

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO
DEPARTAMENTO DE SISTEMAS E CONTROLE DE ENERGIA
DSCE-FEEC-UNICAMP

CONTROLE ADAPTATIVO PARA RELIGAMENTO TRIPOLAR APLICADO A LINHAS DE TRANSMISSÃO COM COMPENSAÇÃO REATIVA EM DERIVAÇÃO

Aluna: Patricia Mestas Valero

Orientadora: Profa. Dra. Maria Cristina Dias Tavares

Tese de Doutorado apresentada a Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica, na área de concentração de Energia Elétrica.

BANCA EXAMINADORA:

Profa. Dra. Maria Cristina Dias Tavares (FEEC/UNICAMP)
Prof. Dr. Aniruddha Madhukar Gole (University of Manitoba)
Prof. Dr. Sérgio Gomes Júnior (CEPEL)
Prof. Dr. Fujio Sato (FEEC/UNICAMP)
Prof. Dr. Madson Cortes de Almeida (FEEC/UNICAMP)

CAMPINAS, SETEMBRO DE 2011

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

M564c Mestas Valero, Patricia
Controle adaptativo para religamento tripolar
aplicado a linhas de transmissão com compensação
reativa em derivação / Patricia Mestas Valero. --
Campinas, SP: [s.n.], 2011.

Orientador: Maria Cristina Dias Tavares.
Tese de Doutorado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação.

1. Linhas elétricas - Transmissão. 2. Transitórios
(Eletricidade). 3. Sobretensões. 4. Eletricidade -
Simulação por computador. I. Tavares, Maria Cristina
Dias. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade
de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Título em Inglês: Adaptive control for three phase reclosing applied to shunt
reactor compensated transmission lines

Palavras-chave em Inglês: Electrical lines - Transmission, Transients
(Electricity), Overvoltages, Electricity - Computer
simulation

Área de concentração: Energia Elétrica

Titulação: Doutor em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: Aniruddha Madhukar Gole, Sérgio Gomes Júnior, Fujio
Sato, Madson Cortes de Almeida

Data da defesa: 28-09-2011

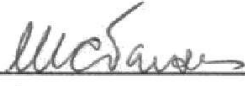
Programa de Pós Graduação: Engenharia Elétrica

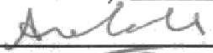
COMISSÃO JULGADORA - TESE DE DOUTORADO

Candidata: Patricia Mestas Valero

Data da Defesa: 28 de setembro de 2011

Título da Tese: "Controle Adaptativo para Religamento Tripolar Aplicado a Linhas de Transmissão com Compensação Reativa em Derivação"

Profa. Dra. Maria Cristina Dias Tavares (Presidente): 

Prof. Dr. Aniruddha Madhukar Gole : 

Prof. Dr. Sérgio Gomes Júnior: 

Prof. Dr. Fujio Sato: 

Prof. Dr. Madson Cortes de Almeida: 

Dedico este trabalho a meu bem maior.....

minha filha Ângela Patrícia.

AGRADECIMENTOS

A Deus, fonte de vida e de inspiração.

À Prof. Maria Cristina Dias Tavares, minha orientadora, a quem sou extremamente grata por todos os momentos compartilhados nos últimos anos e que, sem dúvida, muito colaboraram para minha formação acadêmica e, fundamentalmente, para minha formação enquanto ser humano. Muito obrigada pelo carinho e pela confiança e por incentivar-me em novos projetos e novas possibilidades.

Ao Prof. Aniruddha M. Gole, pela oportunidade da realização de estágio na Universidade de Manitoba. Agradeço sua disponibilidade, sugestões relevantes e, sobretudo, a compreensão e paciência que teve ao longo de minha estadia em Canadá.

Aos meus pais Rômulo e Olga, que além de amor e dedicação, privilegiaram-me com o maior dos presentes: A oportunidade de estudar....

Não posso deixar de expressar um especial agradecimento a minha querida mãe, Olga, quem me apoiou incondicionalmente em todos os momentos durante este processo e compartilhou comigo esta experiência. Foram fundamentais seu grande amor, generosidade e estímulo constante.

A meus irmãos, Roger e Abel, por me mostrarem o valor de uma conquista, do conhecimento e do carinho, sempre me incentivando a crescer.

À Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo suporte financeiro que viabilizou este trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pelo apoio institucional e financeiro que tornou possível a realização do estágio em Canadá.

Aos amigos e amigas, que fiz e faço nesta caminhada, com vocês o mundo fica muito melhor!

RESUMO

O presente trabalho descreve um novo método de controle adaptativo para chaveamento sincronizado de disjuntores durante a manobra de religamento tripolar de linhas de transmissão com compensação reativa em derivação. O objetivo principal do método desenvolvido é controlar as sobretensões transitórias e reduzir o tempo morto antes do religamento.

Diferentes estratégias para controlar sobretensões decorrentes do religamento tripolar são descritas com a finalidade de diferenciar as vantagens do chaveamento sincronizado. Os benefícios potenciais a serem obtidos a partir do religamento tripolar rápido são expostos.

O método de controle adaptativo desenvolvido consiste em identificar com antecedência a região ótima para o religamento, permitindo fechar o disjuntor já no primeiro mínimo do batimento da tensão entre os contatos do disjuntor após o tempo morto de atuação da proteção.

Após os testes realizados utilizando um programa para simulação de transitórios eletromagnéticos (PSCAD/EMTDC), o método proposto foi implementado em protótipo (controlador). Este protótipo foi testado utilizando o Simulador Digital em Tempo Real (RTDS). As simulações em tempo real demonstraram a eficiência do método no controle das sobretensões e na redução do tempo morto.

Finalmente, o método foi avaliado parametricamente para uma série de condições simuladas, incluindo diferentes níveis de compensação reativa em derivação, a influência da compensação série, a influência da transposição da linha de transmissão e os efeitos da variação do comprimento da linha. Além disto, outras simulações foram realizadas para comparar o desempenho dos métodos de controle existentes e do método proposto.

Palavras – chave: Chaveamento controlado, Religamento tripolar, Linhas de transmissão, Sobretensões de manobra, RTDS.

ABSTRACT

The present thesis describes a new adaptive control method for synchronous switching of circuit breakers during three-phase reclosing of shunt compensated transmission lines. The main objective of the developed method is to control the overvoltages and to reduce the dead time prior of reclosing.

Several strategies to control overvoltages resulting from three-phase reclosing are described in order to differentiate the benefits of the proposed method. The potential benefits obtained from the developed controlled reclosing method are exposed.

The proposed algorithm identified, in advance, the optimal region for reclosing of transmission line, allowing closing the circuit breaker at the first minimum voltage beat across circuit breaker, after protection dead time.

After off-line testing using electromagnetic transients simulation program (PSCAD/EMTDC), the proposed method was also implemented in physical hardware. This hardware was then tested on a real-time transients simulator (RTDS). The real time simulations demonstrate the method efficiency to control overvoltages and to reduce the dead time.

Finally, the method has been parametrically evaluated for a range of simulated conditions, including different shunt compensation levels, influence of series compensation, influence of transmission line transposition, effect of line lengths. In addition, simulations have been conducted to compare the performance of existing control method and the proposed method.

Keywords: Controlled Switching, Three-phase reclosing, Transmission Lines, Switching Overvoltages, RTDS.

ÍNDICE

RESUMO.....	ix
ABSTRACT	xi
ÍNDICE.....	xiii
LISTA DE FIGURAS.....	xvii
LISTA DE TABELAS.....	xxi
LISTA DE SÍMBOLOS	xxiii

CAPÍTULO 1	1
-------------------------	----------

INTRODUÇÃO

1.1 Relevância e motivação da pesquisa.	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Estrutura do Trabalho	4
1.4 Publicações	5

CAPÍTULO 2	7
-------------------------	----------

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Solicitações elétricas	8
2.1.1 Tensões a frequência industrial	8
2.1.2 Sobretensões temporárias	8
2.1.3 Sobretensões atmosféricas	8
2.1.4 Sobretensões de manobra ou transitórias.....	9
2.2 Manobras em linhas de transmissão	10
2.2.1 Energização	10
2.2.2 Religamento.....	10
2.3 Métodos de controle de sobretensões	10

2.3.1	Resistor de pré-inserção.....	11
2.3.2	Para-raios	11
2.3.3	Chaveamento controlado	12
2.4	Religamento de linhas de transmissão.....	16
2.4.1	Modalidades de religamento automático	16
2.4.2	Vantagens do religamento automático	21
2.4.3	Religamento tripolar em função da compensação reativa em derivação.....	22
2.4.4	Religamento tripolar em função do estado do sistema	26
2.5	Área de pesquisa.....	30
2.6	Tecnologias desenvolvidas	31
2.6.1	Cenário no Mundo	31
2.5.2	Cenário no Brasil	38
CAPÍTULO 3		41
MATERIAIS E MÉTODOS		
3.1	Materiais	41
3.1.1	Sistema elétrico analisado	41
3.1.2	PSCAD/EMTDC	49
3.1.3	RTDS	50
3.2	Método de controle proposto.....	51
3.2.1	Algoritmo principal de controle	52
3.2.2	Implementação do controlador em hardware físico	62
3.2.3	Avaliação de desempenho do controlador no simulador digital em tempo real.....	63
CAPÍTULO 4		69
RESULTADOS		
4.1	Resultados das simulações digitais em tempo real	69
4.2	Diversos esquemas de compensação em derivação.....	72
4.3	Influência da compensação série	74
4.4	Influência da transposição	75
4.5	Análise comparativa de métodos de controle na manobra de religamento	76

4.6	Análise comparativa de métodos de controle variando a comprimento da linha	82
4.6.1	Religamento tripolar usando chaveamento controlado	82
4.6.2	Religamento tripolar usando resistor de pré-inserção.	84
4.6.3	Religamento tripolar usando pára-raios.....	86
CAPÍTULO 5		89
ANÁLISE DE RESULTADOS		
5.1	Aplicações	89
5.2	Vantagens do método desenvolvido	89
5.3	Observações referentes ao tempo morto.....	90
5.4	Simplificações adotadas	91
CAPÍTULO 6		93
CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS		
6.1	Conclusões.....	93
6.2	Sugestões para trabalhos futuros	94
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		95
ANEXO 1		99
SIMULAÇÃO DIGITAL EM TEMPO REAL		
A.1	Simulador Digital em Tempo Real (RTDS ^{MR}).....	100
A.1.1	Hardware	101
A.1.2	Software.....	104
A.1.3	A interface do simulador digital em tempo real	108
8.1.4	Vantagens da simulação digital em tempo real	110

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Classificação de solicitações dielétricas.....	9
Figura 2. Operação de chaveamento sem controle	13
Figura 3. Operação de chaveamento com controle.....	13
Figura 4. Esquema simplificado de religamento monopolar tradicional.....	18
Figura 5. Esquema simplificado de religamento tripolar tradicional	20
Figura 6. Tensão através dos contatos do disjuntor. LT sem compensação reativa em derivação.....	23
Figura 7. Formas de onda nos contatos do disjuntor para diferentes níveis de compensação. .	26
Figura 8. Forma de onda trifásica da tensão entre os contatos do disjuntor.....	27
Figura 9. Corrente de falta e forma de onda através do disjuntor. LT de 500 kV	29
Figura 10. Demarcação da área de pesquisa.....	30
Figura 11. Métodos de controle de sobretensões.....	31
Figura 12. Tensão do lado da linha e tensão do lado da fonte de uma fase.	32
Figura 13. Instante em que a tensão da linha e a tensão da fonte têm a mesma polaridade.	33
Figura 14. Tempo para o religamento controlado	34
Figura 15. Princípio de reconhecimento de padrões e previsão dos instantes ótimos de religamento.	34
Figura 16. Estimativa da tensão em instantes futuros com reconhecimento de padrões.....	36
Figura 17. Estimativa da tensão em instantes futuros com o método de Prony.	37
Figura 18. Determinação do instante ótimo para LTs com compensação.....	39
Figura 19. Esquema básico do sistema elétrico em estudo.....	42
Figura 20. Esquema da torre da linha de transmissão de 500 kV.....	42
Figura 21. Modelo para reator de linha.....	47
Figura 22. Modelo para reator de barra.	47

Figura 23. Diagrama tripolar do circuito básico de uma linha trifásica com compensação em derivação.....	52
Figura 24. Identificação do instante ótimo para o religamento da linha.	53
Figura 25. Diferença de potencial entre os terminais do disjuntor aberto.....	54
Figura 26. Amostragem interpolada da onda de entrada.	54
Figura 27. Valor eficaz da tensão entre os terminais do disjuntor aberto	55
Figura 28. Sinal filtrado.....	56
Figura 29. Instante de abertura dos contatos do disjuntor	57
Figura 30. Crescimento e decaimento do sinal filtrado após a abertura do disjuntor.....	57
Figura 31. Duração do meio-período do batimento.....	58
Figura 32. Período do batimento identificado	58
Figura 33. Diagrama de blocos do algoritmo desenvolvido.....	59
Figura 34. Forma de onda das três fases da tensão na região de mínimo do batimento.....	60
Figura 35. Ajuste do tempo de religamento.	61
Figura 36. Escalamento dos sinais para interface.....	62
Figura 37. Configuração da Interface do controlador com o RTDS	63
Figura 38. Canais de saídas de sinais analógicas do RTDS	64
Figura 39. Conversor Analógico – Digital OADC	65
Figura 40. Canais de entradas A/D ao RTDS.....	65
Figura 41. Canais de saídas digitais do RTDS	66
Figura 42. Cartão de Interface IMC	67
Figura 43. Canais de entradas digitais ao RTDS.....	67
Figura 44. Forma da onda da tensão entre os contatos do disjuntor.....	69
Figura 45. Sinal de referencia.....	70
Figura 46. Identificação do instante de abertura do disjuntor	70
Figura 47. Identificação do meio período.....	71
Figura 48. Identificação do período completo do primeiro batimento	71
Figura 49. Fechamento do disjuntor depois do primeiro batimento.....	72
Figura 50. Tensões entre os contatos do disjuntor utilizando o controlador para religamento.	73
Figura 51. Comparação LT com compensação em derivação vs. LT com compensação em derivação + compensação série.	74

Figura 52. Comparação LT perfeitamente transposta vs. LT com transposição real	75
Figura 53. Religamento tripolar utilizando resistor de pré-inserção	77
Figura 54. Religamento tripolar utilizando o método existente	78
Figura 55. Religamento tripolar utilizando o método proposto.....	79
Figura 56. Perfis de sobretensões ao longo da linha.....	81
Figura 57. Sobretensões no terminal receptor usando chaveamento controlado.....	83
Figura 58. Tensão no terminal receptor no religamento com chaveamento controlado.	84
Figura 59. Sobretensões no terminal receptor usando resistor de pré-inserção.....	84
Figura 60. Tensão no terminal receptor no religamento com resistor de pre-inserção.....	85
Figura 61. Sobretensões no terminal receptor usando para-raios.....	86
Figura 62. Tensão no terminal receptor usando pára-raios.	87
Figura 63. Comparação das máximas sobretensões (pu) no religamento tripolar usando diferentes métodos de controle	87
Figura 64. Arquitetura do hardware do RTDS.	101
Figura 65. Módulos do software do RTDS.	105
Figura 66. Módulos do software do RTDS.	107
Figura 67 Exemplo de um teste de modelo de linha de transmissão em malha fechada.....	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Parâmetros elétricos de linha calculados para frequência de 60 Hz	44
Tabela 2. Resumo dos parâmetros básicos dos geradores na Barra 1 (B1)	44
Tabela 3. Curva de saturação do transformador elevador da Barra 1 (B1).	45
Tabela 4. Dados do transformador elevador da Barra 1 (B1).....	45
Tabela 5. Curva de saturação do transformador da barra 3 (B3).....	46
Tabela 6. Dados do auto-transformador da Barra 3 (B3)	46
Tabela 7. Curva de saturação do transformador da Barra 5 (B5)	46
Tabela 8. Dados do auto-transformador da Barra 5 (B5)	47
Tabela 9. Parâmetros básicos dos reatores de linha e barra.....	48
Tabela 10. Curva dos pára-raios.	49
Tabela 11. Resumo de dados técnicos de pára-raios ZnO.....	49
Tabela 12. Máximas tensões através dos contatos do disjuntor	73
Tabela 13. Dados da compensação série	74
Tabela 14. Sobretensões no terminal receptor da linha de transmissão	80
Tabela 15. Sobretensões no terminal receptor usando chaveamento controlado.	83
Tabela 16. Sobretensões no terminal receptor usando resistor de pre-inserção	85
Tabela 17. Sobretensões no terminal receptor usando para-raios	86

LISTA DE SÍMBOLOS

ABB	Asea Brown Boveri
ATP	Alternative Transient Program
BPA	Bonneville Power Administration
CIGRE	International Council on Large Electric Systems
CSMF	Continuous System Model Functions
CSMF	Continuous System Model Functions
DSP	Digital signal processor
EAT	Extra Alta Tensão
EMTDC	Electromagnetic Transients incluindo DC
EMTP	Electromagnetic Transient Program
FPL	Florida Power & Light
GUI	Grafical user interface
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IMC	Interface MUX Card
MOSA	Metal Oxide Surge Arrester
OADC	Optical Analogue-Digital Converter
PSCAD	Power System Computer Aided Design
RPI	Resistor de pre-inserção
RTDS	Real Time Digital Simulator
TPs	Transformadores de potencial
Ur	Tensão Nominal
Zc	Impedância Característica
ZnO	Óxido de Zinco

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Relevância e motivação da pesquisa.

A eletricidade está diretamente associada à qualidade de vida no mundo moderno uma vez que a demanda mundial por energia elétrica aumenta continuamente, sendo a sua necessidade mais fortemente observada nos países em crescimento. No Brasil vem sendo aumentada a interconexão do sistema elétrico com o objetivo de propiciar maiores opções de exportação e importação de energia de uma região para outra, e, conseqüentemente, aumentar as possibilidades de fornecimento de energia ao sistema como um todo. Além de manter o fornecimento, é necessário garantir qualidade na energia elétrica, e se possível, otimizar sua transmissão para que tenha um melhor aproveitamento.

Atualmente, para garantir tais exigências do sistema elétrico, torna-se necessária a utilização de equipamentos que permitam aumentar a capacidade de transmissão e também melhorar a qualidade da energia transmitida, possibilitando assim a economia ou postergação de novos investimentos nos sistemas de transmissão.

O resultado frente aos fatores econômicos, a estabilidade do sistema e a manutenção dos níveis de tensão faz com que o sistema elétrico se torne mais complexo. É frequente a utilização de esquemas de compensação de potência reativa, com o objetivo de aumentar a estabilidade e a capacidade de transmissão de potência, bem como manter as tensões próximas aos valores nominais. Uma prática comum é a instalação de reatores em derivação em pontos selecionados ao longo das linhas de extra alta tensão (EAT). Os reatores compensam a

potência reativa capacitiva e reduzem as sobretensões durante condições de carga leve ou em vazio, sendo necessário em linhas longas.

Por outro lado, a proteção dos sistemas elétricos de potência evoluiu através dos anos, da utilização de dispositivos eletromecânicos com capacidades muito limitadas a sistemas complexos digitais.

Um sistema de proteção deve ser projetado para reconhecer anormalidades no sistema elétrico, as quais quando não detectadas podem acarretar em danos nos equipamentos elétricos e na paralisação no fornecimento de energia. Não há a necessidade, geralmente, de desligar todo o sistema devido a um defeito isolado. O sistema de proteção deve possuir seletividade para isolar os defeitos, minimizando a ocorrência de interrupções. Isto frequentemente requer a utilização de religamento automático após a abertura de um circuito, a partir da experiência de que a grande maioria das faltas (80 - 90 %) no sistema elétrico são fugitivas, e assim os religamentos em sua maioria são bem sucedidos. A restauração da transmissão de energia necessita que os sistemas de proteção realizem uma operação rápida e confiável, reduzindo ao mínimo o tempo de interrupção.

Como uma alternativa para aperfeiçoar os sistemas de proteção, nos últimos tempos, tanto empresas concessionárias de energia elétrica quanto fabricantes de equipamentos elétricos, no Brasil e no exterior, começaram a se movimentar na direção da utilização do chaveamento controlado de disjuntores. Na prática, atualmente, esta aplicação está apenas sendo iniciada em linhas de transmissão.

O chaveamento controlado utiliza um equipamento eletrônico (controlador) que permite realizar a operação da manobra em um ponto ótimo da onda de tensão através dos contatos do disjuntor. O princípio de funcionamento do controlador consiste em reconhecer o padrão do sinal de referência, permitindo a predição do ponto ótimo da onda para manobrar o disjuntor. A precisão deste procedimento é muito dependente da complexidade do sinal de referência de tensão através dos contatos do disjuntor.

As linhas de transmissão com compensação reativa em derivação apresentam uma complexidade adicional na forma de onda de tensão através dos contatos do disjuntor pelo que precisa-se de uma lógica sofisticada na determinação do instante ótimo para o religamento tripolar.

Desta maneira, devido a grande utilização de compensação reativa em derivação nos sistemas de transmissão de energia composto por linhas longas, como o sistema brasileiro, com a finalidade de compensar os efeitos da capacitância da linha e manter a tensão ao longo da linha próxima dos valores nominais, bem como a necessidade de sistemas de proteção rápidos e precisos, torna necessária a análise criteriosa dos algoritmos de proteção que serão utilizados nestas situações.

Em vista do exposto acima, a motivação principal do presente trabalho foi desenvolver um método de chaveamento controlado para otimizar a manobra de religamento tripolar de linhas de transmissão com compensação reativa em derivação, após a abertura da linha devido a ocorrência de defeito externo.

Deve-se ressaltar que já existe um produto comercial utilizado em linhas longas nos EUA e Canadá que será analisado ao longo do texto. O método proposto apresenta desempenho distinto do controlador existente, conforme será apresentado.

1.2 Objetivos

O objetivo geral do presente trabalho é o desenvolvimento de um controle adaptativo para chaveamento controlado de disjuntores durante a manobra de religamento tripolar de linhas de transmissão com compensação reativa em derivação. O método tem como foco a diminuição do tempo de interrupção de energia e a redução da amplitude das sobretensões transitórias decorrentes do religamento.

Os objetivos específicos foram os seguintes:

- Desenvolver um sistema de aquisição de dados para obter a forma de onda da tensão através dos terminais do disjuntor.
- Desenvolver um algoritmo que permita o religamento das linhas de transmissão em um intervalo de tempo menor do que o usual, reduzindo por sua vez as sobretensões geradas durante a manobra.
- Implementar em hardware físico o algoritmo desenvolvido, e testar seu desempenho utilizando o Simulador Digital em Tempo Real (RTDS™) com o intuito de que o algoritmo do controlador seja avaliado como se ligado a um sistema real.
- Realizar uma análise de sensibilidade da efetividade do controlador considerando:
 - Diferentes esquemas de compensação em derivação.

- A influência da compensação série.
 - A influência da transposição da linha.
 - A influência da variação do comprimento da linha.
 - Comparação do desempenho do método com um método existente e com o resistor de pré-inserção.
- Capacitação na utilização do simulador digital em tempo real RTDS e da ferramenta digital RSCAD.

1.3 Estrutura do Trabalho

A presente tese de doutorado está estruturada em 6 capítulos, conforme descrito a seguir:

Inicialmente, o capítulo 1 introduz o tema a ser tratado apresentando o estado da arte e a organização da tese.

O capítulo 2 foi desenvolvido com o intuito de demarcar a área de pesquisa. Para isto se faz uma revisão bibliográfica abordando conceitos gerais de sobretensões, classificação das manobras, classes do religamento de linhas de transmissão, métodos de controle de sobretensões e fundamentos do chaveamento controlado. Finalmente, são apresentadas, de maneira resumida, as pesquisas desenvolvidas na área de pesquisa no âmbito mundial e no Brasil.

O capítulo 3 corresponde aos materiais e métodos. Como parte dos materiais são descritos o sistema elétrico analisado, o programa de transitórios eletromagnéticos (PSCAD/EMTDC) e o simulador digital em tempo real (RTDS) utilizados na pesquisa. Como parte da metodologia são descritos o algoritmo do método proposto, a implementação do controlador num protótipo e os testes realizados no RTDS.

O capítulo 4 apresenta os resultados da pesquisa. São reportados os resultados das simulações em tempo real, através da avaliação paramétrica do método, incluindo a análise do desempenho do método proposto em comparação com o método tradicional do resistor de pré-inserção e outros métodos de controle existentes.

O capítulo 5 inclui a discussão geral da pesquisa. São reportadas as vantagens, as limitações e os aspectos importantes referentes ao método desenvolvido.

As conclusões da pesquisa, evidenciando suas principais contribuições, além da proposta de trabalhos futuros são apresentadas no capítulo 6.

Finalmente, no anexo 1, aborda-se o tema da simulação digital em tempo real, abrangendo uma descrição do Simulador Digital em Tempo Real (RTDS™), ferramenta utilizada para a avaliação do método proposto.

1.4 Publicações

A pesquisa realizada durante o doutorado foi consolidada através das seguintes publicações:

Patentes

1. M. C. Tavares, P. Mestas, “Method for Fast Three-Phase Reclosing of Shunt Compensated Transmission Lines” Patent Cooperation Treaty (PCT) Prot. Patent PCT/BR2009/000347, Outubro 2009. (Pedido de patente internacional aceito).
2. M. C. Tavares, P. Mestas, “Método para Religamento Tripolar Rápido em Linhas de Transmissão com Compensação Reativa Em Derivação” Instituto Nacional de Propriedade Industrial INPI. Depósito Patente 13.10.08 – PI0804330-2, Brasil Outubro, 2008.

Artigos publicados em periódicos

1. P. Mestas, M. C. Tavares, A. M. Gole, “Implementation and Performance Evaluation of a Reclosing Method for Shunt Reactor-Compensated Transmission Lines” IEEE Transactions on Power Delivery, v.26, p. 954-962, 2011.
2. P. Mestas, M. C. Tavares, “Comparative Analysis of Techniques for Control of Switching Overvoltages during Transmission Lines Energization”, Electric Power Systems Research, v. 80, p. 115-120, 2009.

Artigos apresentados em congressos

1. P. Mestas, M. C. Tavares “A Comparison of Overvoltage Control Methods during Three-Phase Reclosing varying the Length of Shunt Compensated Transmission Lines” In: Electrical Power and Energy Conference - EPEC, Winnipeg, MB, Canada; Outubro, 2011.

2. P. Mestas, M. C. Tavares, “Análise de Sensibilidade do Desempenho do Controle Adaptativo Aplicado ao Religamento Tripolar de Linhas de Transmissão”. In: Seminário Nacional de Produção e Transmissão e Energia Elétrica - XXI SNPTEE, Florianópolis, SC, Brasil; Outubro, 2011.
3. P. Mestas, M. C. Tavares, A. M. Gole, “Real Time Digital Simulation to Performance Evaluation of an Adaptive Three-Phase Autoreclosing Method for Compensated Transmission Lines”. In: 17th Power Systems Computation Conference - PSCC'11, Estocolmo, Suecia; Agosto, 2011.
4. P. Mestas, M. C. Tavares, A. M. Gole, “Implementation and Performance Evaluation of a Reclosing Method for Shunt Reactor Compensated Transmission Lines”. In: 2011 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Detroit, EUA; Julho 2011.
5. P. Mestas, M. C. Tavares, A. M. Gole, “Parametric Analysis of Three-Phase Autoreclosing Method for Compensated Transmission Lines”. In: International Conference on Power Systems Transients- IPST11, Delft, Holanda; Junho 2011.
6. P. Mestas, M. C. Tavares, “Religamento Tripolar: Comparação de Métodos de Redução de Sobreensões”. In: Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos SBSE 2010, Belém PA, Brasil; Maio 2010.
7. P. Mestas, M. C. Tavares, “Controle Adaptativo para Religamento Tripolar de Linhas de Transmissão com Compensação Reativa em Derivação visando a Redução de Sobreensões Transitória”. In: XX SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - SNPTEE 2009, Recife PE, Brasil; Novembro 2009.
8. P. Mestas, M. C. Tavares, “Métodos Alternativos de Limitación de Sobreensiones Transitorias durante la Maniobra de Energización de Líneas de Transmisión”. In: Conferencia Técnica Andina IEEE ANDESCON, Cusco, Perú, Outubro 2008.
9. P. Mestas, M. C. Tavares, “Estudo Comparativo de Métodos de Controle de Sobreensões Transitórias em Linhas de Transmissão durante a Manobra de Energização”. In: Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE 2008, Belo Horizonte, MG, Brasil; Abril 2008.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Um sistema de potência deve ser capaz de assegurar de forma eficiente um contínuo fornecimento de energia com uma adequada qualidade. Para alcançar este objetivo com um mínimo de investimentos há necessidade de se realizar um conjunto de estudos em nível de projeto não só em regime permanente, mas também quando da ocorrência de fenômenos transitórios.

Embora, uma rede elétrica funcione na maioria do tempo em regime permanente, surgirão fenômenos transitórios, que mesmo sendo de curta duração terão que ser minuciosamente analisados. O conhecimento de tais fenômenos é muito importante pelas solicitações que impõem à rede, devido às elevadas correntes ou tensões que podem ocorrer. Dentre os fenômenos transitórios que podem surgir numa rede, pela sua importância, salientam-se as situações de curto-circuito que ocasionam elevadas correntes de defeito e as manobras de chaveamento que originam tensões elevadas da rede.

As sobretensões de forma geral podem dividir-se em dois tipos: externas e internas. A diferença entre ambas depende somente da localização dos eventos que as causaram. As sobretensões externas são originadas fora do sistema considerado, sendo sua principal fonte as descargas atmosféricas, enquanto que as internas são causadas por eventos dentro do sistema de potência em si como as manobras de disjuntores ou os curtos-circuitos.

O aumento dos níveis de tensão nas redes de transmissão e interligação fez com que as sobretensões de manobra assumissem uma grande importância. De fato, para tensões nominais superiores a 400 kV são as sobretensões de manobra que podendo atingir valores de 3 p.u. condicionam os níveis de isolamento, ao contrário do que sucede para tensões nominais

inferiores, onde são as sobretensões de origem atmosféricas que condicionam os níveis de isolamento (RYAN e ENGINEERS, 2001). Não obstante, isto não deve ser utilizado como norma para simplificar os estudos, mas como um indicativo de severidade.

A seguir são apresentados os principais conceitos relativos à pesquisa. Trata-se assim de balizar o conhecimento para especificar a área do tema em estudo.

2.1 Solicitações elétricas

São tensões caracterizadas por uma magnitude, uma duração e uma probabilidade de ocorrência. Os seguintes tipos de solicitações dielétricas podem ser verificados durante a operação de um sistema de transmissão.

2.1.1 Tensões a frequência industrial

As tensões a frequência industrial, sob condições normais de operação, podem variar ligeiramente, mas para efeitos de coordenação de isolamento, é considerada constante, isto é, não excedem a tensão máxima do equipamento.

2.1.2 Sobretensões temporárias

As sobretensões temporárias também chamadas de sustentadas, cuja principal característica é a sua longa duração com baixo amortecimento, persistem no sistema até que o mesmo seja modificado ou que seja eliminada a causa que deu origem às sobretensões. As principais causas das sobretensões temporárias são as faltas envolvendo ou não a terra, a rejeição de carga, a ressonância e a ferorressonância.

A importância deste tipo de sobretensões na coordenação de isolamento se dá pelo fato de que os equipamentos a elas submetidos terão que ser especificados de modo a suportá-las por muito tempo, uma vez que os para-raios, em regra geral, não são projetados com o intuito de absorver toda a energia associada a estas sobretensões.

2.1.3 Sobretensões atmosféricas

As sobretensões atmosféricas têm uma curta duração e podem ser simuladas por uma onda aperiódica, com frentes de onda relativamente rápidas (da ordem de 1 μ s) e tempos de

decaimento da ordem de 100 a 300 μ s. A incidência destas descargas pode se dar diretamente sobre o equipamento como no caso de descargas atmosféricas atingindo subestações, ou sobre as linhas de transmissão do sistema, originando neste caso surtos de tensão que se propagam ao longo destas linhas, atingindo os equipamentos nas subestações.

2.1.4 Sobretensões de manobra ou transitórias

As sobretensões de manobra ou transitórias que ocorrem em um sistema de potência são o resultado de alguma modificação estrutural ocorrida como chaveamentos, curtos, etc. com duração determinada pelo período de acomodação de uma condição sustentada para outra. Durante esse período de acomodação entre as duas situações, ocorre um transitório, que dá origem a sobretensões ou sobrecorrentes.

São de grande importância as sobretensões de manobra produzidas pela energização e religamento da linha que causam ondas viajantes ao longo da linha de transmissão e são mais severas na extremidade remota do ponto de chaveamento.

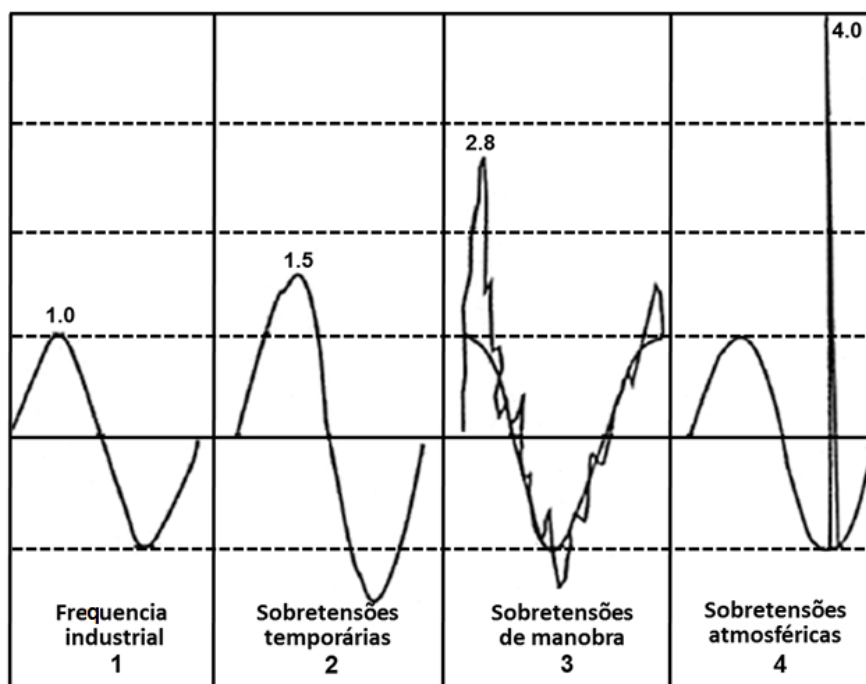


Figura 1. Classificação de solicitações dielétricas (Fonte: RYAN e ENGINEERS, 2001)

2.2 Manobras em linhas de transmissão

A energização e religamento de linhas de transmissão são manobras típicas que ocorrem em um sistema e cuja análise pode ser feita considerando-se três períodos distintos: o período transitório, no qual prevalecem os efeitos das ondas trafegantes associados a estes fenômenos, o período dinâmico que representa uma transição entre os períodos transitórios e o regime permanente e finalmente o regime permanente, no qual a tensão é periódica.

2.2.1 Energização

A energização de uma linha de transmissão é uma manobra que consiste no fechamento dos contatos dos disjuntores ocasionando um transitório inicial com duração de alguns ciclos, para logo o sistema entrar em regime permanente. Em razão da variação brusca da tensão, a sobretensão pode atingir o dobro do valor da tensão da fonte na condição de regime permanente.

2.2.2 Religamento

O religamento é uma manobra que consiste no fechamento dos contatos do disjuntor subsequentemente à abertura de uma linha de transmissão, com a finalidade de restaurar o fornecimento de energia. Esta manobra pode resultar em um grande transitório se a fonte de tensão e a carga residual na linha manobrada tiverem polaridades opostas.

Este trabalho está focado no religamento de linhas de transmissão, pelo que no item 2.4 serão detalhados os principais benefícios, modalidades e características desta manobra.

2.3 Métodos de controle de sobretensões

Existem diversas formas para controlar as sobretensões, sendo que os mecanismos especiais utilizados para este fim devem levar em consideração que cada tipo de sobretensão é dependente das características dos equipamentos usados, da configuração do sistema e dos seus critérios operativos.

2.3.1 Resistor de pré-inserção

O método de controle de sobretensões mais comumente utilizado é a inserção de um resistor em série com a linha durante o fechamento dos polos do disjuntor. Este resistor é instalado junto à câmara do disjuntor e, durante o deslocamento do contato móvel do mesmo, ele é colocado temporariamente em série com a linha. Este processo cria um divisor de tensão entre o resistor e a linha, o que reduz as sobretensões durante o transitório. Por fim, o resistor é curto-circuitado, sendo retirado do sistema.

O resistor deve ficar inserido no circuito durante pelo menos duas vezes o tempo de trânsito da onda. Valores de tempo de inserção de 6 a 10 ms são normalmente especificados. Em geral o valor do resistor de pré-inserção (RPI) é da ordem de grandeza da impedância característica da linha, variando de acordo com as diferentes condições do sistema, mas tipicamente está na faixa de 300-500 ohms. (COLCLASER, 1970; ZANETTA, 2003).

