

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

**ANALISE COMPARATIVA DE TÉCNICAS DE CONTROLE DE
SOBRETENSÕES TRANSITÓRIAS NAS MANOBRAS DE
ENERGIZAÇÃO E RELIGAMENTO DE LINHAS DE
TRANSMISSÃO**

Autora: Patricia Mestas Valero

Orientadora: Profa. Dra. Maria Cristina Dias Tavares

Dissertação submetida à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas, para preenchimento dos requisitos exigidos para obtenção do Título de **MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA**.

BANCA EXAMINADORA:

Profa. Dra. Maria Cristina Dias Tavares - FEEC/UNICAMP

Prof. Dr. José Pissolato Filho - FEEC/UNICAMP

Prof. Dr. Fujio Sato – FEEC/UNICAMP

Prof. Dr. Washington Luiz Araújo Neves - UFCG

CAMPINAS, JULHO DE 2007

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

M564a Mestas Valero, Patricia
Análise comparativa de técnicas de controle de
sobretensões transitórias nas manobras de energização e
religamento de linhas de transmissão / Patricia Mestas
Valero. --Campinas, SP: [s.n.], 2007.

Orientador: Maria Cristina Dias Tavares
Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação.

1. Pára-raios. 2. Transitórios (Eletricidade). I. Tavares,
Maria Cristina Dias. II. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III.
Título.

Título em Inglês: Comparative analysis of control switching transient techniques
in transmission lines energization and reclosing maneuvers

Palavras-chave em Inglês: Surge arresters, Transients (Electricity)

Área de concentração: Energia Elétrica

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: José Pissolato Filho, Fujio Sato e Washington Luiz Araújo
Neves

Data da defesa: 10/7/2007

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Elétrica

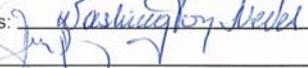
COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO

Candidata: Patrícia Mestas Valero

Data da Defesa: 10 de julho de 2007

Título da Tese: "Análise Comparativa de Técnicas de Controle de Sobretensões Transitórias nas Manobras de Energização e Religamento de Linhas de Transmissão"

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

Prof. Dr. Washington Luiz Araújo Neves: 

Prof. Dr. José Pissolato Filho: 

Prof. Dr. Fujio Sato: 

*A minha filha Ângela Patrícia,
fonte interminável de alegrias
e estímulos de viver sempre a mais.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, onipresença na minha vida.

À Profa. Dra. Maria Cristina Dias Tavares, pela oportunidade que me deu de realizar este trabalho, pela sua disponibilidade, paciência e dedicação com que me orientou. Minha especial admiração e gratidão.

Aos meus queridos pais, Rómulo e Olga, que tiveram uma colaboração de extrema importância, pelo amor, apoio emocional e compreensão que me permitiram dar seqüência aos meus estudos, mesmo nos momentos mais difíceis.

Aos meus irmãos, Roger e Abel, pelo imenso carinho e por ser sempre referência de vida pessoal, profissional e ética.

A Javier, pelo apoio e comunicação constante durante a realização deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo suporte financeiro.

A todos meus amigos e colegas, que me ajudaram a acalmar as saudades do meu querido Perú.

RESUMO

As sobretensões em um sistema de transmissão não podem ser evitadas assim como a sua total supressão é extremamente difícil, entretanto, suas amplitudes podem ser reduzidas.

Tradicionalmente, as sobretensões transitórias advindas das manobras de energização e religamento de linhas de transmissão são limitadas utilizando o “método convencional” como é o caso do uso de resistores de pré-inserção, este apesar de ser um método efetivo, apresenta uma aceitação de sua tecnologia tendente a diminuir devido ao alto custo de implementação e manutenção.

Nos últimos tempos as principais empresas de transmissão do mundo têm se mostrado mais favoráveis a utilização de pára-raios e chaveamento controlado de disjuntores para o controle de sobretensões, mas na prática esta aplicação está apenas sendo iniciada.

O presente trabalho foi realizado com o objetivo de analisar os diferentes métodos para o controle de sobretensões associadas às manobras de energização e religamento trifásico de linhas de transmissão em vazio determinando assim as melhores condições técnicas para a otimização destes processos.

Apresentam-se os resultados obtidos através de simulações com o programa PSCAD/EMTDC de um caso específico com dados reais dos geradores, transformadores, características dos trechos de linhas de transmissão, pára-raios e reatores de compensação em derivação tendo como base um sistema de 500 kV.

Palavras – chave: Energização, religamento, chaveamento controlado, pára-raios, PSCAD

ABSTRACT

The switching transient in transmission system cannot be prevented as well as its total suppression is extremely difficult, however, its magnitudes have to be limited.

For long transmission lines, traditionally the switching transient overvoltages due to energization and reclosure are limited by the “conventional method” as is the case of pre-insertion resistors in the line circuit breakers. Although this is an effective mitigation method it presents a decreasing acceptance due to the high cost of implementation and maintenance.

Recently, important transmission firms in the world have shown the trend to the use of surge arresters and controlled switching breakers, in practical this application is only being initiated.

The present work was realized with the objective of analyzing the different methods for the overvoltages control associates to energization and three-phase reclosing maneuvers of transmission lines to determine the best technique for the optimization of these processes.

The results was obtained through digital simulations with PSCAD/EMTDC software for an specific case with real dates for generators, transformer, transmission lines, surge arresters and shunt compensation reactors of a 500 kV system.

Keywords: Energization, three-phase reclosing, controlled switching, surge arresters, PSCAD

SUMÁRIO

RESUMO.....	vi
ABSTRACT	viii
LISTA DE FIGURAS.....	xiv
LISTA DE TABELAS.....	xx
LISTA DE SÍMBOLOS	xxii
CAPÍTULO 1.....	1
INTRODUÇÃO	
1.1 Relevância e motivação da pesquisa.	1
1.2 Objetivos da dissertação	3
1.3 Organização da dissertação	3
1.4 Trabalhos publicados.....	4
CAPÍTULO 2.....	7
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	
2.1 Histórico.	7
2.1.1 Cenário no Mundo.....	7
2.1.2 Cenário no Brasil.....	11
2.2 Vantagens do chaveamento controlado em linhas de transmissão.....	13
2.2.1 Disjuntor	13
2.2.2 Linha de Transmissão.....	14
2.2.3 Sistema de Potência.....	14
2.2.4 Outros Equipamentos.	15

2.3	Considerações Gerais de Custos Associados ao Chaveamento Controlado.....	15
2.4	Panorama Mundial da Utilização de Chaveamento Sincronizado	17
CAPÍTULO 3.....		19
DESCRIÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO ANALISADO		
3.1	Linha de Transmissão.....	23
3.2	Geradores.....	25
3.3	Transformadores.....	26
3.4	Reatores.....	28
3.5	Pára-raios.....	29
CAPÍTULO 4.....		33
PRINCIPAIS MÉTODOS DE LIMITAÇÃO DE SOBRETENSÕES		
4.1	Pára-raios.....	33
4.2	Chaveamento Controlado	36
4.2.1	Energização de linhas de transmissão	37
4.2.2	Religamento trifásico de linhas de transmissão.....	37
4.3	Resistor de Pré-Inserção	41
CAPÍTULO 5.....		45
SIMULAÇÕES E ANÁLISE DE RESULTADOS		
5.1	Energização de linhas de transmissão	45
5.1.1	Pára-raios.....	47
5.1.2	Chaveamento Controlado	62
5.1.3	Resistor de Pré-inserção	70
5.2	Religamento trifásico de linhas de transmissão.....	72
5.2.1	Pára-raios.....	79
5.2.2	Chaveamento Controlado	93
5.2.3	Resistor de Pré-inserção	96
5.3	Análise comparativa	98
CAPÍTULO 6.....		101
CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS		

6.1	Conclusões.....	101
6.2	Sugestões para trabalhos futuros	103
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		105
ANEXO 1.....		111
ANEXO 2.....		127
ANEXO 3.....		155
ANEXO 4.....		161

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Panorama mundial da utilização de chaveamento controlado entre 1984 e 2001.....	17
Figura 2. Esquema básico do sistema elétrico em estudo.....	21
Figura 3. Modelagem do sistema em estudo no PSCAD (Parte 1)	21
Figura 4. Modelagem do sistema em estudo no PSCAD (Parte 2)	22
Figura 5. Esquema da torre da linha de transmissão de 500 kV.....	23
Figura 6. Curva característica de tensão residual máxima para impulso de manobra (30/60 μ s). Pára-raios Classe 5 (Fonte: ABB Surge Arrester, 2004).....	31
Figura 7. Curva característica de tensão residual máxima para impulso de manobra (30/60 μ s). Pára-raios Classe 3 (Fonte: ABB Surge Arrester, 2004).....	31
Figura 8. Características de proteção de pára-raios ZnO.....	35
Figura 9. Seqüência de fechamento dos polos do disjuntor	37
Figura 10. Tensão entre os polos do disjuntor. LT sem compensação reativa em derivação....	39
Figura 11. Tensão no terminal receptor. Religamento LT sem compensação em derivação	39
Figura 12. Tensão entre os polos do disjuntor. LT com compensação reativa em derivação.	40
Figura 13. Tensão no terminal receptor. Religamento LT com compensação em derivação....	40
Figura 14. Circuito simplificado do resistor de pré-inserção.	41
Figura 15. Efeito do tempo de inserção do RPI em uma manobra de religamento de LT.	42
Figura 16. Valor ôhmico do RPI nas manobras de energização e religamento da L.T.	43
Figura 17. Sistema de medição do perfil de tensão ao longo da LT.....	46
Figura 18. Perfil de tensão.- Manobra de energização utilizando pára-raios de tensão nominal 420 kV. LT com 91 % de compensação reativa em derivação.....	48
Figura 19. Tensão na Barra 5. Energização com pára-raios 420 kV nos terminais e no meio da linha. LT com 91 % de compensação reativa em derivação	48

Figura 20. Energia dissipada nos pára-raios.- Energização da LT utilizando pára-raios 420 kV nos terminais e no meio da linha – LT com 91 % de compensação reativa em derivação.....	49
Figura 21. Perfil de tensão.- Manobra de energização utilizando pára-raios de tensão nominal 396 kV. LT com 91 % de compensação reativa em derivação.....	50
Figura 22. Tensão na Barra 5. Energização com pára-raios 396 kV nos terminais e no meio da linha. LT com 91 % de compensação reativa em derivação	50
Figura 23. Energia dissipada nos pára-raios. Manobra de energização utilizando pára-raios 396 kV nos terminais e no meio da linha - 91 % de compensação reativa em derivação.....	51
Figura 24. Perfil de tensão.- Manobra de energização utilizando pára-raios de tensão nominal 360 kV. LT com 91 % de compensação reativa em derivação.....	52
Figura 25. Tensão na Barra 5. Energização com pára-raios 360 kV nos terminais e no meio da linha. LT com 91 % de compensação reativa em derivação	52
Figura 26. Energia dissipada nos pára-raios. Manobra de energização utilizando pára-raios 360 kV nos terminais e no meio da linha - 91 % de compensação reativa em derivação.....	53
Figura 27. Perfil de tensão.- Manobra de energização utilizando pára-raios de tensão nominal 420 kV. LT com 75 % de compensação reativa em derivação.....	54
Figura 28. Tensão na Barra 5. Energização com pára-raios 420 kV nos terminais e no meio da linha. LT com 75 % de compensação reativa em derivação	54
Figura 29. Energia dissipada nos pára-raios. Manobra de energização utilizando pára-raios 420 kV nos terminais e no meio da linha - 75 % de compensação reativa em derivação.....	55
Figura 30. Perfil de tensão.- Manobra de energização utilizando Pára-raios de tensão nominal 396 kV. LT com 75 % de compensação reativa em derivação.....	56
Figura 31. Tensão na Barra 5. Energização com pára-raios 396 kV nos terminais e no meio da linha. LT com 75 % de compensação reativa em derivação	56
Figura 32. Energia dissipada nos pára-raios. Manobra de energização utilizando pára-raios 396 kV nos terminais e no meio da linha - 75 % de compensação reativa em derivação.....	57

