

**MARCUS VINICIUS GARBELOTTI**

**Sistema Digital para Manobra Sincronizada de Disjuntores  
Estudo e Especificação Funcional**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo para obtenção do título  
de Mestre em Engenharia Elétrica.

São Paulo  
2006

**MARCUS VINICIUS GARBELOTTI**

**Sistema Digital para Manobra Sincronizada de Disjuntores  
Estudo e Especificação Funcional**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo para obtenção do título  
de Mestre em Engenharia Elétrica.

**Área de Concentração: Sistemas de Potência  
Orientador: Prof. Dr. José Antonio Jardini**

São Paulo  
2006

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

**Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.**

**São Paulo, de maio de 2006.**

**Assinatura do autor** \_\_\_\_\_

**Assinatura do orientador** \_\_\_\_\_

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

**Garbelotti, Marcus Vinicius**

**Sistema digital para manobra sincronizada de disjuntores - estudo e especificação funcional / M. V. Garbelotti. – ed.rev. – São Paulo, 2006.**

**86 p.**

**Dissertação (Mestrado) –Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.**

**1.Chaveamento controlado 2.Disjuntores 3.Manobra sincronizada 4.Sobretensão 5.Sobrecorrente I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II.t.**

**À Anita, minha mãe, e à Luciana,  
minha esposa. Com amor, carinho e  
apoio, elas sempre me ajudaram a  
avançar.**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço inicialmente aos muitos não citados nominalmente, mas que ajudaram, informaram, influenciaram e batalharam por mim.

À ANEEL, por proporcionar a oportunidade de capacitação por meio dos Programas de Pesquisa e Desenvolvimento e à sua equipe voltada a esses Programas, cujo trabalho tem sido grandioso. Agradeço especialmente à Sra. Gláucia Regina da Cruz Gomes e ao Sr Aurélio Calheiros de Melo Junior, além dos ex-funcionários Srs. Gliender Pereira de Mendonça e Máximo Luiz Pompermayer.

Aos Srs. Abraham Tudisco Santiago, Oswaldo Errerias Ortega, Teofrasto de Souza Barbeiro e Marcelo Tosto de Oliveira Carvalho, pelo incentivo e pela flexibilidade dos horários que possibilitaram-me o comparecimento às aulas e atividades pertinentes ao Programa de Mestrado.

Aos colegas Ronaldo Pedro Casolari, Mário Masuda e, especialmente, a Gerson Yukio Saiki, que incentivaram, trabalharam e colaboraram intensamente. Sem a ajuda deles, nada teria sido possível.

Ao orientador, Prof. Dr. José Antonio Jardini, que não apenas norteou o rumo, mas transmitiu muitos conhecimentos, me manteve no caminho e teve participação fundamental em todas as etapas.

## RESUMO

Garbelotti, M. V, **Sistema Digital para Manobra Sincronizada de Disjuntores - Estudo e Especificação Funcional**  
. 2006. 86 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

Nesta dissertação, discorre-se sobre manobra sincronizada de disjuntores. Entre as atividades desenvolvidas para a sua elaboração estão a análise de transitórios causados por manobras em capacitores, reatores e linhas de transmissão, estudos de sobretensão e estudos para a determinação de instantes favoráveis às manobras, sob o ponto de vista de diminuição de sobretensões.

Completa a dissertação a especificação de equipamento de sincronismo que, a partir de medições em tempo real de variáveis elétricas - que interferem nas sobretensões - e de variáveis climáticas - que interferem no tempo de acionamento dos contatos dos disjuntores - calculam o tempo de atraso necessário para o fechamento elétrico em instantes mais convenientes.

Palavras-chave: Chaveamento controlado, disjuntores, manobra sincronizada, sobretensão, sobrecorrente.

## ABSTRACT

Garbelotti, M. V, **Sistema Digital para Manobra Sincronizada de Disjuntores - Estudo e Especificação Funcional**. 2006. 86 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

The scope of this dissertation is the study of synchronized switching of circuit breakers. The transients caused by capacitor, reactor and transmission line switching are analyzed, for overvoltage evaluation and to determined the favorable time in the wave that leads to smallest overvoltages.

Finally the specification of an equipment is produced. The equipment acquire, in real time, the values of electrical variables (current and voltages) the ambient temperature and oil pressure in the circuit breaker operating mechanism, voltage in the auxiliary system and assign a delay in the breaker switching time in order to control overvoltages.

Keywords: Controlled switching, circuit breakers, synchronized maneuver, overvoltage, overcurrent.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>Preâmbulo .....</b>	<b>1</b>
1.1	<i>Introdução .....</i>	<i>1</i>
1.2	<i>Objetivos.....</i>	<i>3</i>
1.3	<i>Apresentação .....</i>	<i>4</i>
<b>2</b>	<b>Estado da arte .....</b>	<b>6</b>
2.1	<i>Tecnologias de chaveamento controlado .....</i>	<i>6</i>
2.2	<i>Energização e religamento de linhas de transmissão .....</i>	<i>9</i>
2.3	<i>Energização de transformadores em vazio .....</i>	<i>10</i>
2.4	<i>Modelagens.....</i>	<i>11</i>
2.5	<i>Aplicação.....</i>	<i>12</i>
2.6	<i>Controles de chaveamento.....</i>	<i>13</i>
<b>3</b>	<b>Chaveamento Controlado .....</b>	<b>16</b>
3.1	<i>Linhas de transmissão .....</i>	<i>16</i>
3.2	<i>Bancos de capacitores em paralelo ou shunt .....</i>	<i>17</i>
3.3	<i>Bancos de reatores em paralelo ou shunt .....</i>	<i>19</i>
3.4	<i>Energização de transformadores em vazio .....</i>	<i>20</i>
<b>4</b>	<b>Simulações .....</b>	<b>23</b>
4.1	<i>Modelagem do sistema .....</i>	<i>23</i>

4.1.1	Equivalentes de geração .....	24
4.1.2	Transformadores .....	25
4.1.3	Disjuntores.....	26
4.1.4	Linha de transmissão .....	27
4.2	<i>Simulações efetuadas - energização</i> .....	30
4.2.1	Procedimento de cálculo.....	30
4.2.2	Resultados.....	33
4.2.3	Recomendação.....	46
4.2.4	Análise estatística do desempenho .....	47
4.2.5	Desempenho utilizando-se resistor de pré-inserção .....	48
4.3	<i>Religamento de linha de transmissão sem reator</i> .....	49
4.3.1	Metodologia.....	49
4.3.2	Resultados obtidos:.....	52
4.3.3	Análise estatística .....	61
4.3.4	Desempenho utilizando-se resistor de pré-inserção .....	61
4.4	<i>Religamento de linhas com reatores</i> .....	62
4.4.1	Resultados.....	64
4.4.2	Análise estatística .....	68
4.4.3	Desempenho utilizando-se resistor de pré-inserção .....	69
<b>5</b>	<b>Especificação funcional do equipamento de chaveamento controlado</b> .....	<b>71</b>
5.1	<i>Manobra (fechamento) de linhas sem compensação paralela por reatores</i> .....	72
5.2	<i>Manobra (fechamento) de linhas com compensação por reatores em paralelo</i> .....	73
5.3	<i>Tempo mecânico de fechamento dos disjuntores</i> .....	74

5.4	<i>Equipamento geral</i> .....	74
5.5	<i>Requisitos do controlador de chaveamento</i> .....	75
5.6	<i>Variáveis relacionadas ao disjuntor</i> .....	76
<b>6</b>	<b>Sumário, conclusões e recomendações</b> .....	<b>82</b>
	<b>Referências</b> .....	<b>83</b>

### Lista de Abreviaturas e Siglas

- ATP – Analysis Transient Program  
TNA - Transient Network Analyzer  
EMTP - Electro-Magnetic Transients Program  
TRV - Transient Recovery Voltage  
pu - Valor por unidade  
TACS - Transient Analysis of Control Systems  
kV - Volt x  $10^3$   
LT - Linha de transmissão  
ms - milissegundos (s x  $10^{-3}$ )  
 $\mu$ s - microssegundos (s x  $10^{-6}$ )

## Lista de Tabelas

Tabela 1 -	Equivalentes em Blumenau e Curitiba .....	25
Tabela 2 -	Ângulos das fases .....	32
Tabela 3 -	Sobretensões no final da linha .....	34
Tabela 4 -	Sobretensões menores ou iguais a 2,06 pu no final da linha .....	35
Tabela 5 -	Sobretensões maiores ou iguais a 2,25 pu no final da linha .....	35
Tabela 6 -	Sobretensões menores ou iguais a 1,9 pu no final da linha .....	36
Tabela 7 -	Sobretensões maiores ou iguais a 2,84 pu no final da linha .....	37
Tabela 8 -	Ângulos de acionamento com maiores e menores sobretensões .....	40
Tabela 9 -	Ângulos de chaveamento - fase A $0^{\circ} \pm 30^{\circ}$ .....	41
Tabela 10 -	Ângulos de chaveamento – fase A em $180^{\circ} \pm 30^{\circ}$ .....	42
Tabela 11 -	Limites favoráveis de operação .....	43
Tabela 12 -	Ângulos recomendados para energização de linha .....	46
Tabela 13 -	Posições de acionamento das chaves .....	59

## Lista de Figuras

<b>Figura 1</b> - Sistema de transmissão modelado .....	23
<b>Figura 2</b> - Torre característica tipo SS.....	29
<b>Figura 3</b> - Instantes das simulações .....	31
<b>Figura 4</b> - Ângulos utilizados nas simulações .....	31
<b>Figura 5</b> - Sobretensões no início, meio e final da linha .....	39
<b>Figura 6</b> - Sobretensões no final da linha – menor sobretensão.....	39
<b>Figura 7</b> - Sobretensões no final da linha – maior sobretensão.....	40
<b>Figura 8</b> - Caso 01 da tabela 11 .....	43
<b>Figura 9</b> - Caso 02 da tabela 11 .....	44
<b>Figura 10</b> - Caso 03 da tabela 11 .....	44
<b>Figura 11</b> - Caso 04 da tabela 11 .....	45
<b>Figura 12</b> - Caso 05 da tabela 11 .....	45
<b>Figura 13</b> - Caso 06 da tabela 11 .....	46
<b>Figura 14</b> - Esquema de funcionamento do resistor de pré-inserção .....	48
<b>Figura 15</b> - Cargas residuais nas três fases da LT (tensões na barra de Blumenau) .....	52
<b>Figura 16</b> - Distribuição estatística das sobretensões obtidas no religamento da LT (em pu) ..	54
<b>Figura 17</b> - Intervalos de acionamento das 3 fases – simulações iniciais .....	55
<b>Figura 18</b> - Intervalos de acionamento das 3 fases – todas as simulações .....	55
<b>Figura 19</b> - Menor sobretensão no final da linha – fase A .....	56
<b>Figura 20</b> - Menor sobretensão no final da linha – fase B .....	56
<b>Figura 21</b> - Menor sobretensão no final da linha – fase C .....	57
<b>Figura 22</b> - Maior sobretensão no final da linha – fase A .....	57
<b>Figura 23</b> - Maior sobretensão no final da linha – fase B .....	58
<b>Figura 24</b> - Maior sobretensão no final da linha – fase C .....	58

<b>Figura 25</b> - Ângulos de religamento das três fases que causam menores sobretensões.....	59
<b>Figura 26</b> - Carga residual no final da LT, fase A.....	63
<b>Figura 27</b> - Carga residual no final da LT, fase B.....	63
<b>Figura 28</b> - Carga residual no final da LT, fase C.....	64
<b>Figura 29</b> - Religamento da fase a em momento favorável.....	65
<b>Figura 30</b> - Religamento da fase b em momento favorável .....	65
<b>Figura 31</b> - Religamento da fase c em momento favorável.....	66
<b>Figura 32</b> - Religamento da fase a em momento desfavorável .....	66
<b>Figura 33</b> - Religamento da fase b em momento desfavorável .....	67
<b>Figura 34</b> - Religamento da fase c em momento desfavorável .....	67
<b>Figura 35</b> - Esquema de dispositivo de sincronização para linhas não compensadas com reatores em paralelo.....	73
<b>Figura 36</b> - Sincronizador para abertura ou fechamento de linhas e reatores .....	75
<b>Figura 37</b> - Energização de carga indutiva na tensão máxima.....	77

# 1 Preâmbulo

## 1.1 Introdução

Os isolamentos de linhas de transmissão e subestações são definidos pelas sobretensões que deverão ser suportadas sem que sejam comprometidos o bom funcionamento do sistema, de seus equipamentos e elementos componentes e sem que seja colocada em risco a integridade tanto desses equipamentos quanto das pessoas.

Um valor de tensão superior ao máximo da tensão de operação do sistema é denominado sobretensão. Caso seja originada por descargas atmosféricas, é considerada externa. Caso contrário, é considerada interna, posto ser causada, então, por eventos ocorridos dentro do sistema de potência em questão. A divisão em três grupos, conforme apresenta-se a seguir, é mais útil ao propósito desta dissertação, como poder-se-á observar:

- Sobretensões Temporárias: em frequência industrial, com característica oscilatória e duração relativamente longa, superior a dezenas de milissegundos. Podem ser fracamente amortecidas ou não amortecidas e são, normalmente, causadas por manobras, faltas, ferro-ressonância e efeito Ferranti.
- Sobretensões Atmosféricas: têm duração muito curta e são decorrentes de descargas atmosféricas. Rotineiramente são representadas, para ensaios em laboratório, por uma onda triangular -ou dupla exponencial- com tempos de frente de onda próximos a 2 microssegundos e tempo de meio valor, de 50 microssegundos.
- Sobretensões de manobra: têm perfil similar ao da onda padronizada de impulso de manobra utilizada em ensaios de laboratório - onda triangular ou dupla exponencial- com frente de onda com duração entre 200 a 400 microssegundos e tempo de meio valor de 4.000 microssegundos. São geralmente consideradas como de manobras as

sobretensões com durações entre 1 a 3 ciclos e são as determinantes do isolamento para sistemas de 345kV ou acima. Elas podem ser originadas de:

- Ocorrências de curtos-circuitos;
- Aberturas de linhas;
- Rejeição de cargas;
- Manobras de capacitores;
- Manobras de reatores;
- Energizações de linhas e
- Religamentos de linhas.

Para o caso de linhas de transmissão, os fenômenos mais importantes ocorrem nos momentos de energização e religamento e dependem do instante do fechamento, da dispersão entre os pólos dos disjuntores envolvidos, de reatores de linha e de dispositivos de controle existentes no sistema.

Os dispositivos de controle das sobretensões de manobra podem ser:

- Resistores de fechamento e abertura;
- Pára-raios e, atualmente,
- Dispositivos para chaveamento controlado.

O Chaveamento controlado tem por objetivo atuar nos circuitos de comando das bobinas dos disjuntores para que o acionamento ocorra no momento mais favorável, do ponto de vista de sobretensões –ou sobrecorrentes-, ou seja, visa a assegurar que o disjuntor feche o circuito no instante em que as sobretensões –ou sobrecorrentes- resultantes dessa manobra sejam as menores possíveis.

## 1.2 Objetivos

O tema abordado é relativamente novo e bastante extenso. Apesar de conter análises acerca de manobras em todos os tipos de equipamentos, esta dissertação tem como objetivo as análises de energização e de religamento de linhas de transmissão com e sem reatores, além da especificação funcional de um equipamento de chaveamento controlado para estes fins, conforme detalhamento a seguir:

A) Energização e religamento de linhas de transmissão com e sem reatores:

As atividades para se atingir os objetivos propostos foram, fundamentalmente, as análises dos tipos já existentes de chaveamento controlado de disjuntores e de como efetuá-los. Para isso, foram estudados artigos que tratam do chaveamento controlado de capacitores, reatores, transformadores e linhas de transmissão.

O estudo e análise do chaveamento controlado para manobras de fechamento de linhas de transmissão, foco de maior ênfase, abrange os itens a seguir:

- Energização de linhas de transmissão;
- Religamento de linhas de transmissão sem reatores e
- Religamento de linhas de transmissão com reatores.

Foram estudadas as sobretensões numa linha de 525kV, Campos Novos-Blumenau e o efeito que se obtém do uso de chaveamento controlado. Avaliou-se, também, qual a precisão requerida deste sistema, de forma que não venham ocorrer sobretensões excessivas, isto é, acima de padrões de dimensionamento de linhas, que se situa entre 2 a 2,5 pu.

B) Especificação funcional de um equipamento de chaveamento controlado:

A especificação funcional tem a finalidade de apresentar as entradas e saídas necessárias ao funcionamento de um dispositivo de chaveamento controlado, permitindo seu projeto. Além disso, nessa fase são analisadas as influências de parâmetros no tempo de fechamento dos disjuntores, quais sejam: a temperatura ambiente, a tensão dos serviços auxiliares e a pressão no sistema de acionamento, itens de fundamental importância para o sucesso do dispositivo.

Pretende-se, com o estudo focado nestes dois objetivos, conhecer formas de diminuir os efeitos danosos à isolação dos equipamentos do sistema causados pelas sobretensões geradas pelos transitórios eletromagnéticos no momento das manobras de uma forma diferente da usual, que utiliza resistores de pré-inserção.

### **1.3 Apresentação**

Esta dissertação é dividida em seis capítulos, conforme mostrados a seguir:

Capítulo 1: “Preâmbulo” - que contém uma introdução ao tema, a definição dos objetivos do trabalho e esta apresentação geral do texto.

Capítulo 2: “Estado da Arte” – no qual são apresentados e comentados os artigos relativos ao tema e que foram considerados para a elaboração desta dissertação.

Capítulo 3: “Chaveamento Controlado” - traz a exposição do comportamento de elementos do sistema quando acionados por disjuntores controlados na abertura e/ou no fechamento dos pólos dos disjuntores.

Capítulo 4: “Simulações” - traz a metodologia utilizada para a realização das simulações computacionais, feitas com o intuito de comprovar a eficiência do chaveamento controlado de disjuntores e seus benefícios para os elementos do sistema, além de apresentar casos calculados com o programa ATP (*Alternative Transient Program*) e seus respectivos resultados, para embasamento da proposição do dispositivo de controle.

Capítulo 5: “Especificação funcional do equipamento de chaveamento controlado” - traz os requisitos que devem ter os equipamentos para efetuar o chaveamento controlado, a descrição das entradas e saídas do equipamento e quais variáveis são acessadas.

Capítulo 6: Apresenta um breve sumário do que foi realizado, além das conclusões e recomendações para os futuros trabalhos sobre este tema que venham complementar a abrangência deste.

Ao final, esta dissertação traz a relação de artigos e livros consultados para o embasamento teórico do assunto principal, bem como para auxílio em questões secundárias pertinentes.

## 2 Estado da arte

Para o estudo do assunto e conhecimento do estado da arte foram pesquisados diversos artigos relacionados ao chaveamento controlado. Esses artigos abordam:

- Tecnologias de chaveamento existentes;
- Energização e religamento de linhas de transmissão;
- Energização de transformadores;
- Aplicações dos chaveamentos e
- Controles de chaveamento.

No presente capítulo são apresentados os artigos selecionados, classificados segundo os aspectos ligados ao tema.

### 2.1 Tecnologias de chaveamento controlado

H. Ito [1] apresenta o estado da arte do chaveamento controlado abordando requisitos dos ensaios e as aplicações em manobras de banco de capacitores *shunt*, banco de reatores *shunt*, transformadores e linhas de transmissão. Segundo o autor, desde 1993 vem crescendo rapidamente o número de usuários satisfeitos por diferentes aplicações de chaveamento controlado baseadas nas tecnologias atuais, que contam com algoritmos de compensação de tempos auxiliados por sensores avançados e por tecnologia digital confiável.

Quanto aos disjuntores de operação monopolar, Ito [1] classifica como importantes os seguintes parâmetros:

- Taxa de decrescimento da rigidez dielétrica;

- Tempos de abertura e fechamento dependem dos mecanismos envolvidos e de várias condições externas;
- Relação entre tempo ocioso e tempo de operação.

Especificamente sobre esse item, Ito [1] descreve que a maior fonte de falhas em chaveamento controlado seria proveniente de grandes variações no tempo de operação ocorridas durante o tempo ocioso, considerando que muitas vezes os equipamentos são manobrados com pouca frequência e considerando ainda que, ao longo do tempo, as variações crescem.

O artigo de Ito [1] traz também uma relação de requisitos para o disjuntor, sensores e controle de chaveamento para diversas aplicações.

Os artigos do CIGRÉ - “Working Group 13.07” [2] e [3] apresentam o cenário de manobras em que as técnicas do chaveamento controlado podem ser aplicadas e ressaltam os benefícios, problemas técnicos e limitações práticas da utilização dessas técnicas. Os artigos também apresentam as aplicações já citadas no artigo [1] e, além disso, trazem informações bastante significativas para o tema deste trabalho, conforme apresentado abaixo:

O artigo da referência [2] apresenta os princípios de chaveamento controlado e as estratégias básicas para sua implementação, além de características significativas dos disjuntores. Apresenta também informações sobre abertura e fechamento de bancos de capacitores e linhas de transmissão sem carga.

Sobre bancos de capacitores, o artigo da referência [3] apresenta o chaveamento controlado como uma possível alternativa à energização com o auxílio de resistores ou indutores em série. Na abertura desses bancos, o chaveamento controlado poderia reduzir substancialmente a probabilidade de reigitação, trazendo benefícios principalmente aos disjuntores dos bancos de capacitores freqüentemente manobrados.

O artigo da referência [3] discute o chaveamento de reatores como fonte de transitórios de tensão e corrente. Na energização de reatores *shunt*, correntes de *inrush* bastante assimétricas e com constantes de tempo longas podem ser geradas se o fechamento dos contatos do disjuntor for feito num instante desfavorável, podendo afetar os reatores e outros equipamentos das subestações ou a geração de correntes de seqüência zero de altas magnitudes e longas durações.

Durante a desenergização de reatores, as sobretensões geradas podem ser originadas por duas causas: reignição e *chopping*.

A sobretensão denominada *chopping* resulta da interrupção de correntes indutivas antes do zero natural, fenômeno que surge em todas as manobras de interrupção com diferentes graus de importância. Dependem do número de câmaras conectadas em série no disjuntor, da potência dos reatores envolvidos, da capacitância paralela aos terminais do disjuntor e do tempo de arco. A taxa de crescimento da tensão é baixa.

As “sobretensões de reignição” são geradas por reignição durante uma interrupção. As reignições são provocadas quando a tensão entre os contatos do disjuntor supera a capacidade dielétrica do meio onde eles trabalham. A taxa de crescimento da tensão durante a reignição varia entre a taxa de crescimento de tensão de um raio e de um transitório de frente rápida, dependendo do comprimento da barra entre o disjuntor e o reator. As reignições podem afetar algumas partes do disjuntor como o soprador e os contatos; dos reatores, podem vir a comprometer o isolamento.

