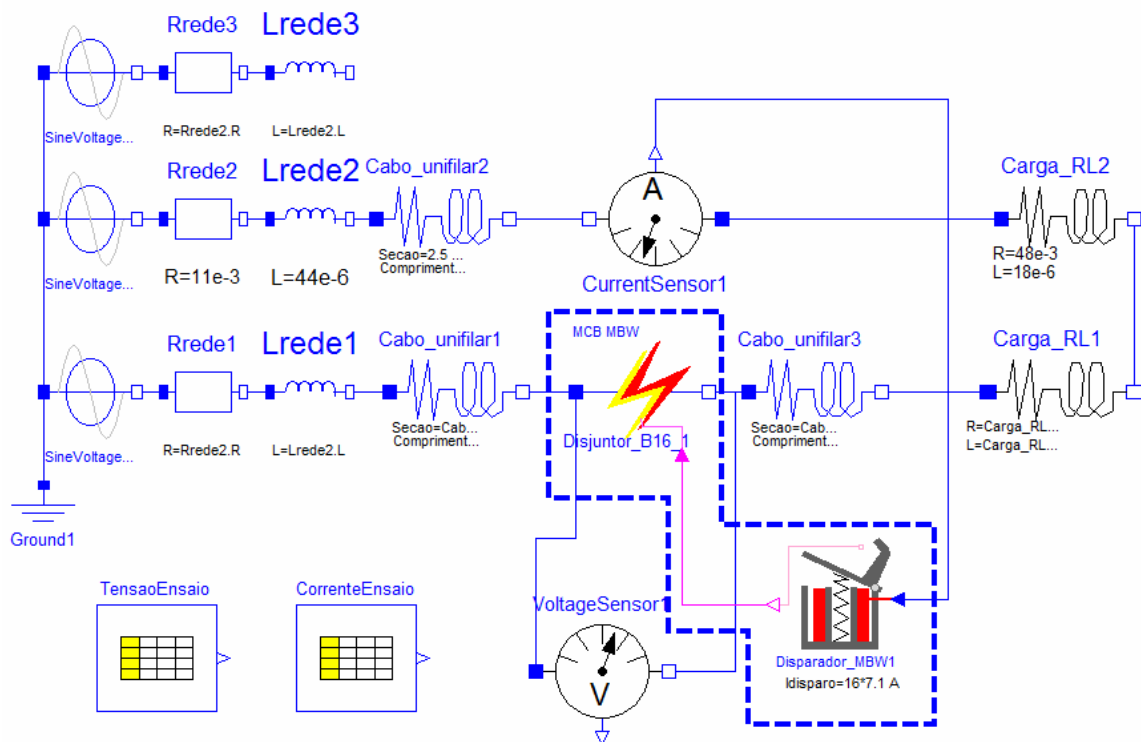


Figura 4-5 - Circuito de ensaio do curto-circuito no disjuntor MBW B16 em 3kA e f.p. 0,93

Disjuntor_B16_1 in Curto_3kA_B16_09

General Add modifiers

Component

Name Disjuntor_B16_1 Icon MC...

Comment Disjuntor...

Model

Path Disjuntor.Disjuntor_B16

Comment Modelo de disjuntor elétrico usando a tensão de arco

Parameters

Rligado	0.010	Resistência em série total fechado
RligadoARCO	0.010	Resistência em série quando o arco está na câmara
Lligado	1e-5	Indutância em série total fechado
LligadoARCO	1e-5	Indutância em série quando o arco está na câmara
Rdesligado	1E3	Resistência Aberto (1-10 kA)
tRDM	1.7E-3	Tempo de resposta do disparador magnético
Ieqmec	1000	Corrente equivalente à mola de abertura do contato
I _{mag}	5000	Corrente de disparo magnético I _n (pico)*3.9
I _{levit}	950	Corrente de levitação dos contatos
U _{ac}	18	Tensão de anodo-catodo
E _{arc}	9500	Campo elétrico do arco
constA	0.04	parametro de integração de prolongamento do arco na fase IA
constB	0.001	parametro de integração de aumento da tensão na fase PA
ComprIA	0.003	Comprimento do arco de transição entre fases IA e PA
dRadt	90	Taxa de crescimento da resistência na fase AC
U _{arco}	85	tensão de arco na fase AC
I _{ext}	1	Corrente de extinção do arco
dRodt	200000	Taxa de crescimento da resistência na fase EA

OK Info Cancel

Figura 4-6 - Quadro de parâmetros do disjuntor MBW 16A - curva B - ensaio em 3kA/f.p.0,93

Observe-se aqui que o parâmetro que controla a corrente I_{mag} de disparo magnético foi ajustado para um valor relativamente grande para que não tenha efeito dentro deste elemento do modelo e para que o disparo magnético ocorra pelo comando externo a este elemento do modelo (mas não ao disjuntor) provido pelo elemento “Disparador_MBW1”.

As curvas da Figura 4-7 apresentam o resultado da simulação juntamente com o ensaio do curto circuito da Figura 4-5. Na escala de abscissas encontra-se a informação do tempo em segundos e na de ordenadas a corrente em ampères ou a tensão em volts, dependendo da curva a que se referir.

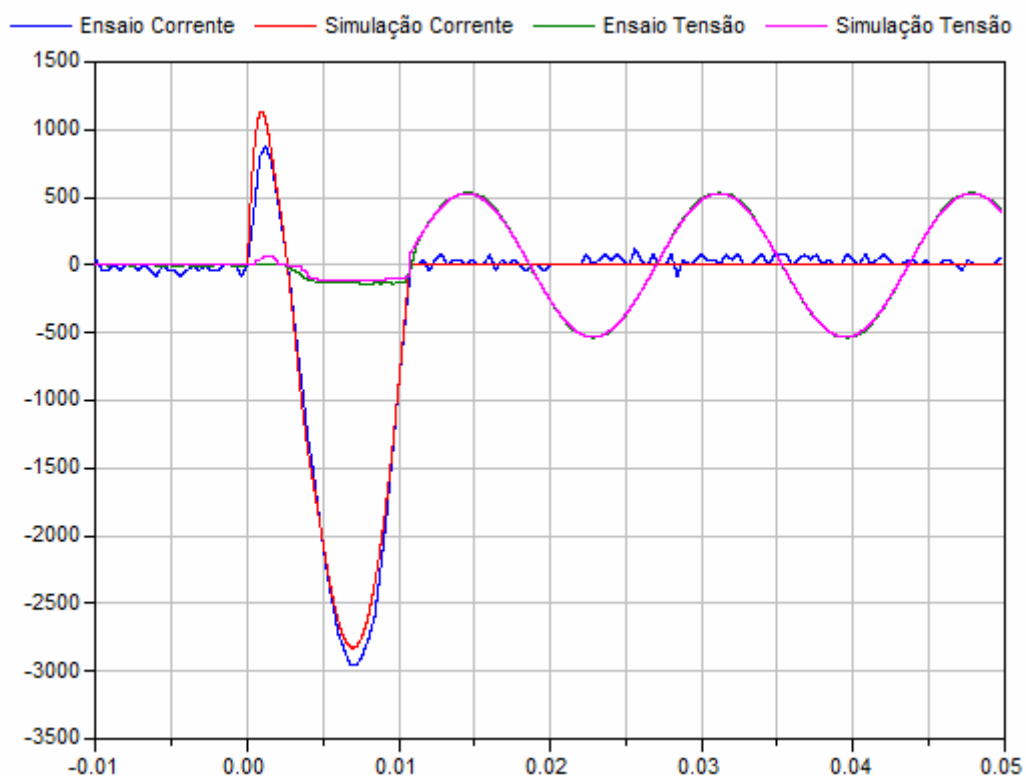


Figura 4-7 - Ensaio e resultado da simulação curto-circuito 3kA, f.p. 0,93

Observa-se novamente uma aproximação satisfatória do ensaio e dos valores simulados. Versões anteriores da simulação, em que não havia sido introduzido o modelo do disparador em separado, apresentaram problema de interromper o circuito já na primeira parte (pico positivo de aproximadamente 1000 A).

As diversas etapas pelas quais o modelo do disjuntor passa no processo de interrupção de um curto-circuito, podem ser observadas na Figura 4-8 a seguir. No gráfico superior encontram-se as representações das correntes e tensões de ensaio e na simulação e no gráfico inferior são mostradas as diversas etapas do modelo. A escala do gráfico

inferior é novamente com o tempo nas abscissas e valor lógico 0(falso) e 1(verdadeiro) nas ordenadas.

Inicialmente, antes do curto-circuito, o disjuntor encontra-se na etapa fechado “FE” (na simulação e ensaio o disjuntor encontra-se inicialmente em vazio e com seus contatos fechados, o curto-circuito é estabelecido por uma outra chave, que, no ensaio representa um contator e na simulação é representado pelo instante de tempo zero, quando as tensões nas fontes têm iniciado seu sinal), logo que a corrente começa a circular sobre o disjuntor, este permanece com seus contatos fechados, até que em aproximadamente 0,5 milissegundos se observa a transição para a etapa de ignição do arco “IA” – o fenômeno de levitação dos contatos ($i > I_{levit}$) determina este evento (vide transição entre as etapas “FE” e “IA” na Figura 3-20). O contato permanece em seu estado de levitação até que em 2,1 ms aproximadamente, há o refechação dos contatos.

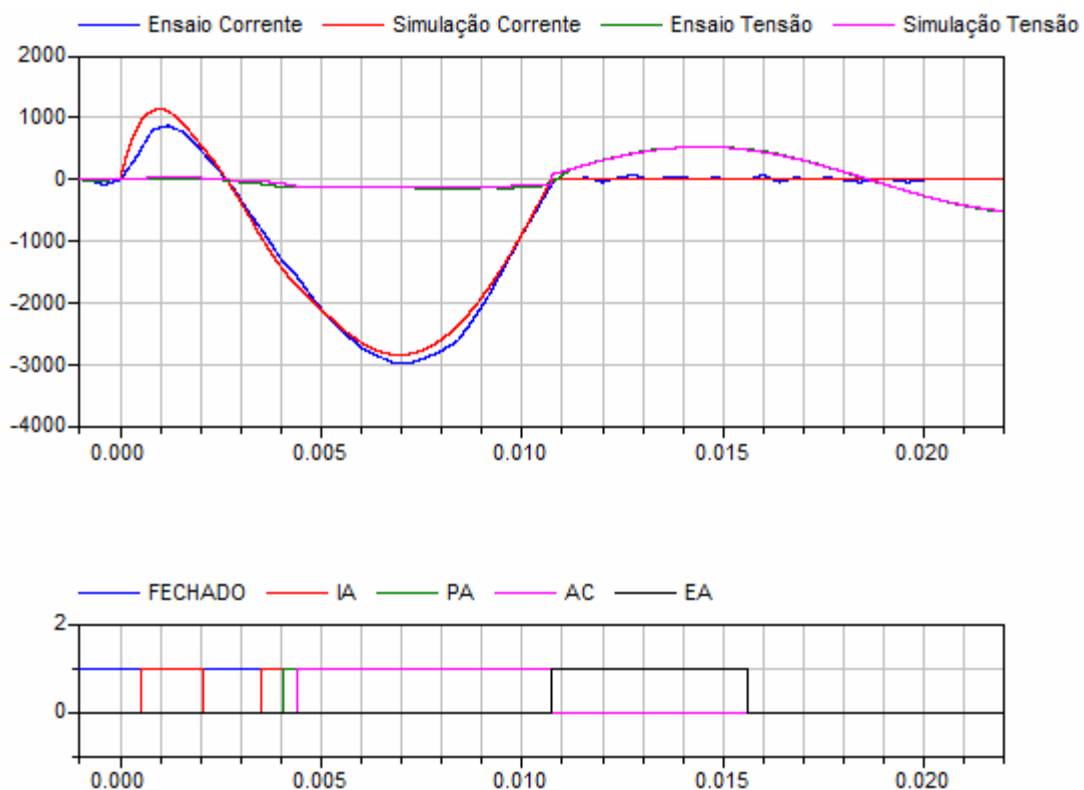


Figura 4-8 - Detalhe das etapas do modelo do disjuntor na simulação

Entre 2,1 e 3,4 ms, o disjuntor permanece fechado e conduzindo a corrente normalmente. Como aqui o crescimento da corrente é maior e após o acionamento do mecanismo de disparo, existe ainda a força de abertura dos contatos liberada pelo mecanismo, a velocidade de prolongamento do arco é maior e a etapa “IA” é mais curta,

levando rapidamente à etapa de prolongamento do arco “PA” cuja duração depende basicamente do parâmetro $Const_A$ do modelo. Após a etapa “PA” observa-se uma etapa relativamente longa do arco na câmara “AC”, onde pode ser observado o comportamento praticamente constante das tensões no modelo e no ensaio. Na seqüência, quando a corrente assume valor suficientemente baixo, inicia-se a etapa de extinção de arco “EA” e, por último, ainda que não representado no gráfico, o disjuntor assume a etapa aberto “AB”, quando a resistência do modelo, que cresce na razão da constante dR_{odt} , é suficientemente alta. O modelo do disjuntor conclui assim o processo de interrupção do curto-circuito.

Ainda como complemento da informação obtida do modelamento, pode-se também obter o valor da elevação de temperatura no cabo de ligação. Como o processo de estabelecimento e interrupção do curto-circuito ocorre em um período de tempo muito curto (abaixo de 100ms), o equacionamento adiabático para a elevação de temperatura é razoável e o modelo apresenta, neste caso uma elevação de temperatura de 31 K.

Mais informações de utilidade incontestável podem ser obtidas do modelo, como por exemplo, a energia dissipada no disjuntor durante o processo de interrupção do circuito e a integral de Joule (I^2t), que é um dos parâmetros que devem ser disponibilizados pelo fabricante ao consumidor e é de difícil e dispendiosa determinação (vide capítulo 1).

Nesta simulação a energia obtida foi de 1589 J e a integral de Joule (I^2t) foi de 32555 A²s.

4.2.2 Simulação e ensaio do minidisjuntor MBW B16 em 1kA

Como informado no item anterior, os parâmetros do disjuntor foram ajustados para fazer com que a simulação do modelo seja condizente com o comportamento verificado no ensaio. Resta saber se estes parâmetros serão válidos em outras condições de funcionamento. A simulação e ensaio em uma condição diferente da qual o disjuntor foi ajustado na primeira simulação são essenciais. O modelo do disjuntor deve apresentar fidelidade às medições em qualquer condição de ensaio dentro dos limites em que está previsto o seu funcionamento. Desta maneira, este modelo foi submetido à simulação em ensaios até 3 kA. A corrente de ensaio menor em 1 kA foi utilizada para refinamento do

modelo em correntes menores e pode ser considerado suficientemente pequeno para este propósito.

Ajustes puderam então ser feitos nos parâmetros do modelo do disjuntor de forma a obter a melhor adequação entre valores calculados e ensaiados nas duas condições. Quanto mais ensaios em diferentes condições de carga forem disponíveis para ajuste dos parâmetros, tanto mais confiável o modelo se torna. Aqui serão apresentados apenas alguns dos resultados em razão de não se tornar repetitivo desnecessariamente.

A Figura 4-9 apresenta o modelo do curto-circuito no minidisjuntor MBW de 16A e curva B quando ligado a um circuito ajustado para fornecer 1kA e fator de potência 0,3.