Figura 33. Perfil de tensão.- Manobra de energização utilizando Pára-raios de tensão nominal 360 kV. LT com 75 % de compensação reativa em derivação.....	58
Figura 34. Tensão na Barra 5. Energização com pára-raios 360 kV nos terminais e no meio da linha. LT com 75 % de compensação reativa em derivação	58
Figura 35. Energia dissipada nos pára-raios. Manobra de energização utilizando pára-raios 360 kV nos terminais e no meio da linha - 75 % de compensação reativa em derivação.....	59
Figura 36. Seqüência de eventos. Fechamento dos polos do disjuntor no cruzamento exato pelo zero.	63
Figura 37. Seqüência de eventos. Fechamento dos polos do disjuntor com atraso de 60° entre fases	63
Figura 38. Diferenças nas formas de onda para as duas modalidades de fechamento dos polos do disjuntor – Tensão na Barra 4.....	64
Figura 39. Diferenças nos perfis de tensão para as duas modalidades de fechamento do disjuntor. L.T. com 91 % de compensação em derivação.....	65
Figura 40. Diferenças nos perfis de tensão para as duas modalidades de fechamento do disjuntor. L.T. com 75 % de compensação em derivação.....	65
Figura 41. Tensão na Barra 5. Energização da linha sem chaveamento controlado. LT com 91 % de compensação em derivação.....	67
Figura 42. Tensão na Barra 5. Energização da linha com chaveamento controlado. LT com 91 % de compensação em derivação.....	67
Figura 43. Perfis de tensão. Energização da linha utilizando chaveamento controlado. LT com 91 % de compensação em derivação.....	68
Figura 44. Tensão na Barra 5. Energização da linha utilizando chaveamento controlado. LT com 91 % de compensação em derivação.....	68
Figura 45. Perfis de tensão. Energização da linha utilizando chaveamento controlado. LT com 75 % de compensação em derivação.....	69
Figura 46. Tensão na Barra 5. Energização da linha utilizando chaveamento controlado. LT com 75 % de compensação em derivação.....	69
Figura 47. Perfis de tensão. Energização da linha utilizando resistor de pré-inserção. LT com 91 % de compensação em derivação.....	71

Figura 48. Tensão na Barra 5. Energização da linha utilizando resistor de pré-inserção. LT com 91 % de compensação em derivação.....	71
Figura 49. Perfil de tensão. Energização da linha utilizando resistor de pré-inserção. LT com 75 % de compensação em derivação.....	72
Figura 50. Tensão na Barra 5. Energização da linha utilizando resistor de pré-inserção LT com 75 % de compensação em derivação.....	72
Figura 51. Monitoramento da tensão dos polos do disjuntor no PSCAD.	74
Figura 52. Monitoramento das prováveis condições de fechamento dos polos do disjuntor.	74
Figura 53. Tensão entre os terminais dos polos do disjuntor. LT com 91 % de compensação em derivação.....	75
Figura 54. Tensão entre os terminais dos polos do disjuntor. LT com 75 % de compensação em derivação.....	75
Figura 55. Tensão na Barra 5. Religamento tripolar com chaveamento no instante desfavorável.LT com 91 % de compensação em derivação.....	78
Figura 56. Tensão na Barra 5. Religamento tripolar com chaveamento no instante favorável. LT com 91 % de compensação em derivação.....	78
Figura 57. Perfil de tensão. Religamento trifásico utilizando pára-raios de tensão nominal 420 kV. LT com 91 % de compensação em derivação	80
Figura 58. Tensão na Barra 5. Religamento trifásico da linha utilizando pára-raios 420 kV nos terminais e no meio da linha.- LT com 91 % de compensação em derivação.....	80
Figura 59. Energia dissipada nos pára-raios. Religamento trifásico utilizando pára-raios 420 kV nos terminais e no meio da linha. LT com 91 % de compensação em derivação.....	81
Figura 60. Perfil de tensão. Religamento trifásico da linha utilizando pára-raios 396 kV. LT com 91 % de compensação em derivação.....	82
Figura 61. Tensão na Barra 5. Religamento trifásico da linha utilizando pára-raios 396 kV nos terminais e no meio da linha.- LT com 91 % de compensação em derivação.....	82
Figura 62. Energia dissipada nos pára-raios. Religamento trifásico utilizando pára-raios 396.kV nos terminais e no meio da linha. LT com 91 % de compensação em derivação.....	83

Figura 63. Perfil de tensão. Religamento trifásico da linha utilizando pára-raios 360 kV. LT com 91 % de compensação em derivação.....	84
Figura 64. Formas de onda de tensão. Religamento trifásico utilizando pára-raios 360 kV nos terminais e no meio da linha.- LT com 91 % de compensação em derivação.....	84
Figura 65. Energia dissipada nos pára-raios. Religamento trifásico utilizando pára-raios de 360 kV nos terminais e no meio da linha.- LT com 91 % de compensação em derivação.....	85
Figura 66. Perfil de tensão. Religamento trifásico da linha utilizando pára-raios 420 kV. LT com 75 % de compensação em derivação.....	86
Figura 67. Tensão na Barra 5. Religamento trifásico da linha utilizando pára-raios 420 kV nos terminais e no meio da linha. LT com 75 % de compensação em derivação.....	86
Figura 68. Energia dissipada nos pára-raios. Religamento trifásico utilizando pára-raios 420.kV nos terminais e no meio da linha. LT com 75 % de compensação em derivação.....	87
Figura 69. Perfil de tensão. Religamento trifásico da linha utilizando pára-raios 396 kV. LT com 75 % de compensação em derivação.....	88
Figura 70. Tensão na Barra 5. Religamento trifásico da linha utilizando pára-raios 396 kV nos terminais e no meio da linha. LT com 75 % de compensação em derivação.....	88
Figura 71. Energia dissipada nos pára-raios. Religamento trifásico utilizando pára-raios 396 kV nos terminais e no meio da linha. LT com 75 % de compensação em derivação.....	89
Figura 72. Perfil de tensão. Religamento trifásico da linha utilizando pára-raios 360 kV. LT com 75 % de compensação em derivação.....	90
Figura 73. Tensão na Barra 5. Religamento trifásico da linha utilizando pára-raios 360 kV nos terminais e no meio da linha.- LT com 75 % de compensação em derivação.....	90
Figura 74. Energia dissipada nos pára-raios. Religamento trifásico utilizando pára-raios 360 kV nos terminais e no meio da linha. LT com 75 % de compensação em derivação.....	91
Figura 75. Perfil de tensão. Religamento trifásico com chaveamento controlado.	94
Figura 76. Tensão na Barra 5. Religamento trifásico utilizando chaveamento controlado. LT com 91 % de compensação reativa em derivação.....	95

Figura 77. Tensão na Barra 5. Religamento trifásico utilizando chaveamento controlado. LT com 75 % de compensação reativa em derivação.....	95
Figura 78. Perfil de tensão. Religamento trifásico utilizando resistor de pré-inserção.....	96
Figura 79. Tensão na Barra 5. Religamento trifásico com resistor de pré-inserção. 91 % de compensação reativa em derivação.....	97
Figura 80. Tensão na Barra 5. Religamento trifásico com resistor de pré-inserção. 75 % de compensação reativa em derivação.....	97
Figura 81. Máximas Sobretensões - Barra 5. Manobra de energização da LT.....	99
Figura 82. Máximas Sobretensões na Barra 5. Manobra de religamento da LT.....	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Custos referenciais associados aos métodos de controle.....	16
Tabela 2. Parâmetros elétricos de linha calculados para frequência de 60 Hz.....	24
Tabela 3. Resumo dos parâmetros básicos dos geradores na Barra 1 (B1).....	25
Tabela 4. Curva de Saturação do transformador elevador da Barra 1 (B1).....	26
Tabela 5. Dados do Transformador elevador da Barra 1 (B1)	26
Tabela 6. Curva de Saturação do Transformador da Barra 3 (B3).....	27
Tabela 7. Dados do Auto-Transformador da Barra 3 (B3).....	27
Tabela 8. Curva de Saturação do Transformador da Barra 5 (B5).....	28
Tabela 9. Dados do Auto-Transformador da Barra 5 (B5).....	28
Tabela 10. Parâmetros básicos dos reatores de linha e barra.....	29
Tabela 11. Curva dos pára-raios de Tensão Nominal 420 kV.....	30
Tabela 12. Resumo de Dados Técnicos de Pára-raios ZnO. (Fonte: ABB, 2005)	30
Tabela 13. Máximas sobretensões durante a manobra de energização no terminal e no meio da LT utilizando pára-raios para o controle – 91 % de compensação.....	60
Tabela 14. Máximas sobretensões durante a manobra de energização no terminal e no meio da LT utilizando pára-raios para controle – 75 % de compensação.....	60
Tabela 15. Energia consumida pelos pára-raios. Energização da LT.....	61
Tabela 16. Máximas sobretensões na manobra de religamento trifásico no terminal e no meio da LT utilizando pára-raios como método de controle – 91 % de compensação.....	92
Tabela 17. Máximas sobretensões na manobra de religamento trifásico no terminal e no meio da LT utilizando pára-raios como método de controle – 75 % de compensação.	92
Tabela 18. Energia consumida pelos pára-raios. Religamento da LT	92

LISTA DE SÍMBOLOS

ABB	Asea Brown Boveri
ATP	Alternative Transient Program
BPA	Bonneville Power Administration
CIGRE	International Council on Large Electric Systems
EAT	Extra Alta Tensão
EMTDC	Electromagnetic Transient including DC
EMTP	Electromagnetic Transient Program
EUA	Estados Unidos da América
FPL	Florida Power & Light
HVAC	High Voltage Alternating Current
IEC	International Electrotechnical Commission
LT	Linha de Transmissão
MOSA	Metal Oxide Surge Arrester
PSCAD	Power System Computer Aided Design
TACS	Transient Analysis of Control Systems
TRT	Tensão de Restabelecimento Transitória
Ur	Tensão Nominal
USD	United States Dolar
Zc	Impedância Característica
ZnO	Óxido de Zinco

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Relevância e motivação da pesquisa.

As sobretensões em um sistema de transmissão não podem ser evitadas, assim como sua total supressão é extremamente difícil, entretanto, suas amplitudes podem ser limitadas para que sejam compatíveis com os níveis de isolamento dos equipamentos do sistema. Por este motivo faz-se necessário pesquisar novas abordagens que busquem soluções cada vez mais eficientes com a finalidade de diminuir os efeitos das sobretensões nos sistemas de transmissão. Nesse sentido, a avaliação precisa do comportamento dos sistemas de potência frente a sobretensões torna-se uma missão prioritária para pesquisadores que buscam melhorar a proteção dos sistemas, a diminuição dos custos de projeto, a identificação de sistemas vulneráveis e seus impactos efetivos.

Durante a maior parte do tempo, os sistemas elétricos de potência e, especificamente, as linhas de transmissão operam em regime permanente (tensão e corrente a frequência nominal constante). No entanto, o dimensionamento dos sistemas elétricos deve contemplar, além das perturbações sustentadas, as perturbações transitórias. A linha de transmissão, em conjunto com seus sistemas de proteção, de controle e dos equipamentos de compensação reativa quando existentes, é dimensionada para suportar ocorrências de fenômenos transitórios

e sustentados, tendo como ferramentas bastante úteis nessa tarefa os simuladores de sistemas elétricos.

Simulações de transitórios eletromagnéticos são fundamentais para o planejamento e operação de redes elétricas. No caso de estudos de planejamento, a avaliação de fenômenos rápidos é determinante para o dimensionamento adequado dos equipamentos, que são sujeitos a surtos de tensão de origens diversas. No âmbito da operação, a análise de transitórios eletromagnéticos é decisiva tanto para a investigação de uma série de problemas no sistema quanto para a definição de medidas de operação através dos estudos pré-operacionais.