Os disjuntores têm uma probabilidade de reignição causada por tempos de arco pequenos, menores que o mínimo. Pode-se aumentar o tempo de arco com o chaveamento controlado (controle de abertura do disjuntor), porém deve-se considerar que maiores tempos de arco acarretam sobretensões *chopping* mais altas.

- Altas correntes de energização nos reatores *shunt* podem causar excessivo estresse eletromagnético nos enrolamentos;
- Para reatores *shunt* com neutro aterrado, um fluxo excessivo de corrente de seqüência zero, devido aos efeitos de saturação, podem ativar os respectivos relés, causando operação indevida.

A aplicação de chaveamento controlado para abertura de reatores pode ser usada para assegurar uma baixa probabilidade de reignição, reduzindo desse modo as sobretensões e, em alguns casos, reduzindo a deterioração das características dos disjuntores, melhorando a confiabilidade e reduzindo a necessidade de manutenção.

## 2.2 Energização e religamento de linhas de transmissão

A. Carvalho, M. Lacorte, O. Knudsen [4] discutem os surtos de chaveamento em linhas de transmissão e sua limitação por meio do uso de pára-raios de óxido metálico e chaveamento controlado. Os benefícios desses métodos de controle de sobretensão são baseados em estudos de simulações em linhas de transmissão de 550 kV. O comprimento da linha é tomado como um parâmetro independente. O grau de compensação *shunt* também.

Os estudos de simulação mostram que pára-raios de óxido metálico e chaveamento controlado podem, na maioria dos casos, eliminar a necessidade de resistores de fechamento.

Os autores descrevem, ainda, a metodologia de simulações feitas com auxílio do programa ATP, gerando gráficos de sobretensões em função do comprimento da linha considerando ora pára-raios inseridos ora não inseridos nos terminais da linha sob análise.

As conclusões mais relevantes são:

- A generalização de resultados obtidos em análise e simulações deve ser tratada com cuidado, já que muitos parâmetros influenciam os resultados, tais como: configuração do sistema, comprimento da linha, resistividade do solo, grau de compensação e outros.
- Pára-raios de óxido metálico são eficientes para o controle de sobretensões em linhas. Os melhores resultados foram obtidos com a associação dos pára-raios ao dispositivo de chaveamento.
- A associação de pára-raios de óxido metálico e de chaveamento controlado pode substituir resistores de pré-inserção.

### 2.3 Energização de transformadores em vazio

J. H. Brunke & K. J. Fröhlich, [5] e [6], apresentam o caso de energização de transformadores em vazio. As correntes de *inrush* do transformador são elevadas e ricas em harmônicas, geradas quando os núcleos do transformador são levados à saturação durante a energização. Estas correntes têm efeitos indesejáveis, incluindo danos ou perda de vida potencial do transformador, operações erradas dos relés de proteção e perda de qualidade de energia no sistema. Esses transitórios podem ser potencialmente eliminados pelo chaveamento controlado do transformador se os fluxos transitório, residual e no núcleo forem levados em conta no algoritmo de fechamento. O artigo explora as considerações práticas de transitórios de fluxo do núcleo, o desempenho de estratégias do controle e a aplicação de disjuntores para controlar transitórios *inrush* do transformador.

O fluxo residual pode chegar a assumir valores de até 85% do pico de fluxo normal, sendo valores típicos, os da ordem de 20 a 70%.

## 2.4 Modelagens

R. Rocha, A. C. Carvalho & J. L. Távora [7] descrevem um modelo desenvolvido para uso com o programa ATP, para simular manobra controlada em sistema de transmissão. O modelo implementa a característica dielétrica do disjuntor durante a operação de fechamento, bem como a dispersão do tempo de operação do disjuntor e a imprecisão do instante ótimo determinado pelo controlador. A representação da característica dielétrica do disjuntor, aplicável à operação de fechamento, foi concebida através da rotina TACS (Transient Analysis of Control Systems). Este modelo determina a tensão de pré-arco do disjuntor, oferecendo uma avaliação mais precisa do desempenho do disjuntor e do controlador em manobra controlada.

Para obter-se melhor fidelidade na simulação da manobra controlada, é necessário reproduzir dois aspectos: a dispersão do instante ótimo e a característica da suportabilidade dielétrica do *gap* entre os contatos do disjuntor.

O princípio de funcionamento é associado à definição do instante de fechamento de duas chaves estatísticas, sendo a primeira independente e a segunda dependente. Como parâmetro para a chave independente são fornecidos o instante médio de fechamento do disjuntor e o desvio padrão, enquanto que para a chave dependente somente é fornecido o desvio padrão referente à imprecisão do controlador. As chaves reproduzem, portanto, as dispersões e imprecisões do disjuntor e do controlador.

## 2.5 Aplicação

U Krüsi, K. & J. Fröhlich [8] apresentam a aplicação do chaveamento controlado, desenvolvendo um método de identificação que fornece uma avaliação da taxa de decrescimento da suportabilidade dielétrica nos disjuntores já em operação. Esse método é baseado em um modelo físico de pré-descarga que exclui o desvio estatístico das características do disjuntor. Usando esse modelo, a identificação das características de pré-descarga dos disjuntores pode ser rapidamente obtida por meio da comparação de um conjunto de padrões calculados numericamente com a performance em campo de um disjuntor real. Desse modo, a adequação de um disjuntor para controle de chaveamento e a extensão dos benefícios da redução de transitórios podem ser obtidos com mínimo esforço. A aplicação bem sucedida do método foi demonstrada em testes de laboratório com disjuntor de 145 kV.

O artigo do “Working Group 13.07”, do CIGRE [9] fornece extenso guia de como abordar projetos de chaveamento controlado e de como estudar, especificar e testar o disjuntor e o sistema controlador. Discute a interação entre as peças componentes de um sistema de chaveamento controlado e a hierarquia de responsabilidade para assegurar sua performance. Apresenta questões de interface entre o controlador e os sistemas auxiliares da subestação. Faz recomendações para o teste de tipo de componentes do sistema de chaveamento controlado e também para o sistema integrado, incluindo orientação detalhada de questões complexas, como a determinação das características dos disjuntores. O documento apresenta também uma orientação da verificação completa da performance do sistema e teste de comissionamento.

K. Fröhlich, C. Hoelzl, A. C. Carvalho, W. Hofbauer, B. L. Avent apresentam, no artigo citado na referência [10], o desenvolvimento de um projeto inovador, que incorpora

pára-raios especiais para linhas de transmissão a um dispositivo de religamento controlado de alta velocidade para o disjuntor. Os estudos conduzidos pelos autores revelaram que, utilizando-se apenas um resistor de pré-inserção de 400 Ohms por 8 milissegundos, não seria conseguido o limite de 1,7 pu de sobretensão. Outras possibilidades seriam o uso de resistores multiestágios ou resistores simples de associados a pára-raios, ambas abandonadas por razões econômicas.

O projeto e sua base foram aplicados em uma linha de 500 kV com extensão de 330 km. Foram descritos testes reais de manobra da linha, confirmando a validade dos estudos elaborados e conceitos aplicados ao projeto. As conclusões citadas no artigo são:

- Limitações de sobretensões de manobra em sistemas de 500 kV podem ser conseguidas com o uso de pára-raios e controladores de fechamento de disjuntores, tornando desnecessário o uso de resistores de pré-inserção.
- São necessários requisitos especiais para os equipamentos envolvidos de tal forma a garantir o funcionamento do disjuntor.
- Pode-se utilizar níveis mais baixos de isolamento para a linha de transmissão, com correspondente redução de custos.

## **2.6 Controles de chaveamento**

H. Tsutada, T. Hirai, H. Kohyama, H. Ito & K. Sasaki, [11], apresentam o controlador síncrono de chaveamento aplicado ao disjuntor a gás. Este controlador é capaz de acionar os circuitos para abrir e fechar os contatos do disjuntor a SF<sub>6</sub> em um ponto predeterminado da onda, para minimizar os surtos de manobra. O artigo propõe um novo algoritmo de fechamento controlado para minimizar o tempo total de atraso e o erro de controle. Este novo

algoritmo é direcionado a detectar o zero da tensão e da corrente e prever o próximo tempo de operação do disjuntor a SF<sub>6</sub>.

O artigo apresenta também os resultados de testes em um disjuntor de 145 kV com o algoritmo proposto.

No artigo “*Controlled Closing on Shunt Reactor Compensated Transmission Lines. Part I: Closing Control Device Development*” [12], de K. Fröhlich, C. Hoelzl, A. C. Carvalho, W. Hofbauer & B. L. Avent e outros, é apresentado um dispositivo de controle *point-on-wave* para fechamento ou religamento de linha de transmissão compensada por reator em paralelo, para redução da sobretensões. São apresentados como complementos, aspectos de desenvolvimento e investigações básicas sobre a relevância do fenômeno transitório de fechamento:

- Uma manobra de religamento ocorre quando pelo menos uma das fases esteve sob falta. Depois da desenergização, pode permanecer na linha uma carga residual de até 1,2 pu. Da combinação da linha com um reator em paralelo, forma-se um circuito oscilante numa frequência mais baixa do que a da rede, dependendo da capacitância da linha e do grau de compensação exercido pelo reator.
- A capacitância da linha de transmissão e o reator de aterramento de neutro, quando este existe, geram os fenômenos de acoplamento entre fases que interferem na predição do momento mais adequado para fechamento do disjuntor e devem ser considerados, sendo particularmente importantes para os casos de religamentos automáticos.

O algoritmo empregado funciona independentemente da forma do sinal da tensão a ser sincronizado por meio de reconhecimento de padrão. Peculiaridades do hardware são a alta redundância e o sistema para proteger o controlador em qualquer mau funcionamento do circuito eletrônico. A eficiência do controlador foi verificada por uma combinação de testes

no TNA (*Transient Network Analyzer*) e em simulações no EMTP (*Electro-Magnetic Transients Program*) mostrando a habilidade do dispositivo para evitar as sobretensões.

### 3 Chaveamento Controlado

Neste capítulo aborda-se o assunto de manobras, enfatizando as manobras em linhas de transmissão correspondentes à energização e religamento, apontando os melhores instantes para os chaveamentos desses componentes do sistema elétrico. Não obstante o foco desta dissertação ser especificamente em linhas de transmissão, discorre-se também, neste capítulo, sobre manobras de outros equipamentos como reatores, capacitores *shunt* e transformadores.

#### 3.1 Linhas de transmissão

De uma forma geral, a energização ou o religamento de uma linha será melhor executada se o fechamento dos disjuntores for realizado quando a tensão sobre cada um de seus pólos for igual a zero, pois assim são reduzidos ou eliminados os transitórios de tensão que podem afetar negativamente o desempenho do isolamento da linha e dos equipamentos nela conectados. Ainda para a energização, independentemente da linha ser compensada com reatores *shunt*, o disjuntor deve ser fechado quando a tensão do lado fonte está em zero.

Diferentemente da energização de linhas ou equipamentos, no religamento a tensão no lado da carga geralmente não pode ser ignorada. Ela permanece na linha durante um tempo consideravelmente longo após a abertura, seja como uma tensão direta exponencial decrescente ou, em uma linha compensada por reator *shunt*, como uma tensão alternada decrescente com duas frequências, ambas diferentes da frequência da rede. Mesmo em uma linha que já tenha sido descarregada, é difícil prever o acoplamento entre fases e, portanto, a tensão no lado da carga nas fases que não são fechadas no primeiro instante.

Particularizando-se o religamento para diferentes configurações de linhas, tem-se:

- Linhas não compensadas, com transformador de potencial indutivo:  
O melhor momento para energização seria no ponto de tensão zero no lado da fonte.
- Linhas não compensadas, com transformador de potencial capacitivo:  
O ponto ótimo seria no momento em que a diferença de tensão entre os pólos do disjuntor é nula, ou quando se tem a tensão do lado carga no valor de pico da tensão do lado da fonte, desde que com a mesma polaridade.
- Linhas compensadas com reator em paralelo:  
Neste caso, o instante mais apropriado seria no momento de mínima tensão entre os terminais dos pólos do disjuntor.

O chaveamento controlado de disjuntores para a desenergização de linhas de transmissão somente seria justificável em casos de ocorrências de situações especiais de redes, em que possam ocorrer tensões de restabelecimento (TRV) que superem a capacidade dos disjuntores, não sendo aqui discutido.

### **3.2 Bancos de capacitores em paralelo ou *shunt***

Como um capacitor totalmente descarregado é similar a um curto-circuito no momento inicial de sua conexão a uma fonte de tensão, a energização de uma carga capacitiva tem melhor resultado quando a tensão sobre cada pólo do disjuntor é zero, uma vez que isso eliminaria a corrente de influxo e o transitório de tensão não seria imposto ao sistema.

Os bancos de capacitores normalmente são descarregados antes da energização ocorrer. Isso significa que, em um banco de capacitores com neutro aterrado, os contatos são fechados em seqüência de fases inversa, em intervalos de  $60^\circ$ , quando a tensão de alimentação respectiva é zero. Quando o banco possui neutro flutuante ou está conectado em delta, deve-se fechar duas fases no instante em que a tensão no lado de alimentação entre essas fases é zero. Em seguida, deve-se fechar a terceira fase  $90^\circ$  depois ( $1/4$  de período). Para se obter a menor influência possível dos efeitos de envelhecimento, o fechamento adaptável (análise do efeito e correção para a próxima operação) deve ser utilizado, independente do tipo de aterramento.

O acionamento controlado de disjuntores para a desenergização de bancos de capacitores visando à eliminação das sobretensões normalmente não é necessário, pois os disjuntores são dimensionados para suportar as tensões de recuperação previstas. Em alguns casos, porém, uma maior proteção contra reignição pode ser desejável.

Com disjuntores de operação monopolar, os instantes de comutação dos pólos podem ser pré-ajustados de maneira independente uns dos outros, tanto para fechamento quanto para abertura.

Como o encadeamento de pólos de um disjuntor de operação tripolar é determinado por um projeto mecânico fixo, as seqüências de fechamento e abertura dependem uma da outra e nem sempre pode ser obtida a atuação ótima para abertura e fechamento. Para bancos de capacitores, as possibilidades de criar bons esquemas de sincronização, tanto para fechamento quanto para abertura são melhores em bancos com neutro flutuante. Para neutro aterrado, as possibilidades são limitadas.

### 3.3 Bancos de reatores em paralelo ou *shunt*

Existem seqüências de fechamento teoricamente melhores para reatores em paralelo com o propósito de reduzir a corrente de *inrush* e/ou corrente de seqüência zero nas fases. Frequentemente, é possível desprezar a remanência ao tratar-se de reatores. Geralmente, as correntes de fase devem começar próximas a seu zero natural, ou seja, com o mínimo de assimetria possível. A exigência de precisão na sincronização é igual à do fechamento de bancos de capacitores, motivo pelo qual o fechamento adaptável deve ser utilizado. A melhor seqüência de fechamento depende de como as fases estão acopladas umas às outras através dos circuitos magnéticos e elétricos.

A abertura sincronizada é indicada para eliminar reignições e *chopping* dando ao *gap* (espaço entre os contatos) o tempo necessário para tornar-se tão amplo quanto possível, antes da recuperação da tensão, ou seja, o máximo tempo de arco possível. A melhor seqüência de abertura entre fases, nesse caso, depende dos tipos de aterramento e dos parâmetros dos reatores (R,X).

A exigência de tolerância para desenergização é, para cada fase, determinada por uma “janela” de separação de contatos, começando no penúltimo zero de corrente e com um final correspondendo ao tempo de arco mais curto que não resulte em reignição. O tempo de arco mais curto depende das características do disjuntor, da rede e da carga. Normalmente, a exigência é menor para a desenergização do que para energização dos reatores, por isso a abertura adaptável normalmente não é necessária. Além disso, a abertura adaptável é de difícil obtenção, uma vez que o momento importante, que é o início do tempo de arco, é difícil de se detectar diretamente. Os contatos auxiliares do disjuntor podem ser utilizados para uma detecção indireta, mas isso implica em que as atuações dos contatos auxiliares e principais deverão estar inter-relacionadas com precisão suficiente.

Com disjuntores de operação monopolar, os instantes de comutação dos pólos podem ser pré-ajustados de maneira independente uns dos outros, tanto para fechamento quanto para abertura.

Como a seqüência de comutação de um disjuntor de operação tripolar é determinada por um projeto mecânico fixo, a seqüência de abertura é oposta à de fechamento, tendo intervalos de pólos diferentes dependendo das diferenças nas velocidades dos contatos na abertura e no fechamento. Um meio-termo nem sempre pode ser obtido. Boas soluções de sincronização para ambos, a abertura e o fechamento, estão limitadas a reatores de três núcleos e reatores com neutro flutuante. Mesmo para estes, a combinação de precisão de fechamento e uma “janela” de abertura pode exigir projetos de encadeamento mecânico especiais.

### **3.4 Energização de transformadores em vazio**

Transformadores trifásicos de potência podem ser montados em uma só unidade, com núcleo comum às três fases ou compostos de três unidades monofásicas. Podem ter diversas características particulares de arranjos.

Dependendo do arranjo dos enrolamentos e da forma dos núcleos, cada fase influencia com diferentes intensidades as demais fases durante as operações de chaveamento, tanto de abertura como de fechamento.

Um transformador em operação sem carga, isto é, com o lado da carga desconectado do sistema, será percorrido apenas por uma corrente de magnetização relativamente pequena. Com essa pequena corrente o efeito *chopping* é mais acentuado para transformadores do que para reatores no caso de uma interrupção. A oscilação natural do núcleo do transformador, porém, é menos intensa.

Depois da desenergização, é provável que um fluxo residual permaneça no núcleo do transformador e esse fluxo poderá influenciar o comportamento do sistema na manobra de fechamento subsequente.

Para manobras de transformadores em vazio é necessário considerar os casos de existência ou não de fluxo residual.

- Sem fluxo residual:

A energização deve ocorrer no momento do pico da tensão.

- Com fluxo residual:

A energização deve ocorrer da seguinte forma: a última fase desenergizada deve ser energizada em primeiro lugar, seguida pelas duas outras fases após vários “meios-ciclos”. O melhor resultado pode ser conseguido com o fechamento no momento em que o provável fluxo normal do núcleo for igual ao fluxo residual. A desenergização deve ocorrer em duas fases simultaneamente, abrindo-se a terceira após vários “meios-ciclos”.

Para o controle do fechamento após uma operação randômica de abertura, necessita-se das informações de tensão, a fim de que o fluxo residual possa ser obtido por integração. Conhecido o fluxo residual, a operação de fechamento seguinte poderá ser conduzida de forma a minimizar a corrente de *inrush*.

A seguir, apresenta-se um resumo dos chaveamentos:

<i>TIPO DE MANOBRA</i>	<i>INSTANTE DE FECHAMENTO</i>	<i>INSTANTE DE ABERTURA</i>
Energização de linha com ou sem reator <i>shunt</i>	Tensão do lado fonte igual a zero	Sem requisito
Religamento de linha sem reatores	Quando a tensão é zero do lado fonte (LT com TP indutivo); Quando a tensão entre os pólos do disjuntor for nula, ou, caso não seja possível, no pico de tensão (LT com TP capacitivo)	Sem requisito
Religamento de linha com reator “ <i>shunt</i> ”	Quando a tensão entre os pólos do disjuntor for nula	Sem requisito
Manobra de capacitores	Quando a tensão fase-terra for máxima do lado fonte (conexão Y aterrado); Quando a tensão fase-fase for máxima, fechar os dois pólos respectivos	Sem requisito
Manobra de reatores shunt	Quando a tensão do lado fonte for máxima	Manter um tempo de arco suficientemente longo
Manobra de transformadores	Quando o fluxo magnético do lado fonte (estimado) for igual ao fluxo residual. Duas outras fases simultaneamente após alguns ½ ciclos	Simultânea em duas fases e a última, vários ½ ciclos depois

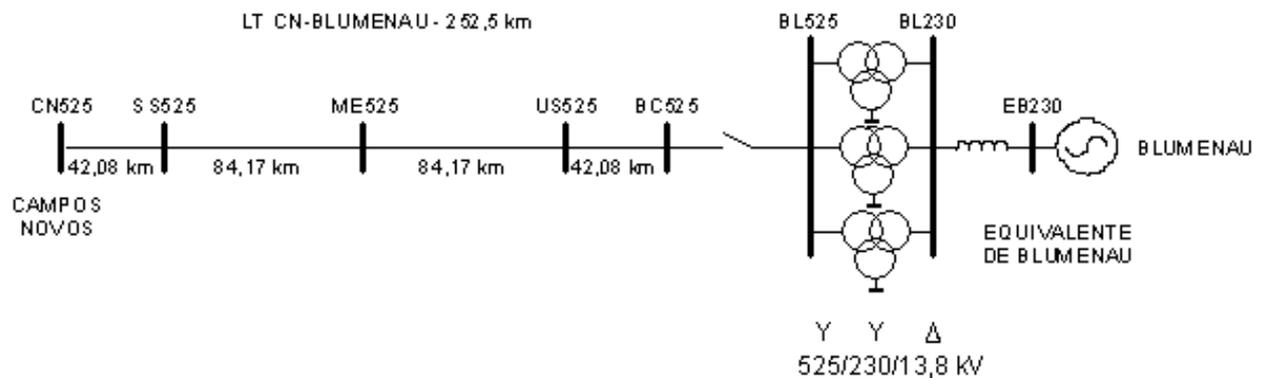
## 4 Simulações

Para as simulações necessárias à comprovação dos comportamentos descritos foi utilizado o programa ATP. Para sua utilização, é necessária a modelagem dos componentes do sistema elétrico adotado, assim como dos equipamentos e controles envolvidos nos estudos.

As simulações realizadas referem-se apenas à energização e religamento de linhas.

### 4.1 Modelagem do sistema

O sistema da Empresa Catarinense de Transmissão de Energia S.A. - ECTE, detentora da concessão da linha Campos Novos-Blumenau, que é usada para demonstração, encontra-se inserido no sistema de alta tensão de 525/230 kV da Eletrosul Centrais Elétricas S.A. – ELETROSUL, conforme pode ser verificado na figura 1.



**Figura 1 -** Sistema de transmissão modelado

#### 4.1.1 Equivalentes de geração

Os equivalentes da rede foram obtidos a partir dos valores das correntes de curto-circuito disponibilizados pelo ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) no relatório “RE 03/343/2002 - ESTUDOS DE CURTO-CIRCUITO - PERÍODO 2002-2005”.

Os valores dos equivalentes foram calculados de forma aproximada utilizando as expressões a seguir:

$$x_1 = \frac{V^2}{P} = \frac{V^2}{\sqrt{3} \cdot V \cdot I_{3\phi}} \quad (1)$$

e

$$\frac{x_0 + 2 \cdot x_1}{3} = \frac{V^2}{\sqrt{3} \cdot V \cdot I_{1\phi}} \quad (2)$$

Resultando em:

$$x_1 = \frac{V}{\sqrt{3} \cdot I_{3\phi}} \quad (3)$$

e

$$x_0 = \frac{3 \cdot V}{\sqrt{3} \cdot I_{1\phi}} - 2 \cdot x_1 \quad (4)$$

onde:

V: Tensão fase-fase em kV

P: Potência de curto trifásico em MVA

$I_{3\phi}$ : Corrente de curto trifásica em kA

$I_{1\phi}$ : Corrente de curto monofásica em kA

Para os estudos, são utilizados os equivalentes em Blumenau (230 kV).