2.3.2 Para-raios

Os para-raios são usados na proteção contra qualquer tipo de sobretensão. No caso de surtos atmosféricos, a corrente que os para-raios terão que dissipar é limitada pela blindagem fornecida pelos cabos para-raios, uma vez que não permitem que valores elevados de corrente das descargas atmosféricas atinjam diretamente os condutores de fase da linha de transmissão.

Quando da ocorrência de sobretensões temporárias, os para-raios são capazes de proteger os equipamentos somente por um período curto de tempo, pois caso fiquem submetidos a altos níveis de tensão por muitos ciclos sua capacidade de absorver energia será ultrapassada, causando danos permanentes aos mesmos.

Para sobretensões de manobra a instalação de para-raios de óxido metálico (ZnO) com menor nível de proteção e uma maior capacidade de dissipação de energia nos dois terminais da linha reduz as sobretensões ao longo da linha. Uma redução adicional de sobretensões de chaveamento pode ser conseguida através da utilização de um para-raios adicional no meio da linha, porém é recomendada sua utilização de forma combinada com o chaveamento controlado. (LEGATE et al., 1988; RIBEIRO; MCCALLUM, 1989; STENSTRÖM; MOBEDJINA, 1998; SEYEDI et al., 2005).

2.3.3 Chaveamento controlado

O uso do chaveamento controlado como forma de limitar as sobretensões transitórias é uma técnica que vem sendo estudada há vários anos. Entretanto, soluções tecnicamente viáveis para colocar em prática a técnica só puderam ser desenvolvidas em tempos mais recentes, graças à evolução dos projetos dos disjuntores de EAT e ao desenvolvimento de dispositivos microeletrônicos aplicados a sistemas de potência. (ABB, 2004; ESMERALDO, 1999; ROCHA, 1997; ITO, 2002).

Este método consiste em controlar o instante de abertura ou fechamento dos contatos do disjuntor, pois os surtos originados por manobras são dependentes das tensões no instante do seu chaveamento, e são consideravelmente reduzidos se estas tensões forem próximas de zero. O conceito fundamental de chaveamento controlado é explicado mediante a comparação de uma operação de "chaveamento sem controle" (Figura 2) e uma operação de "chaveamento controlado" (Figura 3). O chaveamento está baseado no fechamento do disjuntor com relação à tensão de fase. Para simplificar apenas uma fase é considerada. (THOMAS, 2004)

Na Figura 2 no instante 1 uma solicitação de fechamento do disjuntor é emitida. Neste caso a ordem para fechamento ocorre em um instante próximo a um pico negativo da onda tensão. A solicitação de fechamento poderia ocorrer em qualquer instante com relação a onda de tensão, ou seja, de 0 a 360 graus elétricos, como indicado na figura pela faixa (A).

No instante 2, a solicitação é expressa diretamente como um comando de fechamento do disjuntor, que é executado depois de um tempo indicado por (B), completando assim a operação de fechamento.

Finalmente no instante 3, o disjuntor encontra-se fechado sendo que a operação foi realizada em um ponto próximo máximo positivo da onda da tensão. O instante do fechamento acontece de forma aleatória em relação à onda de tensão de forma similar ao comando original de fechamento, como indicado pela faixa (C).

Para o caso de uma operação com chaveamento controlado, a Figura 3 apresenta a sequência de eventos para que o fechamento dos contatos do disjuntor ocorra no cruzamento por zero da onda da tensão.

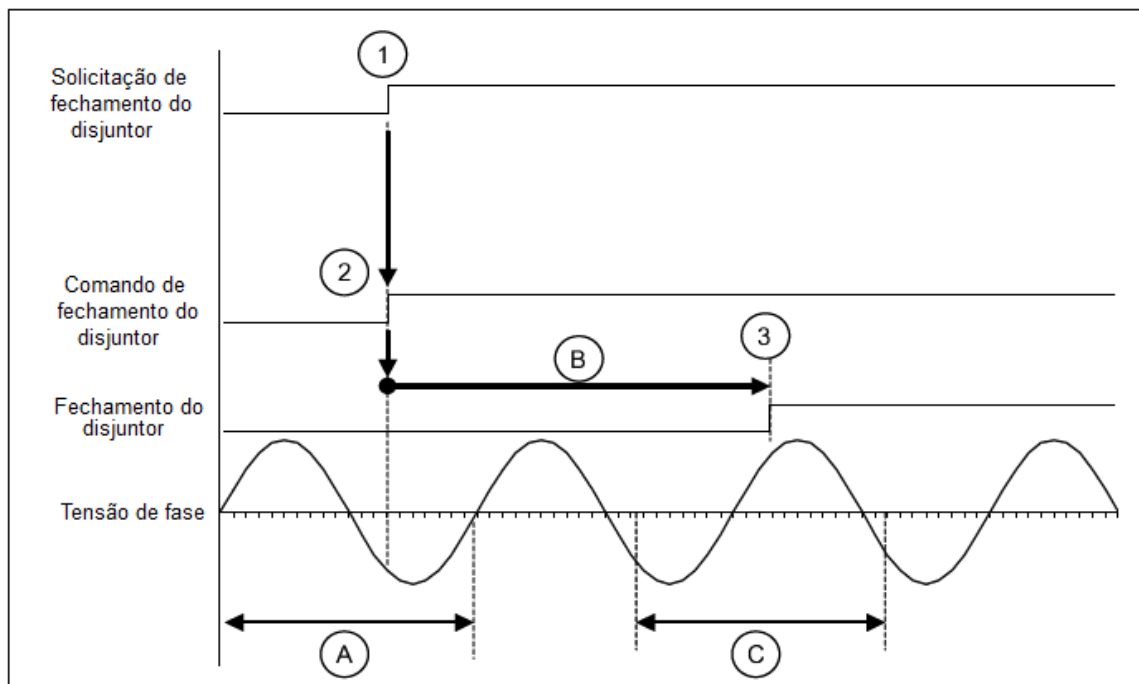


Figura 2. Operação de chaveamento sem controle

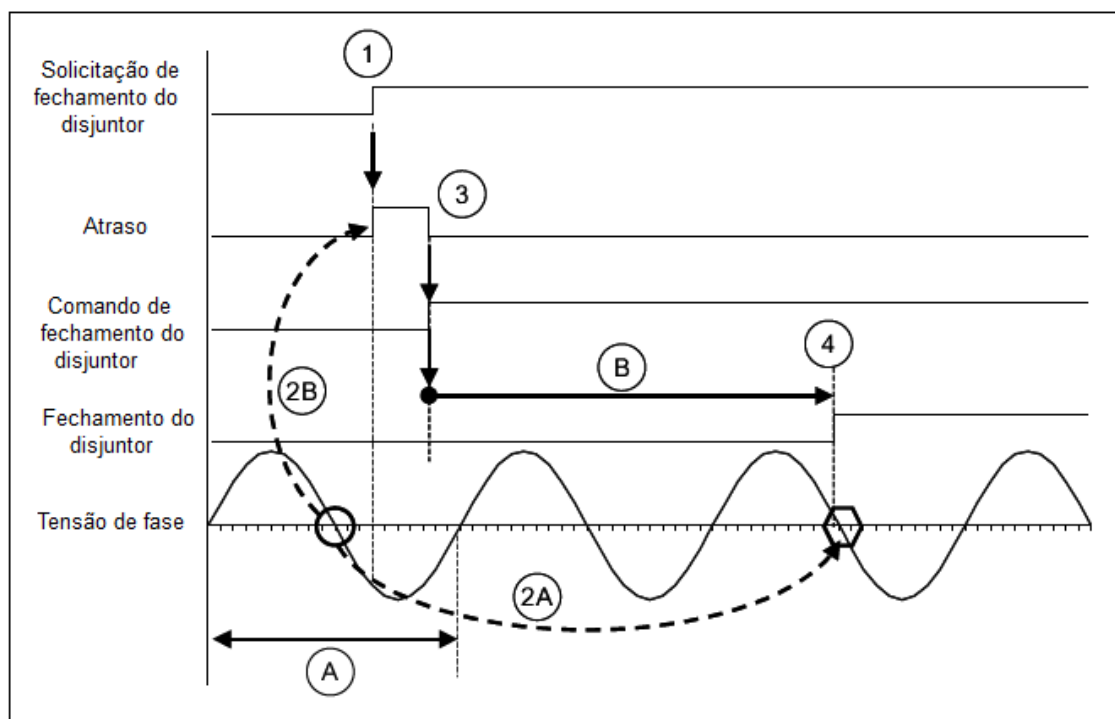


Figura 3. Operação de chaveamento com controle

No instante 1 uma solicitação para fechar o disjuntor é emitida, no mesmo ângulo da onda de tensão que para o caso anterior da Figura 2. Mais uma vez a solicitação de uma operação pode ocorrer em qualquer instante com relação à onda tensão, como indicado pela faixa (A).

Sendo a finalidade controlar o fechamento dos contatos do disjuntor no cruzamento por zero da onda da tensão, as passagens por zero devem ser detectadas e monitoradas continuamente. Uma passagem por zero é detectada sempre que um sinal senoidal muda de polaridade entre duas amostras consecutivas, ou seja, em uma amostra tem um valor instantâneo positivo e na seguinte passa a ter um valor negativo, ou passa de um valor negativo para um positivo. Um futuro cruzamento por zero da onda de tensão deve ser identificado como o "instante ótimo" no qual o disjuntor pode ser fechado.

No passo 2A, ao receber o comando para fechamento do disjuntor, o sistema de controle estima os sinais de referência em instantes futuros tomando-se como base os últimos valores determinados como passagens por zero do sinal. Assumindo um comportamento simétrico e periódico característico do regime permanente da tensão e considerando a estabilidade no tempo de operação do disjuntor, é estabelecido o "instante ótimo" para o fechamento.

No passo 2B, com o "instante ótimo" identificado e o tempo de operação do disjuntor conhecido, o comando de fechamento do disjuntor é adequadamente retardado.

Uma vez que o tempo de atraso necessário para a sincronização acabe no instante 3, o comando de fechamento é emitido ao disjuntor, realizando-se a operação de fechamento com o mesmo tempo de operação de fechamento (B) de acordo com o caso anterior mostrado na Figura 2.

No instante 4, o disjuntor fecha seus contatos no cruzamento por zero da onda de tensão conseguindo-se o chaveamento controlado.

A operação apresentada acima é desenvolvida assumindo uma série de condições ideais, incluindo, mas não limitadas a:

- Casos de chaveamento com um instante ótimo bem definido.
- Estabilidade do tempo de operação do disjuntor.
- Estabilidade da tensão e frequência do sistema de potência.
- Esquema de controle capaz de calcular o atraso para atingir o instante ótimo, em um tempo razoavelmente curto.

Na prática, para os casos de chaveamento em regime permanente, tais condições podem ser normalmente realizadas sem grandes dificuldades com disjuntores modernos e projetos de sistemas de controle bem definidos.

O uso de chaveamento controlado, tem se tornado uma prática bastante comum para algumas aplicações específicas, incluindo:

- Energização de bancos de capacitores em derivação.
- Energização de bancos de reatores em derivação.
- Energização de transformadores de potência.
- Energização e religamento de linhas de transmissão.

Os instantes ótimos específicos e os métodos para determinar tais instantes variam de acordo com a natureza específica do circuito a ser manobrado. No entanto, todas as aplicações acima mencionadas têm em comum o objetivo principal de reduzir a magnitude das sobretensões e das correntes de manobra. A redução destes transitórios, decorrentes do chaveamento do disjuntor, fornece uma melhoria significativa na qualidade de energia e também uma redução do risco de falha por excesso de esforço dos equipamentos conectados.

O chaveamento controlado de banco de capacitores em derivação e bancos de reatores em derivação tem-se tornado uma tecnologia bastante sólida na última década, impulsionada principalmente pela melhora significativa na qualidade de energia alcançada com consequente aumento na vida útil dos equipamentos devido à redução da severidade dos transitórios de chaveamento que ocorre com estes tipos de manobra.

O uso do chaveamento controlado na manobra de energização de linhas de transmissão é uma das aplicações mais recentes. Neste caso, o instante ótimo ocorre na passagem por zero da tensão do lado da fonte. O monitoramento pode ser feito para uma única fase, identificando-se o cruzamento por zero da tensão e fechando-se as demais fases em intervalos de 60° elétricos. Pode-se efetuar também o monitoramento para cada fase individualmente, para evitar possíveis defasagens do cruzamento por zero das tensões devido ao transitório de manobra. Estudos não indicam a necessidade deste controle por fase, sendo mais usual o monitoramento de uma única fase.

Seguindo-se a sequência de eventos apresentada na Figura 3 pode-se executar a manobra de energização de linhas de transmissão com chaveamento controlado.

No caso do religamento o problema de sincronização pode se tornar consideravelmente mais difícil de resolver em um tempo aceitavelmente curto devido à presença de carga residual na seção isolada de linha de transmissão. Como tal, este caso está mais próximo de ser um problema de sincronização transitória do que os casos em regime permanente estável de bancos de capacitores e reatores.

2.4 Religamento de linhas de transmissão

Atualmente o estudo do religamento de linhas de transmissão está diretamente relacionado ao *religamento automático*. O termo *automático* está relacionado com as operações de chaveamento local ou remota que são iniciadas mediante o acionamento de um relé ou controlador sem a direta intervenção de um operador. Neste sentido, o religamento automático é definido como o fechamento automático do disjuntor com a finalidade de restaurar um elemento ao serviço após a abertura automática do disjuntor. (IEEE Std C37.104, 2002)

O religamento automático pode ser ainda rápido ou lento. O religamento rápido consiste no fechamento automático do disjuntor sem atraso intencional que não seja o tempo de desenergização necessário para desionizar o arco de falta. Já o religamento lento consiste no fechamento dos disjuntores depois de um atraso que é intencionalmente maior do que o tempo de desionização especificado para o nível de tensão. Este atraso intencional varia usualmente de 1 a 60 segundos. (IEEE Power Systems Relaying Committee, 1984).

2.4.1 Modalidades de religamento automático

Tradicionalmente, utilizam-se duas modalidades distintas de religamento automático: o religamento monopolar e o religamento tripolar. A adoção de uma ou outra modalidade depende de diversos aspectos relacionados ao desempenho dinâmico do sistema, às características dos equipamentos de proteção e disjuntores, à frequência de defeitos monofásicos, etc.

a) Religamento automático monopolar

A motivação para utilização do religamento monopolar reside no fato de que, em circuitos de alta e EAT, a maioria dos defeitos envolve apenas uma das fases e a terra. Neste sentido, no esquema de religamento monopolar, a eliminação dos defeitos monofásicos é feita através da abertura apenas da fase sob falta (abertura monopolar). Para viabilizar a abertura monopolar, o esquema de proteção deve permitir a identificação precisa da fase sob falta. Além disso, os disjuntores do circuito a ser religado devem estar preparados para abertura e fechamento individual de seus polos.

Para conclusão da manobra, depois de decorrido o tempo morto faz-se o religamento apenas da fase que foi efetivamente desligada. Durante o ciclo da manobra monopolar (abertura monopolar, tempo morto e fechamento monopolar), permanecem em serviço as fases sãs do circuito, sem que ocorra a interrupção total do fluxo de energia na linha.

A eficácia do religamento monopolar depende, dentre outros fatores, da extinção do arco secundário. Teoricamente, o aumento do tempo morto do religamento conduz a uma maior probabilidade de extinção do arco secundário. Contudo, a operação com uma das fases desligada impõe circulação de correntes desequilibradas no sistema, podendo resultar na operação indevida de proteções de sobrecorrente de neutro, o que inviabiliza o aumento do tempo morto para valores muito superiores a 1 segundo.

Outro aspecto importante é que a manobra monopolar, pelas suas próprias características, só pode ser realizado quando o defeito envolve apenas uma das fases da linha de transmissão. Para todos os defeitos que envolvem mais de uma das fases faz-se necessária a abertura tripolar do circuito, não sendo possível a aplicação do esquema de abertura e religamento monopolar.

A manobra de abertura e religamento monopolar caracteriza-se por apresentar um tempo de religamento fixo, ou seja, após a abertura monopolar o disjuntor fechará depois de um período previamente determinado, o qual é dimensionado através de análises que consideram diversos parâmetros do sistema de transmissão, assim como parâmetros vinculados a condições ambientais. A Figura 4 ilustra simplificadaamente uma sequência de atuação de um esquema de proteção que opera com religamento monopolar.

Para a eliminação de faltas monofásicas transitórias através desta técnica, a fase em curto-circuito é aberta em seus dois terminais. Este instante de abertura caracteriza o término

do chamado arco elétrico primário, o qual existe desde o início da formação do arco até o instante em que os disjuntores atuam. Trata-se de um arco de grande potência, dado o elevado valor de corrente de curto-circuito primário (da ordem de kA). Entretanto, após a abertura dos polos dos disjuntores nos dos extremos da fase sob falta, o arco continua existindo por certo período, sendo chamado de arco elétrico secundário. O arco secundário se mantém devido ao acoplamento capacitivo e indutivo com as outras duas fases energizadas da linha de transmissão, as quais permanecem conectadas transmitindo energia e também devido ao acoplamento com outras linhas paralelas que por ventura existam. Nesta transição, decorrente da abertura dos disjuntores, a corrente é reduzida do seu valor prévio de arco primário para valores menores de arco secundário (de dezenas a centenas de amperes).

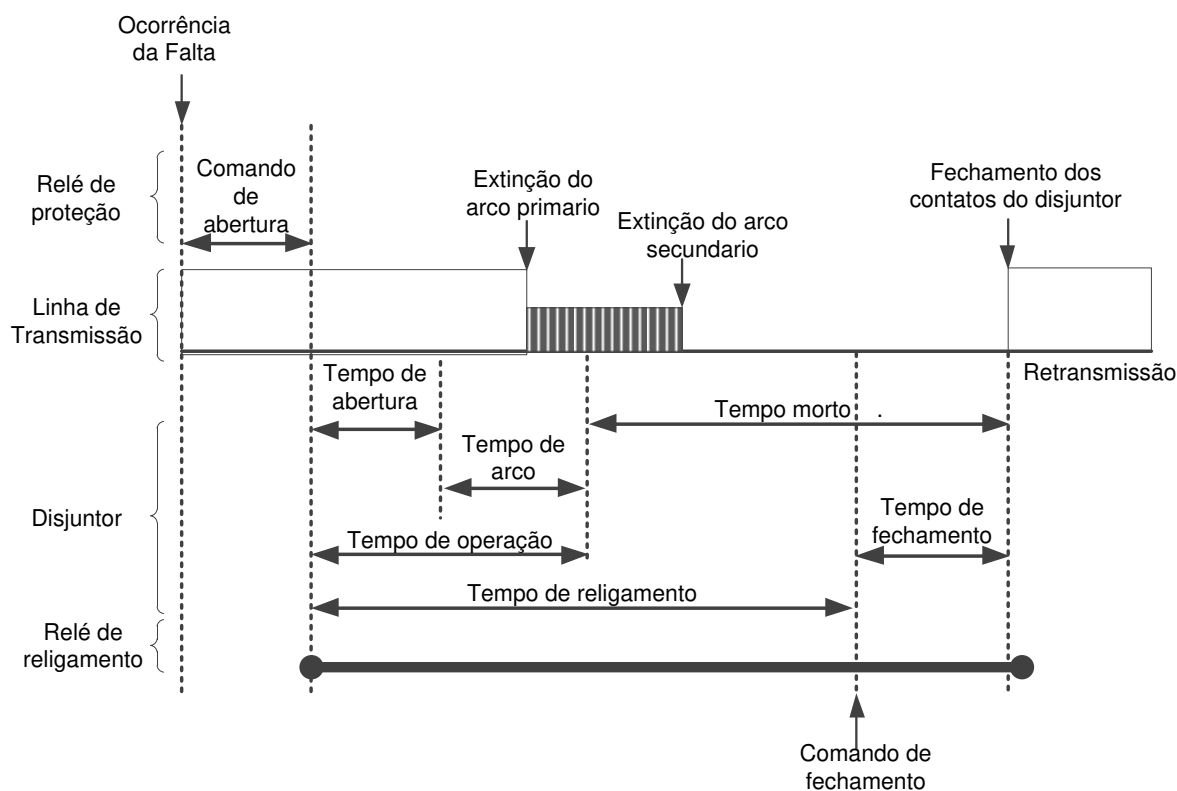


Figura 4. Esquema simplificado de religamento monopolar tradicional

O arco secundário mantém a condição de curto-circuito do sistema, de forma que o religamento da fase somente poderá ser efetuado com segurança após a extinção do mesmo. Decorrido um determinado tempo, se o religamento da fase faltosa ocorrer com o arco secundário ainda existente, o arco primário se restabelecerá. O sistema permanecerá em curto-circuito e a manobra de abertura tripolar será solicitada por atuação do sistema de proteção,

caracterizando um religamento sem sucesso. Esta é uma das causas da ocorrência de faltas sequenciais no sistema, ressaltando a importância do dimensionamento correto do tempo morto para cada linha de transmissão e da identificação da extinção ou não do arco secundário.

As perturbações decorrentes do religamento monopolar sem sucesso e a subsequente abertura tripolar são muito severas e muitas empresas acabam restringindo o uso da abertura/religamento monopolar em linhas onde os estudos indiquem uma baixa probabilidade de sucesso.

Segundo NYLÉN (1979), o tempo morto é o intervalo desde o instante da extinção do arco primário após da operação de abertura até o instante em que o ar é desionizado, o isolamento do ar é recuperado e os contatos do disjuntor são restaurados para transmitir energia elétrica. Geralmente, reduzir o tempo morto e acelerar o tempo de restauração é vantajoso para a melhoria da estabilidade e segurança do sistema. No entanto, no caso em que o tempo de restauração é muito curto, é necessário verificar se a extinção do arco ocorreu, para evitar uma re-ignição do arco quando a tensão é aplicada novamente.

O tempo de desionização de um arco ao ar livre depende da tensão do circuito, do espaçamento entre condutores, do comprimento da linha, da corrente de falta, da duração da falta, da velocidade do vento e do acoplamento capacitivo de condutores adjacentes. (WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION, 1964)

b) Religamento automático tripolar

No esquema de religamento tripolar a eliminação do defeito ocorre em função da abertura das três fases da linha de transmissão (abertura tripolar). Decorrido o tempo morto, a manobra é concluída com a energização do terminal líder e o consequente fechamento do terminal seguidor. A Figura 5 ilustra simplificada uma sequência de atuação de um esquema de proteção que opera com religamento tripolar.

Nesta modalidade de religamento aumentam-se os impactos no sistema elétrico, sobretudo nas unidades geradoras. De fato, a abertura tripolar interrompe abruptamente o fluxo de energia no circuito, com impacto nas unidades geradoras e redistribuição de fluxos nas demais linhas de transmissão. Neste sentido, a adoção do religamento tripolar deve considerar ajustes adequados de verificação de sincronismo, principalmente no que se refere às defasagens angulares que se verificam antes da conclusão das manobras de fechamento de

anel. De fato, as variações instantâneas de potência elétrica nas unidades geradoras crescem à medida que aumentam as defasagens angulares associadas ao fechamento do anel.

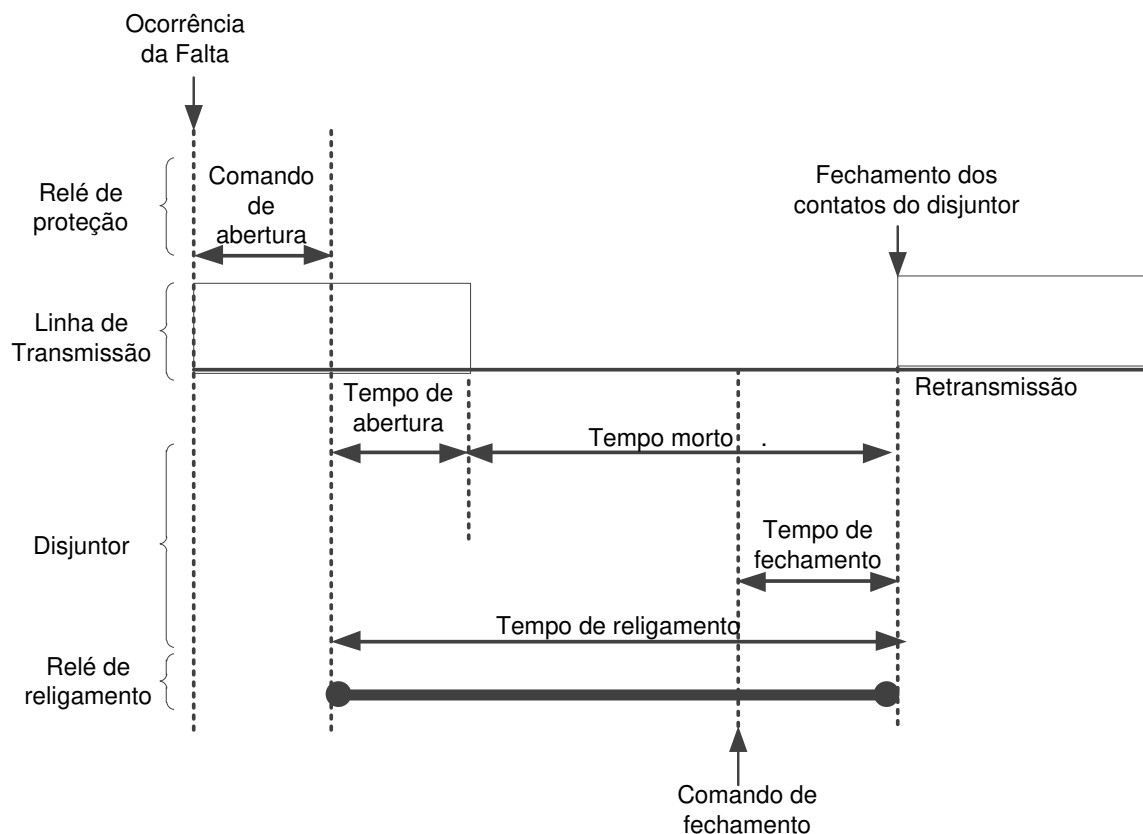


Figura 5. Esquema simplificado de religamento tripolar tradicional

Outro aspecto que deve ser considerado é que na abertura tripolar ocorre a desenergização de todas as fases durante o período de tempo morto. Desta forma, na abertura tripolar aumentam as chances de extinção da causa do defeito, sobretudo quando a mesma está relacionada a descargas atmosféricas ou queimadas (defeitos fugitivos).

Conforme tratado no item anterior, no caso do religamento monopolar o tempo morto está limitado pelo desempenho dos sistemas de proteção em função da circulação de correntes desequilibradas. Este problema não ocorre no religamento tripolar, pois a abertura das três fases não provoca desequilíbrios no sistema.

O esquema de religamento tripolar é simples e menos custoso que o esquema de religamento monopolar. O tempo morto pode ser menor devido ao menor tempo de desionização do arco necessário já que os outros condutores não estão energizados.

2.4.2 Vantagens do religamento automático

MASSAUD e AQUINO, (2008) afirmam que, de forma geral, o religamento automático (monopolar ou tripolar) com sucesso de linhas de transmissão agrega uma série de benefícios para os sistemas elétricos. Estes benefícios estão relacionados ao desempenho do sistema elétrico, quer seja em regime permanente ou dinâmico, a aspectos de confiabilidade do sistema e à disponibilidade dos circuitos.

A seguir são resumidos os principais benefícios do religamento automático.

a) Estabilidade do sistema elétrico

A estabilidade indica a capacidade que tem os sistemas elétricos de atingir uma nova posição de equilíbrio após a ocorrência de uma determinada perturbação (KUNDUR, 1994). Em geral, em se tratando de grandes perturbações, a perda de elementos de transmissão após a ocorrência de curtos-circuitos constitui a emergência mais severa para os sistemas elétricos.

O desligamento de linhas reduz a capacidade de transmissão dos sistemas elétricos, podendo levar as unidades geradoras à perda de sincronismo, dependendo das condições operativas verificadas antes da emergência e da própria severidade do distúrbio. Geralmente, problemas associados à perda de elementos de transmissão estão relacionados à estabilidade transitória, ou seja, ocorrem nos primeiros 500 ms – 1 s após a emergência.

O religamento automático monopolar, quando se dá com sucesso, melhora significativamente a estabilidade do sistema. Nesta modalidade de religamento permanecem em serviço as fases sãs do circuito envolvido na manobra, sem que ocorra a interrupção total do fluxo de energia na linha. Neste sentido, a utilização do religamento monopolar conduz a um aumento das margens de estabilidade e permite evitar, em determinadas situações, a perda de sincronismo de unidades.

Igualmente, o religamento tripolar (com sucesso) também agrega melhoria à estabilidade do sistema. Contudo, nesta modalidade de religamento há algumas questões que limitam os benefícios para a estabilidade. A principal é que, no religamento tripolar, a eliminação do defeito se dá por meio da abertura das três fases, o que conduz à interrupção total do fluxo de energia no circuito. Neste caso, o movimento relativo dos rotores das máquinas é muito mais rápido, o que faz com a perda de sincronismo se dê em menos tempo. Na prática, para que se

possa extrair benefícios efetivos do religamento tripolar para a estabilidade do sistema, faz-se necessário a adoção de tempos mortos muito baixos, da ordem de até 500 ms, por exemplo.

b) Confiabilidade do sistema elétrico

O religamento automático em sistemas elétricos malhados perde a importância sob o aspecto de estabilidade, passando a ter mais importância para melhoria da confiabilidade do sistema. Após uma emergência na rede de transmissão e havendo atuação do esquema de religamento automático com sucesso, o sistema fica melhor preparado para enfrentar novos desligamentos. Ou seja, a atuação do religamento automático pode evitar, em determinadas perturbações, que uma contingência simples resulte em um distúrbio mais severo para o sistema.

O tempo morto do religamento é um aspecto que tem influência na confiabilidade dos sistemas, sobretudo no esquema de religamento tripolar. Até que o religamento seja concluído, o sistema fica mais vulnerável em função da indisponibilidade de um de seus elementos. Numa análise preliminar, pode-se dizer que a redução do tempo morto do religamento tende a aumentar a confiabilidade dos sistemas elétricos.

c) Recomposição do sistema elétrico e disponibilidade dos circuitos

De uma forma geral, a ativação do religamento automático dos circuitos beneficia a recomposição do sistema elétrico. Da mesma forma, o religamento automático permite melhorar os índices de disponibilidade dos circuitos nos quais esta funcionalidade está ativa.

2.4.3 Religamento tripolar em função da compensação reativa em derivação

As operações de religamento de linhas de transmissão são normalmente realizadas com carga residual na linha cujas características dependem do grau de compensação em derivação da linha de transmissão, e a tensão residual na linha determina a forma de onda de tensão entre os contatos do disjuntor.

a) Religamento trifásico de linhas de transmissão sem compensação reativa em derivação

No caso de linhas sem compensação a forma de onda da tensão através dos contatos do disjuntor é aproximada pela função $1 - \cos(\omega t)$ como mostra a Figura 6.

Para a manobra de religamento de uma linha de transmissão sem compensação em derivação o instante ótimo pode situar-se próximo ao pico positivo ou negativo do sinal de tensão do lado da fonte, a depender da polaridade da carga residual.

A otimização do religamento trifásico deste tipo de linha consiste em fechar o disjuntor nos vales da onda de tensão, caso a tensão não passe nos cruzamentos por zero (região 1) ou em fechar o disjuntor próximo aos cruzamentos de zero da tensão (região 2).

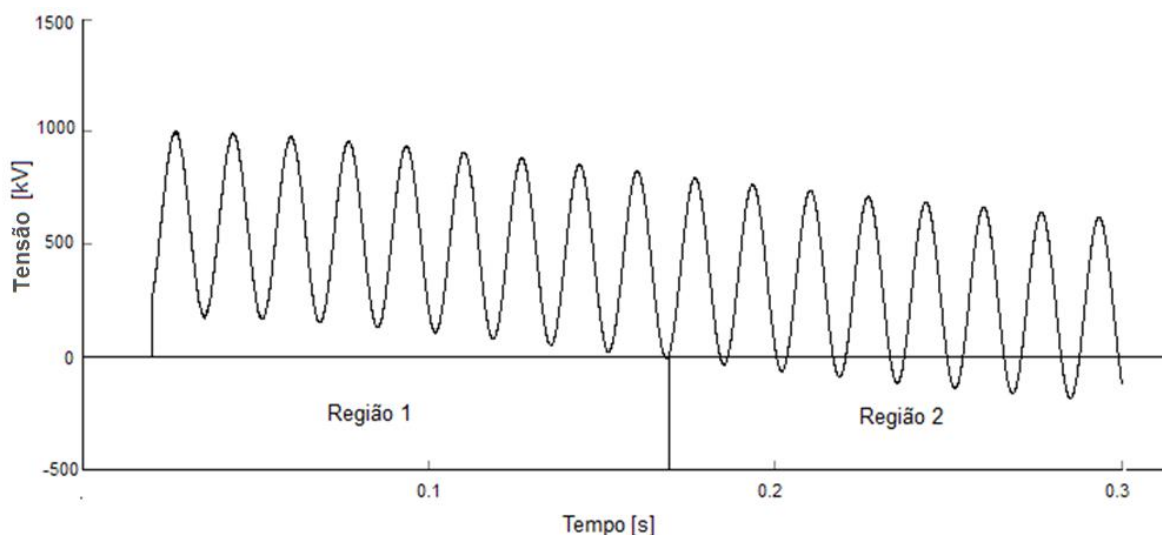


Figura 6. Tensão através dos contatos do disjuntor. LT sem compensação reativa em derivação.

b) Religamento trifásico linhas de transmissão com compensação reativa em derivação

As linhas de transmissão de alta e extra alta tensão, particularmente as linhas longas, geram grandes quantidades de potência reativa capacitiva quando operam em vazio ou em condições de carga leve. Sendo a corrente capacitiva proporcional à tensão do sistema, a potência reativa é proporcional ao quadrado da tensão da linha. Esta energia reativa deve ser

controlada, já que pode provocar grandes sobretensões em regime permanente nos terminais dos equipamentos conectados ao sistema de potência.

Os reatores em derivação compensam a potência reativa capacitiva e reduzem as sobretensões durante condições de carga leve e em vazio. Dependendo dos requisitos operativos do sistema e do comprimento da linha pode-se instalar reatores em apenas um terminal ou em ambos, sendo que nas linhas curtas normalmente não há necessidade de reatores.

Quando a linha é compensada com reatores em derivação, o grau de compensação tem um efeito importante na forma de onda de tensão entre os contatos do disjuntor. Devido ao circuito formado entre a capacitância transversal da linha e a indutância dos reatores em derivação, a tensão entre os contatos do disjuntor assume forma oscilatória (batimento) devido à composição entre a frequência fundamental do sistema de um lado do contato do disjuntor e a frequência natural da linha e dos equipamentos de compensação do outro lado do contato do disjuntor.

Para melhor entendimento da natureza oscilatória da carga residual é considerada uma linha perfeitamente transposta, compensada com reatores em derivação e assim determina-se a frequência de oscilação da carga residual desprezando a reatância da linha, a qual é bem inferior a do reator.

Inicialmente são definidas as seguintes grandezas:

f_{60} - frequência fundamental de operação do sistema elétrico (60 Hz).

ω - frequência angular fundamental

f_l - frequência de oscilação da carga residual na linha de transmissão.

L_r - indutância equivalente do reator.

C_l - capacitância equivalente da linha de transmissão.

Q_l - potência reativa capacitiva da linha de transmissão.

Q_r - potência reativa do reator.

V - tensão nominal da linha de transmissão.