Neste trabalho aborda-se especificamente sobretensões transitórias durante as manobras de energização e religamento trifásico de linhas de transmissão, pois se medidas preventivas não forem adotadas, a tensão no terminal em vazio pode alcançar valores acima de 3.0 p.u., embora geralmente tais valores sejam menores (D'AJUZ et al., 1987).

A energização e religamento trifásico de linhas de transmissão são manobras frequentes, cuja amplitude dos transitórios é influenciada pela configuração do sistema bem como pelas características dos equipamentos. Tradicionalmente as sobretensões transitórias advindas destas manobras são limitadas por métodos convencionais. No caso estes métodos consistem na aplicação de resistores de pré-inserção nos disjuntores, muitas vezes associados a pára-raios de óxido metálico em ambos os terminais da linha. O uso de resistores de pré-inserção, apesar de ser um método efetivo, apresenta uma aceitação de sua tecnologia tendente a diminuir devido ao alto custo de implementação e manutenção.

Um outro método para reduzir as sobretensões de manobra é controlar o instante de fechamento do disjuntor através da utilização de um dispositivo de controle. Isto se deve ao fato de que os surtos originados de manobras de energização e religamento são dependentes das tensões através dos contatos do disjuntor no instante do seu fechamento, e são consideravelmente reduzidos se estas tensões estão próximas de zero. Experiências positivas de campo têm sido obtidas durante os últimos anos com equipamentos de sincronismo usados

para controlar manobras de bancos de capacitores e reatores em derivação em sistemas de alta tensão.

Pelo exposto, nesta dissertação analisam-se os métodos de limitação de sobretensões transitórias associadas às manobras energização e religamento trifásico de linhas de transmissão determinando assim as melhores condições técnicas para a otimização destas manobras. Esta análise não se aplica as linhas com comprimento elétrico próximo a meio comprimento de onda.

1.2 Objetivos da dissertação

A finalidade principal desta pesquisa visa estimar os níveis de sobretensões geradas em uma linha de transmissão durante as manobras de energização e religamento trifásico. Tal levantamento é fundamental para inferir o desempenho do “método convencional” de controle como é o caso do resistor de pré-inserção versus o chaveamento controlado de disjuntores e o uso de pára-raios nos terminais e ao longo da linha, para finalmente fazer uma análise comparativa destas técnicas de mitigação de sobretensões. Como parte da metodologia de desenvolvimento, realiza-se simulações computacionais utilizando-se o programa PSCAD/EMTDC.

1.3 Organização da dissertação

A presente dissertação é apresentada em 7 capítulos, conforme descrito a seguir:

No capítulo 2, a revisão bibliográfica dos estudos realizados no âmbito mundial e no Brasil referente ao emprego de métodos de controle de sobretensões em linhas de transmissão é apresentada. Esta informação é complementada com as vantagens e o panorama mundial da utilização do chaveamento controlado de disjuntores.

No capítulo 3 é descrito o sistema elétrico analisado e são apresentados os dados dos principais componentes do sistema.

No capítulo 4 é apresentada uma descrição dos principais métodos utilizados para mitigar sobretensões durante as manobras de energização e religamento trifásico de linhas de transmissão.

No capítulo 5 são comparados e avaliados os resultados das simulações computacionais referentes ao desempenho dos métodos de controle de sobretensões geradas durante as manobras de energização e religamento trifásico de linhas de transmissão.

No capítulo 6, as conclusões obtidas com a realização do presente trabalho bem como algumas sugestões para trabalhos futuros são apresentadas.

No anexo 1 são abordados os aspectos referidos aos principais componentes do programa PSCAD/EMTDC utilizado nesta dissertação, bem como os conceitos fundamentais que este software utiliza para simulação de transitórios.

No anexo 2 se realiza uma breve descrição do programa PSCAD/EMTDC completando esta informação com um guia resumido para sua utilização.

No anexo 3 são apresentados os dados e simulações realizadas utilizando pára-raios de tensão nominal 420 kV, existentes em campo.

No anexo 4, as simulações realizadas utilizando resistores de pré-inserção de 211Ω correspondente ao valor da impedância característica são apresentadas.

1.4 Trabalhos publicados

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

MESTAS P.; TAVARES M.C.; **“Análise comparativa de técnicas de controle de sobretensões transitórias na manobra de energização de linhas de transmissão”** XIX In: Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – SNPTEE; Rio de Janeiro, Brasil; Outubro 2007. (Aceito)

MESTAS P.; TAVARES M.C.; **“Comparative analysis of control switching transient techniques in transmission lines energization maneuver”** In: International Conference on Power Systems Transients (IPST'07); Lyon, França; Junho, 2007.

MESTAS P.; TAVARES M.C.; **“Análise Comparativa das Técnicas de Redução de Sobretensões na Manobra de Energização de Linhas de Transmissão”** In: Encontro de Pesquisadores em Sistemas de Potência - SisPot 2006, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação FEEC - UNICAMP; Campinas SP, Brasil; 10 a 12 de abril de 2006.

MESTAS P.; TAVARES M.C.; **“Estudo e análise comparativa de técnicas de controle de sobretensões transitórias durante a manobra de energização de linhas de transmissão”** In: 1º Encontro de Ciência e Tecnologia dos Estudantes Latino-Americanos da Unicamp; Campinas SP, Brasil; 08 de novembro de 2005.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Histórico

O objetivo principal deste capítulo é apresentar, de maneira resumida, a revisão bibliográfica das pesquisas envolvendo a utilização dos métodos de controle de sobretensões em linhas de transmissão no âmbito mundial e no Brasil.

2.1.1 Cenário no Mundo

LEGATE et al. (1988) reporta a experiência da Bonneville Power Administration (BPA) com sede em Portland, Oregon, EUA, com os complexos disjuntores de potência de Extra Alta Tensão (EAT) equipados com resistores de até duas etapas de inserção, os quais demonstraram funcionamento mecânico ineficiente e converteu-se na causa mais comum de falha dos disjuntores. Além disso, a experiência de um período de mais de dois anos (1978-1980) com a utilização destes disjuntores, determinou que o projeto dos mesmos era conservativo e precisava ser reavaliado.

A Bonneville Power Administration (BPA) foi uma empresa pioneira na utilização de disjuntores sem resistores de pré-inserção, empregando como alternativa para limitar as sobretensões de chaveamento a instalação de pára-raios de óxido metálico (MOSA) nos terminais da linha e o chaveamento controlado de disjuntores.

Neste caso realizaram-se duas formas de chaveamento controlado:

- Fechamento escalonado (*Staggered closing*) que consiste no fechamento individual dos polos do disjuntor com uma separação aproximada de um ciclo, onde o polo seguinte não é fechado até que a tensão transitória provocada pelo polo anterior tenha se extinguido.
- Fechamento controlado (*Polarity closing*) que consiste no fechamento independente de cada fase quando as tensões nos terminais de cada fase têm a mesma polaridade.

Efetuaram-se testes de campo em uma linha de 500 kV com comprimento de 188 km com o propósito de coletar dados para a validação dos resultados obtidos no estudo de um modelo digital realizado em EMTP. Estes testes apresentaram resultados semelhantes aos estudos computacionais, validando as técnicas de chaveamento controlado e uso de pára-raios nos terminais da linha para o controle de sobretensões nas manobras de energização e de religamento trifásico de linhas de transmissão e permitiram concluir que linhas de 500 kV com um comprimento maior que 320 km podem ser energizadas com sucesso sem o uso de resistores de pré-inserção.

Em outro estudo, RIBEIRO e McCALLUM (1989) reportam a experiência da Florida Power & Light Co. (FPL) de Miami, EUA em 1985, quando começou a ocorrer problemas com os mecanismos dos resistores de pré-inserção em uma grande percentagem dos disjuntores de potência de 500 kV a SF₆ instalados em seu sistema. A primeira intenção da FPL foi encomendar as partes para reconstruir os mecanismos. No entanto, a pouca confiabilidade dos resistores e o possível impacto adverso na confiabilidade do sistema a obrigaram a contemplar outras alternativas.

Coincidentemente, em 1986 a FPL completou um projeto para a instalação de pára-raios de óxido metálico com tensão nominal de 396 kV. Este projeto foi motivado por razões de confiabilidade e segurança do pessoal não relacionada ao desempenho dos disjuntores. No entanto, frente ao funcionamento ineficiente dos mecanismos dos resistores de pré-inserção, uma alternativa atraente foi retirar estes e contar com as características dos pára-raios de óxido metálico para atenuar as amplitudes de sobretensões de chaveamento.

As simulações realizadas em EMTP para um sistema de 500 kV, num trecho de linha de 277 km de comprimento, determinaram como principal conclusão que na presença de pára-raios de óxido metálico nos terminais da linha os resistores de pré-inserção não eram necessários. Baseado nestes resultados a FPL comprou e instalou em seu sistema novos disjuntores de 500 kV sem resistores de pré-inserção, reportando uma experiência de campo positiva.

Posteriormente, BLADOW e WEAVER (1990) apresentam os estudos que investigam o uso de pára-raios de óxido metálico em lugar de resistores de pré-inserção para o controle de sobretensões de chaveamento, no Projeto de Transmissão Califórnia – Oregon (COPT) que é uma interconexão de 500 kV entre o Noroeste do Pacífico e Califórnia nos EUA, com uma extensão de 554 km e 75 % de compensação série. Os resultados do estudo de transitórios em EMTP confirmam a efetividade dos pára-raios de óxido metálico para reduzir os níveis de sobretensões de chaveamento e o benefício adicional de reduzir os valores da tensão de restabelecimento transitória (TRT).

Em um outro estudo, CARVALHO et al. (1995), analisa a possibilidade de controle de sobretensões de chaveamento em linhas de transmissão mediante o uso de pára-raios de óxido metálico e chaveamento sincronizado. A análise se realiza numa linha de transmissão de 550 kV, abrangendo os comprimentos de linha mais comuns, ou seja, de 100 km a 400 km. A compensação em derivação é também variada de 35 % a 70 % da potência reativa total da linha de transmissão. A intenção básica é mostrar mediante simulações digitais a redução de sobretensões de chaveamento obtidas pelos pára-raios de óxido metálico e o ganho adicional quando atua junto ao chaveamento sincronizado.

Todas as simulações foram realizadas com o programa ATP e demonstraram que os pára-raios de óxido metálico juntamente com o chaveamento controlado são eficientes no controle de sobretensões de chaveamento, embora a generalização de resultados seja perigosa e nem sempre acompanha as tendências esperadas. Isto ocorre devido à influência de um grande número de parâmetros do sistema como a configuração da linha, o comprimento da linha, a resistividade do solo, as características dos componentes modais, grau de compensação em derivação e as características dos pára-raios entre outros.

Segundo FROEHLICH et al. (1997) para as linhas de 500 kV, da BC Hydro, Canadá, construídas entre 1993 e 1994 tomou-se a decisão de limitar o nível de tensão de chaveamento de 2 p.u. a 1,7 p.u. ou menos; isto teria que ser conseguido mediante o uso de pára-raios de óxido metálico e chaveamento controlado no disjuntor.

O estudo foi realizado com o programa EMTP, para energização e religamento trifásico de uma linha de 500 kV, 330 km, equipada com reatores em derivação de 135 MVA nos terminais e um banco de capacitores em série de 605 MVA localizada no meio da linha. O artigo conclui que a limitação de sobretensões de manobra em sistemas de 500 kV pode ser conseguida com o uso de pára-raios e controladores do fechamento de disjuntores, tornando desnecessário o uso de resistores de pré-inserção. Para esta finalidade são necessários requisitos especiais para os equipamentos envolvidos de tal forma a garantir o funcionamento do disjuntor.