A tabela 1 apresenta os valores calculados dos equivalentes utilizando as equações (1) e (2) e os valores de correntes de curto-circuito do relatório "RE 03/343/2002", do ONS.

Localidade	V (kV)	$I_{1\phi}$ (kA)	$I_{3\phi}$ (kA)	$x_1$ ( $\Omega$ )	$x_0$ ( $\Omega$ )
Blumenau	230	19,9	17,3	7,68	4,67
Curitiba	525	14,9	15,1	20,07	20,88

**Tabela 1** - Equivalentes em Blumenau e Curitiba

#### 4.1.2 Transformadores

Para os casos de energização ou religamento de linhas de transmissão, foram utilizados os valores das reatâncias adotadas nos estudos de fluxo de potência disponibilizados pelo ONS.

Os valores adotados são:

Transformadores de Blumenau:

Potência nominal: 224 MVA

Reatâncias na base de 672 MVA:

$$x_{ps} = 8,55\%$$

$$x_{st} = 37,92\%$$

$$x_{tp} = 30,88\%$$

Resultando em:

$$x_{ps} = 8,55\% \times 100/672 = 1,277\%, \text{ na base } 100 \text{ MVA}$$

A reatância em Ohms vista do lado de 525 kV resulta em:

$$x_{525} = 0,0855 \cdot \frac{\left(\frac{525}{\sqrt{3}}\right)^2}{\frac{672}{3}}$$

$$x_{525} = 2x17,59\Omega \quad (\text{metade de cada lado do transformador})$$

No lado de 230 kV:

$$x_{230} = 0,0855 \cdot \frac{\left(\frac{230}{\sqrt{3}}\right)^2}{\frac{672}{3}}$$

$$x_{230} = 2x3,32\Omega \quad (\text{metade de cada lado do transformador})$$

#### 4.1.3 Disjuntores

Os disjuntores foram representados por chaves estatísticas ou sistemáticas.

Normalmente os disjuntores são equipados com resistores de pré-inserção para fechamento. Ao ser dado o comando de fechamento, um contato secundário é acionado inserindo o resistor. Após aproximadamente 8 milissegundos, o contato principal se fecha, promovendo um curto-circuito (*by pass*) nos terminais do resistor, anulando assim o seu efeito.

O fechamento dos contatos das três fases do disjuntor, tanto os secundários quanto os principais, não ocorre simultaneamente (dispersão de fechamento), mesmo para comando tripolar.

Na simulação com o programa de transitórios eletromagnéticos ATP, as chaves sistemáticas são fechadas em um instante pré-definido (dados de entrada). Essas chaves sistemáticas, no caso de abertura, interrompem a corrente em sua primeira passagem pelo zero após o tempo estipulado.

As chaves estatísticas são representadas, no fechamento, por chaves sistemáticas com tempos de fechamento calculados para cada caso. São fornecidos o tempo básico de fechamento do contato secundário e o tempo básico de fechamento do contato principal. Supõe-se que o contato de cada fase feche (de forma independente entre eles) seguindo uma curva de distribuição Gaussiana, cuja média situa-se sobre o tempo básico. É definido, também, o desvio padrão característico dessa distribuição Gaussiana.

Ao se solicitar um cálculo estatístico com “n” casos, o programa gera números aleatórios segundo o método “Monte Carlo” e, partindo desses números aleatórios, define o instante de fechamento de cada fase dentro dos padrões solicitados.

Ao prover um disjuntor de um sistema de fechamento sincronizado, o resistor de pré-inserção deveria passar a ser um item dispensável.

#### 4.1.4 Linha de transmissão

A linha de transmissão foi modelada utilizando-se o perfil da torre característica apresentada na figura 2 mostrada adiante, utilizando-se o programa *Line Constants* do ATP. Para isso foi utilizado o modelo de parâmetros distribuídos e linha não transposta. Abaixo são apresentados os dados utilizados:

- Condutor: 4 cabos tipo CAA Goose 636 MCM por fase
- Espaçamento entre condutores: 0,454m (no *brundle*)

- Pára-raios: 3/8" - Aço Galvanizado HS
- Resistividade do solo 1.000  $\Omega.m$
- Flecha do condutor = 16,22m
- Flecha do pára-raios = 14,6m
- Vão médio aproximado: 475m
- Valores de resistência, reatância e capacitância da linha:
  - $R_1 = 0,0233 \frac{\Omega}{km.fase}$
  - $X_1 = 0,3185 \frac{\Omega}{km.fase}$
  - $C_1 = 13,73 \frac{nF}{km.fase}$
  - $R_0 = 0,4026 \frac{\Omega}{km.fase}$
  - $X_0 = 1,3610 \frac{\Omega}{km.fase}$
  - $C_0 = 8,18 \frac{nF}{km.fase}$
- Geometria: conforme figura 2 a seguir:



## 4.2 Simulações efetuadas - energização

Os limites favoráveis, que resultam em baixas sobretensões para operação do sistema, foram obtidos por meio de simulações realizadas com o programa ATP. Para isso, foram realizadas simulações de energização da linha de transmissão Blumenau/Campos Novos, ligando-se cada fase da linha em diferentes instantes. Os valores máximos de tensões no início, meio e final da linha foram obtidos do arquivo de saída do ATP e tabulados para se obter os casos de menores e maiores sobretensões.

A simulação da energização da linha de transmissão Blumenau/Campos Novos foi realizada utilizando a configuração da figura 1.

Trata-se de uma linha de transmissão de 252,5 km de extensão em 525 kV. A energização da linha foi efetuada pelo lado de Blumenau, onde foi representada uma chave entre os pontos BL525 e BC525.

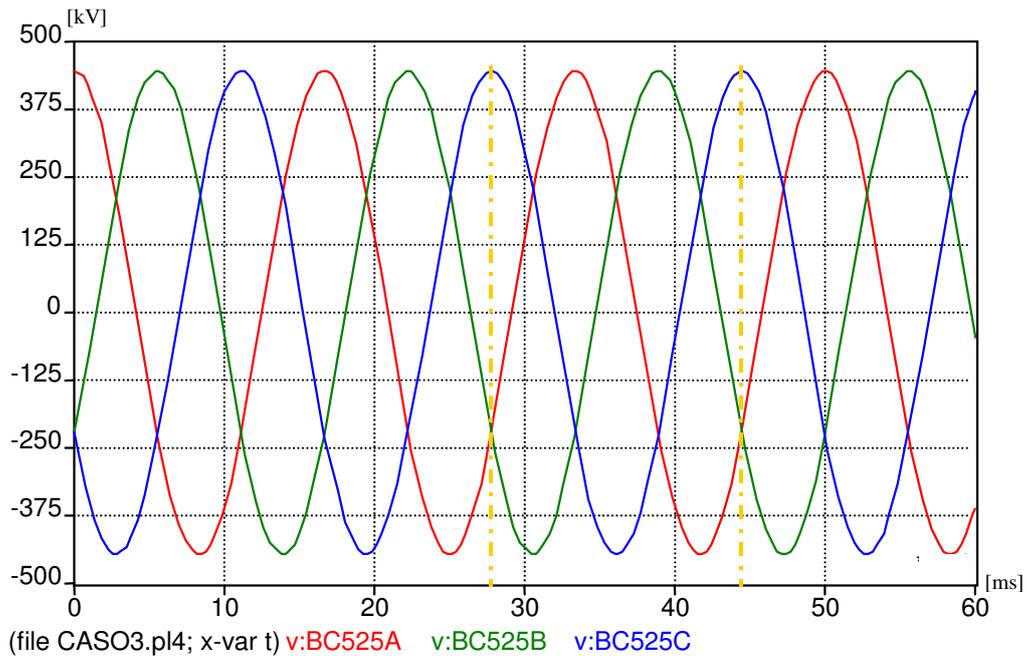
As barras US525, ME525 e SS525 foram utilizadas para possibilitar a representação da transposição da linha em 1/6, 1/3, 1/3 e 1/6.

Monitorou-se as tensões nas barras BC525, ME525 e CN525, respectivamente início, meio e final da linha.

### 4.2.1 Procedimento de cálculo

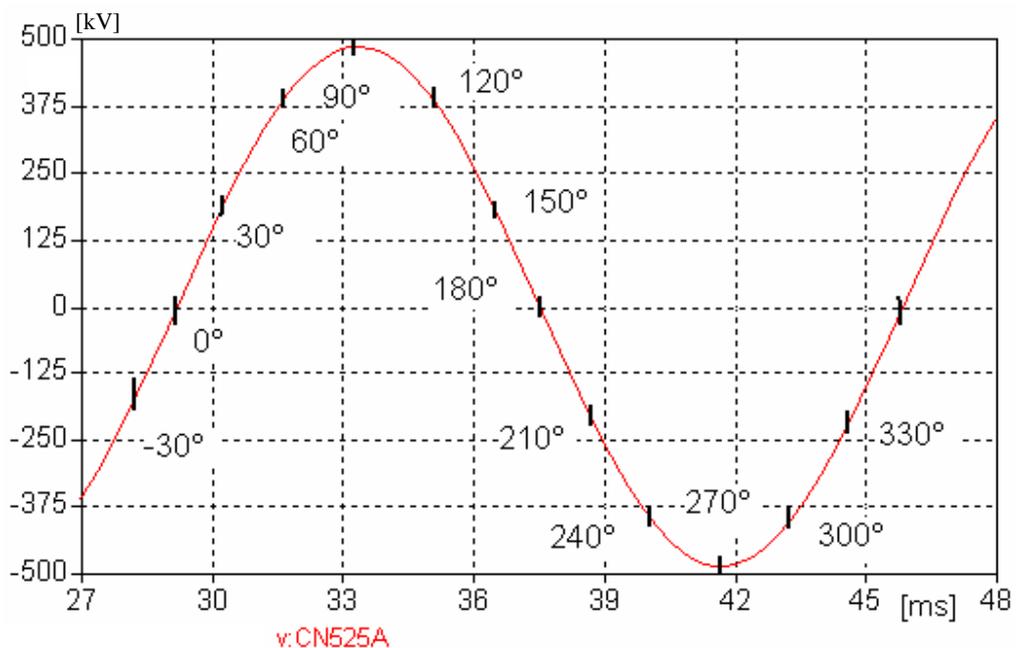
Foram realizadas 924 simulações para a determinação dos limites favoráveis de operação. Essas simulações consistiram em fechar a chave que está entre os pontos BL525 e BC525 (ver figura 1) em instantes diferentes para cada fase. As três fases foram acionadas em instantes que variaram de zero até o máximo de tensão. Essas simulações foram realizadas a

partir do instante 27,78 ms que é o instante em que a fase A (em vermelho) está na posição -30° (primeira linha vertical tracejada na cor laranja na figura 3). A maior parte das simulações foi realizada até o instante 44,44 ms (segunda linha vertical tracejada na cor laranja na figura 3).



**Figura 3 -** Instantes das simulações

A figura 4 apresenta a posição dos ângulos adotados em uma onda de tensão (fase A).



**Figura 4 -** Ângulos utilizados nas simulações

A tabela 2 apresenta os ângulos das três fases para os instantes entre 29,17 ms a 44,44 ms, variando de 30° em 30°.

Instante (ms)	27,78	29,17	30,56	31,94	33,33	34,72	36,11	37,50	38,89	40,28	41,67	43,06	44,44
Ângulo da Fase A [°]	-30	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
Ângulo da Fase B [°]	210	240	270	300	330	0	30	60	90	120	150	180	210
Ângulo da Fase C [°]	90	120	150	180	210	240	270	300	330	0	30	60	90

**Tabela 2 - Ângulos das fases**

A partir das simulações realizadas foram obtidos:

- Resultados da fase A: nesse conjunto de simulações, a fase A foi acionada entre os instantes 29,17 (0°) e 44,44 ms (330°), com variação de 30°. As fases B e C foram acionadas em 300 ms, para que não se considerasse a influência dessas duas fases na sobretensão da fase A. Com isso, obteve-se uma faixa de valores em que as sobretensões geradas foram menores e outra faixa em que as sobretensões foram maiores.
- Resultados com a influência do fechamento da fase B: nesse conjunto de simulações a fase A foi acionada entre os instantes 29,17 (0°) a 33,33 ms (90°), a fase B entre 29,17 a 44,44 ms (de 30° em 30°) e a fase C em 300 ms para não considerar a sua influência.
- Influência dos fechamentos das fases B e C: nesse conjunto de simulações a fase A foi acionada entre os instantes 27,78 (-30°) e 34,72 ms (120°) e as fases B e C variaram de 29,17 ms a 44,44 ms de 30° em 30°.

Após realizadas as simulações, foram obtidos os valores máximos (positivos e negativos) das tensões no início, meio e final da linha para cada uma das três fases. Esses valores foram tabulados e ordenados, de modo a se obter os casos de menor e maior sobretensão.

#### 4.2.2 Resultados

##### I) Resultados obtidos para o fechamento da Fase A:

Foram 12 simulações, em que o acionamento da fase A, como dito, variou de 29,17 ms a 44,44 ms e as fases B e C foram acionadas em 300 ms.

A tabela 3 apresenta as sobretensões no final da linha (em pu) dos casos simulados em ordem crescente.

A tensão de base, utilizada como referência nas tabelas de sobretensões apresentadas a seguir, é:

$$V_{\text{BASE}} = \frac{525\text{kV}\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 428,66\text{kV}$$

Casos	Sobretensões (pu)	Acionamento da Chave
		Ângulo de Fase A [°]
1	1,54	0
7	1,54	180
6	1,87	150
12	1,87	330
2	1,93	30
8	1,93	210
4	1,97	90
10	1,97	270
5	2,16	120
11	2,16	300
3	2,21	60
9	2,21	240

**Tabela 3** - Sobretensões no final da linha

Dos resultados obtidos, pode-se constatar que:

- As menores sobretensões se verificam para fechamentos na passagem da tensão pelo zero ou próximo ao zero (casos 1; 7);
- As maiores sobretensões não estão ligadas ao fechamento na passagem da tensão pelo máximo, e sim nos pontos próximos da ocorrência do máximo (casos 3;9);
- As sobretensões oriundas de fechamentos defasados de 180° resultam em sobretensões iguais em módulo, porém com sinal invertido.

## II) Resultados do fechamento da fase A com a influência do fechamento da fase B

Foram 48 simulações, como dito, com a fase A variando de 29,17 a 33,33 ms, fase B variando de 29,17 a 44,44 ms e fase C em 300 ms. As tabelas 4 e 5 apresentam as ocorrências das menores e maiores sobretensões no final da linha (em pu), respectivamente.

Casos	Sobretensões no final da linha [pu]	Acionamento das Chaves	
		Ângulo da Fase A [°]	Ângulo da Fase B [°]
11	1,69	0	180
5	1,73	0	0
12	1,87	0	210
6	1,90	0	30
17	1,93	30	0
23	1,93	30	180
24	1,93	30	210
18	1,96	30	30
22	1,96	30	150
47	1,97	90	180
48	1,97	90	210
42	2,00	90	30
41	2,01	90	0
8	2,01	0	90
16	2,03	30	330
10	2,04	0	150
02	2,04	0	270
20	2,05	30	90
04	2,06	0	330

**Tabela 4** - Sobretensões menores ou iguais a 2,06 pu no final da linha

Casos	Sobretensões no final da linha [pu]	Acionamento das Chaves	
		Ângulo da Fase A [°]	Ângulo da Fase B [°]
43	2,25	90	60
40	2,25	90	330
27	2,26	60	300
38	2,26	90	270
44	2,28	90	90
32	2,30	60	90
33	2,32	60	120
19	2,37	30	60
31	2,37	60	60
26	2,38	60	270
39	2,45	90	300
28	2,45	60	330
13	2,52	30	240
25	2,55	60	240
45	2,61	90	120

**Tabela 5** - Sobretensões maiores ou iguais a 2,25 pu no final da linha

Dos resultados obtidos pode-se constatar que:

- As menores sobretensões ocorreram para fechamentos na passagem das duas fases de tensão pelo zero (casos 11 e 5 da tabela 4);
- As maiores sobretensões não ocorreram para fechamento na passagem da tensão pelo máximo nas duas fases e sim nos pontos em que pelo menos uma das fases passa pelo máximo de tensão (caso 45 da tabela 5);
- Os casos em que as fases A e B foram fechadas no máximo de tensão (caso 44 da tabela 5, por exemplo) resultaram em altas sobretensões, porém não foram as maiores.

### III) Resultados do fechamento da fase A com a influência dos fechamentos das fases B e C

Foram realizadas 864 simulações, com a fase A variando de 27,78 a 34,72 ms e as fases B e C variando de 29,17 a 44,44 ms. As tabelas 6 e 7 apresentam os casos de ocorrências de menores e maiores sobretensões (em pu), respectivamente:

Casos	Sobretensões no final da linha [pu]	Acionamento das Chaves		
		Ângulo da Fase A [°]	Ângulo da Fase B [°]	Ângulo da Fase C [°]
267	1,66	0	180	180
273	1,73	0	180	0
201	1,73	0	0	0
266	1,76	0	180	150
195	1,76	0	0	180
200	1,82	0	0	330
272	1,82	0	180	330
194	1,85	0	0	150
254	1,85	0	150	150
255	1,87	0	150	180
57	1,87	330	0	0
129	1,87	330	180	0
128	1,87	330	180	330
212	1,90	0	30	330
213	1,90	0	30	0

**Tabela 6** - Sobretensões menores ou iguais a 1,9 pu no final da linha

Casos	Sobretensões no final da linha [pu]	Acionamento das Chaves		
		Ângulo da Fase A [°]	Ângulo da Fase B [°]	Ângulo da Fase C [°]
600	2,84	90	270	90
667	2,85	90	90	300
661	2,86	90	90	120
805	2,87	120	90	120
798	2,90	120	60	270
618	2,94	90	330	270
811	2,95	120	90	300
445	2,99	60	270	120
624	3,00	90	330	90
810	3,00	120	90	270
449	3,02	60	270	240
589	3,12	90	270	120
684	3,12	90	120	90
612	3,19	90	300	90
606	3,28	90	300	270

**Tabela 7** - Sobretensões maiores ou iguais a 2,84 pu no final da linha

Dos resultados acima obtidos pode-se constatar que:

- As menores sobretensões se verificam para fechamentos na passagem das três fases de tensão pelo zero (casos 267;273 e 201 da tabela 6);
- As maiores sobretensões foram observadas para fechamento na passagem da tensão pelo máximo em pelo menos duas fases (casos 606; 612 e 684 da tabela 7);
- Os casos em que as três fases foram fechadas no máximo resultaram em altas sobretensões porém, não foram as maiores (caso 600 da tabela 7, por exemplo).

#### IV) Avaliação Geral:

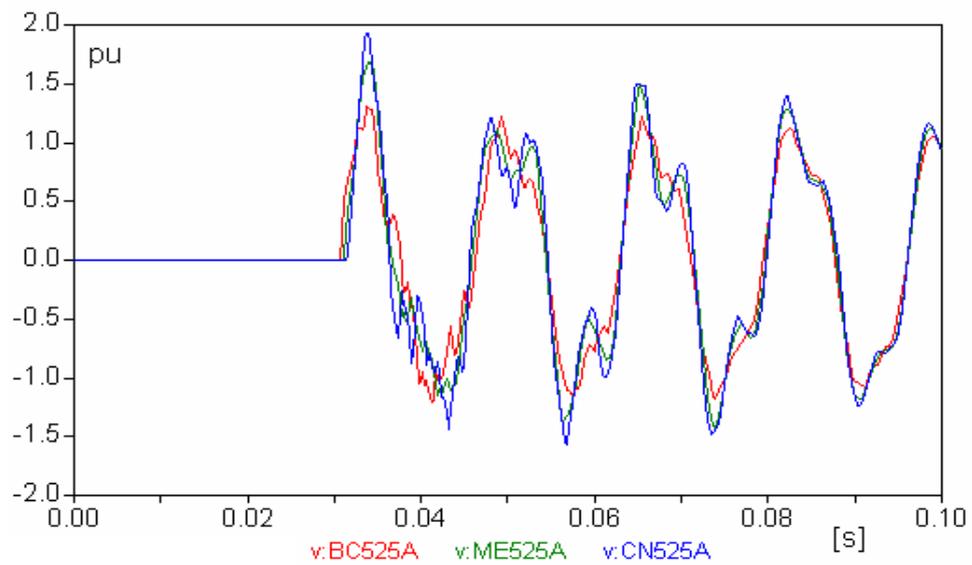
Das 864 simulações realizadas de fechamento da fase A, com as influências das fases B e C, resultou uma distribuição de sobretensões no final da linha na qual o valor médio de sobretensão foi 2,33 pu e o desvio padrão, 0,23 pu. Definiu-se, para efeito de análise, uma

máxima sobretensão de referência de 2,10 pu, que corresponde ao valor médio menos um desvio padrão, ou seja, somente 15,8% das sobretensões são inferiores a este valor, coincidindo com o uso habitual de pára-raios de 420 kV em sistemas de 500 kV, que têm um valor de disparo 100% a manobra de 890 kV crista, portanto  $890/428=2,08$  pu (maior sobretensão que restará no fim da linha e começo da linha). No cálculo do isolamento, usualmente se utiliza 15 a 25% a mais, chegando-se a um valor entre 2,4 e 2,6 pu.

Analisando as simulações realizadas, verificou-se que as menores sobretensões ocorreram no intervalo de fechamento das chaves com ângulos entre  $-30^\circ$  e  $30^\circ$  e entre  $150^\circ$  e  $210^\circ$ . Por isso, foram selecionadas as simulações em que o acionamento foi realizado nesses intervalos.