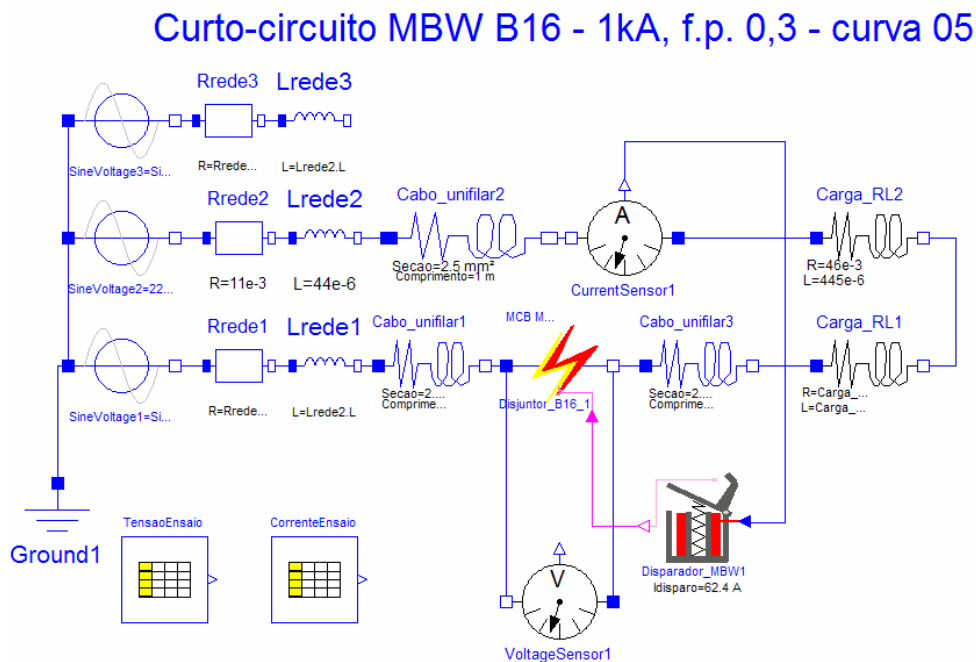


Figura 4-9 - Circuito de ensaio do curto-circuito no disjuntor MBW B16 – 1kA – f.p. 0,3

Uma observação importante a se acrescentar nesta simulação é a de que nenhum parâmetro do disjuntor foi alterado em relação aos parâmetros do ensaio em 3kA e fator de potência 0,93. Os mesmos parâmetros da simulação do item 4.2.1 foram aplicados aqui, sem alteração.

Os gráficos da Figura 4-10 mostram que os resultados da simulação foram muito próximos aos dos ensaios. A prática mostra que mesmo as repetições de ensaios em mesmas condições em diferentes disjuntores (de mesma faixa de corrente e curva de disparo) apresentam diferenças entre si por vezes maiores do que a observada nesta simulação.

Como resultados complementares, obtém-se deste modelo:

Elevação de temperatura do cabo: 4 K

Energia dissipada no disjuntor: 279 J

Integral de Joule (I^2t): 3909 A²s

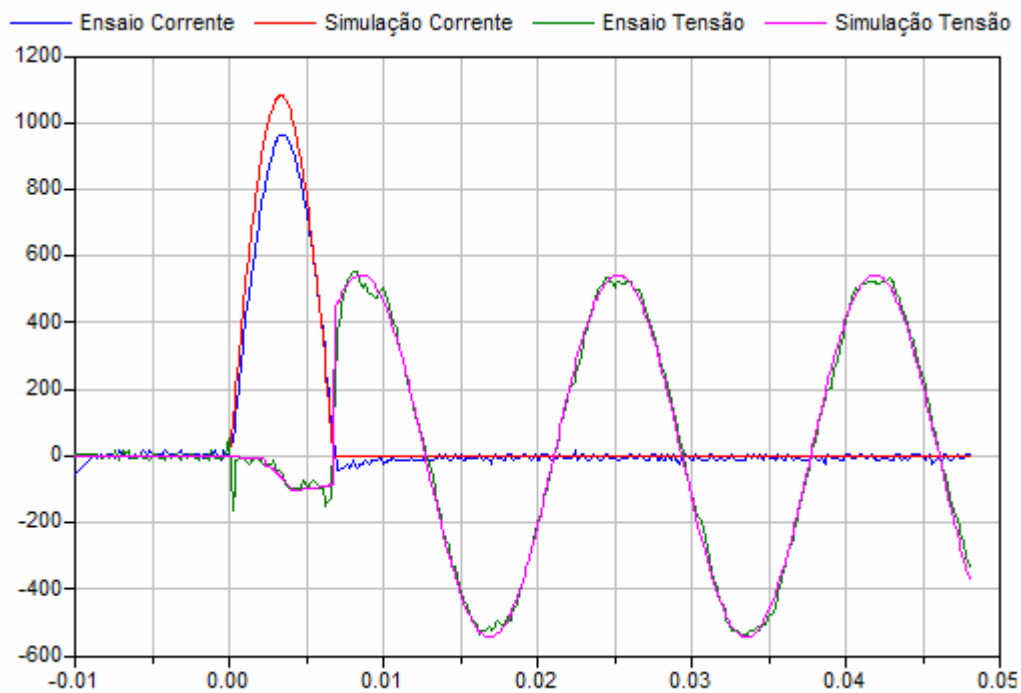


Figura 4-10 - Ensaio e resultado da simulação curto-circuito 1kA, f.p. 0,3

4.2.3 Simulação e ensaio do minidisjuntor MBW C2 em 3kA

Além de se evidenciar que um modelo de disjuntor deve ser válido para as diversas condições de curto-circuito às quais pode ser exposto, é interessante também verificar a flexibilidade do modelo quanto à variação na concepção do disjuntor, variando-se alguns de seus parâmetros nominais. Tendo em vista esta possibilidade, um modelo com os parâmetros conhecidos de um disjuntor MBW de 2A e curva característica C foi também implementado e passou pelo mesmo processo de ajuste de parâmetros. A grande diferença deste modelo em relação ao anterior está no tocante da mudança repentina de caminho de corrente que ocorre quando o modelo do disjuntor assume a etapa “arco na câmara –AC”, pois na ocorrência deste evento, a corrente não circula mais pelo conjunto do disparador térmico, cordoalha e contato móvel o item 3.8.4 apresenta mais detalhes desta característica.

O circuito da Figura 4-11 representa o minidisjuntor MBW de 2A em curto-circuito de 3kA e fator de potência 0,93. Observa-se que o circuito é absolutamente idêntico ao da Figura 4-5 quando se apresentou o modelo do curto-circuito para o disjuntor de 16A, exceto pelo próprio disjuntor e seu disparador. O disjuntor agora tem seus próprios parâmetros e o disparador foi ajustado para uma corrente de disparo compatível com seus dados nominais, ou seja, 14,2 A.

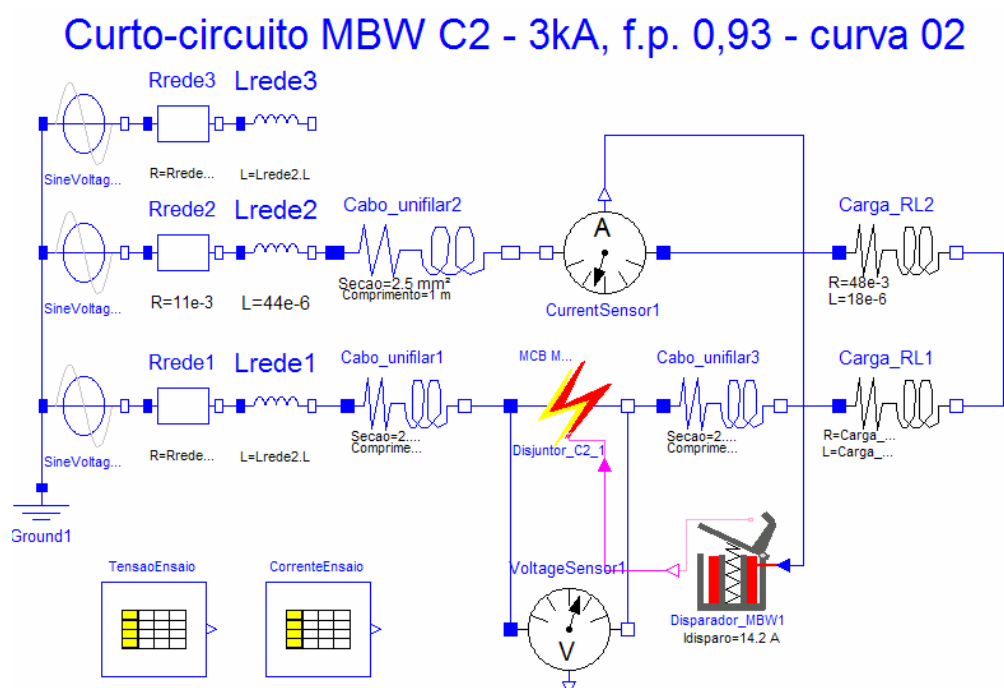


Figura 4-11 - Circuito de ensaio do curto-circuito no disjuntor MBW C2 – 3kA – f.p. 0,93

No quadro da Figura 4-12 são apresentados os parâmetros do disjuntor MBW de 2A e curva C. Evidencia-se novamente a corrente extremamente alta colocada como parâmetro de corrente de disparo magnético, valor este apenas assim atribuído para neutralizar o efeito dessa condição de disparo no modelo e possibilitar o disparo magnético pelo disparador modelado em separado.

Observa-se neste modelo também a absoluta fidelidade com os parâmetros do modelo do disjuntor de 16A e curva B quanto aos parâmetros de difícil determinação por medição como, por exemplo, as constantes “Const_A” e “Const_B” que representam características próprias de cada concepção de disjuntor, sua geometria, materiais (compare-se os valores com o quadro da Figura 4-6). Já os parâmetros obviamente diferentes e de fácil obtenção como as resistências foram devidamente alterados no modelo para refletir a real condição de funcionamento do disjuntor.

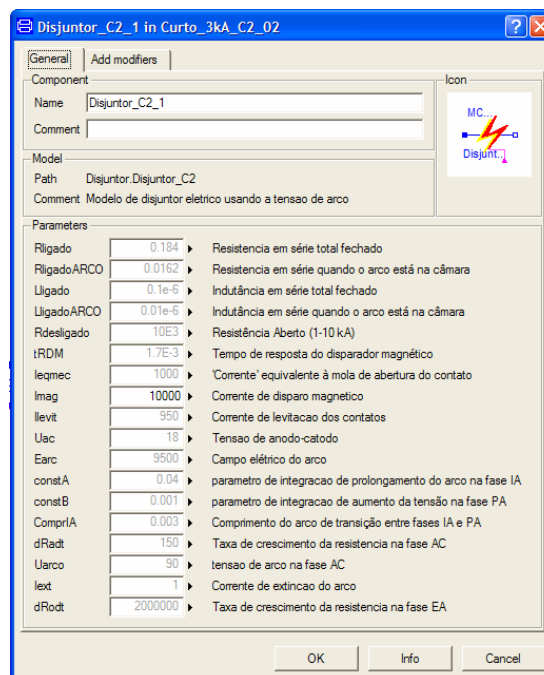


Figura 4-12 - Quadro de parâmetros do disjuntor MBW 2A - curva C - ensaio em 3kA/f.p.0,93

O resultado da simulação que pode ser visto na Figura 4-13 traz novamente valores bastante próximos entre a simulação e os ensaios. A fidelidade do modelo foi também

testada em mais ensaios nesta condição, aqui não serão apresentadas para evitar repetições.

Observe-se o pequeno pico de tensão que se verifica no ensaio e na simulação (mais saliente na simulação). Este pico representa a comutação da tensão quando há o desvio da corrente para dentro da câmara de extinção e não há mais a queda de tensão na resistência do disparador térmico.

Como resultados complementares, obtém-se ainda deste modelo:

Elevação de temperatura do cabo: 23 K

Energia dissipada no disjuntor: 1741 J

Integral de Joule (I^2t): 24365 A²s

Pode ser observada aqui a pequena redução dos valores de energia e elevação de temperatura em relação ao disjuntor de 16A, mas como a condição de chaveamento não é a mesma, não se pode ainda concluir que isso se deve a redução da corrente nominal de disparo do disjuntor ou devido à melhor característica de limitação de corrente do disjuntor de 2A. Uma simulação do disjuntor na mesma condição de chaveamento do circuito pode levar a uma informação mais útil. Oportunamente serão apresentadas simulações destas condições.

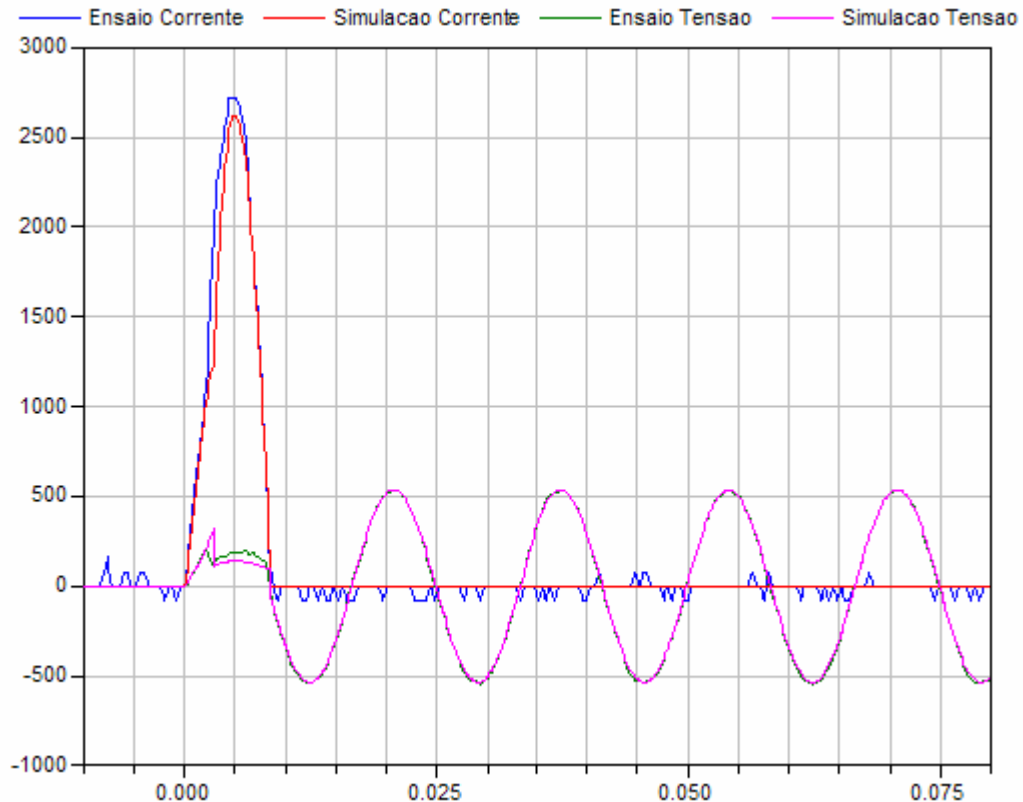


Figura 4-13 - Ensaio e resultado da simulação curto-circuito 3kA, f.p. 0,93 em disjuntor MPW C2

4.2.4 Simulação e ensaio do minidisjuntor MBW C2 em 1kA

Novamente, para validação do modelo, faz-se necessária a verificação de sua acuracidade em uma condição bem diversa usando-se os mesmos parâmetros do modelo. A Figura 4-14 apresenta o mesmo disjuntor com os mesmos parâmetros do item anterior, desta feita ligado a um circuito capaz de fornecer apenas 1kA de corrente de curto-circuito e em fator de potência 0,3.