Assim, a frequência natural de oscilação do circuito formado entre a capacitância da linha e a indutância do reator, que é a frequência de oscilação da carga residual, é dada por:

$$f_l = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_l}} \quad (2.2)$$

Uma vez que Q_r e Q_l podem ser escritas da seguinte maneira:

$$Q_r = \frac{V^2}{\omega L_r} \quad (2.3)$$

$$Q_l = V^2 \omega C_l \quad (2.4)$$

chega-se às seguintes expressões:

$$L_r = \frac{V^2}{\omega Q_r} \quad (2.5)$$

$$C_l = \frac{Q_l}{\omega V^2} \quad (2.6)$$

Definindo o grau de compensação da linha como:

$$k = \frac{Q_r}{Q_l} \quad (2.7)$$

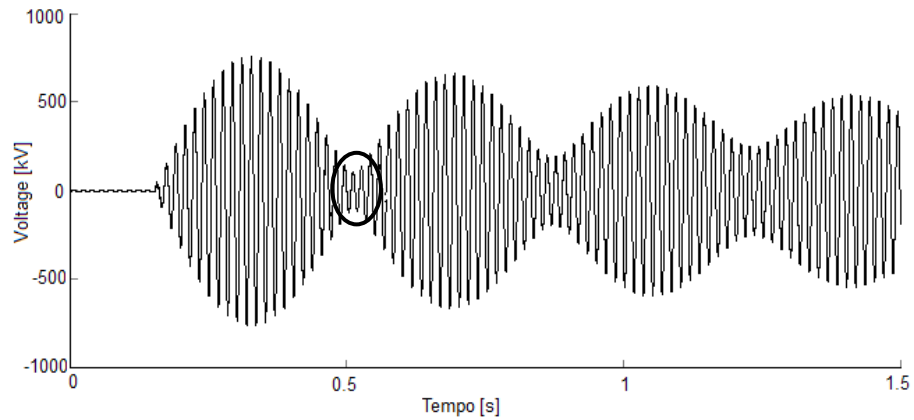
e substituindo as equações (2.5) e (2.6) na Equação (2.2), tem-se:

$$f_l = \frac{\omega}{2\pi} \sqrt{k} \quad (2.8)$$

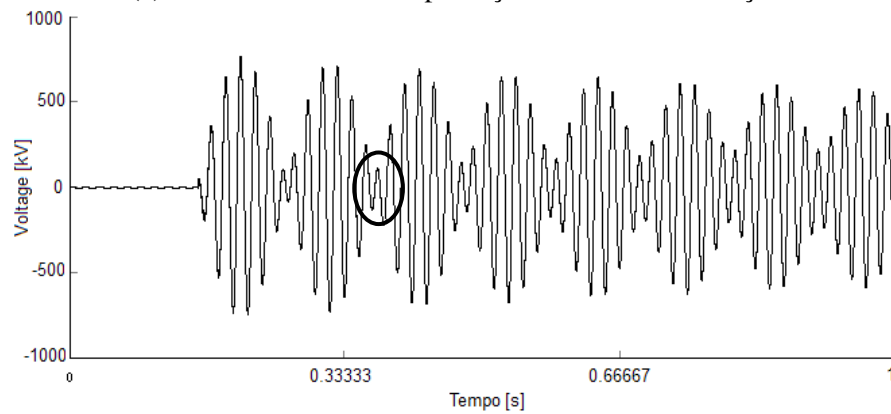
Para a frequência fundamental do sistema elétrico de 60 Hz, a Equação (2.8) fica:

$$f_l = f_{60} \sqrt{k} \quad (2.9)$$

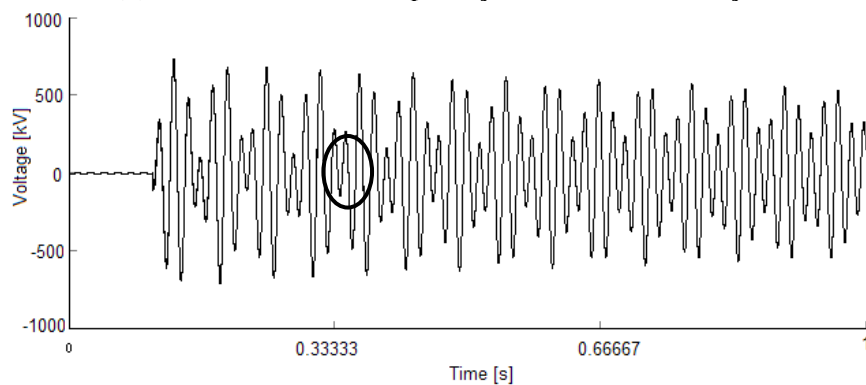
De (2.9) verifica-se que o período do batimento depende do grau da compensação da linha. Nas Figura 7 (a) - (c), são mostradas as formas da onda de tensão através dos polos do disjuntor para níveis de compensação alto (90 %), médio (70 %) e baixo (50 %), respectivamente.



(a) LT com 90 % de compensação reativa em derivação.



(b) LT com 70 % de compensação reativa em derivação.



(c) LT com 50 % de compensação reativa em derivação.

Figura 7. Formas de onda nos contatos do disjuntor para diferentes níveis de compensação.

2.4.4 Religamento tripolar em função do estado do sistema

O religamento tripolar de linhas de transmissão pode ocorrer para duas condições do sistema: quando a abertura dos contatos do disjuntor ocorre devido a uma falta ou defeito externo à linha ou quando a abertura ocorre após uma falta interna na linha de transmissão.

a) Religamento tripolar em condições de defeito externo

Neste caso a abertura dos contatos do disjuntor ocorre tendo as três fases sãs, ou seja, o defeito que ocasiona a abertura e religamento advém de condições externas à linha.

O religamento tripolar em condições de defeito externo é comum quando valores elevados de sobretensões de chaveamento podem ser erroneamente interpretados como falta por algum relé de proteção, resultando na saída da linha. Outro exemplo ocorre no caso de linhas de transmissão em circuito duplo quando os transitórios de chaveamento de uma das linhas podem se acoplar na outra linha, o que também podem conduzir a uma operação incorreta da proteção. Embora os dispositivos de proteção modernos sejam projetados para cuidar destas situações, o chaveamento controlado permite maior qualidade e confiabilidade do sistema devido ao incremento na disponibilidade da linha de transmissão. (CIGRE, 2004).

Esta condição também pode ser devida a uma rejeição de carga seguida do desligamento de linha ou durante a recomposição do sistema elétrico após o desligamento de uma grande área.

Neste caso específico de religamento tripolar, a sequência de eventos inclui a abertura automática do disjuntor e posterior religamento, após um intervalo de tempo predeterminado. Como mostra a Figura 8, a tensão através do disjuntor mostra um batimento definido, sendo a forma de onda semelhante para as três fases.

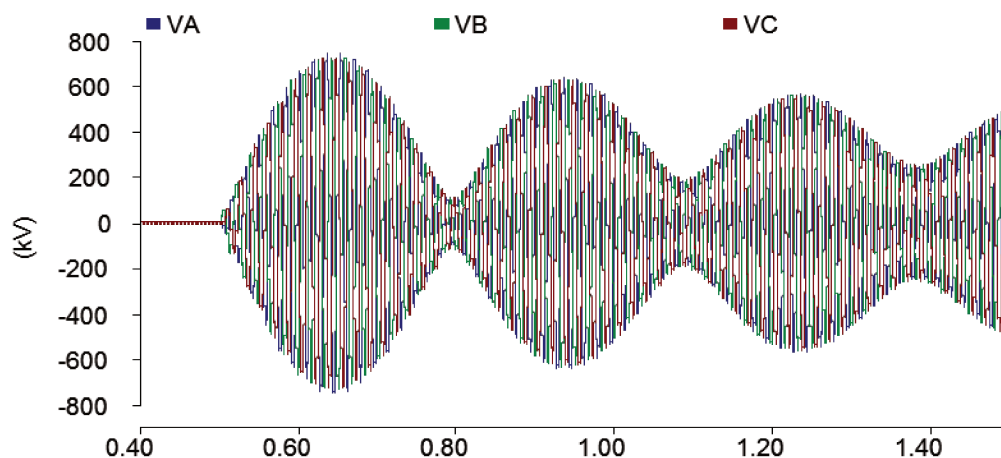


Figura 8. Forma de onda trifásica da tensão entre os contatos do disjuntor.

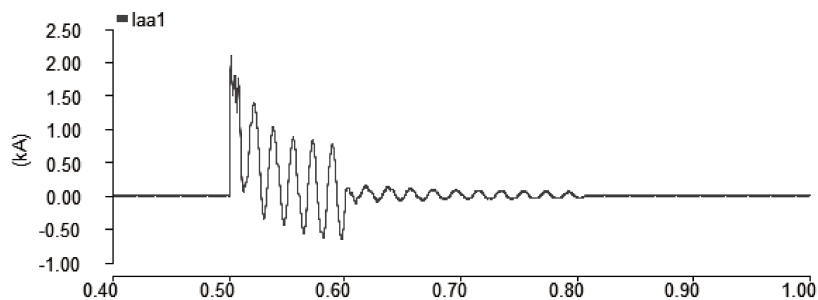
A perda da carga do trecho de linha em vazio produz um amortecimento na amplitude da tensão no decorrer do tempo, sendo a descarga função do fator de qualidade do reator. Como resultado a amplitude máxima do batimento entre os contatos do disjuntor tende a diminuir, mas a amplitude da região de mínimo do batimento aumenta com o tempo. Em função destas condições, a região ótima nas ondas de tensão entre os polos do disjuntor para religar o disjuntor corresponde ao primeiro intervalo de menor amplitude do batimento da tensão, Figura 7(a).

Para linhas pouco compensadas, o tempo morto para atuação da proteção deve ser levado em consideração. Assumindo um tempo morto de 12 ciclos da frequência fundamental para a atuação da proteção, a região ótima para religamento trifásico corresponde ao mínimo de segundo batimento na Figura 7 (b) e ao mínimo do quarto batimento na Figura 7(c).

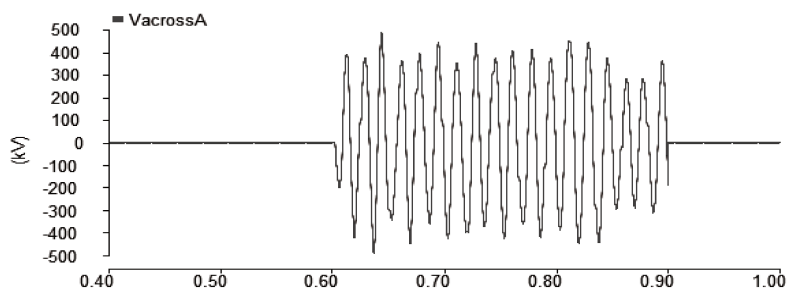
b) Religamento tripolar sob condições de falta interna

Quando a abertura de uma linha ocorre devido a uma falta na linha de transmissão, a sequência de eventos para o religamento tripolar inclui: a ocorrência da falta, abertura da linha nas três fases para isolar a seção sob falta, tempo de espera para extinção da falta e finalmente religamento da linha de transmissão.

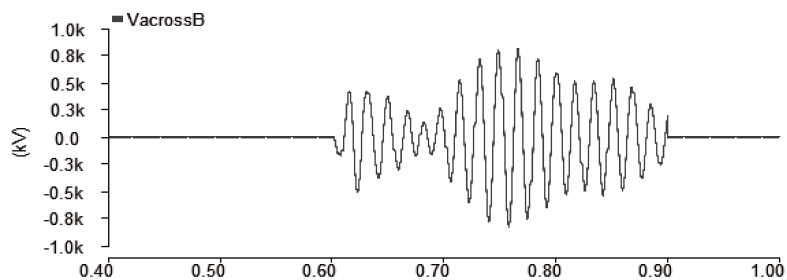
A Figura 9 (a) mostra a corrente de falta durante o religamento após falta interna de uma linha de transmissão com 90 % de compensação em derivação. Depois da abertura trifásica, a extinção de falta ocorre 200 ms após da ocorrência da falta. As Figura 9 (b) – (d) mostram as formas de onda de tensão através do disjuntor. A fase A (sob falta) influencia o sinal das outras duas fases sãs (fases B e C), portanto os sinais obtidos são muito complexos e o batimento esperado é distorcido. Os dados de linha são apresentados no Capítulo 3.



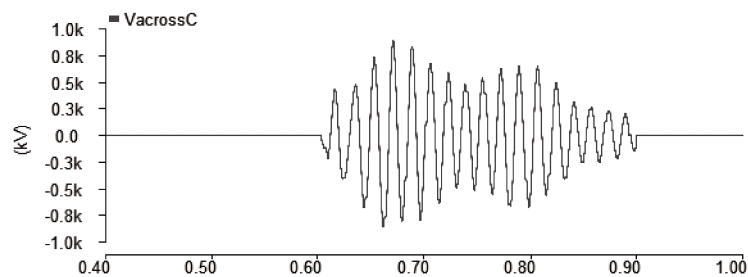
(a) Corrente de falta. Fase A sob falta.



(b) Tensão nos pólos do disjuntor. Fase A



(c) Tensão nos pólos do disjuntor. Fase B



(d) Tensão nos pólos do disjuntor. Fase C

Figura 9. Corrente de falta e forma de onda através do disjuntor. LT de 500 kV

2.5 Área de pesquisa

Baseado nos conceitos apresentados até agora é possível demarcar a área da presente pesquisa. Este trabalho está focado no desenvolvimento de um método de chaveamento controlado para reduzir sobretensões geradas durante a manobra de religamento tripolar rápido de linhas de transmissão com compensação reativa em derivação, sob condições de defeito externo à linha.

A Figura 10 e a Figura 11 mostram em forma resumida a demarcação do tema específico da pesquisa.

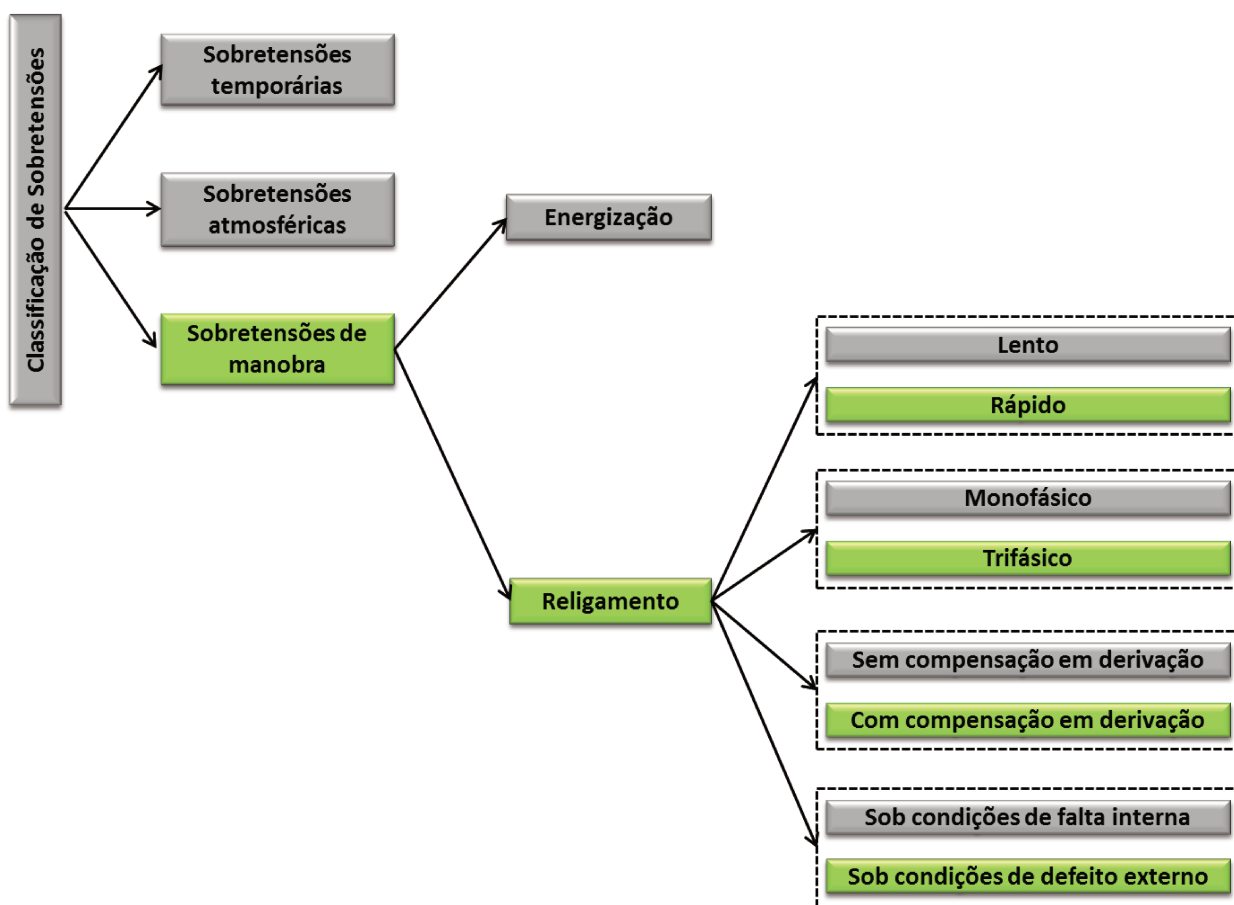


Figura 10. Demarcação da área de pesquisa



Figura 11. Métodos de controle de sobretensões

2.6 Tecnologias desenvolvidas

Para o caso específico em estudo, são apresentadas a seguir as tecnologias desenvolvidas no âmbito mundial e no Brasil. Todas as tecnologias tratam de métodos de religamento tripolar para linhas com compensação reativa em derivação sob condições de defeito externo à linha.

2.6.1 Cenário no Mundo

BLAHOUS (1988), mediante a publicação de uma patente nos EUA, apresenta um método genérico e um aparelho para executar o método que torna possível o religamento de linhas compensadas evitando níveis elevados de sobretensões de manobra. O método está baseado na detecção das polaridades das tensões do lado da fonte e do lado da linha e do cruzamento por zero. O instante de fechamento do disjuntor é determinado quando ambas as polaridades são idênticas.

Para melhor explicar o método, a Figura 12 mostra a tensão de linha (linha sólida) e a tensão da fonte (linha tracejada) de uma das fases. T_0 é o ponto de referência a partir do qual o instante para o religamento é determinado. O ponto T_0 é determinado mediante o cruzamento por zero da tensão de linha. T_L e T_S são os períodos previamente determinados mediante medições dos cruzamentos por zero da tensão de linha e da tensão da fonte. ΔT representa o tempo decorrido desde o primeiro cruzamento por zero da tensão de linha no instante T_0 até o cruzamento por zero da tensão do lado da fonte.

Para todos os instantes $T_n - T_0 = \Delta T + m T_S$, a tensão da fonte tem um meio período de polaridade idêntica à tensão de linha para o que se aplica a seguinte condição de religamento:

$$|nT_L - (\Delta T + mT_S)| \leq \frac{(T_L - T_S)}{2} \quad (2.10)$$

Onde $n, m = 1, 2, 3, \dots$

A razão para isto é que desde o instante T_0 a tensão de linha começa a oscilar com a mesma polaridade que a tensão da fonte no instante $T_0 + \Delta T$. Ambas as tensões tem a mesma polaridade depois de nT_L ou mT_S . Por esta razão têm a mesma polaridade no meio período imediatamente anterior ao cruzamento por zero no instante $T_0 + nT_L$ ou $T_0 + nT_L + \Delta T$ se $nT_L \geq mT_S + \Delta T$.

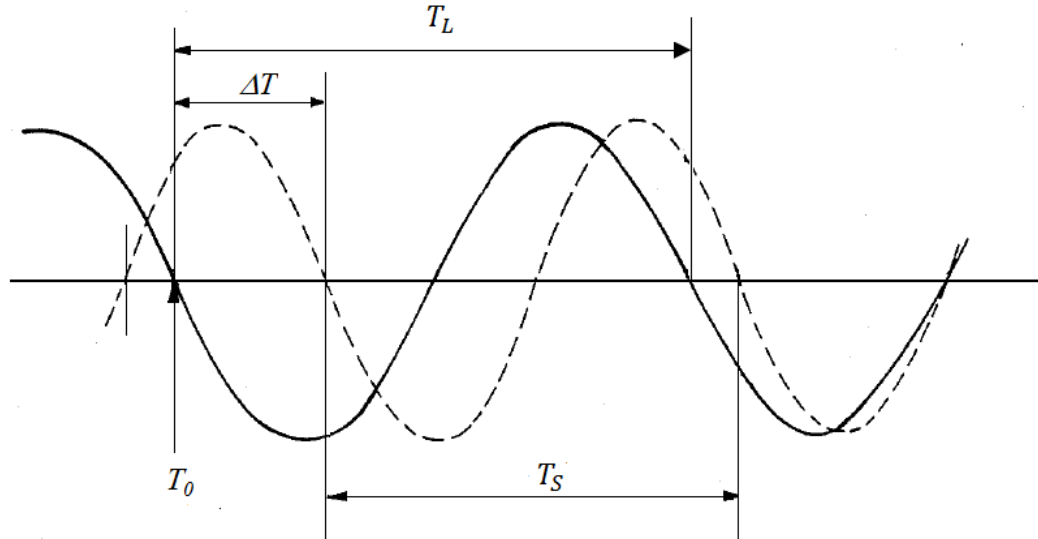


Figura 12. Tensão do lado da linha e tensão do lado da fonte de uma fase.
(Fonte: BLAHOUS, 1988)

Isto pode ser visto na Figura 13. Se $nT_L \leq \Delta T + mT_S$ e a condição de religamento é encontrada a tensão da fonte e a tensão da linha têm a mesma polaridade no meio período seguinte da tensão do lado da fonte $T_0 + \Delta T + mT_S$.

Portanto, a condição acima mencionada assegura que meio período de maior frequência da tensão (do lado da fonte) está totalmente contido no meio período da tensão de menor frequência (do lado da linha) da mesma polaridade, então o religamento pode ocorrer quando a tensão da linha e da fonte têm a mesma polaridade.

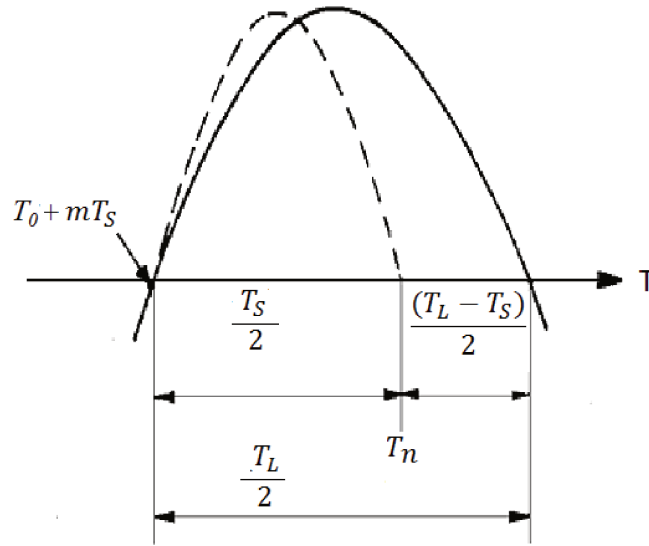


Figura 13. Instante em que a tensão da linha e a tensão da fonte têm a mesma polaridade.
(Fonte: BLAHOUS, 1988)

FROEHLICH et al. (1997) apresenta um dispositivo para chaveamento controlado de linhas de transmissão com compensação reativa em derivação. O algoritmo empregado trabalha mediante reconhecimento de padrões analisando as tensões do lado da fonte e do lado da linha separadamente, independente da forma de onda da tensão entre os contatos do disjuntor. A estratégia do algoritmo é atrasar o comando de fechamento de forma adequada para que o religamento dos contatos do disjuntor ocorra numa janela de tempo desejada. A Figura 14 ilustra a estratégia.

Depois da abertura da linha, até 300 ms estão disponíveis para que o dispositivo de controle analise as características do sinal de tensão entre os contatos do disjuntor e determine possíveis janelas para o fechamento. Cada disjuntor tem um tempo de fechamento determinado t_b , que é o intervalo de tempo entre o comando de fechamento e o contato real dos mesmos. Isto significa que após o dispositivo de controle emitir o comando de fechamento é preciso um tempo adicional t_b até os contatos realmente fecharem. Assim, o dispositivo de controle tem que prever o sinal um tempo t_b depois de determinar o instante de fechamento apropriado. Em outras palavras, uma previsão para o futuro tem que ser feita baseada no sinal de tensão disponível antes do comando de comutação seja dado. Esta tarefa só é possível se o sinal através do disjuntor for repetido periodicamente, pelo menos, duas a três vezes durante o tempo de aquisição de 300 ms ou menos após a linha ter sido aberta.

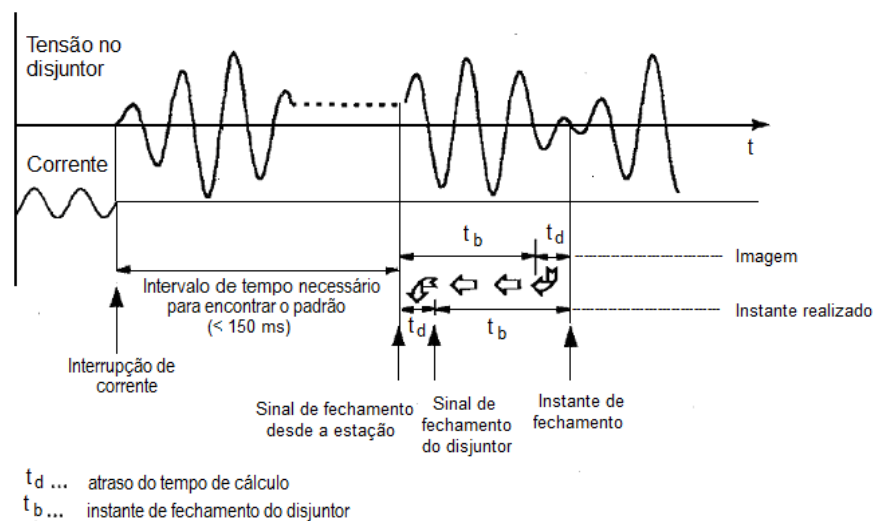


Figura 14. Tempo para o religamento controlado (Fonte: FROEHLICH et al., 1997)

O sinal a ser sincronizado é verificado em tempo real durante um intervalo de tempo ajustável ΔT (que normalmente é em torno de um período de frequência industrial), proporcionando um primeiro conjunto de dados. Este conjunto de dados é armazenado e um novo conjunto de dados é adquirido da mesma maneira. Ambos os conjuntos são então comparados entre si. Se os dois conjuntos de dados não são iguais, um terceiro conjunto de dados é adquirido e assim por diante.

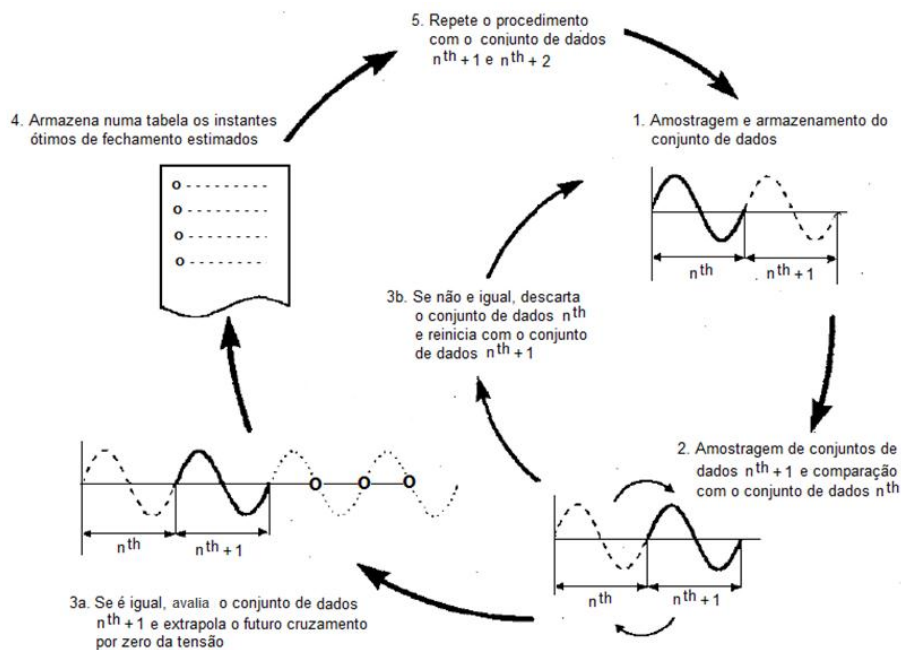


Figura 15. Princípio de reconhecimento de padrões e previsão dos instantes ótimos de religamento. (Fonte: FROEHLICH et al., 1997)

Assim que a equivalência é encontrada entre dois conjuntos de dados, a periodicidade do sinal é concluída. As diferenças de frequência e tempo entre os cruzamentos por zero da tensão são avaliados a partir do último conjunto de dados. A Figura 15 ilustra o procedimento.

Desde o cruzamento por zero do sinal, a forma de onda do sinal está prevista para aproximadamente 100 ms em diante (a frente do instante atual). Este procedimento é repetido continuamente enquanto o disjuntor está em uma posição à espera de ser fechado. Em outras palavras, a qualquer momento o algoritmo fornece um número de instantes ótimos de fechamento previstos. Quando um comando de fechamento chega ao dispositivo de controle da subestação, este será transferido ao disjuntor com um intervalo de tempo de atraso calculado de tal forma que o próximo instante ótimo de fechamento disponível seja o alvo.

O algoritmo foi validado com testes em analisadores de redes e também com simulações digitais via EMTP. Além disto, testes em campo com a instalação do dispositivo em uma linha de 500 kV do sistema da British Columbia Hydro and Power Authority (BC Hydro) comprovaram a eficiência do método em reduzir as sobretensões de manobras sem a utilização de resistores de pré-inserção.

PILZ et al. (2004) apresenta dois algoritmos para religamento de linhas de transmissão com compensação reativa em derivação. Os algoritmos utilizam métodos de tratamento de sinais para estimar a forma da onda de tensão através do disjuntor. Baseado nesta forma de onda os instantes de chaveamento são estimados para instantes futuros.

A Figura 16 ilustra o primeiro algoritmo que se baseia no reconhecimento de padrões. Este método analisa o envelope da curva do sinal de tensão entre os contatos do disjuntor. Para realizar a estimativa da tensão em instantes futuros, o algoritmo deve trabalhar mediante um laço de repetição. Este laço é dividido em janelas de tempo individuais.

A tensão nos contatos do disjuntor é verificada na primeira janela. O envelope da tensão é calculado e da mesma forma é verificado na segunda janela. O cálculo dos envelopes para a segunda verificação, a variação com o primeiro envelope no comprimento da janela e a comparação dos dois envelopes realizam-se na terceira janela.

A tensão nos contatos do disjuntor é verificada outra vez. Se uma correspondência entre os envelopes da primeira e da segunda janela é detectada, o instante de chaveamento controlado pode ser determinado. O envelope da segunda janela de dados é defasado em dois

comprimentos de janela para este fim, sendo um ponto da tensão definido como instante de chaveamento.

Se não for detectada a correspondência entre os dois envelopes, o envelope da primeira janela será descartado e o envelope da segunda janela é usado como amostra de referência. Esta amostra de referência deve ser comparada com o envelope da terceira janela. Quando se obtém um resultado válido, a operação de fechamento controlado ou a finalização do tempo definido interrompe este ciclo.

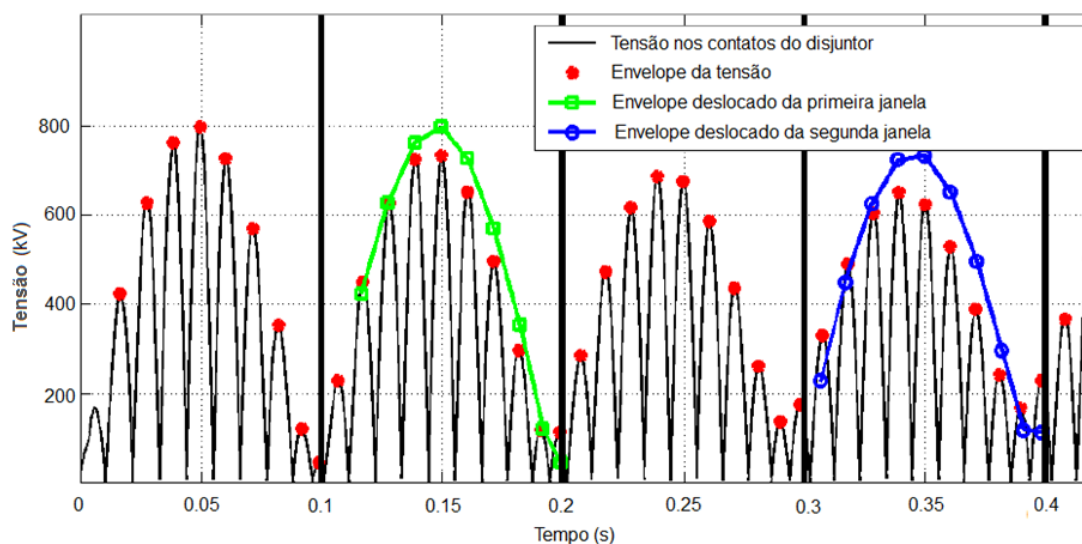


Figura 16. Estimativa da tensão em instantes futuros com reconhecimento de padrões.

(Fonte: PILZ et al. 2004)

A Figura 17 ilustra o segundo algoritmo baseado no Método de Prony. O método compõe o sinal de tensão mediante uma soma de funções sinusoidais, exponenciais e amortecidas. Os parâmetros destas funções são a amplitude, o fator de amortecimento, a frequência e a defasagem.

A estimativa de sinais de tensões futuras através do Método de Prony funciona também em sequência com os dados de janelas com comprimento constantes. As amostras de dados da primeira janela são os pontos de partida do cálculo. Na segunda janela são realizados paralelamente a estimativa dos parâmetros para a primeira janela e a amostragem de dados, sendo preciso analisar a qualidade dos parâmetros calculados.

Existem duas possibilidades para a análise da precisão dos parâmetros estimados. No primeiro método a forma do sinal da primeira janela é recalculada com base nos parâmetros estimados do sinal. Mediante uma comparação entre a medida e o sinal recalculado a

qualidade da estimativa pode ser avaliada. No segundo método os parâmetros estimados são usados para recalcular e comparar o sinal da segunda janela. Esta comparação pode acontecer na terceira janela. Em oposição ao primeiro método, a saída de instantes de chaveamento só poderia ser obtida para a quarta janela.

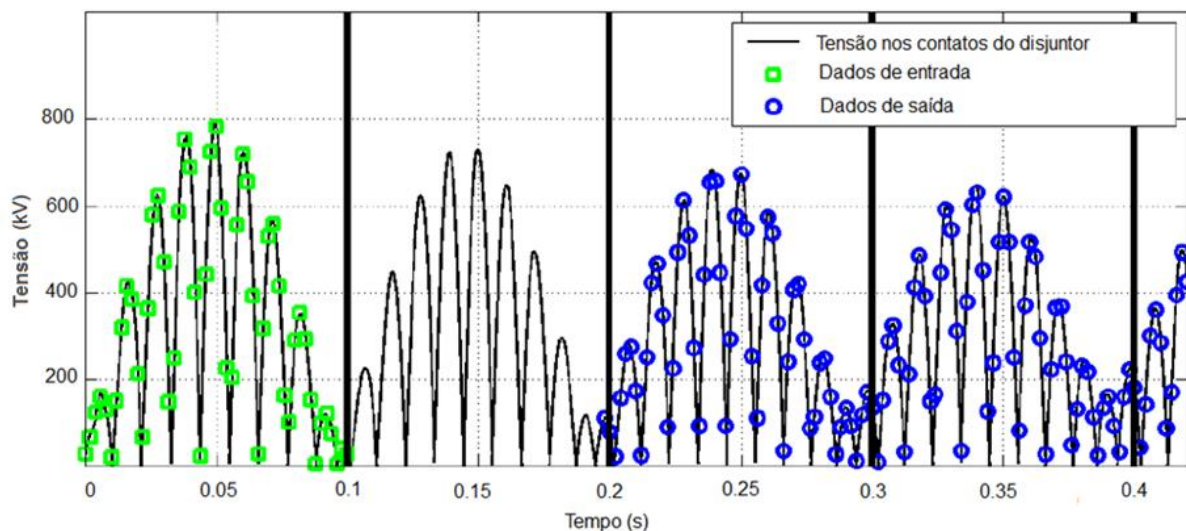


Figura 17. Estimativa da tensão em instantes futuros com o método de Prony. (Fonte: PILZ et al. 2004)

A invenção decorrente do trabalho apresentado em 2004 foi patenteado por PILZ G. et al. (2008) sendo objeto da patente o método de Prony para estimar tensões em instantes futuros com a finalidade de determinar o instante ótimo para o religamento.

ITO H. (2007) reporta a situação atual e as tendências futuras do sistema de chaveamento controlado aplicado a banco de capacitores, reatores, transformadores e linhas de transmissão. Com relação ao religamento de linhas de transmissão com compensação reativa em derivação, o autor cita a metodologia utilizada por FROEHLICH et al. (1997).

GOLDSWORTHY D. et al. (2008) apresenta um tutorial sobre chaveamento controlado para disjuntores de EAT, descreve a teoria e a tecnologia que está em uso hoje além das experiências de aplicação da Bonneville Power Administration (BPA). O artigo discute também os benefícios do chaveamento controlado e as aplicações em capacitores, reatores, transformadores e linhas de transmissão utilizando modernos relés de proteção e dispositivos de controle. Na parte do artigo referente a linhas de transmissão com compensação reativa em derivação, o autor cita que é preciso uma lógica sofisticada e que a BPA ainda não aplicou um controlador para religamento rápido tendo nos planos para o futuro incorporar uma lógica específica para o caso.

2.5.2 Cenário no Brasil

CARVALHO et al. (1995) avaliaram a redução de sobretensões de manobra em LTs utilizando pára-raios nos seus terminais em conjunto com técnicas de chaveamento controlado. Para tanto, energizações e religamentos de linhas de 550 kV com diferentes comprimentos e diferentes graus de compensação em derivação foram analisadas através de simulações digitais via ATP. Além disto, o tempo de operação do disjuntor e a precisão na estimação do instante ótimo para o chaveamento foram representados por distribuições estatísticas. Verificou-se que a utilização de pára-raios juntamente com chaveamento controlado pode eliminar a necessidade de resistores de pré-inserção em disjuntores de EAT, limitando as sobretensões a valores inferiores a 1,7 p.u.