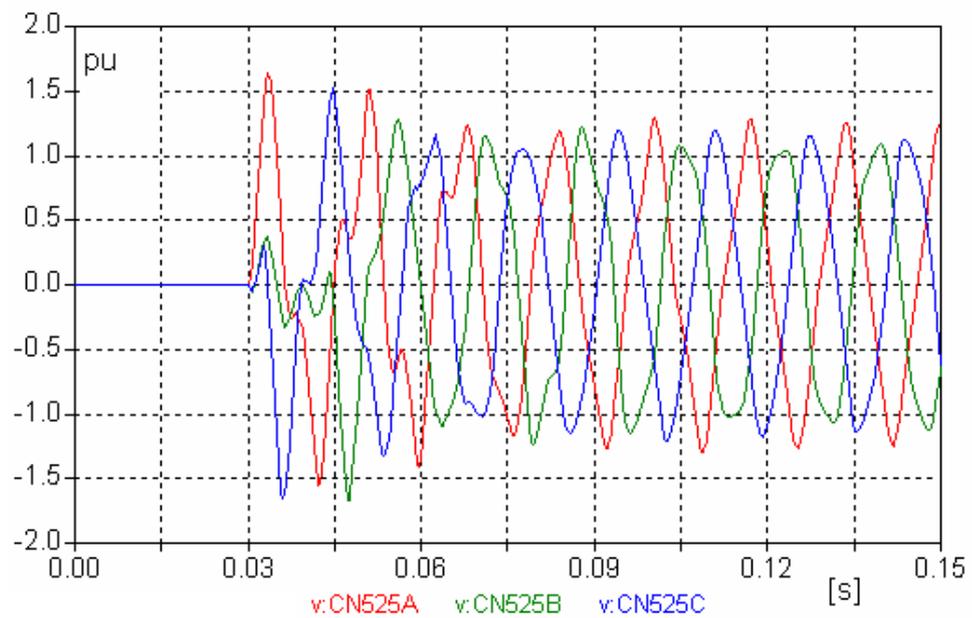
Apesar das menores sobretensões ocorrem entre  $-30^\circ$  e  $30^\circ$ , e entre  $150^\circ$  e  $210^\circ$ , nem todos os casos apresentam sobretensões abaixo de 2,10 pu. A seguir, nas tabelas 9 e 10, encontram-se apresentados, com destaque em negrito, os casos em que as sobretensões, no final da linha, ultrapassaram esse valor. Nestes casos destacados, a sobretensão foi menor que 3,28 pu.

Na figura 5 são apresentadas, no tempo, as tensões no início (BC525A-em vermelho), meio (ME525A-em verde) e final (CN525A-em azul) da linha. O início da linha é em Blumenau e o final em Campos Novos. Essa figura mostra que a maior sobretensão ocorre no final da linha (em azul), como esperado. Por isso, gráficos a partir da figura 6, inclusive, apresentam apenas as sobretensões no final da linha.

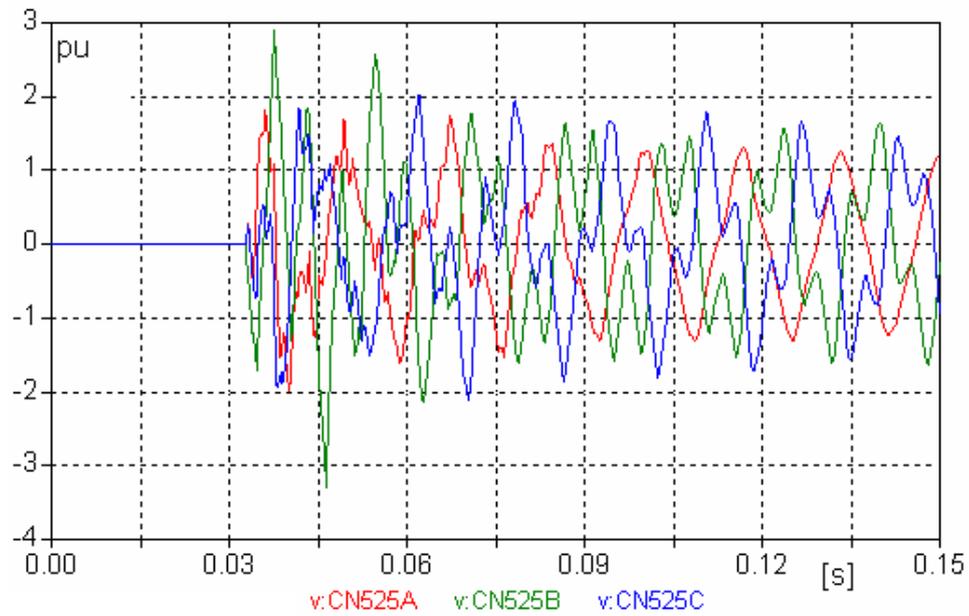


**Figura 5 -** Sobretensões no início, meio e final da linha

As figuras 6 e 7 apresentam os casos de menor e maior sobretensões, respectivamente, para energização de linha de transmissão.



**Figura 6 -** Sobretensões no final da linha – menor sobretensão



**Figura 7 -** Sobretensões no final da linha – maior sobretensão

A tabela 8 apresenta os ângulos em que ocorreram as maiores e menores sobretensões.

	Ângulo de Acionamento [°]			Sobretensão [pu]
	Fase A	Fase B	Fase C	
Menor sobretensão	0	180	180	1,66
Maior sobretensão	90	300	270	3,28

**Tabela 8 -** Ângulos de acionamento com maiores e menores sobretensões

Os ângulos das tabelas 9 e 10 apresentam, respectivamente, as posições na onda de tensão em que as chaves foram acionadas resultando nas menores sobretensões.

A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
-30	330	330	<b>-30</b>	<b>330</b>	<b>150</b>	-30	150	330	-30	150	150
-30	330	0	<b>-30</b>	<b>330</b>	<b>180</b>	-30	150	0	-30	150	180
-30	330	30	<b>-30</b>	<b>330</b>	<b>210</b>	<b>-30</b>	<b>150</b>	<b>30</b>	<b>-30</b>	<b>150</b>	<b>210</b>
<b>-30</b>	<b>0</b>	<b>330</b>	<b>-30</b>	<b>0</b>	<b>150</b>	-30	180	330	-30	180	150
<b>-30</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>-30</b>	<b>0</b>	<b>180</b>	-30	180	0	-30	180	180
<b>-30</b>	<b>0</b>	<b>30</b>	<b>-30</b>	<b>0</b>	<b>210</b>	<b>-30</b>	<b>180</b>	<b>30</b>	<b>-30</b>	<b>180</b>	<b>210</b>
-30	30	330	<b>-30</b>	<b>30</b>	<b>150</b>	<b>-30</b>	<b>210</b>	<b>330</b>	-30	210	150
-30	30	0	<b>-30</b>	<b>30</b>	<b>180</b>	<b>-30</b>	<b>210</b>	<b>0</b>	-30	210	180
<b>-30</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>-30</b>	<b>30</b>	<b>210</b>	<b>-30</b>	<b>210</b>	<b>30</b>	<b>-30</b>	<b>210</b>	<b>210</b>
0	330	330	<b>0</b>	<b>330</b>	<b>150</b>	0	150	330	0	150	150
0	330	0	<b>0</b>	<b>330</b>	<b>180</b>	0	150	0	0	150	180
0	330	30	<b>0</b>	<b>330</b>	<b>210</b>	<b>0</b>	<b>150</b>	<b>30</b>	<b>0</b>	<b>150</b>	<b>210</b>
<b>0</b>	<b>0</b>	<b>330</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>150</b>	0	180	330	0	180	150
<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>180</b>	0	180	0	0	180	180
<b>0</b>	<b>0</b>	<b>30</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>210</b>	<b>0</b>	<b>180</b>	<b>30</b>	<b>0</b>	<b>180</b>	<b>210</b>
0	30	330	<b>0</b>	<b>30</b>	<b>150</b>	<b>0</b>	<b>210</b>	<b>330</b>	0	210	150
0	30	0	<b>0</b>	<b>30</b>	<b>180</b>	0	210	0	0	210	180
0	30	30	<b>0</b>	<b>30</b>	<b>210</b>	<b>0</b>	<b>210</b>	<b>30</b>	<b>0</b>	<b>210</b>	<b>210</b>
30	330	330	<b>30</b>	<b>330</b>	<b>150</b>	30	150	330	30	150	150
30	330	0	<b>30</b>	<b>330</b>	<b>180</b>	30	150	0	30	150	180
30	330	30	<b>30</b>	<b>330</b>	<b>210</b>	<b>30</b>	<b>150</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>150</b>	<b>210</b>
<b>30</b>	<b>0</b>	<b>330</b>	<b>30</b>	<b>0</b>	<b>150</b>	30	180	330	30	180	150
<b>30</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>30</b>	<b>0</b>	<b>180</b>	30	180	0	30	180	180
<b>30</b>	<b>0</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>0</b>	<b>210</b>	<b>30</b>	<b>180</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>180</b>	<b>210</b>
30	30	330	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>150</b>	<b>30</b>	<b>210</b>	<b>330</b>	30	210	150
30	30	0	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>180</b>	30	210	0	30	210	180
30	30	30	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>210</b>	<b>30</b>	<b>210</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>210</b>	<b>210</b>

**Tabela 9 - Ângulos de chaveamento - fase A  $0^\circ \pm 30^\circ$**

Nota: os números em negrito são de casos que passaram de 2,10 pu de sobretensão.

A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
150	330	330	<b>150</b>	<b>330</b>	<b>150</b>	<b>150</b>	<b>150</b>	<b>330</b>	<b>150</b>	<b>150</b>	<b>150</b>
150	330	0	150	330	180	150	150	0	<b>150</b>	<b>150</b>	<b>180</b>
<b>150</b>	<b>330</b>	<b>30</b>	150	330	210	<b>150</b>	<b>150</b>	<b>30</b>	150	150	210
150	0	330	150	0	150	150	180	330	<b>150</b>	<b>180</b>	<b>150</b>
150	0	0	150	0	180	150	180	0	<b>150</b>	<b>180</b>	<b>180</b>
<b>150</b>	<b>0</b>	<b>30</b>	150	0	210	<b>150</b>	<b>180</b>	<b>30</b>	150	180	210
150	30	330	<b>150</b>	<b>30</b>	<b>150</b>	<b>150</b>	<b>210</b>	<b>330</b>	<b>150</b>	<b>210</b>	<b>150</b>
150	30	0	<b>150</b>	<b>30</b>	<b>180</b>	<b>150</b>	<b>210</b>	<b>0</b>	<b>150</b>	<b>210</b>	<b>180</b>
<b>150</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>150</b>	<b>30</b>	<b>210</b>	<b>150</b>	<b>210</b>	<b>30</b>	150	210	210
180	330	330	180	330	150	180	150	330	180	150	150
180	330	0	180	330	180	180	150	0	180	150	180
<b>180</b>	<b>330</b>	<b>30</b>	180	330	210	<b>180</b>	<b>150</b>	<b>30</b>	180	150	210
180	0	330	180	0	150	180	180	330	180	180	150
180	0	0	180	0	180	180	180	0	180	180	180
<b>180</b>	<b>0</b>	<b>30</b>	180	0	210	<b>180</b>	<b>180</b>	<b>30</b>	180	180	210
180	30	330	<b>180</b>	<b>30</b>	<b>150</b>	<b>180</b>	<b>210</b>	<b>330</b>	180	210	150
180	30	0	<b>180</b>	<b>30</b>	<b>180</b>	<b>180</b>	<b>210</b>	<b>0</b>	180	210	180
<b>180</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>180</b>	<b>30</b>	<b>210</b>	<b>180</b>	<b>210</b>	<b>30</b>	180	210	210
<b>210</b>	<b>330</b>	<b>330</b>	<b>210</b>	<b>330</b>	<b>150</b>	210	150	330	210	150	150
<b>210</b>	<b>330</b>	<b>0</b>	<b>210</b>	<b>330</b>	<b>180</b>	210	150	0	210	150	180
<b>210</b>	<b>330</b>	<b>30</b>	<b>210</b>	<b>330</b>	<b>210</b>	<b>210</b>	<b>150</b>	<b>30</b>	210	150	210
<b>210</b>	<b>0</b>	<b>330</b>	<b>210</b>	<b>0</b>	<b>150</b>	210	180	330	210	180	150
<b>210</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>210</b>	<b>0</b>	<b>180</b>	210	180	0	210	180	180
<b>210</b>	<b>0</b>	<b>30</b>	<b>210</b>	<b>0</b>	<b>210</b>	<b>210</b>	<b>180</b>	<b>30</b>	210	180	210
<b>210</b>	<b>30</b>	<b>330</b>	<b>210</b>	<b>30</b>	<b>150</b>	<b>210</b>	<b>210</b>	<b>330</b>	<b>210</b>	<b>210</b>	<b>150</b>
<b>210</b>	<b>30</b>	<b>0</b>	<b>210</b>	<b>30</b>	<b>180</b>	<b>210</b>	<b>210</b>	<b>0</b>	210	210	180
<b>210</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>210</b>	<b>30</b>	<b>210</b>	<b>210</b>	<b>210</b>	<b>30</b>	210	210	210

**Tabela 10 - Ângulos de chaveamento – fase A em  $180^\circ \pm 30^\circ$**

Nota: os números em negrito são de casos que passaram de 2,10 pu de sobretensão.

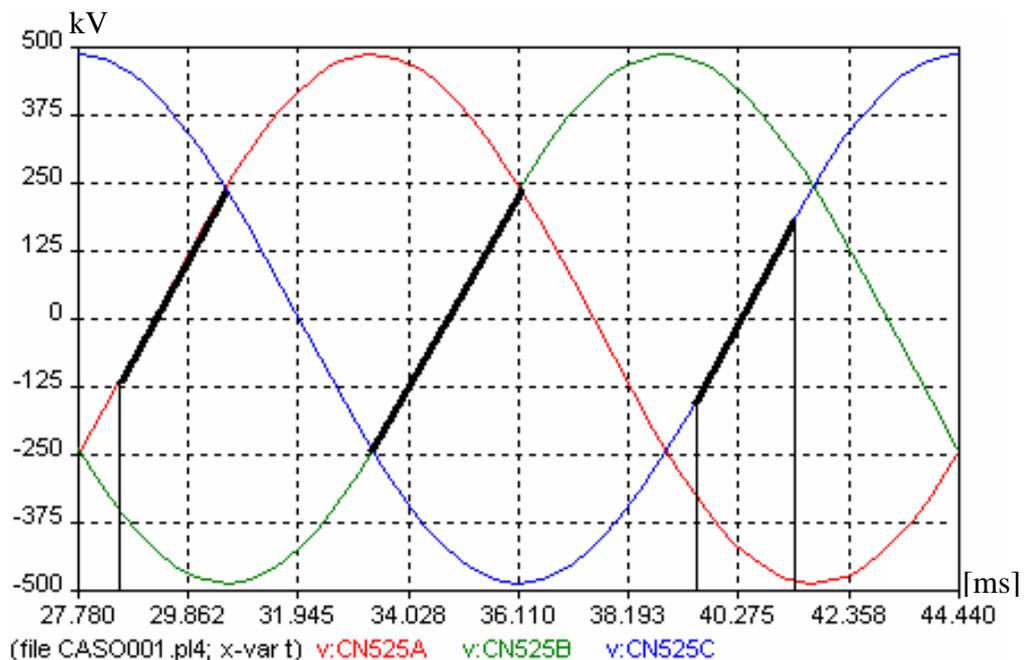
Para que os valores das sobretensões se mantivessem dentro do limite fixado de 2,10 pu, as faixas de ângulos de acionamento das chaves deveriam ser reduzidas. Optou-se por reduzir pela metade a faixa de instantes de acionamento da fase A, ou seja, nos casos em que o

acionamento ocorria em  $30^\circ$  foi diminuído para  $15^\circ$ . Foram também realizadas simulações em que a fase A foi fechada entre  $150^\circ$  e  $210^\circ$ . Após essas simulações foram obtidos os novos limites favoráveis de fechamento das chaves para energização da linha de transmissão. Esses limites são apresentados na tabela 11.

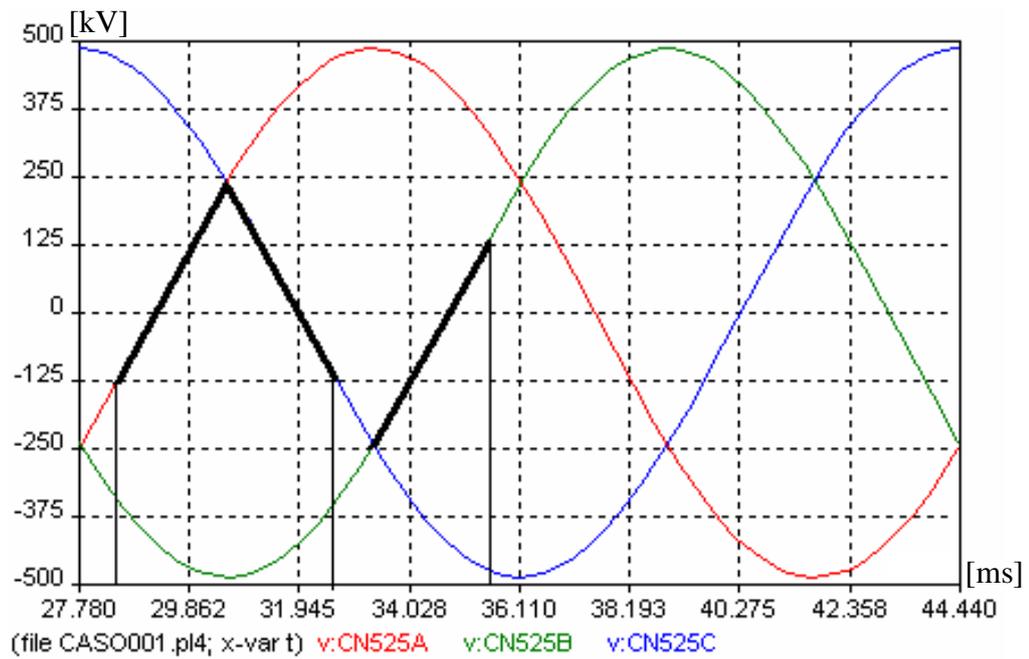
Casos	Limites de Acionamento		
	Fase A	Fase B	Fase C
01	$-15^\circ$ a $30^\circ$	$330^\circ$ a $30^\circ$	$345^\circ$ a $15^\circ$
02	$-15^\circ$ a $30^\circ$	$330^\circ$ a $15^\circ$	$150^\circ$ a $195^\circ$
03	$-30^\circ$ a $30^\circ$	$150^\circ$ a $195^\circ$	$150^\circ$ a $195^\circ$
04	$150^\circ$ a $195^\circ$	$330^\circ$ a $30^\circ$	$330^\circ$ a $15^\circ$
05	$150^\circ$ a $195^\circ$	$330^\circ$ a $15^\circ$	$150^\circ$ a $210^\circ$
06	$165^\circ$ a $210^\circ$	$150^\circ$ a $210^\circ$	$150^\circ$ a $210^\circ$

**Tabela 11** - Limites Favoráveis de Operação

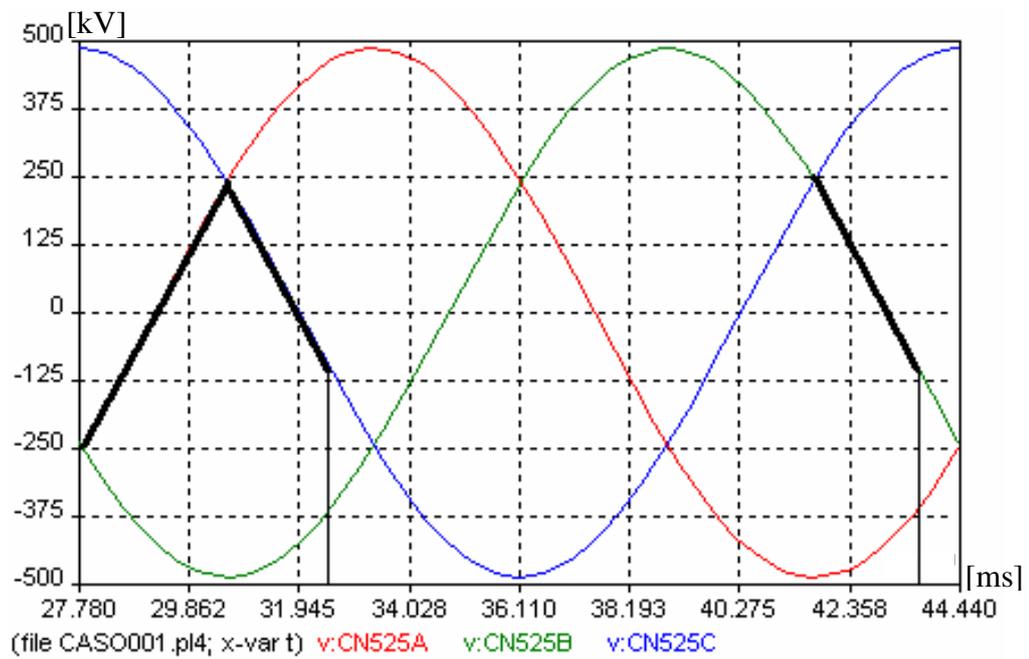
As figuras 8 a 13, a seguir, apresentam os intervalos de acionamento das chaves (tabela 11) das três fases de modo a obter sobretensões de no máximo 2,10 pu.



