

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Dissertação de Mestrado

Influência do Arco Elétrico em Disjuntores para Estudos de Tensão de Restabelecimento Transitória

Rusângela Rodrigues Guido Cavalcanti

Campina Grande – Paraíba – Brasil

Outubro de 2010

Rusângela Rodrigues Guido Cavalcanti

Influência do Arco Elétrico em Disjuntores para Estudos de Tensão de Restabelecimento Transitória

Dissertação apresentada à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento da Energia

Washington Luiz Araújo Neves, Ph.D.
Orientador

Damásio Fernandes Júnior, D.Sc.
Orientador

Campina Grande – Paraíba – Brasil

Outubro de 2010

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

C376i Cavalcanti, Rusângela Rodrigues Guido.

Influência do arco elétrico em disjuntores para estudos de tensão de restabelecimento transitória / Rusângela Rodrigues Guido Cavalcanti. — Campina Grande, 2010.

53 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática.

Referências.

Orientadores: Prof. Ph.D. Washington Luiz Araújo Neves, Prof. D.Sc. Damásio Fernandes Júnior.

1. Tensão de Restabelecimento Transitória. 2. Disjuntor. 3. Arco Elétrico. 4. Transitórios e Eletromagnéticos. I. Título.

CDU – 621.3.026(043)

INFLUÊNCIA DO ARCO ELÉTRICO EM DISJUNTORES PARA ESTUDOS DE
TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIA

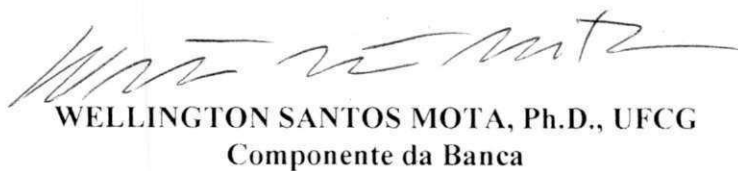
RUSÂNGELA RODRIGUES GUIDO CAVALCANTI

Dissertação Aprovada em 15.10.2010


WASHINGTON LUIZ ARAÚJO NEVES, Ph.D., UFCG
Orientador


DAMASIO FERNANDES JÚNIOR, D.Sc., UFCG
Orientador


BENEMAR ALENCAR DE SOUZA, D.Sc., UFCG
Componente da Banca


WELLINGTON SANTOS MOTA, Ph.D., UFCG
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB
OUTUBRO - 2010

*A meus pais, que tanto me incentivam,
ao meu esposo e companheiro de todos os momentos e as minhas filhas maravilhosas.*

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por tornar possível a realização de mais este sonho.

À Coordenação de Pós-graduação de Engenharia Elétrica (COPELE) pela oportunidade da realização do trabalho.

À Energisa Paraíba, principalmente aos Engenheiros Ricardo Marques Soares e Danielly Formiga P. de Moura, pela oportunidade e disponibilidade para participação neste programa de mestrado.

A meu esposo e filhas, Marcelon J. O. Cavalcanti, Bianca M. Guido Cavalcanti e Júlia M. Guido Cavalcanti por estarem presentes em minha vida.

A meus pais, Ruy I. Guido e Ângela M. R. Guido por tornarem tudo possível e pela dedicação e incentivo.

A meus sogros Marcos Cavalcanti e Rosita Cavalcanti pelo constante apoio.

Meus agradecimentos aos profs. Washington Neves e Damásio Fernandes pela compreensão e confiança em mim depositadas e pelas sugestões, dedicação e orientação na realização deste trabalho.

Aos funcionários do Laboratório de Alta Tensão da UFCG, pela sempre disponibilidade em ajudar.

Aos colegas Alessandro V. Fontes, Danielly F. P. de Moura, nos quais sempre encontrei incentivo. A Wilker Victor da Silva Azevêdo pelas correções no manuscrito e por valiosas sugestões.

Sumário

LISTA DE FIGURAS	viii
RESUMO	ix
ABSTRACT	x
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 Motivação	3
1.2 Objetivos e Contribuições	4
1.3 Organização do Trabalho	4
CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 Descrição Física do Arco Elétrico	8
2.2 Revisão Bibliográfica	11
2.2.1 Ala & Inzerillo (1999)	11
2.2.1.1 Simulação do Modelo do Disjuntor	12
2.2.2 Nitu et al (2005)	13
2.2.3 Martinez et al (2005)	14
2.2.3.1 Modelagem do Arco	16
2.2.3.2 Determinação dos Parâmetros	17
2.2.4 Guardado et al (2005)	19

2.3 Modelo do Arco em Programas do Tipo EMTP	20
CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA	21
3.1 Modelos Matemáticos	22
3.1.1 Equação de Mayr	22
3.1.2 Equação de Cassie	23
3.2 Metodologia	25
3.3 Modelo do Arco	26
CAPÍTULO 4 – SIMULAÇÕES DIGITAIS	27
4.1 Análise de Resultados	27
4.1.1 Circuito de Simulação	27
4.1.2 Sistema Energisa	31
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES	35
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37
ANEXO 1	40
ANEXO 2	43

Lista de Figuras

Figura 2.1 Análise das regiões térmica e dielétrica do disjuntor (D’Ajuz,1987).	6
Figura 2.2 Sistemas conectados por disjuntor.	7
Figura 2.3 Tensão de Restabelecimento Transitória após eliminação de corrente de falta (Azevedo, 2010).	8
Figura 2.4 Disjuntor em operação de interrupção de corrente (Sinder, 2007).	9
Figura 2.5 Modelo do disjuntor (Ala e Inzerillo, 1999).	13
Figura 2.6 a) disjuntor a vácuo – tempo do arco em torno de 35 ms, (b) disjuntor a SF ₆ - tempo do arco que excede 29 ms (Martinez, 2005).	18
Figura 3.1 Fluxograma do processo de cálculo da TRT	25
Figura 3.2 Diagrama do modelo do disjuntor.	26
Figura 4.1 Condição de falta na linha do exemplo 1 (Norma IEC 62271-100, 2006).	28
Figura 4.2 TRT entre os contatos do disjuntor.	28
Figura 4.3 TRT no disjuntor com C _{dL} igual a 2.0 nF.	29
Figura 4.4 TRT no disjuntor com C _{dL} igual a 4.0 nF.	29
Figura 4.5 TRT no disjuntor com corte de corrente em I = 10 A.	30
Figura 4.6 TRT no disjuntor com corte de corrente em I = 15 A.	30
Figura 4.7 Diagrama unifilar de trecho do regional Campina Grande II.	31
Figura 4.8 TRT no disjuntor 12B1 ALT com disjuntor ideal.	32
Figura 4.9 TRT no disjuntor 12B1 ALT com modelo de Mayr.	33
Figura 4.10 Resistência do arco com o modelo de Mayr.	34

RESUMO

Neste trabalho é apresentado um estudo para avaliação da tensão de restabelecimento transitória (TRT) em disjuntores de média tensão incluindo o efeito do arco elétrico. É feita uma análise de sensibilidade da TRT em um circuito simples e posteriormente feita uma avaliação do estudo da TRT em um disjuntor de classe 72,5 kV de uma subestação existente. Os resultados das simulações digitais mostram que a inclusão do arco elétrico no modelo do disjuntor proporciona uma redução do pico da TRT quando comparado com os resultados da representação do disjuntor como uma chave ideal. Assim, para casos em que o pico da TRT encontra-se próximo dos limites estabelecidos por normas quando o disjuntor é modelado por uma chave ideal, recomenda-se que essas simulações sejam refeitas considerando o efeito do arco elétrico no modelo do disjuntor.

Palavras-chave: TRT, disjuntor, arco elétrico, transitórios eletromagnéticos.

ABSTRACT

In this work is a study to determine transient recovery voltages (TRV) of medium voltage circuit breakers taking into account the model of the electric arc, is presented. It has been analyzed the sensitivity of the TRV in a simple circuit and subsequently made an assessing study of TRV in circuit breakers class 72.5 kV at an existing substation. The digital simulation results show that the inclusion of the electric arc in the circuit breaker model provides a reduction in TRV peak values compared to the results of the representation of the circuit breaker as an ideal switch. Thus, for cases where the TRV peak is close to the limits established by breaker standards when the circuit breaker is modeled by an ideal switch, it is recommended that these simulations are done again including the effect of the electric arc in the model of the circuit breaker.

Keywords: TRV, circuit-breaker, electric arc, electromagnetic transients.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O estudo de transitórios eletromagnéticos é essencial para a análise e planejamento de sistemas de energia elétrica, subsidiando desta forma as empresas do setor elétrico na aquisição de novos módulos de manobra de linhas e de transformadores. Neste cenário, faz-se necessária a utilização de metodologias e critérios bem definidos, assim como investigações cíclicas freqüentes da superação de tais equipamentos de modo evitar dispêndios na aplicação dos recursos destinados a este fim.

Os equipamentos pertencentes aos módulos de manobra são dimensionados para suportar correntes de carga e de curto-circuito nominais. No planejamento da expansão, tais equipamentos podem sofrer um aumento das solicitações térmicas e dielétricas, causando muitas vezes a sua superação. São eles: disjuntores, religadores, chaves seccionadoras, bobinas de bloqueio e transformadores de corrente. A superação desses equipamentos pode ocorrer por corrente de carga, corrente de curto-circuito e Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT). Esta última se aplica somente aos disjuntores e religadores, equipamentos responsáveis pela interrupção das correntes de

curto-circuito, cujo correto desempenho se faz fundamental para a confiabilidade dos sistemas de proteção.

O disjuntor é um dispositivo capaz de estabelecer, conduzir e interromper corrente elétrica nas condições normais de circuito e conduzir por um tempo específico e interromper correntes sob condições anormais, tais como curto-circuito (Garzon, 1997). Durante a abertura do disjuntor na ocorrência de um curto-circuito, surge entre seus contatos uma diferença de potencial a qual pode ser elevada e a componente transitória desta diferença de potencial é conhecida como TRT (Alexander e Dufournet, 2005).

Sinteticamente, em decorrência da eliminação de faltas no sistema elétrico, problemas potenciais podem ocorrer devido à superação da capacidade de interrupção do disjuntor, os quais necessitam de estudos específicos para diagnosticar eventuais cenários que comprometam a coordenação do isolamento.

Face às considerações expostas, torna-se então necessário desenvolver de maneira mais eficaz os estudos relacionados à TRT em disjuntores levando em consideração a representação do modelo do arco elétrico que surge em sua câmara de extinção quando da abertura de seus contatos em caso de curto-circuito.

Este estudo possibilita auxiliar no dimensionamento correto dos disjuntores, subsidiando os setores competentes na aquisição destes equipamentos. Esta especificação deve assegurar a confiabilidade na análise de adequabilidade do equipamento, evitando que, durante a execução da manobra, haja riscos na operação do sistema que provoquem a interrupção do suprimento de energia (Alves, 2006).

1.1 Motivação

A expansão do sistema e a instalação de novas unidades geradoras próximas aos centros de carga têm várias conseqüências, tais como, o aumento das correntes de carga e dos níveis de curto-circuito em diversos pontos do sistema, o que causa superações precoces das características nominais dos equipamentos. Desta forma, faz-se necessária a realização de estudos de TRT em disjuntores. Em função disto, em 2006, a Energisa Paraíba realizou os primeiros estudos de TRT em seus disjuntores, considerando os mesmos representados através de uma chave ideal. No entanto, verificou-se que devido ao alto custo aquisitivo dos disjuntores é preciso reavaliar a TRT considerando o modelo do arco elétrico que surge em sua câmara de extinção quando da abertura de seus contatos em caso de curto-circuito, pois em situações em que é necessário avaliar a capacidade de interrupção do disjuntor e a influência sobre a corrente interrompida, um detalhamento do modelo do arco deve ser realizado (Mahseredjian et al, 2001).

Por isso, iniciou-se em 2009 uma linha de pesquisa denominada “Estudos da Adequabilidade de Disjuntores de Média e Alta Tensão Devido as Solicitações de TRT e de Surtos Decorrentes de Manobras em Bancos de Capacitores”, a exemplo de um projeto de pesquisa aprovado pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) cujos recursos foram aportados pelo grupo Energisa e na qual esta dissertação está relacionada (Neves et al, 2009). As pesquisas que constituíram objeto deste projeto foram aplicadas ao sistema elétrico que atende à área de concessão da Energisa Paraíba, tendo como finalidades: a representação adequada de equivalentes do sistema elétrico, a representação adequada de disjuntores para estudos de TRT, em cujo tema esta dissertação está inserida; avaliação de desempenho de disjuntores de média e alta tensão instalados em subestações das empresas do Grupo Energisa no que se refere aos problemas de suportabilidade às solicitações de

TRT, considerando a configuração atual e a expansão do sistema até um horizonte de 10 anos; identificação de alternativas de custo econômico baixo para a redução do pico da TRT; determinação do perfil de tensões no sistema de distribuição quando são feitas manobras em bancos de capacitores e identificação de alternativas de custo econômico baixo para redução da tensão e corrente nos bancos.