DANTAS K.M.C. et al. (2007, 2008) apresenta um método para chaveamento controlado de linhas de transmissão. O método consiste no aprimoramento de técnicas já existentes e é implementado diretamente em um programa do tipo EMTP. O método é baseado em um algoritmo de detecção de passagem por zero e consiste em estimar o sinal de referência em instantes futuros de forma que uma lista de possíveis instantes ótimos para cada fase seja prevista assim que o comando para a operação do disjuntor ocorra.

Inicialmente, os sinais do lado da linha e do lado da fonte são obtidos e estimados, e a amplitude de cada sinal é determinada detectando-se o valor de pico entre dois zeros consecutivos. Assim, no instante em que ocorre o comando para o chaveamento do disjuntor, tomando como referência os últimos valores determinados para os períodos, amplitudes e passagens por zero dos sinais do lado da linha e do lado da fonte, estes sinais são estimados em instantes futuros e postos em conjunto para que possíveis instantes ótimos referentes aos instantes de mínimo dos sinais de tensão entre os contatos do disjuntor sejam determinados.

No entanto, os instantes ótimos a serem considerados não são aqueles que ocorrem apenas na passagem por zero dos sinais de referência, mas sim aqueles que ocorrem na passagem por zero e no período de menor pulsação destes sinais. Para se determinar estes instantes, verifica-se que para cada fase eles ocorrem quando os sinais do lado da linha e do lado da fonte são iguais, ou seja, têm o mesmo valor instantâneo e, além disto, também possuem derivada com o mesmo sinal. Na Figura 18 é ilustrada tal situação, onde o instante ótimo é indicado por uma seta.

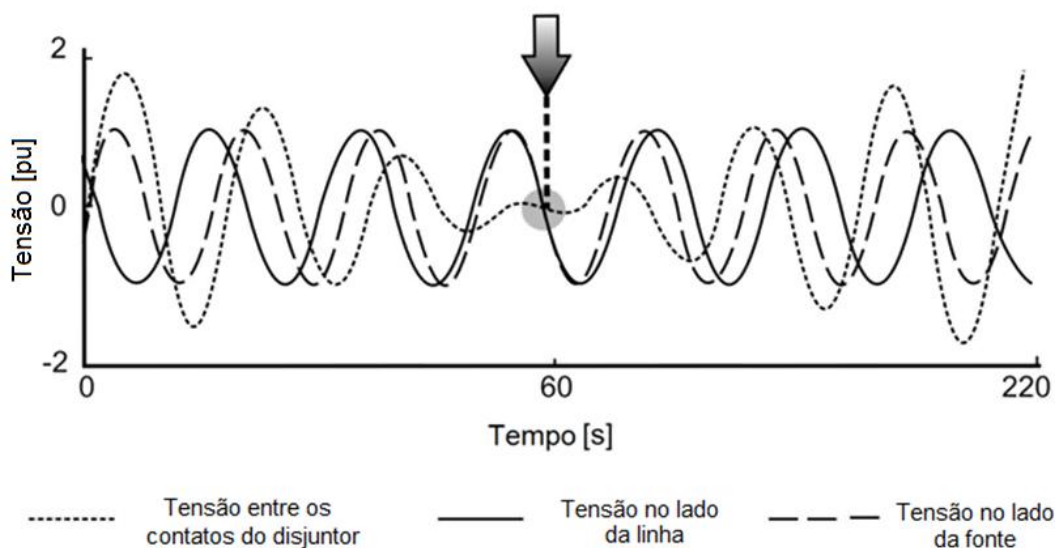


Figura 18. Determinação do instante ótimo para LTs com compensação.
(Fonte: DANTAS K.M.C. et al., 2007)

Para representar os sinais do lado da linha e do lado da fonte entre cada dois instantes futuros estimados é realizada uma interpolação linear, ou seja, estes sinais são aproximados por segmentos de reta. Em seguida estes segmentos são postos em conjunto, de forma a verificar se eles interceptam-se no intervalo definido por dois instantes futuros. Caso os segmentos não se interceptem, pode-se concluir que não há nenhuma passagem por zero do sinal de referência naquele intervalo. Caso os segmentos se interceptem, determina-se a inclinação (derivada) dos segmentos de reta para cada sinal.

Finalmente, caso as inclinações tenham o mesmo sentido, ou seja, o valor da derivada tenha o mesmo sinal (positivo ou negativo), o instante onde estes segmentos de reta se interceptam é definido como um instante ótimo que ocorre no período de menor pulsação do sinal de referência.

Caso os valores das derivadas dos segmentos tenham sinais opostos, conclui-se que apesar de haver um instante onde o sinal de referência é zero, este instante não se situa no período de menor pulsação do sinal e consequentemente não se configura como um instante ótimo.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo descrevem-se os materiais e métodos utilizados nesta tese. Inclui-se no capítulo o sistema elétrico analisado, o programa de transitórios eletromagnéticos (PSCAD/EMTDC) e o simulador digital em tempo real (RTDS) utilizados na pesquisa. Como parte da metodologia são descritos o algoritmo do método proposto e a implementação do algoritmo em hardware (controlador) para ser testado no RTDS.

3.1 Materiais

3.1.1 Sistema elétrico analisado

Nesta seção apresenta-se uma descrição do sistema elétrico utilizado como base para estudar os fenômenos envolvidos com a abertura e religamento tripolar, bem como desenvolve-se o algoritmo responsável pelo controle da proteção adaptativa, com referência à manobra de religamento tripolar.

Para o estudo utilizou-se como base um sistema elétrico real de 500 kV de 1052 km mostrado na Figura 19. As manobras foram realizadas no último trecho da linha que corresponde a um comprimento de 252 km, no sentido da Barra B4 → Barra B5 e no segundo trecho da linha que apresenta um comprimento de 320 km, no sentido da Barra B2 → Barra B3.

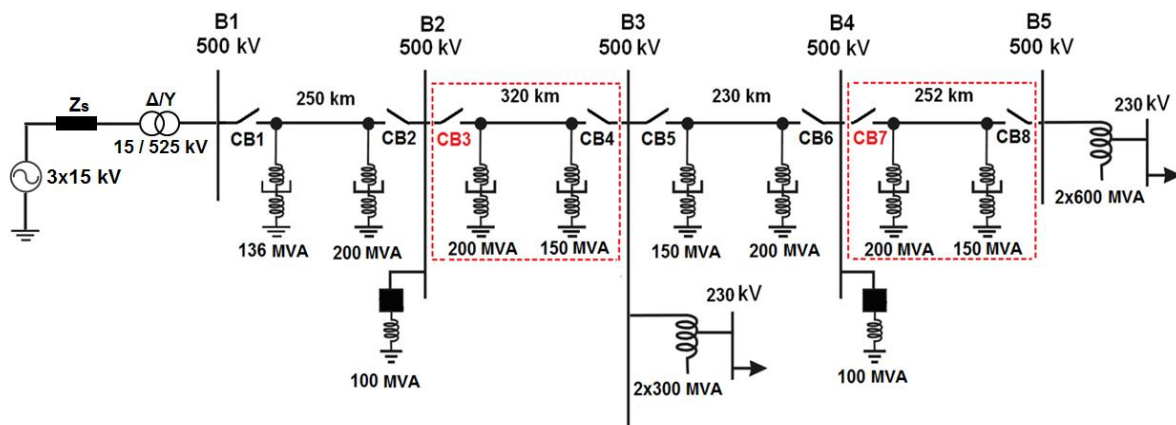


Figura 19. Esquema básico do sistema elétrico em estudo

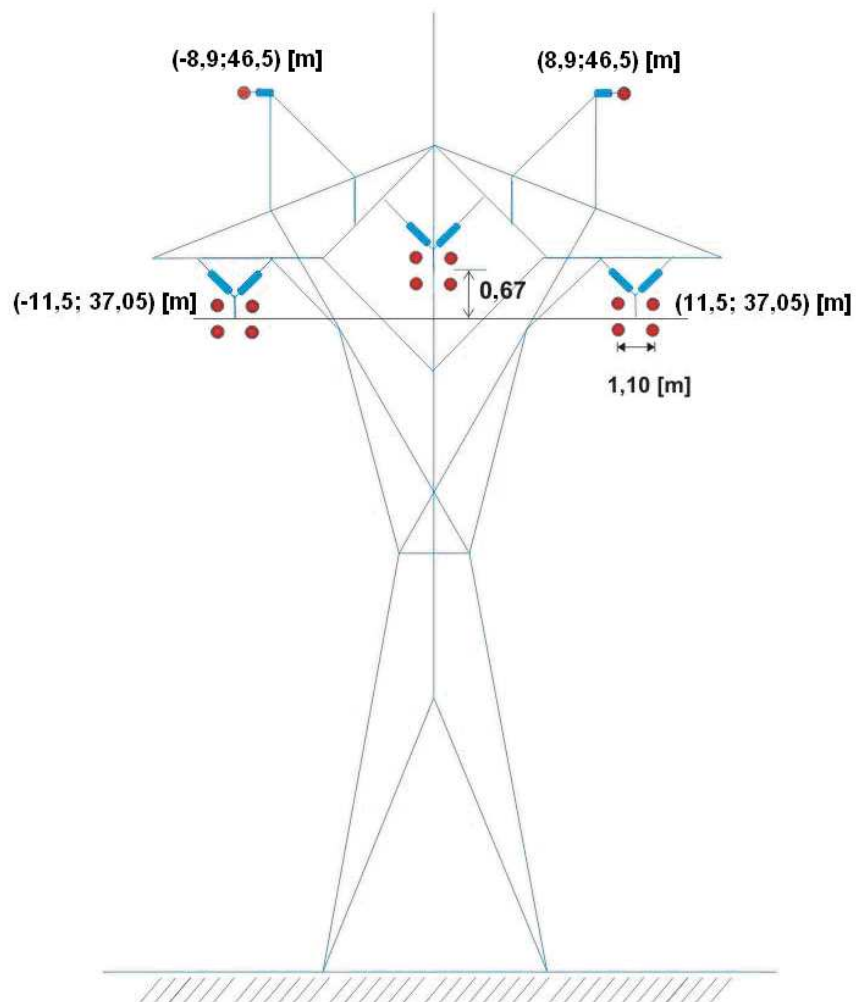


Figura 20. Esquema da torre da linha de transmissão de 500 kV

a) Linha de Transmissão

As estruturas de suporte da linha de transmissão em análise são constituídas por torres de 500 kV que possuem quatro cabos condutores compondo o feixe de cada uma das três fases e dos cabos para-raios.

Os condutores das fases estão situados nos vértices de um quadrado de 1,1 m, sendo que os condutores inferiores dos feixes das fases externas estão situados a 36,50 m do solo, e os condutores inferiores do feixe da fase central estão situados a 37,17 m do solo. A distância horizontal entre o centro da fase central e o centro de quaisquer fases laterais é de 11,50 m. Os cabos para-raios estão localizados a 46,50 m do solo e a distância horizontal entre o centro da fase central e cada cabo para-raios é 8,90 m. Esta descrição pode ser observada na Figura 20 (sem escala), que mostra a distribuição geométrica dos cabos da linha de transmissão de 500 kV do sistema em estudo.

Apresentam-se no que segue as especificações referentes aos condutores, denotando-se as suas principais características, bem como a resistividade do solo considerada.

Condutor de fase:

- a) Cabo CAA-RAIL
- b) Diâmetro externo do condutor: 29,59 mm.
- c) Diâmetro interno do condutor: 7,4 mm
- d) Resistência em CC a 25°C: 0,06114 Ω /km

Cabos Pára-raios:

- a) Cabo de aço galvanizado 3/8" EHS
- b) Diâmetro externo do condutor: 9,144 mm.
- c) Resistência em CC a 25° C : 3,51 Ω /km

Resistividade do solo:

$$\rho : 4000 \Omega.m$$

Flecha a meio vão:

Fase: 26,11 m. (60° C)

Pára-raios: 22,42 m (40° C)

Os parâmetros da linha foram calculados para a frequência fundamental (60 Hz) e são apresentados na Tabela 1. A linha foi suposta idealmente transposta e os parâmetros

longitudinais foram modelados com representação da dependência com a frequência utilizando o modelo no domínio das fases. É importante usar uma modelagem que represente a dependência com a frequência dos parâmetros longitudinais da linha, uma vez que se pretende observar a resposta transitória das tensões nos extremos da fase aberta.

Tabela 1. Parâmetros elétricos de linha calculados para frequência de 60 Hz

Componentes	Longitudinal (Ω/km)	Transversal ($\mu\text{S}/\text{km}$)
Não homopolar	$0,01603+j\ 0,2730$	$j\ 6,123$
Homopolar	$0,3482+j\ 4,42$	$j\ 3,524$

b) Geradores

O sistema de geração é formado por três unidades geradoras síncronas as quais são capazes de produzir em seus terminais uma tensão senoidal balanceada de 15 kV. Os principais parâmetros dos geradores são apresentados na Tabela 2 e os dados utilizados para modelar os geradores são destacados na tabela.

Tabela 2. Resumo dos parâmetros básicos dos geradores na Barra 1 (B1)

Nº Unidades	3
Potência aparente [MVA]	472,5
Potência ativa máxima [MW]	431
Potência ativa mínima [MW]	108
Potência reativa gerada [MVA_R]	190
Potência reativa absorvida [MVA_R]	-190
X_t % (base 100 MVA)	2,507
X_d % (base maq)	93,4
X_q %	61,1
X'_d %	29
X''_d %	27,2
U nominal [kV]	15
X''_d [Ω]	0,12952
X_q [Ω]	0,29095
T''_{d0} [s]	0,091
T''_{q0} [s]	0,205
R equivalente [Ω]	0,00377

c) Transformadores

Para elevar o nível de tensão gerada de forma a viabilizar a transmissão de energia elétrica, utilizaram-se dados reais do transformador elevador Δ/Y com neutro aterrado de tensões nominais 15 kV/525 kV presente na subestação da Barra B1. Este transformador eleva a tensão de geração, suprindo os barramentos da linha de transmissão. A Tabela 3 apresenta a curva de saturação medida para o lado de 525 kV e na Tabela 4 os dados principais do transformador são apresentados.

Tabela 3. Curva de saturação do transformador elevador da Barra 1 (B1).

Corrente [A]	Fluxo [V.s]
3,09	1171,1
12,29	1262,1
27,47	1387,2
55,84	1535,0
96,36	1569,1
153,07	1591,8
664,59	1762,4

Tabela 4. Dados do transformador elevador da Barra 1 (B1)

Reatância de dispersão do primário (500 kV)	31,338 Ω
Reatância de dispersão do secundário (15 kV)	0,0846 Ω
Resistência do enrolamento primário (500 kV)	0,795 Ω
Resistência do enrolamento secundário (15 kV)	0,003 Ω
Potência nominal [MVA]	472,5

A Barra 3 (B3) possui dois auto-transformadores (500/230/13,8) Yaterrado/Yaterrado/ Δ (2x300 MVA). Na Tabela 5 é apresentada a curva de saturação medida do lado de 500 kV e na Tabela 6 encontram-se os principais dados do transformador.

Tabela 5. Curva de saturação do transformador da barra 3 (B3)

Corrente [A]	Fluxo [V.s]
0,559883169	795,940770
0,671578988	909,646594
1,087363710	1023,352420
2,109293600	1137,058240
5,409300650	1250,764070
10,057259800	1296,246400
24,009779500	1387,211060
133,622053000	1478,175720

Tabela 6. Dados do auto-transformador da Barra 3 (B3)

Reatância de dispersão do primário (500 kV)	58,84 Ω
Reatância de dispersão do secundário (230 kV)	1,262 Ω
Reatância de dispersão do terciário (13,8 kV)	0,3683 Ω
Fator de qualidade dos enrolamentos 1 e 2	100
Fator de qualidade do enrolamento 3	10

A Barra 5 (B5) possui dois auto-transformadores (500/230/13,8) Yaterrado/Yaterrado/ Δ (2x600 MVA). Na Tabela 7 se apresenta a curva de saturação medida do lado de 500 kV e seus dados principais se apresentam na Tabela 8.

Tabela 7. Curva de saturação do transformador da Barra 5 (B5)

Corrente [A]	Fluxo [V.s]
0,279941585	682,234946
0,373255446	909,646594
0,737111702	1023,352420
1,860672800	1137,058240
4,613173220	1250,764070
8,598664610	1364,469890
16,282029700	1478,175720
29,118988100	1591,881540

Tabela 8. Dados do auto-transformador da Barra 5 (B5)

Reatância de dispersão do primário (500 kV)	32,156 Ω
Reatância de dispersão do secundário (230 kV)	0,01 Ω
Reatância de dispersão do terciário (13,8 kV)	0,62845 Ω
Fator de qualidade dos enrolamentos 1 e 2	100
Fator de qualidade do enrolamento 3	10

d) Reatores.

Os reatores são instalados em um sistema com a função de compensar a potência reativa da linha, evitando elevações de tensão ao longo da mesma devido às capacitâncias em derivação. Este fenômeno é conhecido como efeito Ferranti.

O sistema em estudo possui reatores de linha e reatores de barra. Os modelos utilizados para os reatores de linha e de barra são mostrados na Figura 21 e na Figura 22 respectivamente.

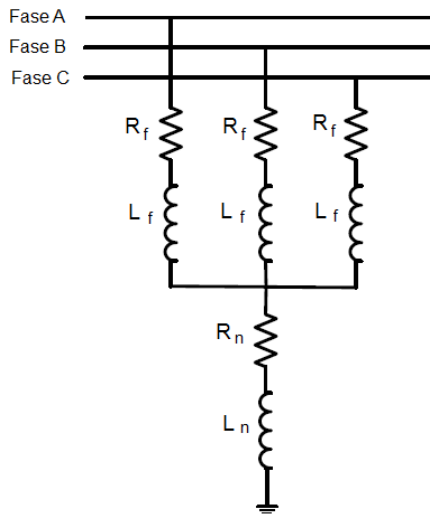


Figura 21. Modelo para reator de linha.

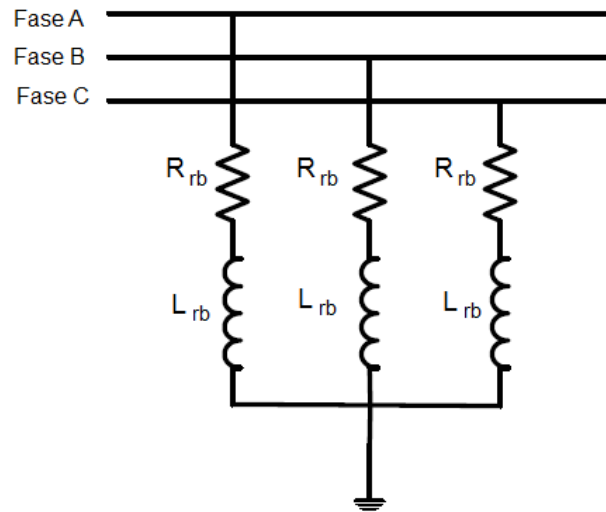


Figura 22. Modelo para reator de barra.

Adotaram-se fatores de qualidade de 400 para reatores de fase e 40 para reatores de neutro. Assim, as resistências dos reatores de fase e de neutro foram determinadas pela equação (3.1):

$$Q = \frac{X}{R}, \quad (3.1)$$

Onde X é a reatância em ohms em 60 Hz, R e a resistência em ohms e Q e o fator de qualidade.

A Tabela 9 apresenta um resumo dos parâmetros básicos dos reatores de linha e barra a frequência industrial para a linha de transmissão com 90 % e 70 % de compensação.

Tabela 9. Parâmetros básicos dos reatores de linha e barra.

Tipo de Equipamento	Reator	Compensação Reativa de 90 % Potência [MVA _R]	Compensação Reativa de 70 % Potência [MVA _R]	Fator de Qualidade	Relação Xh/Xd
Reatores de Fase	R1	136	134	400	1,5
	R2	200	134	400	1,5
	R3	200	118	400	1,5
	R4	150	118	400	1,5
	R5	150	123	400	1,5
	R6	200	123	400	1,5
	R7	200	134	400	1,5
	R8	150	134	400	1,5
Reatores de Barra	R9	100	100	400	1,5
	R10	100	100	400	1,5

e) Pára-raios

A Tabela 10 apresenta os dados da característica V x I dos pára-raios utilizados. Estes dados foram obtidos das curvas características de tensão residual máxima para impulso de manobra (30/60 µs) com referência na frente de onda 8/20 µs e corrente de descarga 10 kA. Utilizou-se como valor de “tensão residual base”: 937 kV para o para-raios de tensão nominal 420 kV (Tabela 11).

Tabela 10. Curva dos pára-raios.

Corrente [kA]	Tensão [kV]
0,00001	651,984
0,01	693,600
0,05	731,136
0,1	748,272
0,2	762,144
0,4	780,504
0,7	794,784
1	806,616
2	829,872
5	873,120

Tabela 11. Resumo de dados técnicos de pára-raios ZnO. (Fonte: ABB, 2005)

Grandeza	
Tensão máxima da rede (U_m)	550 kV
Tensão nominal (U_r)	420 kV
Corrente nominal de descarga	20 kA
Classe de descarga de energia	5
Capacidade de absorção de energia kJ / kV de U_r	15,4
Tensão residual máxima de descarga - onda de corrente de 8/20 μ s, 10 kA	924 kV

3.1.2 PSCAD/EMTDC

O aplicativo Power System Computer Aided Design (PSCAD/EMTDC) é utilizado para implementar e avaliar o procedimento desenvolvido. PSCAD é a interface gráfica do usuário enquanto que o EMTDC (Electromagnetic Transients incluindo DC) é um programa que permite representar redes monofásicas ou polifásicas com qualquer topologia, as quais são traduzidas como um conjunto de equações diferenciais e algébricas resolvidas em intervalos de tempo discretos.

A linguagem Continuous System Model Functions (CSMF) do programa PSCAD/EMTDC é utilizada na implementação das rotinas para o chaveamento controlado, as quais proporcionam uma interação dinâmica em tempo de execução, permitindo a simulação de dispositivos de controle tal como requerido para o desenvolvimento deste trabalho.

A rotina CSMF permite uma maior flexibilidade nas simulações, de modo que o estado do sistema pode ser modificado dinamicamente durante a simulação a partir de programas (ou modelos) implementados nestas rotinas.

3.1.3 RTDS

A evolução da tecnologia digital permitiu que fosse desenvolvido um novo tipo de implementação da modelagem do sistema elétrico, a qual se tornou referência e ainda hoje constitui o estado da arte em simulação digital em tempo real. Neste ambiente de teste todo o sistema é representado (modelado) digitalmente e somente os sinais necessários à interface com os equipamentos sob teste são convertidos do formato digital para analógico e de analógico para digital. Isto somente é possível através de um projeto em conjunto de hardware e software operando em paralelo, devido à grande demanda por processamento exigida por esta configuração. As grandes vantagens deste tipo de configuração são a versatilidade, uma vez que uma infinidade de sistemas com diferentes topologias podem ser representados, armazenadas e facilmente alterados, a baixa quantidade de conexões físicas e a possibilidade de automação de execução dos testes em malha fechada.

O Simulador Digital em Tempo Real (RTDS) é um exemplo de equipamento que utiliza esta tecnologia. O RTDS é um computador projetado para estudar fenômenos transitórios eletromagnéticos em tempo real. O RTDS é uma combinação de hardware e software constituída para alcançar o tempo real em uma simulação.

O hardware está baseado num Processador Digital de Sinais (DSP) e num Computador com um Conjunto Reduzido de Instruções (RISC) que utiliza técnicas avançadas de processamento paralelo, com a finalidade de conseguir as velocidades computacionais requeridas para manter uma operação contínua em tempo real.

O software do RTDS inclui modelos matemáticos dos componentes do sistema de potência requeridos para representar muitos dos elementos complexos que formam um sistema de potência real. A técnica global de solução da rede empregada no RTDS está baseada na

análise nodal. A solução fundamental dos algoritmos foi introduzida no clássico artigo de DOMMEL H.W., (1969). A solução do algoritmo de Dommel é usada em praticamente todos os programas de simulação digital para o estudo de transitórios eletromagnéticos.

O software do RTDS inclui também uma interface gráfica com o usuário (GUI) denominada RSCAD, mediante a qual o usuário é capaz de construir, rodar e analisar casos de simulações.

No anexo 1 é apresentada informação mais detalhada da simulação digital em tempo real, dando ênfase ao RTDS.

3.2 Método de controle proposto

Como já foi demarcado no Capítulo 2, este trabalho está focado em desenvolver um método de controle de sobretensões na manobra de religamento tripolar de linhas de transmissão compensadas. Para melhor entender os elementos envolvidos neste tipo de manobra, a Figura 23 mostra o diagrama de um circuito básico para uma linha trifásica com compensação em derivação, que é aberta por um disjuntor e possui um dispositivo para o religamento de acordo com a o método desenvolvido.

L_1 , L_2 e L_3 são as três faes da linha de transmissão (LT) que é aberta nos dois terminais. Os elementos R_1 , R_2 e R_3 são reatores em derivação. No terminal líder a linha de transmissão é conectada mediante um disjuntor DJ a um gerador trifásico F.

Os transformadores de potencial (TPs) M_{F1} , M_{F2} , M_{F3} e M_{L1} , M_{L2} , M_{L3} fornecem os sinais E_{F1} , E_{F2} e E_{F3} que são proporcionais à tensão de alimentação do lado da fonte entregue por cada fase da fonte de tensão F e os sinais E_{L1} , E_{L2} e E_{L3} que são proporcionais às tensões da linha L_1 , L_2 e L_3 .

Os sinais E_{F1} e E_{L1} entregues pelos transformadores de potencial (TPs) M_{F1} e M_{L1} alimentam o controlador C que gera um comando de saída ativando um elemento excitador B do contato do disjuntor DJ1 fechando-o num instante apropriado. Os contatos dos disjuntores DJ2 e DJ3 são fechados no mesmo instante que os contatos DJ1.

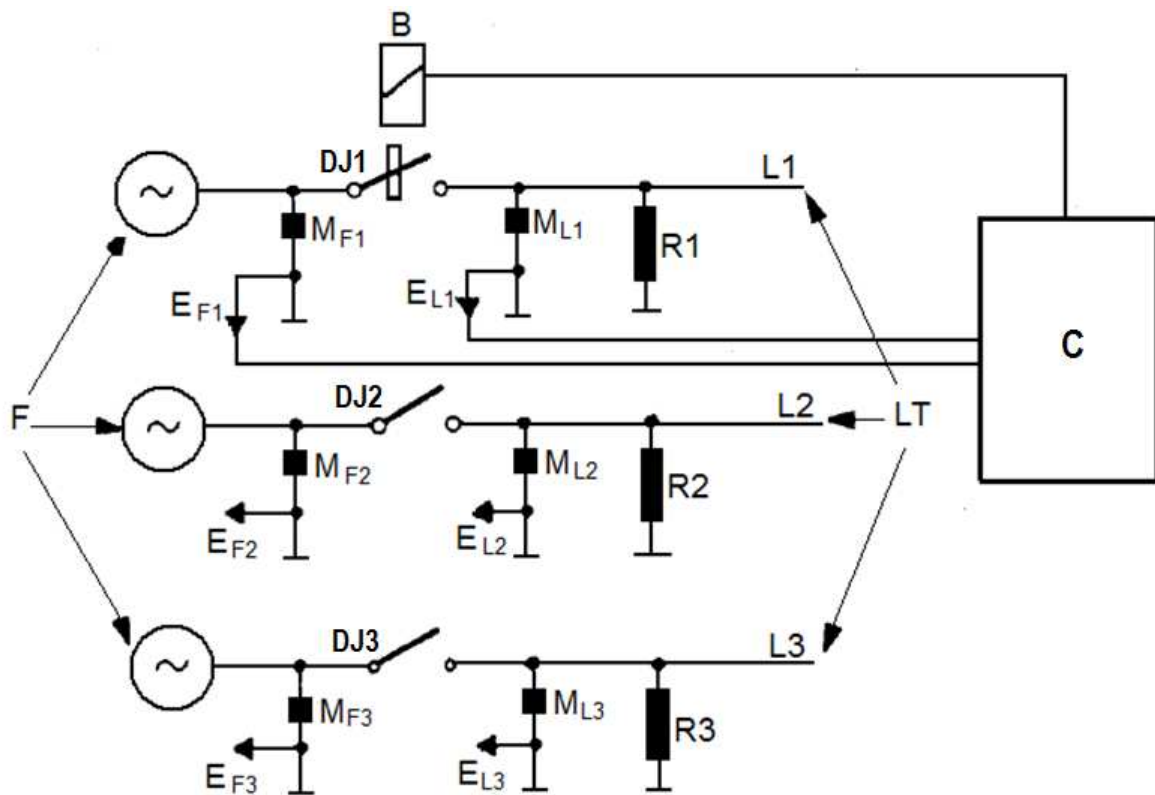


Figura 23. Diagrama tripolar do circuito básico de uma linha trifásica com compensação em derivação

3.2.1 Algoritmo principal de controle

Nesta seção é descrito o algoritmo desenvolvido para a implementação do controlador referido na seção anterior. Para isto, mediante a Figura 24 são definidas as principais grandezas envolvidas no algoritmo, as quais são listadas a seguir:

V_{brk} : Tensão entre os contatos do disjuntor

V_{ref} : Envoltória da onda de tensão entre os contatos do disjuntor (tensão de referência)

t_{open} : Instante de abertura dos contatos do disjuntor

t_{max} : Instante em que a tensão de referência alcança seu máximo valor

$T/2$: Meio período do primeiro batimento da tensão entre os contatos do disjuntor

t_{rec1} : Instante ótimo para o religamento (caso a linha seja altamente compensada)

t_{rec2} : Instante ótimo para o religamento (caso a linha seja pouco compensada)

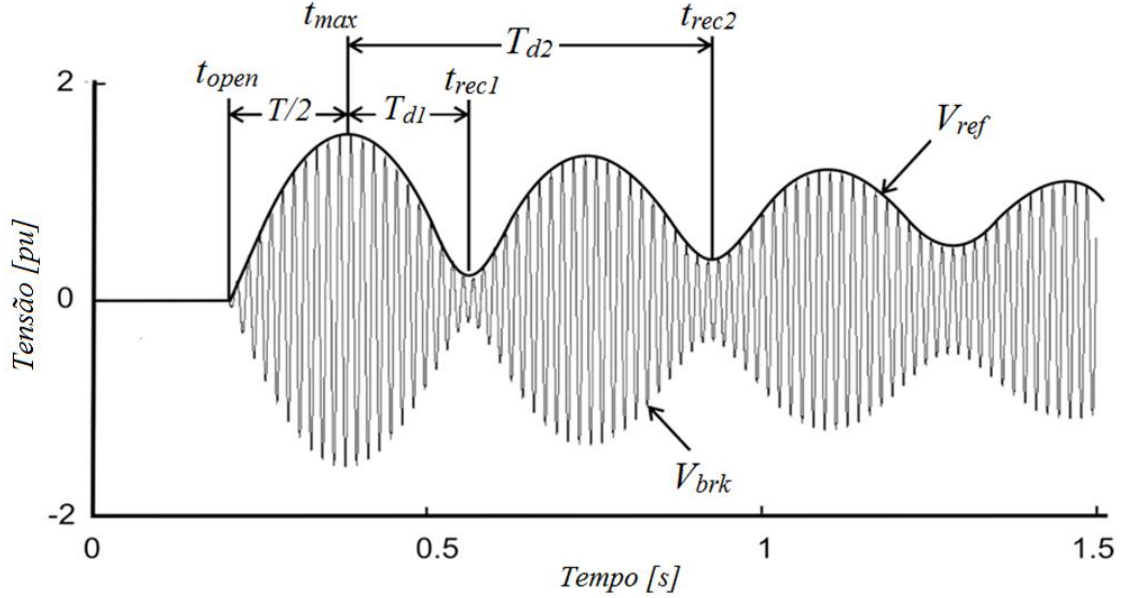


Figura 24. Identificação do instante ótimo para o religamento da linha.

A tensão em um sistema de potência é monitorada constantemente por instrumentos de medição que podem ser transformadores de potencial (TPs). No desenvolvimento do algoritmo proposto, para efeitos de simulação trabalha-se com a tensão real do sistema, mas no caso de implementação do algoritmo desenvolvido nos equipamentos de proteção deverão ser utilizadas grandezas reduzidas transformadas pelos TPs. Neste trabalho os transformadores de potencial foram supostos ideais, não sendo considerada a saturação dos mesmos nem a resposta em frequência. Numa etapa futura o controle proposto deve obter as medidas de tensão de TPs adequadamente representados. Não se espera desempenho muito diferente do obtido se os TPs não saturassem, mas casos específicos com saturação dos equipamentos de medição devem ser analisados.

Mediante um de tensão, disponível no PSCAD/EMTDC, se mede a tensão no lado do sistema e a tensão no lado da linha. A forma de onda da diferença de potencial entre os terminais do disjuntor aberto (Figura 25) pode ser determinada e denominada V_{brk} como mostrado na Figura 24.

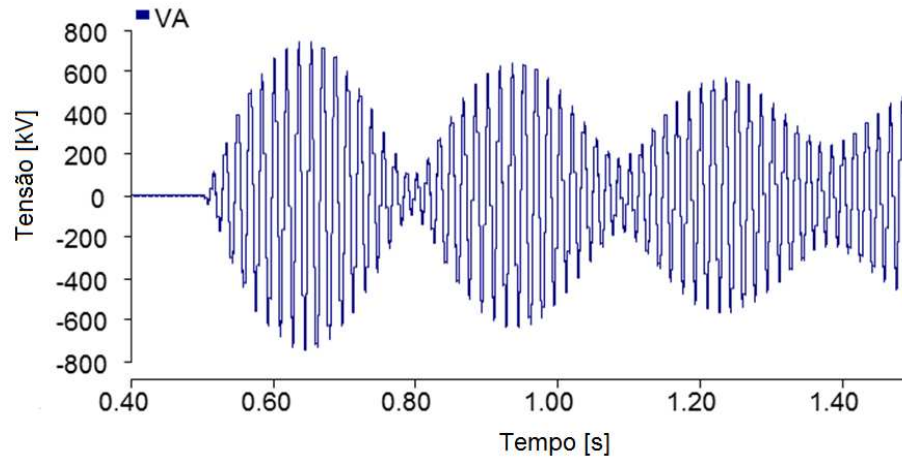


Figura 25. Diferença de potencial entre os terminais do disjuntor aberto

Através de um processamento digital do sinal é possível obter o envelope da curva V_{brk} , o que é feito no PSCAD através de uma função pré-definida denominada Medidor de Valor Eficaz.

Esta sub-rotina produz o valor eficaz para uma onda repetitiva de entrada, mediante amostragem interpolada. Armazena-se continuamente uma quantidade de amostras por cada ciclo da frequência fundamental. Conforme se observa na Figura 26, sendo δt o período de amostragem, os limites das instantâneas são definidos pelo tempo atual t e o período T da frequência fundamental.

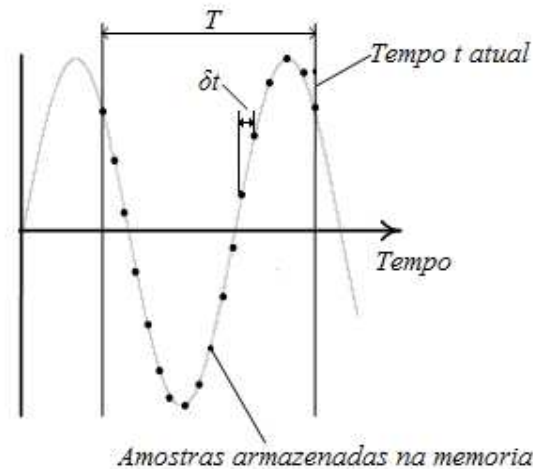


Figura 26. Amostragem interpolada da onda de entrada.

A amostragem dos dados de entrada considera primeiro a quantidade de amostras de entrada por ciclo (Q) e verifica se a quantidade é apropriada, segundo a frequência f de

entrada e o passo da simulação Δt escolhido. Se o produto destes três valores for maior ou igual que 1,0, então a quantidade de amostras por ciclo é ajustada internamente de acordo com (3.1).

$$amostras = \frac{1}{f \cdot \Delta t} \quad (3.1)$$

Isto modifica a quantidade de amostras solicitadas se o tempo de passo ou a frequência são demasiado grandes para alojar a quantidade de amostras determinada por ciclo. Se um tempo de amostragem fica entre tempos de passo, a sub-rotina ajustará o valor da entrada mediante uma interpolação lineal (iniciando dos valores de entrada existentes nos tempos de passo presente e anterior), e utilizará o valor de entrada interpolado no cálculo de saída.