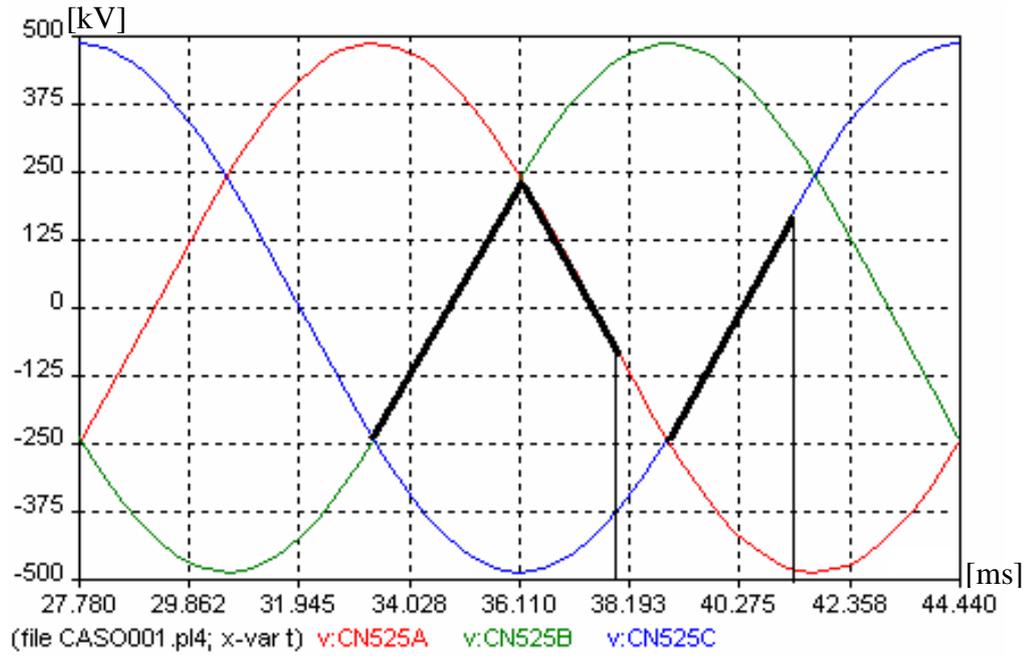
**Figura 8** - Caso 01 da tabela 11



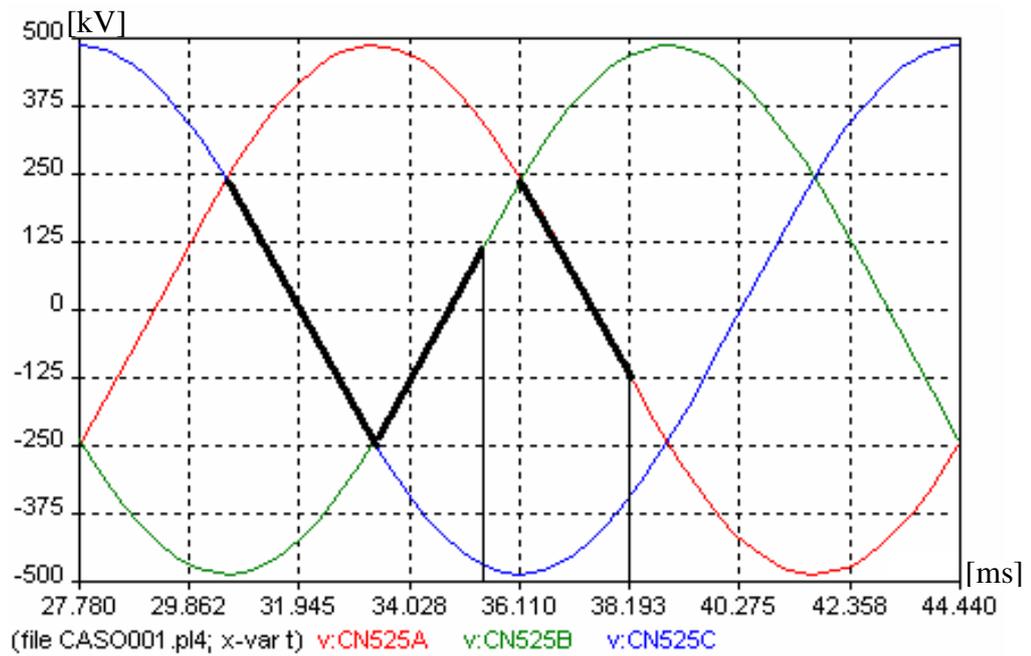
**Figura 9 -** Caso 02 da tabela 11



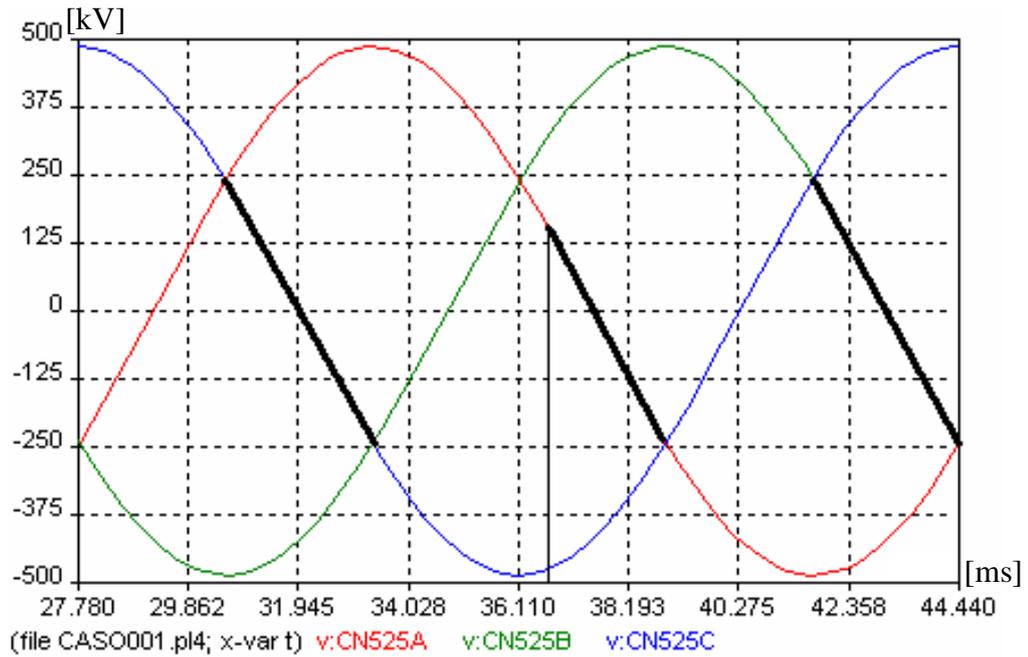
**Figura 10 -** Caso 03 da tabela 11



**Figura 11** - Caso 04 da tabela 11



**Figura 12** - Caso 05 da tabela 11



**Figura 13** - Caso 06 da tabela 11

Os casos abaixo não definiram uma faixa de acionamento:

- Fase A entre  $-30^\circ$  e  $30^\circ$ , Fase B entre  $150^\circ$  e  $210^\circ$  e Fase C entre  $330^\circ$  e  $30^\circ$
- Fase A entre  $150^\circ$  e  $210^\circ$ , Fase B entre  $150^\circ$  e  $210^\circ$  e Fase C entre  $330^\circ$  e  $30^\circ$

#### 4.2.3 Recomendação

Do exposto anteriormente, recomenda-se o fechamento nos seguintes instantes (ângulos de cada fase e sua referência de tempo):

Fases	Ideal [°]	Faixa Admissível [°]
A	7,5	$\pm 22,5$
B	0	$\pm 30$
C	7,5	$\pm 22,5$

**Tabela 12** - Ângulos recomendados para energização de linha

#### 4.2.4 Análise estatística do desempenho

Para esta análise foram considerados 200 casos nos intervalos possíveis de instantes, conforme indica a figura 8. Para as fases A os intervalos estão compreendidos entre  $-15^\circ$  a  $30^\circ$ , para a fase B entre  $330^\circ$  a  $30^\circ$  e para a fase C entre  $345^\circ$  e  $15^\circ$ .

Os valores obtidos foram:

Média:  $\mu = 1,67$  pu e

Desvio Padrão:  $\sigma = 0,10$  pu

Menor sobretensão encontrada: 1,54 pu

Maior sobretensão encontrada: 2,01 pu

Probabilidade de ocorrer sobretensão de valor superior a 2,5 pu: Menor do que 0,001, pois  $(2,5 = 1,67 + Z \cdot 0,1 \Rightarrow Z = 8,3$  e  $P(Z \geq 8,3) \cong 0$ .

A mesma análise foi realizada para os intervalos ilustrados na figura 9, cujos ângulos foram, para a fase A:  $-15^\circ$  a  $30^\circ$ , fase C  $150^\circ$  a  $195^\circ$  e para a fase B:  $330^\circ$  a  $15^\circ$ .

Os valores obtidos foram:

Média:  $\mu = 1,74$  pu e

Desvio Padrão:  $\sigma = 0,08$  pu

Menor sobretensão encontrada: 1,60 pu

Maior sobretensão encontrada: 1,97 pu

Probabilidade de ocorrer sobretensão de valor superior a 2,5 pu: Menor do que 0,001, pois  $(2,5 = 1,74 + Z \cdot 0,08 \Rightarrow Z = 9,5$  e  $P(Z \geq 9,5) \cong 0$ .

#### 4.2.5 Desempenho utilizando-se resistor de pré-inserção

A figura 14 mostra um esquema equivalente de funcionamento de um resistor de pré-inserção. Ao ser dado o comando para fechar o disjuntor, a chave principal se fecha, inserindo o resistor em série com o circuito. Após 8 milissegundos, a chave dependente se fecha, anulando a ação do resistor a partir desse momento. Considerando-se estas condições básicas, foram feitas simulações com fechamentos calculados estatisticamente admitindo uma dispersão no fechamento dos pólos dentro de uma curva gaussiana com desvio padrão de 2 ms

Os valores obtidos foram:

Média:  $\mu = 1,58$  pu e

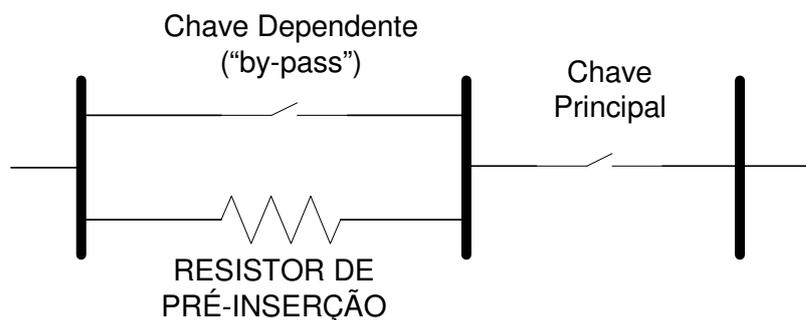
Desvio Padrão:  $\sigma = 0,22$  pu

Menor sobretensão encontrada: 2,15 pu

Maior sobretensão encontrada: 1,19 pu

Probabilidade de ocorrer sobretensão de valor superior a 2,5 pu: Menor do que 0,001, pois

$(2,5 = 1,58 + Z \cdot 0,22 \Rightarrow Z = 4,18$  e  $P(Z \geq 4,18) \cong 0$ .



**Figura 14 -** Esquema de funcionamento do resistor de pré-inserção

### 4.3 Religamento de linha de transmissão sem reator

São abordados neste item, os estudos realizados com o objetivo de determinar os instantes de fechamento de cada fase do disjuntor em que ocorrem as menores sobretensões no sistema quando do religamento da linha de transmissão em estudo (conforme figura 1). A determinação desses instantes servirá como base para a especificação do dispositivo sincronizador quando do religamento.

#### 4.3.1 Metodologia

Quando um disjuntor opera na função de desligar uma linha em vazio ou quando a linha já foi desligada do outro lado, a corrente capacitiva da linha é interrompida ao passar pelo zero e, quando isto ocorre, a tensão está passando pelo seu valor máximo, conseqüentemente deixando uma “carga residual” na linha, que não é igual em todas as três fases, devido ao acoplamento existente entre elas. Este acoplamento e o deslocamento do neutro deixam na fase em que primeiro se interrompe a corrente, uma tensão da ordem de 1,3 pu, e, a menos que esta carga seja drenada por um transformador de potencial indutivo ou reator, permanecerá na linha por um certo tempo. Se for drenada por um transformador de potencial indutivo, ela desaparece rapidamente e o religamento recai no caso já considerado de energização.

Sem a existência de equipamentos especiais, o decaimento da carga residual de uma linha é muito lento, sendo governado pelas condições climáticas. Desta forma, a linha mantém-se carregada com praticamente sua tensão máxima após a interrupção da corrente por um período que pode durar de 2 a 5 minutos para descarga total, podendo até mesmo atingir

15 minutos em condições ambientais muito secas, ou seja, um tempo bastante superior ao tempo morto utilizado nos esquemas de religamento, que se situa em torno de 30 ciclos (500 ms).

Se a linha for religada antes de sua carga residual ter sido drenada e os pólos do disjuntor se fecharem quando a tensão do sistema estiver com polaridade oposta à da linha, a diferença entre os valores de tensão nesses pólos é grande e, conseqüentemente, a sobretensão transitória também será maior.

O tempo de descarga da linha pode ser bastante modificado caso ao disjuntor tenham sido acoplados resistores de abertura ou se reatores em derivação ou transformadores de potencial indutivo forem conectados à linha.

Dos fatos expostos, verifica-se que, para uma mesma configuração de linha, para um mesmo sistema alimentador, as sobretensões originadas de manobras de religamento não são constantes, uma vez que dependem da carga residual presente em cada fase, do ponto da onda de tensão em que o disjuntor é chaveado e da dispersão entre os contatos, para cada operação realizada.

Desta forma, os estudos dessa natureza são realizados estatisticamente, de modo que, todas as prováveis condições de fechamento, citadas no parágrafo anterior, possam ser consideradas.

A metodologia adotada nas simulações do presente estudo, considerando a LT sem compensação derivada (ela, de fato, não tem) e levando em conta os aspectos relacionados à carga residual na linha e ao ponto da onda de tensão de fechamento do disjuntor, foi a seguinte:

- Como não foram considerados equipamentos especiais que pudessem drenar a carga residual quando da abertura da LT, a manobra de religamento da LT foi simulada na presença das cargas residuais nas três fases;

- A simulação foi iniciada com a LT operando em condições normais;
- A seguir, foi simulada a abertura trifásica da LT, resultando no aparecimento de cargas residuais nas três fases;
- Na presença dessas cargas residuais, foi simulado o religamento da LT com as três fases acionadas em instantes variando a cada 30° dentro de um ciclo completo da onda de tensão. Foram pesquisadas todas as combinações possíveis de fechamento de cada fase, ou seja, para cada fase foram fixados os 12 pontos ( $360^\circ/30^\circ$ ) possíveis para fechamento dos pólos do disjuntor. Considerando o religamento das três fases, o resultado é a necessidade de 1.728 ( $12 \times 12 \times 12 = 1.728$ ) simulações de casos, no mínimo. Na prática foi preciso estender os intervalos e foram simulados 1.772 casos.
- A seguir, foram analisados os valores máximos obtidos das tensões no início, meio e final da linha para cada uma das três fases. Esses valores foram tabulados e ordenados numa distribuição de frequência das sobretensões de modo a se identificar o comportamento dos valores das sobretensões originados no religamento da LT;
- Finalmente, foram identificadas as faixas sobre a onda de tensão de cada fase que originaram as menores sobretensões no sistema. Foram realizadas algumas simulações adicionais, com o objetivo de refinar essas faixas.

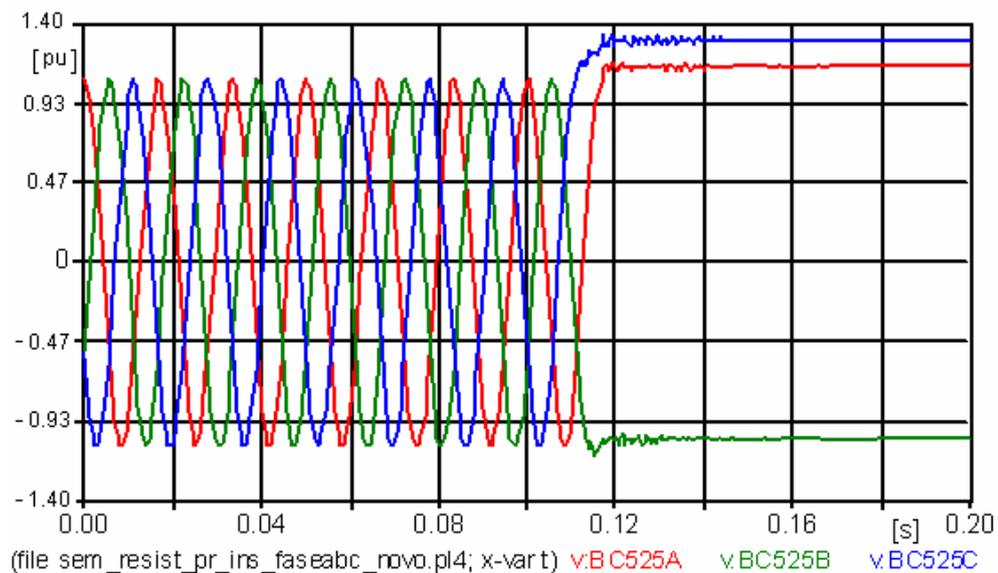
O critério de sobretensão máxima de referência para a análise foi o mesmo utilizado nos estudos de energização da LT, ou seja, uma sobretensão máxima de 2,10 pu no sistema, assumindo-se que esse valor apresenta uma relação (custo x desempenho) adequada para os estudos de coordenação de isolamento das linhas e subestações.

### 4.3.2 Resultados obtidos:

#### a) Determinação das Cargas Residuais

O sistema apresentado na figura 1 foi simulado operando em condição normal, estando fechado o disjuntor (ligação BL525 – BC525) da LT Campos Novos - Blumenau. Nessas condições, foi simulada a manobra de abertura do disjuntor da LT, o que acarretou a obtenção de cargas residuais nas 3 fases da LT. Essas cargas residuais estarão presentes quando do religamento dessa LT.

A figura 15 apresenta as cargas residuais (tensões) nas 3 fases da LT resultantes da manobra de abertura da LT.



**Figura 15** - Cargas Residuais nas Três Fases da LT (Tensões na barra de Blumenau)

Os valores das cargas residuais obtidos foram:

Fase A: + 493,42 kVpico (1,15 pu);

Fase B: – 445,26 kVpico (1,04 pu);

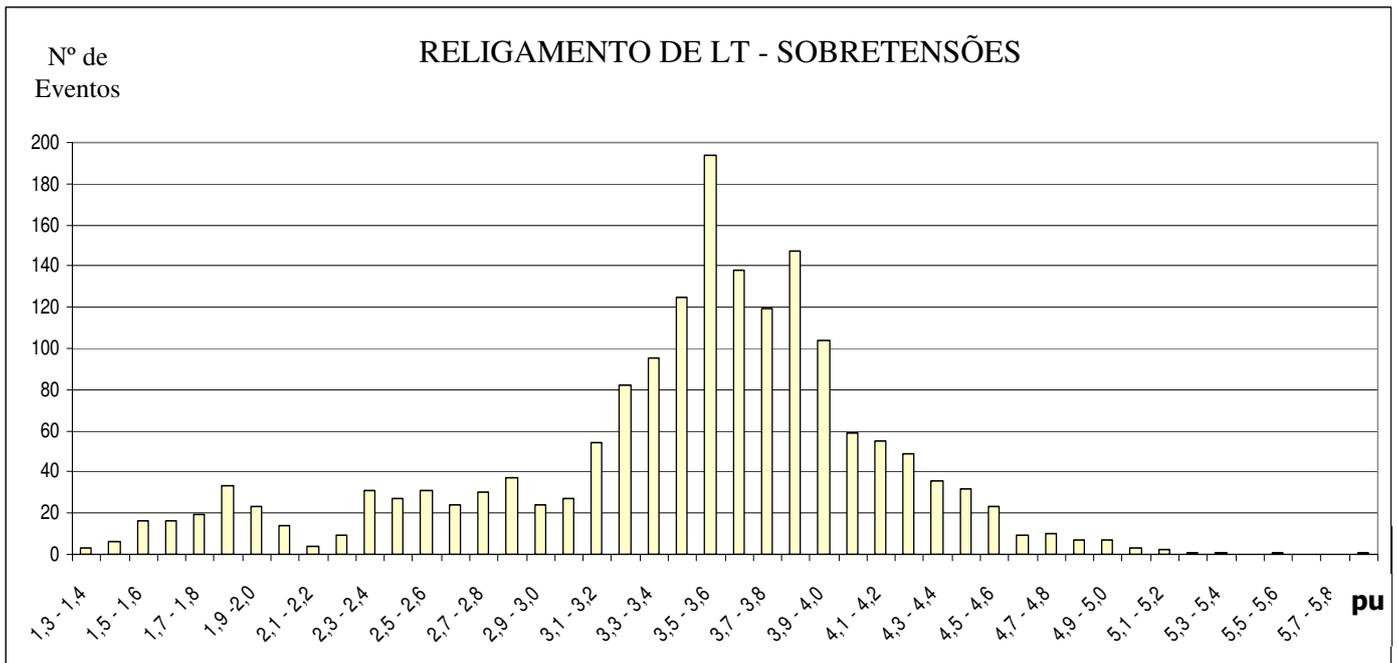
Fase C: + 559,30 kVpico (1,30 pu).

Conforme citado (ver 4.3.1 Metodologia), a primeira fase que abriu (fase C) permaneceu com uma tensão residual da ordem de 1,30 pu e as demais fases permaneceram com tensões residuais superiores ao valor nominal (de pico) da tensão de fase da LT (428,66 kVpico). Observar também o baixo amortecimento da carga residual.

#### b) Religamento da LT com Cargas Residuais

A partir da condição obtida no item anterior, passou-se à análise da manobra de religamento da LT, na presença das cargas residuais.

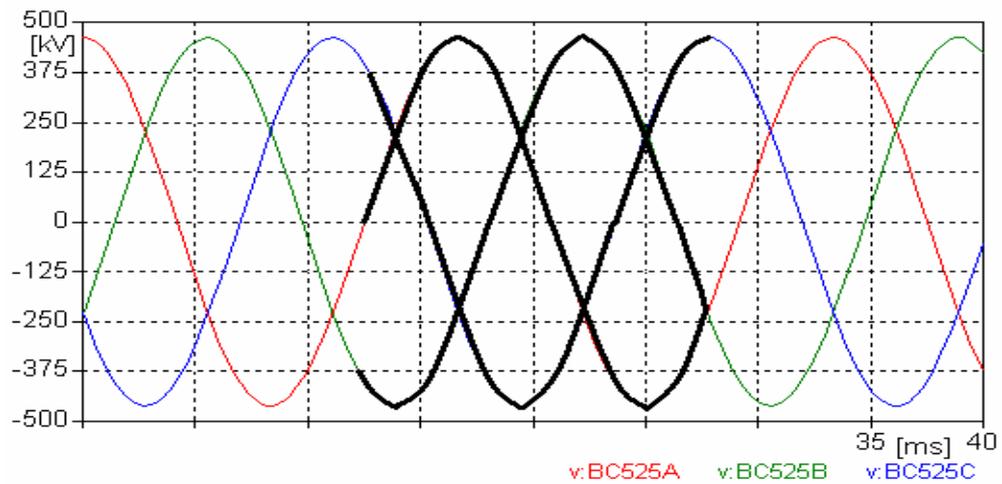
Foram simulados os 1.772 casos de religamento conforme a metodologia descrita e a figura 16 apresenta a distribuição de frequência dos valores das sobretensões no final da linha, para esses casos simulados.



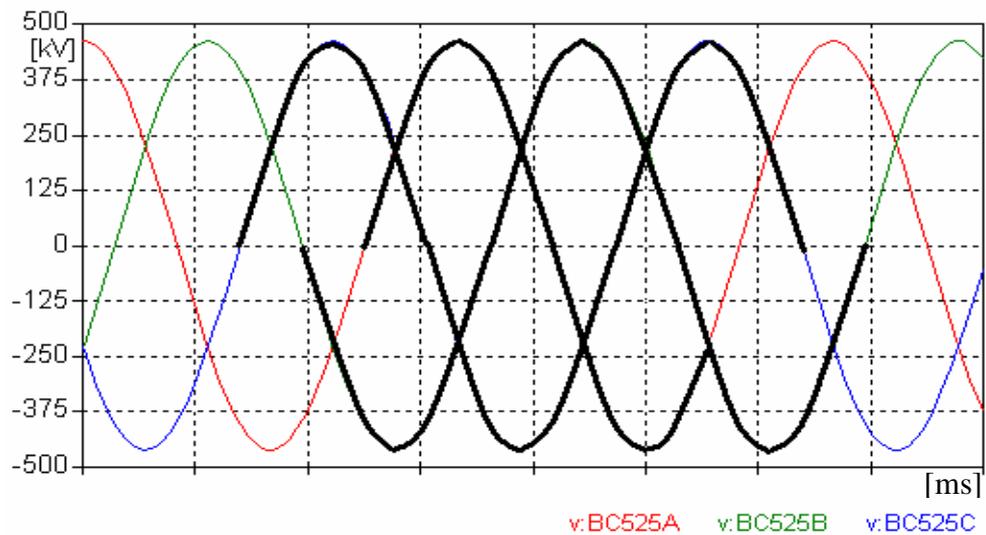
**Figura 16 -** Distribuição estatística das sobretensões obtidas no religamento da LT (pu)

Observa-se, conforme a figura 16, que a maior parte das sobretensões se situou na faixa entre 3,0 e 4,5 pu (1.316 casos, correspondente a 74,3% do total das simulações). Apenas 130 casos (7,3%) apresentaram sobretensões de até 2,10 pu (critério de máxima sobretensão admissível), apontando para uma pequena faixa de pontos sobre a onda de tensão de cada fase, onde o controlador deve atuar.