STENSTRÖM e MOBEDJINA (1998) descrevem o efeito dos pára-raios em linhas de Extra Alta Tensão (EAT) no que refere a limitação de sobretensões de chaveamento. O estudo foi feito usando EMTP em linhas de transmissão de 550 kV e 420 kV, com comprimentos que variam de 100 km a 300 km, e graus de compensação em derivação de 30 % e 60 %. O número de pára-raios utilizado foi variado em função do comprimento e grau de compensação da linha de transmissão, obtendo-se melhores resultados com a utilização de um pára-raios adicional no meio da linha ou dois pára-raios a 1/3 e 2/3 da linha além dos pára-raios localizados nos terminais, o que permite dispensar a utilização do resistor de pré-inserção e do fechamento sincronizado.

ITO (2002) apresenta o estado da arte do chaveamento controlado abordando requisitos dos ensaios e as aplicações em manobras de banco de capacitores em derivação, banco de reatores em derivação, transformadores e linhas de transmissão. Segundo o autor, desde 1993 vêm crescendo rapidamente o número de usuários satisfeitos, por diferentes aplicações do chaveamento controlado baseadas nas tecnologias atuais, que contam com algoritmos auxiliados por sensores avançados e por tecnologia digital confiável. No que se refere aos disjuntores de operação monopolar, o autor considera como parâmetros importantes a taxa de decrescimento da rigidez dielétrica, os tempos de abertura e fechamento que dependem de condições externas e a relação entre o tempo ocioso e o tempo de operação.

O grupo de trabalho 13.07 do CIGRE denominado Controlled Switching of HVAC Circuit-Breakers, resumindo e avaliando os trabalhos realizados preparou um primeiro documento denominado o Estado da Arte, onde são tratadas em detalhe as reduções de transitórios potencialmente realizáveis para vários casos de chaveamento. Em particular o foco estava nas aplicações mais comuns de chaveamento de reatores em derivação, banco de capacitores e linhas de transmissão. A teoria fundamental e os aspectos científicos foram apresentados e os papéis dominantes das características de disjuntor foram claramente identificados. (CIGRE, 2001)

Com base na informação apresentada no primeiro documento em 1995 o grupo de trabalho 13.07 do CIGRE preparou um segundo documento para proporcionar um guia para o planejamento, especificação e provas do uso de chaveamento controlado dirigido a fabricantes e usuários (CIGRE, 2001). Já em 2004, o grupo de trabalho A3.07 (antes 13.07) apresenta um documento, complementando os anteriores onde apresentou indicadores quantitativos e qualitativos dos benefícios econômicos que podem ser usados como um suporte para estudos comparativos e análises de custo - benefício. (CIGRE, 2004).

2.1.2 Cenário no Brasil

Segundo CARVALHO et al. (1997), normalmente na empresa FURNAS as sobretensões transitórias advindas de manobras de energização e religamento trifásico

automático de linhas de transmissão de 500 kV são limitadas mediante a aplicação de pára-raios de óxido de zinco em ambos terminais da linha e resistores de pré-inserção nos disjuntores.

As empresas concessionárias no mundo começaram a se movimentar na direção de utilização de sincronizadores para o fechamento controlado de disjuntores e FURNAS decidiu analisar no que diz respeito às manobras de energização e religamento automático tripolar de linhas de transmissão estas duas tendências de métodos de limitação de sobretensões transitórias.

Segundo os autores os resultados das simulações estatísticas efetuadas com o EMTP que foram utilizados para se estimar a possibilidade dos pára-raios se danificarem e para cálculo do risco de falha da linha concluem que, para o sistema estudado, o sincronizador é um método tão adequado de controle das sobretensões de manobra quanto o resistor de pré-inserção.

ROCHA et al. (1997) descreve um modelo desenvolvido para uso com o programa ATP, para simular a manobra controlada em sistemas de transmissão. O modelo implementa a característica dielétrica do disjuntor durante a operação de fechamento, bem como a dispersão do tempo de operação do disjuntor e a imprecisão do instante ótimo determinado pelo controlador. A representação da característica dielétrica do disjuntor, aplicável à operação de fechamento, foi implementada através da rotina TACS (Transient Analysis of Control Systems). Este modelo determina a tensão de pré-arco do disjuntor, oferecendo uma avaliação do desempenho do disjuntor e do controlador na manobra controlada.

Em outro estudo FERNANDEZ et al. (1998); ESMERALDO et al. (1999); FERNANDEZ et al. (2004), descrevem o estudo feito na etapa de planejamento para determinar as sobretensões impostas sobre disjuntores de linha de uma nova expansão do sistema de transmissão de FURNAS a serem instalados possivelmente na região central do Brasil.

O estudo considerou três configurações de linhas de transmissão: uma configuração convencional com três condutores por fase e duas configurações com torres compactas, uma com quatro condutores por fase e outra com seis condutores por fase, neste último caso as linhas teriam alta potência característica.

Para as simulações utilizou-se o programa ATP considerando uma linha de transmissão de 500 kV e 250 km, com reatores em derivação de 136 MVA nos terminais, onde quatro alternativas foram estudadas para a limitação de sobretensões: Resistor de pré-inserção, fechamento sincronizado, fechamento escalonado (*staggered closing*) e uso de pára-raios de óxido metálico nos terminais. O estudo conclui que para energização e religamento trifásico rápido, a utilização de pára-raios de óxido metálico combinado com o fechamento sincronizado e o uso de resistores de pré-inserção são igualmente viáveis.

2.2 Vantagens do chaveamento controlado em linhas de transmissão.

O chaveamento controlado apresenta claras vantagens as quais, para um melhor entendimento, são consideradas em relação ao disjuntor, à linha de transmissão, ao sistema de potência e outros equipamentos, segundo a revisão bibliográfica efetuada.

2.2.1 Disjuntor

- A principal vantagem de utilizar o chaveamento controlado de disjuntores para mitigar sobretensões é a eliminação do resistor de pré-inserção. Embora o desempenho das duas soluções seja similar para manobra de energização, o chaveamento sincronizado tem custos iniciais menores devido à eliminação do resistor de pré-inserção e câmaras auxiliares. (FROEHLICH et al. 1997; CARVALHO et al. 1995; CIGRE, 2004);

- Incremento na confiabilidade do disjuntor devido à redução do número de partes móveis, o que diminui diretamente o risco de falha. (LEGATE et al., 1988, RIBEIRO e McCALLUM, 1989);
- Redução dos custos de manutenção do disjuntor. (CIGRE, 2004);
- Os custos de instalação do controlador são menores que a modificação do equipamento primário, ou seja, adicionar resistor de pré-inserção ou os pára-raios. (CIGRE, 2004).

2.2.2 Linha de Transmissão

- Quando um dos principais critérios dos projetos de sistemas de transmissão são as sobretensões de chaveamento como no caso de sistemas de Extra Alta Tensão e Ultra Alta Tensão, o fechamento sincronizado, principalmente associados aos pára-raios, permite uma diminuição do nível de isolamento devido à redução de sobretensões durante manobras de religamento trifásico. O projeto de linhas mais compactas com torres menores e isoladores permite a diminuição nos custos iniciais da linha. Alternativamente podem se operar linhas de transmissão existentes a níveis de tensão maiores. (FERNANDEZ et al., 1998; ESMERALDO et al., 1999; FERNANDEZ et al., 2004);
- Um projeto de linha compacta aumenta a potência natural da linha de transmissão e assim permite a transmissão de maior quantidade de energia. No entanto, no projeto de uma linha de transmissão, o chaveamento controlado é só um dos aspectos a ser considerado. (CIGRE, 2004);
- No que se refere à segurança do pessoal, o chaveamento controlado diminui a probabilidade de interrupção devido a manobras de chaveamento. (CIGRE, 2004).

2.2.3 Sistema de Potência

- Valores elevados de sobretensões de chaveamento podem ser erroneamente interpretados como falta por algum relé de proteção, resultando na saída da linha. Simultaneamente, no caso de linhas de transmissão em circuito duplo, os transitórios de chaveamento de uma

das linhas podem se acoplar na outra linha, 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).

2.2.4 Outros Equipamentos.

- Quando as manobras de chaveamento são fatores determinantes para as especificações de pára-raios de óxido metálico, o chaveamento controlado permite a seleção de pára-raios com um menor nível de dissipação de energia. (LEGATE et al., 1988; FROEHLICH et al., 1997);
- A redução de sobretensões de chaveamento conseguida com o chaveamento controlado reduz o esforço dielétrico nos enrolamentos do reator de compensação e permite uma expectativa de tempo de vida maior dos mesmos. A mesma análise pode ser estendida aos transformadores (CIGRE, 2004).

2.3 Considerações Gerais de Custos Associados ao Chaveamento Controlado

O incremento de custo no equipamento de um disjuntor para chaveamento controlado depende principalmente do projeto do equipamento (vácuo, SF₆, óleo, ar comprimido) e da configuração da operação dos polos (independente ou grupal, espiral, solenóide, hidráulico, etc). A maior parte de disjuntores com um nível de tensão menor do que 245 kV são operados em grupo enquanto que disjuntores com nível de tensão maior são operados tipicamente com um mecanismo por fase.

A implementação de chaveamento controlado para disjuntores com operação de polos independentes envolve a adição do controlador e dos elementos no circuito de controle. O

incremento de custo de implementação do chaveamento controlado, como uma porcentagem do custo total do disjuntor é função do nível de tensão. Para níveis entre 75,5 kV e 170 kV a proporção do custo de um disjuntor completamente equipado para chaveamento controlado e um disjuntor normal é aproximadamente 150 % a 160 %. Neste nível de tensão, o custo do controlador é claramente significativo em relação ao custo do disjuntor somente. Este custo é de 120 % a 130 % para disjuntores de 245 kV e alcança um valor mínimo de 105 % a 110 % para disjuntores de 362 kV e maiores (CIGRE, 2004).

A Tabela 1 apresenta um exemplo dos custos associados a um sistema de 500 kV, onde se pode observar que a implementação do resistor de pré-inserção aumenta o custo do disjuntor em 36,58 % frente à implementação do sincronizador de fases que aumenta o valor do disjuntor em um 8,29 %. Os dados foram obtidos de uma cotização solicitada por uma empresa particular ao fabricante de equipamentos elétricos de alta tensão.

Tabela 1. Custos referenciais associados aos métodos de controle.

Item	Quantidade	Descrição	Valor de Venda Unitário (USD)	Valor de Venda Total (USD)
1	1	Disjuntor de Potência SF ₆ Tensão Nominal 550 kV / 4000 A Operação unipolar	287.000, 00	287.000, 00
2	1	Disjuntor de Potência SF ₆ (Com resistor de pré-inserção) Tensão Nominal 550 kV / 4000 A Operação unipolar	392.000, 00	392.000, 00
3	1	Sincronizador de Fases	23.800, 00	23.800, 00
4	6	Pára-raios de Tensão Nominal 396 kV Classe 5	21.700, 00	130.200, 00
5	6	Pára-raios de Tensão Nominal 420 kV Classe 5	22.400, 00	134.400, 00

2.4 Panorama Mundial da Utilização de Chaveamento Controlado

O chaveamento controlado é atualmente amplamente disponível e os controladores são cada vez mais aplicados para interrupção de pequenas correntes indutivas, chaveamento de banco de capacitores, chaveamento de linhas de transmissão e energização de transformadores. O grupo de trabalho A3.07 do CIGRE tem tentado vistoriar as aplicações a nível mundial do chaveamento controlado verificando o número de controladores fornecidos (CIGRE, 2004).

Embora haja dificuldade para determinar informação detalhada em todos os casos, devido à venda individual de controladores para os quais nenhum dado de aplicação estava disponível, a Figura 1 resume os resultados desde 1984 até 2001, onde aproximadamente 2500 controladores foram fornecidos e instalados ao redor do mundo.