1.2 Objetivos e Contribuições

Esta dissertação tem como principal objetivo apresentar uma metodologia para o cálculo da TRT em disjuntores considerando o arco elétrico que surge em sua câmara de extinção quando da ocorrência de um curto-circuito.

O cálculo da TRT é realizado pela MODELS (Dube, 1996), rotina auxiliar de uso geral do ATP (*Alternative Transients Program*). Os valores de pico e taxa de crescimento da TRT são obtidos através de simulações digitais com o ATP.

A contribuição deste trabalho está relacionada com a realização de uma análise de sensibilidade entre o procedimento inicialmente adotado em um sistema elétrico real da Energisa Paraíba e o proposto nesta dissertação, verificando assim a adequabilidade dos disjuntores às solicitações da TRT apresentadas.

1.3 Organização do Trabalho

Além deste capítulo introdutório, para atingir os objetivos propostos, os demais capítulos estão organizados de acordo com a seguinte estrutura:

- ❖ Capítulo 2: Faz-se uma descrição física do arco elétrico e uma revisão bibliográfica do assunto.
- ❖ Capítulo 3: É apresentada a metodologia utilizada para o modelo do arco elétrico nos estudos de TRT em disjuntores e a descrição de como o modelo foi inserido no ATP.
- ❖ Capítulo 4: São apresentadas as análises dos resultados e estudos de sensibilidade do modelo do disjuntor em relação ao arco elétrico.
- ❖ Capítulo 5: São apresentadas as conclusões e propostas para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO

BIBLIOGRÁFICA

Projetar disjuntores e religadores capazes de cumprir suas funções em um sistema elétrico exige uma série de requisitos a serem seguidos pelos fabricantes. Em relação às características nominais, a capacidade nominal de interrupção (CNI) das correntes de curto-circuito e o comportamento térmico e dielétrico do meio de extinção do arco (Figura 2.1) são fatores relevantes para análise da suportabilidade dos equipamentos (D'Ajuz et al, 1987).

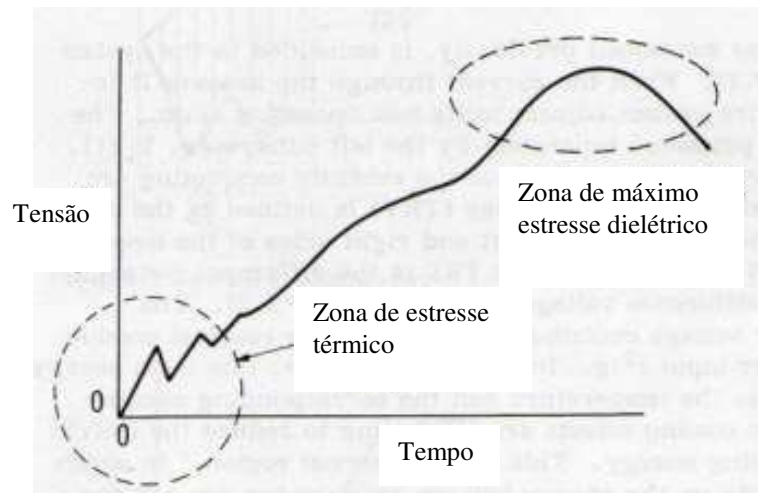


Figura 2.1 Análise das regiões térmica e dielétrica do disjuntor (D'Ajuz, 1987).

No que concerne às condições de sobretensão, é fundamental avaliar a tensão que surge entre os pólos dos dispositivos seccionadores sob cenário de eliminação

de faltas no sistema elétrico. Neste caso, o tipo de curto-circuito e a topologia da rede definem o perfil de oscilação da tensão entre os contatos (Colclaser et al, 1976; Wagner & Smith, 1984; Nobre, 1999; ANSI/IEEE C37.011, 2005). Além disso, através de aferições dos valores presumidos com patamares de referência estabelecidos por normas técnicas, é possível prever se as condições impostas pela rede são suportáveis pelo equipamento (Azevêdo, 2010; Azevêdo et al, 2010).

Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT) é o termo utilizado para especificar a componente transitória da tensão que surge entre os terminais do equipamento quando da sua abertura sob eliminação de uma falta no sistema elétrico.

Após a desconexão das duas redes (Figura 2.2), cada uma delas redistribui sua energia, adequando-se a um novo estado.

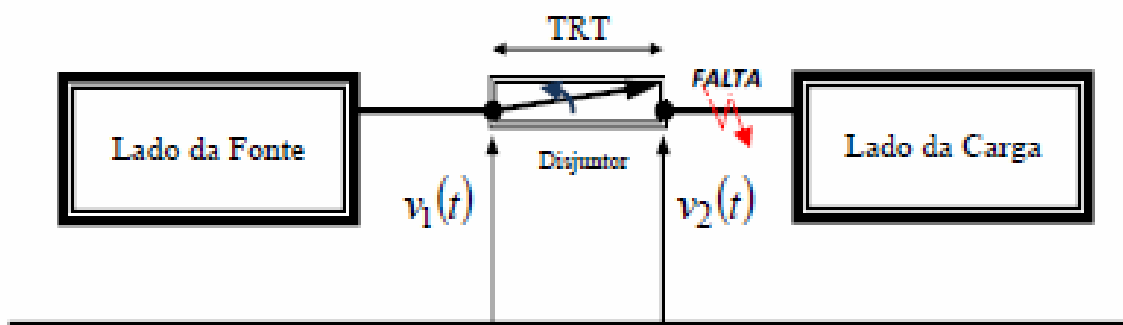


Figura 2.2 Sistemas conectados por disjuntor.

Como resultado da eliminação da corrente de falta, a tensão de restabelecimento que aparece entre os pólos do disjuntor, $v_1(t) - v_2(t)$ apresentará oscilações transitórias até que o regime permanente seja atingido. Na Figura 2.3 é mostrado ilustrativamente o perfil de TRT para um disjuntor de classe de tensão 72,5 kV após a eliminação de corrente de falta (Azevêdo, 2010).

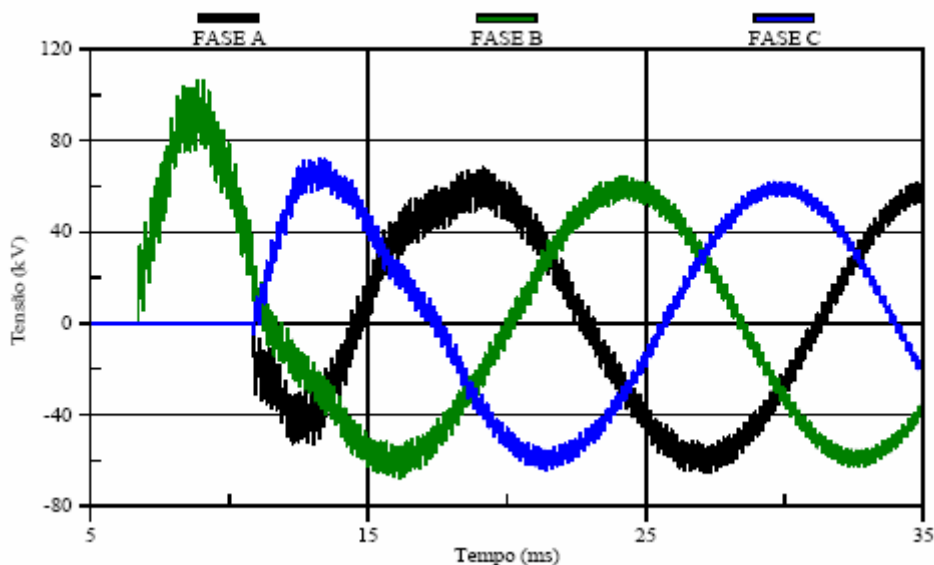


Figura 2.3 Tensão de Restabelecimento Transitória após eliminação de corrente de falta (Azevêdo, 2010).

2.1 Descrição Física do Arco Elétrico

O processo de interrupção de corrente no interior da câmara de extinção do disjuntor durante uma operação de abertura pode ser basicamente dividido em quatro passos, conforme demonstrado na Figura 2.4.

Os quatro passos principais deste processo ocorrem da seguinte forma:

- Passo A: os contatos estão fechados e a corrente passa pelo disjuntor;
- Passo B: com o contato móvel já em movimento, inicia-se a abertura do disjuntor e a corrente é comutada para os contatos do mesmo;
- Passo C: os contatos estão separados, provocando o surgimento de um arco elétrico entre eles que mantém a circulação de corrente entre os terminais do disjuntor. Ao mesmo tempo, na câmara de extinção do disjuntor é produzido um sopro de gás isolante sobre o arco;

– Passo D: os contatos estão em posição totalmente aberta em um caso de sucesso de interrupção de corrente.

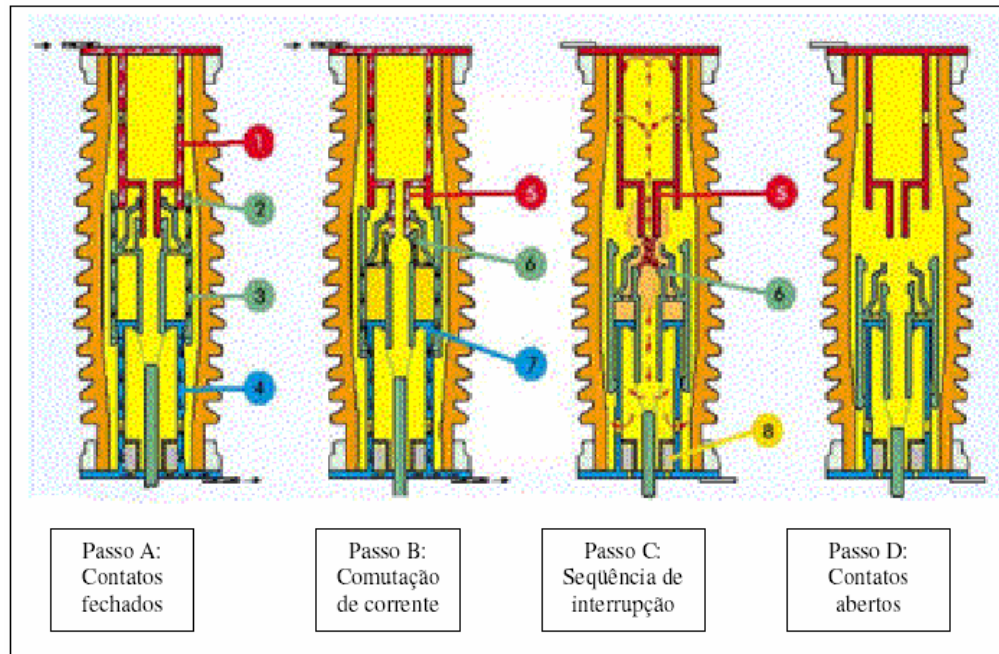


Figura 2.4 Disjuntor em operação de interrupção de corrente (Sinder, 2007).

- Passo A: Contatos fechados

Nesta fase os fenômenos dominantes são: o efeito Joule e os esforços eletrodinâmicos nos contatos. A corrente de carga através dos contatos principais do disjuntor provoca o aquecimento dos mesmos devido ao efeito Joule.

A corrente de curto-circuito através dos contatos do disjuntor causa as seguintes solicitações:

- Aquecimento dos contatos devido ao efeito Joule;
- Centelhamento nos contatos principais devido à comutação da corrente de curto-circuito para os contatos de arco;
- Esforços eletrodinâmicos nos contatos devido ao pico da corrente de curto-circuito.

- Passo B: Fase térmica 1

Imediatamente após a separação mecânica dos contatos de arco do disjuntor, lembrando que o fluxo magnético nas indutâncias do circuito elétrico não pode se alterar instantaneamente, sua continuidade se mantém pelo desenvolvimento de um arco elétrico que conduz a corrente de curto-circuito. O arco que se forma no interior das câmaras de extinção do disjuntor é submetido ao resfriamento devido à ação do meio extintor (óleo, ar comprimido ou gás hexa-fluoreto de enxofre – SF₆).

Para disjuntores a sopro de gás, a extinção é obtida pelo resfriamento do arco devido ao sopro de gás na direção da coluna de arco. No caso de disjuntores a óleo, o processo de interrupção se dá principalmente pela ação do nitrogênio gerado pela decomposição térmica do óleo pelo arco.