A figura 17 apresenta os intervalos simulados de acionamento das três fases para o religamento da LT (1.772 simulações) e a figura 18 apresenta esses intervalos mais os adicionais que foram necessários para a determinação dos melhores instantes de religamento da LT.

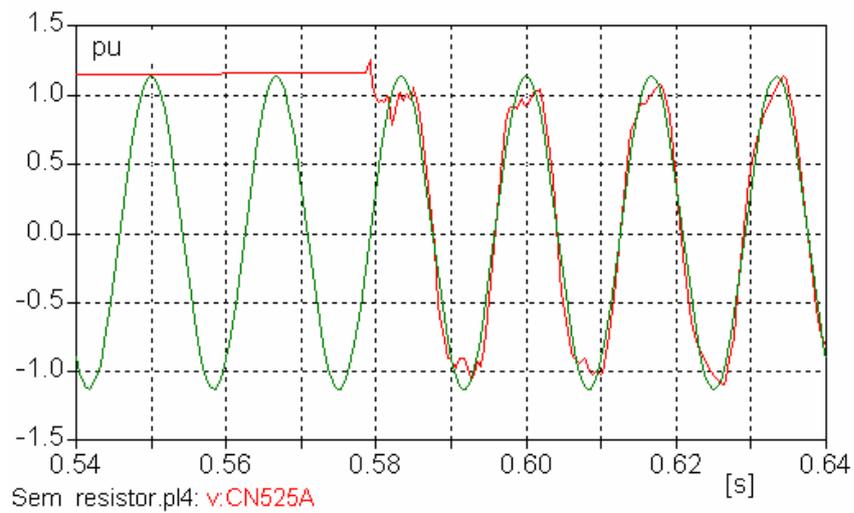


**Figura 17 -** Intervalos de Acionamento das 3 Fases – Simulações Iniciais



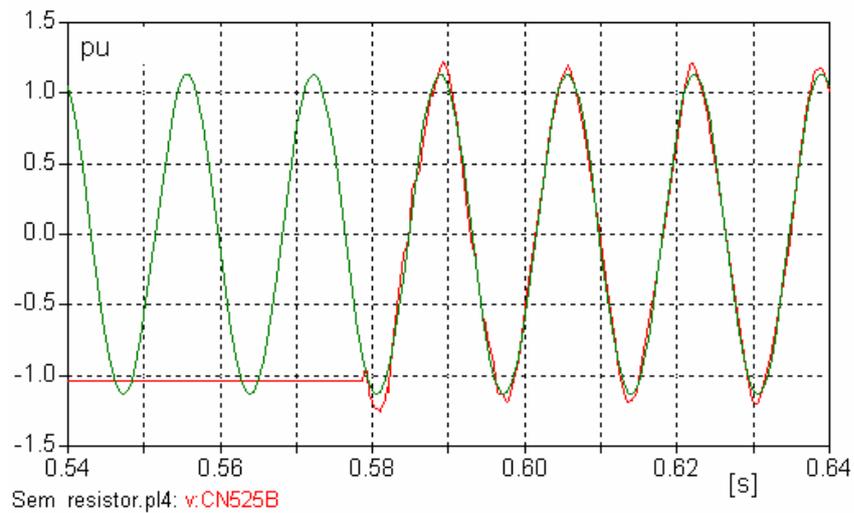
**Figura 18 -** Intervalos de Acionamento das 3 Fases – Todas as Simulações

As figuras 19, 20 e 21 a seguir, apresentam o caso de menor sobretensão, mostrando as formas de onda para as fases A, B e C, respectivamente, para religamento de linha de transmissão sem reator.



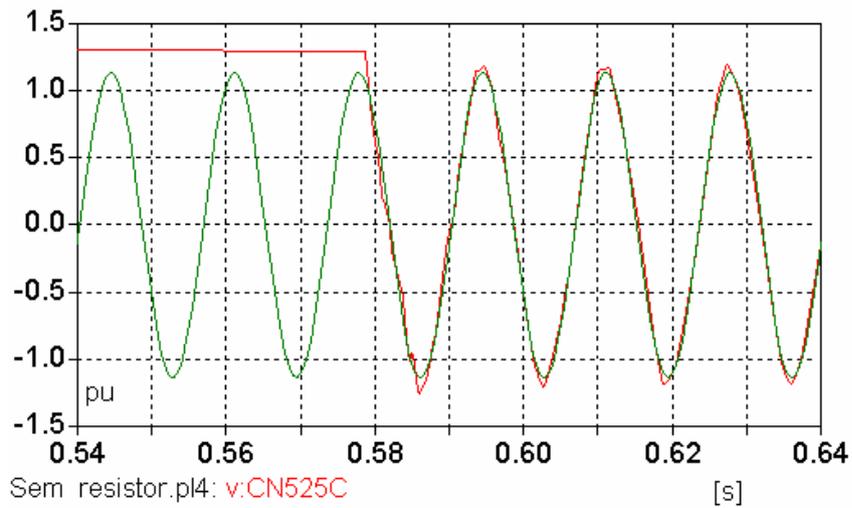
referencia.pl4: v:CN525A

**Figura 19** - Menor sobretensão no final da linha – Fase A



referencia.pl4: v:CN525B

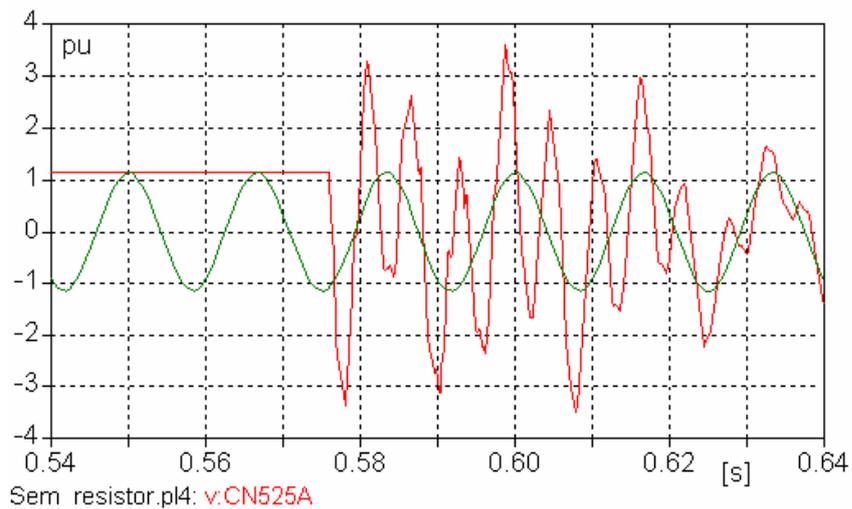
**Figura 20** - Menor sobretensão no final da linha – Fase B



referencia.pl4: v:CN525C

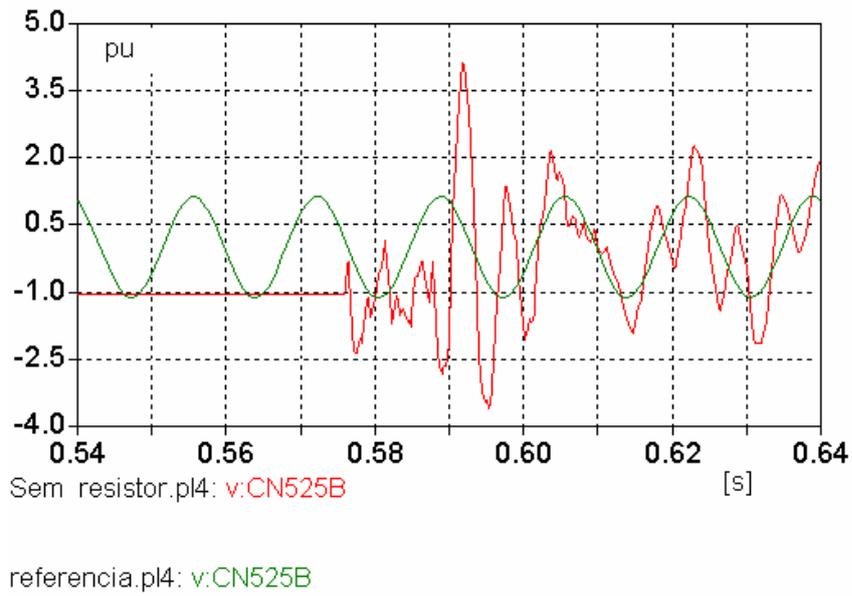
**Figura 21** - Menor sobretensão no final da linha – Fase C

As figuras 22, 23 e 24 a seguir, apresentam o caso de maior sobretensão, mostrando as formas de onda para as fases A, B e C, respectivamente, para religamento de linha de transmissão sem reator.

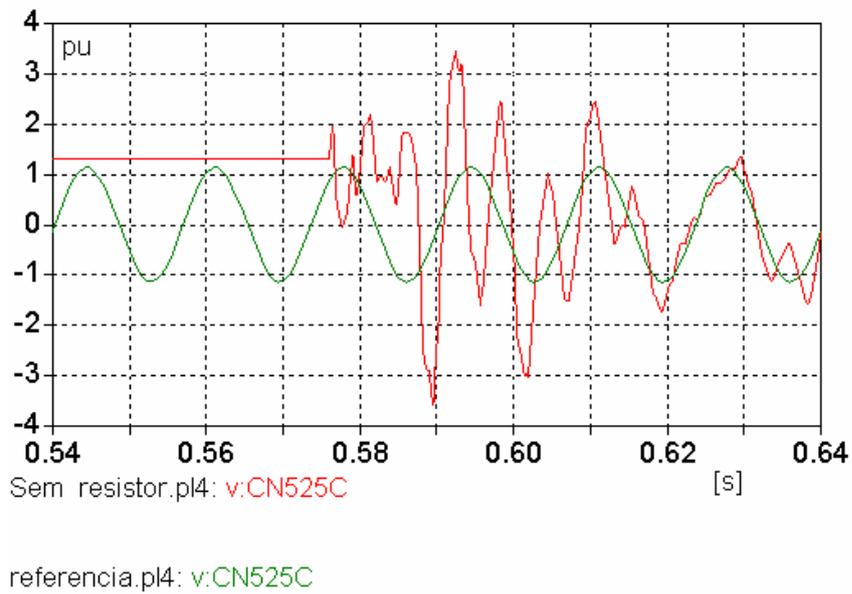


referencia.pl4: v:CN525A

**Figura 22** - Maior sobretensão no final da linha – fase A



**Figura 23** - Maior sobretensão no final da linha – fase B



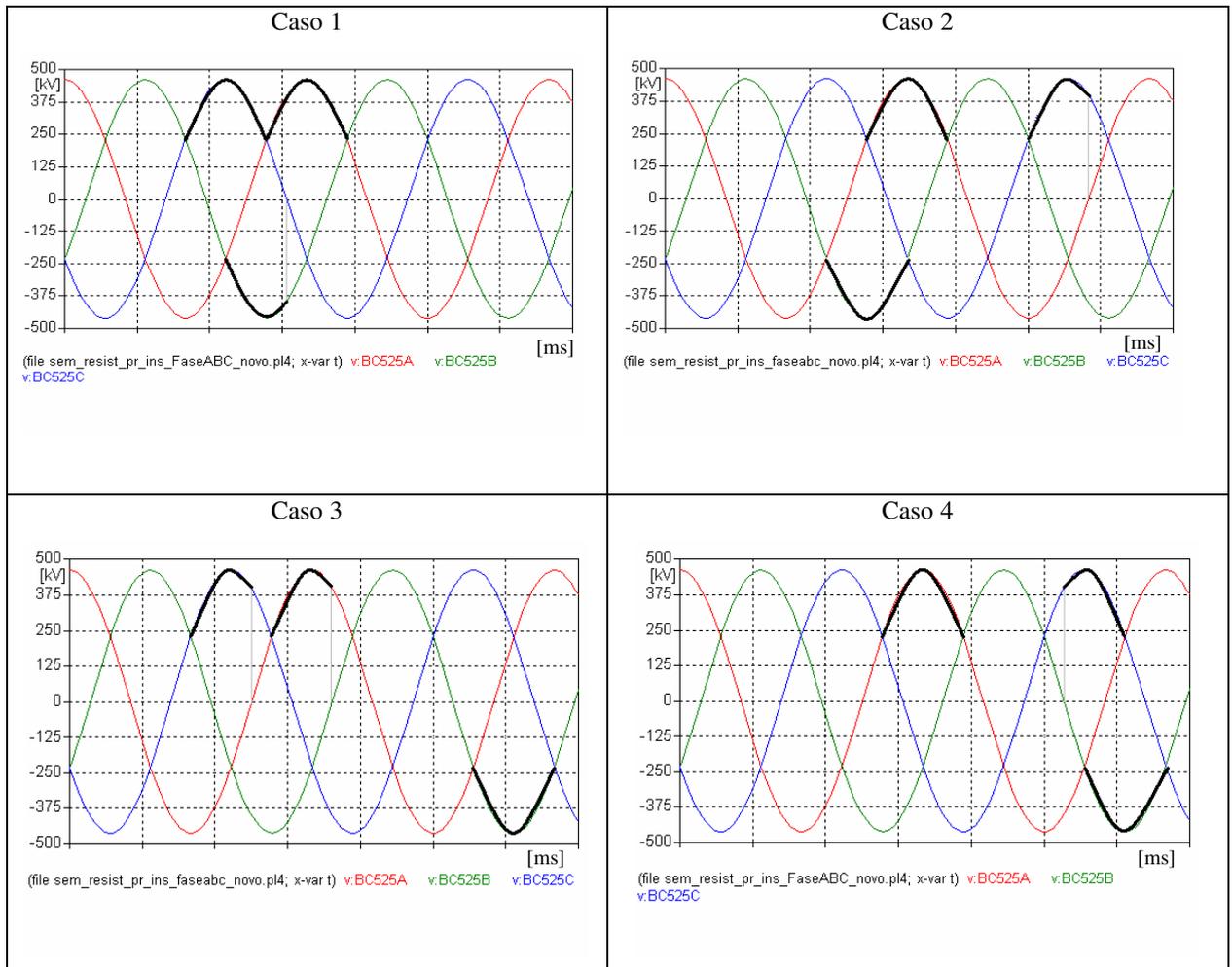
**Figura 24** - Maior sobretensão no final da linha – fase C

Os ângulos da tabela 13 a seguir apresentam as posições, na onda de tensão, em que as chaves foram acionadas e as respectivas sobretensões resultantes.

Casos		Ângulo de Acionamento [°]			Sobretensão [pu]
		Fase A	Fase B	Fase C	
Caso A	Menor sobretensão	60	270	120	1,35
Caso B	Maior Sobretensão	270	90	300	5,80

**Tabela 13** - Posições de acionamento das chaves

Na figura 25 a seguir, são mostradas as faixas de ângulo que resultam em menores sobretensões.



**Figura 25** - Ângulos de Religamento das Três Fases que Causam Menores Sobretensões

Analisando a figura 25, pode-se observar que os melhores instantes para as fases A e C ocorrem quando as tensões são positivas e para a fase B, quando a tensão é negativa. Isso

acontece porque as tensões residuais nas fases A e C são positivas e na fase B negativa. Todas as tensões estão em torno do valor máximo, visto que as cargas residuais também estão. Portanto, o critério consiste em fechar cada fase quando os valores de tensão entre os terminais dos pólos do disjuntor são nulos (valores iguais no lado barra e linha, ou os mais próximos possíveis).

Na análise dos resultados deve-se levar em conta que:

- o estudo considerou o religamento da LT na presença de cargas residuais nas 3 fases, que permaneceram praticamente constantes durante o período em que a LT esteve aberta;
- o controle para o religamento de cada fase é função da carga residual existente na fase;
- na seleção dos intervalos de fechamento das 3 fases do religamento da LT, adotou-se uma sobretensão máxima admissível de 2,10 pu (mesmo valor adotado no estudo de energização da LT);
- como qualquer fase pode apresentar fluxo residual máximo, em módulo, dependendo do instante de abertura da LT, adotou-se o intervalo de fechamento menor para as 3 fases. Assim, para a fase com tensão residual positiva, o religamento deve ser realizado entre  $60^\circ$  e  $120^\circ$ , valor médio  $90^\circ$  (máxima tensão positiva). Para a fase com tensão residual negativa, o religamento deve ser realizado entre  $240^\circ$  e  $300^\circ$ , valor médio  $270^\circ$  (máxima tensão negativa).

Adicionalmente, deve ser observado que, na prática, as cargas residuais podem ser parcialmente drenadas enquanto a LT permanecer aberta, resultando em tensões residuais, em cada fase, menores que a tensão máxima da fase.

Para levar em consideração essa possibilidade, os resultados obtidos nas simulações podem ser estendidos, ou seja, cada fase deve ser religada quando a tensão, no lado fonte, for

igual à tensão residual presente na fase, com um intervalo de  $\pm 30^\circ$  como sendo aceitável para esse fechamento, o que corresponde a um intervalo de  $\pm 1,4$  ms, em torno do instante de tensão no lado fonte igual à tensão residual.

#### 4.3.3 Análise estatística

Para esta análise foram considerados 200 casos, simulando o funcionamento do sincronizador nos seguintes instantes:

A,C – carga residual positiva Instantes de fechamento estatístico na faixa de  $90^\circ \pm 30^\circ$

B – carga residual negativa Instantes de fechamento estatístico na faixa de  $270^\circ \pm 30^\circ$

Os valores obtidos para sobretensão no final da linha foram:

Média:  $\mu = 1,33$  pu e

Desvio Padrão:  $\sigma = 0,08$  pu

Menor sobretensão encontrada: 1,22 pu

Maior sobretensão encontrada: 1,71 pu

Probabilidade de ocorrer sobretensão de valor superior a 2,5 pu: menor do que 0,001, pois

$(2,5 = 1,33 + Z \cdot 0,08 \Rightarrow Z = 14,6$  e  $P(Z \geq 14,6) \cong 0$

#### 4.3.4 Desempenho utilizando-se resistor de pré-inserção

Com vistas a analisar o desempenho do sincronizador, é calculado o desempenho usando sistema convencional com resistores de pré-inserção da seguinte forma;

Contato auxiliar: instantes de fechamento estatístico

Contatos principais: 8 milissegundos mais um instante estatístico na faixa  $\pm 4$  milissegundos após os auxiliares

Os valores obtidos para sobretensão no final da linha foram:

Média:  $\mu = 1,64$  pu e

Desvio Padrão:  $\sigma = 0,20$  pu

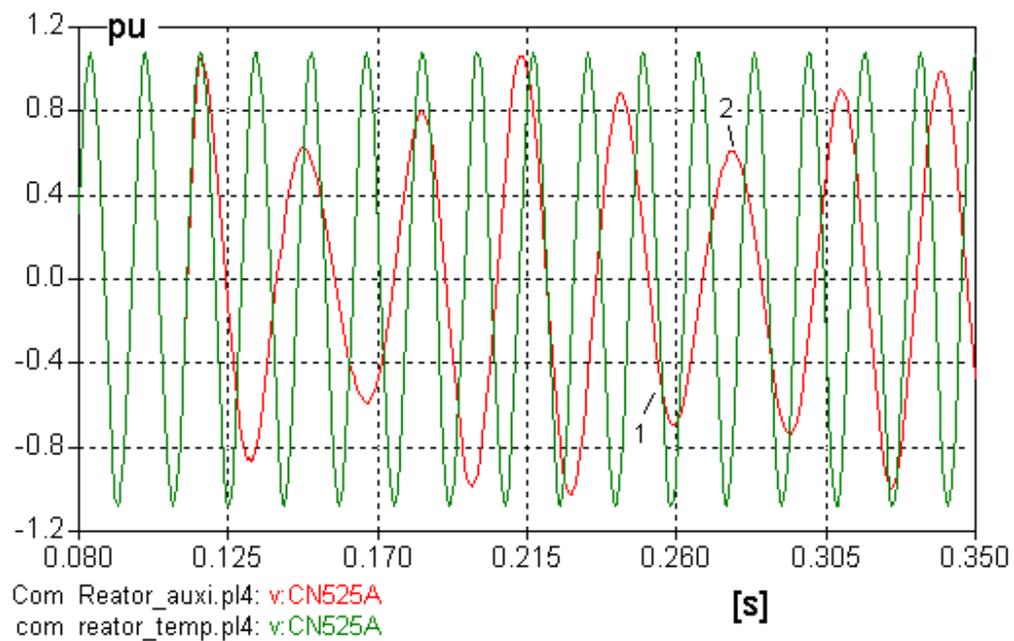
Menor sobretensão encontrada: 1,22 pu

Maior sobretensão encontrada: 2,21 pu

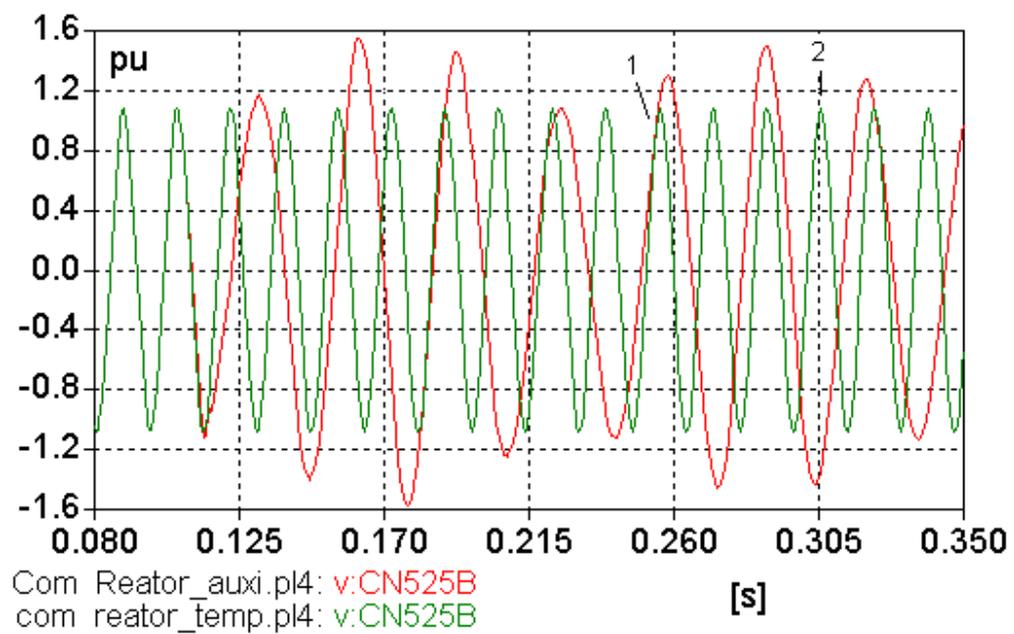
Probabilidade de ocorrer sobretensão de valor superior a 2,5 pu: menor do que 0,001, pois  $(2,5 = 1,64 + Z \cdot 0,20 \Rightarrow Z = 4,3$  e  $P(Z \geq 4,3) < 0,0001$ .