A saída se atualiza cada vez que se encontra um tempo de amostragem, como descrito anteriormente, tomando como base os valores de entrada armazenados na memória intermediária de entrada. O sinal de saída está dado por:

$$Saída = \sqrt{\frac{1}{Q} \sum_{n=1}^Q entrada^2 (t - (Q - n) \cdot \Delta t)} \quad (3.2)$$

A Figura 27 mostra valor eficaz da tensão entre os terminais do disjuntor aberto para as seguintes condições de simulação:

Frequência fundamental (f) = 60 Hz.

Número de amostras de entrada por ciclo (Q) = 64

Tempo de passo da simulação (Δt) = 50 μ s

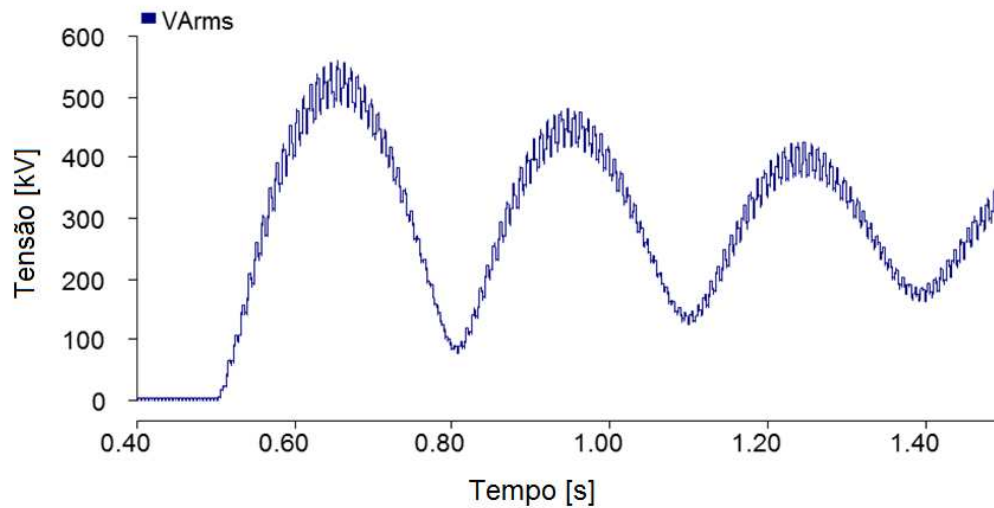


Figura 27. Valor eficaz da tensão entre os terminais do disjuntor aberto

Deve-se ressaltar que para se obter o envelope da curva foi utilizada uma alta taxa de amostragem nas medidas de tensão, uma vez que todos os dados gerados nas simulações foram utilizados com um passo de integração de $50\mu s$ pelo que o controlador trabalhou com uma taxa de amostragem de 20 kHz. Apesar de ter se trabalhado com taxas de amostragem da ordem de 20 kHz não se espera que o desempenho do controlador se altere ao se utilizar taxas de amostragem menores.

O valor eficaz da tensão entre os terminais do disjuntor aberto, por sua vez é tratado por um filtro digital para atenuar os componentes de alta frequência. Utilizou-se neste caso um filtro Butterworth passa-baixas de terceira ordem. O sinal filtrado mostrado na Figura 28 é convertido no sinal de referência V_{ref} .

O processo de filtragem provoca um atraso no sinal filtrado em relação ao V_{brk} que deve ser corrigido. Esta correção é feita automaticamente dentro do algoritmo geral sendo que o atraso do filtro é um parâmetro que deve ser ajustado em função do sistema elétrico.

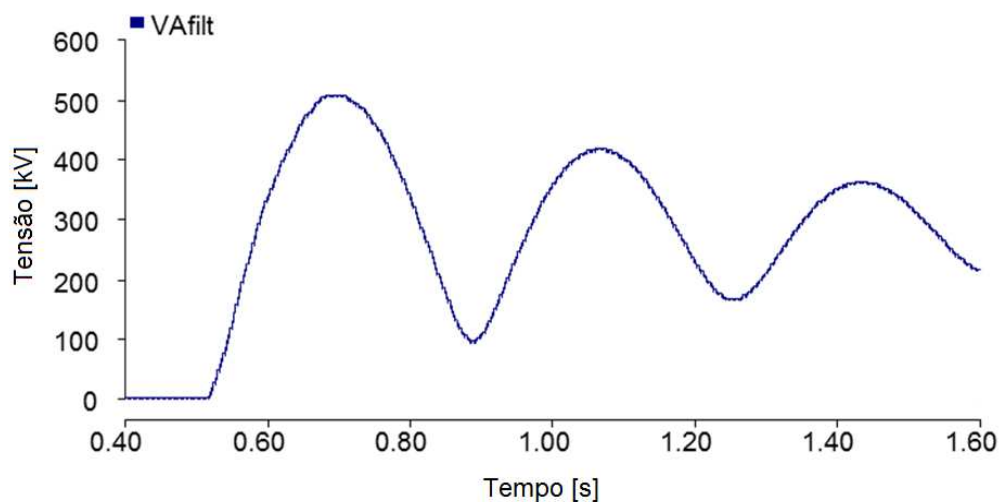


Figura 28. Sinal filtrado

Em seguida o sinal filtrado é amostrado sendo que antes da abertura do disjuntor a tensão de referência V_{ref} tem magnitude zero, portanto, usando um comparador que confere duas entradas de nível é identificado o instante de abertura dos contatos do disjuntor T_{open} . O sinal resultante é apresentado na Figura 29.

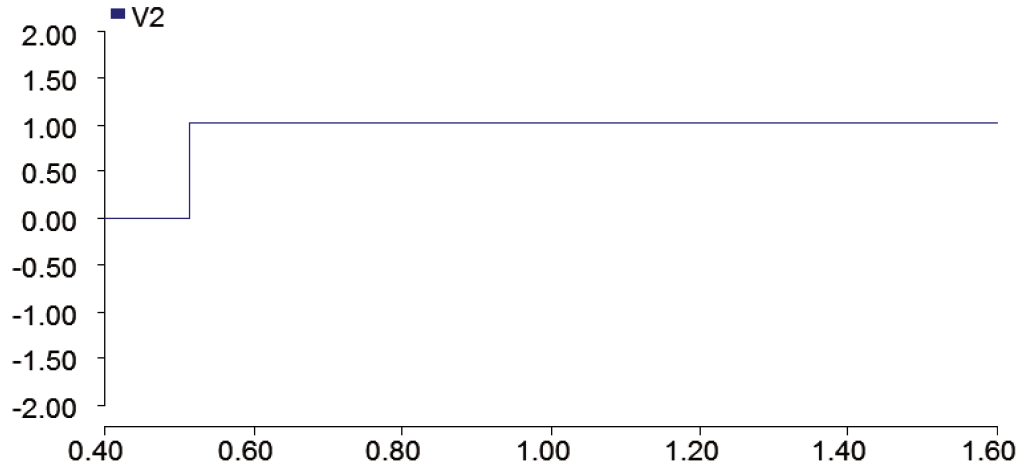


Figura 29. Instante de abertura dos contatos do disjuntor

Como mostrado na Figura 30, o passo seguinte é a identificação dos instantes de crescimento e decaimento do sinal filtrado após a abertura do disjuntor.

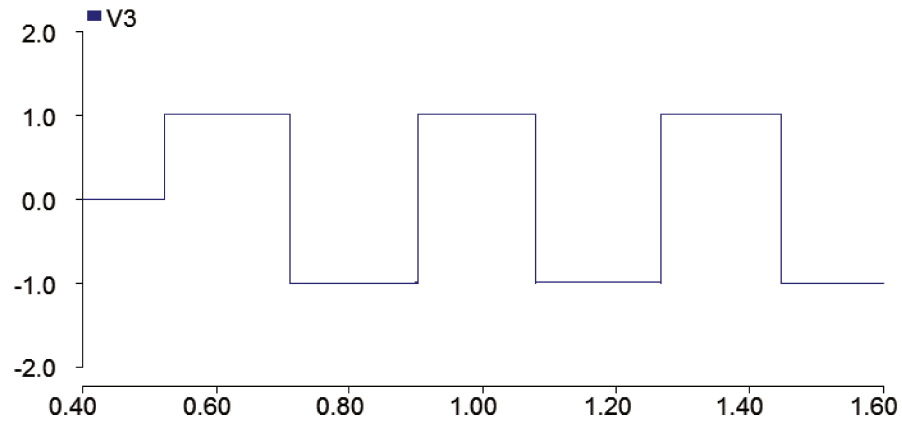


Figura 30. Crescimento e decaimento do sinal filtrado após a abertura do disjuntor.

A duração do meio-período do batimento $T/2$ é identificada pela determinação do t_{max} , ponto em que V_{ref} atinge seu primeiro máximo. Assim, a ordem para o religamento deve ser dada no próximo mínimo do batimento, então o atraso para fechar o disjuntor a partir do instante t_{max} é $T_{d1} = T/2$. A Figura 31 ilustra a determinação do meio período de batimento.

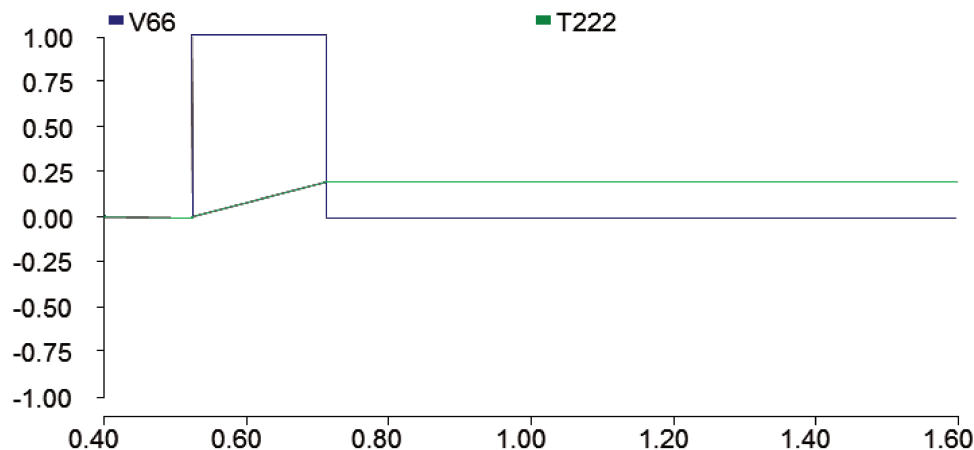


Figura 31. Duração do meio-período do batimento

Finalmente duplica-se o valor deste semi-ciclo obtendo-se a duração do período do batimento (Figura 32).

Logo após a abertura dos contatos do disjuntor, o relé deve ajustar o tempo do religamento para um valor muito elevado, podendo ser este valor de 60 s. No instante em que o sinal lógico da identificação do semi-ciclo for concluído uma ordem é fornecida para que o tempo do religamento seja substituído pelo período do batimento identificado.

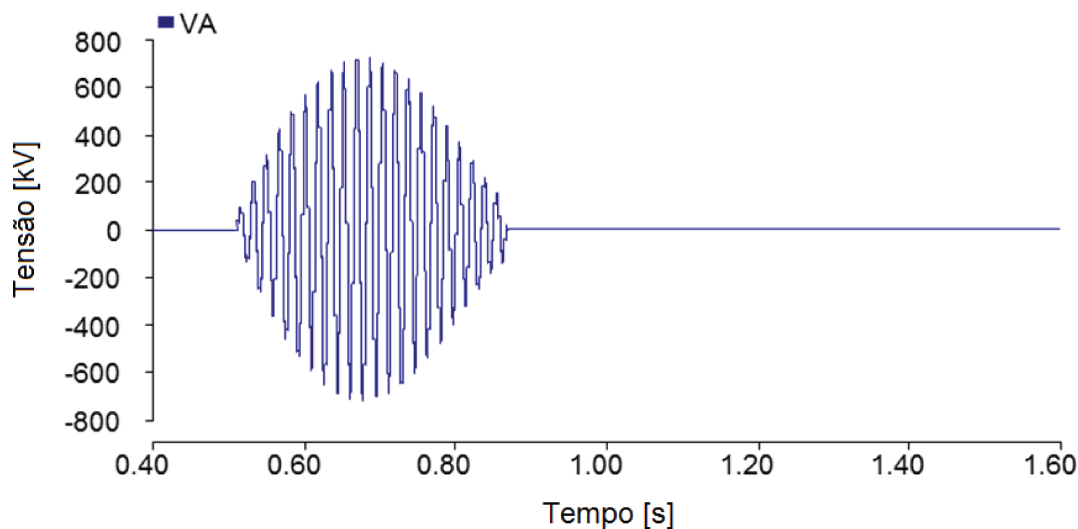


Figura 32. Período do batimento identificado

O método tem de se adaptar a qualquer grau de compensação em derivação da linha. Por exemplo, quando a linha é medianamente compensada (Figura 7-b), o tempo ótimo para o

religamento pode ser muito curto, devido ao tempo morto da proteção. Nesse caso, o tempo de fechamento deve ser estendido para que ocorra no próximo batimento sendo $T_{d2} = 3T/2$, ou no caso de níveis mais baixos de compensação (Figura 7-c), deve fechar ainda nos mínimos subsequentes, no caso $5T/2$, sendo esta identificação um procedimento automático.

O diagrama de blocos da Figura 33 representa esquematicamente o processo completo do algoritmo de controle

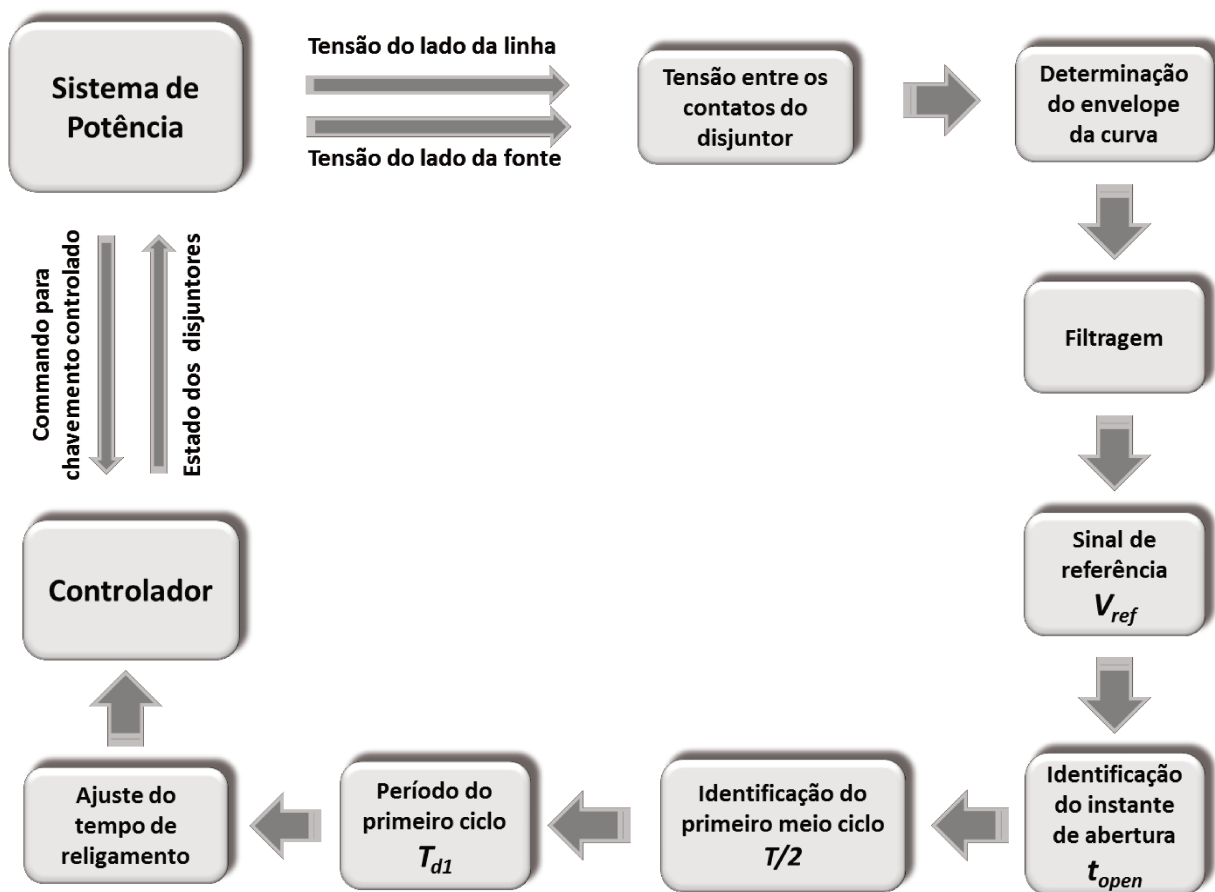
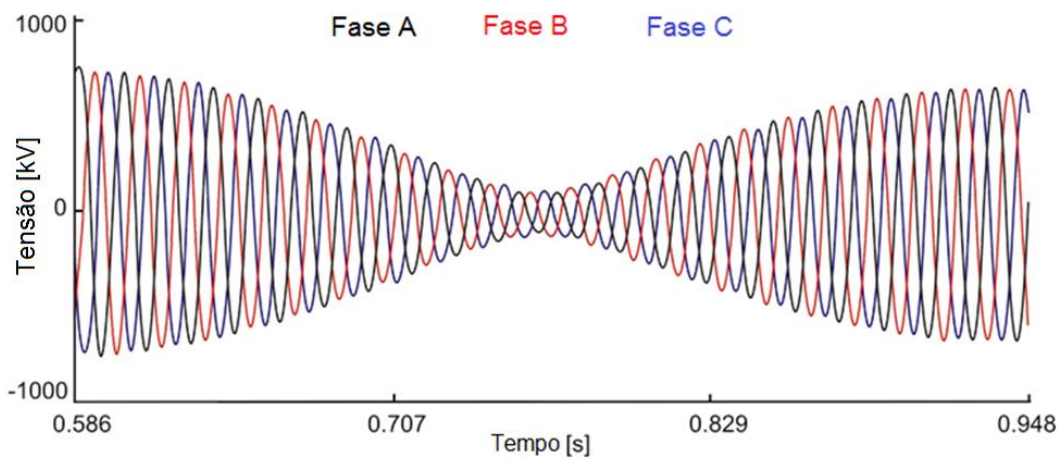
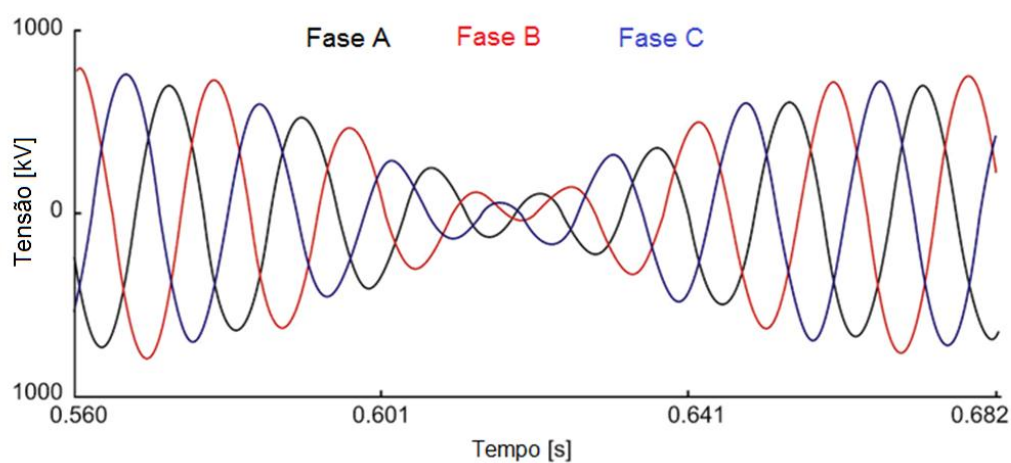


Figura 33. Diagrama de blocos do algoritmo desenvolvido

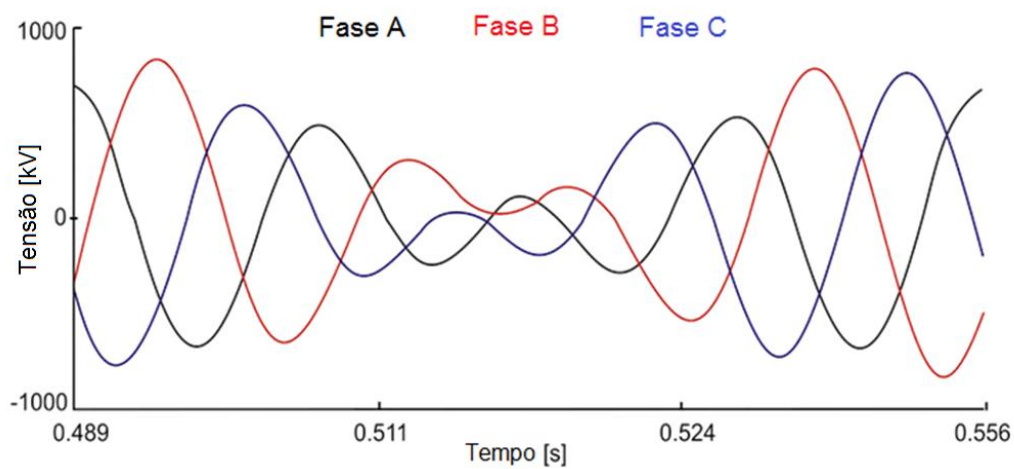
Por outro lado, mesmo sendo o sistema trifásico, o algoritmo necessita da tensão somente de uma das fases, a qual emitirá o sinal para operar o religamento das três fases ao mesmo instante. Isso ocorre porque, como mostrado na Figura 34, a região do mínimo do batimento é aproximadamente a mesma para as três fases, independentemente do nível de compensação.



a) 90 % compensação



b) 70 % compensação



c) 50 % compensação

Figura 34. Forma de onda das três fases da tensão na região de mínimo do batimento

a) Tempos de operação

Para incluir a característica dielétrica e a dispersão do disjuntor além da imprecisão do instante ótimo determinado pelo controlador durante a operação de fechamento é preciso modificar os tempos de operação.

Os tempos de operação do disjuntor variam significativamente com o tipo do disjuntor, as condições ambientais e as condições de operação. Algumas das variações são previsíveis e algumas são puramente estatísticas (GOLDSWORTHY D. et al..2008). Como mostrado na Figura 35, o tempo de religamento do disjuntor é a soma de três termos:

$$T_{rec} = T_{dead} + \Delta T_{Pred} + \Delta T_{Statistic} \quad (3.3)$$

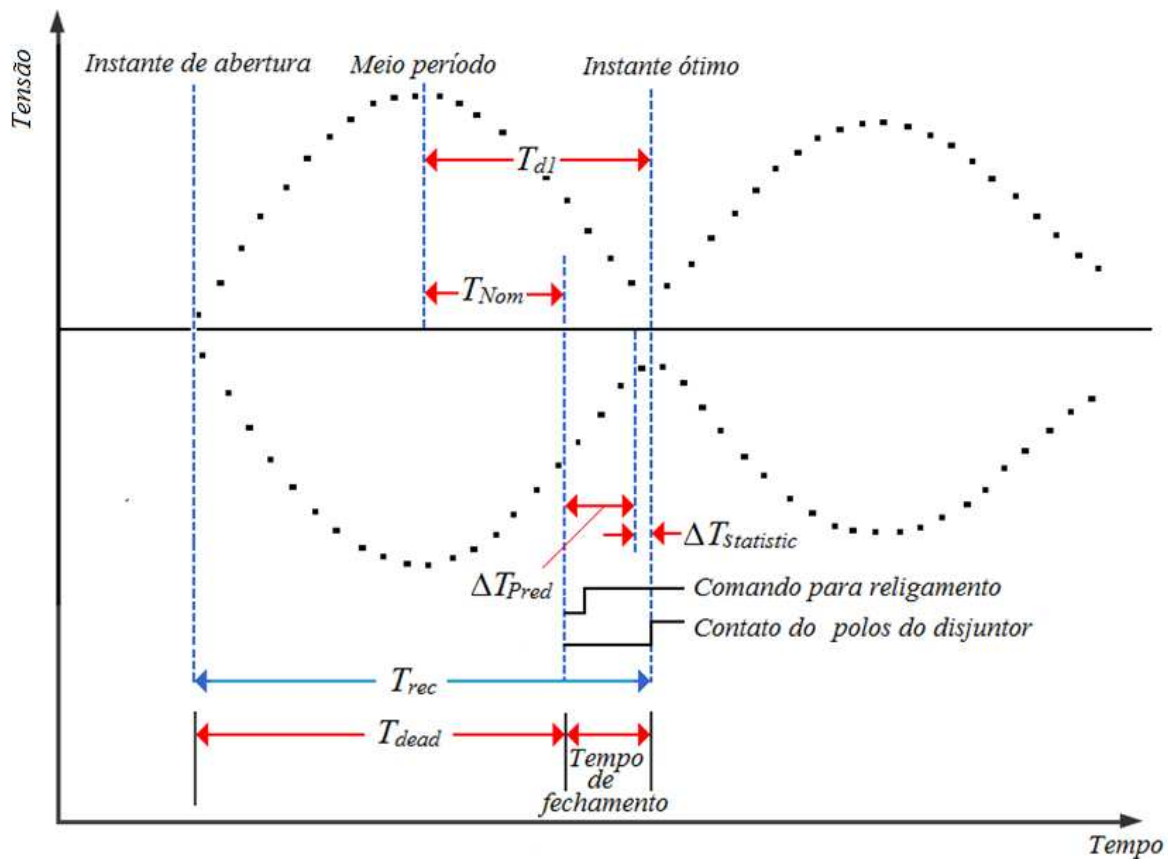


Figura 35. Ajuste do tempo de religamento.

T_{rec} é o tempo total da manobra de religamento. O tempo morto T_{dead} é o intervalo de tempo desde a abertura dos contatos do disjuntor até o primeiro restabelecimento da corrente nos polos do disjuntor no subsequente religamento. O período ΔT_{Pred} é uma variação previsível desde a energização do circuito para fechar o disjuntor até o contato mecânico do disjuntor. O período $\Delta T_{Statistic}$ é uma variação puramente estatística do tempo de operação.

Para considerar estes atrasos adicionais o sinal de religamento é reduzido a partir do instante T_{dl} obtida pelo algoritmo principal do controle, mediante a redução do período $\Delta T_{Pred} + \overline{\Delta T_{Statistic}}$, onde $\overline{\Delta T_{Statistic}}$ é o valor médio de $\Delta T_{Statistic}$. Desta forma, o disjuntor fecha o mais próximo possível do instante ótimo, como mostrado na Figura 35.

3.2.2 Implementação do controlador em hardware físico

O controlador foi implementado em um processador separado (3PC) que contém três processadores digitais de sinais do tipo ADSP-21062 no RTDS.

Como um hardware real está sendo usado, é importante que todos os sinais entre o RTDS e o controlador sejam adequadamente dimensionados. A Figura 36 ilustra a escala necessária para transferência de sinais entre o RTDS e o controlador. As constantes K mostradas são implementadas em software e permitem ajustar os sinais enviados ou recebidos dos conversores.

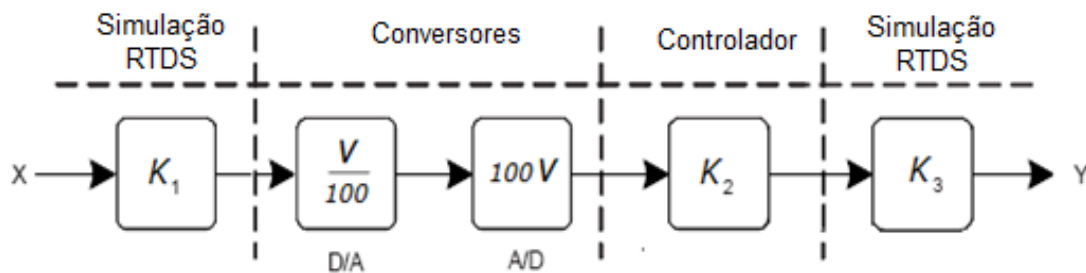


Figura 36. Escalamento dos sinais para interface.

3.2.3 Avaliação de desempenho do controlador no simulador digital em tempo real

A avaliação do controlador no RTDS tem a vantagem de que o algoritmo proposto pode ser avaliado como se estivesse conectado a um sistema real, já que o simulador aceita e gera sinais em tempo real sendo, portanto, virtualmente indistinguível do sistema real. Assim, os erros de hardware, erros do sinal de interface, flutuações etc. do equipamento em teste podem ser identificados e corrigidos. O simulador utilizado para os testes foi o RTDS da Universidade de Manitoba do Canadá, durante o estágio de 12 meses de doutorado sanduíche.

a) Interface do controlador com o RTDS

Para realizar a interface do controlador com o RTDS, primeiro o sistema de potência em estudo, detalhado no capítulo 4, foi modelado digitalmente no RTDS.

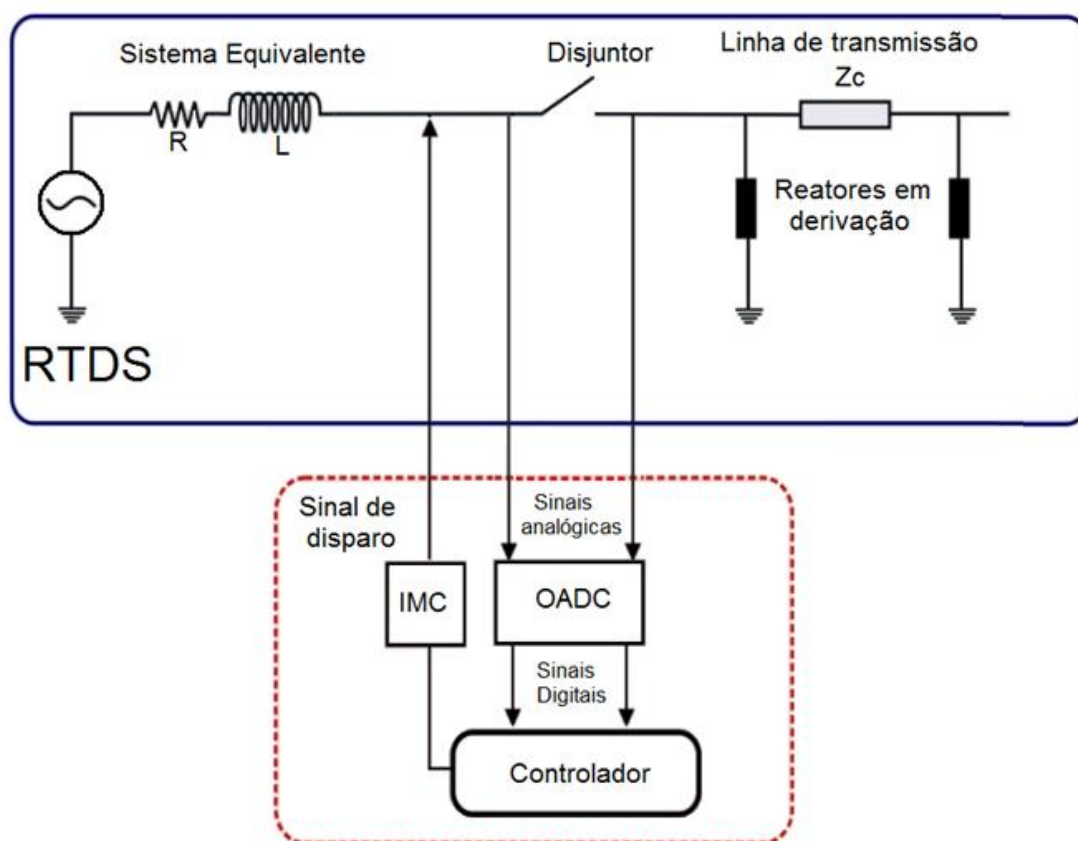


Figura 37. Configuração da Interface do controlador com o RTDS

A execução da simulação do sistema de potência gera sinais de tensões analógicos do lado da fonte e do lado da linha. Estes sinais são captados pelos canais de saídas analógicas do RTDS, como mostrado na Figura 37.

Para ter acesso aos sinais de tensão analógicos o circuito do sistema deve ser modificado especificando o sinal que será enviado, a qual canal de saída e em que nível. Estas tarefas podem ser realizadas mediante um componente de controle de saída (D/A). No exemplo da Figura 38 os sinais de tensão foram especificados para utilizar a saída mediante o 3PC N°6, Processador A e canais de saída 1 e 2.

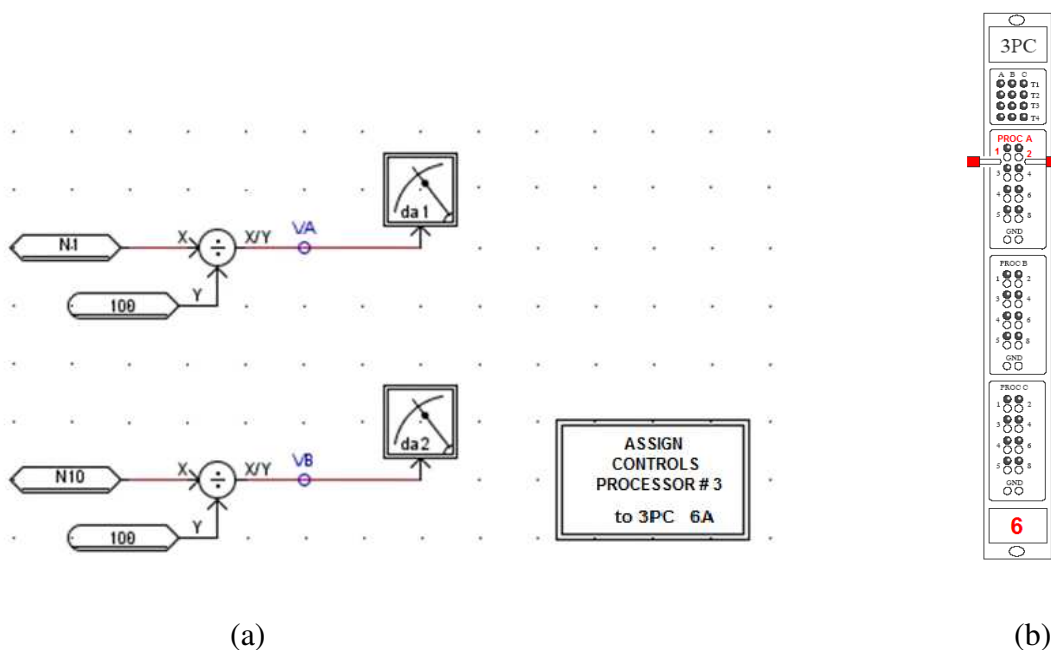


Figura 38. Canais de saídas de sinais analógicas do RTDS

Um conversor analógico-digital OADC (Optical Analogue-Digital Converter) é usado para converter estes sinais analógicos em sinais digitais que irão alimentar o controlador. As entradas do OADC devem ter um valor máximo de 10 V. No exemplo da Figura 39, os sinais analógicos ingressam pela porta 6 do OADC.

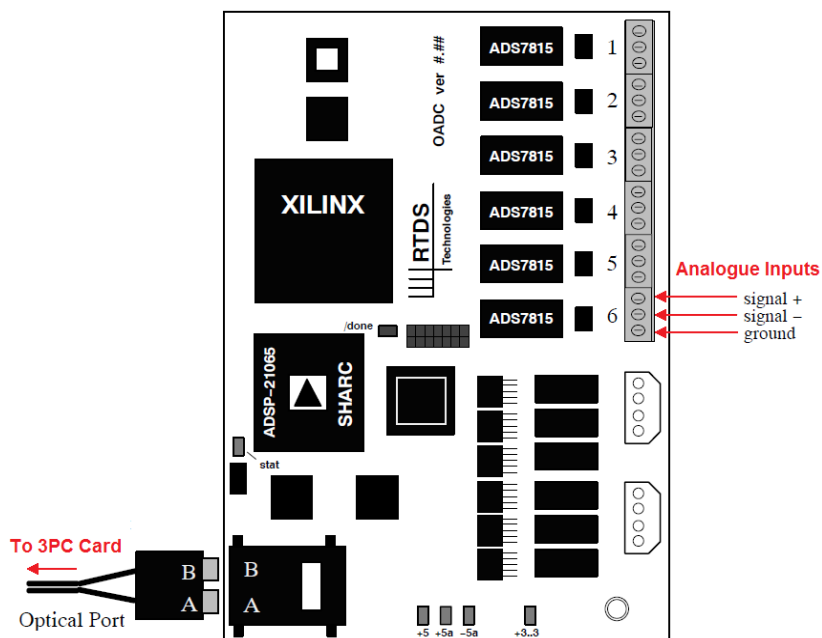


Figura 39. Conversor Analógico – Digital OADC

O cartão OADC se conecta ao 3PC mediante uma conexão ótica que ingressa exclusivamente através do processador C do 3PC e que tem o acesso pela parte posterior do cubículo do RTDS. Os sinais ingressados podem ser chamados da interface do usuário mediante o componente OADC, especificando o número de 3PC, o número de processador e os canais de entrada. No exemplo da Figura 40, os sinais ingressam ao RTDS utilizando o mesmo canal de entrada, ou seja, o 6.