Na década de 1990 o número instalações aumentou tão rapidamente quanto a capacidade do chaveamento controlado, que tem sido incorporada nas tecnologias modernas e flexíveis dos relés digitais. Atualmente o uso de chaveamento controlado em aplicações como chaveamentos de capacitores e reatores é rotina e o desenvolvimento está focado em áreas mais complexas como chaveamento de transformadores e linhas de transmissão.

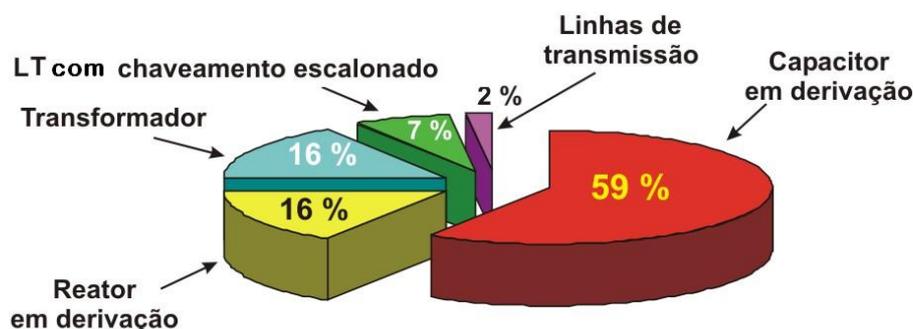


Figura 1. Panorama mundial da utilização de chaveamento controlado entre 1984 e 2001

CAPÍTULO 3

DESCRIÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO ANALISADO

Para o estudo utilizou-se como base um sistema elétrico real de 500 kV de 1052 km mostrado na Figura 2. As manobras foram realizadas no último trecho da linha que corresponde a um comprimento de 252 km, no sentido da Barra B4 → Barra B5.

Para as simulações realizadas utilizou-se o programa PSCAD/EMTDC, ferramenta de simulação de fenômenos transitórios em redes polifásicas com configurações arbitrárias que tem sua aplicação principal em sistemas elétricos de potência. A descrição e a modelagem matemática dos componentes básicos e linhas de transmissão do PSCAD/ EMTDC é apresentada no Anexo 1.

As Figuras 3 e 4 mostram o sistema em estudo modelado no PSCAD/EMTDC. Para facilitar o uso deste programa a novos usuários, no Anexo 2 se apresenta um guia de introdução ao PSCAD/EMTDC, desenvolvido como parte desta dissertação, produto do emprego deste software para a modelagem do sistema e realização das simulações.

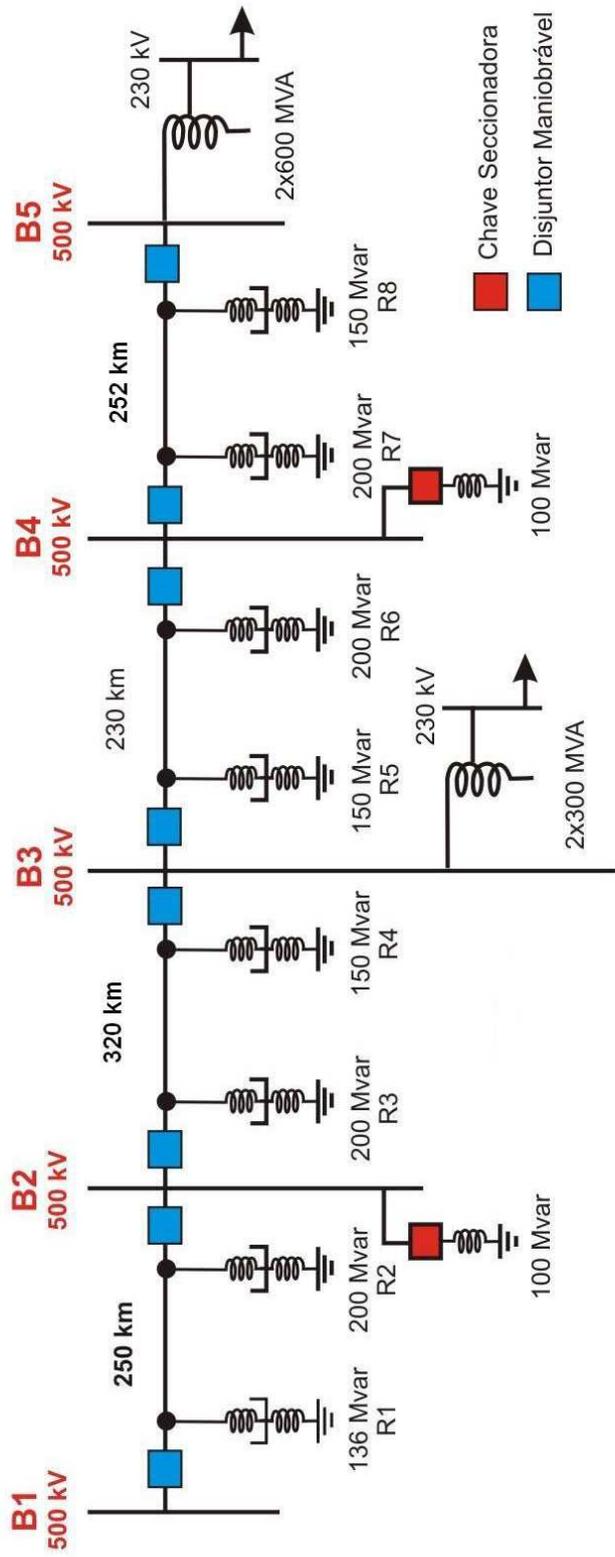


Figura 2. Esquema básico do sistema elétrico em estudo

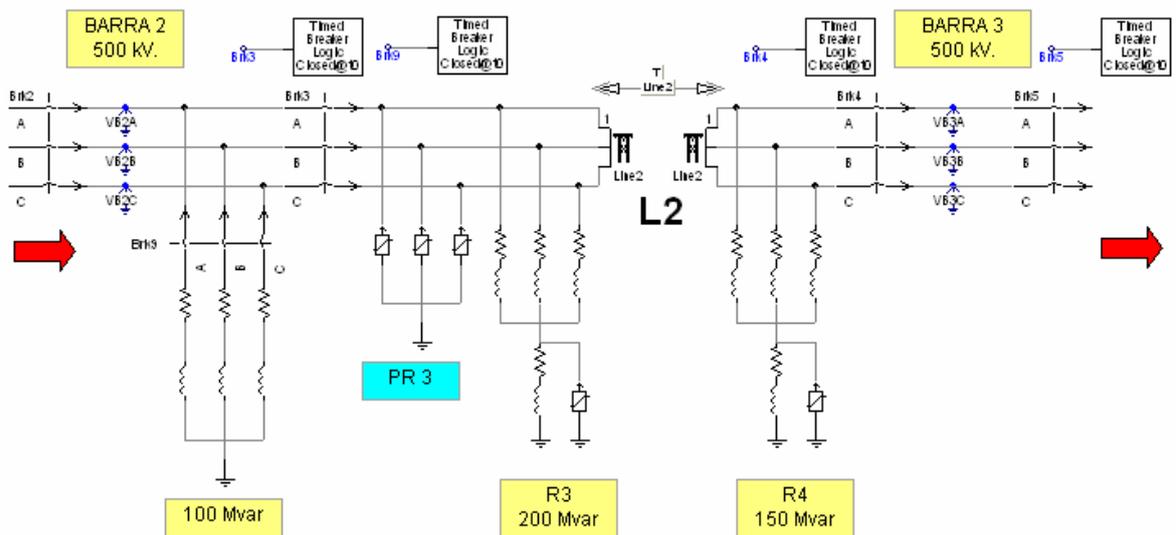
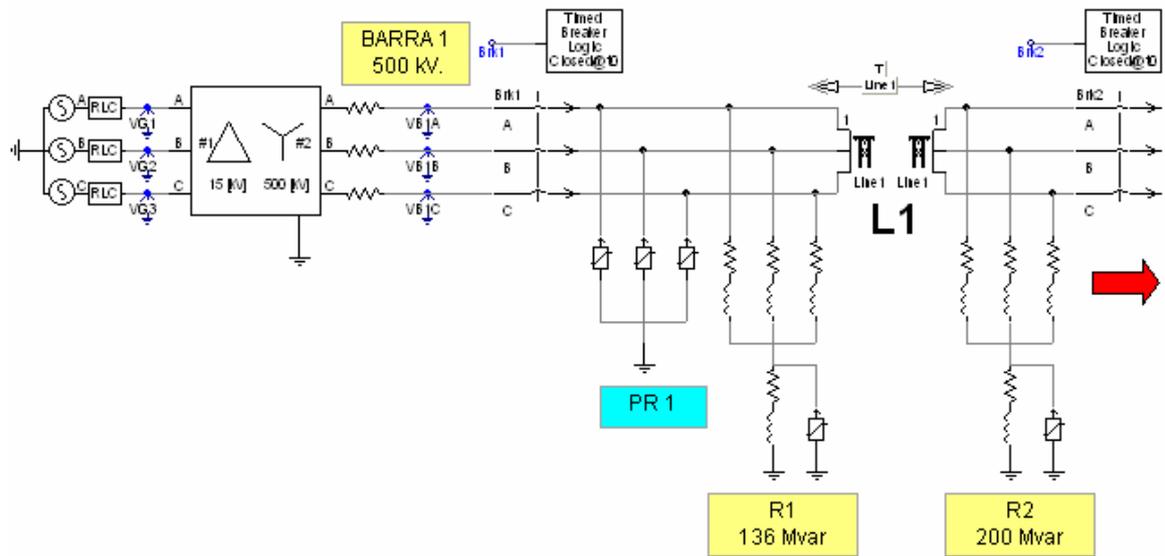


Figura 3. Modelagem do sistema em estudo no PSCAD (Parte 1)

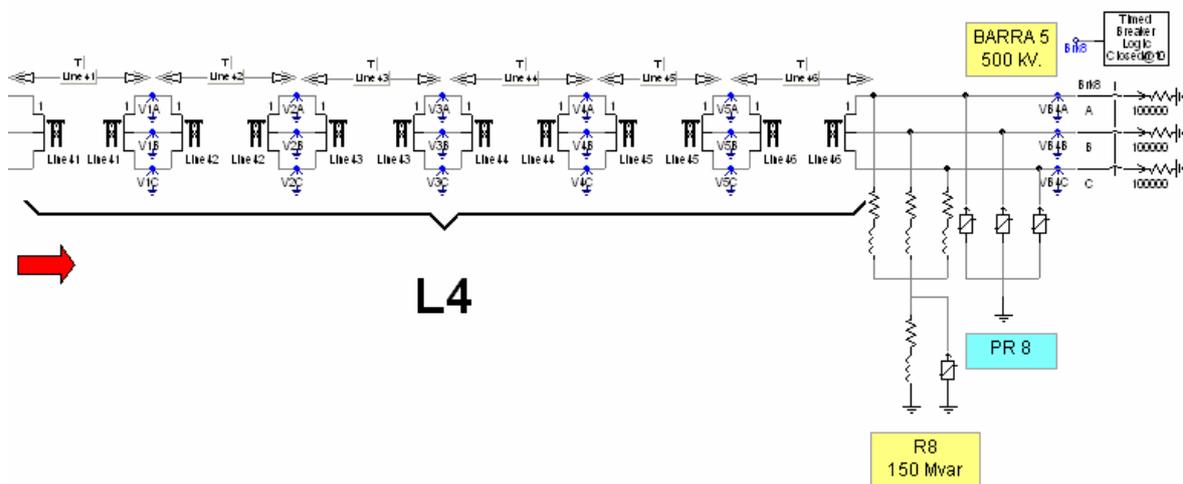
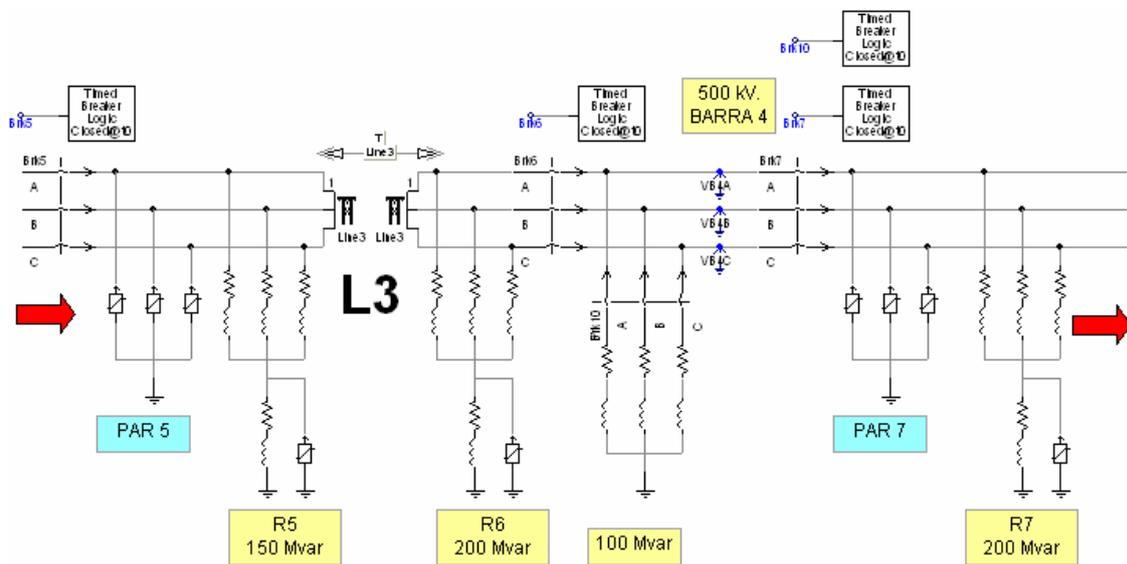