O disjuntor é solicitado a suportar termicamente a energia dissipada através do arco elétrico de alta intensidade. Por isso, surgem no interior das câmaras de extinção temperaturas e pressões elevadas.

- Passo C: Fase térmica 2

A fase térmica 2, ou de corrente zero, é definida pelo pequeno intervalo de tempo em torno do instante de interrupção de corrente propriamente dito. A corrente de curto-circuito se aproxima de zero e flui através de um arco de baixa intensidade. As vizinhanças do zero de corrente constituem a região onde os fenômenos térmicos determinam o sucesso ou o fracasso da operação de interrupção. Esta fase caracteriza-se por:

- Acentuado resfriamento da coluna de arco;

- Rápido crescimento da resistência de arco à medida que a corrente se aproxima de zero;
- Interrupção da corrente de curto-circuito;
- Início da TRT.

A interrupção de corrente é predominantemente dependente do balanço de energia no arco. Ou seja, caso o meio extintor retire mais energia do arco que a energia nele dissipada pela corrente de curto-circuito, a interrupção será bem sucedida.

- Passo D: Fase dielétrica

Durante o processo de interrupção, o arco rapidamente perde condutividade à medida que a corrente alternada instantânea se aproxima de zero. Poucos instantes após o zero de corrente, a corrente para de circular pelo circuito. Imediatamente após a extinção do arco elétrico, a coluna residual de arco, cuja condutância se aproxima de zero, é solicitada pela TRT imposta pela rede. Ao mesmo tempo, a capacidade dielétrica entre os contatos do disjuntor inicia sua recuperação, estabelece-se, assim, uma competição entre a solicitação imposta pela rede e a suportabilidade dielétrica entre os contatos do disjuntor. Caso a TRT ultrapasse a suportabilidade dielétrica entre contatos, haverá um re-acendimento do arco e a conseqüente falha do disjuntor.

2.2 Revisão Bibliográfica

2.2.1 Ala & Inzerillo (1999)

Segundo Ala e Inzerillo, a representação da dinâmica do arco através da combinação de duas equações diferenciais encontradas na literatura, as de Mayr e Cassie,

tem uma grande aplicação prática no desenvolvimento de disjuntores e tem mostrado que está de acordo com os dados de medição relatados para disjuntores a SF₆. Os autores Ala e Inzerillo desenvolveram um modelo de disjuntor na rotina MODELS do programa ATP, baseado na combinação das equações de Mayr e Cassie, onde o modelo consiste de dois resistores conectados em série. Um deles representa a resistência de arco calculada através da equação de Mayr e a outra através da equação de Cassie.

Neste caso, para altas correntes, praticamente toda a tensão de arco é suprida pela parcela de Cassie. A parcela de Mayr aumenta justamente antes da corrente zero e abrange toda a TRT após a interrupção da corrente, enquanto a parcela de Cassie vai para zero.

A contribuição deste modelo é que não são necessárias condições de transição, e todos os aspectos de representação, solução e inicialização do disjuntor são controladas pelo usuário.

2.2.1.1 Simulação do Modelo do Disjuntor

Mayr e Cassie desenvolveram duas equações diferenciais baseadas em diferentes abordagens do fenômeno físico natural do arco. Logo, parece correto simular a condutância do arco com dois modelos diferenciais trabalhando simultaneamente e constituindo em dois resistores conectados em série, onde a resistência total do arco R_{arco} é dada por:

$$R_{arco} = \frac{1}{g_c} + \frac{1}{g_m}, \quad (2.1)$$

em que g_c é a condutância de Cassie e g_m é a condutância de Mayr. O modelo do disjuntor utilizado é mostrado na Figura 2.5, onde cada fase do disjuntor é representada por uma

chave tipo 13 controlada pela rotina MODELS (SW2) em série com a resistência do arco a qual é representada por uma resistência variável R_{arco} tipo 91, também controlada pela rotina MODELS.

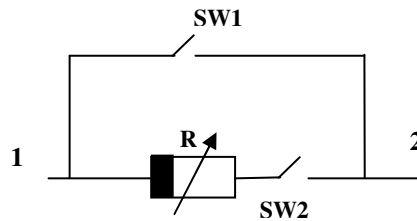


Figura 2.5 Modelo do disjuntor (Ala & Inzerillo, 1999).

O disjuntor está inicialmente na posição fechada e esta resistência R é constante e muito pequena. A outra chave (SW1) está na condição fechada em paralelo com os dois elementos série do disjuntor para representar a condição do disjuntor durante o estado inicial do sistema. A chave paralela é aberta quando o disjuntor começa a abrir. A condutância do arco é calculada até a resistência do arco alcançar um valor elevado predefinido. Neste caso, a chave (SW2) abre e a resistência do modelo é fixada no valor elevado previamente definido, representando assim a abertura efetiva do disjuntor.

2.2.2 Nitu et al (2005)

Os disjuntores são construídos em larga escala, com soluções diferentes e para muitas aplicações. Os testes de curto-circuito nestes dispositivos são indispensáveis, para seu projeto e fabricação e também para a compreensão do fenômeno do arco elétrico, o qual influencia fortemente na melhoria do processo de abertura do disjuntor. Este fenômeno depende de diversos fatores tais como: a coluna do arco, o resfriamento do arco, a suportabilidade dielétrica na abertura dos contatos e a corrente passante em torno do zero. Todos estes fenômenos físicos devem ser considerados no modelo do arco elétrico.

Após a interrupção mecânica do circuito, isto é, durante a queima do arco entre contatos, a coluna do plasma é fortemente ionizada e tem uma boa condutividade elétrica. Como a tensão e a corrente estão em fase, a impedância do espaço ionizado tem uma natureza resistiva, mas esta resistência é não-linear, aumentando de quase zero até infinito, enquanto o arco na câmara de extinção é resfriado. O arco deverá ser extinto quando a corrente estiver passando por zero, quando o resfriamento for intensificado e quando a condutividade residual do gap entre os contatos do disjuntor for suficientemente pequena. Se o arco elétrico não for suficientemente resfriado, a condutância residual do gap é grande e haverá uma reignição do arco, conduzindo a uma abertura mal sucedida do disjuntor.

Esse assunto é uma preocupação real de físicos e engenheiros desde o começo do século passado, quando Cassie e Mayr fizeram os primeiros testes em 1930. O modelo de Mayr é aplicado para aproximação do comportamento do arco elétrico para a corrente passando antes do zero.

2.2.3 Martinez et al (2005)

O disjuntor em condição normal de operação está fechado e uma corrente normal de carga está passando através dos seus contatos. O disjuntor abre seus contatos quando recebe um sinal de trip, e devido à separação dos seus contatos surge o arco elétrico dentro da câmara de extinção do disjuntor o qual deverá ser rapidamente refrigerado pelo gás. Vários modelos podem ser aplicados para análise desse período transitório:

- 1) O modelo simples considerando uma abertura ideal completamente independente do arco. O disjuntor é representado por uma chave ideal que abre na primeira

passagem da corrente pelo zero, depois do sinal de trip enviado. O modelo pode incluir uma aproximação da corrente indutiva. Tal modelo é aplicado em estudos onde a interação entre o arco do disjuntor e o sistema pode ser desprezado. Pode ser usado para obter a tensão entre os contatos do disjuntor, e esta tensão deve ser comparada com a tensão de restabelecimento transitória (TRT).

2) Um modelo mais elaborado considera o arco como uma resistência ou uma condutância variando no tempo. A variação no tempo é determinada pela característica do disjuntor e talvez no conhecimento inicial da corrente de interrupção. Este modelo pode representar o efeito do arco no sistema, mas exige conhecimento avançado do efeito do sistema sobre o arco. Os parâmetros do arco não são facilmente obtidos e o modelo ainda exige o uso de curvas de TRT para determinar a adequação do disjuntor.

3) O modelo mais avançado representa o disjuntor como uma resistência ou uma condutância variando dinamicamente, cujos valores dependem do passado histórico da tensão e da corrente do arco. Este modelo pode representar ambos os efeitos do arco sobre o sistema e o efeito do sistema sobre o arco. Nenhuma curva de TRT é exigida. A maioria destes modelos utiliza uma equação diferencial de primeira ordem. Este tipo de modelo é desenvolvido geralmente para determinar a capacidade de extinção do arco. A maioria destes modelos pode ser usada para estudar o período térmico, alguns podem ser usados para determinar a reignição do arco devido à insuficiente capacidade resistiva da tensão do dielétrico entre os contatos do disjuntor. Este modelo tem importante aplicação nos casos de interrupção de curto na linha e de chaveamento de baixas correntes indutivas. Eles são aplicados exclusivamente para disjuntores a gás (ar, SF₆).

2.2.3.1 Modelagem do Arco

O modelo usual do disjuntor usado na simulação de transitórios eletromagnéticos é uma chave ideal que abre no cruzamento da corrente pelo zero e pode incluir a representação de uma possível corrente indutiva. Tal modelo é aplicável nos estudos onde a interação entre o arco do disjuntor e o sistema pode ser desprezado.

Em outros estudos, onde é necessário avaliar a capacidade de interrupção do disjuntor e sua influência na corrente interrompida, um modelo detalhado do arco deverá ser usado.

Neste caso foram realizados testes em uma hidroelétrica em Québec num sistema de 735 kV. A tensão suficientemente alta do arco pode forçar a corrente interrompida a cruzar o zero mais adiantada do que um modelo ideal do disjuntor. Com o modelo ideal do disjuntor, a corrente cruza o zero após 113 ms comparado apenas a 63 ms quando o modelo do arco do disjuntor é usado. O tempo do arco é de crucial importância para determinar a capacidade de extinção do arco, a qual varia com o tipo de disjuntor dado. Portanto, o modelo do disjuntor tem como principais objetivos:

- do ponto de vista do sistema, determinar todas as tensões e correntes que são produzidas no sistema em consequência da ação do disjuntor;
- do ponto de vista do disjuntor, determinar se a abertura será bem sucedida nas condições do sistema.

Diversos modelos de arco elétrico estão disponíveis na literatura, sendo que alguns são derivados das equações de Cassie e de Mayr, e outros são uma combinação de ambos os modelos. As descrições básicas do comportamento do arco foram feitas primeiramente por Cassie e Mayr.

O modelo de Cassie assume constante a temperatura, a densidade da corrente e a rigidez dielétrica do meio. O mecanismo de retirada de energia é por convecção.

O modelo de Mayr assume que a temperatura do arco é dominante e que o tamanho e o perfil do arco são constantes. A condução térmica é o principal mecanismo de retirada de energia. Uma combinação de ambos os modelos é o modelo Cassie-Mayr, onde a condutância equivalente g_{eqv} pode ser calculada por:

$$\frac{1}{g_{eqv}} = \frac{1}{g_m} + \frac{1}{g_c}, \quad (2.2)$$

em que g_m é a condutância de Mayr e g_c é a condutância de Cassie.

2.2.3.2 Determinação dos Parâmetros

A identificação de modelos de arco tem que ser feita baseada em métodos específicos da avaliação dos parâmetros do arco. Embora alguns métodos sejam apresentados na literatura, não há nenhum método de uso geral prontamente acessível. Na maioria dos casos, é necessário partir dos dados experimentais. Os testes reais fornecem a tensão e a corrente de arco durante o período térmico. A análise destes resultados é baseada em uma equação específica do arco e em suposições adicionais a respeito das funções particulares dos parâmetros. O assunto principal desta análise é o procedimento da avaliação dos parâmetros do arco. A equação e os parâmetros definem o modelo do arco estabelecido em uma base experimental. Um exemplo de testes em laboratório da não interrupção de uma corrente zero atrasada usando disjuntores a vácuo e a SF₆ é mostrada na Figura 2.6.

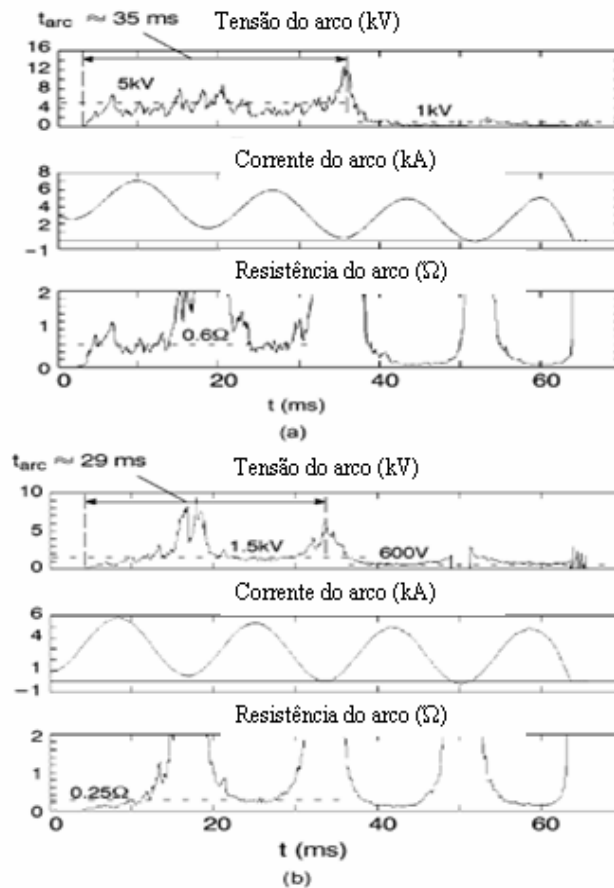


Figura 2.6 a) Disjuntor a vácuo – tempo do arco em torno de 35 ms, (b) Disjuntor a SF₆ - tempo do arco que excede 29 ms (Martinez, 2005).