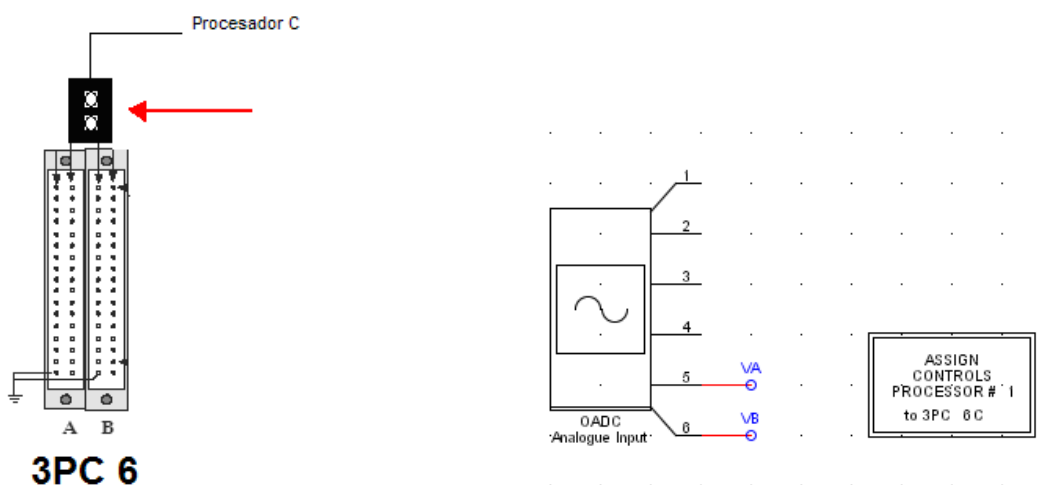


Figura 40. Canais de entradas A/D ao RTDS

Após processar o algoritmo, no instante em que o tempo de religamento é identificado, uma ordem é enviada para fechar o disjuntor. A saída desta ordem é um sinal digital. Para fornecer este sinal ao sistema de potência implementado na interface gráfica do RTDS se utiliza um sistema de isolamento óptico denominado MUX Interface Card (IMC) (Figura 42). Para realizar esta conexão digital se utiliza as saídas digitais disponíveis nos processadores A ou B do 3PC que são acessíveis pela parte posterior do cubículo do RTDS. As saídas devem ser especificadas mediante a interface do usuário utilizando o componente Digital Output Port.

No exemplo da Figura 41 as saídas digitais estão especificadas para o 3PC N°1, Processador A.

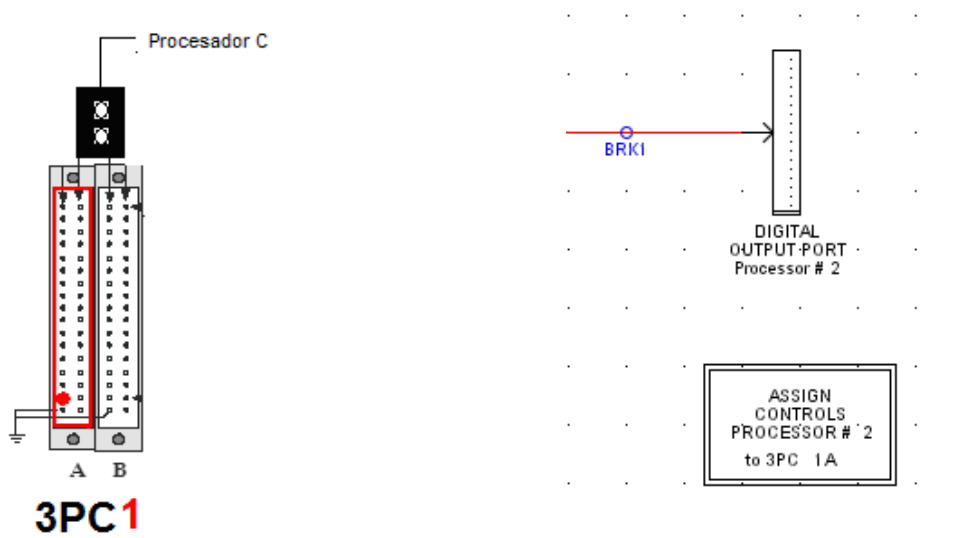


Figura 41. Canais de saídas digitais do RTDS

Um sinal digital pode ser inserido num *rack* do RTDS pelo cartão Interface MUX Card (IMC). O IMC é usado apenas para os sinais digitais. No exemplo da Figura 42, a saída digital do 3PC N°1 é transferida ao 3PC N°6.



Figura 42. Cartão de Interface IMC

O sinal digital é inserido por sua vez no sistema através da interface gráfica do usuário utilizando o componente Digital Input Port. No exemplo da Figura 43 a entrada digital é especificada para ingressar no 3PC N°6, Processador B.

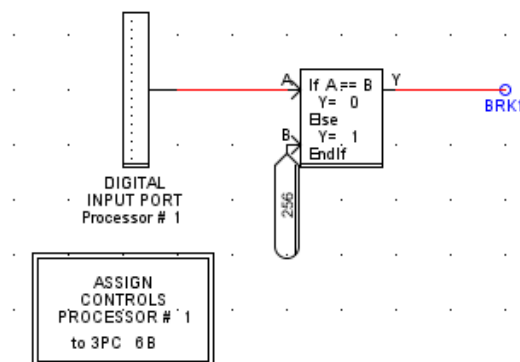


Figura 43. Canais de entradas digitais ao RTDS

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

4.1 Resultados das simulações digitais em tempo real

Os resultados das principais simulações obtidas no RTDS são apresentados nesta seção. A importância destas simulações está na semelhança com as simulações obtidas utilizando o PSCAD/MTDC, o que confirma o correto desempenho do controlador implementado.

A Figura 44 mostra a forma de onda da tensão entre os terminais do disjuntor, obtida da diferença de potencial entre a tensão do lado da fonte e a tensão do lado da linha.

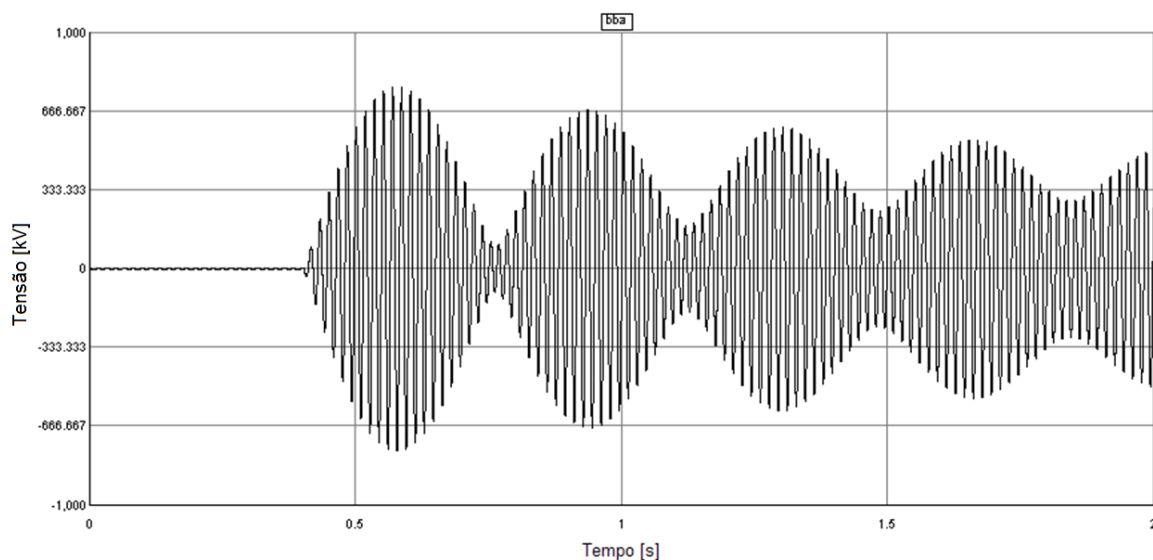


Figura 44. Forma da onda da tensão entre os contatos do disjuntor.

O sinal de tensão é processado e convertido na envoltória da onda que será usada como sinal de referência. A Figura 45 mostra o sinal filtrado ou sinal de referência.

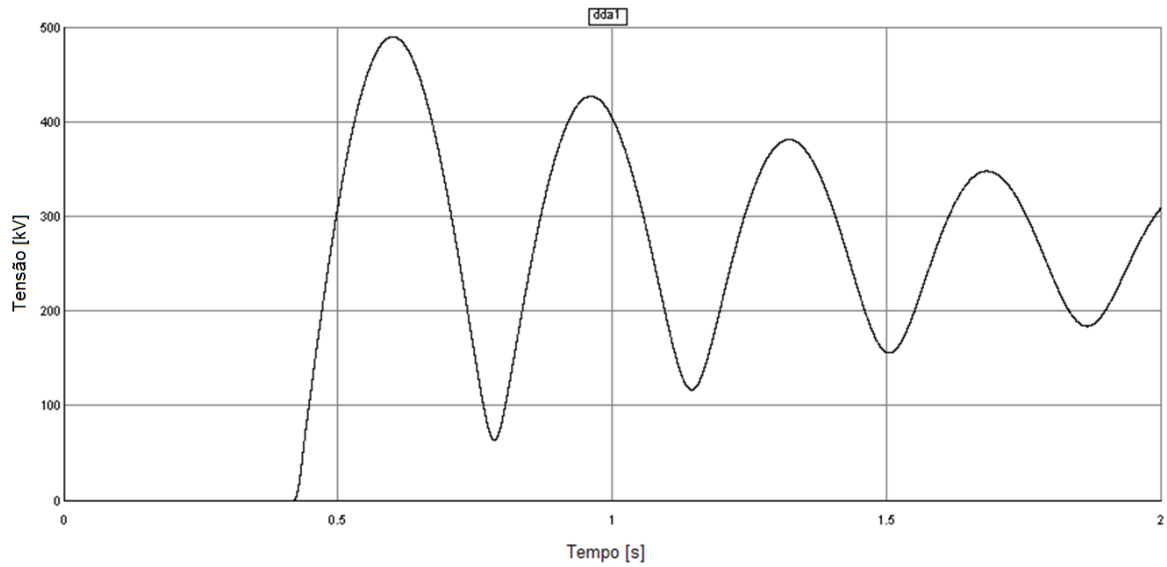


Figura 45. Sinal de referencia.

Em função do sinal de referência são determinados os instantes de abertura do disjuntor e do meio período do batimento como é mostrado na Figura 46 e na Figura 47, respectivamente.

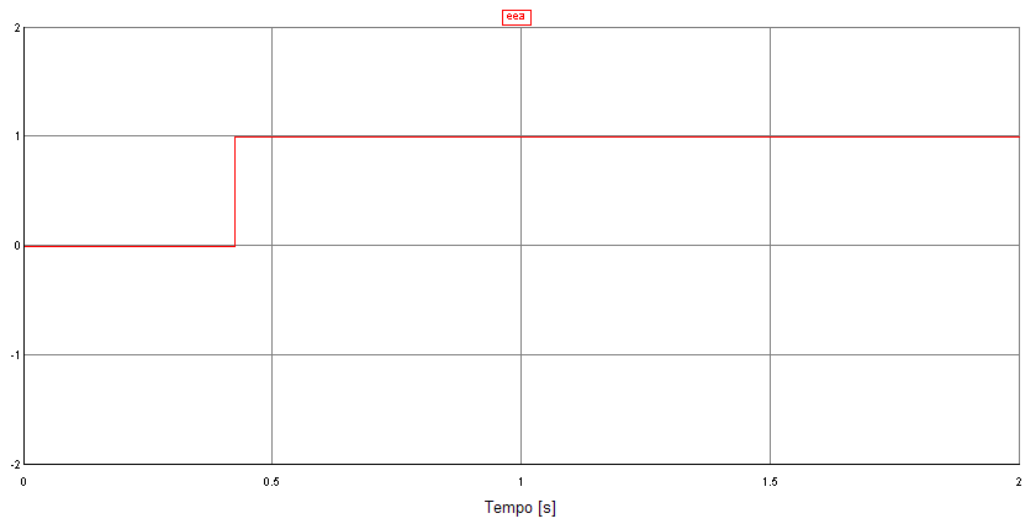


Figura 46. Identificação do instante de abertura do disjuntor

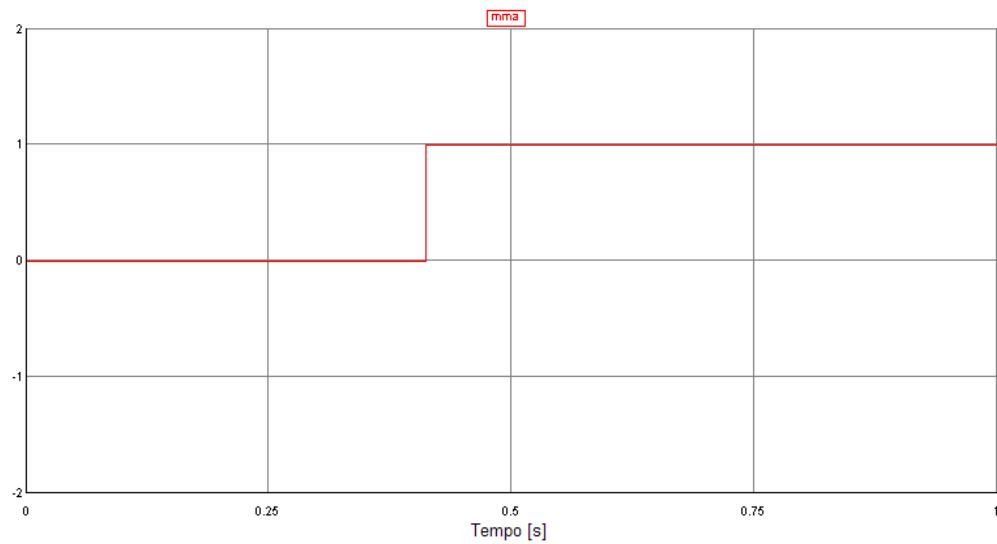


Figura 47. Identificação do meio período

Duplicando o tempo do meio período se obtém o instante para o fechamento do disjuntor logo após o primeiro batimento como é mostrado na Figura 48 e na Figura 49.

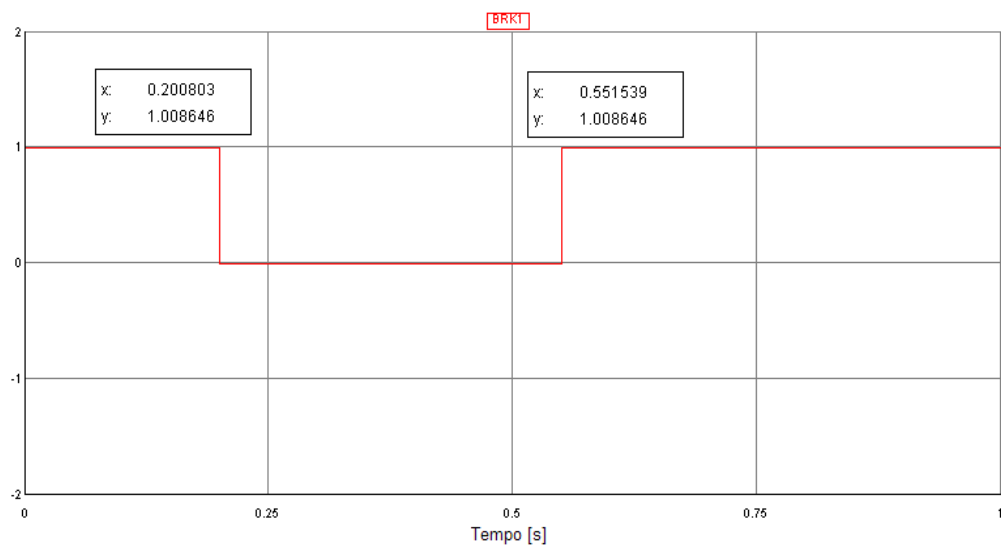


Figura 48. Identificação do período completo do primeiro batimento

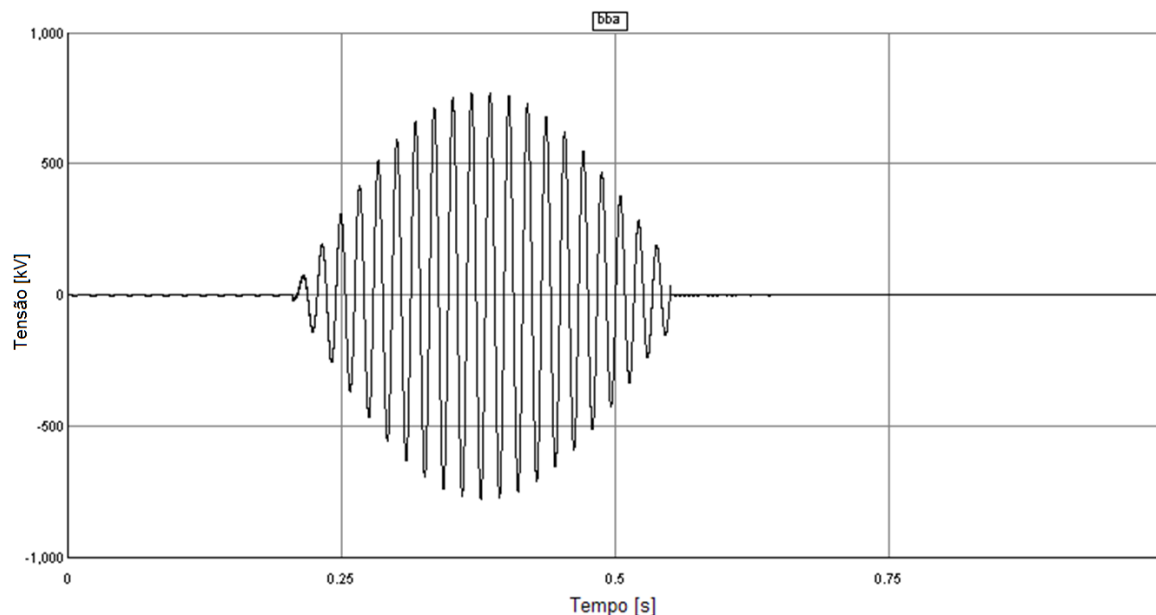


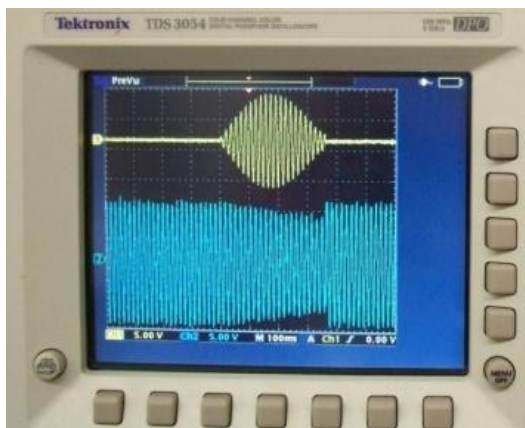
Figura 49. Fechamento do disjuntor depois do primeiro batimento

4.2 Diversos esquemas de compensação em derivação.

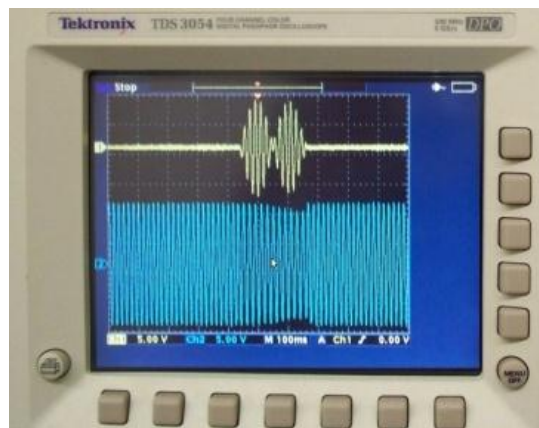
Para considerar os efeitos da compensação em derivação foram analisadas as seguintes seções da linha do sistema de potência apresentado na Figura 19:

- i) Trecho final da linha que corresponde a um comprimento de 252 km em direção da barra B4 a B5 incluindo dois reatores em derivação que corresponde a 90 % de compensação.
- ii) Segundo trecho da linha que corresponde a um comprimento de 320 km em direção da barra B2 a B3 com os dois reatores conectados que corresponde a 70 % de compensação.
- iii) O mesmo trecho final de 252 km entre a barra B4 e B5 considerado em i), mas esta vez só com um reator em derivação conectado o que corresponde a 50 % de compensação.

O controlador é testado em tempo real no RTDS para os três níveis de compensação mencionados. O disjuntor é fechado no primeiro, segundo e quarto do mínimo do batimento para 90 %, 70 % e 50 % de compensação, respectivamente. Em cada caso, o religamento se realiza no menor tempo possível, considerando um tempo morto de 12 ciclos. A Figura 50 mostra os oscilogramas capturados nas saídas analógicas do RTDS para os três casos.



(a) 90% de compensação



(b) 70% de compensação



(c) 50% de compensação

Figura 50. Tensões entre os contatos do disjuntor utilizando o controlador para religamento.

A Tabela 12 mostra a diferença entre a tensão no ponto máximo da onda de tensão entre os contatos do disjuntor e a tensão na região do mínimo do batimento. Esta diferença permite observar a vantagem de efetuar o religamento na região do mínimo já que os valores nesta região são muito menores o que faz que não seja preciso procurar o cruzamento por zero.

Tabela 12. Máximas tensões através dos contatos do disjuntor

Nível de compensação (%)	Máxima tensão na região do máximo do batimento (kV)	Máxima tensão na região do mínimo do batimento (kV)
90 %	780 (Primeiro máximo)	125 (Primeiro mínimo)
70 %	840 (Segundo máximo)	160 (Segundo mínimo)
50 %	900 (Quarto máximo)	330 (Quarto mínimo)

4.3 Influência da compensação série

Para linhas de transmissão muito longas, além da compensação em derivação são usados capacitores em série que aumentam a capacidade de transmissão, reduzem as perdas do sistema e melhoram o perfil de tensão da linha de transmissão.

Para analisar a influência da compensação série no desempenho do método proposto foi simulada uma linha de 900 km com 90 % de compensação em derivação e um banco de capacitores série instalado no meio da linha. A Tabela 13 mostra os dados da compensação série da linha de transmissão.

Tabela 13. Dados da compensação série

Comprimento da linha (km)	Capacitor série	
	Nível de compensação (%)	XC (Ω)
900	50	95,432

A Figura 51 mostra a forma da onda de tensão entre os contatos do disjuntor comparando uma linha de transmissão com 90 % de compensação em derivação e a mesma linha com 90 % de compensação em derivação mais 50 % de compensação em série. As simulações realizadas com o PSCAD / EMTDC demonstraram que os batimentos da tensão através do disjuntor para ambos os casos são muito semelhantes, por isto é possível concluir que a compensação série não interfere no desempenho do método de controle proposto.

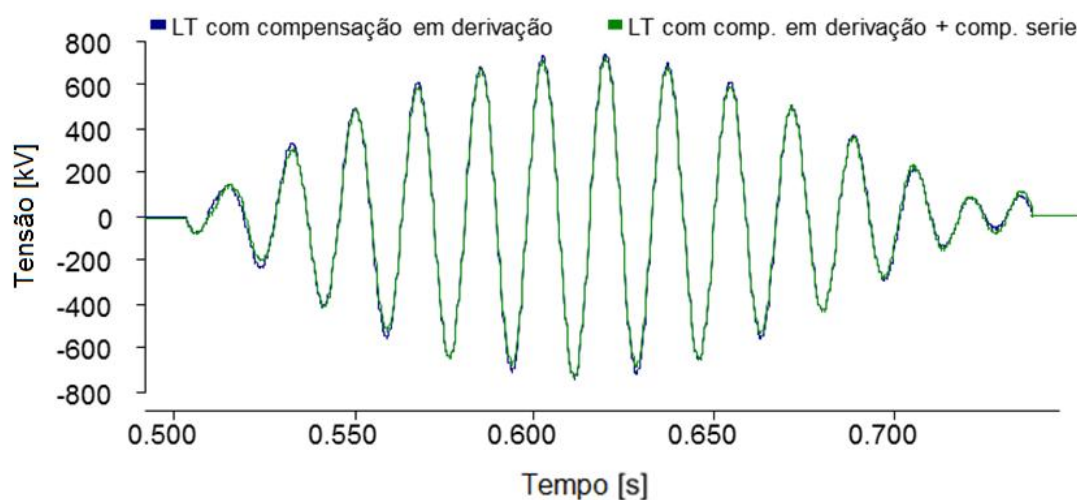


Figura 51. Comparação LT com compensação em derivação vs. LT com compensação em derivação + compensação série.

4.4 Influência da transposição

O desempenho do método de chaveamento controlado foi avaliado por meio de linhas de transmissão perfeitamente transpostas na seção 4.2. Por esta razão, o método aumentaria a sua eficácia porque os parâmetros de sequência negativa e positiva da linha são os mesmos quando se considera a linha equilibrada. Por conseguinte, para a linha de transmissão com compensação, a tensão do lado da linha após a abertura mostra principalmente uma componente de frequência, associados aos parâmetros de sequência positiva.

No entanto, na prática as linhas de transmissão não são idealmente transpostas, ou seja, a linha não é balanceada para todas as frequências envolvidas no transitório eletromagnético. Para sinais de altas frequências os comprimentos não são muito maiores do que o ciclo de transposição, e, portanto, a transposição da linha deve ser devidamente representada.

Em geral, o setor elétrico brasileiro, usa o esquema de transposição 1/6 - 1/3 - 1/3 - 1/6 (com três torres de transposição). A fim de determinar a influência da transposição, a linha foi modelada como segue: idealmente transposta e com um esquema real de transposição.

O segundo trecho do sistema em estudo, com a linha de transmissão com 70 % de compensação foi escolhida para esta análise. A Figura 52 mostra a tensão entre os polos do disjuntor para quando a linha é idealmente transposta e quando a linha tem o esquema de transposição de 1/6 - 1/3 - 1/3 - 1/6. O comportamento das formas de onda foi muito semelhante, o que leva a concluir que o desempenho do método será satisfatório para ambos os casos.

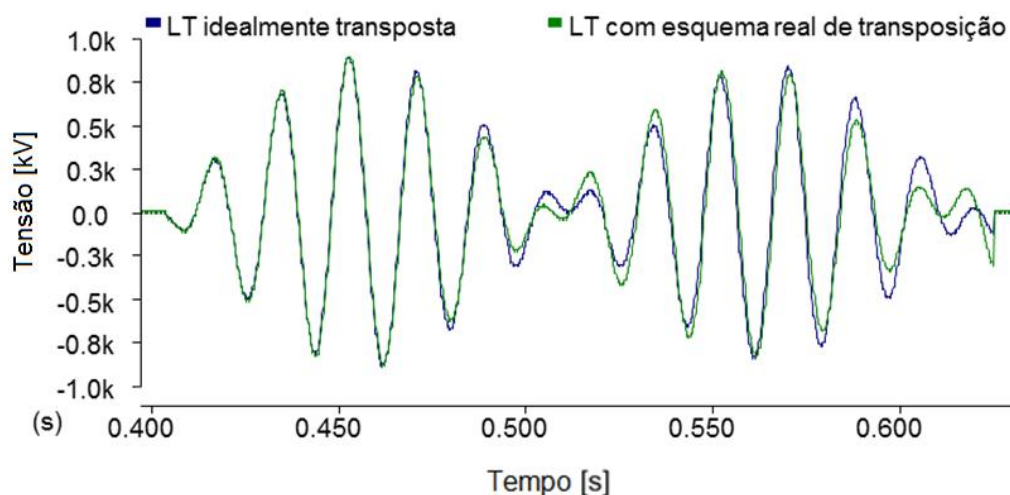


Figura 52. Comparação LT perfeitamente transposta vs. LT com transposição real

4.5 Análise comparativa de métodos de controle na manobra de religamento

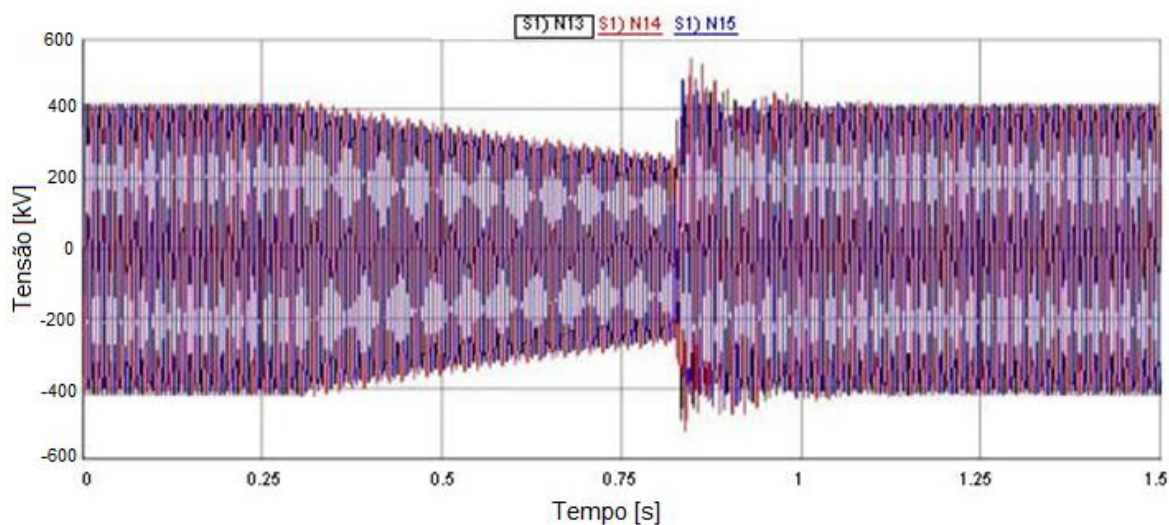
Nesta seção é apresentada uma análise comparativa dos diferentes métodos utilizados no controle de sobretensões durante o religamento tripolar de linhas de transmissão. Os níveis de sobretensões são medidos no terminal receptor. As seguintes situações foram consideradas:

- i) Nenhum método para limitar sobretensões.
- ii) Utilização do resistor de pré-inserção.
- iii) Utilização do método **existente** de chaveamento controlado.
- iv) Utilização do método **proposto** de chaveamento controlado.

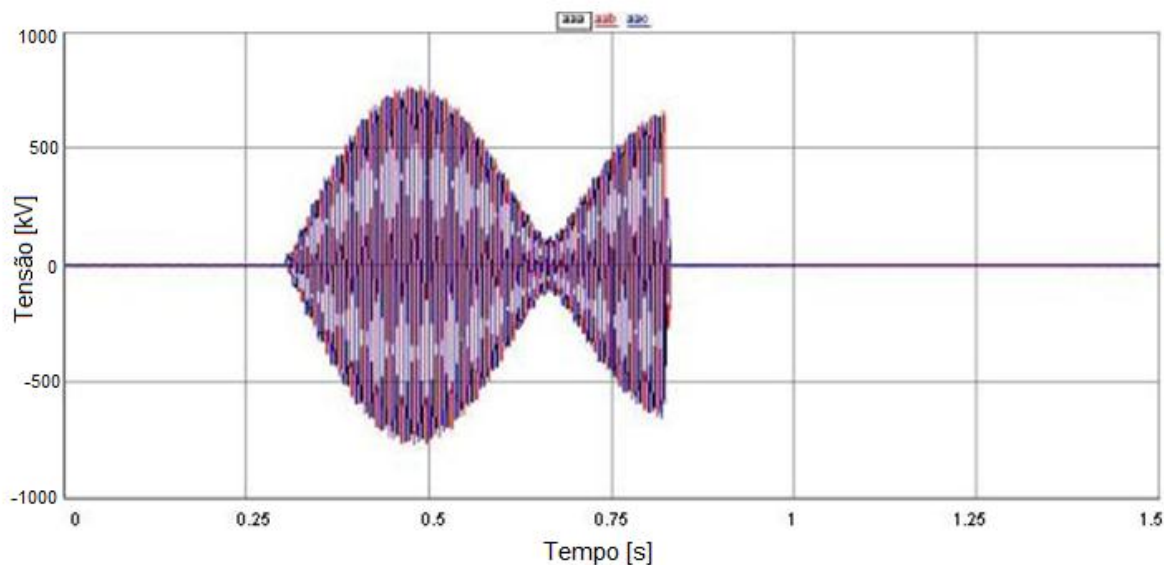
Serão apresentados os resultados gráficos das simulações de linhas de transmissão com 90 % de compensação. Os resultados das simulações da linha com 70 e 50 % de compensação são apresentados na Tabela 16.

No primeiro caso nenhum método para limitar sobretensões foi usado, ou seja, foram utilizados somente pára-raios com tensão nominal de 420 kV localizados nos terminais da linha. O tempo morto considerado foi 500 ms (os valores típicos para linhas de transmissão de 500 kV no Brasil estão na faixa de 500 a 1100 ms).

O segundo caso reproduz o uso do resistor de pré-inserção com pára-raios Ur. 420 kV localizados nos terminais da linha. O disjuntor foi fechado logo após um tempo morto de 500 ms. A sobretensão no final da linha com 90 % de compensação e a forma da onda entre os contatos do disjuntor, simuladas no RTDS são apresentada na Figura 53.



a) Tensão no terminal da linha em vazio



b) Tensão entre os terminais do disjuntor

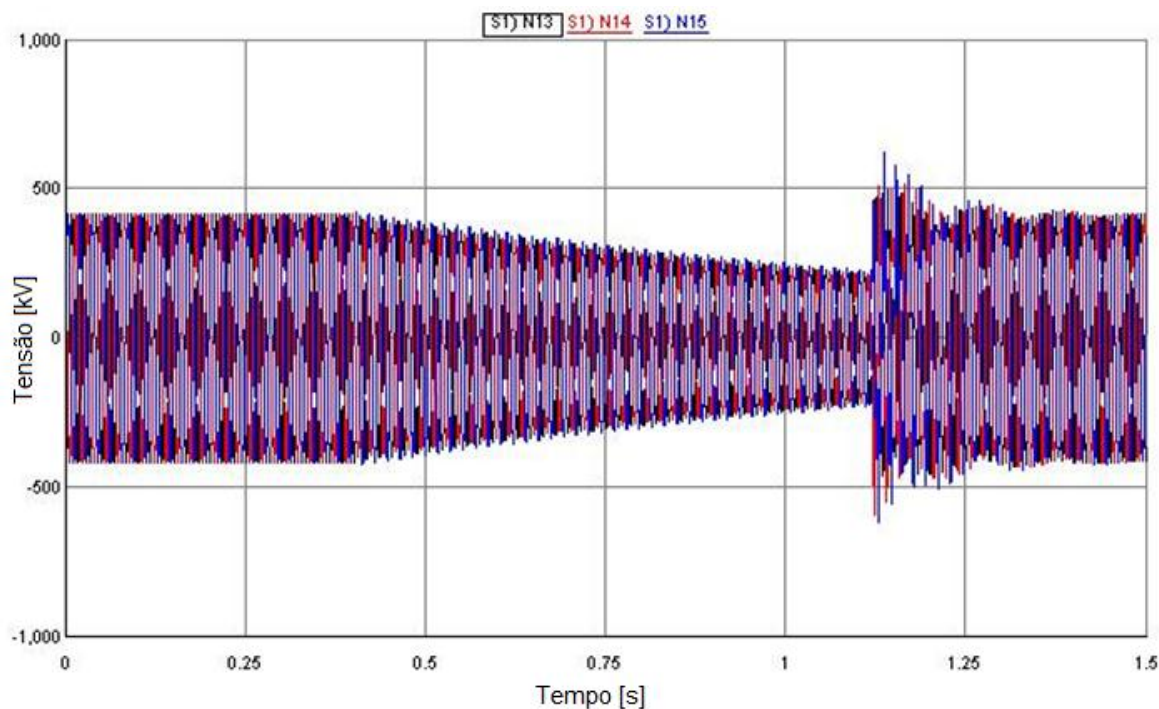
Figura 53. Religamento tripolar utilizando resistor de pré-inserção – 90 % de compensação

No terceiro caso, utilizando o método existente para religamento tripolar, o disjuntor é fechado no cruzamento por zero do segundo, terceiro e quinto mínimo do batimento da tensão entre os polos disjuntor para linhas com 90, 70 e 50 % de compensação em derivação, respectivamente.