É importante observar também que o circuito da rede e carga obedece as mesmas características do circuito de calibração apresentado em sua simulação no item 4.1.

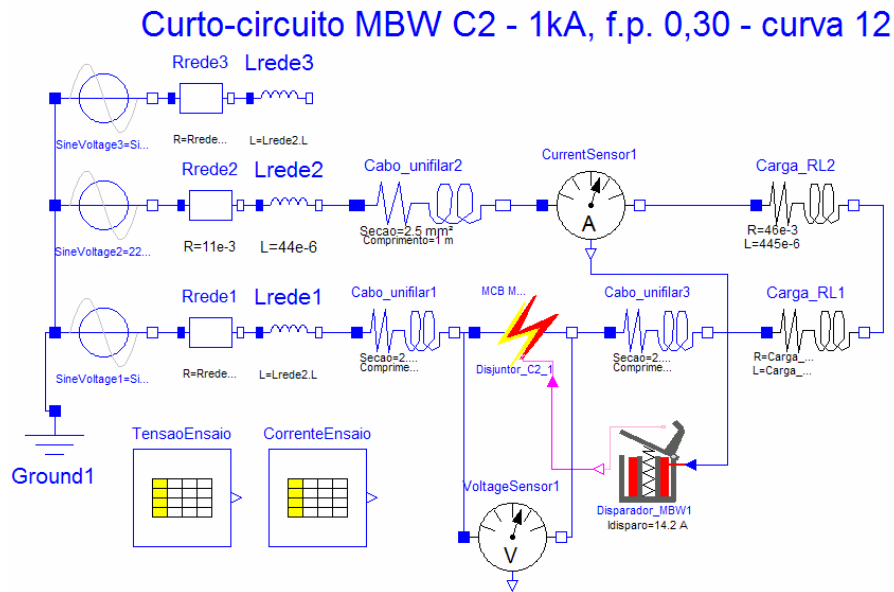


Figura 4-14 - Circuito de ensaio do curto-circuito no disjuntor MBW C2 – 1kA – f.p. 0,3

Os parâmetros do disjuntor e disparador são mantidos os mesmos da simulação em 3kA do item anterior.

O resultado da simulação é apresentado na Figura 4-15. Novamente pode ser verificada a boa qualidade do modelo em função das pequenas diferenças entre os valores medidos e os valores calculados.

O pequeno pico de tensão resultante do desvio da corrente quando esta está dentro da câmara de extinção pode ser agora mais nitidamente observado e a fidelidade entre o modelo e a medição torna-se ainda mais clara.

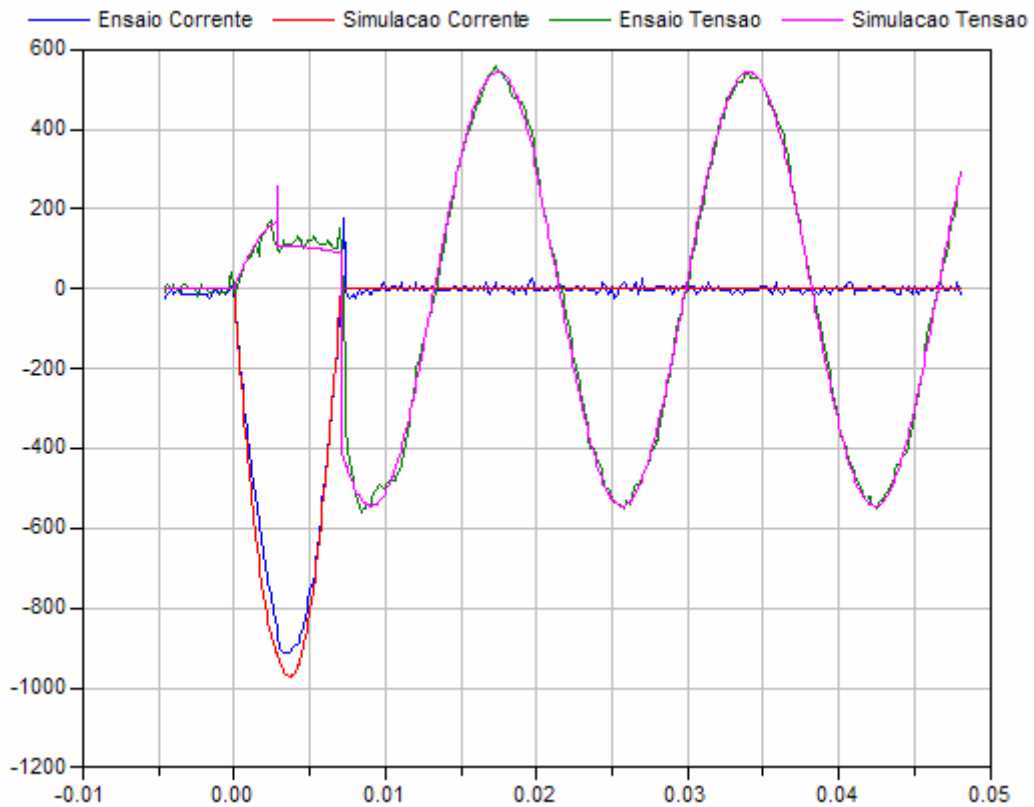


Figura 4-15 - Ensaio e resultado da simulação curto-circuito 3kA, f.p. 0,93 em disjuntor MPW C2

4.3 Simulação de seletividade entre dois minidisjuntores MBW

Utilizando-se os modelos ajustados nas simulações anteriores é possível realizar simulações onde podem ser previstos comportamentos dos disjuntores nas mais diversas condições.

Neste item é apresentada a simulação de um curto-circuito em 2 disjuntores de curva característica C, um de 2 A e outro de 16 A, ligados em série. De acordo com o modelo, estes disjuntores apresentam seletividade em 380V até uma corrente de aproximadamente 350 A RMS. Circuitos capazes de fornecer curto-circuito acima deste valor, segundo este modelo, não teriam o curto-circuito adequadamente discriminado por essa combinação de disjuntores.

Simulação de Seletividade entre 2 disjuntores MBW

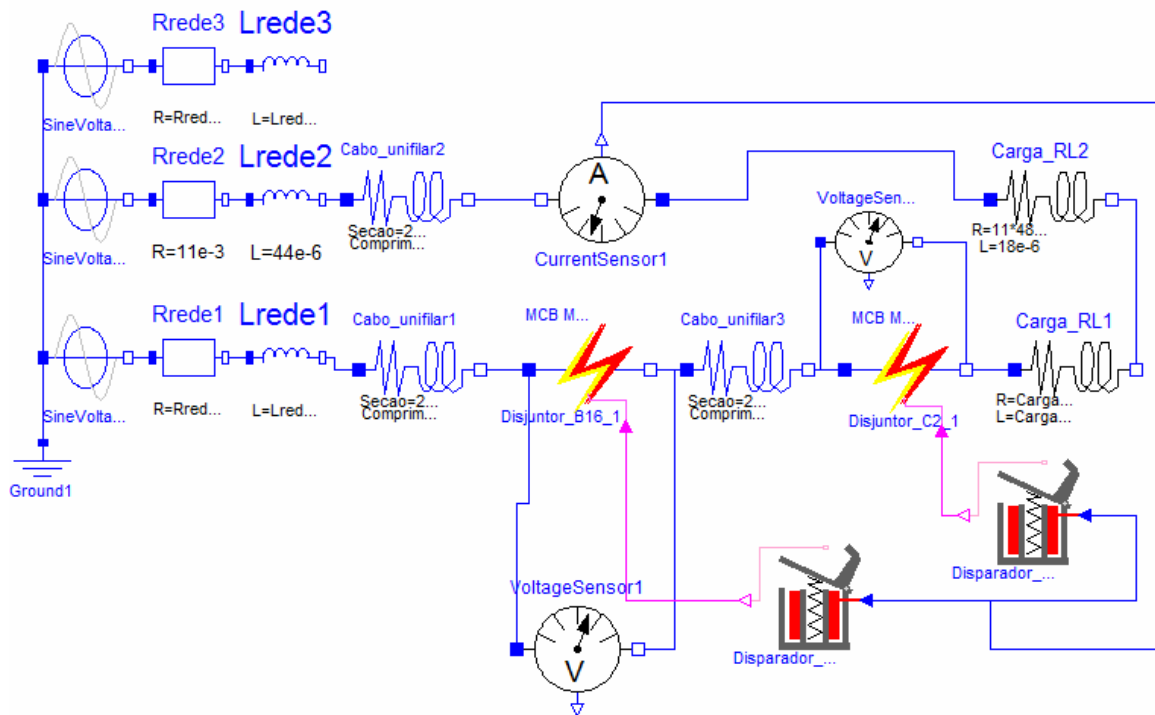


Figura 4-16 - Modelo do circuito de simulação de seletividade com 2 disjuntores ligados em série

Observe-se no diagrama da figura que o disjuntor de 16 A está à jusante no circuito, representando, por exemplo, um disjuntor instalado em uma ramificação do circuito acima do disjuntor menor de 2 A que está abaixo. O objetivo desta simulação é verificar qual é o limite de corrente em que a configuração mantém sua característica de seletividade. Conforme apresentado no item 2.4.2, entre os vários tipos de seletividade, existe a seletividade natural, que ocorre quando disjuntores de porte suficientemente diferente são ligados em série. Nereau [26] determina uma relação entre as maiores correntes de carcaças de disjuntores como 2,5 para que seja possível a seletividade natural entre dois disjuntores. Isso quer dizer que entre dois disjuntores de carcaças diferentes a relação entre as correntes nominais da maior corrente de cada carcaça deve ser no mínimo 2,5. No caso do minidisjuntor MBW a maior corrente da carcaça é de 63 A, seja qual for o disjuntor levado em consideração (desde 2 a 63 A), a carcaça do disjuntor é a mesma, logo a relação neste caso é 1,0. É de se esperar então que a seletividade natural em todo o espectro de corrente não seja possível.

Através de tentativas sucessivas, atuando na variação da impedância da carga, obteve-se o limite de corrente para o qual a combinação destes dois disjuntores apresentou

seletividade e o gráfico da simulação pode ser visto na Figura 4-17. Observa-se no gráfico uma corrente de pico de curto-circuito de aproximadamente 400A, as impedâncias introduzidas no circuito levam a uma corrente presumida de 350A RMS e aproximadamente 500A de pico.

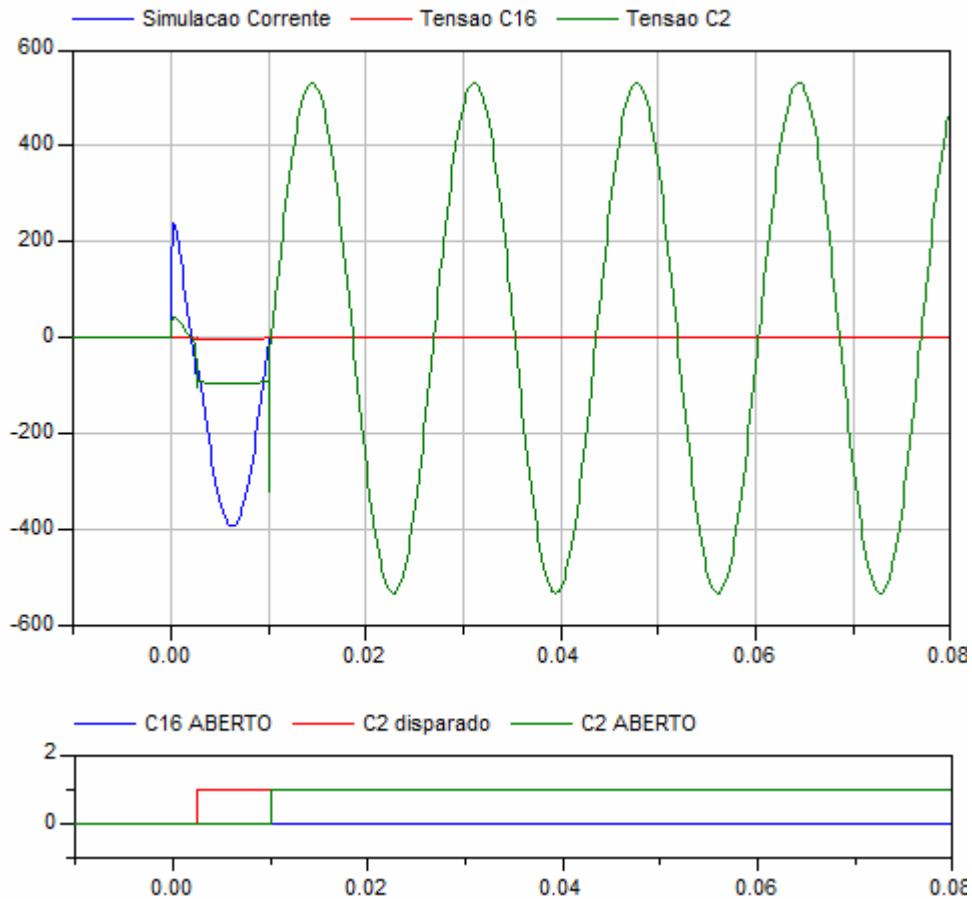


Figura 4-17 - Simulação da seletividade entre dois disjuntores MBW

O modelo levou então a uma característica de seletividade não muito satisfatória, pois mesmo tendo os dois disjuntores uma grande diferença em sua corrente nominal, a seletividade natural só foi possível até irrisórios 350A RMS, o que é, na verdade, uma corrente de curto-circuito muito baixa, principalmente se forem levados em consideração valores típicos de corrente presumida de curto-circuito em instalações industriais.

A melhoria da característica de seletividade natural é facilmente conseguida se forem introduzidos atrasos na resposta dos disjuntores de maior porte (corrente da última faixa da carcaça). Estes atrasos são, em geral, características inerentes da necessidade de projeto dos disjuntores. Um disjuntor cuja carcaça tenha sido concebida para conduzir maiores correntes deve ter um mecanismo mais robusto e com maiores inércias do que um

disjuntor com uma carcaça para menor corrente. Isso leva o disjuntor maior a ter uma característica de tempo de resposta às perturbações do tipo curto-circuito mais lentas, melhorando assim a característica de seletividade.

O modelo em estudo mostra dessa forma que pode ser vantajoso criar mais carcaças de disjuntores para permitir que a seletividade natural seja possível entre os disjuntores de diferentes carcaças. Em contrapartida, do ponto de vista econômico, esta solução não é atraente, pois significa muito mais investimento em ferramental, dispositivos de montagem e itens de estoque.