#### **4.4 Religamento de linhas com reatores**

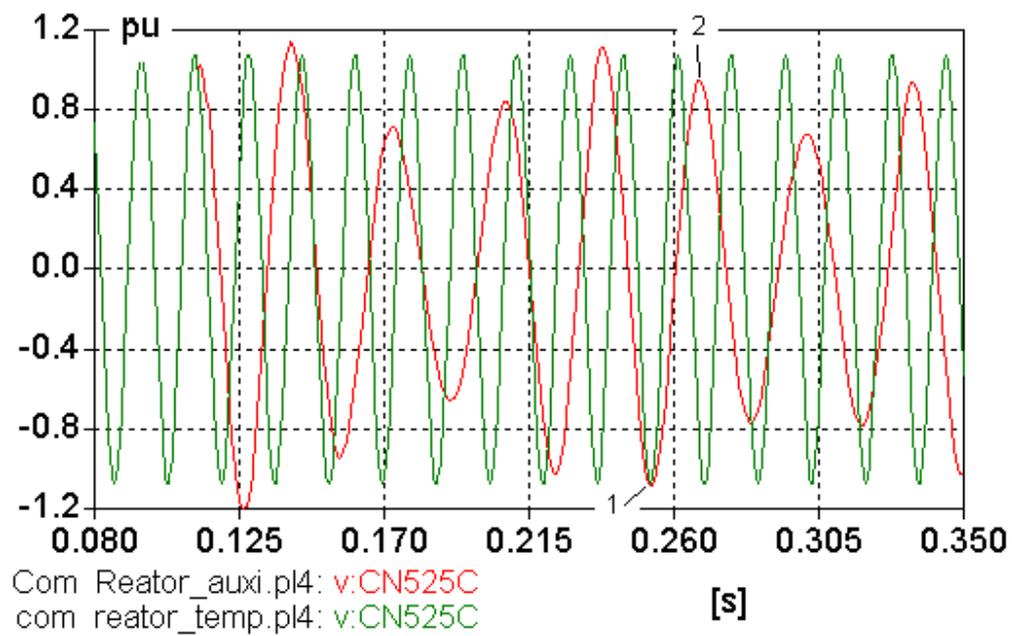
Quando a linha é compensada com reatores em derivação, o comportamento da carga residual retida nas capacitâncias da linha assume forma oscilatória, em geral, com composição de frequências que dependem do grau de compensação. A forma de onda possui um amortecimento na sua magnitude no decorrer do tempo dependente do fator de qualidade do reator ( $X/R$ ). Esta descarga transitória é quem determina as condições de fechamento dos pólos do disjuntor. As figuras 26, 27 e 28 a seguir, mostram os exemplos de instantes favoráveis (indicados por 1 nas figuras) e desfavoráveis (indicados por 2 nas figuras) para religamento de linhas com reatores.



**Figura 26 -** Carga residual no final da LT, fase A



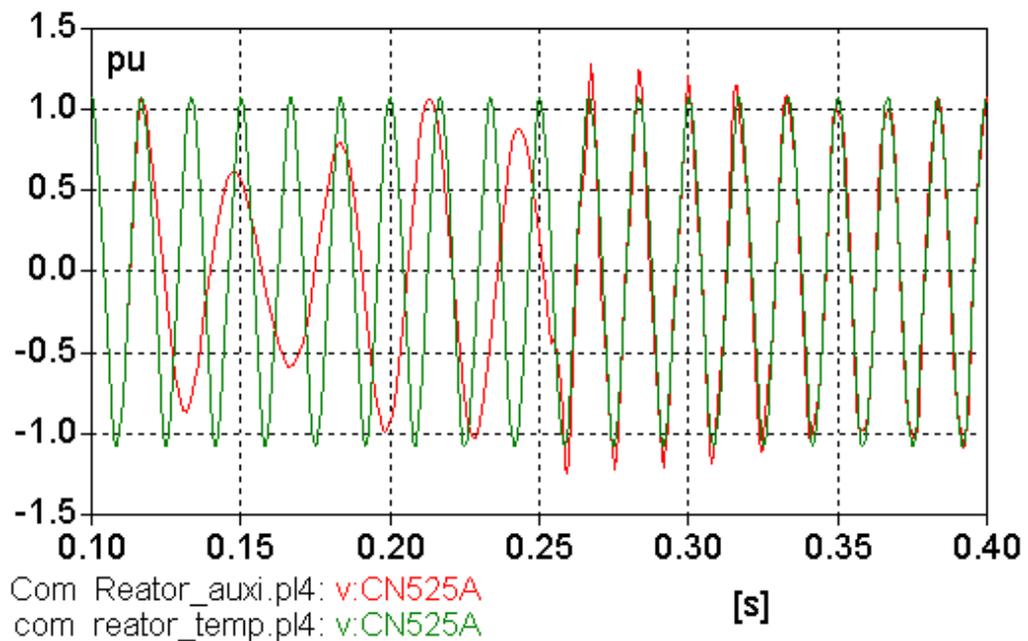
**Figura 27 -** Carga residual no final da LT, fase B



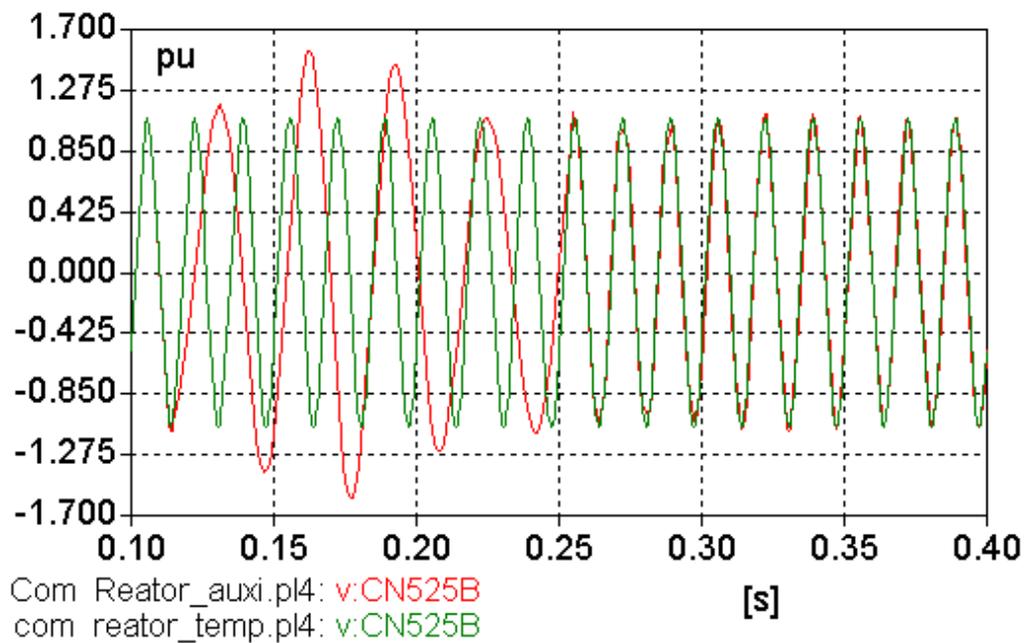
**Figura 28** - Carga residual no final da LT, fase C

#### 4.4.1 Resultados

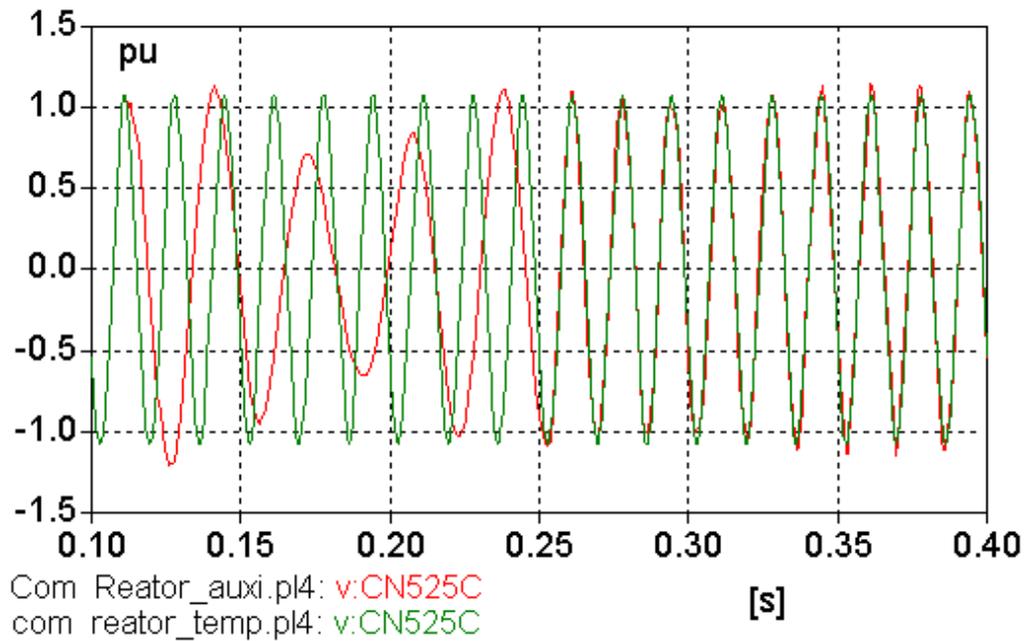
Nas figuras 29, 30 e 31 são mostrados os resultados da simulação para cada fase, considerando o fechamento no instante em que a tensão no lado fonte é igual à do lado linha.



**Figura 29** - Religamento da fase A em momento favorável

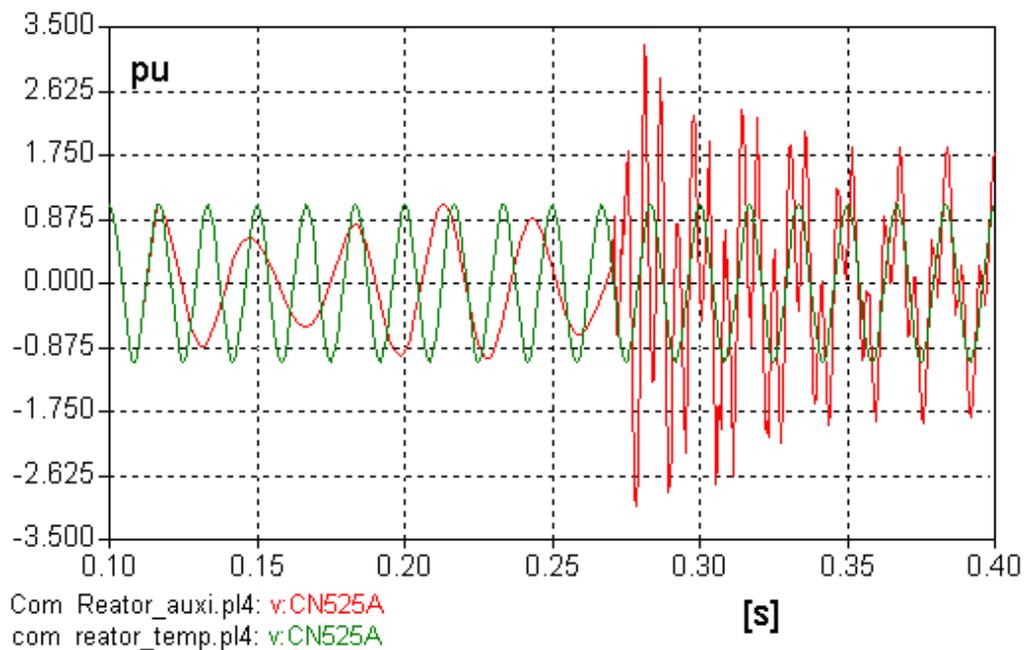


**Figura 30** - Religamento da fase B em momento favorável

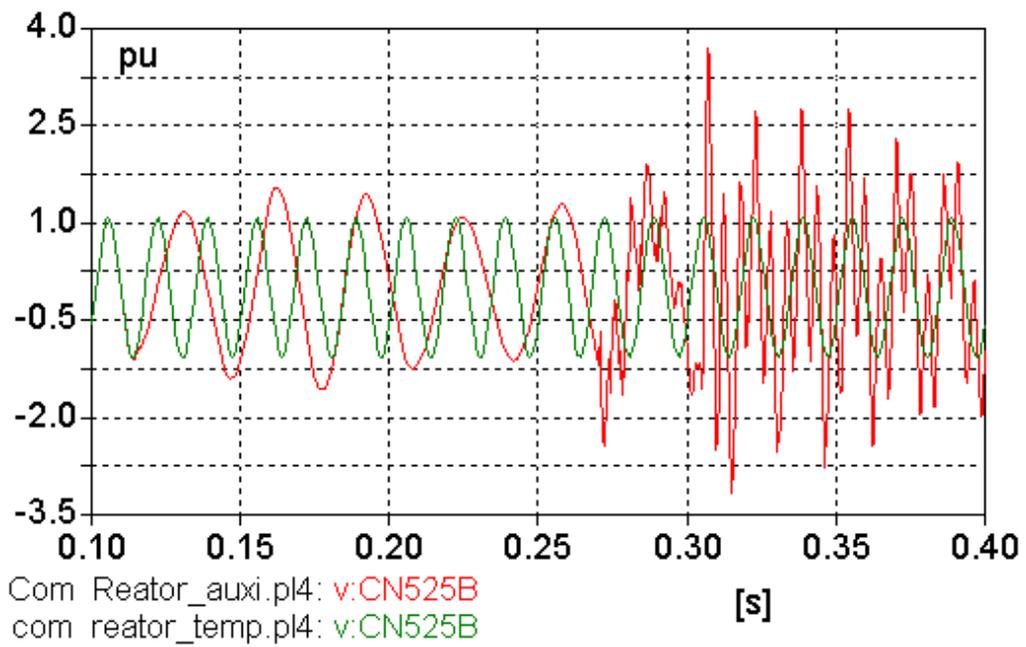


**Figura 31 -** Religamento da fase C em momento favorável

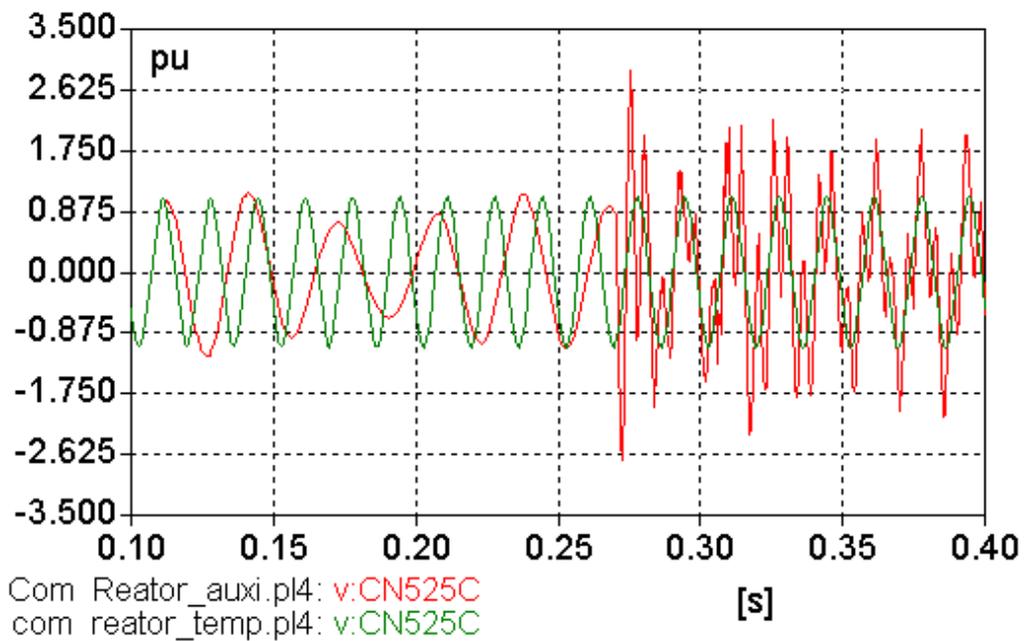
Nas figuras 32 a 34 são mostrados os resultados da simulação para cada fase no instante mais desfavorável.



**Figura 32 -** Religamento da fase A em momento desfavorável



**Figura 33 - Religamento da fase B em momento desfavorável**



**Figura 34 - Religamento da fase C em momento desfavorável**

Considerando o caso mais geral de religamento de LT, ou seja, na presença de cargas residuais nas 3 fases e considerando os resultados do item anterior, pode-se afirmar que:

- há necessidade de monitoração da tensão de uma fase, no lado fonte;
- há necessidade de monitoração das tensões nas 3 fases, no lado carga, para obtenção das cargas residuais remanescentes na LT (essa monitoração é necessária para a identificação do valor da carga residual em cada fase);
- deve ser fornecida ao controlador a seqüência de fases do sistema.
- com a monitoração da tensão de uma fase do lado fonte e com a seqüência de fases do sistema, o controlador terá condições de promover o religamento independente de cada fase, nos instantes (ângulos) adequados, de modo a causar as menores sobretensões;
- o religamento de cada fase deve ser realizado no instante em que a tensão do lado fonte for igual à tensão residual da fase;
- Um intervalo de variação de  $\pm 30^\circ$  em torno do ponto ótimo é aceitável. Esse intervalo corresponde a um tempo de  $\pm 1,39$  ms, aproximadamente.

#### 4.4.2 Análise estatística

Foi realizada a análise de sensibilidade com fechamento em torno do caso favorável, indicado no item 4.4.1, com variação de  $+30^\circ$  e  $-30^\circ$  (8 casos), resultando em sobretensões inferiores a 1,55 pu.

#### 4.4.3 Desempenho utilizando-se resistor de pré-inserção

##### Caso favorável:

Foram realizadas 200 simulações estatísticas de religamento com resistor de pré-inserção (450  $\Omega$ ).

A LT foi desligada em 0,108s para as três fases e religada em 0,255s (determinado anteriormente) e 8ms depois o resistor foi curto-circuitado. O instante 0,255s corresponde ao instante mais favorável para a fase A. As fases B e C foram religadas no mesmo instante. O desvio da chave principal é de 0,000694, que corresponde a 15°, uma vez que o programa ATP utiliza  $3\sigma$  ( $\pm 45^\circ$ ). O desvio padrão da chave que curto-circuita o resistor é de 2 ms, que é o mesmo valor utilizado nas simulações anteriores.

A maior sobretensão encontrada foi de 1,803 pu.

##### Casos desfavoráveis:

Foram realizadas duas simulações estatísticas com o caso desfavorável:

##### Primeiro caso:

Foram religadas as três fases no instante 0,275s, que corresponde ao instante mais desfavorável de religamento para a fase A. O resistor de pré-inserção foi curto-circuitado após 8 ms. Os desvios foram os mesmos do caso anterior, de 0,694 ms para a chave principal, que corresponde a 15° e de 2 ms para a chave de curto-circuito do resistor.

A maior sobretensão encontrada foi 1,886 pu.

Segundo caso:

Foram religadas as três fases no instante 0,267s (0,275 – 0,008), ou seja, o instante de religamento foi deslocado 8 ms, fazendo com que o instante de retirada do resistor coincidissem com o pior instante de religamento da fase A. Os desvios foram os mesmos do caso anterior, de 0,694 ms para a chave principal, que corresponde a 15° e de 2 ms para a chave de curto-circuito do resistor.

A maior sobretensão encontrada foi de 2,083 pu.

Constatou-se, pois, a eficiência do resistor de pré-inserção, porém verifica-se também que o fechamento sincronizado com dispersão inferior a 30° é mais eficiente.

## 5 Especificação funcional do equipamento de chaveamento controlado

Trata-se, neste capítulo, da especificação das bases para o desenvolvimento de um dispositivo eletrônico que permitirá a manobra de fechamento sincronizada de disjuntores, visando menor solicitação transitória (sobretensão, sobrecorrente) ao sistema. Serão consideradas as seguintes situações:

- manobras de linhas sem compensação paralela por reatores e;
- manobras de linhas com compensação paralela por reatores.

O equipamento deverá ser, em qualquer dos casos acima:

- aplicável a disjuntores de operação monopolar e tripolar, sendo que no segundo caso, haverá um tempo fixo mecânico, ajustado em fábrica para o fechamento das duas fases restantes;
- aplicável a qualquer arranjo de subestações (inclusive 1 ½ disjuntor e disjuntor duplo)
- ajustável, do ponto de vista do tempo de operação, considerando a influência da temperatura ambiente, pressão de gás/óleo, e tensão auxiliar CC;
- auto-ajustável em caso de desvio de desempenho no tempo.

Independentemente do sistema de interrupção do disjuntor e do tipo de seu mecanismo de funcionamento, o tempo de operação muda dependendo de certos parâmetros.

Tensões reduzidas nas bobinas aumentam o tempo de operação.

Variação na pressão hidráulica faz com que o tempo de operação varie.

Finalmente, a temperatura é o mais complexo parâmetro de influência, pois interfere na resistência elétrica das bobinas de *trip*, na viscosidade do óleo, na pressão de SF6 e ainda faz

com que variem as dimensões das colunas de porcelana e dos eixos e outros dispositivos da parte mecânica do acionamento.

Entre os requisitos do dispositivo, merece destaque a velocidade de processamento requerida, considerando-se que a 1<sup>o</sup> elétrico corresponde um tempo de 46,3  $\mu$ s.

### **5.1 Manobra (fechamento) de linhas sem compensação paralela por reatores**

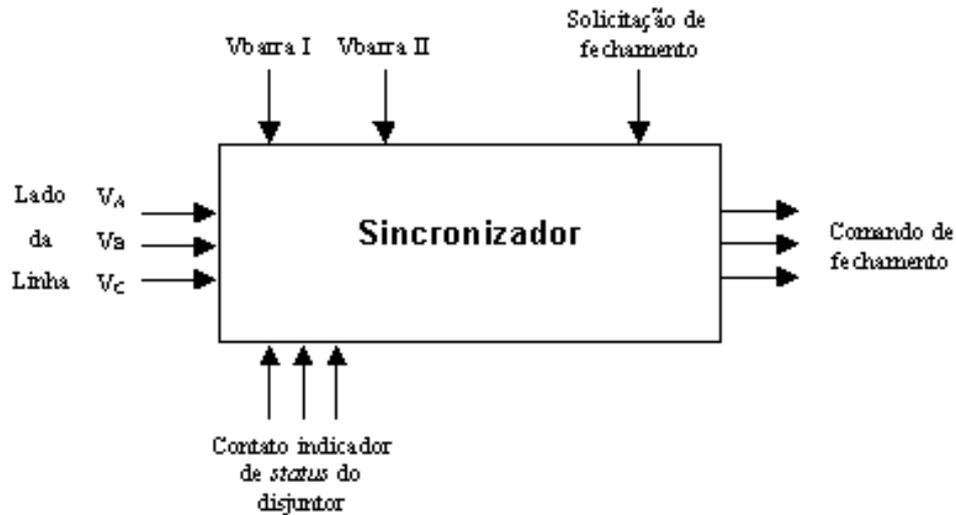
O critério, como visto no capítulo 4, é fechar o disjuntor quando a tensão for igual em seus dois terminais.