Figura 4. Modelagem do sistema em estudo no PSCAD (Parte 2)

3.1 Linha de Transmissão

A estrutura correspondente à linha de transmissão de 500 kV do sistema em estudo é mostrada na Figura 5. Apresentam-se no que segue as especificações referentes aos condutores, denotando-se as suas principais características, bem como a resistividade do solo considerada.

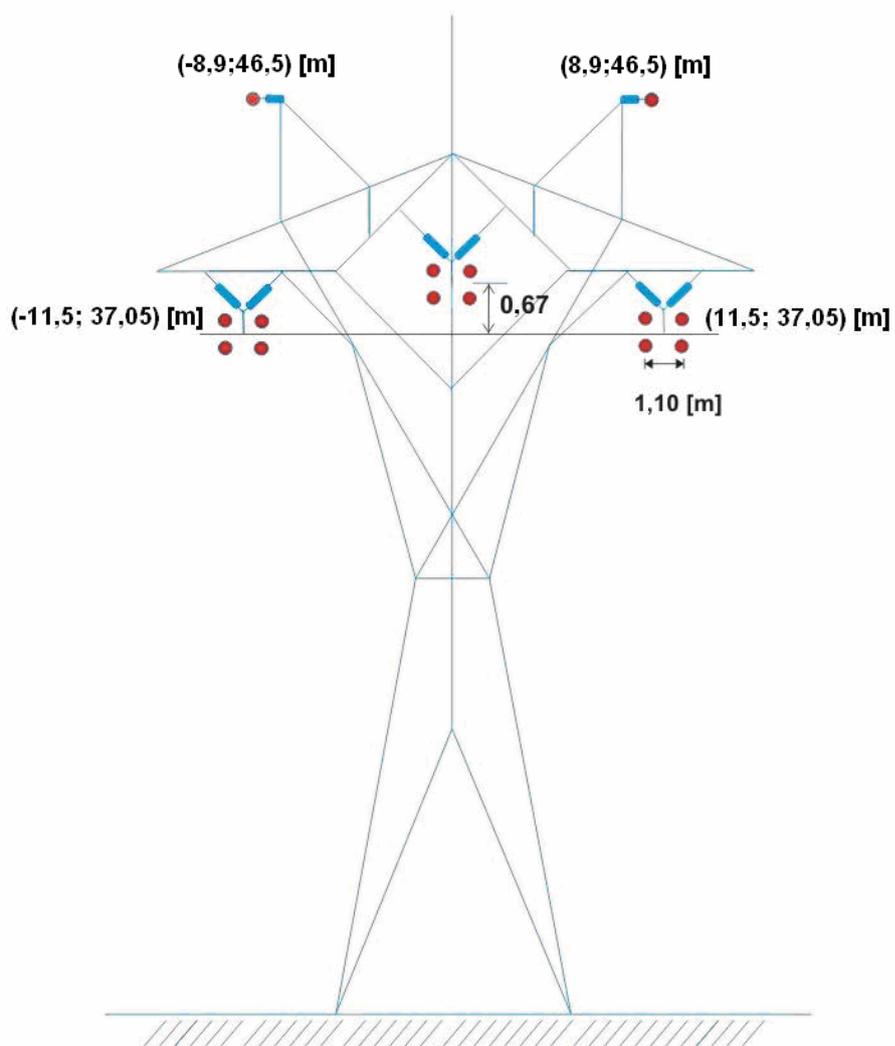


Figura 5. Esquema da torre da linha de transmissão de 500 kV

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:

ρ : 4000 Ω .m

Flecha a meio vão:

Fase: 26,11 m. (60° C)

Pára-raios: 22,42 m (40° C)

Os parâmetros da linha calculados para a frequência fundamental (60 Hz) foram calculados usando a rotina LINE CONSTANT e são apresentados na Tabela 2. 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.

Tabela 2. Parâmetros elétricos de linha calculados para frequência de 60 Hz

Componentes	Longitudinal (Ω /km)	Transversal (μ S/km)
Não homopolar	0,01603+j 0,2730	j 6,123
Homopolar	0,3482+j 4,42	j 3,524

3.2 Geradores

Na Barra 1 (B1), encontram-se em operação 03 grupos geradores em paralelo. Os principais parâmetros dos geradores são apresentados na Tabela 3 e os dados utilizados para modelar os geradores são destacados na tabela.

Tabela 3. 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]	190
Potência reativa absorvida [MVA]	-190
Xt % (base 100 MVA)	2,507
Xd % (base maq)	93,4
Xq %	61,1
X'd %	29
X''d %	27,2
U nominal [kV]	15
X''d [Ω]	0,12952
Xq [Ω]	0,29095
T''d0 [s]	0,091
T''q0 [s]	0,205
R equivalente [Ω]	0,00377

3.3 Transformadores

- Cada grupo gerador está conectado a um transformador elevador Δ/Y aterrado (15/500 kV). Na Tabela 4 se apresenta a curva de saturação para o lado de 500 kV e na Tabela 5 os dados principais do transformador.

Tabela 4. 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 5. 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 um Auto-Transformador (500/230/13,8) Y aterrado/Y aterrado/ Δ (2x300 MVA). Na Tabela 6 se apresenta a curva de saturação do lado de 500 kV e na Tabela 7 os dados principais do transformador.

Tabela 6. 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 7. 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 um Auto-Transformador (500/230/13,8) Yaterrado/Yaterrado/ Δ (2x600 MVA). Na Tabela 8 se apresenta a curva de saturação do lado de 500 kV e seus dados principais se apresentam na Tabela 9.

Tabela 8. 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 9. 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

3.4 Reatores.

A Tabela 10 apresenta um resumo dos parâmetros básicos dos reatores de linha e barra a frequência industrial para a linha de transmissão com 91 % e 75 % de compensação. A cada um dos reatores listados corresponde um reator de neutro com um fator de qualidade de 40.

Tabela 10. Parâmetros básicos dos reatores de linha e barra.

Tipo de Equipamento	Reator	Compensação Reativa de 91 % Potência [MVA]	Compensação Reativa de 75 % Potência [MVA]	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

3.5 Pára-raios

A Tabela 11 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 μ s) com referência na frente de onda 8/20 μ s e corrente de descarga 10 kA apresentadas nas Figuras 6 e 7 para pára-raios de classe 5 e 3 respectivamente. Utilizaram-se como valores de “tensões residuais base”: 937 kV, 872 kV e 846 kV para pára-raios de tensão nominal 420 kV, 396 kV e 360 kV, respectivamente (Tabela 12).

As características de tensão residual máxima e mínima dos pára-raios que se encontram instalados em campo são apresentadas no Anexo 3.

Tabela 11. Curva dos pára-raios.

	Ur 420 kV	Ur 396 kV	Ur 360 kV
Corrente [kA]	Tensão [kV]	Tensão [kV]	Tensão [kV]
0,001	651,984	615,264	574,464
0,01	693,600	654,432	611,184
0,05	731,136	690,336	644,640
0,1	748,272	706,248	660,960
0,2	762,144	719,304	677,280
0,4	780,504	736,848	693,600
0,7	794,784	749,904	709,920
1	806,616	761,328	718,896
2	829,872	782,952	742,560
5	873,120	824,160	779,280

Tabela 12. Resumo de Dados Técnicos de Pára-raios ZnO. (Fonte: ABB, 2005)

Grandeza	Pára-raios 01	Pára-raios 02	Pára-raios 03
Tensão máxima da rede (Um)	550 kV	550 kV	420 kV
Tensão nominal (Ur)	420 kV	396 kV	360 kV
Corrente nominal de descarga	20 kA	20 kA	10 kA
Classe de descarga de energia	5	5	3
Capacidade de absorção de energia kJ / kV de Ur	15,4	15,4	7,8
Tensão residual máxima de descarga - onda de corrente de 8/20 μ s, 10 kA	924 kV	872 kV	846 kV

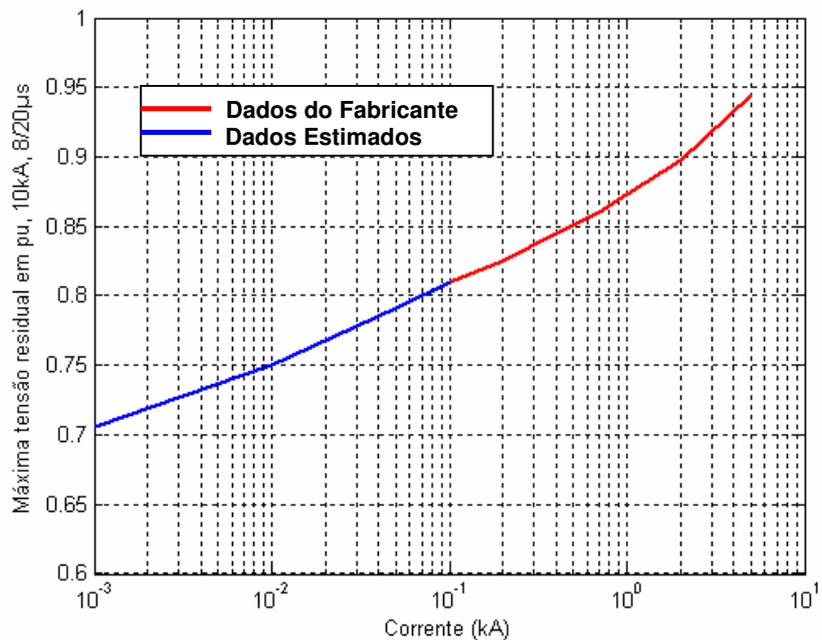


Figura 6. Curva característica de tensão residual máxima para impulso de manobra (30/60 μ s). Pára-raios Classe 5 (Fonte: ABB Surge Arrester, 2004)