5 Discussão dos resultados

5.1 Comparação, avaliação e crítica dos resultados.

Como proposto ainda na introdução deste trabalho, a predição de parâmetros de desempenho dos disjuntores modelados neste trabalho se mostrou eficiente. O mesmo modelo do minidisjuntor em condições diferentes de curto-circuito apresentou desempenho muito satisfatório. Basta comparar desempenho dos modelos dos minidisjuntores de 2A e 16A nas duas condições em que ambos foram ensaiados e simulados quanto ao valor da corrente de pico, que foi um dos parâmetros apresentados ainda no capítulo 1 como de fundamental importância:

Disjuntor MBW 2A, curva de disparo C		
	<i>1kA e fator de potência 0,3 (item 4.2.4)</i>	<i>3kA e fator de potência 0,93(item 4.2.3)</i>
corrente de pico calculada	970A	2622 A
corrente de pico medida	915A	2720 A
Diferença absoluta entre valor calculado e medido	+55 A	-98 A
Diferença relativa entre valor calculado e medido	+6,0 %	-3,6 %

Disjuntor MBW 16A, curva de disparo B		
	<i>1kA e fator de potência 0,3 (item 4.2.2)</i>	<i>3kA e fator de potência 0,93(item 4.2.1)</i>
corrente de pico calculada	965A	2815 A
corrente de pico medida	1092A	2960 A
Diferença absoluta entre valor calculado e medido	-127 A	-145 A
Diferença relativa entre valor calculado e medido	-11,6 %	-4,9 %

É dedutível dos valores expostos nas tabelas acima que a qualidade do modelo é boa, o que torna o modelo suficientemente confiável para uso como predição do desempenho do minidisjuntor em condições diferentes das ensaiadas aqui, contanto que, por segurança, as simulações sejam feitas dentro dos limites ensaiados de corrente e fator de potência. Ensaios em condições muito diferentes da proposta, por exemplo, em 690V ou em 50 kA, deveriam ser previamente validados por uma confrontação de um resultado da simulação com um ensaio.

Ao observar o formato das curvas de tensão, observa-se que a fidelidade do programa é grande e o equacionamento proposto é adequado. Até o pequeno pico de tensão devido à transição entre as etapas de “prolongamento do arco PA” e de “arco na câmara AC” e vistos nas curvas medidas da Figura 4-13 e da Figura 4-15 atestam a fidelidade do modelo à realidade.

Outro fator que atesta a qualidade do modelo é o resultado da simulação do ensaio exposto na Figura 4-7, onde não ocorre a interrupção da corrente na primeira passagem da corrente por zero. O modelo e sua simulação mostram que devido ao atraso natural na resposta do mecanismo de disparo do disjuntor e seu gatilho eletromagnético, o processo de disparo não havia sido iniciado no primeiro semiciclo e, portanto o disjuntor permanece conduzindo a corrente de curto-circuito no semiciclo seguinte. Modelos em que a dinâmica mecânica do gatilho do disparador magnético não é levada em consideração, como o proposto por Roschke [28], frequentemente apresentam problemas com este tipo de perturbação.

Outra questão fundamental a ser discutida no modelo é a sua viabilidade para a simulação da seletividade entre disjuntores. A simulação executada no item 4.3 demonstra que o modelo pode ser útil para este tipo de simulação. O disparador magnético e seu gatilho mais sensível no disjuntor de 2A dispara antes que se permita passar energia suficiente ao disparador do disjuntor de 16A. Obviamente, além das inércias mecânicas e diferentes esforços eletromagnéticos, todo o processo de limitação de corrente devido às impedâncias e tensão de arco no disjuntor de 2A e a própria levitação dos contatos do disjuntor de 16A são responsáveis pelo processo bem sucedido de seletividade.

A simulação da elevação de temperatura nos cabos (integrante, portanto do modelo auxiliar “Cabo_unifilar” apresentado em 4.1) durante o processo de curto-circuito ainda que muito grosseira, por levar em consideração que o sistema é adiabático, também é uma ferramenta útil e mostrou valores plausíveis de temperaturas. Infelizmente, pela não disponibilidade de equipamentos adequados no laboratório, os valores não puderam ser medidos para que se pudesse fazer uma comparação com os valores calculados. Medições futuras poderão confirmar os resultados.

O valor da integral de Joule, disponível na simulação, também pode ser comparado ao valor medido cuja integral pode ser obtida, por exemplo, em uma planilha eletrônica. A Figura 5-1 apresenta a simulação e a Figura 5-2 representa o valor integrado do ensaio do curto-circuito realizado no minidisjuntor MBW de 16A e curva B cujo modelo e resultados de simulação podem ser vistos no item 4.2.1. Observa-se novamente discrepância aceitável de apenas -8 % entre o valor ensaiado e o valor medido (32767 A².s na simulação e 35448 A².s no ensaio).

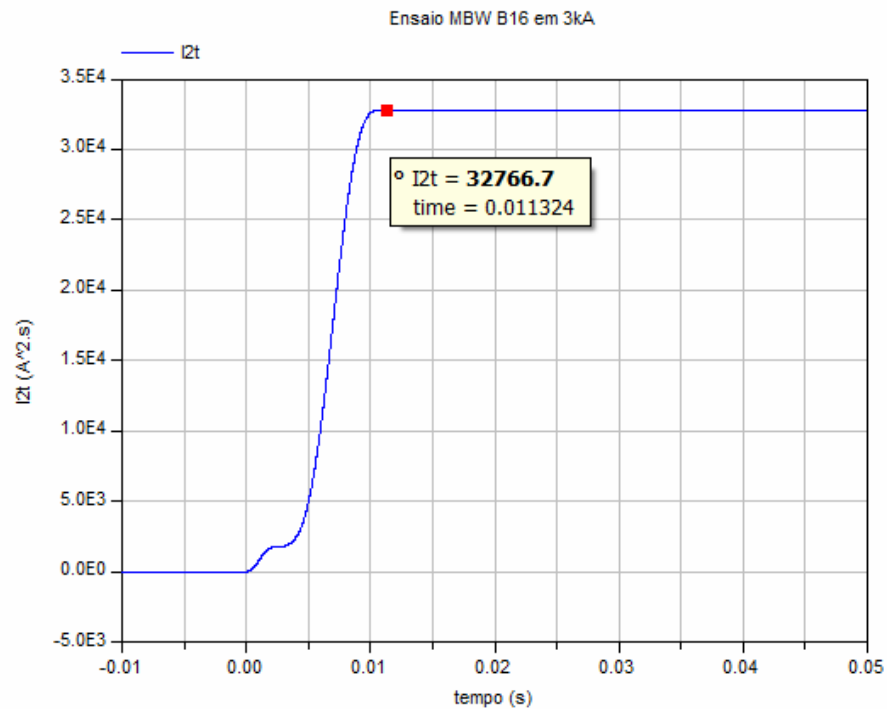


Figura 5-1 - Simulação da integral de Joule do minidisjuntor MBW B16 em 3kA e f.p. 0,93

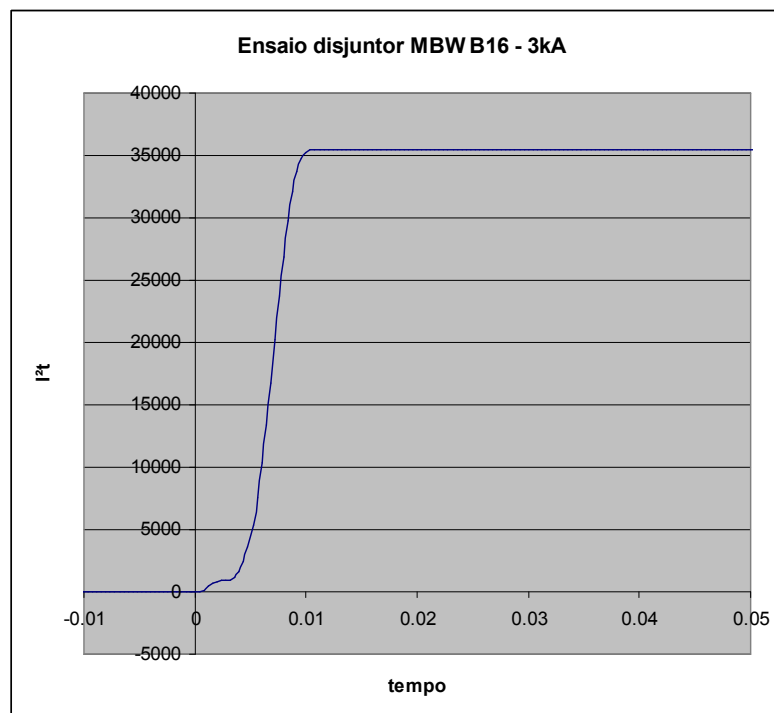


Figura 5-2 - Ensaio da integral de Joule do minidisjuntor MBW B16 em 3kA e f.p. 0,93

Este resultado vem confirmar que o modelo pode ser útil na simulação do desempenho dos minidisjuntores quanto à integral de Joule. O modelo atende, portanto um de seus principais objetivos estabelecidos no capítulo 1.

5.2 Alteração do modelo para simulação de alterações no circuito ou projeto

Uma das utilidades de um modelo computacional qualquer é a relativamente fácil alteração de parâmetros e sua simulação quando comparada com a fabricação de protótipos e execução de ensaios. Existem obviamente limitações às quais o projetista deve estar atento, no entanto a simulação de variações no projeto pode ser uma ferramenta útil ao projetista no sentido de auxiliá-lo na tomada de decisões quanto a alterações no projeto.

O modelo proposto permite a alteração de vários parâmetros de projeto do disjuntor, como por exemplo, a tensão de arco (determinada basicamente pelo número de chapas da câmara de extinção) ou a resistência do disjuntor quando fechado e quando a corrente está na câmara.

5.2.1 Variação da resistência do modelo

A primeira proposta de alteração no modelo e posterior simulação é a da resistência do mesmo. Como é sabido, o aquecimento em uma carga do tipo resistiva em um sistema adiabático é proporcional ao valor da integral de Joule e, pode-se, com uma pequena modificação no modelo, prever o que aconteceria em um disjuntor de 2A se este não dispusesse da pequena cordoalha para desvio da corrente, que foi suposta como ter sido introduzida na concepção do disjuntor para reduzir o aquecimento e, portanto, os danos à resistência de aquecimento e ao elemento bimetálico, componentes do sistema de disparo térmico.

O gráfico da Figura 5-3 mostra um detalhe da simulação do curto-circuito, já apresentado no item 4.2.3. Observa-se no gráfico superior a representação gráfica temporal da integral de Joule e o ponto em evidência (com valores na caixa de texto) que representa o valor da integral de Joule no instante em que a corrente pára de circular pelo sistema de aquecimento térmico, não provocando, portanto aquecimento nesta parte do circuito a partir daí.

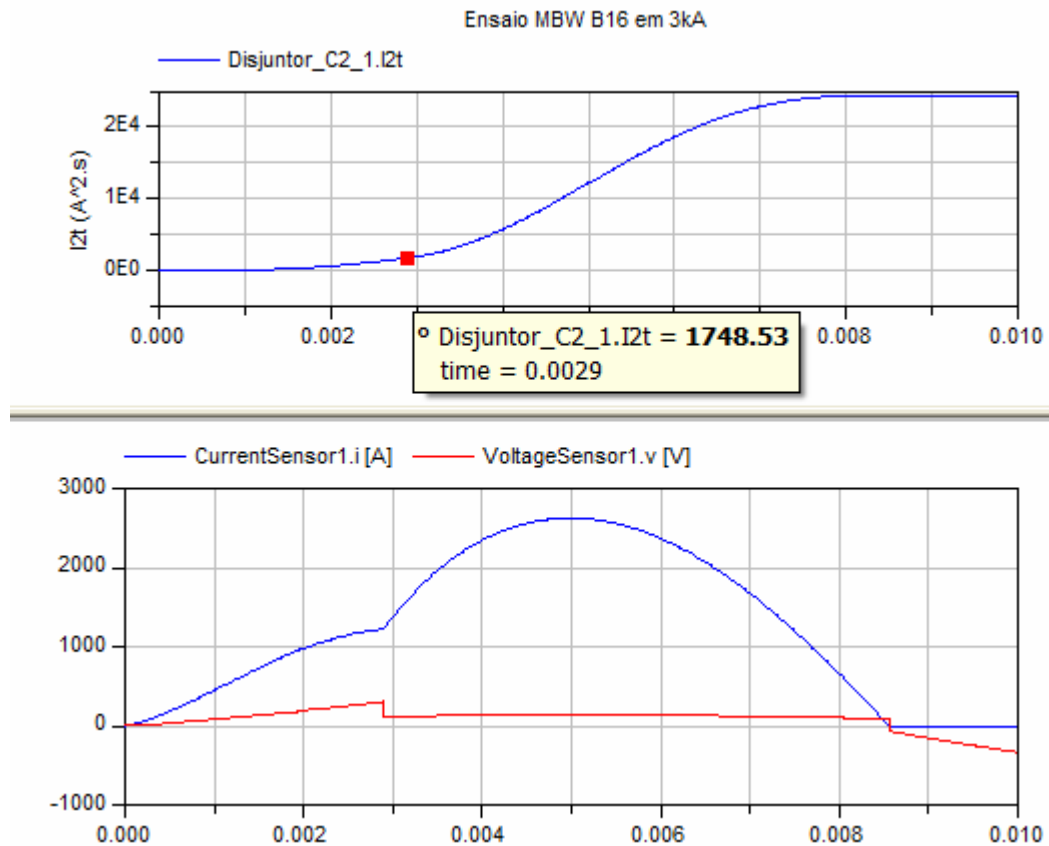


Figura 5-3 - Simulação de curto-circuito com desvio da corrente na etapa "AC"

Obtém-se então do gráfico o valor da integral de Joule de apenas 1748 A².s. Nesta condição ainda é obtido o valor da integral de Joule total que passa pelo disjuntor e a máxima corrente de pico, que são, respectivamente, 24400 A².s e 2622A.

Ao se aplicar ao modelo uma pequena modificação, fazendo com que a resistência não varie quando estiver na etapa “arco na câmara AC”, ou seja, fazendo $R_{\text{ligadoARCO}}=R_{\text{ligado}}$, obtém-se os resultados mostrados na Figura 5-4.

Observe-se que a integral de Joule que irá ser proporcional ao aquecimento do sistema de disparo térmico do disjuntor é agora a integral de Joule total da simulação, portanto, a nova integral de Joule passa a ser 7820 A².s, o que leva o sistema térmico a sofrer um aquecimento na proporção de 7820/1748, ou seja, aproximadamente 4,5 vezes maior.

Chega-se à conclusão então que o artifício de desvio de corrente para evitar problemas de sobreaquecimento no disjuntor pode ser interessante para salvaguardar o disjuntor de problemas de queima por sobreaquecimento ou ainda por perda do ajuste do disparador térmico se este for submetido a estresses excessivos durante o curto-circuito.

No entanto a instalação elétrica ao qual o disjuntor está ligado seria mais bem protegida por um disjuntor com a característica do disjuntor sem o desvio de corrente do sistema de aquecimento, conforme pode-se deduzir dos resultados da simulação exposta na Figura 5-4.