A seguir faz-se uma descrição sucinta para cada tipo do disjuntor:

- Disjuntor a vácuo: quando os contatos estiverem completamente abertos, a tensão de arco é aproximadamente 5 kV. A resistência de arco média é de 0,6 ohms por abertura. Repetitivos testes de abertura indicam que a amplitude máxima da corrente que os disjuntores a vácuo podem forçar a zero com segurança é 1500 A com uma constante de tempo de 32 ms;

- Disjuntor a SF₆: este disjuntor produz uma tensão de arco média de 1,5 kV. A resistência de arco média é 0,25 ohms por abertura. Repetitivos testes de abertura

indicam que a amplitude máxima da corrente que os disjuntores a vácuo podem forçar a zero com segurança é 400 A com uma constante de tempo de 30 ms.

Estes parâmetros indicam que os disjuntores a SF₆ têm um comportamento muito mais rápido do que o disjuntor a vácuo.

Segundo Martinez, a combinação dos modelos de Cassie e Mayr servem para uma melhor representação do arco elétrico na câmara de extinção do disjuntor.

2.2.4 Guardado et al (2005)

O desempenho de disjuntores de alta tensão durante a interrupção de corrente tem sido alvo de estudos por muitos anos. Ao longo desse tempo, um grande número de publicações foi apresentado com relação a testes e modelos de disjuntor.

A interrupção da corrente está associada à abertura do disjuntor com o fenômeno físico do arco elétrico. Durante a operação do disjuntor, a sua câmara de extinção muda rapidamente de plasma condutivo para um gás isolante. O desempenho do arco elétrico durante este curto período de tempo depende do balanço de energia na coluna do plasma, logo, para que haja sucesso, o disjuntor deve ser capaz de interromper esta corrente num curto período de tempo próximo da corrente zero.

Para avaliar a capacidade do disjuntor durante a interrupção de corrente é necessário um programa de testes, os quais provêem uma oportunidade para estudar a dinâmica do arco em detalhes.

A maioria dos trabalhos publicados é baseada em uma combinação dos modelos de Mayr e Cassie os quais apresentam uma descrição qualitativa do arco na região de baixa e alta corrente, respectivamente. Os resultados do modelo são apropriados aos dados de medição, considerando que os parâmetros do arco são funções da corrente e da

tensão do mesmo.

O modelo de arco desenvolvido por Guardado utiliza a equação sugerida por Mayr para representar a região de baixa corrente e a equação sugerida por Cassie para representar a região de alta corrente.

2.3 Modelo do Arco em Programas do Tipo EMTP

O comportamento do disjuntor durante sua abertura em condição de falta pode ser determinado por uma série de testes práticos para obter resultados válidos. No entanto, de um lado existem os custos de tais testes que são relativamente elevados e igualmente tomam um tempo considerável para serem executados e do outro existe a vantagem de poder simular este comportamento em computadores. Com esta finalidade, foi desenvolvida uma série de modelos de simulação do comportamento de disjuntores em programas do tipo EMTP (*Electromagnetic Transients Program*), visando simular a resposta do mesmo em condições transitórias (Bizjak et al, 1995).

O modelo do arco elétrico utilizado nesta dissertação considera cada pólo do disjuntor representado por uma chave ideal em paralelo com a resistência do arco a qual é representada por uma resistência variável no tempo e controlada pela rotina MODELS. No capítulo três a seguir será descrito com mais detalhes o modelo do arco elétrico no disjuntor.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

Como um elemento de circuito, o arco elétrico se comporta como um resistor não-linear. A relação entre a tensão e a corrente do arco na região próxima a corrente zero pode ser representada através de modelos matemáticos do arco na forma de equações diferenciais.

Um conceito básico da dinâmica do modelo do arco é que a energia térmica armazenada Q no arco elétrico está associada à sua condutância elétrica G (Browne, 1984), isto é a potência de entrada W , se expressa do seguinte modo:

$$W = P + \frac{dQ}{dt}, \quad (3.1)$$

sendo,

$$\frac{dQ}{dt} = W - P, \quad (3.2)$$

e P as perdas de potência no arco. Portanto,

$$G = f(Q) = f\left[\int (W - P)dt\right]. \quad (3.3)$$

Na forma diferencial a equação (3.3) se torna

$$\frac{dG}{dt} = \frac{df(Q)}{dt} = \frac{df(Q)}{dQ} \cdot \frac{dQ}{dt}, \quad (3.4)$$

ou

$$\frac{dG}{dt} = (W - P) \frac{df(Q)}{dQ}. \quad (3.5)$$

3.1 Modelos Matemáticos

O desempenho de disjuntores de alta tensão durante a interrupção da corrente tem sido foco de estudos por muitos anos. Ao longo deste tempo um grande número de publicações tem sido feito a respeito de testes e modelos de disjuntores (Guardado et al, 2005). Ao final da década de 1930, os efeitos de condução térmica foram analisados usando formulações matemáticas iniciadas por Mayr e Cassie.

3.1.1 Equação de Mayr

Um modelo muito usado por Mayr é baseado na física simplificada da coluna do arco com área de seção transversal fixa e com perda de energia por condução térmica onde a condutividade do gás varia quase exponencialmente com a temperatura. Esta análise conduz Mayr para a seguinte relação aproximada

$$f(Q) = K \exp\left(\frac{Q}{Q_0}\right)$$

(3.6)

e

$$P = P_0, \quad (3.7)$$

em que P_0 é a potência de perda no arco considerada constante e Q_0 é a quantidade de energia térmica armazenada no arco considerada constante. Também definindo uma constante de tempo,

$$\theta = \frac{Q_0}{P_0},$$

(3.8)

logo, tem-se que a equação diferencial de Mayr é dada por

$$\frac{dG}{dt} = \frac{G}{\theta} \left(\frac{W}{P_0} - 1 \right),$$

(3.9)

no qual ambos θ e P_0 são parâmetros constantes. O significado de θ é esclarecido pela integração da equação (3.9) com $W = 0$, conduzindo para

$$G = G_0 \exp\left(\frac{-t}{\theta}\right), \quad (3.10)$$

mostrando que sem a potência de entrada, a condutância do arco decai exponencialmente do valor inicial G_0 com a constante de tempo θ .

3.1.2 Equação de Cassie

O modelo de Cassie também se baseou na física da coluna do arco, em que o arco tem uma temperatura constante e é refrigerado por convecção forçada. Neste caso, para correntes relativamente grandes, a condutividade, a densidade de energia armazenada e a potência de perda podem ser consideradas constantes para uma primeira aproximação de modo que G , Q e P na equação (3.3) e (3.5) sejam todos proporcionais a área da seção

transversal A . No regime permanente com $P = W = G^*v^2$ tem-se a relação para a tensão do arco

$$v = \sqrt{\frac{P}{G_0}} = E_0, \quad (3.11)$$

um valor constante independente da área e da corrente. Na condição fora do regime permanente, $P \neq G^*v^2$, G varia com a mudança de A , com a tensão do arco e com parte de E_0 . Novamente definindo a constante de tempo como

$$\theta = \frac{Q}{P},$$

(3.12)

independente de A , logo da equação (3.12) tem-se

$$P = \frac{Q}{\theta}, \quad (3.13)$$

e

$$f(Q) = \frac{Q}{E_0^2 \theta}, \quad (3.14)$$

e

$$\frac{df(Q)}{dQ} = \frac{1}{E_0^2 \theta}. \quad (3.15)$$

Assim a equação (3.5) torna-se

$$\frac{dG(Q)}{dt} = \frac{G}{\theta} \left(\frac{v^2}{E_0^2} - 1 \right). \quad (3.16)$$

Em termos da corrente $i = G^*v$, esta equação pode ser convenientemente escrita

$$\frac{d}{dt}(G^2) + \frac{2G^2}{\theta} = \frac{2}{\theta} \left(\frac{i}{E_0} \right)^2. \quad (3.17)$$

Com tensão ou corrente aplicada igual a zero, estas equações igualmente integram a equação 3.15, mostrando que θ tem o mesmo significado em ambos os modelos. Mais recentemente, tem-se mostrado que as considerações físicas que são a base do modelo de Mayr conduzem igualmente à equação de Cassie se as temperaturas do arco e os níveis correspondentes de ionização forem suficientemente elevados a ponto de a condutividade do gás aumentar de forma aproximadamente linearmente com a temperatura.

3.2 Metodologia

Para melhor compreensão da metodologia, é apresentado na Figura 3.1 um fluxograma do processo para determinar a tensão de restabelecimento transitória. A solução é encontrada usando o pacote computacional ATP (*Alternative Transients Program*) (Leuven EMTP Center, 1987) e sua rotina auxiliar denominada MODELS. O sistema elétrico é representado no ATP e o arco do disjuntor é representado na MODELS. Calcula-se a resistência do arco elétrico utilizando o modelo matemático de Mayr e estes cálculos realizados na MODELS servirão de entrada para o cálculo da TRT no ATP.

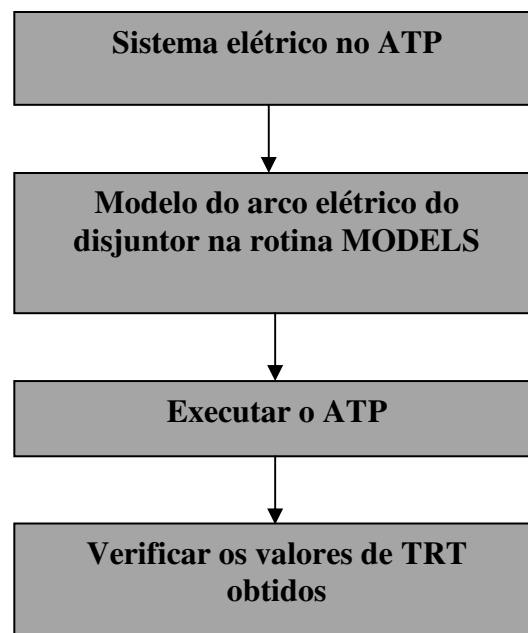


Figura 3.1 Fluxograma do processo de cálculo da TRT.

3.3 Modelo do Arco

O modelo do disjuntor utilizado é mostrado na Figura 3.2, onde cada fase do disjuntor é representada por uma chave ideal (CH) em paralelo com a resistência do arco a qual é representada por uma resistência variável no tempo (R_m) e controlada pela rotina MODELS.

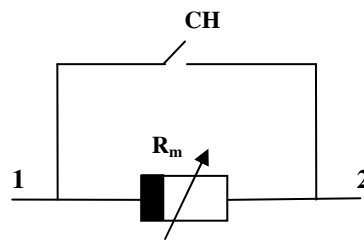


Figura 3.2 Diagrama do modelo do disjuntor.

O disjuntor está inicialmente na posição fechado e nesta condição a resistência (R_m) é constante e muito elevada (o valor utilizado foi igual a $10^7 \Omega$). A chave paralela é aberta quando o disjuntor começa a abrir e a partir deste momento a resistência do arco é calculada. Conforme citado no item 3.2, a resistência do arco proposta e a qual será utilizada nos cálculos da TRT, é a resistência R_m calculada através do modelo de Mayr.

No capítulo 4 serão verificados e analisados os resultados da TRT calculados através da metodologia proposta neste capítulo.

CAPÍTULO 4

SIMULAÇÕES DIGITAIS

Nos capítulos anteriores foi mostrada a importância do conhecimento e do modelo adequado do disjuntor para a determinação da TRT entre os contatos deste equipamento durante a manobra de abertura do mesmo. Foram também ressaltados os aspectos mais relevantes a serem considerados nas análises deste tipo de manobra.

Neste capítulo são apresentados os resultados das simulações de manobra de abertura de disjuntor em conformidade com a metodologia apresentada no capítulo 3.