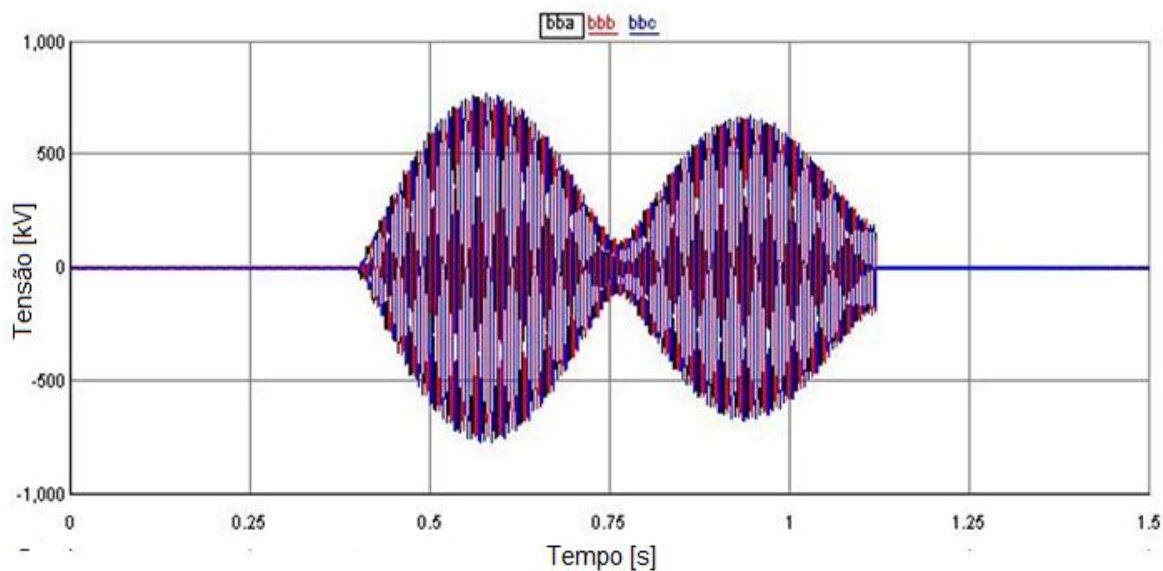
Deve-se mencionar que este método foi simulado de maneira ideal, ou seja, os instantes para religamento são otimistas. Na realidade o método pode apresentar dificuldade para

encontrar a exata periodicidade do batimento e pode precisar de um tempo maior para determinar a região ótima para o fechamento do disjuntor.

A Figura 54 mostra a onda de tensão entre os contatos do disjuntor e no terminal da linha com 90 % de compensação, durante a manobra de religamento tripolar usando o método de controle existente.



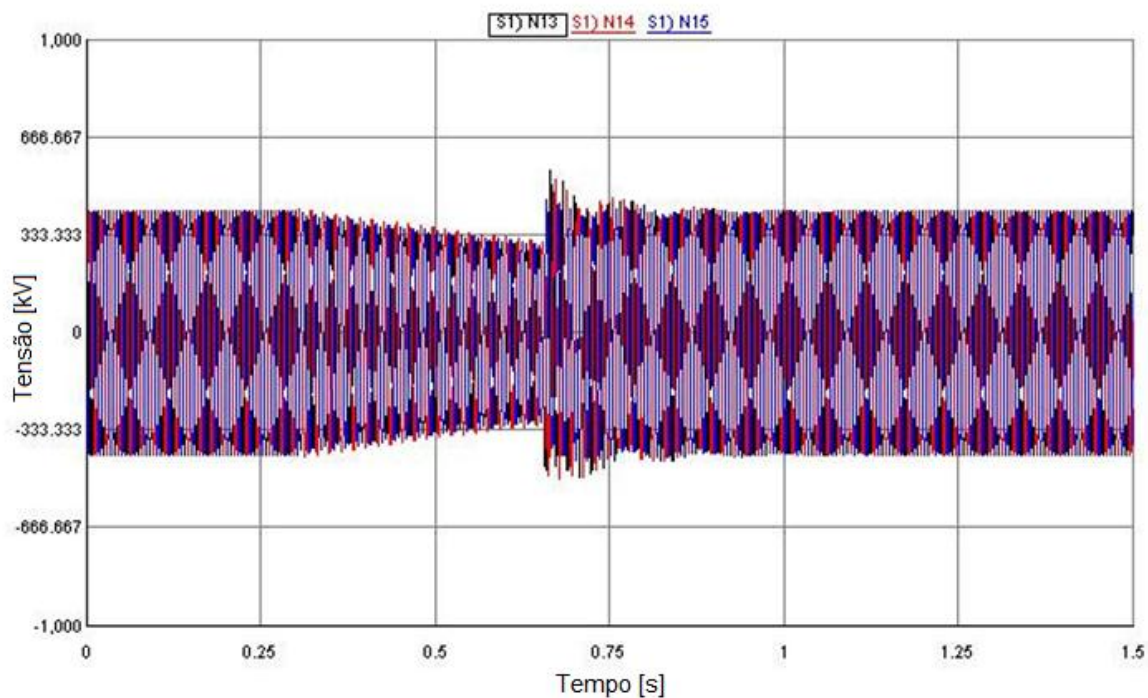
a) Tensão no terminal da linha em vazio



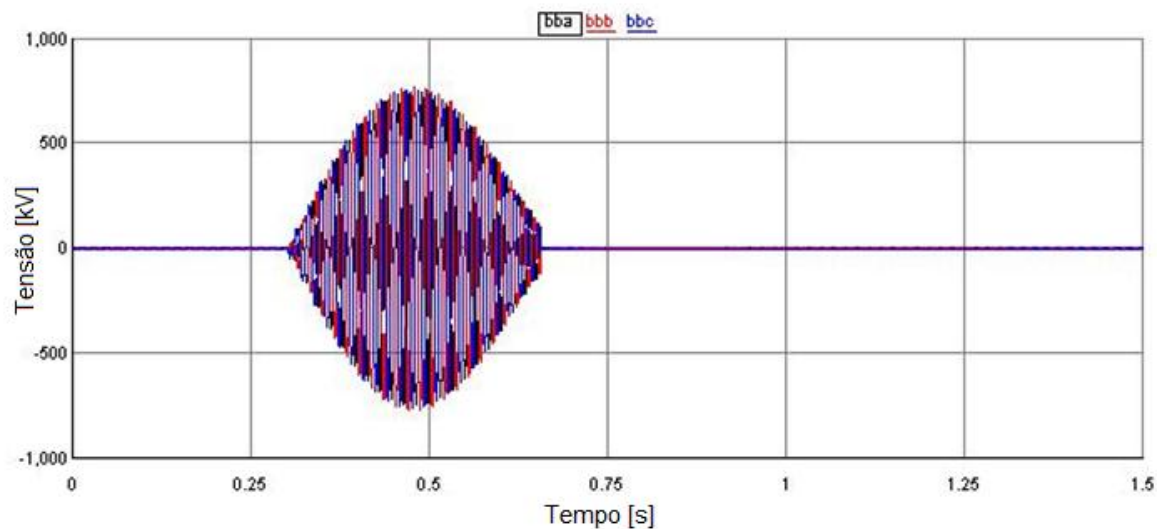
b) Tensão entre os terminais do disjuntor

Figura 54. Religamento tripolar utilizando o método existente – Linha com 90 % de compensação.

No último caso foi simulado o método proposto. O disjuntor é fechado, no primeiro, segundo e quarto mínimo do batimento entre os contatos do disjuntor para linhas com 90, 70 e 50 % de compensação em derivação, respectivamente. A tensão entre os contatos do disjuntor e no terminal receptor para o religamento da linha com 90 % de compensação pode ser observada na Figura 55.



a) Tensão no terminal da linha em vazio



b) Tensão entre os terminais do disjuntor

Figura 55. Religamento tripolar utilizando o método proposto – LT com 90 % de compensação.

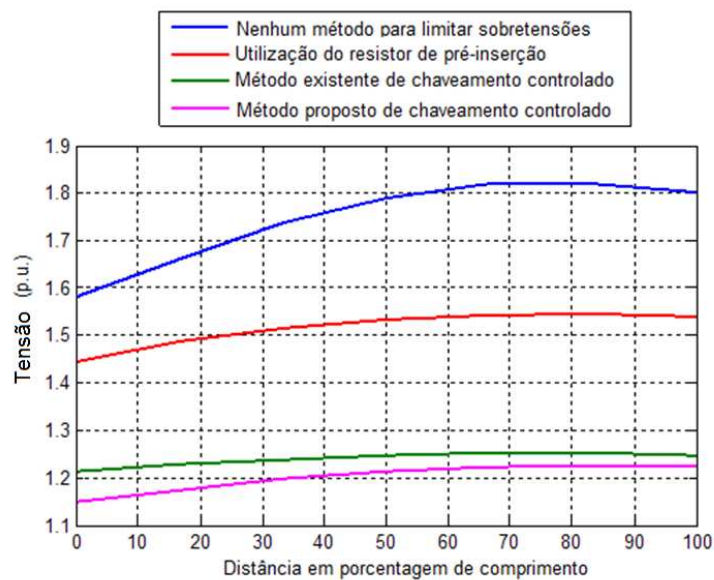
A Tabela 14 resume os resultados das simulações incluindo os tempos de religamento. Pode-se observar que utilizando o método proposto as sobretensões são ligeiramente menores do que para o método existente, mas apresenta grande vantagem na redução do tempo de religamento. Deve-se resaltar que o método existente foi modelado idealmente e que os tempos de religamento podem ser maiores do que os apresentados. (Em torno de 800 ms em lugar de 297 ms como apresentado Tabela 16 (FROEHLICH et al., 1997)).

Tabela 14. Sobretensões no terminal receptor da linha de transmissão

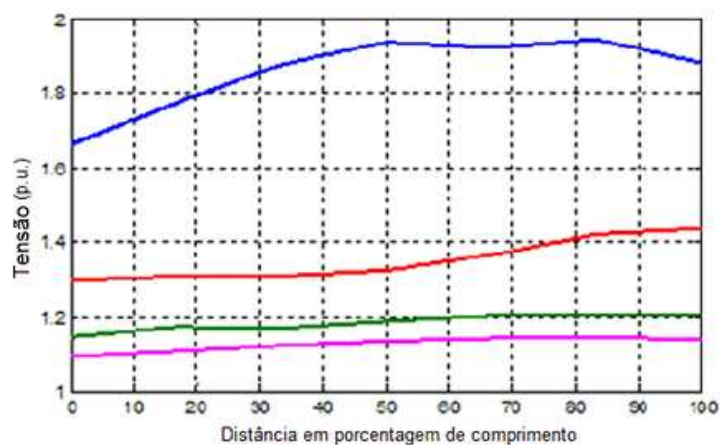
	90 % de compensação		70 % de compensação		50 % de compensação	
	Tensão no terminal da linha (pu)	Tempo de religamento (ms)	Tensão no terminal da linha (pu)	Tempo de religamento (ms)	Tensão no terminal da linha (pu)	Tempo de religamento (ms)
Sem controle	1,81	550	1,94	500	1,91	500
Resistor de pré-inserção	1,54	550	1,42	500	1,85	500
Método existente	1,25	740	1,28	350	1,61	297
Método proposto	1,24	360	1,15	230	1,59	239

A Figura 56 (a-c) apresenta o perfil de sobretensão para os três níveis de compensação analisados, incluindo para cada caso o método proposto bem como as alternativas analisadas anteriormente. As sobretensões foram plotadas em função da porcentagem de comprimento da linha, desde o terminal líder (0 %) até o terminal receptor (100 %).

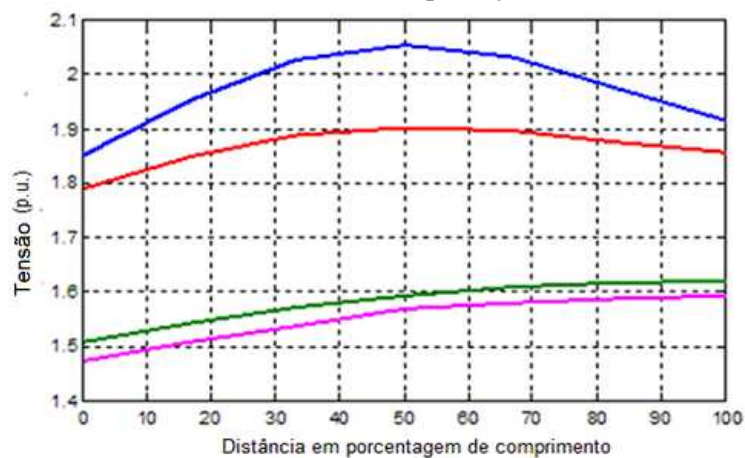
Pode-se concluir destes gráficos que a redução de sobretensões utilizando o método proposto é ligeiramente menor do que do método existente, mas a diferença é significativa quando comparada com o resistor de pré-inserção. Este comportamento se repete para os três níveis de compensação.



a) 90 % compensação



b) 70 % compensação



c) 50 % compensação

Figura 56. Perfis de sobretensões ao longo da linha

4.6 Análise comparativa de métodos de controle variando a comprimento da linha

Nesta seção se analisa o desempenho do método de controle proposto comparado ao desempenho do resistor de pré-inserção e do para-raios, mas desta vez tomando como parâmetro independente o comprimento da linha, ou seja, a análise considera diferentes comprimentos de linha visando identificar o impacto desta variação no desempenho dos métodos de controle analisados.

A modelagem da manobra de religamento inclui a representação da dispersão estatística dos contatos do disjuntor. Nesta análise comparativa foi usado um modelo de disjuntor implementado no PSCAD (WOODFORD, D.A 1997) que permite simular a dispersão dos contatos do disjuntor bem como o comportamento da suportabilidade dielétrica do “gap” entre os contatos do disjuntor.

4.6.1 Religamento tripolar usando chaveamento controlado

No âmbito do chaveamento controlado foi utilizado o método proposto para religamento tripolar de linhas de transmissão com compensação em derivação. Foi analisado o último trecho da linha que corresponde a 90 % de compensação. Neste caso o instante ideal para o religamento, determinado pelo algoritmo, ocorre no primeiro mínimo do batimento da onda de tensão entre os contatos do disjuntor.

A dispersão dos contatos do disjuntor foi considerada mediante a utilização da chave estatística implementada no PSCAD. Com a finalidade de avaliar a influência da precisão do instante de fechamento do disjuntor, 300 simulações estatísticas foram realizadas para cada um dos comprimentos de linha analisados considerando um desvio padrão dos contatos principais de 1 ms. Sendo que a sequencia de abertura da linha tem influência sobre a magnitude da carga residual, foram realizadas 100 simulações para cada sequência de abertura da linha fazendo um total de 300 simulações.

Os resultados destas simulações não podem ser generalizados, no entanto, mostram a magnitude de sobretensões para linhas que variam seu comprimento entre 200 km e 400 km. Um resumo dos resultados das curvas estatísticas é apresentado na Figura 57 e na Tabela 15. Os resultados correspondem às tensões no terminal receptor, onde ocorrem os mais altos

níveis de sobretensão, uma vez que as sobretensões em ambas as extremidades da linha não são limitados por pára-raios.

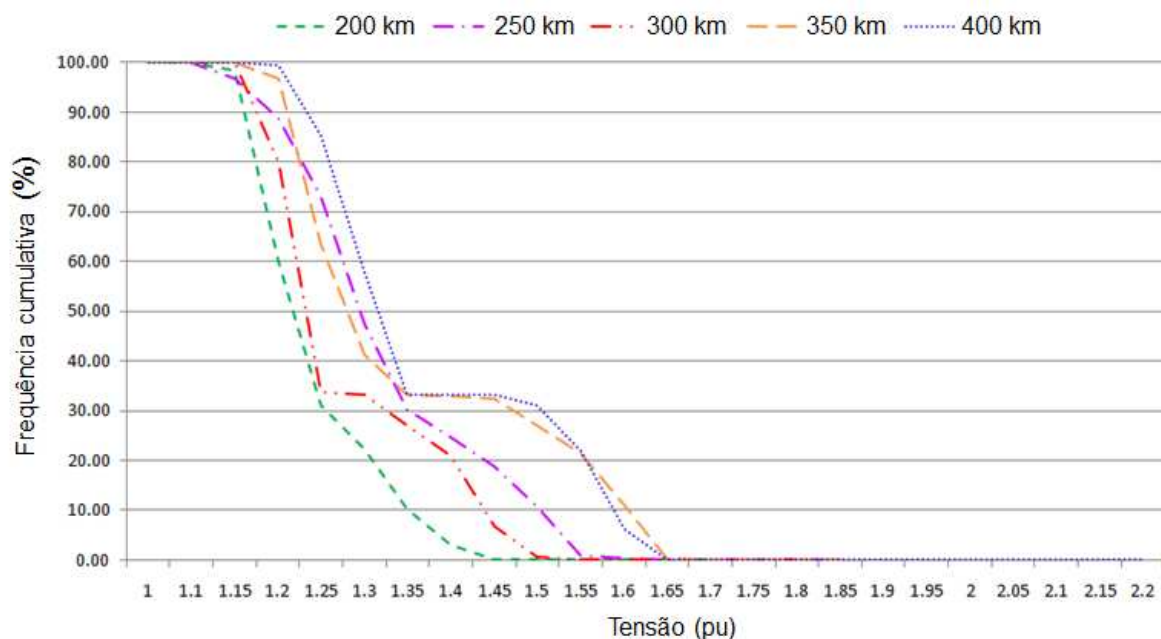


Figura 57. Sobretensões no terminal receptor usando chaveamento controlado.

Tabela 15. Sobretensões no terminal receptor usando chaveamento controlado.

	Tensão no terminal receptor (kV)				
	200 km	250 km	300 km	350 km	400 km
Média	1,2377	1,3208	1,2754	1,3541	1,3742
Mediana	1,2099	1,2968	1,2221	1,2705	1,3154
Máximo	1,4476	1,6116	1,5074	1,6534	1,6431
Desvio padrão	0,0715	0,1113	0,0985	0,1543	0,1390
Nível de confiança (95 %)	0,0081	0,0126	0,0112	0,0175	0,0158

Para a operação de religamento tripolar, a máxima sobretensão alcançada foi 1,65 p.u que não representa uma sobretensão severa para esta manobra. O tempo médio de religamento é 360 ms. A forma de onda da tensão no terminal receptor para uma das manobras de religamento da linha de transmissão de 250 km é mostrada na Figura 58.

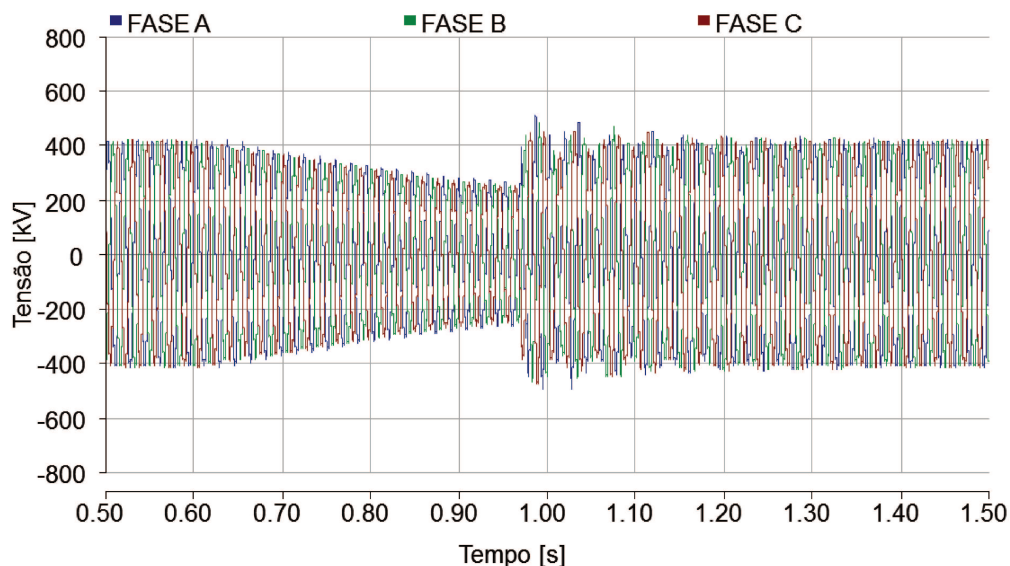


Figura 58. Tensão no terminal receptor no religamento com chaveamento controlado. LT de 250 km.

4.6.2 Religamento tripolar usando resistor de pré-inserção.

No segundo caso foi simulado o resistor de pré-inserção como método de controle. Neste estudo, um resistor existente em campo de 400Ω , com um tempo de inserção médio de 8 ms foi simulado. O tempo de fechamento médio do resistor de pré-inserção corresponde ao máximo do segundo batimento, com um desvio padrão dos contatos principais de 1 ms. Um desvio padrão de 1 ms foi considerado também para o by-pass do disjuntor.

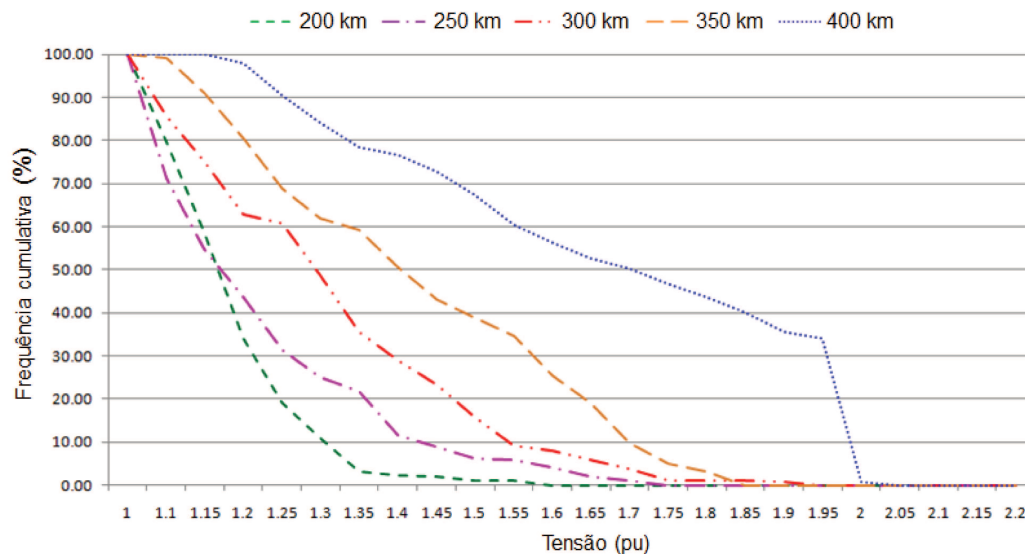


Figura 59. Sobreensões no terminal receptor usando resistor de pré-inserção

Os resultados estatísticos das sobretensões no terminal receptor da linha para 300 ensaios estatísticos realizados para cada comprimento de linha são apresentados na Figura 59 e na Tabela 16. Não são considerados para-raios instalados nos terminais da linha.

Tabela 16. Sobretensões no terminal receptor usando resistor de pré-inserção

	Tensão no terminal receptor (kV)				
	200 km	250 km	300 km	350 km	400 km
Média	1,4428	1,2172	1,3062	1,4210	1,6665
Mediana	1,2393	1,1676	1,2962	1,4120	1,7075
Máximo	1,9882	1,7385	1,9207	1,8363	2,0302
Desvio padrão	0,3795	0,1589	0,1870	0,2105	0,2826
Nível de confiança (95%)	0,0431	0,0181	0,0212	0,0239	0,0321

Para o religamento tripolar utilizando o resistor de pré-inserção a maior sobretensão obtida foi 2,03 pu para a linha de 400 km.

A forma de onda da tensão no terminal receptor para uma das manobras de religamento da linha de transmissão de 250 km usando resistor de pré-inserção é mostrada na Figura 58.

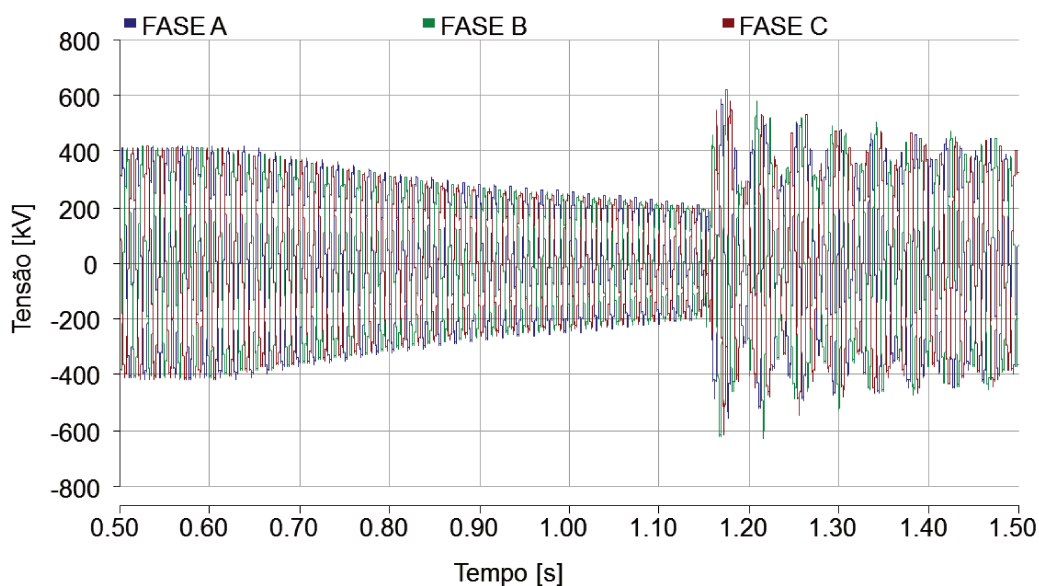


Figura 60. Tensão no terminal receptor no religamento com resistor de pré-inserção. LT de 250 km.

4.6.3 Religamento tripolar usando pára-raios

No último caso foram usados pára-raios com tensão nominal de 420 kV localizados nos terminais de linha. O tempo de religamento foi de 550 ms após a abertura da linha. Na Figura 61 cada curva representa 100 operações de religamentos para cada comprimento de linha e um resumo dos resultados estatísticos é apresentado na Tabela 17. É possível observar que é necessário o uso de pára-raios nas extremidades da linha associada a outro método de controle de sobretensão, como medida de segurança. Maiores níveis de limitação de sobretensões podem ser conseguidos usando pára-raios com menor nível de proteção e uma maior capacidade de dissipação de energia (MESTAS, 2007). O desvio padrão dos contatos do disjuntor para a simulação da chave estatística foi de 1 ms.

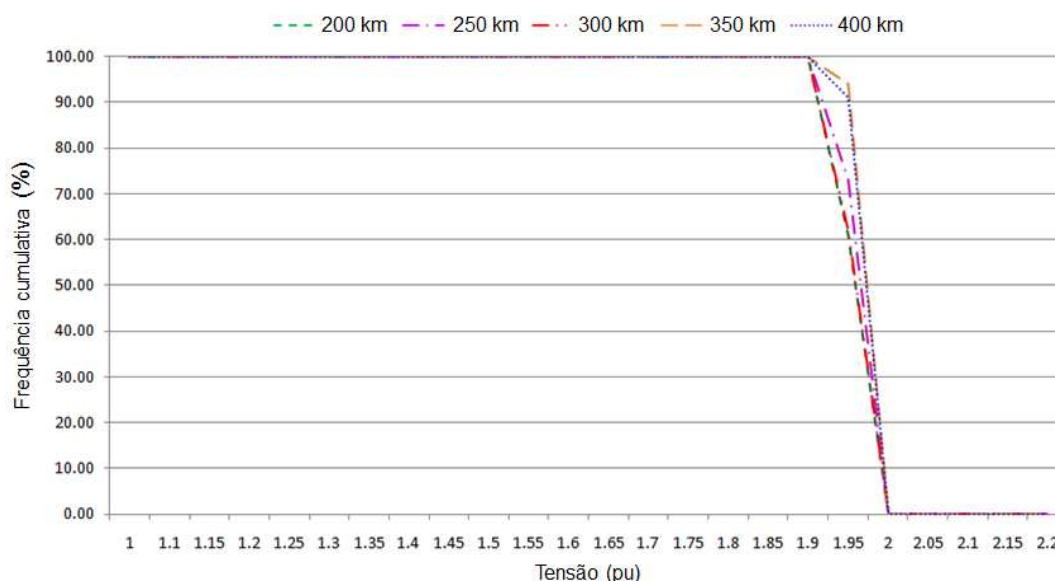


Figura 61. Sobretensões no terminal receptor usando para-raios

Tabela 17. Sobretensões no terminal receptor usando para-raios

	Tensão no terminal receptor (kV)				
	200 km	250 km	300 km	350 km	400 km
Média	1,9547	1,9555	1,9568	1,9631	1,9615
Mediana	1,9526	1,9538	1,9597	1,9627	1,9615
Máximo	1,9836	1,9809	1,9886	1,9882	1,9849
Desvio padrão	0,0133	0,0102	0,0214	0,0092	0,0090
Nível de confiança (95%)	0,0026	0,0020	0,0042	0,0018	0,0018

A Figura 62 mostra a forma de onda no terminal receptor para uma linha de 250 km usando pára-raios para controlar sobretensões numa das manobras de religamento executadas.

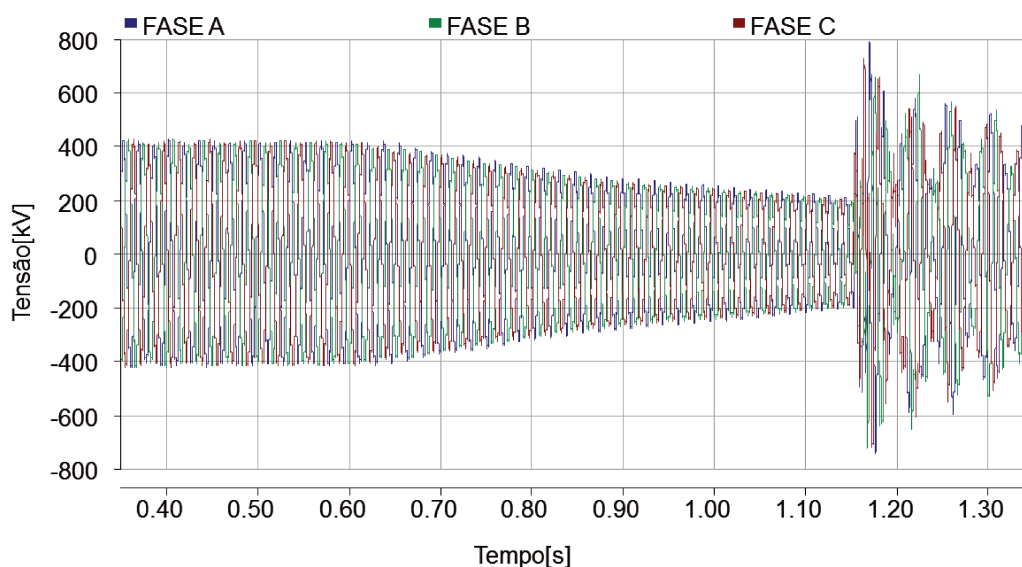


Figura 62. Tensão no terminal receptor usando pára-raios para LT de 250 km.

Finalmente, a Figura 63 mostra uma comparação das máximas sobretensões durante o religamento tripolar de linhas de transmissão com compensação em derivação, usando separadamente cada um dos três métodos analisados. A sobretensão foi medida no terminal receptor da linha e a análise foi realizada para cinco comprimentos de linha. O chaveamento controlado tem o melhor desempenho para limitar sobretensões em todos os casos.

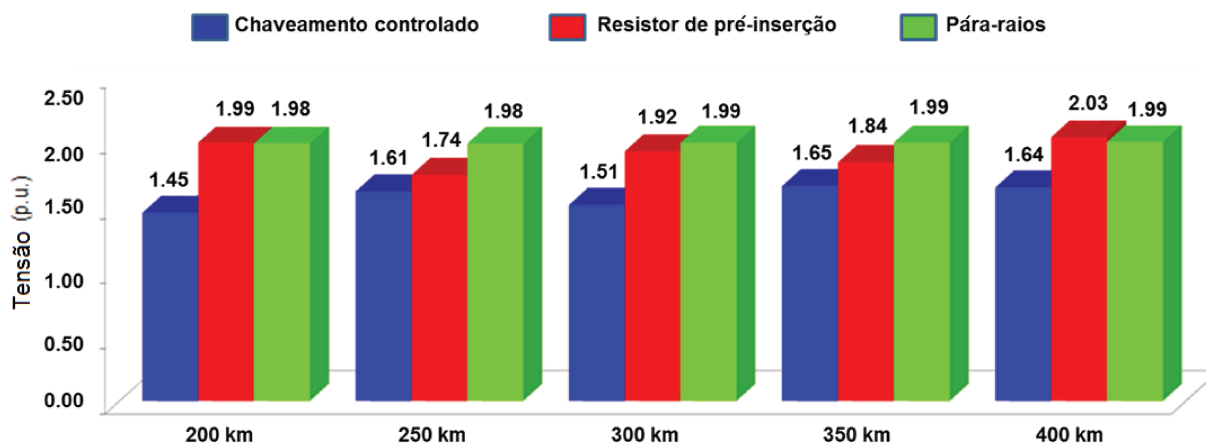


Figura 63. Comparação das máximas sobretensões (pu) no religamento tripolar usando diferentes métodos de controle

CAPÍTULO 5

ANÁLISE DE RESULTADOS

5.1 Aplicações

O método desenvolvido tem sua principal aplicação no controle de sobretensões e na redução do tempo de religamento tripolar rápido de linhas de transmissão com compensação reativa em derivação, sob condições de defeitos externos à linha. Para que o controlador atue somente em condições de defeito. Para que o controlador atue somente em condições de defeito externo o equipamento deve ser ligado num circuito independente, ou seja, não deve ser ligado no circuito de proteção da linha.

O religamento tripolar nestas condições pode ocorrer devido às seguintes condições:

- Quando valores elevados de sobretensões de manobra são erroneamente interpretados como falta por algum relé de proteção, resultando na saída da linha.
- No caso de linhas de transmissão em circuito duplo, quando os transitórios de manobra de uma das linhas se acoplam na outra linha, levando a uma operação incorreta da proteção.
- No caso de uma rejeição de carga seguida do desligamento de linha.
- Durante a recomposição do sistema elétrico após o desligamento de uma grande área.

5.2 Vantagens do método desenvolvido

- O método desenvolvido não depende do cruzamento por zero da onda da tensão entre os contatos do disjuntor. Esta é uma vantagem frente aos métodos existentes baseados na identificação do instante ótimo em função do cruzamento por zero, já que devido à

complexidade da forma da onda entre os contatos do disjuntor, o cruzamento por zero de alguns ciclos pode ser omitido, atrasando a identificação do instante ótimo para o religamento.

- O método é capaz de identificar a primeira região do mínimo do batimento da onda de tensão entre os contatos do disjuntor, garantindo assim o religamento no menor tempo possível e reduzindo o tempo de interrupção de fornecimento de energia.
- O método se adapta a qualquer grau de compensação em derivação das linhas. Para as linhas altamente compensadas, o disjuntor irá fechar no primeiro mínimo do batimento e para linhas pouco compensadas o tempo de religamento depende do tempo morto de atuação da proteção, sendo a sua identificação um procedimento automático.
- A identificação do instante ótimo do fechamento é obtida com vários ciclos de frequência fundamental de antecedência, possibilitando assim um ajuste adicional, se necessário, devido à dispersão dos polos e à característica dielétrica do disjuntor.

5.3 Observações referentes ao tempo morto

- Os valores típicos de tempo morto na manobra de religamento tripolar de linhas de transmissão de 500 kV no Brasil estão na faixa de 500 a 1100 ms, sendo a causa da abertura um defeito externo ou interno à linha. Este valor está baseado na determinação do tempo morto segundo o esquema da Figura 4 que prevê os tempos necessários para um religamento monopolar.
- O tempo morto no religamento monopolar depende principalmente da extinção do arco secundário que se mantém devido ao acoplamento capacitivo e indutivo com as outras duas fases energizadas da linha de transmissão, as quais permanecem conectadas transmitindo energia e também devido ao acoplamento com outras linhas paralelas que possam existir. Devido à abertura das três fases, em um religamento tripolar não existe acoplamento capacitivo e indutivo das fases energizadas e, portanto, não existe arco secundário.
- Em caso de uma abertura tripolar devido a uma falta monofásica, um fator importante no tempo necessário para a desionização do ar no disjuntor é a corrente e a duração da falta. No caso de religamento tripolar sob condições de defeito externo à linha não existe falta, não sendo necessário considerar um tempo de deinonização da falta.

- Para o caso em estudo foi assumido um tempo morto de 12 ciclos, considerando uma abertura tripolar sem defeito.
- O tempo morto assumido de 12 ciclos corresponde ao intervalo de tempo desde a abertura dos contatos do disjuntor até o primeiro restabelecimento da corrente nos polos do disjuntor no subsequente religamento mais o período previsível desde a energização do circuito para fechar o disjuntor até o contato mecânico do mesmo.

5.4 Simplificações adotadas

- O projeto básico do controlador foi desenvolvido utilizando medidas de tensão do sistema, sem que fossem representados os equipamentos usuais de medição, especificamente os transformadores de potenciais. Desta forma as distorções geradas pela redução da tensão, incluindo as decorrentes de eventual saturação, não foram analisadas.
- Foi utilizada uma alta taxa de amostragem nas medidas de tensão, uma vez que todos os dados gerados nas simulações foram utilizados com um passo de integração de $50\mu\text{s}$ pelo que o controlador trabalhou com uma taxa de amostragem de 20 kHz. A influência de taxas de amostragem menores não foi analisada.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusões

Foi desenvolvido um novo método que permite o religamento das linhas de transmissão em um intervalo de tempo menor do que o usual, reduzindo as sobretensões geradas durante a manobra. Durante o estágio na Universidade de Manitoba o método foi implementado em hardware físico, e seu desempenho foi testado utilizando o Simulador Digital em Tempo Real.