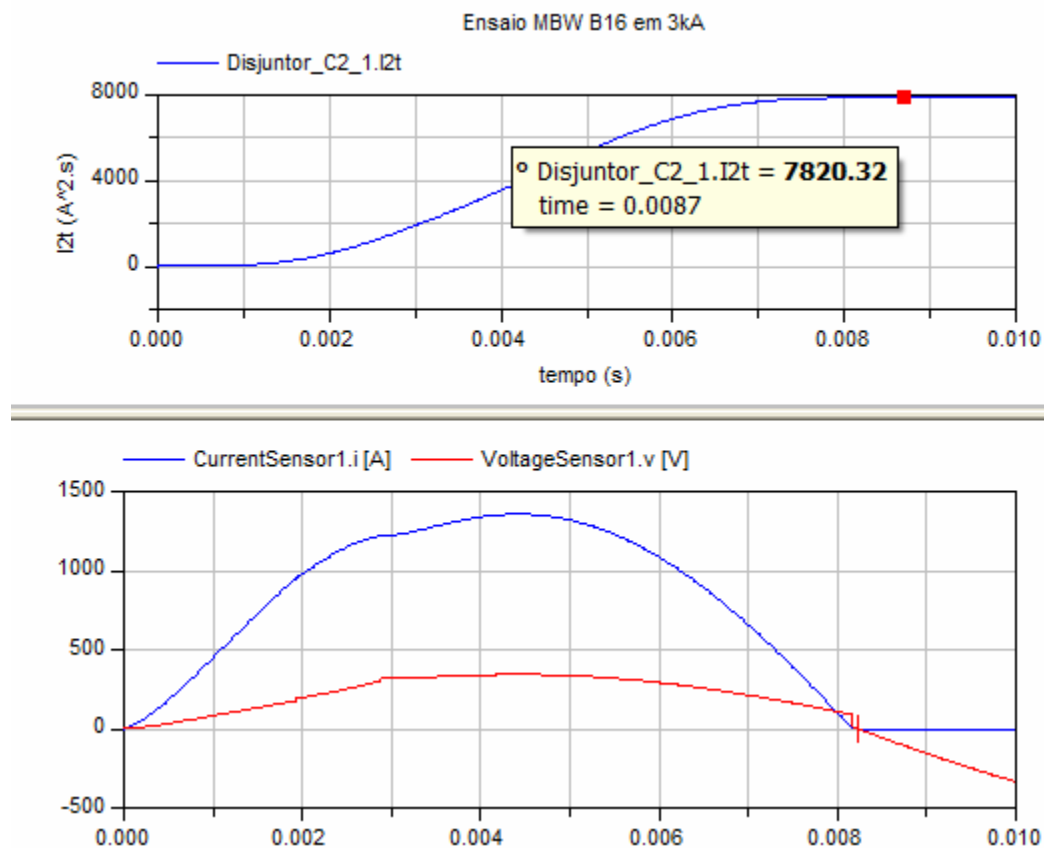


Figura 5-4 - Simulação de curto-circuito sem desvio da corrente na etapa "AC"

Observe-se nesta simulação que os valores da integral de Joule e da corrente de pico são respectivamente 7820 A².s e 1357 A. Já a simulação com o desvio de corrente traz os valores de 24400 A².s e 2622A para as mesmas grandezas.

É dedutível que um circuito protegido pelo disjuntor com este artifício sofre maior aquecimento em um processo de curto-circuito na ordem de $(24400/7820)=3,1$ vezes mais do que um disjuntor cujo disparador térmico participe de todo o processo de limitação do curto-circuito.

Ainda em se tratando da diferença de efeitos danosos da corrente de curto-circuito, pode-se afirmar também que o disjuntor sem desvio de corrente tem melhor característica limitadora de corrente, pois permitiu apenas a passagem de aproximadamente a metade da

corrente de pico, o que representa na circunvizinhança do circuito, perturbações indutivas reduzidas à metade e esforços devido ao curto-circuito reduzidos para apenas um quarto do valor normal (com desvio de corrente).

5.2.2 Variação do número de chapas da câmara de extinção

Um aspecto cultural arraigado entre a maioria dos projetistas de dispositivos de chaveamento é a idéia de que um maior número de chapas em uma câmara de extinção proporciona melhor desempenho do dispositivo como um todo, afinal a característica de limitação de corrente será mais evidenciada devido à maior tensão de arco, facilitando a extinção mais rápida da corrente de curto-circuito.

Não é raro encontrar dispositivos de chaveamento com até 24 chapas na câmara de extinção, ao invés das 4 que o disjuntor aqui modelado apresenta. Um número razoável de chapas para minidisjuntores é de 12 chapas, que parece ser um valor consensual entre os vários fabricantes de minidisjuntores de maior capacidade de interrupção (6 kA e 10 kA segundo a IEC60898[16]).

Como foi visto anteriormente, um disjuntor com 4 chapas na câmara de extinção possui 5 pequenos arcos elétricos, um entre cada chapa, totalizando três, mais os dois extremos. Em um disjuntor com 12 chapas esse número torna-se portanto 13. Supondo-se que a tensão anodo-catodo se comporte de forma semelhante no disjuntor, o parâmetro U_{ARCO} deve ser reajustado para a nova condição de simulação pelo fator $13/5 = 2,6$.

O modelo do disjuntor MBW de 16 A e curva B tem como parâmetro U_{ARCO} o valor de 85V, logo o novo valor do parâmetro para esta simulação é de 221 V.

Se este novo parâmetro é introduzido no mesmo modelo de disjuntor e no mesmo ajuste do circuito, é possível inferir o efeito da introdução das chapas na câmara de extinção do minidisjuntor.

A Figura 5-5 mostra a simulação do disjuntor com $U_{ARCO}=221$ V e a Figura 5-6 repete a simulação já mostrada no item 4.2.1 em que o disjuntor tinha o parâmetro $U_{ARCO}=85$ V.

Percebe-se aqui a diminuição da corrente de pico quando a tensão de arco é maior. A corrente de pico anteriormente verificada de aproximadamente 2800 A reduziu-se a apenas 1800 A. Como já discutido anteriormente, vários são os efeitos benéficos desta

diminuição da corrente para os elementos do circuito ao qual o disjuntor está ligado: aquecimento, interferências magnéticas e esforços mecânicos, são sensivelmente reduzidos.

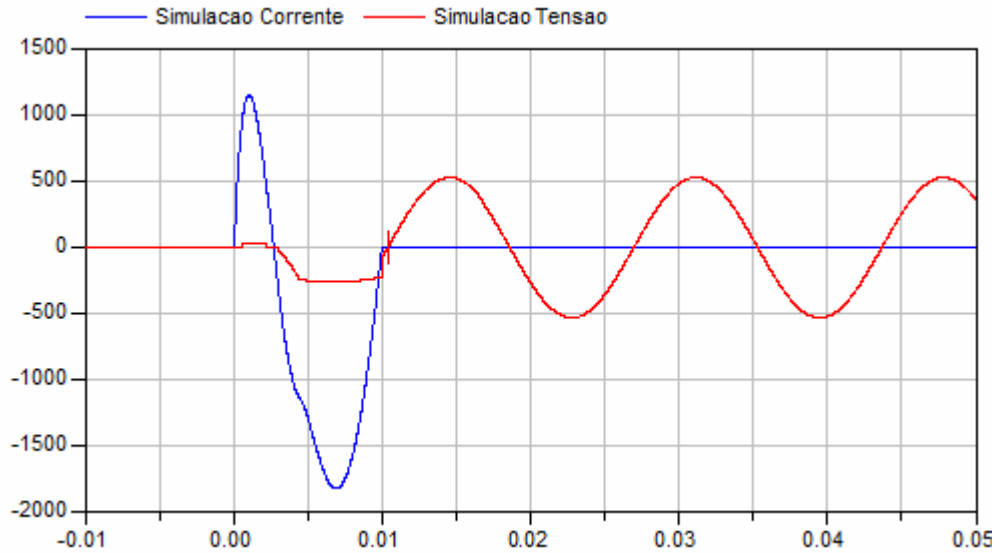


Figura 5-5 - Corrente e tensão simulada em minidisjuntor com 12 chapas na câmara de extinção ($U_{\text{arco}}=221\text{V}$)

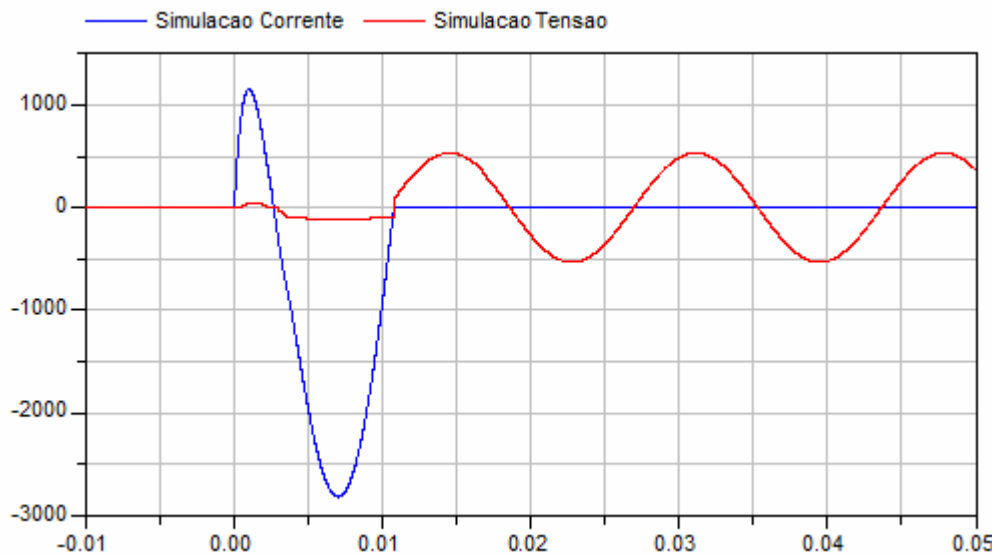


Figura 5-6 - Corrente e tensão simulada em minidisjuntor com 4 chapas na câmara de extinção ($U_{\text{arco}}=85\text{V}$)

No entanto este efeito benéfico ao circuito representa um custo para o disjuntor, a Figura 5-7 e a Figura 5-8 mostram a simulação da integral de Joule e da energia dissipada no disjuntor durante o processo de extinção do arco.

Como esperado, com 12 chapas na câmara de extinção, a integral de Joule foi sensivelmente menor (14000 contra 32700 A².s) e pode-se afirmar, portanto, que o estresse térmico no circuito ligado a este disjuntor é $(14000/32700)=0,42$ vezes o do minidisjuntor com 4 chapas na câmara de extinção de arco.

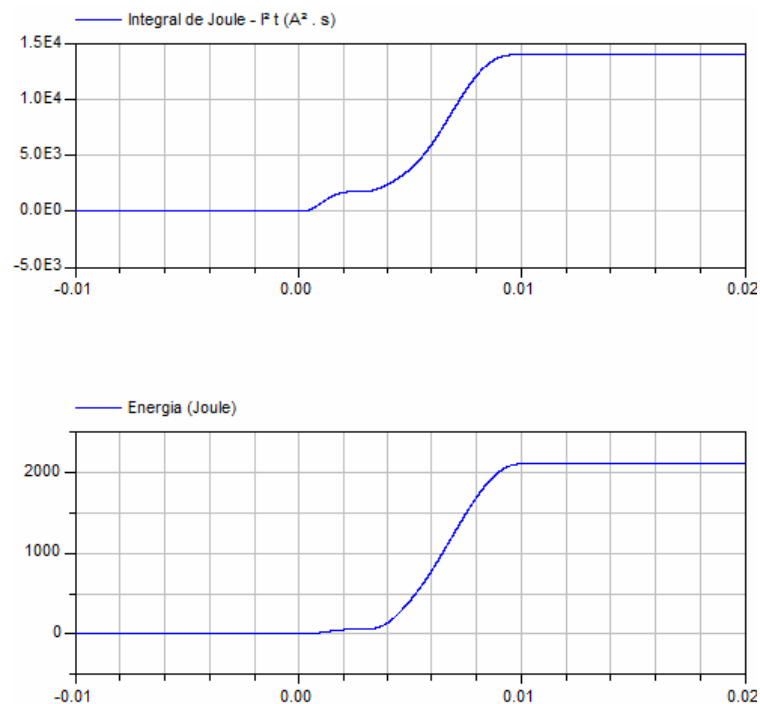


Figura 5-7 - Integral de Joule e energia no disjuntor com 12 chapas na câmara.

Entretanto, o gráfico abaixo em ambas as figuras representa a energia global dissipada no disjuntor (modelada simplesmente como a integral da potência sobre o disjuntor), evidencia que o disjuntor com 12 chapas na câmara de extinção deve ser capaz de dissipar – ou suportar – uma quantidade maior de energia, pois sua simulação apresentou o valor de 2100 J, enquanto que o disjuntor com 4 chapas apresentou apenas 1570 J.

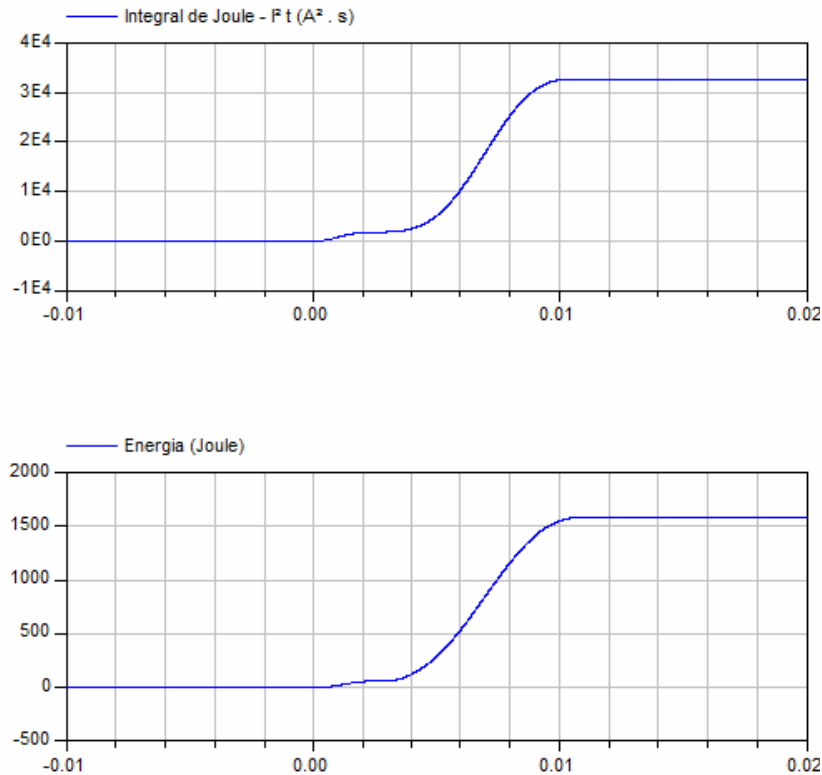


Figura 5-8 - Integral de Joule e energia no disjuntor com 4 chapas na câmara.

5.3 Questões e problemas para desenvolvimento em próximos trabalhos

O modelo apresentado neste trabalho apresenta grande flexibilidade e seus parâmetros podem ser alterados com relativa facilidade para se obter resultados de simulações que sejam condizentes com a prática.

Uma evolução no modelo poderia ser proposta na direção de levar em consideração os aspectos físicos de construção do disjuntor para inferir com menor grau de liberdade as diversas constantes de ajuste do modelo. Apesar da complexidade do comportamento do arco elétrico desencorajar modelagens de sistemas reais, haja vista que até os dias atuais apenas geometrias muito simples têm sido modeladas em centros de pesquisa de ponta em nível mundial (vide Lindmayer [23]), alguns parâmetros como, por exemplo, o material termoplástico da câmara de extinção, o volume da câmara, a força da mola de abertura dos contatos, o material da pastilha de contato, a inércia e/ou massa do contato móvel e tantos outros poderiam ser introduzidos no modelo de forma a permitir que se determine o comportamento de um disjuntor hipotético a partir de um conhecido.