4.1 Análise de Resultados

4.1.1 Circuito de Simulação

Como um primeiro exemplo, a Figura 4.1 mostra um circuito monofásico, onde ocorre a abertura do disjuntor durante uma condição de falta na linha. O circuito foi representado por uma fonte de tensão (U_f) senoidal de amplitude 245 kV com uma

impedância equivalente da fonte (Z_f), um componente (Z_s) e um capacitor (C_d) para controlar a TRT do lado da fonte, uma linha de comprimento L_1 com impedância de surto Z_1 , um disjuntor a gás SF₆ onde o mesmo tem tensão de isolamento de 300 kV e capacidade de interrupção simétrica de 50 kA, um capacitor (C_{dL}) do lado do disjuntor para reduzir a taxa de crescimento da TRT e uma linha de comprimento L_2 com impedância de surto Z_2 . Para o disjuntor, aplicando o modelo de arco de Mayr os valores de P_0 e θ_m utilizados no exemplo foram 293 kW e 1 μ s, respectivamente. Para maiores detalhes ver Norma IEC 62271-100 e Anexo 1.

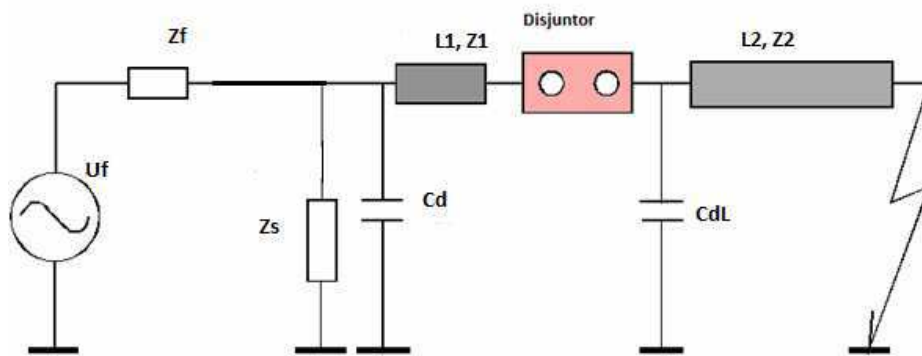


Figura 4.1 Condição de falta na linha exemplo 1 (Norma IEC 62271-100, 2006).

Verificam-se na Figura 4.2 os valores da TRT no disjuntor considerando uma falta na linha L_2 .

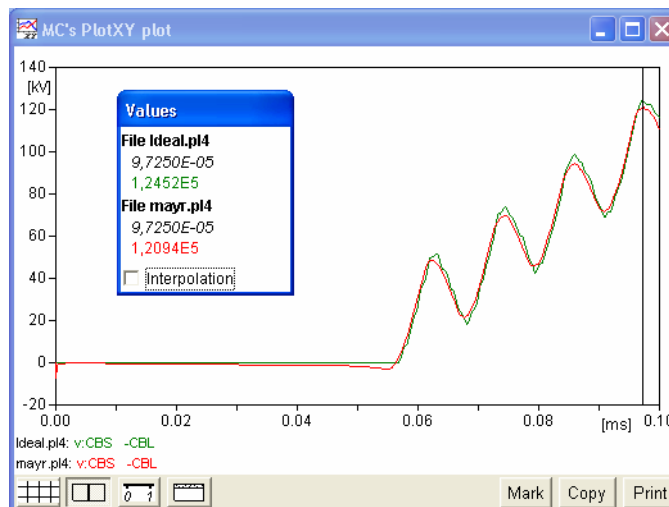


Figura 4.2 TRT entre os contatos do disjuntor.

Verificam-se na Figura 4.3 os valores da TRT no disjuntor considerando uma falta na linha L2 e alterando o valor do capacitor C_{dL} para 2,0 nF.

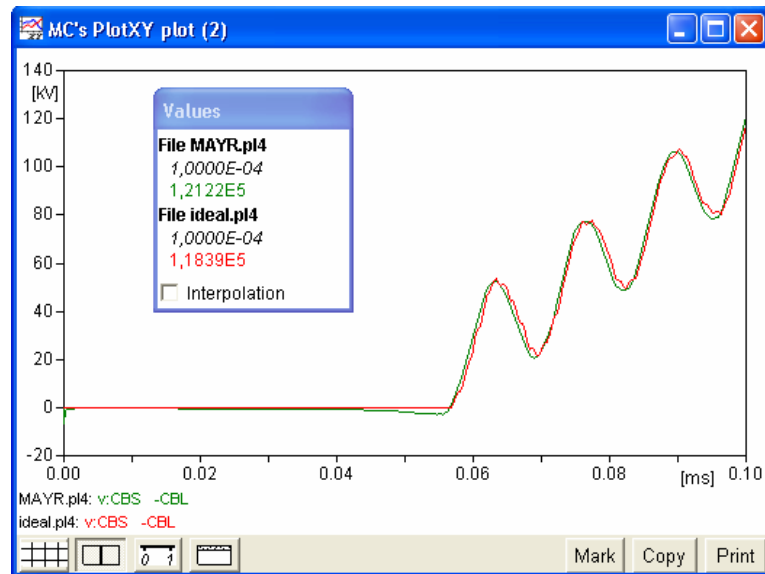


Figura 4.3 TRT no disjuntor com C_{dL} igual a 2,0 nF.

Verificam-se na Figura 4.4 os valores da TRT no disjuntor considerando uma falta na linha L2 e alterando o valor do capacitor C_{dL} para 4,0 nF.

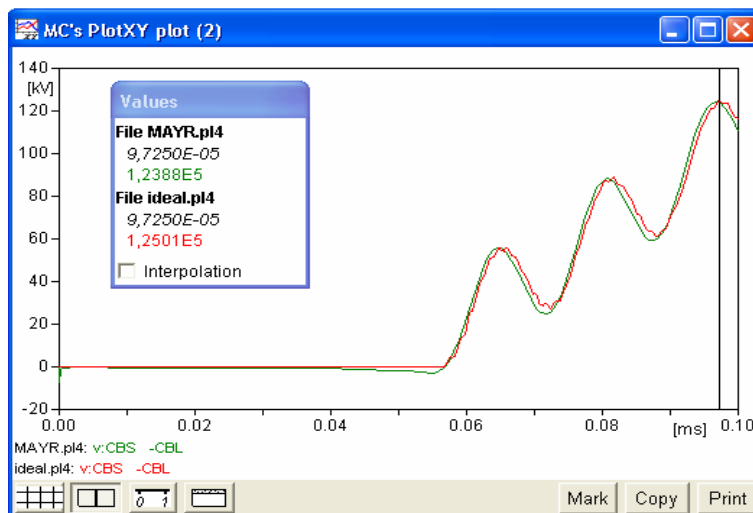


Figura 4.4 TRT no disjuntor com C_{dL} igual a 4,0 nF.

Verificam-se na Figura 4.5 os valores da TRT no disjuntor considerando uma falta na linha L2 e um corte de corrente em $I = 10$ A.

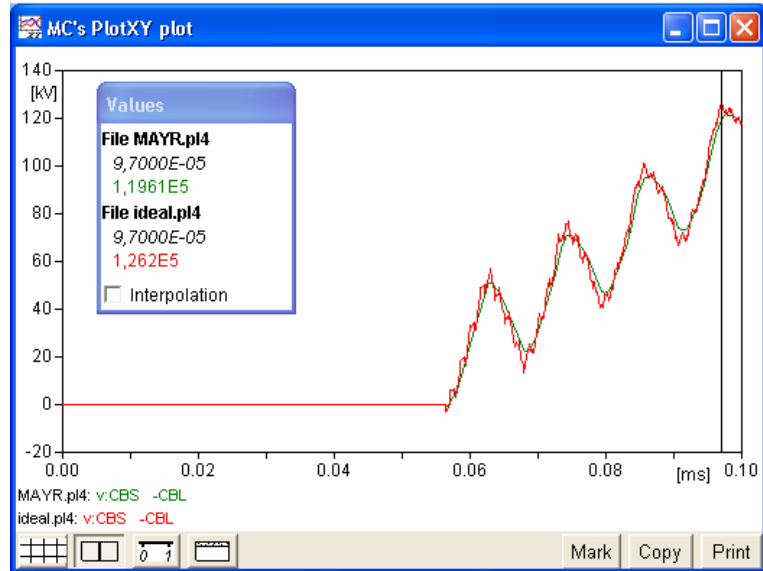


Figura 4.5 TRT no disjuntor com corte de corrente em $I = 10$ A.

Verificam-se na Figura 4.6 os valores da TRT no disjuntor considerando uma falta na linha L2 e um corte de corrente em $I = 15$ A.



Figura 4.6 TRT no disjuntor com corte de corrente em $I = 15$ A.

Conforme verificado na análise de sensibilidade, mesmo variando as condições do sistema e havendo o corte de corrente antes do seu zero natural, comprova-se que a utilização das equações de Mayr para o modelo do arco elétrico no disjuntor proporciona uma redução na TRT entre os seus contatos.

4.1.2 Sistema Energisa

Como um segundo exemplo, a Figura 4.7 mostra um trecho do regional Campina Grande II que atende cargas da Energisa Borborema. Destaca-se, nesta figura, o disjuntor 12B1 da subestação Alto Branco (ALT) que foi utilizado para as simulações de TRT onde o mesmo é de fabricação da AREVA, tem tensão de isolamento de 72,5 kV, capacidade de interrupção simétrica de 25 kA e baseia-se na Norma IEC 62271-100 (ver Anexo 2).

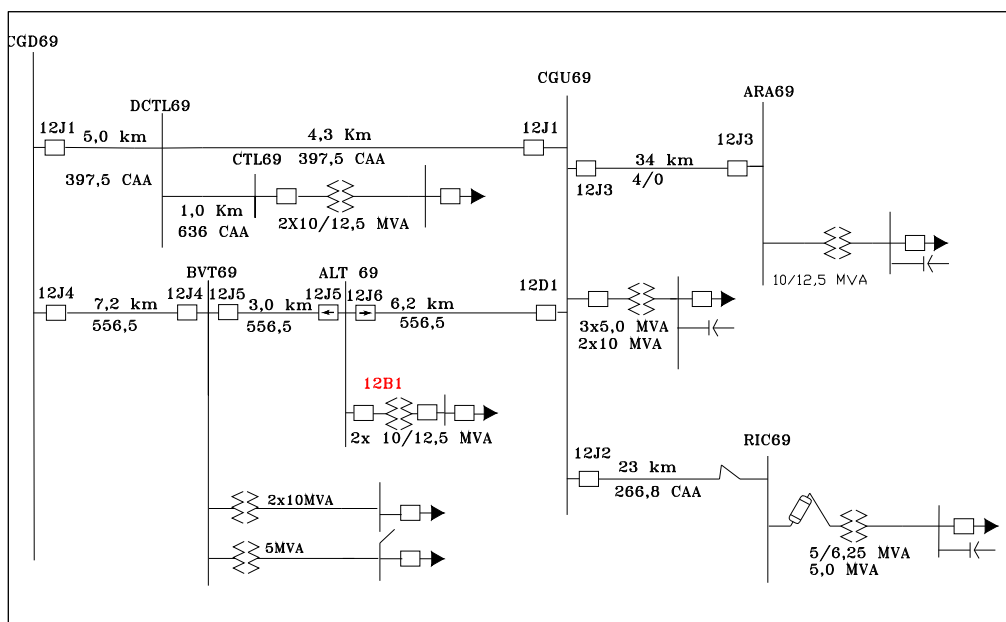


Figura 4.7 Diagrama unifilar de trecho do regional Campina Grande II.

Para as simulações de TRT no sistema real da Energisa Borborema foram consideradas algumas premissas, as quais são:

- equivalente do sistema em Campina Grande 230 kV;
- as subestações de Catolé (CTL), Bela Vista (BVT), Areia (ARA), Campina Grande I (CGU) e Riachão (RIC) estão no patamar de carga leve;

- a subestação de Alto Branco está sem carga;
- os parâmetros de P_0 e θ_m utilizados no modelo do arco são os mesmos do exemplo 1.

Na Figura 4.8 abaixo se verifica a TRT no disjuntor 12B1 da subestação Alto Branco na condição do disjuntor representado através de uma chave ideal, bem como é mostrada a curva da referência de Norma. De acordo com a Norma, este equipamento pode suportar um pico da TRT da ordem de 133 kV (curva verde) e conforme visto na Figura 4.8 o mesmo atinge um valor de 122,96 kV (curva vermelha), atendendo desta forma os critérios estabelecidos pela mesma.