Os resultados das simulações off-line obtidas com o programa PSCAD e as simulações em tempo real executadas com o RTDS demonstraram a eficiência do método de controle na redução das sobretensões e na otimização do tempo morto, reduzindo assim o tempo de interrupção do fornecimento de energia.

O procedimento apresenta maior confiabilidade na determinação do primeiro mínimo do batimento de tensão, independente do cruzamento por zero da tensão o que faz com que o método seja adaptável a qualquer nível de compensação.

Este método permite também ter uma ampla margem de tempo para operar o disjuntor já que a detecção do mínimo do batimento ocorre com vários ciclos da frequência fundamental de antecedência, permitindo considerar a dispersão e a característica dielétrica do disjuntor.

A análise paramétrica demonstra que o método proposto funciona satisfatoriamente com diversos esquemas de compensação em derivação. A compensação série e a transposição da linha não influenciam o desempenho do método.

O método de controle desenvolvido tem um desempenho satisfatório para comprimentos de linha maiores, conforme foi demonstrado na análise paramétrica variando o comprimento da linha. Pode-se concluir que quando um dos principais critérios dos projetos de sistemas de transmissão for as sobretensões de religamento tripolar, como no caso de sistemas de EAT e UAT, o método desenvolvido viabilizaria a possibilidade de projetar linhas mais longas, o que significaria reduzir o número de subestações e o custo do projeto.

Finalmente, a utilização do controlador permite eliminar a necessidade do resistor de pré-inserção, reduzindo os custos dos disjuntores da linha de transmissão, proporcionando um aumento da vida útil dos equipamentos e a melhoria da qualidade no fornecimento da energia.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

- Analisar a influência da inclusão dos TPs no desempenho do controlador.
- Analisar o desempenho do controlador quando taxas de amostragem menores forem utilizados para obtenção do sinal de referencia.
- Incluir ruído nos sinais medidos para avaliar a robustez do controlador proposto.
- Analisar o desempenho do controlador em linhas de circuito duplo.
- Desenvolver o protótipo do dispositivo de controle para o religamento adaptativo de disjuntores de EAT utilizando processadores digitais de sinais comerciais e distintos aos utilizados pelo RTDS.
- Verificar o desempenho do protótipo através de simulação digital em tempo real utilizando o RTDS eliminando incertezas e simplificações existentes no uso do modelo.
- Testar o protótipo desenvolvido em um sistema de transmissão real.
- Comparar mediante simulações em tempo real o desempenho de um controlador comercial (baseado no método de controle existente) e desempenho do controlador desenvolvido com a finalidade de verificar o desempenho de ambos métodos.
- Ampliar o estudo e análise do religamento tripolar sob falta. Esta pesquisa permitiria complementar o estudo do religamento tripolar em condições de defeito externo e otimizar a redução de sobretensões e o tempo morto durante a manobra de religamento tripolar em geral.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABB. **Controlled switching - Application guide**, Edição 1, 2004.
- BLAHOUS, L., 1988. **Method for determining the time of reclosing a circuit breaker and device for carryng out this method**, United States Patent, Fevereiro 1988.
- CARVALHO, A.C.; LACORTE, M.; KNUDSEN O., **Improved EHV Line Switching Surge Control by Application of MO-arrester and Controlled Switching**, International Conference on Energy Management and Power Delivery, Proceedings of EMPD'95, 21-23, Singapore, Novembro 1995.
- CIGRE WG 13.00.1, **Controlled Switching: Non-Conventional Applications**, ELECTRA, No. 214, pp. 29-39, Junho 2004.
- COLCLASER, R.G.; WAGNER, C. L.; CONOHUE, E. P.; **Multi-step resistor control of switching surges**, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-88 pp. 1022-1028, Julho 1969.
- DANTAS K. M. C. **Chaveamento Controlado de Linhas de Transmissão**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, Setembro 2007.
- DANTAS K. M. C.; FERNANDES D; NEVES W. L. A.; SOUZA B. A.; FONSECA C. A. **Mitigation of Switching Overvoltages in Transmission Lines via Controlled Switching** IEEE PES General Meeting, Jullho 2008.
- DOMMEL, H. W. **Electromagnetic Transient Progam Reference Manual- EMTP Theory Book**, Department of Electrical Engineering-The University of British Columbia, Vancouver, Canadá, 1986.
- ESMERALDO P.C.V.; AMON F.J.; ARVALHO F.M.S.; CARVALHO A.S.;MORAIS A.S. **Circuit-breaker requirements for alternative configurations of a 500 kV transmission system**. IEEE Transactions on Power Delivery, v 14, n 1, January, 1999, pp 169-175.

- FROEHLICH, K.; HOELZL, C.; STANEK, M.; CARVALHO, A. C.; HOFBAUER, W.; HOEGG, P.; AVENT, B. L.; PEELO, D. F.; SAWADA, J. H. **Controlled Closing on Shunt Reactor Compensated Transmission Lines. Part I: Closing Control Device Development.** IEEE Transactions on Power Delivery, v. 12, n. 2, p. 734–740, April 1997.
- FROEHLICH, K.; CARVALHO, A.C.; AVENT, B.L.; HOELZL, C.; HOFBAUER, W.; PEELO, D.F.; STANEK, M.; HOEGG, P.; SAWADA, J.H. **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, Vol. 12, No. 2, pp. 741 -746, Abril 1997.
- GOLDSWORTHY, D.; ROSEBURG, T.; TZIOUVARAS, D.; POPE, J. **Controlled switching of HVAC circuit breakers: application, examples and benefits.** In: 61st Annual Conference for Protective Relay Engineers, 2008.
- IEEE POWER SYSTEMS RELAYING COMMITTEE, **Automatic reclosing of transmission lines,** IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 103, No. 1, pp. 234 - 245, Fevereiro, 1984
- IEEE Std C37.104. **Guide for automatic reclosing of line circuit breakers for AC distribution and transmission lines,** 2002.
- ITO H. **“Controlled switching technologies, state-of-the-art”,** Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002, pp. 1455-1460, Vol.2, Ásia Pacífica, 2002.
- KUNDUR, P. S., **Power system stability and control,** McGraw-Hill Education, 1994.
- LEGATE, A.C.; BRUNKE, J.H.; RAY J.J.; YASUDA E. **Elimination of closing resistors on EHV circuit breakers,** IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 3, No. 1, pp. 223-231-157, Janeiro 1988.
- MASSAUD A.; AQUINO F. **Adoção do religamento tripolar lento: Benefícios para o desempenho do sin e para concessionárias de transmissão.** In: IX Seminário Técnico de Proteção e Controle, Belo Horizonte, MG, Brasil, Junho de 2008.
- MESTAS P. **Análise comparativa de técnicas de controle de sobretensões transitórias nas manobras de energização e religamento de linhas de transmissão.** Dissertação

- (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, Brasil, Junho 2007.
- PILZ, G., SCHEGNER, P., WALLNER, C., MUHR, H.M., PACK, S. **An Algorithm for the Three-Pole Controlled Auto-Reclosing of Shunt Compensated Transmission Lines with a Optimization for the second and third Pole**, e & i Elektrotechnik und Informationstechnik, pp.446-451, 2004.
- PSCAD/EMTDC versão 4.2, **PSCAD®/EMTDC™ User'Guide**, Manitoba HVDC Research Centre, Canadá, 2005.
- RIBEIRO, J.R.; MCCALLUM M.E. **An application of metal oxide surge arresters in the elimination of need for closing resistors in EHV breakers**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 1, pp. 282 -291, Janeiro, 1989.
- ROCHA R.; CARVALHO A.C.; TÁVORA J.L. **Manobra controlada: Modelagem da suportabilidade dielétrica do disjuntor durante a operação de fechamento**. In: Grupo XI: Sobretensões, Coordenação de Isolamento e Interferências do XIV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Belém, Pará, 1997.
- RYAN, H.M. e ENGINEERS, **High voltage engineering and testing** - 2nd ed., Londres, Inglaterra, IEE Institution of Electrical Engineers, 2001.
- NAYLEN, R.; **Auto-reclosing**, ASEA Journal Vol. 6 pp. 127 – 132, 1979.
- SEYEDI, H.; SANAYE-PASAND, M.; DADASHZADEH M. R. **Application of transmission line surge arresters to reduce switching overvoltages**. In International Conference on Power Systems Transients (IPST'05); Montreal, Canadá, Junho, 2005.
- STENSTROM, L.; MOBEDJINA, M. **Limitation of switching overvoltages by use of transmission line surge arresters** In: CIGRE 1998 sc 33 International Conference, Zagreb, Croácia, 1998.
- THOMAS, R. **Controlled switching of high voltage SF6 circuit breakers for fault interruption** Dissertação de mestrado, Chalmers University of Technology; Göteborg, Suécia, 2004.
- WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION, **Westinghouse Electrical Transmission and Distribution** 4th edition, pp. 490 – 491, 1964.

WOODFORD, D.A.; WEDEPOHL L.M. **Transmission line energization with breaker pre-strike.** In: Conference on Communications, Power and Computing WESCANEX'97; pp. 105-108; Winnipeg, Manitoba, Canada; Maio, 1997

ZANNETA Jr., L. C. **Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência.** São Paulo, SP - Brasil: Edusp - Editora da Universidade de São Paulo, 2003.

ANEXO 1

SIMULAÇÃO DIGITAL EM TEMPO REAL

O desenvolvimento de metodologias e equipamento de análise, instrumentação, medição e controle para os sistemas elétricos de potência sempre esbarra em dois problemas básicos que são o da geração das situações de falhas no sistema e a validação das novas filosofias e equipamentos. Esta validação e testes necessitam de simuladores que possam gerar os sinais de corrente e tensão em tempo real, correspondente às situações reais de interesse, e que também possam receber sinais de controles externos, advindos dos equipamentos. A simulação digital em tempo real apresenta esta característica.

A Simulação Digital em Tempo Real permite que o comportamento dinâmico do sistema seja determinado e que as correntes e tensões para as diversas condições sejam aplicadas ao sistema de proteção real para determinar o seu desempenho através do monitoramento de sua resposta em tempo real. Assim sendo, é possível aferir e modificar os ajustes inicialmente propostos em tempo real, o que não pode ser feito através dos programas convencionais.

Tradicionalmente simuladores analógicos (TNAs) têm sido utilizados na realização de estudos e simulações em tempo real. Através da aplicação de componentes como capacitores, resistores e indutores em escalas reduzidas, os simuladores analógicos representam as características elétricas dos componentes do sistema elétrico.

Adicionalmente ao simulador analógico, softwares de simulações de transitórios eletromagnéticos estiveram disponíveis por muitos anos e tem sido utilizados nos estudos dos fenômenos dos sistemas de potência. A capacidade de modelagem dos modernos softwares [ATP(EMTP), PSCAD(EMTDC), NETOMAC] de simulações de transitórios eletromagnéticos é muito grande e assim estes podem representar com muitos detalhes o

sistema elétrico em estudo. Estes softwares se baseiam em modelos matemáticos para representar a capacidade individual dos componentes, e através da conexão destes modelos é que se propicia o estudo de um sistema.

A solução mais comum empregada pelos softwares de simulações de transitórios eletromagnéticos é a utilização de algoritmos baseados em cálculos numéricos, como por exemplo, o EMTP (ATP) de DOMMEL H. (1969). Nestes algoritmos, a regra trapezoidal de integração é utilizada para converter equações integrais (resultantes de análises nodais do sistema elétrico) em equações algébricas.

A aplicação da regra trapezoidal requer que a solução só seja computada em momentos discretos no tempo ao invés de uma solução contínua. Os momentos discretos são conhecidos como “passo de integração” e são denotados como Δt .

Todas as equações que representam o modelo do sistema de potência devem ser computadas em cada “passo de integração”. Modelos de sistemas grandes e complexos podem levar vários segundos ou até minutos para computar um único “passo de integração”, e neste caso a simulação é considerada como não realizada em tempo real. Porém, caso um computador seja capaz de executar os cálculos necessários continuamente para um único “passo de integração”, em um tempo menor ou igual ao “passo de integração”, então a operação em tempo real do simulador digital pode ser alcançada.

A.1 Simulador Digital em Tempo Real (RTDS^{MR})

O Simulador Digital em Tempo Real (RTDS) é um computador com propósito especial projetado para estudar fenômenos transitórios eletromagnéticos em tempo real. O RTDS é uma combinação de hardware e software projetado para alcançar o tempo real em uma simulação.

O hardware está baseado num Processador Digital de Sinais (DSP) e num Computador com um Conjunto Reduzido de Instruções (RISC) que utiliza técnicas avançadas de processamento paralelo, com a finalidade de conseguir as velocidades computacionais requeridas para manter uma operação contínua em tempo real.

O software do RTDS inclui modelos matemáticos dos componentes do sistema de potência requeridos para representar muitos dos elementos complexos que formam um sistema

de potência real. A técnica global de solução da rede empregada no RTDS está baseada na análise nodal.

O software do RTDS inclui também uma poderosa e amigável interface gráfica com o usuário (GUI) denominada RSCAD, mediante a qual o usuário é capaz de construir, rodar e analisar casos de simulações.

A.1.1 Hardware

O hardware do RTDS está organizado em *racks* de processadores acoplados, que por sua vez estão acoplados a outros *racks*. Os processadores num único *rack* estão ligados a um *backplane* comum. Os *racks* individuais podem estar diretamente ligados a outros *racks*. A Figura 64 ilustra os componentes dos *racks* e suas interligações.

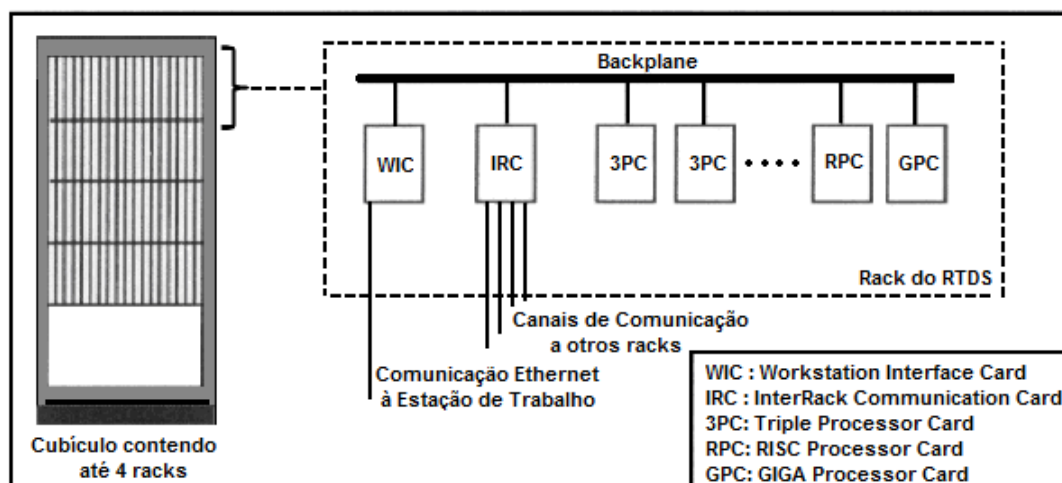


Figura 64. Arquitetura do hardware do RTDS.

Para realizar e manter as taxas de cálculo requeridas para a operação em tempo real, muitos processadores de alta velocidade operando em paralelo são utilizados pelo RTDS. Os seguintes tipos de cartões podem ser instalados em cada *rack* do RTDS.

a) Cartões de Procesamento

- Cartão de Triplo Processador (3PC)

Todo 3PC contém três processadores digitais de sinais independentes ADSP 21064 com uma velocidade de 40 MHz. O número de 3PC contidos em cada *rack* pode variar de instalação a instalação. O número de sistemas de potência e controle que podem ser incluídos

numa simulação depende do número de 3PC disponíveis. A função do cartão 3PC durante uma simulação é definida mediante software. É importante notar que todos os 3PC dentro de um RTDS são idênticos e que nenhum é dedicado a modelar um componente particular do sistema elétrico. Assim, durante um caso de simulação um determinado processador pode ser utilizado para modelar um transformador e na próxima estar modelando uma linha de transmissão, por exemplo.

Adicionalmente cada processador 3PC contém canais analógicos de saída, portas digitais de entrada e saída e uma porta óptica de entrada e saída opcional.

- Cartão do Processador RISC (RPC)

Cada RPC contém dois processadores IBM PPC 750CX do tipo RISC (Reduced Instruction Set Computer) que opera com uma velocidade de 600 MHz. Um cartão RPC pode resolver até 54 nós e 56 disjuntores.

O RTDS pode estar configurado só com cartões 3PC ou como uma combinação de 3PC e RPC. Um *rack* do RTDS pode conter até 20 placas de circuitos impressos. A configuração típica inclui os seguintes números de cartões de processadores:

$$12 * 3PC,$$

$$8 * 3PC + 1 * RPC$$

- Cartão do Processador GIGA (GPC)

Cada GPC contém dois processadores IBM 750GX RISC de dupla precisão, cada um operando a 1,0 GHz. Um processador GPC pode resolver uma rede que contém até 54 nós e 56 disjuntores. Um processador GPC pode ser usado para resolver uma rede e o processador restante pode ser usado para calcular os componentes. Um *rack* pode conter mais do que uma placa GPC. Apenas a solução de uma rede é permitida por *rack*. Portanto, se existirem duas placas GPC num *rack* o número máximo de nós ainda é 54 e o número máximo de disjuntores ainda é 56. Os cartões GPC podem ser usados num *rack* que também contém cartões 3PC e RPC.

Além dos processadores principais RISC, dois co-processadores estão instalados no cartão GPC. Os co-processadores estão reservados para processamentos extra potentes quando necessitarem resolver modelos complicados. O cartão GPC inclui 24 canais de saída analógica e até quatro portas óticas de entrada e saída.

b) Cartão de Interface de Trabalho (WIF)

Um cartão WIF é instalado por cada *rack* do RTDS. Cada WIF tem quatro funções principais:

- Diagnóstico do *rack*.
- Comunicação entre o RTDS e a estação de trabalho.
- Sincronização de casos utilizando múltiplos *racks*.
- Comunicações entre os cartões de um mesmo *rack*.

A comunicação entre o RTDS e a estação de trabalho do computador hospedeiro é feita usando um link ethernet. O WIF pode ser diretamente conectado à estação de trabalho usando um cabo tipo “*swap*” ou usando um tubo ethernet.

O WIF é responsável por manter o sincronismo entre os *racks* individuais num caso de simulação *multi-rack*. Os simuladores que incluem 3 ou mais *racks* requerem de um *Global Bus Hub* (GBH). O GBH é instalado na parte posterior do cubículo do RTDS e é usado para facilitar a comunicação direta de sinais entre os *racks* do RTDS durante uma simulação. O simulador RTDS que consiste em um *rack* só não requer um GBH. Os cartões WIF num RTDS de dois *racks* são conectados diretamente usando cabo de fibra óptica e não precisam GBH.

Dentro de um *rack* muitos sinais são trocados entre os cartões 3PC, WIF e IRC durante uma comunicação comum no *backplane*. O cartão WIF é responsável pela coordenação da comunicação do *backplane*.

c) Cartão de Comunicação Inter-racks (IRC)

Um cartão de Comunicação *Inter-racks* é instalado em cada *rack* de um simulador *multirack*. O IRC é usado para comunicar dados entre *racks* interconectados. Uma alta velocidade de conversão de dados de paralelo a série e série a paralelo permite que as conexões sejam feitas entre *racks*. Todos os IRC incluem seis rotas de comunicação de dados bidirecional. Um RTDS composto de sete *racks* pode assim ter comunicação direta entre todos os *racks*. Um par de diodos emissores de luz, também conhecidos como LED (Light-Emitting Diode) nos painéis frontais estão disponíveis para cada seis canais de comunicação no IRC. O LED verde, quando está aceso, indica que o canal associado está ativo para o caso de

simulação. O LED só se acenderá quando o caso de simulação estiver sendo executado e se o software do RTDS determinou que a comunicação direta entre os dois *racks* conectados mediante o canal é necessária. O LED vermelho, quando está aceso, indica que um grupo de dados inválidos foi recebido. O protocolo de comunicação em série entre o envio e a recepção inclui bits extra para a detecção de erro (não para a correção).

d) Cartão Digital de Entrada e Saída (DIO)

O DIO provê isolamento óptico de 32 canais digitais de entrada e 32 canais digitais de saída. Em nível de hardware, o RTDS é visto como um computador dedicado disponível em uma rede local. Qualquer computador conectado àquela rede local pode ter acesso ao simulador.

A.1.2 Software

O software para o RTDS é organizado dentro de uma hierarquia que contém três níveis separados: Interface gráfica do usuário de alto nível, compilador de nível médio e o sistema operativo multi-tarefas WIF de baixo nível. É exposto ao usuário do RTDS só o software de alto nível sendo os níveis mais baixos automaticamente acessados mediante o software de alto nível.

a) Interface Gráfica do Usuário

Todas as interações entre o usuário e o RTDS são realizadas através de um programa de interface comandado graficamente: o RSCAD^{RM}. Este programa representa uma família de ferramentas constituídas de vários módulos individuais utilizados para realizar várias tarefas na operação global do simulador. Os módulos são descritos a seguir.

- Administrador de Arquivos (File Manager)

O módulo administrador de arquivo representa o mais alto nível do RSCAD pelo qual o usuário administra o sistema graficamente. Este módulo auxilia ao usuário organizando um grande número de estudos e os muitos arquivos associados aos mesmos. (Figura 65)

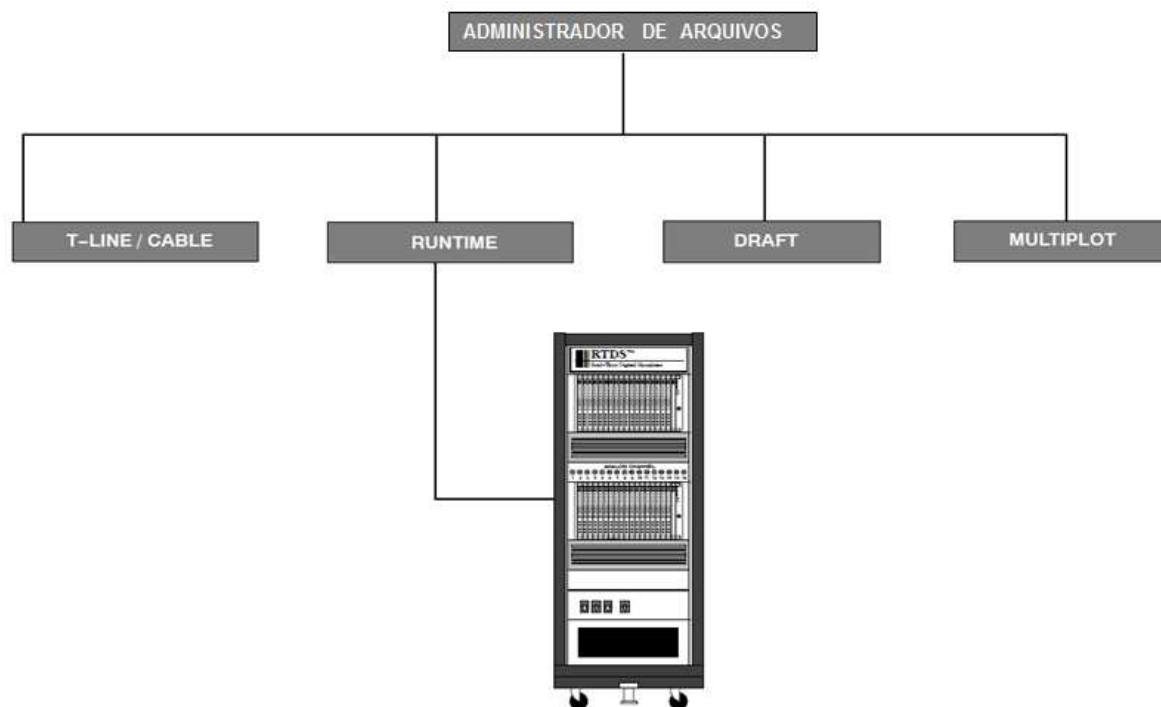


Figura 65. Módulos do software do RTDS.

- Descrição Gráfica (*Draft*)

É um módulo de pré-processamento utilizado para elaborar o circuito de simulação e entrar com os parâmetros associados. A tela do *Draft* é dividida em duas seções: A seção de biblioteca e a seção para implementar os circuitos. Ícones individuais dos componentes são selecionados da biblioteca e localizados na seção para implementar circuitos. A interconexão dos ícones de componentes individuais e parâmetros é realizada através de uma série de menus.

- Operação (*RunTime*)

É usado para controlar os casos de simulação que estão sendo realizados no hardware do RTDS. O controle da simulação, incluindo comandos de início/parada, iniciação de sequência, ajuste do conjunto de pontos, aplicação de faltas, operação do disjuntor, etc., são realizadas mediante o Console do Operador do *RunTime*. Adicionalmente, a medição *on-line*, aquisição de dados e funções de gravação de distúrbios estão disponíveis no *RunTime*.

- Linhas e Cabos (*T-Line e Cable*)

São usados para definir as propriedades das linhas de transmissão aéreas e dos cabos subterrâneos, respectivamente. Os dados são geralmente fornecidos em termos de geometria e configuração física. As constantes das linhas e dos cabos e as equações são resolvidas, ficando prontas para usar os dados pelo Draft. O Draft cruza as referências dos arquivos de saída de linhas e cabos mediante nomes.

- MultiPlot

É usado para processos posteriores e análises de resultados capturados e armazenados durante a simulação. Impressões de relatórios prontos podem ser geradas por este módulo.

b) Compilador

O software de nível médio do RTDS está dividido em duas áreas: o sistema operativo e o compilador. Ainda que nenhum destes elementos do software do RTDS seja diretamente acessado pelo usuário, deve-se mencionar suas funções na estrutura geral do software para proporcionar um melhor entendimento dos princípios operacionais do RTDS.

O sistema operativo do RTDS realiza muitas funções. Parte do sistema operativo se executa na estação de trabalho do computador hospedeiro enquanto outra parte se executa nos cartões de interface. A principal função do WIF na parte do sistema operacional é manipular os requerimentos de entrada e saída que são usualmente iniciados pelo usuário. O diagnóstico das provas do sistema realizado pelo administrador é também manejado através do sistema operativo do software que reside no WIF. Finalmente, os erros de comunicação entre *racks*, se ocorrerem, serão detectados pelo software do sistema operativo do WIF que por sua vez faz com que a simulação se detenha e o indicador LED apropriado se ilumine.

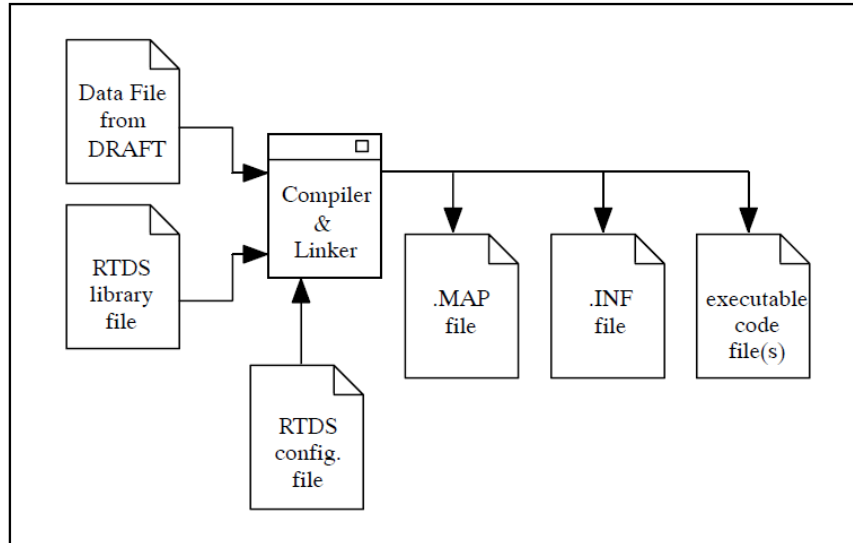


Figura 66. Módulos do software do RTDS.

A geração de um código executável requerido para cada caso novo de simulação é realizada através de um conjunto de programas especialmente desenvolvidos denominados em conjunto Compilador do RTDS. O compilador toma como entrada os dados do sistema de potência fornecidos pelo usuário através do *Draft* juntamente com um arquivo de configuração do hardware (*RSCAD\HDWR\configfile*). Como saída, o compilador produz todos os códigos de processamento paralelo requerido pelo processador digital de sinais, bem como a alocação de memória e os tempos de transferência de dados de comunicação.

Para gerar o código executável, o compilador acesa o nível mais baixo do software do RTDS que são os componentes da biblioteca, segundo mostrado na Figura 66. A biblioteca contém os módulos de código disponíveis para todos os modelos dos componentes do sistema de controle e do sistema de potência. Os módulos de código geralmente consistem em códigos de linguagem de máquina de baixo nível para os modelos de componentes individuais e também para a solução geral do sistema. Baseados no circuito definido pelo usuário, a alocação do processador e o acesso à biblioteca requerida serão realizadas pelo compilador do RTDS de uma maneira transparente para o usuário. A atribuição do processador pode ser automática (isto é, decidida pelo compilador) ou pode ser especificada manualmente pelo usuário durante a sessão do Draft. O produto final do processo de compilação é um arquivo (ou conjunto de arquivos) contendo o código do processador digital de sinais que é transferido ao RTDS através de ethernet usando o comando START do RunTime.

O compilador também gera um arquivo .MAP. O arquivo .MAP é um arquivo legível para o usuário que proporciona informação da alocação do processador, alocação do canal de entrada e saída, a escala dos canais de saída analógica e as condições iniciais do sistema. O arquivo .MAP é particularmente útil e importante quando conexões físicas são feitas entre o RTDS e um equipamento externo.

c) Componentes dos Sistemas de Potência, Controle, Proteção e Automação.

Os ícones que representam todos os modelos disponíveis do RTDS estão armazenados nas bibliotecas disponíveis no Draft do RTDS. Estas bibliotecas estão armazenadas no nível “Master” do Draft.

Apesar dos modelos dos componentes estarem escritos na linguagem de máquina, o usuário não tem acesso aos códigos destes componentes. Ele simplesmente utiliza as bibliotecas com os modelos já otimizados. A criação de novos modelos é possível através de linguagem computacional C.

A.1.3 A interface do simulador digital em tempo real

Entre as várias aplicações do *RTDS*, ocorrem casos onde a simulação é realizada através de uma interface com componentes físicos externos ao simulador, sendo necessária à utilização de cartões de isolamento óptico.

Para a realização de testes e simulações de componentes externos, tensões e correntes do sistema são enviados pelo *RTDS* através das saídas analógicas. Os sinais de comando de abertura e religamento (se disponível) são enviados ao simulador através das entradas digitais e utilizadas para operar os disjuntores do sistema modelado. Este “*loop*” fechado de simulação é único na simulação em tempo real e permite a avaliação do desempenho do equipamento testado e a resposta do sistema modelado onde este está sendo simulado.

Sistemas de controle e de proteção têm sido largamente testados utilizando-se esta técnica, por ser a que melhor representa a interação entre o sistema e o equipamento sob teste. Desenvolvimentos futuros nesta área devem focar a diminuição do intervalo de integração e do aumento do número de nós elétricos disponíveis para modelagem. Na Figura 67 é ilustrado como um teste de um sistema de proteção de linha de transmissão, em malha fechada, pode ser realizado utilizando-se um Simulador Digital em Tempo Real.

No exemplo mencionado, as tensões e correntes resultantes da modelagem no Simulador Digital em Tempo Real são convertidas para sinais analógicos, amplificados e enviados para os relés de proteção. Sinais digitais de saída dos relés, tais como abertura, religamento, permissivo, transferência de disparo e outros podem ser enviados para o Simulador Digital em Tempo Real, influenciando na atuação dos disjuntores. O Simulador Digital em Tempo Real também envia sinais digitais para as proteções, tais como status dos disjuntores e sinais de tele-proteção. A versatilidade desta metodologia oferece uma maior eficácia na realização de testes de modelo uma vez que permite a automação, via programação realizada pelo usuário, dos casos a serem simulados, permitindo realizar uma grande quantidade de simulações em um tempo reduzido. A possibilidade de execução de uma grande quantidade e variedade de simulações aliada à interação entre o equipamento e o sistema simulado, permitindo uma análise da desempenho do sistema de proteção desde a pré-falta, passando pelo evento propriamente dito, até o pós-falta possibilita uma avaliação criteriosa dos ajustes que devido à facilidade de reprodução de eventos, podem ser alterados buscando uma melhor otimização do desempenho.

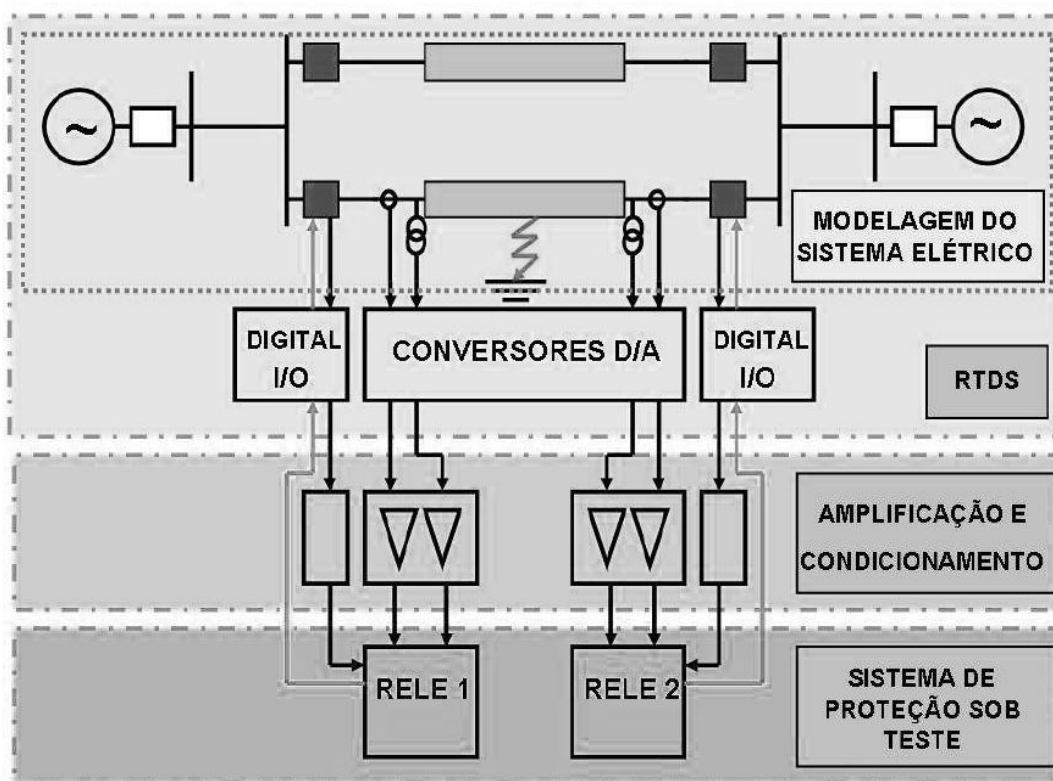


Figura 67 Exemplo de um teste de modelo de linha de transmissão em malha fechada

8.1.4 Vantagens da simulação digital em tempo real

As vantagens das ferramentas de simulação digital sobre os simuladores analógicos incluem a facilidade de utilização, baixa manutenção e custo inicial inferior à aquisição de vários equipamentos analógicos que constituem um simulador deste tipo.

Ao se utilizar simuladores digitais, os sistemas de potência podem ser modelados sem a necessidade de se conectar fisicamente e calibrar um grande número de componentes analógicos. Adicionalmente, utilizando-se tecnologia digital podem ser construídos sistemas de potência mais detalhados e precisos, o que é muito importante quando da simulação de grandes sistemas de corrente alternada e contínua.

Historicamente, a vantagem significativa oferecida pelos simuladores analógicos era a habilidade destes em operar em tempo real, permitindo testes de dispositivos de controle e proteção. Entretanto, com o advento dos simuladores em tempo real as vantagens das ferramentas digitais e dos simuladores analógicos são realizadas simultaneamente.

Uma das vantagens mais visíveis de um simulador completamente digital como o RTDS é a possibilidade de realizar novamente uma simulação já transcorrida em segundos (uma nova conexão física de componentes é completamente eliminada com o RTDS). Enquanto resultados obtidos de uma simulação estão sendo analisados, outro caso de simulação ser simulado sem mudar a organização física do simulador, o que permite que vários estudos completamente diferentes possam ser realizados simultaneamente.

Os benefícios mais importantes da utilização da simulação digital em tempo real são observados quando esta é utilizada para análise de fenômenos onde existem interações entre o sistema de potência e dispositivos de atuação rápida como compensadores estáticos, sistemas de transformação de corrente CA/CC e relés numéricos de proteção. O RTDS já foi utilizado diversas vezes em estudos envolvendo estes elementos dos sistemas de potência, tendo sua versatilidade e eficácia comprovada através da comparação de resultados simulados e ocorrências reais no sistema elétrico.