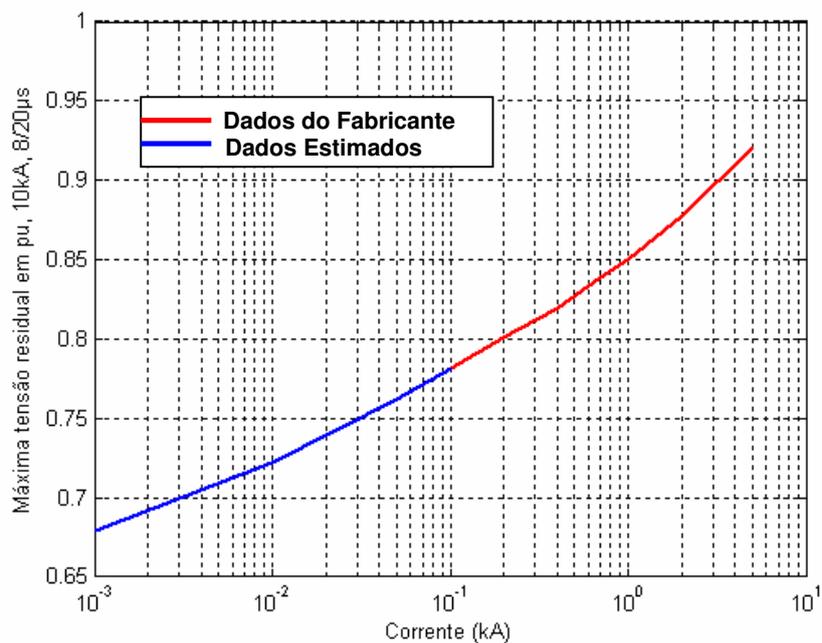


Figura 7. Curva característica de tensão residual máxima para impulso de manobra (30/60 μ s). Pára-raios Classe 3 (Fonte: ABB Surge Arrester, 2004)

CAPÍTULO 4

PRINCIPAIS MÉTODOS DE LIMITAÇÃO DE SOBRETENSÕES

4.1 Pára-raios

Para linhas de EAT longas tradicionalmente são usados resistores de pré-inserção com a finalidade de limitar sobretensões durante as manobras de energização e religamento trifásico das linhas. Os pára-raios são normalmente localizados somente nos dois terminais da linha.

Nos últimos anos surgiram alternativas aos resistores de pré-inserção, especificamente, o uso mais ativo dos pára-raios e o chaveamento controlado. A limitação eficiente das sobretensões ao longo da linha por pára-raios é possível mediante a utilização de pára-raios com alta capacidade de dissipação de energia. O uso de pára-raios em linhas de transmissão oferece uma alternativa aos resistores de pré-inserção pelo menor custo, facilidade na manutenção e a possibilidade destes poderem se situar ao longo da linha em pontos selecionados para obter o controle requerido do perfil de sobretensão. (LEGATE et al.1988; McCALLUM, 1989; CARVALHO et al., 1995; e WEAVER, 1990).

A tecnologia dos pára-raios de Óxido de Zinco (ZnO) foi introduzida no final da década de 1970, desenvolvida durante a década de 1980 e aperfeiçoada nos início da década de 1990, onde foram introduzidos pára-raios para sistemas de EAT com alta capacidade de absorção de energia e fácil instalação, fornecendo uma solução aos problemas que a tecnologia antiga não conseguia.

As energias absorvidas dependem de suas características não-lineares e da configuração de sistema elétrico sob estudo. Geralmente a quantidade de energia absorvida pelos pára-raios é maior para sistemas elétricos com impedâncias de surto menores e para níveis de proteção dos pára-raios mais baixos. Na ocorrência de sobretensões de manobra todos os pára-raios de óxido metálico, instalados na mesma subestação conduzem ao mesmo tempo para compartilhando a energia total envolvida na manobra.

As principais características elétricas dos pára-raios são:

- **Tensão Nominal**

A tensão nominal de um pára-raios é o valor máximo eficaz da tensão na frequência industrial aplicada aos seus terminais no ensaio de ciclo de serviço, para a qual o pára-raios foi projetado e tem condições de operar satisfatoriamente durante o ensaio. O valor da tensão nominal é utilizado como um parâmetro de referência para a especificação de suas características de operação.

- **Níveis de Proteção**

Os níveis de proteção para pára-raios de ZnO, sem nenhum tipo de centelhador em série, são definidos somente pelas tensões residuais que aparecem através de seus terminais durante a sobretensão transitória. As tensões residuais dependem da forma e do valor das correntes de condução. Este tipo de informação deve ser obtido dos fabricantes e normalmente é apresentada segundo a Figura 8 que apresenta a variação da tensão residual máxima de descarga em função da corrente para diversos tipos de impulsos para os pára-raios ZnO da ABB.

Outro aspecto importante que deve ser ressaltado é que a tensão residual também pode ser modificada pelo fabricante para projetos especiais com a finalidade de atender exigências específicas de determinada aplicação.

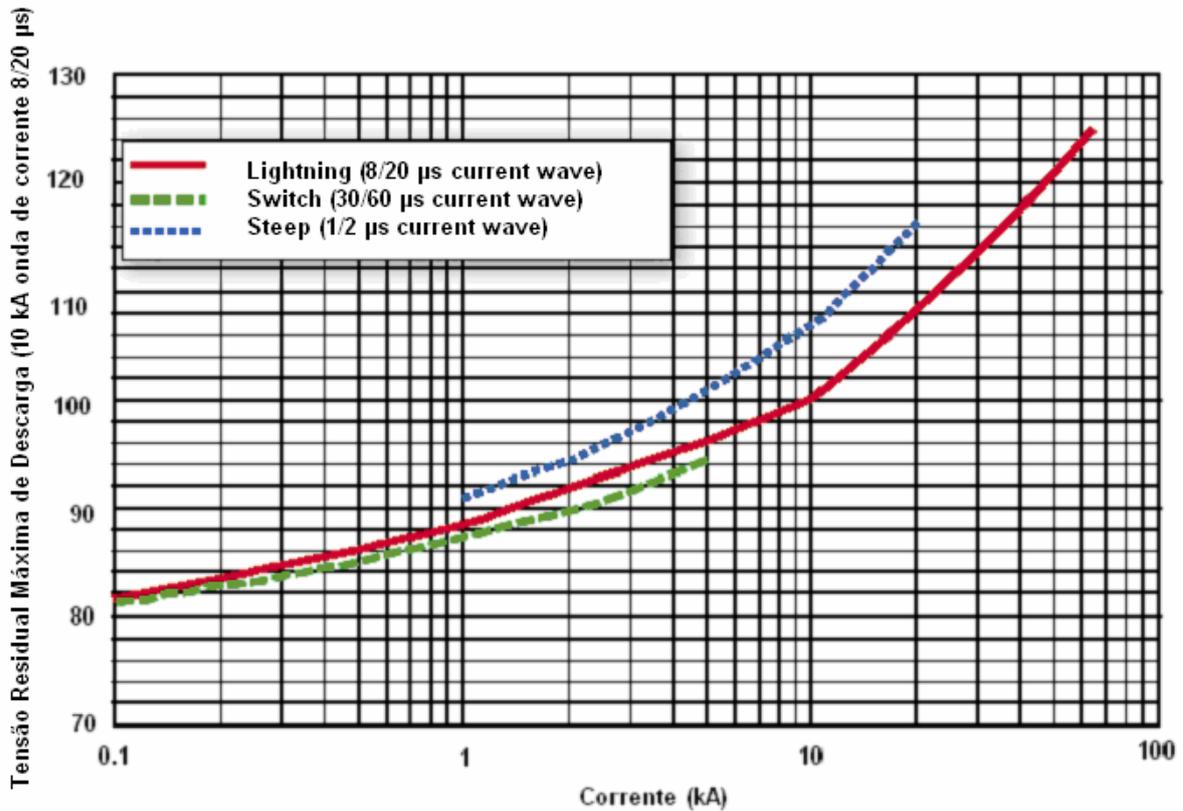


Figura 8. Características de proteção de para-raios ZnO.

(Fonte: ABB Surge Arresters, 2004)

- Capacidade de Absorção de Energia

Os para-raios de ZnO são mais suscetíveis a períodos de condução mais longos e mais frequentes durante as sobretensões do que os para-raios convencionais por causa da ausência de centelhadores. Como estão permanentemente conectados ao sistema elétrico estão sempre conduzindo correntes que variam de 10^{-3} a 10^2 A, dependendo da amplitude da sobretensão transitória. A capacidade de absorção de energia tem que ser adequadamente especificada de forma a evitar conseqüências sérias aos equipamentos do sistema elétrico, incluindo os próprios para-raios de óxido metálico.

4.2 Chaveamento Controlado

Existem várias aplicações importantes do disjuntor nas quais as operações de fechamento e abertura podem provocar transitórios de tensão e de corrente graves. Os transitórios que surgem nos circuitos principais também podem provocar transitórios induzidos nos circuitos de controle auxiliares além de estarem associados a uma variedade de esforços dielétricos e mecânicos que podem causar danos graduais e imediatos.

O método tradicional para limitar sobretensões de chaveamento durante manobras de energização e religamento trifásico de linhas de transmissão de EAT é utilizar disjuntores equipados com resistências de pré-inserção. Não obstante, o chaveamento controlado de disjuntores é considerado cada vez mais como uma alternativa, freqüentemente como uma solução onde os pára-raios também são aplicados para limitação ótima das sobretensões de chaveamento.

Adotar o chaveamento sincronizado como solução para limitar as sobretensões transitórias advindas da manobra de energização não é uma idéia nova. Esta possibilidade e seus benefícios já foram estudados há vários anos. Entretanto, soluções tecnicamente viáveis para colocar em prática a idéia só puderam ser desenvolvidas em tempos mais recentes, graças à evolução dos projetos dos disjuntores EAT e ao desenvolvimento de dispositivos micro-eletrônicos aplicados a sistemas de potência. (ABB, 2004; CARVALHO, 1997; ROCHA, 1997).

Os componentes principais de um chaveamento controlado são o disjuntor e o sincronizador propriamente dito. O sincronizador (ou controlador) é um dispositivo eletrônico que permite realizar a operação da manobra em um ponto ótimo da onda de tensão. O princípio básico de funcionamento do sincronizador é:

- Reconhecer a forma (ou padrão) do seu sinal de referência e,
- Prever o ponto ótimo da onda de tensão para manobrar o disjuntor.

4.2.1 Energização de linhas de transmissão

Os surtos originados de manobras de energização de linhas de transmissão em vazio são dependentes das tensões através dos contatos do disjuntor no instante do seu fechamento e são consideravelmente reduzidos se estas tensões estão próximas de zero. Este método consiste em controlar o instante de fechamento do disjuntor através da utilização de um sincronizador que dá a ordem para que o fechamento dos polos do disjuntor ocorra próximo ao zero da tensão. Considerando um sistema trifásico, para satisfazer esta condição, a melhor opção é fechar as três fases consecutivamente quando a tensão em cada uma delas for zero. (ABB, 2004; CARVALHO, 1997; ROCHA, 1997).

A Figura 9 descreve a seqüência de atuação do método que consiste no fechamento do disjuntor da fase A na passagem pelo zero, seguido do fechamento do disjuntor da fase C e da fase B com um atraso de 60° entre cada fechamento.