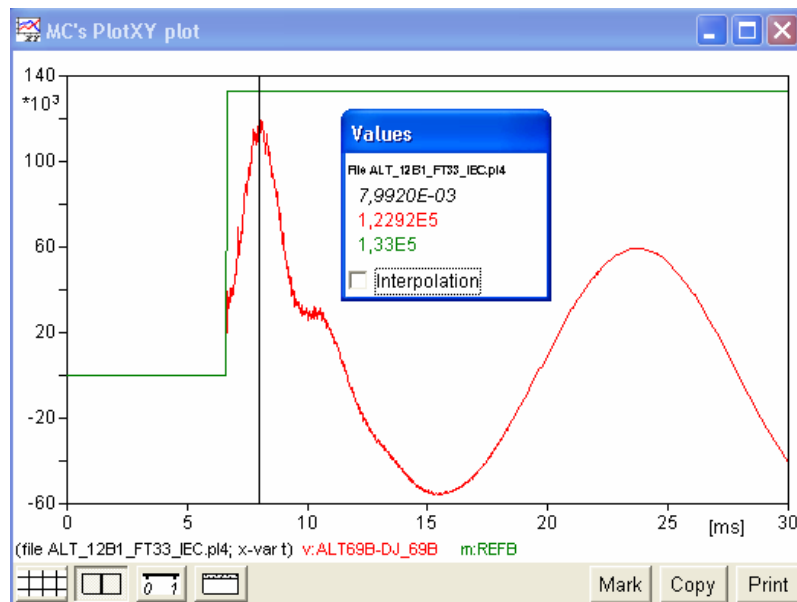


Figura 4.8 TRT no disjuntor 12B1 ALT com disjuntor ideal.

Na Figura 4.9 é mostrada a TRT no disjuntor 12B1 da subestação Alto Branco na condição do disjuntor com o modelo de arco proposto por Mayr, onde se verificam uma redução no pico da TRT da ordem de 2,36 kV quando comparado ao caso do disjuntor ideal, ficando igual a 120,56 kV, conforme visto na Figura 4.9, atendendo

desta forma a expectativa de que a inclusão do modelo do arco no disjuntor reduz o pico da TRT.

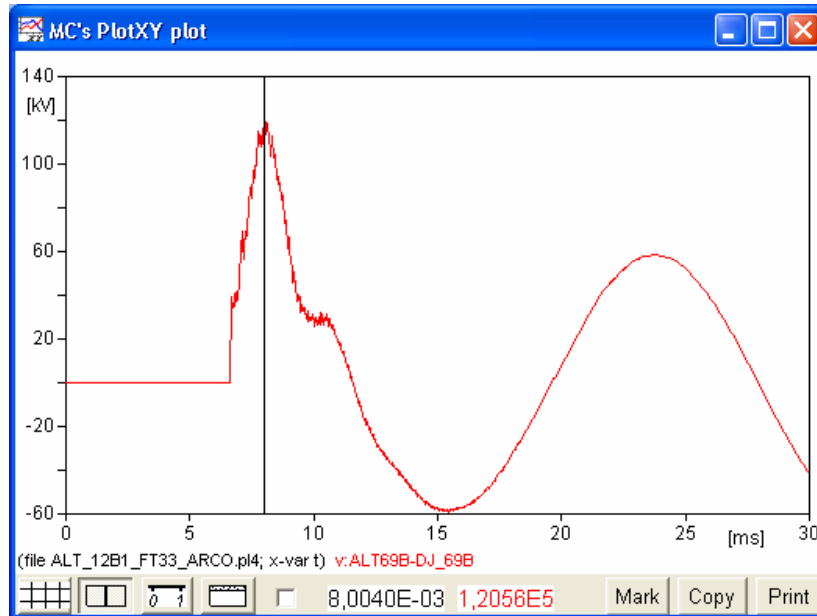


Figura 4.9 TRT no disjuntor 12B1 ALT com modelo de Mayr.

Na Figura 4.10 abaixo é mostrada a resistência do arco calculada através das equações matemáticas de Mayr. Conforme esperado, a resistência evolui até um valor máximo previamente estipulado de 10^7 ohms, o qual representa a condição do disjuntor aberto.

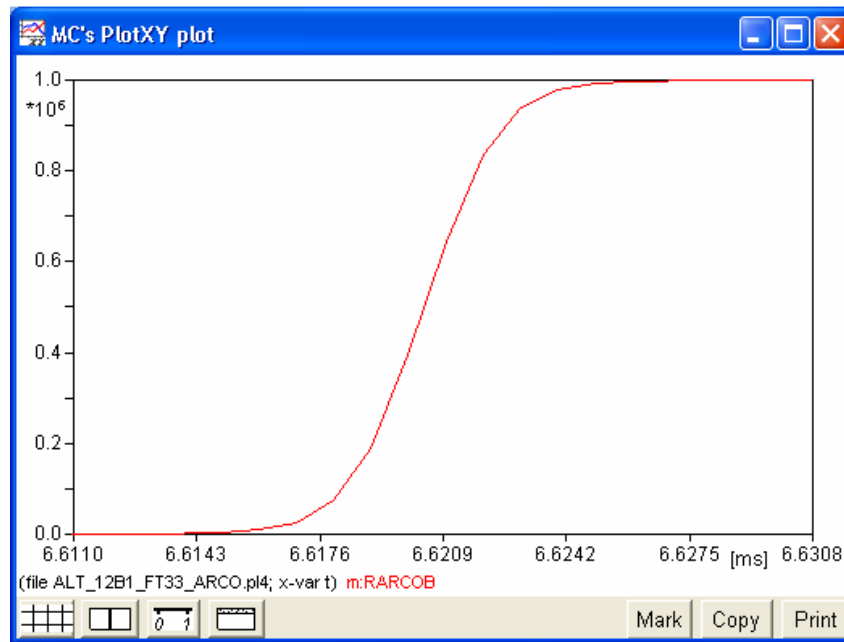


Figura 4.10 Resistência do arco com o modelo de Mayr.

Visando reduzir o esforço computacional e o tempo demandado na utilização do modelo do arco elétrico através das equações de Mayr, indica-se que a representação do disjuntor através do modelo matemático deve ser utilizada quando houver necessidade de um refinamento no estudo, evitando assim uma troca ou aquisição indevida do equipamento de disjunção o qual tem um alto custo aquisitivo.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Foram apresentados os principais conceitos necessários para o cálculo da TRT em disjuntores considerando o modelo adequado dos mesmos no que se refere à representação do arco elétrico que surge na câmara de extinção dos disjuntores quando da ocorrência de um curto-circuito.

As simulações descritas no capítulo 4 mostram que a representação do disjuntor considerando a presença do arco elétrico em estudos de TRT proporciona uma redução no pico da tensão de restabelecimento transitória quando comparados com os valores obtidos utilizando a representação do disjuntor por uma chave ideal. Assim, para casos em que o pico da TRT encontra-se próximo dos limites estabelecidos por normas quando o disjuntor é modelado por uma chave ideal, recomenda-se que essas simulações sejam refeitas considerando o efeito do arco elétrico no modelo do disjuntor.

Este trabalho faz parte de um estudo inicial para o prosseguimento de outras atividades de pesquisa. Um trabalho futuro seria a utilização do modelo de Cassie em conjunto com o modelo de Mayr, podendo desta forma representar além da situação antes

da passagem da corrente pelo zero, representar também a situação após a passagem da corrente pelo zero, levando em consideração uma possível reignição do arco elétrico.

Outros estudos poderiam ser desenvolvidos através da realização de testes em campo para comparar as formas de onda da TRT simuladas com o ATP e as obtidas em disjuntores em um sistema real.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ala, G. and Inzerillo, M., “An Improved Circuit-Breaker Model in Models Language for ATP-EMTP Code”, *IPST 1999 – International Conference on Power Systems Transients*, Budapest, Hungary, June 20-24, 1999.
- Alexander, R. W. and Dufournet, D., *Tutorial Transient Recovery Voltage (TRV) for High-Voltage Circuit Breakers*, IEEE, 2005.
- Alves, F. R., *Características do Disjuntor para Abertura de Linha de Transmissão em Vazio – Metodologia de Estudo*, Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2006.
- ANSI/IEEE C37.011-2005, *IEEE Application Guide for Transient Recovery Voltage for AC High-Voltage Circuit Breakers*. New York, IEEE, Inc., 2005.
- Azevêdo, W. V. S., *Equivalentes de Redes Elétricas e Redução de Tensão de Restabelecimento Transitória*, Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2010.
- Azevêdo, W. V. S., Neves, W. L. A., Fernandes, Jr., Dantas, K. M. C., Cavalcanti, R. R. G., Soares, R. M., “Mitigação de Tensão de Restabelecimento Transitória em Equipamentos de Média Tensão”, *III Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – SBSE 2010*, 2010.

- Bizjak, G., Zunko, P. and Povh, D., “Circuit Breaker Model for Digital Simulation Based on Mayr’s and Cassie’s Differential Arc Equations”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 10, N° 3, July 1995.
- Browne, T. E., *Circuit Interruption Theory and Techniques*, Electrical Engineering and Electronics/21, 1984.
- Colclaser Jr., R. G., Beehler, J. E., Garrity, T. F. “A Field Study of Bus-Fault Transient Recovery Voltages”, *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS 95, N° 6, November/December 1976.
- D’Ajuz, A., Fonseca, C. S., Carvalho, F. M. S., Amon, J., Dias, L. E. N., Pereira, M. P., Esmeraldo, P. C. V., Vaisman, R. e Frontin, S. O., *Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento – Aplicação em Sistemas de Potência de Alta Tensão*, Universidade Federal Fluminense – Editora Universitária, Furnas Centrais Elétricas S. A., 1987.
- Dube, L. *Models in ATP: Language Manual*, 1996.
- Garzon, D., *High Voltage Circuit Breakers Design and Applications*, 1997, Cap. 1, pp 1-27.
- Guardado, J. L., Maximov, S. G., Melgoza, E., Naredo, J. L. and Moreno, P., “An Improved Arc Model Before Current Zero Based on the Combined Mayr and Cassie Arc Models”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, N° 1, January 2005.
- IEC 62271-100, *High Voltage Switchgear and Controlgear – Part 100: High-Voltage Alternating Current Circuit-Breaker*, Edition 1.2, October 2006.
- Leuven EMTP Center, *ATP – Alternative Transients Program: Rule Book*, Belgium, July 1987.
- Mahseredjian, J. and Landry, M., “Arc Modeling for Circuit Breakers”. *Panel Session Data for Modeling System Transients IEEE PES Winter Meeting*, Columbus, 2001.

- Martinez, J. A., Mahseredjian, J. and Khodabakhchian, “Parameter Determination for Modeling System Transients – Part VI: Circuit Breakers”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, N° 3, July 2005.
- Neves, W. L. A., Souza, B. A., Fernandes Jr., D., Dantas, K. M. C., Azevêdo, W. V. S., Soares, R. M., Moura, D. F. P. e Cavalcanti, R. R. G., *Relatório Trimestral (1º trimestre) do Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento – Estudo da Adequabilidade de Disjuntores de Média e Alta Tensão devido às Solicitações de TRT e de Surtos Decorrentes de Manobras em Banco de Capacitores*, abril 2009.
- Nitu, S., Nitu, C. and Anghelita P., *Electric Arc Model for High Power Interrupter*”, Serbia & Montenegro, Belgrade, November 22-24, 2005.
- Nobre, D. M., *Estudo da Adequabilidade de Disjuntores de Classe 15 kV às Solicitações de TRT*, Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, PB, novembro 1999.
- Sinder D., *Métodos de Cálculo da Tensão de Restabelecimento Transitória para Análise da Superação de Disjuntores de Alta Tensão*, Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, março 2007.
- Wagner, C. L. and Smith, H. M., “Analysis of Transient Recovery Voltage (TRV) Rating Concepts”, *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS 103, N° 11, November 1984.