A determinação de um modelo neste nível de detalhe é, com certeza, uma tarefa de muito difícil realização tanto teórica quanto laboratorial, pois a infinidade de ensaios que teriam de ser feitos para verificação e validação dos subsistemas do modelo tornaria a tarefa praticamente inviável, tornando alguma simplificação necessária.

Mais ensaios de verificação também poderiam ser feitos de forma a validar o modelo em outras tensões e frequências de trabalho. É provável que os parâmetros determinados aqui sejam adequados a estas variações, mas apenas a verificação por ensaios poderia confirmar. Infelizmente estas variantes não estavam disponíveis no laboratório utilizado à época.

Um aprofundamento na teoria do arco elétrico em dispositivos de chaveamento de baixa tensão, sua origem e comportamento, a influência dos materiais, condições ambientais e outros aspectos da mecânica quântica do arco elétrico também mereceriam um tratamento mais aprofundado, não sendo aqui trazido por não se tratar do foco principal do trabalho.

6 Conclusões

Ao final deste trabalho obteve-se um modelo do comportamento em curto-circuito de um minidisjuntor. O modelo não é muito complexo de maneira a dificultar o seu uso por um projetista de dispositivos desta natureza, nem simples demais de maneira a reduzir a qualidade dos seus dados calculados.

A proposta inicial de se obter um modelo capaz de determinar os valores da “integral de Joule” e da “corrente de pico de curto-circuito ou característica de limitação de corrente” de um disjuntor nas mais variadas condições foi realizada. Somente um pequeno conjunto de ensaios se torna necessário para ajuste do modelo. As simulações podem ser encarregadas de fornecer os dados para a infinidade de outras condições de curto-circuito necessárias para a obtenção do conjunto completo de curvas.

Outra proposição que era a simulação do comportamento da coordenação por seletividade também foi possibilitada pelo modelo. A validação por ensaios não foi executada aqui, por falta de recursos laboratoriais, mas poderá ser realizada quando houver um laboratório disponível. Uma simulação de seletividade mais coerente poderá ser feita quando da adaptação deste modelo a disjuntores de maior porte, onde a inércia do sistema de disparo do disjuntor maior poderá tornar mais fácil o processo de coordenação por seletividade.

O comportamento do modelo por vezes até surpreendeu, refletindo com precisão comportamentos antes não explicados ou considerados como falha no disjuntor, como a não extinção do arco no primeiro pico da curva da Figura 4-7 e o pequeno pico de tensão proveniente da transição para a etapa de arco na câmara “AC”, que pode ser visualizado nas curvas da Figura 4-13 e da Figura 4-15.

Além dos resultados obtidos do modelo, durante os estudos e ajustes no modelo alguns dogmas foram derrubados:

- “Um número maior de chapas na câmara de extinção aumenta a capacidade de interrupção de um disjuntor”:

Um número maior de chapas de extinção na câmara reduz a corrente que circula no disjuntor e no circuito a que este está ligado, no entanto a quantidade de energia a ser dissipada no disjuntor aumenta significativamente.

- “Quanto menor for a inércia do gatilho de um disparador, tanto melhor é o desempenho do disjuntor”:

Um disjuntor com menor inércia em seu gatilho de disparo, apesar de ter bom comportamento quanto à limitação de corrente, terá dificuldades para executar uma de suas principais tarefas, que é a seletividade quando ligado a disjuntores de menor porte. A simulação executada no item 4.3 evidencia esta situação, pois mesmo com a diferença de oito vezes entre as correntes nominais dos disjuntores, a seletividade só foi garantida (na simulação) até 350 A.

O aspecto mais importante do trabalho foi talvez propiciar o conhecimento da mecânica da extinção de arco em um disjuntor. Aspectos antes obscuros sobre o mecanismo da limitação de corrente, e de quais são os parâmetros de um disjuntor que influenciam no seu desempenho em curto-circuito, podem agora ser mais bem compreendidos e este conhecimento certamente levará a concepção de melhores produtos em futuro próximo.

Referências bibliográficas

- [1] ANHEUSER, M. BERGER, F. KRÄTZSCHMAR, A. Simulation des Schaltverhaltens von Niederspannungs-Leistungsschaltern. Firmenschrift VER 06+ 123-834. Bonn: Klöckner-Moeller GmbH. 1996.
- [2] ASEA BROWN BOVERI, EIKHOFF, W., OTTE, G., Electric Switching Apparatus. Intl. Cl. H01H73/50. DE3734396. Data de depósito: 10/10/1987. Data de publicação: 27/04/1989. www.espacenet.com
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 60898: Disjuntores para proteção de sobrecorrentes para instalações domésticas e similares.(IEC 60898:95 MOD). Rio de Janeiro: ABNT. 2004.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR IEC 60947-2: Dispositivos de Manobra e Comando de Baixa Tensão – Parte 2: Disjuntores. Rio de Janeiro: ABNT. 1998.
- [5] BELZNER, P. et al. Switching, Protection and Distribution in Low Voltage Networks. Munique: Siemens AG e Publicis MCD Verlag. 1994.
- [6] BURKHARD, G. Schaltgeräte der Elektroenergie-technik. Berlin: VDE-Verlag GmbH. 1985.
- [7] CAMINHA, Amadeu C. Introdução à Proteção dos Sistemas Elétricos. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda. 1977.
- [8] CARDOSO, J.R. Introdução ao método dos Elementos Finitos. São Paulo: Edição do Autor. 1996.
- [9] CATÁLOGOS de Produtos da Weg Acionamentos. Disponíveis online no site: www.weg.com.br. Jaraguá do Sul: Weg Acionamentos. 2004.
- [10] DYNASIM AB. Dymola - Dynamic Modeling Laboratory - User's Manual. Lund, Suécia: Dynasim AB.2003.
- [11] EATON CORPORATION, LIAS, E. et al. Circuit Breaker with bypass conductor commutating current out the bimetal during short circuit interruption and method of commutating current out of bimetal. Intl. Cl. H01H71/48. CA2364989. Data de depósito: 18/12/2000. Data de publicação: 18/06/2002. www.espacenet.com

-
- [12] FRANKEN, H. Niederspannungs-Leistungsschalter. Berlin: Springer-Verlag. 1970.
- [13] Fritzon, P., Engelson V., Modelica - A Unified Object-Oriented Language for System Modeling and Simulation. PELAB — Programming Environment Lab Department of Computer and Information Science Linköping University – Suécia. Disponível online no site: <http://www.ida.liu.se/~pelab/modelica>, acessado em outubro/2004.
- [14] GRÜTZMACHER, E. Análise e Modelamento de Disparadores Bimetálicos de Sobrecarga de Disjuntores-Motores de Baixa Tensão. 2003. 155p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.
- [15] HAYT JR., W. Eletromagnetismo. 3a Edição. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora. 1983.
- [16] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 60898-1: Electrical accessories – Circuit-breakers for overcurrent protection for household and similar installations – Part 1: Circuit-breakers for a.c. operation. Edition 1.2. Genebra: IEC. 2003.
- [17] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 60947-1: Low-voltage switchgear and controlgear – Part 1: General rules. Edition 3.2. Genebra: IEC. 2001.
- [18] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 60947-2: Low-voltage switchgear and controlgear – Part 2: Circuit-breakers. Third Edition. Genebra: IEC. 2003.
- [19] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 60947-4-1: Low-voltage switchgear and controlgear – Part 4-1: Contactors and motor starters – electromechanical contactors and motor starters. Genebra: IEC. 2003.
- [20] KINDERMANN, G. Curto-circuito – 2a Edição – Modificada e ampliada. Porto Alegre: Sagra Luzzato. 1997.
- [21] KINDERMANN, G. Proteção de Sistemas Elétricos de Potência – Volume I. Florianópolis: Edição do Autor. 1999.
- [22] LINDMAYER, M. Schaltgeräte Grundlagen, Aufbau, Wirkungsweise. Berlin: Springer-Verlag. 1987.
- [23] LINDMAYER, M. et al. Low-Voltage Switching Arcs – Experiments and modeling. XVth Symposium on Physics of Switching Arc Brno, Czech Republic, 2003

-
- [24] MERLIN GERIN, Boilot, L. et al. Miniature electrical switch with multiple contacts. Intl. Cl. H01H73/02. FR2592738. Data de depósito: 03/01/1986. Data de publicação: 10/07/1987. www.espacenet.com
- [25] NACHTIGAU, K. ANHEUSER, M. BEIER, R. Computer simulation of the short circuit switching behavior of circuit breakers taking into account the flow patterns. Technical Scientific Publication. Klockner-Moeller GmbH. Bonn. 1995.
- [26] NEREAU, J. Cahier technique no. 201 – Discrimination with LV power circuit breakers. Documento eletrônico online – disponível em <http://www.schneider-electric.com> - acessado em dezembro/2003.
- [27] PROGRAMA de formação técnica continuada: Seletividade e continuidade de serviço. Documento eletrônico online – disponível em <http://www.schneider-electric.com> - acessado em dezembro/2003.
- [28] ROSCHKE, T. Modelling of circuit breaker and contactor under short circuit conditions with Dymola. Relatório não publicado. Dresden. 2002.
- [29] ROSCHKE, T. GÜNTHER, I. STUART Jr., R. Simulation of the dynamic behavior of motor circuit breakers under short-circuit current. In: International Conference on Electrical Contacts, Proceedings 20th. Stockholm. 2000. p. 85-90.
- [30] SCHMELCHER, T. Manual de baixa tensão – Vol. 1. – Informações técnicas para aplicação de dispositivos de manobra, comando e proteção. 2a. Edição. São Paulo: Livraria Nobel e Siemens S.A. 1990
- [31] SCHUELLER, P. Cahier technique no. 163 - LV breaking by current limitation. Documento eletrônico online – disponível em <http://www.schneider-electric.com> - acessado em dezembro/2003.
- [32] SERPINET, M. MOREL, R. Cahier technique no. 167 - Energy-based discrimination for low-voltage protective devices. Documento eletrônico online – disponível em <http://www.schneider-electric.com> - acessado em dezembro/2003.
- [33] SHEARER, J. Introduction to System Dynamics. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company. 1967.
- [34] SILVA, J. ANSYS/EMAG – Projeto e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos. São Paulo: Smarttech. 2000.
- [35] SLADE, P. Electrical Contacts – Principles and Applications. New York: Marcel Dekker, Inc. 1999.

- [36] STAMMBERGER, H. PURSCH, H. ZACHARIAS, A. TERHOEVEN, P. Simulation of the temporal behaviour of circuit breakers and motor starters. Proceedings of the 22nd International Conference on Electrical Contacts. Seattle: IEEE. 2004.
- [37] WORKING Manual on Molded Case Circuit Breakers, A. Pittsburgh: Westinghouse. 2000.
- [38] WORKING Model 2D – User’s Manual. San Mateo, California: Knowledge Revolution. 1999.
- [39] WORKSHOP Instalações elétricas de baixa tensão: proteção contra sobrecorrentes e dimensionamento de condutores. Schneider Electric e Procobre. Documento eletrônico online – disponível em <http://www.schneider-electric.com> - acessado em julho/2004.

ANEXO 1 – Código fonte do modelo do arco elétrico do minidisjuntor

```
model Disjuntor_B16
  "Modelo de disjuntor eletrico usando a tensao de arco"

  parameter Real Rligado=0.010 "Resistencia em série total fechado";
// valor medido : 7,5 a 10 mOhm
  parameter Real RligadoARCO=0.010
  "Resistencia em série quando o arco está na câmara";
// valor medido : 10 mOhm
  parameter Real Lligado=10e-6 "Indutância em série total fechado";
// valor medido : ? H
  parameter Real LligadoARCO=10e-6
  "Indutância em série quando o arco está na câmara";
// valor medido : ? H
  parameter Real Rdesligado=1E3 "Resistência Aberto (1-10 kA)";
  parameter Real tRDM=1.7E-3 "Tempo de resposta do disparador magnético";
  parameter Real Ieqmec=100
  "Corrente equivalente à mola de abertura do contato";
  parameter Real Imag=88.25 "Corrente de disparo magnetico In(pico)*3.9";
  parameter Real Ilevit=300 "Corrente de levitacao dos contatos";
  parameter Real Uanca=18 "Tensao de anodo-catodo";
  parameter Real Earc=9500 "Campo elétrico do arco";
  parameter Real constA=0.0035
  "parametro de integracao de prolongamento do arco na etapa IA";
  parameter Real constB=0.001
  "parametro de integracao de aumento da tensão na etapa PA";
  parameter Real ComprIA=0.002
  "Comprimento do arco de transição entre etapas IA e PA";
  parameter Real dRadt=90 "Taxa de crescimento da resistencia na etapa AC";
  parameter Real Uarco=85 "tensao de arco na etapa AC";
  parameter Real Iext=1 "Corrente de extincao do arco";
  parameter Real dRodt=200000 "Taxa de crescimento da resistencia na etapa EA";
  Real Compr "Comprimento equivalente do arco elétrico";
  discrete Real Reaab
  "resistencia durante a extincao do arco (transicao entre EA e ABERTO)";
  Real RInicialDisj "Resistencia do disjuntor no inicio da etapa EA";
  Real RiL "taxa de variacao da resistencia em funcao do tempo na etapa AC";
  discrete Real idir "direção da corrente";
```

```

Real tInicialAbertura "instante de tempo de inicio da etapa PA";
Real tInicialM "instante de tempo de inicio disparo magnético";
Real tEAINicial "instante de tempo de inicio da etapa EA";
Real I2t "Integral de Joule";
Boolean FECHADO(start=true) "Etapa fechado";
Boolean IA(start=false) "Etapa de ignição do arco";
Boolean PA(start=false) "Etapa de prolongamento do arco";
Boolean AC(start=false) "Etapa do arco na câmara";
Boolean EA(start=false) "Etapa de extincao do arco";
Boolean ABERTO(start=false) "Etapa aberto";
Boolean DMativo "Etapa do disparador magnetico ativado";
Boolean DMdisparado "Etapa do disparador magnético disparado";
Boolean vSuficienteParaAC(start=false) "Variavel auxiliar";
extends Modelica.Electrical.Analog.Interfaces.OnePort;

```

equation

```

// Calculo da tensão nos terminais
v = if FECHADO then i*Rligado+der(i)*Lligado else
  if IA then idir*(abs(Earc*Compr) + 1*Uanca + Rligado*abs(i)+abs(der(i)*Lligado)) else
  if PA then idir*(Earc*Compr + (Earc*constB*(time - tInicialAbertura))^2
    + 1*Uanca +Rligado*abs(i)+ abs(der(i)*Lligado)+ ((dRad*(time -
tInicialAbertura))^2)*abs(i)) else
  if AC then idir*(Uarco + (RligadoARCO + RiL)*abs(i)+abs(der(i)*LligadoARCO)) else
  if EA then (dRdt*(time - tEAINicial) + RInicialDisj)*i+idir*(der(i)*LligadoARCO) else
  if ABERTO then i* Rdesligado else
  0;

// Cálculo do comprimento de arco equivalente:
// quando o disparador magnético ainda não estiver atuado e quando o disjuntor não estiver
fechado
// considera a velocidade de abertura dos contatos proporcional à diferença entre a corrente
// instantânea e a corrente necessária para levitação.
// quando o contato não estiver aberto considera proporcional a corrente + Ieqmec (corrente
equivalente
// devido à força da mola principal.
// a constante de proporcionalidade em ambas as relações é constA
der(Compr) = if FECHADO <> true and DMdisparado <> true then constA*(abs(i) - Ilevit)
else