Caso seja uma energização de linha, deve-se fechar o disjuntor quando a tensão instantânea no lado barra é zero. Caso esteja sendo feito um religamento dessa linha, o disjuntor deve ser fechado quando a tensão no lado barra for igual à carga residual da linha.

No primeiro caso, após fechar a primeira das três fases, as outras duas devem ser fechadas após 1/6 do ciclo a seguir, enquanto que, no segundo caso, deve ser calculado o instante em função da carga residual, cujo valor é medido durante o tempo morto e o amortecimento calculado de acordo com a fórmula:

$$V = V_x \cdot e^{\frac{-t}{T_x}}, \text{ onde } T_x \text{ é uma constante de tempo igual a } L/R \text{ da linha de transmissão}$$

A figura 21 mostra os requisitos de entrada e saída de um dispositivo eletrônico para viabilizar a energização e o religamento de linhas não compensadas com reatores em paralelo.



**Figura 35** - Esquema de dispositivo de sincronização para linhas não compensadas com reatores em paralelo

## 5.2 Manobra (fechamento) de linhas com compensação por reatores em paralelo

Este caso é similar ao anterior (linha sem compensação *shunt*), porém, no religamento, a carga residual agora oscila com 2 frequências superpostas (para o caso de sistemas de 60 Hz, uma frequência próxima de 60 Hz e outra, na ordem de 10 Hz, para as compensações por reatores usuais).

O religamento é feito depois de um tempo morto (por exemplo, de aproximadamente 0,5 s), quando parte da oscilação está amortecida. Requer-se, entretanto, a verificação da tensão da linha para o adequado fechamento do disjuntor. Durante este tempo morto, deve ser determinada a equação de carga residual nas três fases para a determinação do instante de fechamento. Isto é feito ajustando-se uma função composta de duas funções senoidais de frequências diferentes, do tipo:

$$V = f(\omega_x, \omega_y, t)$$

### **5.3 Tempo mecânico de fechamento dos disjuntores**

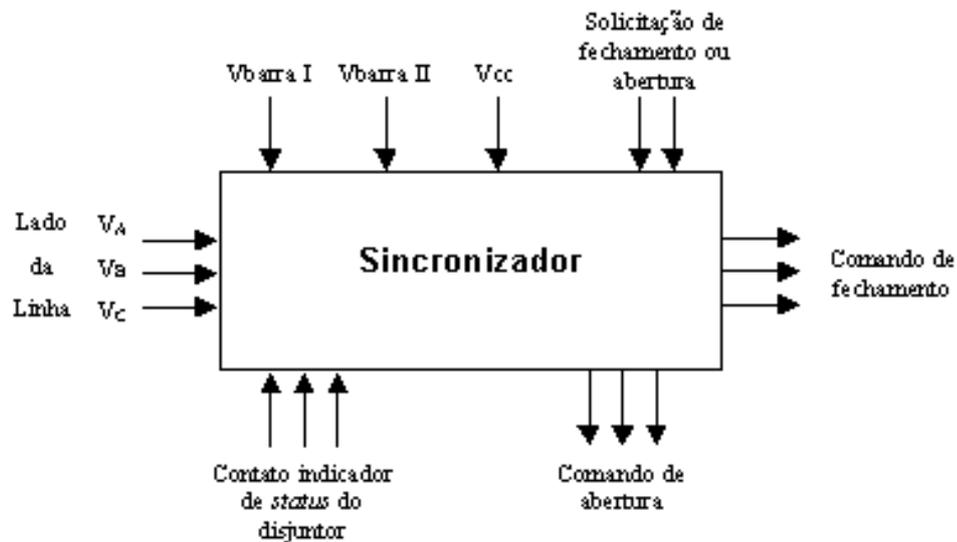
O tempo básico para o fechamento dos disjuntores após o início da passagem de corrente no circuito em que está inserida a bobina de fechamento é de 17 milissegundos, com uma variabilidade de 0,5 milissegundo. Esse tempo varia em função dos seguintes parâmetros:

- Característica do sistema de acionamento;
- Tensão do sistema de serviços auxiliares;
- Temperatura.

No caso específico de disjuntores com acionamento eletro-hidráulico, a energia necessária é armazenada no sistema por meio da compressão de nitrogênio. Ao ser liberado, o nitrogênio faz atuar um pistão hidráulico que movimenta a haste responsável pelo fechamento dos contatos principais do disjuntor. O tempo de acionamento varia com a pressão do nitrogênio, com a temperatura e também com a tensão dos serviços auxiliares.

### **5.4 Equipamento geral**

Para atender todas as condições (energização e desligamento de cargas capacitivas e reatores) é preciso que o equipamento geral tenha as seguintes entradas e saídas:



**Figura 36** - Sincronizador para abertura ou fechamento de linhas e reatores

## 5.5 Requisitos do controlador de chaveamento

O controlador de chaveamento deverá atender aos seguintes requisitos:

- Controle independente de cada fase do disjuntor;
- Resolução do tempo de ajuste: 0,1 milissegundo (correspondendo a aproximadamente  $2^\circ$  de uma senóide de 60 Hz).
- Recebimento, armazenamento e tratamento dos valores obtidos por sensores instalados no disjuntor, relacionados aos seguintes dados:
  - Pressão de óleo no acumulador hidráulico;
  - Tensão de operação da bobina de fechamento.
- Recebimento, armazenamento e tratamento dos valores da temperatura ambiente do local de instalação do disjuntor;

- Cálculo em tempo real dos atrasos a serem considerados na operação de fechamento do disjuntor pelas variações da pressão do óleo, da tensão de operação na bobina e da temperatura ambiente;
- Recebimento, armazenamento e tratamento dos valores de tensão de uma fase do sistema, do lado da fonte;
- Cálculo em tempo real dos tempos para acionamento de cada fase do disjuntor, considerando os atrasos acima descritos, os tempos próprios do disjuntor e os intervalos ótimos de tempo de cada manobra analisada;
- Envio de sinal para acionamento dos comandos de fechamento de cada fase do disjuntor, com base nos tempos calculados, conforme descrito acima;
- Arquivo das principais variáveis das operações de fechamento realizadas (tempos de acionamentos, tensões e correntes).

## **5.6 Variáveis relacionadas ao disjuntor**

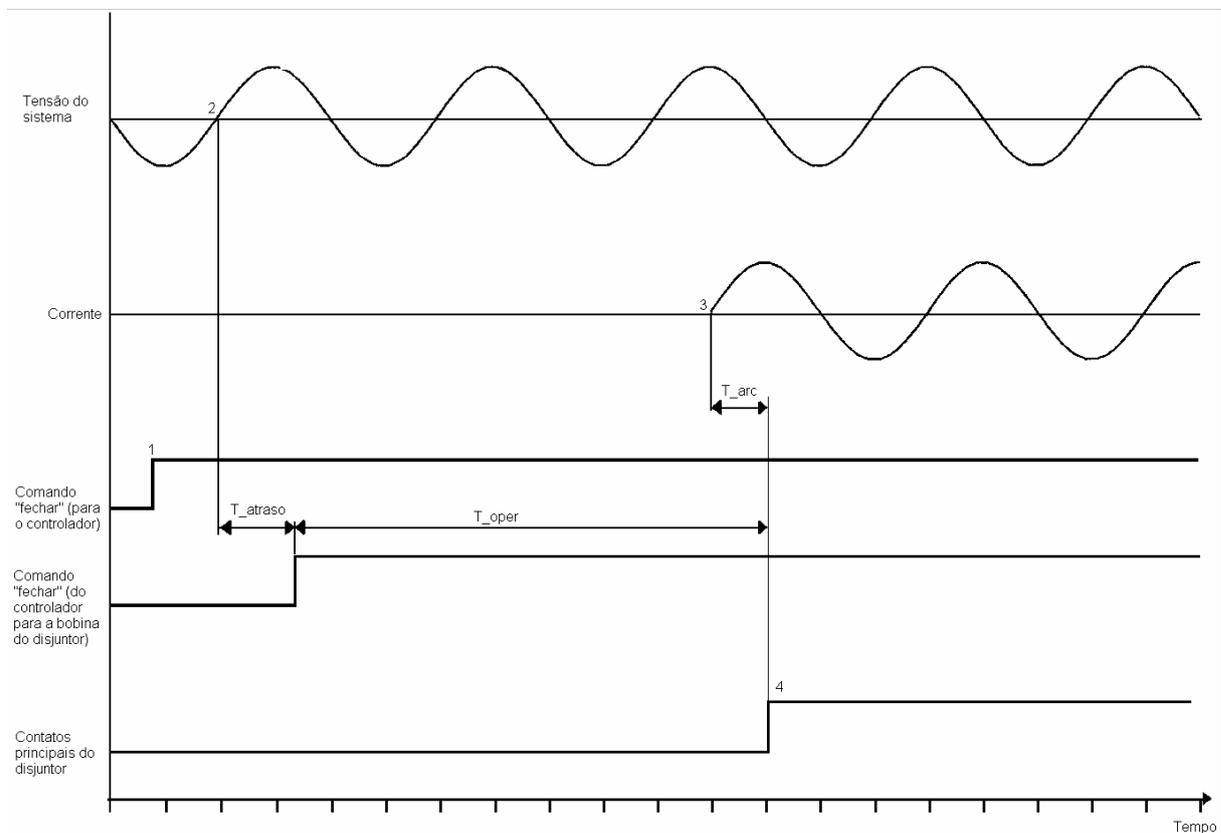
As seguintes variáveis relacionadas ao disjuntor devem ser consideradas na especificação e desenvolvimento do controlador:

- a) No ajuste do instante correspondente ao atraso para envio do sinal pelo controlador para acionamento do disjuntor, devem ser considerados os tempos de operação do disjuntor incluindo as dispersões dos contatos do disjuntor e do arco de corrente durante a operação de fechamento.

O tempo de operação do disjuntor é definido como o tempo entre o comando elétrico para a bobina de operação e o toque dos contatos principais. Esse tempo é especificado em normas e deve ser garantido pelo fabricante.

O tempo de pré-arco deve ser descontado do tempo de operação do disjuntor, uma vez que ocorrendo o arco, a linha (ou outro equipamento) estará energizada.

A figura 37 ilustra as considerações apresentadas acima para um exemplo de caso de energização de uma carga indutiva no ponto máximo de tensão.



**Figura 37 - Energização de carga indutiva na tensão máxima**

Da figura 37, tem-se:

- Em qualquer ponto da onda de tensão pode-se enviar um comando externo para fechamento do disjuntor (ponto 1 da figura 37);

- A partir da passagem pelo zero da onda de tensão (n-ésima passagem pelo zero, conforme critério do projeto), o controlador começa a contar o tempo (ponto 2 da figura 37);
- Dependendo do tempo de operação do disjuntor ( $T_{oper}$ ) e do tempo de pré-arco ( $T_{arc}$ ), o controlador calcula o tempo de atraso ( $T_{atraso}$ ) para enviar o sinal para fechamento do disjuntor no ponto de máxima tensão.

b) Variação do tempo de operação com a tensão do circuito de controle da bobina de acionamento do disjuntor.

A referência [17] indica o seguinte procedimento:

Cálculo de  $\Delta t_u$  correspondente à variação de tempo ( $t_{2u} - t_{1u}$ ) que o controlador deve considerar:

$$\Delta t_u = \frac{kU}{100} \cdot \left( \frac{U1}{U2} - 1 \right) t_{1u} \quad (5)$$

Onde “kU” -parâmetro característico do dispositivo de acionamento do disjuntor e “U1” e “t<sub>1u</sub>” -valores de operação com tensão de controle nominal, são valores fornecidos pelo fabricante do disjuntor.

Com o disjuntor em operação, um sensor deve monitorar a tensão contínua do circuito de comando da bobina de acionamento e fornecer o valor da tensão (valor U2 da equação acima). Com esse valor de U2 e os valores de kU, U1 e t<sub>1u</sub> obtidos do fabricante do disjuntor, pode-se calcular, pela equação (5), a diferença  $\Delta t_u$ , correspondente à variação do tempo que o controlador deve considerar.

c) Variação do tempo de operação com a pressão hidráulica no sistema de acionamento do disjuntor.

A referência [17] indica o seguinte procedimento para o cálculo de  $\Delta t_p$ , que corresponde à variação do tempo ( $t_{2p}-t_{1p}$ ) e que o controlador deve considerar:

$$\Delta t_p = \frac{kP}{100} \cdot \left( \frac{P1}{P2} - 1 \right) t_{1p} \quad (6)$$

Onde “kP” (parâmetro característico do dispositivo de acionamento do disjuntor), “P1” e “t<sub>1p</sub>” (valores de operação com pressão hidráulica nominal) são valores fornecidos pelo fabricante do disjuntor.

Com o disjuntor em operação, um sensor deve monitorar a pressão hidráulica no sistema de acionamento do disjuntor e fornecer o valor da pressão (valor P2 da equação acima). Com esse valor de P2 e os valores de kP, P1 e t<sub>1p</sub> obtidos do fabricante do disjuntor, pela equação (6) pode-se calcular a diferença  $\Delta t_p$ , correspondente à variação do tempo que o controlador deve considerar.

d) Variação do tempo de operação relacionada à temperatura ambiente.

O controlador de chaveamento deve prever a compensação das variações da temperatura ambiente que afetam o tempo de operação do disjuntor, uma vez que afeta a pressão de nitrogênio e, conseqüentemente, do fluido hidráulico de acionamento. A referência [17] indica o seguinte procedimento:

O fabricante do disjuntor deve fornecer o tempo adicional de operação do disjuntor relativamente às condições normais de operação para que, a partir dessas informações torne-se possível compensar esse tempo. Sugere-se que esses tempos adicionais sejam fornecidos na faixa de -20°C a 50°C (dependendo do local de operação do equipamento, pode-se adequar

essa faixa), em intervalos de 10°C. O controlador deve calcular o acréscimo de tempo  $\Delta t_t$  com base em uma função linearizada por trechos. O valor  $\Delta t_t=10\text{ms}$  define o tempo de operação do disjuntor sob condições normais. Os valores  $\Delta t_t$  para várias temperaturas ambientes são as diferenças entre os tempos de operação medidos e o tempo de operação nominal.

Um sensor externo é necessário para medição da temperatura ambiente. O controlador deve identificar o intervalo no qual o valor de temperatura se situa e calcular o acréscimo  $\Delta t_t$  por meio da função linearizada desse intervalo.

e) Ajuste em função de variações do instante de fechamento no decorrer do tempo.

O tempo de fechamento de referência pode variar em decorrência de desgastes naturais de partes mecânicas dos disjuntores, além de variações sistemáticas no mecanismo de acionamento. Por isso, é desejável que o equipamento, além de determinar o instante de fechamento, verifique sua própria eficiência e exatidão e, eventualmente, proceda a uma correção no atraso, de forma a compensar o erro em sua próxima atuação. A esse tipo de ajuste dá-se o nome de controle adaptativo, referindo-se ao uso de detecção de mudanças nas características de operação a cada acionamento, de modo a prever o tempo da próxima operação. O controle adaptativo pode compensar as diferenças de tempo decorrentes de diversas operações em seqüência, bem como as diferenças após longo tempo de inatividade.

Diversos algoritmos podem ser usados para a implementação deste controle. Um exemplo, citado na referência [2], descreve a seguinte fórmula:

$$T_{\text{próx oper}} = T_{\text{última oper}} + k.(T_{\text{última med}} - T_{\text{última oper}}) \quad (7)$$

O valor do tempo de operação a ser utilizado pelo controlador na próxima operação,  $T_{\text{próx oper}}$ , será composto pelo último tempo calculado,  $T_{\text{última oper}}$ , corrigido por uma fração da

diferença entre o tempo medido da última operação,  $T_{\text{última med}}$ , e o tempo calculado,  $T_{\text{última oper}}$ . O fator “k” da fórmula (7) determina quanto da diferença entre os tempos medido e calculado deve ser levado em conta, sendo limitado a valores menores do que 1 como forma de assegurar que o erro não seja amplificado.

## 6 Sumário, conclusões e recomendações

### Sumário:

Foram discutidos chaveamentos controlados aplicáveis a linhas de transmissão, reatores, capacitores e transformadores.

A concentração dos esforços se deu na análise do fechamento controlado de linhas de transmissão, mais especificamente em energização, religamento sem reator shunt e religamento com reator shunt.

Foram determinados os instantes favoráveis para o fechamento de linha de transmissão.

A especificação funcional de um equipamento para executar a manobra sincronizada de disjuntores foi definida.

### Conclusões:

Manobras sincronizadas em linhas de transmissão levam a sobretensões baixas.

O uso das manobras sincronizadas pode trazer como resultado um desempenho melhor do que o conseguido com o uso dos métodos convencionais, que utilizam resistores de pré-inserção, desde que o equipamento permita ajuste adequado do instante de fechamento (aproximadamente 30°) e opere com precisão.

O equipamento é, em linhas gerais, um sistema de aquisição de informações e de controle. As principais informações de entradas são tensões, correntes e estados de chaves fim-de-curso. As demais entradas, fundamentais para o funcionamento adequado do equipamento, são as informações de temperatura, pressão de óleo, pressão de gases e

outras. A saída é um contato elétrico que opera com atraso oportuno em relação ao momento aleatório de solicitação de acionamento das bobinas dos disjuntores.

### **Recomendações:**

Para futuros trabalhos, recomenda-se analisar:

- Manobras de abertura e fechamento de bancos de capacitores;
- Manobras de abertura e fechamento de bancos de reatores;
- Manobras de abertura e fechamento de transformadores, levando-se em conta que esta análise poderá ser conduzida considerando-se ou desprezando-se a influência do fluxo magnético residual.
- Expansões eventuais no equipamento proposto, para generalizar seu uso em função das novas pesquisas.

**Referências:**

- [1] H. Ito “**Controlled Switching Technologies, State-of-the-Art**”, Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. IEEE/PES, Páginas 1455 – 1460, Vol. 2, 2002.
- [2] CIGRÉ WG 13.07 “**Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers: Guide for Application Lines, Reactors, Capacitors, Transformers**”, Part 1, ELÉCTRA No. 183, Páginas 43 – 73, 1999.
- [3] CIGRÉ WG 13.07 “**Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers: Guide for Application Lines, Reactors, Capacitors, Transformers**”, Part 2, ELÉCTRA No. 185, Páginas 35 – 57, 1999.
- [4] A. Carvalho, A., M. Lacorte, O. Knudsen “**Improved EHV Line Switching Surge Control by Application of MO-Arresters and Controlled Switching**”, Energy Management and Power Delivery, 1995. Proceedings of EMPD 95, 1995 International Conference on, Volume: 1, Nov. 1995, Páginas: 292 – 297 vol.1.
- [5] J. H. Brunke, K. J. Fröhlich “**Elimination of Transformer Inrush Currents by Controlled Switching. Part I: Theoretical Considerations**”, IEEE Transactions on Power Delivery, Volume: 16, Issue: 2, April 2001, Páginas: 276 – 280.
- [6] J. H. Brunke, K. J. Fröhlich “**Elimination of Transformer Inrush Currents by Controlled Switching. Part II: Application and Performance Considerations**”, IEEE Transactions on Power Delivery, Volume: 16, Issue: 2, April 2001, Páginas: 281 – 285.
- [7] R. Rocha, A. C. Carvalho, J. L. Távora “**Manobra Controlada: Modelagem da Suportabilidade Dielétrica do Disjuntor Durante a Operação de Fechamento**”, XIV SNPTEE, Belém, Brasil, 1997

- [8] U Krüsi, K. J. Fröhlich “**Controlled Switching – Suitability Check for Already-Installed HVAC Circuit Breakers**”, Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. IEEE/PES, Volume: 2, Oct. 2002, Páginas 813 – 817.
- [9] WG 13.07 “**Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers**”, ELÉCTRA No. 197, Páginas 23 – 33, 2001
- [10] K. Fröhlich, C. Hoelzl, A. C. Carvalho, W. Hofbauer, B. L. Avent, “**Controlled Closing on Shunt Reactor Compensated Transmission Lines. Part II: Application of Closing Control Device for High Speed Autoreclosing on BC Hydro 500 kV Transmission Line**”, IEEE Transactions on Power Delivery, Volume: 12, Issue: 2, April 1997, Páginas: 741 – 746
- [11] H. Tsutada, T. Hirai, H. Kohyama, H. Ito, K. Sasaki, “**Development of Synchronous Switching Controller for Gas Circuit Breakers**”, Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. IEEE/PES, Volume: 2, Oct. 2002, Páginas: 807 – 812 vol.2
- [12] K. Fröhlich, C. Hoelzl, A. C. Carvalho, W. Hofbauer, B. L. Avent, “**Controlled Closing on Shunt Reactor Compensated Transmission Lines. Part I: Closing Control Device Development**”, IEEE Transactions on Power Delivery, Volume: 12, Issue: 2, April 1997, Páginas: 734 – 740
- [13] D’Ajuz, Ari, “**Equipamentos Elétricos; especificação e aplicação em subestações de alta tensão**”, Rio de Janeiro, Furnas, 1985.
- [14] D’Ajuz, Ari, “**Transitórios elétricos e coordenação de isolamento – aplicação em sistemas de potência de alta tensão**”, Rio de Janeiro,. Furnas, Niterói. Universidade Federal Fluminense/EDUFF, 1987.
- [15] Carvalho, Antonio Carlos Cavalcanti, “**Disjuntores e chaves: aplicação em sistemas de potência**”, Niterói, EDUFF, 1995.

- [16] Stevenson, William D., “**Elementos de análise de sistemas de potência**”, Editora McGraw-Hill do Brasil Ltda, 1976 – Tradução de Ademaro A.M.B. Cotrim do original “Elements of Power System Analysis”. Páginas 150 – 152.
- [17] Alstom, “**Point-on-wave controller series RPH2**”, Austria AG, Linz, 1998. Páginas 6 – 38.
- [18] ABB, “**Controlled switching – Buyer’s guide, Application guide**”, Edition 1, 05/2004. Páginas A2 – N2.
- [19] Morettin, Pedro Alberto, “**Introdução à Estatística para Ciências Exatas**”, Atual Editora, 1981. Páginas 51 – 59 e 179.