CÁLCULO DA TRT: MODELO DO DISJUNTOR DE MAYR – EXEMPLO 2

```

BEGIN NEW DATA CASE
C MAYR ARC MODEL CALCULATING SLF BREAKING, 300KV, 50KA, L90 CONDITION
C      1      2      3      4      5      6      7
8
C
34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
67890
C TSTEP_TMAX___XOPT___COPT___EPSILN__TOLMAT
.01E-6 100.E-6
C
IOUT__IPLOT___IDOBL___KSSOUT___MAXOUT___IPUN___MEMSAV___ICAT___NENERG___IPR
SUP___
2000      5      1
MODELS

INPUT
tempo { ATP(t) }
CURCB { I(CBS) }

OUTPUT
Rarco

$INCLUDE ModeloM.mdl

USE Arco AS Arco
INPUT
corrente:=CURCB
OUTPUT
Rarco:=Ra
ENDUSE

RECORD
Rarco AS Rarco
ENDRECORD

ENDMODELS
C ELECTRIC NETWORK BRANCH CARDS
C      1      2      3      4      5      6      7
8
C
34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
67890
C
BUS1__BUS2__BUS3__BUS4__RRRRRLLLLLLLCCCCC_____
___X
C ELECTRICAL CIRCUITS
SS      BUS1      .1      11.2 {Source side short circuit Imp.
BUS1      90.      .50 {For bus side TRV
BUS1      .1      .022 {For bus side time delay
-1CBL      .1      450. .29E06 .7      1 {Relevant short line
CBL      .0011{For line side time delay
-1BUS1 CURCB      .3      260. .29E06 .105 1 {ITRV circuit
CBS      1.E8
C **** Mayr arc model output as dynamic resistor corresponding to CB ****

```


ANEXO 2 – ARQUIVO DE DADOS NO ATP

CÁLCULO DA TRT: DISJUNTOR COM MODELO DE ARCO PROPOSTO POR MAYR – EXEMPLO 2 – SISTEMA ENERGISA

```
BEGIN NEW DATA CASE
C
AVERAGE OUTPUT
C
C DELTAT TMAX XOPT COPT EPSLIN TOLMAT TSTART
  1.E-6 30.E-3 60.0 60.0
C IOUT IPLOT IDOUBL KSSOUT MAXOUT IPUN MEMSAV ICAT NENERG IPRSUP
  999999 1 1 1 1 1
C
$PARAMETERS
C
C TAP'S DOS TRANSFORMADORES
C
TAPCGD = 1.012*132.79 {TAP DOS TRANSFORMADORES DE CGD 230/69 kV - 230.000/RAIZ(3)=132.79
TAPARA = 1.000*69.0 {TAP DOS TRANSFORMADORES 69/13.8 kV
TAPCTL = 1.000*69.0 {TAP DOS TRANSFORMADORES 69/13.8 kV
TAPCGU = 0.975*69.0 {TAP DOS TRANSFORMADORES 69/13.8 kV
TAPBVA = 0.975*69.0 {TAP DOS TRANSFORMADORES 69/13.8 kV
TAPBVB = 0.975*69.0 {TAP DOS TRANSFORMADORES 69/13.8 kV
TAPRIC = 0.975*69.0 {TAP DOS TRANSFORMADORES 69/13.8 kV
TAPALT = 1.000*69.0 {TAP DOS TRANSFORMADORES 69/13.8 kV
C
C PARÂMETROS QUE DEFINEM O TIPO DE DEFEITO APLICADO
C
RFALTA = 1.E06 {USE ESTE VALOR PARA FALTA TRIFÁSICA NÃO-ATERRADA
C
TCLOSEA = -1.0 {TCLOSE FASE A - FALTA 3FT, 3F OU 1F NA FASE A, TC = -1.0
TCLOSEB = -1.0 {TCLOSE FASE B - FALTA 3FT, 3F (-1.0) FALTA 1F NA FASE A (1.0)
TCLOSEC = -1.0 {TCLOSE FASE C - FALTA 3FT, 3F (-1.0) FALTA 1F NA FASE A (1.0)
C
TOPENA = 2.0 {TOPEN FASE A - FALTA 3FT, 3F OU 1F NA FASE A, T0 = 1.0
TOPENB = 2.0 {TOPEN FASE B - FALTA 3FT, 3F (1.0) FALTA 1F NA FASE A (2.0)
TOPENC = 2.0 {TOPEN FASE C - FALTA 3FT, 3F (1.0) FALTA 1F NA FASE A (2.0)
C
C TEMPOS DE FECHAMENTO E ABERTURA DOS DISJUNTORES
C
TCDISJA = -1.0 {TCLOSE DISJUNTOR FASE A
TCDISJB = -1.0 {TCLOSE DISJUNTOR FASE B
TCDISJC = -1.0 {TCLOSE DISJUNTOR FASE C
C
TODISJA = 5.E-3 {TOPEN DISJUNTOR FASE A - PARA FALTA 1F NA FASE A, O MESMO ABRE 5ms
DEPOIS
TODISJB = 5.E-3 {TOPEN DISJUNTOR FASE B
TODISJC = 5.E-3 {TOPEN DISJUNTOR FASE C
C
BAR69 = 'ALT69' {LADO DO DISJUNTOR CONECTADO AO TRAF0 69/13.8 kV)
C
BLANK PARAMETERS
C
MODELS
INPUT
TEMPO { ATP(T) }
```

M0001A { I(BAR69A) }
M0001B { I(BAR69B) }
M0001C { I(BAR69C) }

OUTPUT
RARCOA
RARCOB
RARCOC

\$INCLUDE MODELOM.MDL

USE ARCO AS ARCO
INPUT
CORRENTEA:=M0001A
CORRENTEB:=M0001B
CORRENTEC:=M0001C
OUTPUT
RARCOA:=RAA
RARCOB:=RAB
RARCOC:=RAC
ENDUSE

RECORD
RARCOA AS RARCOA
RARCOB AS RARCOB
RARCOC AS RARCOC
ENDRECORD

ENDMODELS
C

=====

C LINHAS DE TRANSMISSÃO 69 kV

=====

C
C LT CGD - DER CTL - 02J1
C <-BUS1<-BUS2<-BUS3<-BUS4<----R<----A<----B<COMPR<L<P
-1CGO69ADCT69A .332 1.883 2.867 5.00
-2CGO69BDCT69B .155 .497 3.635 5.00
-3CGO69CDCT69C

C
C LT DER CTL - CGU 02J1
C <-BUS1<-BUS2<-BUS3<-BUS4<----R<----A<----B<COMPR<L<P
-1DCT69ACGU69A .332 1.883 2.867 4.50
-2DCT69BCGU69B .155 .497 3.635 4.50
-3DCT69CCGU69C

C
C LT DER CTL - CTL
C <-BUS1<-BUS2<-BUS3<-BUS4<----R<----A<----B<COMPR<L<P
-1DCT69ACTL69A .271 1.769 1.572 1.00
-2DCT69BCTL69B .100 .401 4.149 1.00
-3DCT69CCTL69C

C
C LT CGD - BVT - 02J4
C <-BUS1<-BUS2<-BUS3<-BUS4<----R<----A<----B<COMPR<L<P
-1CGO69ABVT69A .287 2.003 1.725 7.00
-2CGO69BBVT69B .111 .435 3.851 7.00
-3CGO69CBVT69C

C
C LT BVT - ALT - 02J5

C <-BUS1<-BUS2<-BUS3<-BUS4<----R<----A<----B<COMPR<L<P
 -1BVT69AALT69A .143 1.001 0.861 4.75
 -2BVT69BALT69B .055 .217 1.925 4.75
 -3BVT69CALT69C

C

C LT ALT - CGU - 02J5

C <-BUS1<-BUS2<-BUS3<-BUS4<----R<----A<----B<COMPR<L<P
 -1ALT69ACGU69A .143 1.001 0.861 4.75
 -2ALT69BCGU69B .055 .217 1.925 4.75
 -3ALT69CCGU69C

C

C LT BAR69 - DJ_69 - RESISTOR VARIAVEL

C <-BUS1<-BUS2<-BUS3<-BUS4<----R<----A<----B<COMPR<L<P
 91BAR69ADJ_69ATACS RARCOA 3
 91BAR69BDJ_69BTACS RARCOB 3
 91BAR69CDJ_69CTACS RARCOC 3

C

C LT CGU - ARA - 02J3

C <-BUS1<-BUS2<-BUS3<-BUS4<----R<----A<----B<COMPR<L<P
 -1CGU69AARA69A .521 1.755 1.777 34.0
 -2CGU69BARA69B .349 .540 3.338 34.0
 -3CGU69CARA69C

C

C LT CGU - RIC - 02J2

C <-BUS1<-BUS2<-BUS3<-BUS4<----R<----A<----B<COMPR<L<P
 -1CGU69ARIC69A .406 1.701 1.811 23.0
 -2CGU69BRIC69B .234 .483 3.416 23.0
 -3CGU69CRIC69C

C

C LT RIC - ITA - 02J2

C <-BUS1<-BUS2<-BUS3<-BUS4<----R<----A<----B<COMPR<L<P
 -1RIC69AITA69A .406 1.699 1.797 38.0
 -2RIC69BITA69B .234 .483 3.411 38.0
 -3RIC69CITA69C

C

=====

C TRANSFORMADORES CGD 230/69 kV

=====

C * TRAFO 04T3 DA SE CGD - 230/69/13.8 kV - 100MVA

C * ASEA - SERIE 55909

C <REQ. WORD > <I ><FLUX><BTOP><RMAQ> F
 TRANSFORMER TCGD3A
 9999

C <-BUS1<-BUS2<-BUS3<-BUS4<----R<----L<----V

1CGD23ANT3CGD 80.01 TAPCGD
 2CGO69ACGO69B -1.112 69.0
 3CG313A .1214 7.97
 TRANSFORMER TCGD3A TCGD3B
 1CGD23BNT3CGD
 2CGO69BCGO69C
 3CG313B
 TRANSFORMER TCGD3A TCGD3C
 1CGD23CNT3CGD
 2CGO69CCGO69A
 3CG313C

C

C * TRAFO 04T5 DA SE CGD - 230/69/13.8 kV - 100 MVA

C * ASEA - SERIE 42346

C

C <REQ. WORD > <I ><FLUX><BTOP><RMAQ> F
 TRANSFORMER TCGD5A
 9999

C <-BUS1<-BUS2<-BUS3<-BUS4<----R<----L<----V
 1CGD23A 79.14 TAPCGD
 2CGO69ACGO69B -1.128 69.0
 3CG513A .01284 7.97
 TRANSFORMER TCGD5A TCGD5B
 1CGD23B
 2CGO69BCGO69C
 3CG513B
 TRANSFORMER TCGD5A TCGD5C
 1CGD23C
 2CGO69CCGO69A
 3CG513C

C
 C * TRAFO 04T4 DA SE CGD - 230/69 kV - 100 MVA
 C * ASEA - SERIE 54609

C <REQ. WORD > <I ><FLUX><BTOP><RMAQ> F
 TRANSFORMER TCGD4A
 9999

C <-BUS1<-BUS2<-BUS3<-BUS4<----R<----L<----V
 1CGD23A 35.18 TAPCGD
 2CGO69ACGO69B 9.498 69.0
 TRANSFORMER TCGD4A TCGD4B
 1CGD23B
 2CGO69BCGO69C
 TRANSFORMER TCGD4A TCGD4C
 1CGD23C
 2CGO69CCGO69A

C
 =====
 C REFERENCIA PARA TERRA NO DELTA Yc = 1.131 MICRO MHO
 =====

C <-BUS1<-BUS2<-BUS3<-BUS4<----R<----L<----C
 C CGO69A 1.131
 C CGO69B 1.131
 C CGO69C 1.131

C
 =====
 C TRANSFORMADORES 69/13,8 kV
 =====

C
 C TRAFO 02T1 ALT
 C

TRANSFORMER TALT1A
 9999
 C <-BUS1<-BUS2<-BUS3<-BUS4<----R<----L<----V
 1DJ_69ADJ_69B 49.99 TAPALT
 2ALT13A 0.666 7.967
 TRANSFORMER TALT1A TALT1B
 1DJ_69BDJ_69C
 2ALT13B
 TRANSFORMER TALT1A TALT1C
 1DJ_69CDJ_69A
 2ALT13C

C
 C TRAFO 02T2 ALT
 C

TRANSFORMER TALT2A
 9999
 C <-BUS1<-BUS2<-BUS3<-BUS4<----R<----L<----V
 1DJ_69ADJ_69B 49.99 TAPALT
 2ALT13A 0.666 7.967
 TRANSFORMER TALT2A TALT2B
 1DJ_69BDJ_69C
 2ALT13B
 TRANSFORMER TALT2A TALT2C
 1DJ_69CDJ_69A
 2ALT13C
 C
 C TRAF0 02T1 ARA
 C
 TRANSFORMER TARA1A
 9999
 C <-BUS1<-BUS2<-BUS3<-BUS4<----R<----L<----V
 1ARA69AARA69B 48.13 TAPARA
 2ARA13A 0.642 7.967
 TRANSFORMER TARA1A TARA1B
 1ARA69BARA69C
 2ARA13B
 TRANSFORMER TARA1A TARA1C
 1ARA69CARA69A
 2ARA13C
 C
 C TRAF0 02T1 CTL
 C
 TRANSFORMER TCTL1A
 9999
 C <-BUS1<-BUS2<-BUS3<-BUS4<----R<----L<----V
 1CTL69ACTL69B 57.49 TAPCTL
 2CTL13A 0.766 7.967
 TRANSFORMER TCTL1A TCTL1B
 1CTL69BCTL69C
 2CTL13B
 TRANSFORMER TCTL1A TCTL1C
 1CTL69CCTL69A
 2CTL13C
 C
 C TRAF0 02T2 CTL
 C
 TRANSFORMER TCTL2A
 9999
 C <-BUS1<-BUS2<-BUS3<-BUS4<----R<----L<----V
 1CTL69ACTL69B 46.49 TAPCTL
 2CTL13A 0.619 7.967
 TRANSFORMER TCTL2A TCTL2B
 1CTL69BCTL69C
 2CTL13B
 TRANSFORMER TCTL2A TCTL2C
 1CTL69CCTL69A
 2CTL13C
 C
 C TRAF0 02T1 BVT
 C
 TRANSFORMER TBVT1A
 9999
 C <-BUS1<-BUS2<-BUS3<-BUS4<----R<----L<----V