```

```

if FECHADO <> true and DMdisparado then constA*(abs(i) + Ieqmec) else 0;

// Calculo da resistencia durante a extincao do arco (transicao entre EA e ABERTO)
Reaab= if EA then dRodt*(time - tEAINicial) + RInicialDisj else 0;

// Determinacao da direcao da corrente e definicao do sinal da tensao de arco.
idir = if i >.40 then 1 else if i < -.40 then -1 else pre(idir);

// Integral de Joule
der(I2t) = i^2;

// Calculo da variacao da resistencia em funcao do tempo na etapa AC
when pre(AC) then
  RiL = (dRadT*(time - tInicialAbertura))^2;
end when;

// Determinação da resistencia do disjuntor no inicio da etapa EA
when EA then
  RInicialDisj = abs(pre(v))/(abs(pre(i)) + Modelica.Constants.small);
end when;

vSuficienteParaAC = abs(v) > Uarco + Rligado*abs(i) + (dRadT*(time - tInicialAbertura))^
  2*abs(i);

algorithm
// mudança de etapa de EA para ABERTO
when pre(Reaab)>Rdesligado and (EA) then
  EA := false;
  ABERTO := true;
end when;

// Ativa o disparo magnético, ou seja, dispara o mecanismo de disparo e armazena este
instante de tempo.
when (abs(i) > Imag or Disparo.signal[1]) and DMativo <> true then
  tInicialM := time;
  DMativo := true;
end when;

```

```
// Evento em que o disparo magnético ocorreu efetivamente, ou seja, passou-se o tempo de
disparo
when (time - tInicialM > tRDM) and DMativo then
  DMdisparado := true;
end when;

// Se os contatos ainda estiverem fechados, ou seja, a etapa FECHADO ainda estiver ativa,
// o modelo é chaveado para a etapa IA
when DMdisparado and FECHADO then
  IA := true;
  EA := false;
  FECHADO := false;
  ABERTO := false;
end when;

// se a tensão se torna igual a tensão predefinida para a tensão de arco
// o modelo é chaveado da etapa PA para a etapa AC
when pre(vSuficienteParaAC) and PA then
  AC := true;
  PA := false;
end when;

// Se a corrente é maior que a corrente de levitação dos contatos,
// o modelo passa da etapa FECHADO para a etapa IA
when abs(i) > Ilevit and FECHADO then
  FECHADO := false;
  IA := true;
  EA := false;
end when;

// se o comprimento equivalente do arco é maior que o ComprIA o modelo passa da etapa IA
para PA
when Compr > ComprIA and IA then
  PA := true;
  IA := false;
  tInicialAbertura := time;
end when;
```

```
// (apenas se DMdisparado = false)
// transicao de PA para IA se o comprimento do arco for muito reduzido
when Compr < (ComprIA - 0.003) and PA then
  IA := true;
  PA := false;
  EA := false;
end when;

// refechamento dos contatos
when Compr < -0.0001 and FECHADO <> true then
  IA := false;
  PA := false;
  AC := false;
  FECHADO := true;
  reinit(Compr, 0);
end when;

// Etapa de extinção do arco, inicio da transição para alta resistência
when abs(i) < Iext and EA <> true and (IA or PA or AC) then
  AC := false;
  IA := false;
  PA := false;
  tEAINicial := time;
  EA := true;
end when;
end Disjuntor_B16;
```

ANEXO 2 – CATÁLOGO DO MINIDISJUNTOR COMERCIALIZADO PELA WEG
ACIONAMENTOS

Minidisjuntores MBW

**Interruptores
Diferenciais-Residuais DR´s RBW**

Interruptores-Seccionadores SDW

**Minidisjuntores
Interruptores**

Minidisjuntores MBW

Características gerais

O Minidisjuntor termomagnético MBW foi desenvolvido para proteção de instalações elétricas contra sobrecargas e curtos-circuitos. Com correntes que variam de 2 a 63A, o MBW pode ser monopolar, bipolar, tripolar e tripolar + neutro.

Possui mecanismo de "disparo livre", garantindo a atuação do minidisjuntor mesmo com a alavanca de acionamento travada na posição "ligado".

São utilizados contatos especiais de prata que garantem a segurança contra soldagem. A câmara de extinção de arco absorve a energia do arco elétrico e extingue-o, quando da ocorrência de curtos-circuitos. Possui disparadores térmicos e magnéticos para proteção contra sobrecarga e curto-circuito, respectivamente, e bornes de conexão que permitem a conexão de condutores de diferentes diâmetros.



Curvas de Disparo

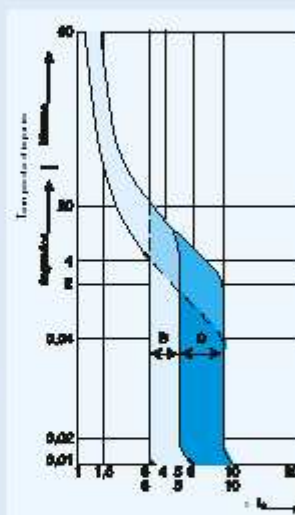
O Minidisjuntor MBW atende as curvas características de disparo B e C, conforme a Norma IEC 60898, podendo ser utilizado nas mais variadas aplicações.

CURVA B

O minidisjuntor de curva B tem como característica principal o disparo instantâneo para correntes entre 3 a 5 vezes a corrente nominal. Sendo assim, são aplicados principalmente na proteção de circuitos com características resistivas ou com grandes distâncias de cabos envolvidas.
Ex: Lâmpadas incandescentes, chuveiros, aquecedores elétricos, etc.

CURVA C

O minidisjuntor de curva C tem como característica o disparo instantâneo para correntes entre 5 a 10 vezes a corrente nominal. Sendo assim, são aplicados para a proteção de circuitos com instalação de cargas indutivas.
Ex: Lâmpadas fluorescentes, geladeiras, máquinas de lavar, etc.



Coordenação de Proteção

Para obter-se uma seleção adequada do minidisjuntor, sua corrente nominal deve ser menor ou igual à corrente máxima admitida pelo condutor da instalação a ser protegida (consultar valores fornecidos pelos fabricantes de condutores).

Interruptores-Seccionadores SDW



Os Interruptores-seccionadores SDW possuem as mesmas carcaças dos minidisjuntores nas versões bipolar, tripolar e tripolar + neutro, porém são desprovidos dos disparadores térmicos e magnéticos, ou seja, não possuem curvas de disparo, tendo a função de seccionar circuitos elétricos com correntes de até 70A conforme norma IEC 60947-3.

Interruptores Diferenciais-Residuais DR's RBW

De acordo com a IEC 60479, que é considerado o mais completo estudo sobre os efeitos da corrente elétrica no corpo humano, na proteção contra choques elétricos deve-se distinguir duas situações: as associadas ao risco de contatos diretos e as associadas ao risco de contatos indiretos.

Na NBR 5410, temos que os *contatos diretos* são os contatos com partes vivas, ou seja, partes que ficam sob tensão em serviço normal, por exemplo, uma pessoa que toca nos pinos de um plugue enquanto o retira da tomada; ou uma pessoa que toca por descuido ou imprudência nos barramentos de um quadro de distribuição.

Os *contatos indiretos* são aqueles contatos com partes que não são vivas em condições normais, por exemplo, o invólucro metálico de um quadro de distribuição ou equipamentos elétrico. Entretanto, do ponto de vista dos efeitos da corrente no corpo humano, tanto faz se o choque é de contato direto ou indireto.

Os *interruptores diferenciais-residuais (DR's)* são os dispositivos utilizados para a proteção de pessoas e instalações quanto a contatos diretos ou indiretos, pois protegem contra os efeitos de correntes de fuga terra, detectando estas fugas que possam existir em circuitos elétricos.



Sensibilidade 30mA ou 300mA

A sensibilidade ou corrente diferencial residual nominal de atuação ($I_{\Delta n}$) é o primeiro fator a ditar se um DR pode ser aplicado à proteção contra contatos indiretos e à proteção complementar contra contatos diretos; ou se ele pode ser aplicado apenas contra contatos indiretos.

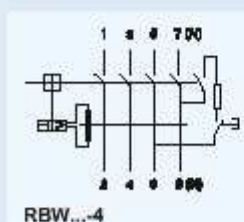
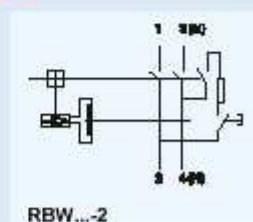
O *DR com sensibilidade de 30mA* é considerado de alta sensibilidade e pode ser utilizado tanto na proteção contra contatos indiretos quanto na proteção complementar contra contatos diretos, garantindo a total proteção das pessoas/usuários.

O *DR com sensibilidade de 300mA* é considerado de baixa sensibilidade e é utilizado na proteção de instalações contra contatos indiretos ou contra riscos de incêndio (conforme normas de instalação), limitando as correntes de falta/fuga à terra em locais que processem ou armazenem materiais inflamáveis, como papel, palha, fragmentos de madeira, plásticos, etc.

Princípio de Funcionamento

O Interruptor DR mede permanentemente a soma vetorial das correntes que percorrem os condutores de um circuito. Se o circuito elétrico estiver funcionando sem problemas, a soma vetorial das correntes nos seus condutores é praticamente nula. Ocorrendo falha de isolamento em um equipamento alimentado por esse circuito, irromperá uma corrente de falta à terra. Quando isto ocorre, a soma vetorial das correntes nos condutores monitorado pelo DR não é mais nula e o dispositivo detecta justamente essa diferença de corrente. Da mesma forma, se alguma pessoa vier a tocar uma parte viva do circuito protegido, a corrente irá circular pelo corpo da pessoa, provocando igualmente um desequilíbrio na soma vetorial das correntes. Este desequilíbrio será também detectado pelo DR tal como se fosse uma corrente de falta à terra.

Diagramas de Ligação



Nota

- (1) Os interruptores DR's bipolares são usados normalmente em sistemas fase/neutro ou fase/fase.
- (2) Os interruptores DR's tetrapolares podem ser usados em qualquer tipo de rede.
- (3) Todos os condutores de fase, incluindo o neutro devem ser conectados ao RBW, entretanto, o condutor terra não deve ser conectado. O condutor do neutro na saída do RBW, deve permanecer isolado em toda instalação e não deve ser conectado ao terra.
- (4) Caso utilize-se um RBW tetrapolar como bipolar, a fase deve passar pelos terminais 5-6 e o neutro por 7-8.

Minidisjuntores MBW

Tabela de Seleção

In (A)	Monopolar		Bipolar		Tripolar		Tripolar + Neutro
	Curva B	Curva C	Curva B	Curva C	Curva B	Curva C	Curva C
2	-	MBW-C2	-	MBW-C2-2	-	MBW-C2-3	-
4	-	MBW-C4	-	MBW-C4-2	-	MBW-C4-3	-
6	MBW-B6	MBW-C6	MBW-B6-2	MBW-C6-2	MBW-B6-3	MBW-C6-3	MBW-C6-3N
10	MBW-B10	MBW-C10	MBW-B10-2	MBW-C10-2	MBW-B10-3	MBW-C10-3	MBW-C10-3N
16	MBW-B16	MBW-C16	MBW-B16-2	MBW-C16-2	MBW-B16-3	MBW-C16-3	MBW-C16-3N
20	MBW-B20	MBW-C20	MBW-B20-2	MBW-C20-2	MBW-B20-3	MBW-C20-3	MBW-C20-3N
25	MBW-B25	MBW-C25	MBW-B25-2	MBW-C25-2	MBW-B25-3	MBW-C25-3	MBW-C25-3N
32	MBW-B32	MBW-C32	MBW-B32-2	MBW-C32-2	MBW-B32-3	MBW-C32-3	MBW-C32-3N
40	MBW-B40	MBW-C40	MBW-B40-2	MBW-C40-2	MBW-B40-3	MBW-C40-3	MBW-C40-3N
50	MBW-B50	MBW-C50	MBW-B50-2	MBW-C50-2	MBW-B50-3	MBW-C50-3	MBW-C50-3N
63	MBW-B63	MBW-C63	MBW-B63-2	MBW-C63-2	MBW-B63-3	MBW-C63-3	MBW-C63-3N

Exemplo de codificação



Obs: Para minidisjuntores monopolar não é necessário informar o número de pólos.

Dados Técnicos

Normas	NBR IEC 60898, NBR IEC 60947-2, IEC 60947-2, IEC 60898 e VDE 0641	
Tensão nominal máxima (Vca)	440Vca - 50/60Hz	
Tensão nominal máxima (Vcc)	60Vcc	
Correntes nominais	2 a 63A	
Frequência	50/60Hz	
Temperatura ambiente (°C)	-20 a +50	
Curvas de disparo	Curva característica de disparo B (3 a 5 vezes In) Curva característica de disparo C (5 a 10 vezes In)	
Vida elétrica	10.000 manobras	
Vida mecânica	20.000 manobras	
Grau de proteção	IP 20	
Secção de condutores (mm ²)	0,75 a 25	
Posição de montagem	sem restrição	
Fixação	Trilho DIN 35mm	
Capacidade de interrupção de curto circuito		
CA	NEMA AB1 120/240V	10kA
	IEC 947-2 230/400V	6kA
	IEC 898 230/400V	3kA
Massa (kg)	0,100 (monopolar)	
	0,197 (bipolar)	
	0,302 (tripolar)	
	0,401 (tripolar + neutro)	

Interruptores Diferenciais-Residuais DR^s RBW

Taboia de Seleção

Corrente Nominal Residual - $I_{\Delta n}$ (mA)	In (A)	Bipolar	Tetrapolar
30	25	RBW30-25-2	RBW30-25-4
30	40	RBW30-40-2	RBW30-40-4
30	63	RBW30-63-2	RBW30-63-4
300	25	RBW300-25-2	RBW300-25-4
300	40	RBW300-40-2	RBW300-40-4
300	63	RBW300-63-2	RBW300-63-4

Exemplo de codificação



Dados Técnicos

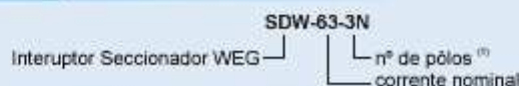
Normas	IEC 1008, EM 61008 e DIN VDE 0664
Número de pólos	2 e 4 pólos
Correntes nominais	25 a 63A
Correntes nominais residuais	30mA e 300mA
Capacidade de interrupção de curto-circuito	6kA, com fusível de backup 63A, gL-gG
Tensão nominal (Un)	230V (bipolar) 230/400V (tetrapolar)
Máxima tensão de operação	1,10 x Un
Tensão de operação do dispositivo de teste (Ut)	100 até 400V
Frequência	50/60Hz
Grau de proteção	IP20
Posição de montagem	sem restrição
Fixação	Trilho DIN 35mm
Terminais	Condutores sólidos ou flexíveis de 1 até 25 mm ²
Expectativa de Vida	5.000 operações
Temperatura ambiente (°C)	-25 a +55
Abertura livre	Sim
Massa (kg)	0,208 (bipolar) 0,416 (tetrapolar)
Tipo	AC (sensível apenas a corrente alternada)