1BVT69ABVT69B 59.20 TAPBVA
 2BVTA1A 0.789 7.967
 TRANSFORMER TBVT1A TBVT1B
 1BVT69BBVT69C
 2BVTA1B
 TRANSFORMER TBVT1A TBVT1C
 1BVT69CBVT69A
 2BVTA1C
 C
 C TRAF0 02T2 BVT
 C
 TRANSFORMER TBVT2A
 9999
 C <-BUS1<-BUS2<-BUS3<-BUS4<----R<----L<----V
 1BVT69ABVT69B 59.34 TAPBVB
 2BVTA1A 0.791 7.967
 TRANSFORMER TBVT2A TBVT2B
 1BVT69BBVT69C
 2BVTA1B
 TRANSFORMER TBVT2A TBVT2C
 1BVT69CBVT69A
 2BVTA1C
 C
 C TRAF0 02T3 BVT
 C
 TRANSFORMER TBVT3A
 9999
 C <-BUS1<-BUS2<-BUS3<-BUS4<----R<----L<----V
 1BVT69ABVT69B 89.41 TAPBVB
 2BVTB1A 1.192 7.967
 TRANSFORMER TBVT3A TBVT3B
 1BVT69BBVT69C
 2BVTB1B
 TRANSFORMER TBVT3A TBVT3C
 1BVT69CBVT69A
 2BVTB1C
 C
 C TRAF0 02T1 CGU
 C
 TRANSFORMER TCGU1A
 9999
 C <-BUS1<-BUS2<-BUS3<-BUS4<----R<----L<----V
 1CGU69ACGU69B 89.41 TAPCGU
 2CGU13A 1.192 7.967
 TRANSFORMER TCGU1A TCGU1B
 1CGU69BCGU69C
 2CGU13B
 TRANSFORMER TCGU1A TCGU1C
 1CGU69CCGU69A
 2CGU13C
 C
 C TRAF0 02T2 CGU
 C
 TRANSFORMER TCGU2A
 9999
 C <-BUS1<-BUS2<-BUS3<-BUS4<----R<----L<----V
 1CGU69ACGU69B 89.41 TAPCGU
 2CGU13A 1.192 7.967
 TRANSFORMER TCGU2A TCGU2B

1CGU69BCGU69C
 2CGU13B
 TRANSFORMER TCGU2A TCGU2C
 1CGU69CCGU69A
 2CGU13C
 C
 C TRAF0 02T3 CGU
 C
 TRANSFORMER TCGU3A
 9999
 C <-BUS1<-BUS2<-BUS3<-BUS4<----R<----L<----V
 1CGU69ACGU69B 93.69 TAPCGU
 2CGU13A 1.249 7.967
 TRANSFORMER TCGU3A TCGU3B
 1CGU69BCGU69C
 2CGU13B
 TRANSFORMER TCGU3A TCGU3C
 1CGU69CCGU69A
 2CGU13C
 C
 C TRAF0 02T4 CGU
 C
 TRANSFORMER TCGU4A
 9999
 C <-BUS1<-BUS2<-BUS3<-BUS4<----R<----L<----V
 1CGU69ACGU69B 58.92 TAPCGU
 2CGU13A 0.786 7.967
 TRANSFORMER TCGU4A TCGU4B
 1CGU69BCGU69C
 2CGU13B
 TRANSFORMER TCGU4A TCGU4C
 1CGU69CCGU69A
 2CGU13C
 C
 C TRAF0 02T5 CGU
 C
 TRANSFORMER TCGU5A
 9999
 C <-BUS1<-BUS2<-BUS3<-BUS4<----R<----L<----V
 1CGU69ACGU69B 59.99 TAPCGU
 2CGU13A 0.799 7.967
 TRANSFORMER TCGU5A TCGU5B
 1CGU69BCGU69C
 2CGU13B
 TRANSFORMER TCGU5A TCGU5C
 1CGU69CCGU69A
 2CGU13C
 C
 C TRAF0 02T1 RIC
 C
 TRANSFORMER TRIC1A
 9999
 C <-BUS1<-BUS2<-BUS3<-BUS4<----R<----L<----V
 1RIC69ARIC69B 92.12 TAPRIC
 2RIC13A 1.228 7.967
 TRANSFORMER TRIC1A TRIC1B
 1RIC69BRIC69C
 2RIC13B
 TRANSFORMER TRIC1A TRIC1C

```

1RIC69CRIC69A
2RIC13C
C
C TRAF0 02T2 RIC
C
TRANSFORMER          TRIC2A
  9999
C <-BUS1<-BUS2<-BUS3<-BUS4<----R<----L<----V
1RIC69ARIC69B      84.84 TAPRIC
2RIC13A          1.131 7.967
TRANSFORMER TRIC2A      TRIC2B
1RIC69BRIC69C
2RIC13B
TRANSFORMER TRIC2A      TRIC2C
1RIC69CRIC69A
2RIC13C
C
C -----
C TRAF0 DE ATERRAMENTO NO BARRAMENTO 69 KV DA SE CAMPINA GRANDE
C IMPEDÂNCIA DO TRAF0 = 40,4 OHMS/FASE - 69 KV
C -----
TRANSFORMER          TTCGO1
  9999
C <BUS1><BUS2>      <RLK><LLK><VRAT>          I
1CGO69ACGZZ1A      .404 20.20 69.0
2  CGZZ1B          .404 20.20 69.0
TRANSFORMER TTCGO1      TTCGO2
1CGO69BCGZZ1B
2  CGZZ1C
TRANSFORMER TTCGO1      TTCGO3
1CGO69CCGZZ1C
2  CGZZ1A
C <N 1><N 2><REF1><REF2><R ><XL><XC>          O
CGZZ1A          10.E8
CGZZ1B          10.E8
CGZZ1C          10.E8
C
=====
C      CARGAS REPRESENTADAS POR CIRCUITOS RL PARALELO
=====
C CARGA DA SE ARA - P = 3.41 MW E Q = 1.49 MVAR
C TENSÃO = 0.99 PU
C
C <-BUS1<-BUS2<-BUS3<-BUS4<----R<----L<----C
ARA13A          55.81
ARA13B          55.81
ARA13C          55.81
ARA13A          115.3
ARA13B          115.3
ARA13C          115.3
C
C CARGA DA SE CTL - P = 5.85 MW E Q = 0.10 MVAR
C TENSÃO = 0.99 PU
C
C <-BUS1<-BUS2<-BUS3<-BUS4<----R<----L<----C
CTL13A          32.55
CTL13B          32.55
CTL13C          32.55
CTL13A          1904.0

```

CTL13B 1904.0
 CTL13C 1904.0

C
 C CARGA DA SE BVT_A - P = 8.82 MW E Q = 2.11 MVAR
 C TENSÃO = 0.99PU

C
 C <-BUS1<-BUS2<-BUS3<-BUS4<----R<----L<----C
 BVA13A 21.58
 BVA13B 21.58
 BVA13C 21.58
 BVA13A 87.68
 BVA13B 87.68
 BVA13C 87.68

C
 C CARGA DA SE BVT_B - P = 1.56 MW E Q = 0.37 MVAR
 C TENSÃO = 0.99 PU

C
 C <-BUS1<-BUS2<-BUS3<-BUS4<----R<----L<----C
 BVB13A 122.3
 BVB13B 122.3
 BVB13C 122.3
 BVB13A 497.2
 BVB13B 497.2
 BVB13C 497.2

C
 C CARGA DA SE CGU - P = 7.47 MW E Q = 3.52 MVAR
 C TENSÃO = 0.99 PU

C
 C <-BUS1<-BUS2<-BUS3<-BUS4<----R<----L<----C
 CGU13A 25.49
 CGU13B 25.49
 CGU13C 25.49
 CGU13A 47.73
 CGU13B 47.73
 CGU13C 47.73

C
 C CARGA DA SE RIC - P = 1.79 MW E Q = 1.13 MVAR
 C TENSÃO = 0.99 PU

C
 C <-BUS1<-BUS2<-BUS3<-BUS4<----R<----L<----C
 RIC13A 106.4
 RIC13B 106.4
 RIC13C 106.4
 RIC13A 168.5
 RIC13B 168.5
 RIC13C 168.5

C
 =====
 C BANCO DE CAPACITOR DA SE CAMPINA GRANDE II - CHESF - 41.5 MVAR
 =====

C
 C <-BUS1<-BUS2<-BUS3<-BUS4<----R<----L<----C
 CGO69A 8716.7
 CGO69B 8716.7
 CGO69C 8716.7

C
 =====
 C IMPEDÂNCIA EQUIVALENTE DE CURTO-CIRCUITO 230 KV CGD
 =====

```

C
C <-BUS1<-BUS2<-BUS3<-BUS4<---R><-----X>
51FONT1ACGD23A      0.450  10.52
52FONT1BCGD23B      1.818  14.06
53FONT1CCGD23C
C
=====
C      RESISTOR AUXILIAR PARA O CURTO-CIRCUITO
=====
C <-BUS1<-BUS2<-BUS3<-BUS4<---R<---L<---C
RESIST      RFALTA
C
=====
C      DISJUNTOR DA SE
=====
C
C <-BUS1<-BUS2<---TCLOSE<---TOPEN<-IEPSILON<---VFLASH<-----WORD
BAR69ADJ_69A  TCDISJA  TODISJA      3
BAR69BDJ_69B  TCDISJB  TODISJB      3
BAR69CDJ_69C  TCDISJC  TODISJC      3
C
C      CURTO-CIRCUITO APLICADO
C
C <-BUS1<-BUS2<---TCLOSE<---TOPEN<-IEPSILON<---VFLASH<-----WORD
DJ_69ARESIST TCLOSEA  TOPENA
DJ_69BRESIST TCLOSEB  TOPENB
DJ_69CRESIST TCLOSEC  TOPENC
C
BLANK SWITCH
C
=====
C      FONTES DE TENSÃO
=====
C
C      FONTE EQUIVALENTE NA BARRA DE CAMPINA GRANDE 230 kV
C
C <-BUS1 <AMPLITUDE<FREQUENCY<---TIME0<-----A1<---TIME1<---TSTART<---TSTOP
14FONT1A 197183.924  60.  0.00      -1.
14FONT1B 197183.924  60. -120.00  -1.
14FONT1C 197183.924  60. 120.00  -1.
C
BLANK SOURCE
BLANK
BLANK
BLANK

```

MODELS UTILIZADA COM O MODELO PROPOSTO POR MAYR – EXEMPLO 2

MODEL ARCO

```

INPUT
CORRENTEA
CORRENTEB
CORRENTEC

```

```

VAR
ABSIA
IA

```

```

GMA
G0MA
RAA
ABSIB
IB
GMB
G0MB
RAB
ABSIC
IC
GMC
G0MC
RAC

CONST
N0 {VAL:293000.}
TETA {VAL:1.0E-6}

OUTPUT
RAA
RAB
RAC

HISTORY
GMA {DFLT:0}
GMB {DFLT:0}
GMC {DFLT:0}

INIT
RAA:=1.0E8
RAB:=1.0E8
RAC:=1.0E8

ENDINIT

EXEC

IA := CORRENTEA
ABSIA := ABS(IA)
G0MA := ((ABSIA)**2)/N0
DIFFEQ(1|D0 + TETA|D1)|GMA:=G0MA
RAA := 1/(GMA + 1.0E-6)

IB := CORRENTEB
ABSIB := ABS(IB)
G0MB := ((ABSIB)**2)/N0
DIFFEQ(1|D0 + TETA|D1)|GMB:=G0MB
RAB := 1/(GMB + 1.0E-6)

IC := CORRENTEC
ABSIC := ABS(IC)
G0MC := ((ABSIC)**2)/N0
DIFFEQ(1|D0 + TETA|D1)|GMC:=G0MC
RAC := 1/(GMC + 1.0E-6)

ENDEXEC

ENDMODEL

```