Interruptores-Seccionadores SDW (IEC 947-3)

Taboia de Seleção

In (A)	Bipolar	Triplar	Triplar + Neutro
40	SDW-40-2	SDW-40-3	SDW-40-3N
63	SDW-63-2	SDW-63-3	SDW-63-3N
70	SDW-70-2	SDW-70-3	SDW-70-3N

Exemplo de codificação

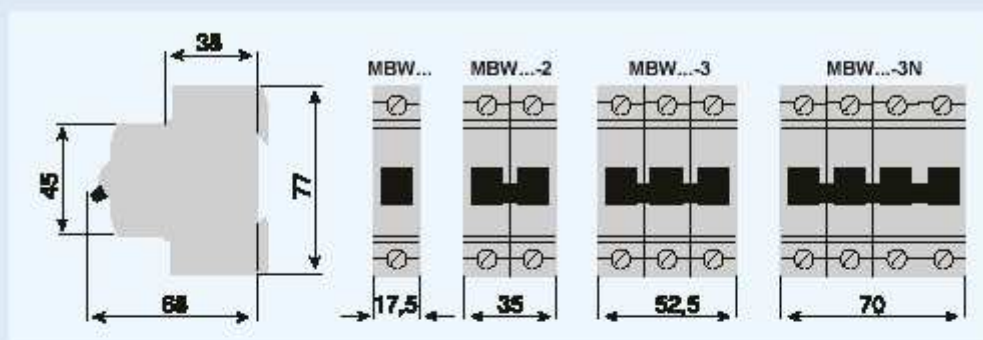


Dados Técnicos

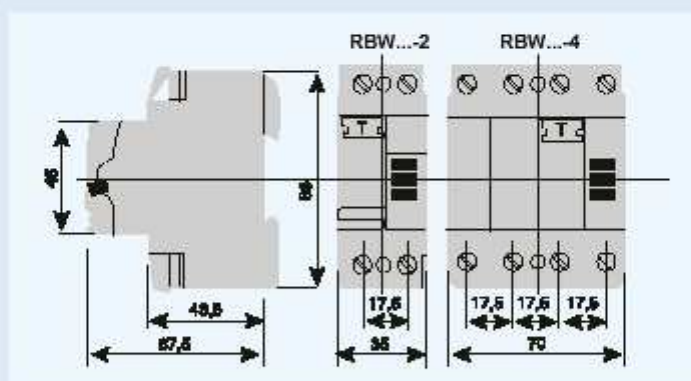
Excetuando-se os dados de curvas características de disparo e as capacidades de interrupção de curto-circuito, os demais dados técnicos dos interruptores-seccionadores são iguais aos minidisjuntores. Isto devido aos interruptores-seccionadores serem desprovidos dos disparadores térmico e magnético, mas serem fabricados nas mesmas carcaças dos minidisjuntores.

Dimensões

Minidisjuntores MBW / Interruptores-Seccionadores SDW




Interruptores Diferenciais-Residuais Dr's RBW



WEG ACIONAMENTOS
 AV. PREF. WALDEMAR GIGLEBA, 3000
 80.256-900 - JARAGUÁ DO SUL - SC
 TEL. (47) 372-4000 - FAX (47) 372-4090
 SÃO PAULO: TEL. (11) 5052-0377 - FAX (11) 5052-4212

ANEXO 3 – REGISTROS DE CALIBRAÇÕES DOS EQUIPAMENTOS USADOS PARA OS ENSAIOS

	Registro de calibração		Data 11/10/2004 Hora 10:12
---	-------------------------------	--	-------------------------------

Equipamento..... 022561 Tipo 0371 OSCILOSCÓPIO
 Grupo..... 4 ELÉTRICOS Entrada em serviço.. 17/08/2004
 Faixa de Operação... 100 MHz/1 GS/s Divisão de escala.....
 Marca..... FLUKE Modelo..... 196B
 Seção..... 0151 ENG. PRODUTO Empresa..... 0003 WA
 Situação..... 0000 NORMAL Data da situação..... 07/10/2004
 Local/Operador..... Meses de calibração 08
 Aplicação..... Periodicidade..... 1 ano

Data de calibração	07/10/2004	U.M. V/s/Hz	Executor	ANDRÉ	Análise	APROVADO
--------------------	------------	-------------	----------	-------	---------	----------


Escala		ACOPL. DC CHA		I.M.		% Leitura 2,5		Vir F.E.		Tol. Geral	
						Valor		Digito 15			
SMC	Descrição	SMP 1	SMP 2	SMP 3	Média	Erro	Tol.	I.M.	Lim.Inf.	Lim. Sup.	An.
20	5 mV/div	20,03	20,05	20,03	20,037	-0,0367	0,6500	0,41			S
50	10 mV/div	49,88	49,91	49,90	49,897	0,1033	1,4000	0,82			S
100	20 mV/div	99,2	99,4	99,3	99,30	0,700	4,000	1,6			S
200	50 mV/div	199,1	199,0	199,3	199,13	0,867	6,500	4,1			S
500	100 mV/div	499,5	499,6	499,5	499,53	0,467	14,000	8,2			S
1	0,2 mV/div	0,993	0,994	0,996	0,9943	0,00567	0,04000	0,016			S
2	0,5 mV/div	1,987	1,989	1,990	1,9887	0,01133	0,06500	0,041			S
5	1 V/div	4,975	4,980	4,983	4,9793	0,02067	0,14000	0,082			S
10	2 V/div	9,84	9,86	9,87	9,857	0,1433	0,4000	0,16			S
20	5 V/div	19,87	19,90	19,87	19,880	0,1200	0,6500	0,41			S
50	10 V/div	49,90	49,94	49,83	49,890	0,1100	1,4000	0,82			S

Escala		ACOPL. DC CHB		I.M.		% Leitura 2,5		Vir F.E.		Tol. Geral	
						Valor		Digito 15			
SMC	Descrição	SMP 1	SMP 2	SMP 3	Média	Erro	Tol.	I.M.	Lim.Inf.	Lim. Sup.	An.
20	5 mV/div	20,00	19,98	20,00	19,993	0,0067	0,6500	0,41			S
50	10 mV/div	49,97	49,96	49,96	49,963	0,0367	1,4000	0,82			S
100	20 mV/div	99,5	99,4	99,5	99,47	0,533	4,000	1,6			S
200	50 mV/div	199,5	199,7	199,7	199,63	0,367	6,500	4,1			S
500	100 mV/div	499,4	499,6	499,6	499,53	0,467	14,000	8,2			S
1	0,2 V/div	0,998	0,997	0,998	0,9977	0,00233	0,04000	0,016			S
2	0,5 V/div	1,988	1,988	1,987	1,9880	0,01200	0,06500	0,041			S
5	1 V/div	4,994	4,994	4,995	4,9943	0,00567	0,14000	0,082			S
10	2 V/div	9,93	9,94	9,94	9,937	0,0633	0,4000	0,16			S
20	5 V/div	19,95	19,96	19,95	19,953	0,0467	0,6500	0,41			S
50	10 V/div	49,96	49,94	49,94	49,947	0,0533	1,4000	0,82			S


Escala		LARGURA DE BANDA CHA		I.M.		% Leitura		Vir F.E.		Tol. Geral	
						Valor		Digito			
SMC	Descrição	SMP 1	SMP 2	SMP 3	Média	Erro	Tol.	I.M.	Lim.Inf.	Lim. Sup.	An.
100	60 mV	146,30	146,50	146,50	146,433	-46,4333		0,15	100,00		S
100	600 mV	139,40	138,80	139,00	139,067	-39,0667		0,15	100,00		S

Escala		LARGURA DE BANDA CHB		I.M.		% Leitura		Vir F.E.		Tol. Geral	
						Valor		Digito			
SMC	Descrição	SMP 1	SMP 2	SMP 3	Média	Erro	Tol.	I.M.	Lim.Inf.	Lim. Sup.	An.
100	60 mV	140,00	140,00	140,00	140,000	-40,0000		0,15	100,00		S
100	600 mV	135,00	135,40	135,00	135,133	-35,1333		0,15	100,00		S

Escala		BASE DE TEMPO		I.M.		% Leitura 0,5		Vir F.E.		Tol. Geral	
						Valor		Digito 2			
SMC	Descrição	SMP 1	SMP 2	SMP 3	Média	Erro	Tol.	I.M.	Lim.Inf.	Lim. Sup.	An.
20	10 us/div	20,00	20,00	20,00	20,000	0,0000	0,1200	1,15			S
200	100 us/div	200,0	200,0	200,0	200,00	0,000	1,200	0,6			S
2	1 ms/div	2,000	2,000	2,000	2,0000	0,00000	0,01200	0,577			S
20	10 ms/div	20,00	20,00	20,00	20,000	0,0000	0,1200	0,58			S
200	100 ms/div	200,0	200,0	200,0	200,00	0,000	1,200	0,6			S

		Registro de calibração							Data 11/10/2004 Hora 10:12		
Escala TENSÃO - DC CHA		I.M.				% Leitura 0,5 Vlr F.E. Valor		Tol. Geral % F.E. Digito 5			
SMP	Descrição	SMC 1	SMC 2	SMC 3	Média	Erro	Tol.	I.M.	Lim.Inf.	Lim. Sup.	An.
250,0000	100mV/div	250,1	250,2	250,2	250,17	0,167	1,750	1,8			S
2,500000	1V/div	2,502	2,503	2,504	2,5030	0,00300	0,01750	0,001			S
25,00000	10V/div	25,03	25,02	25,03	25,027	0,0267	0,1750	0,01			S
250,0000	100V/div	250,1	250,1	250,0	250,07	0,067	1,750	0,1			S
800,000	500V/div	800	799	800	799,7	-0,33	9,00	1,0			S
Escala TENSÃO - AC CHA		I.M.				% Leitura 1 Vlr F.E. Valor		Tol. Geral % F.E. Digito 10			
SMP	Descrição	SMC 1	SMC 2	SMC 3	Média	Erro	Tol.	I.M.	Lim.Inf.	Lim. Sup.	An.
250,000	100mV/div	250,3	250,2	250,2	250,23	0,233	3,500	0,5			S
2,500000	1V/div	2,503	2,502	2,502	2,5023	0,00233	0,03500	0,004			S
25,00000	10V/div	25,02	25,02	25,02	25,020	0,0200	0,3500	0,02			S
250,0000	100V/div	250,1	250,1	250,1	250,10	0,100	3,500	0,1			S
600,000	500V/div	600	600	600	600,0	0,00	16,00	4,0			S
Escala ohm CHA		I.M.				% Leitura 0,6 Vlr F.E. Valor		Tol. Geral % F.E. Digito 5			
SMP	Descrição	SMC 1	SMC 2	SMC 3	Média	Erro	Tol.	I.M.	Lim.Inf.	Lim. Sup.	An.
250,000	500 ohm	249,7	249,9	249,8	249,80	-0,200	2,000	0,1			S
Escala kohm CHA		I.M.				% Leitura 0,6 Vlr F.E. Valor		Tol. Geral % F.E. Digito 5			
SMP	Descrição	SMC 1	SMC 2	SMC 3	Média	Erro	Tol.	I.M.	Lim.Inf.	Lim. Sup.	An.
2,500000	5 kohm	2,498	2,499	2,498	2,4983	-0,00167	0,02000	0,001			S
25,00000	50 kohm	24,99	24,99	24,99	24,990	-0,0100	0,2000	0,01			S
250,0000	500 kohm	250,0	250,0	250,0	250,00	0,000	2,000	0,1			S
Escala Mohm		I.M.				% Leitura 0,6 Vlr F.E. Valor		Tol. Geral % F.E. Digito 5			
SMP	Descrição	SMC 1	SMC 2	SMC 3	Média	Erro	Tol.	I.M.	Lim.Inf.	Lim. Sup.	An.
2,500000	5 Mohm	2,499	2,499	2,498	2,4987	-0,00133	0,02000	0,003			S
25,00000	50 Mohm	24,99	24,99	24,98	24,987	-0,0133	0,2000	0,02			S

Padrões utilizados	
Cód.	Descrição
5500	CALIBRADOR FLUKE 5500A
Observações	

	Registro de calibração	Data 04/10/2004 Hora 08:23

Equipamento..... 017416 Tipo 0105 ALICATE DE CORRENTE
 Grupo..... 4 ELÉTRICOS Entrada em serviço.. 18/07/2001
 Faixa de Operação.... 30/300/3000AAC Divisão de escala..... 100/10/1mV/A
 Marca..... LEM Modelo..... FLEX II
 Seção..... 0149 LABORATÓRIO P&D - WA Empresa..... 0003 WA
 Situação..... 0000 NORMAL Data da situação..... 10/07/2003
 Local/Operador..... Meses de calibração 07
 Aplicação..... Periodicidade..... 1 ano

Data de calibração 05/07/2004	U.M. A	Executor ANDRÉ	Análise APROVADO
--------------------------------------	---------------	-----------------------	-------------------------

Escala 30 AAC		I.M.			% Leitura 5			Tol. Geral			
					Vir F.E.			% F.E.			
					Valor			Digito			
SMP	Descrição	SMC 1	SMC 2	SMC 3	Média	Erro	Tol.	I.M.	Lim.Inf.	Lim. Sup.	An.
5,008	0,5 V	4,990			4,9900	-0,01800	0,25000	0,003			S
10,034	1 V	10,068			10,0680	0,03400	0,50100	0,006			S
15,106	1,5 V	15,520			15,5200	0,41400	0,75500	0,01			S
20,118	2 V	20,67			20,670	0,5520	1,0050	0,01			S
25,03	2,5 V	25,72			25,720	0,6900	1,2500	0,01			S
30,13	3 V	30,95			30,950	0,8200	1,5060	0,01			S

Escala 300 AAC		I.M.			% Leitura 5			Tol. Geral			
					Vir F.E.			% F.E.			
					Valor			Digito			
SMP	Descrição	SMC 1	SMC 2	SMC 3	Média	Erro	Tol.	I.M.	Lim.Inf.	Lim. Sup.	An.
51,64	0,5 V	51,66			51,660	0,0200	2,5820	0,01			S
100,17	1 V	103,33			103,330	3,1600	5,0080	0,01			S
150,05	1,5 V	154,75			154,750	4,7000	7,5020	0,01			S
200,14	2 V	206,3			206,30	6,160	10,007	0,1			S
250,4	2,5 V	258,2			258,20	7,800	12,520	0,1			S
300,5	3 V	309,8			309,80	9,300	15,025	0,1			S

Escala 3000 AAC		I.M. 0,1			% Leitura 5			Tol. Geral			
					Vir F.E.			% F.E.			
					Valor			Digito			
SMP	Descrição	SMC 1	SMC 2	SMC 3	Média	Erro	Tol.	I.M.	Lim.Inf.	Lim. Sup.	An.
200,14	0,2 V	206,1			206,10	5,960	10,007	0,1			S
400,6	0,4 V	412,7			412,70	12,100	20,030	0,1			S
600,1	0,6 V	618,2			618,20	18,100	30,000	0,1			S
800,7	0,8 V	822,3			822,30	21,600	40,030	0,1			S
1003,5	1 V	1030,7			1030,70	27,200	50,170	0,1			S

Padrões utilizados	
Cód.	Descrição
10000	MULTÍMETRO DIGITAL
Observações	