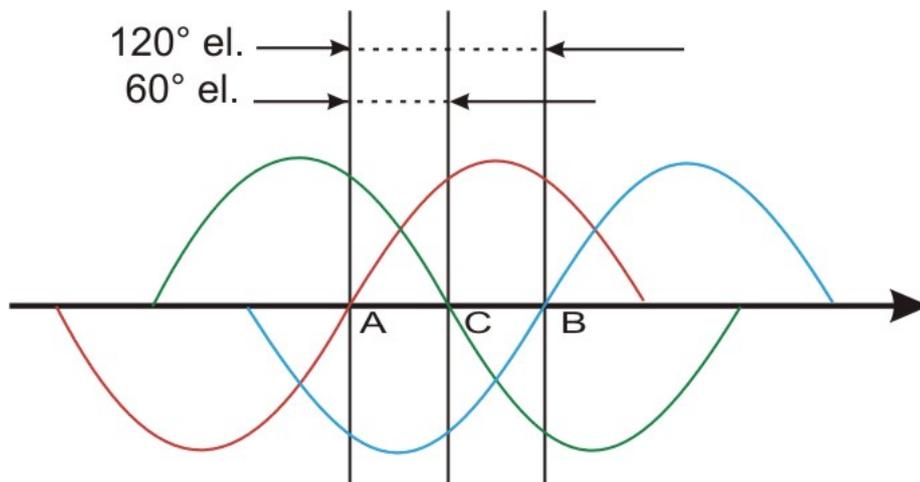


Figura 9. Seqüência de fechamento dos polos do disjuntor

4.2.2 Religamento trifásico de linhas de transmissão

Quando um disjuntor opera na função de abrir uma linha em vazio, a corrente capacitiva da linha é interrompida ao passar pelo zero e quando isto ocorre a tensão na linha está passando pelo seu valor máximo, conseqüentemente deixando uma “carga residual” na

linha, que não é igual nas três fases. A fase que primeiro interrompe a corrente pode chegar a ter uma tensão de até 1,3 p.u. e, a menos que esta carga seja drenada por um transformador, um reator, ou uma carga, permanecerá na linha por muito tempo.

Se a linha é religada antes da carga residual ter sido drenada e os polos do disjuntor fecharem quando a tensão do sistema estiver com polaridade oposta à da linha, a sobretensão transitória também será elevada.

O decaimento da carga de uma linha em vazio quando da não existência de equipamentos especiais ou de carga é muito lento, sendo governado pelas condições climáticas e ocorrendo através do escoamento pela cadeia de isoladores. Desta forma, a linha mantém-se carregada com praticamente sua tensão máxima por um longo período após a interrupção da corrente, tempo este da ordem de 2 a 5 minutos para descarga total da linha podendo atingir 15 minutos em condições ambientais muito secas. (D'AJUZ et al.,1987)

Para o caso da linha de transmissão sem compensação reativa em derivação, a Figura 10 mostra a forma de onda da tensão monitorada entre os polos do disjuntor na manobra de religamento trifásico para o primeiro trecho de linha. A Figura 11 mostra a forma de onda da tensão no terminal receptor (Barra 2) durante a manobra de religamento. A abertura do disjuntor da LT em 0,3 s resultou em cargas residuais nas 3 fases da LT. Essas cargas residuais estarão presentes quando do religamento em 0,55 s. Pode se observar também o baixo amortecimento da carga residual. O ponto ótimo para manobrar o disjuntor corresponde ao instante quando a onda de tensão entre os polos do disjuntor está mais perto de zero.

Quando a linha é compensada com reatores em derivação, o grau de compensação tem um significativo efeito na forma de onda da tensão como se pode observar na Figura 12. A tensão nos polos do disjuntor assume forma oscilatória (batimento), com composição de frequências que dependem do grau de compensação. A forma de onda possui também um amortecimento na sua amplitude no decorrer do tempo função do fator de qualidade do reator (X/R). O ponto ótimo nas ondas de tensão para manobrar o disjuntor corresponde à região quando a amplitude do batimento da tensão entre os polos do disjuntor é mínima, isto é

durante os primeiros períodos de menor amplitude do batimento da tensão, já que ocorre também a descarga da linha através da compensação. Desta forma a amplitude do batimento tende a diminuir, mas a amplitude da região de mínimo batimento aumenta com o tempo. A Figura 13 mostra a forma de onda de tensão no terminal receptor do religamento para LT com 70 % de compensação reativa em derivação. O batimento é explicado com mais detalhe no item 5.2.

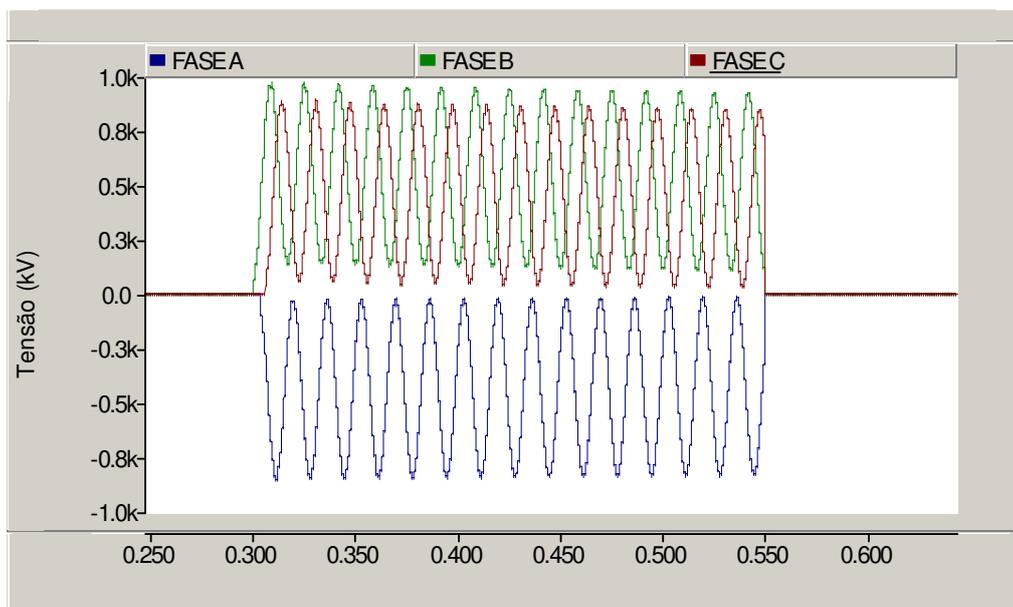


Figura 10. Tensão entre os polos do disjuntor. LT sem compensação reativa em derivação.

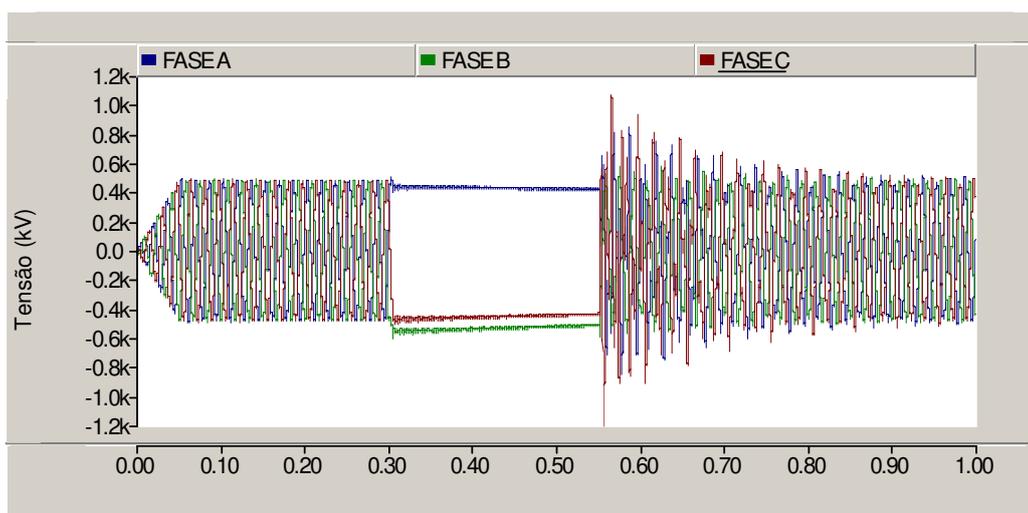


Figura 11. Tensão no terminal receptor. Religamento da LT sem compensação em derivação

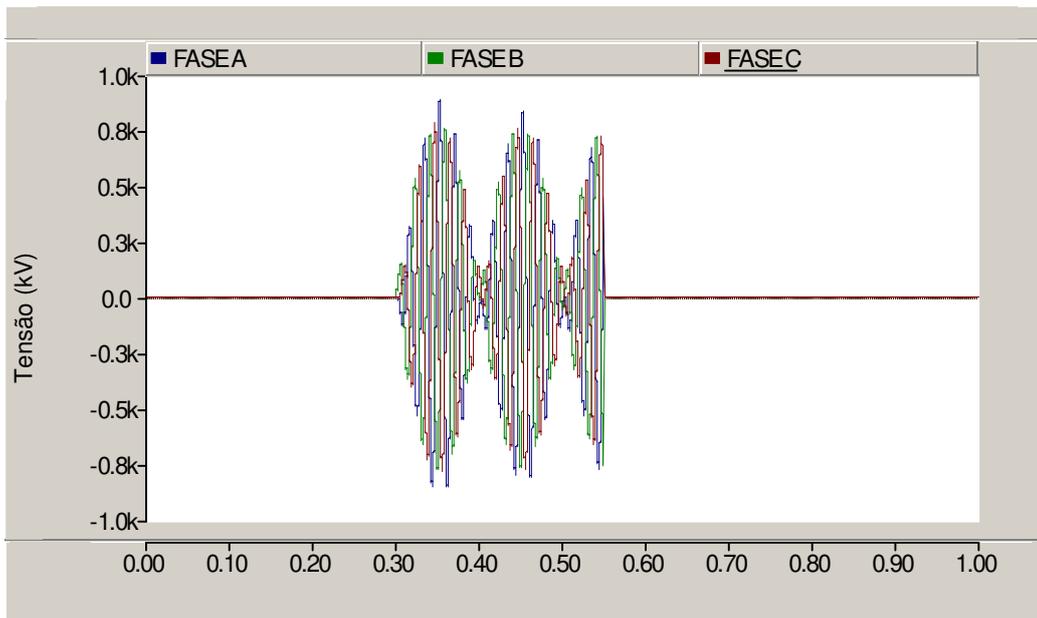


Figura 12. Tensão entre os polos do disjuntor. LT com compensação reativa em derivação.

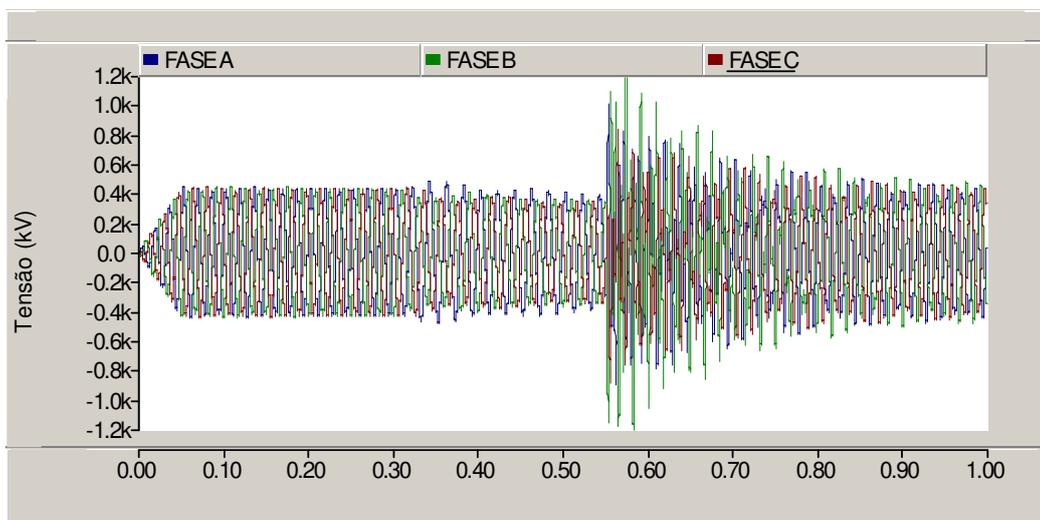


Figura 13. Tensão no terminal receptor. Religamento da LT com compensação em derivação

4.3 Resistor de Pré-Inserção

Os resistores de fechamento de disjuntores, também conhecidos como resistores de pré-inserção (RPI), são um dos mais utilizados meios para se reduzir a amplitude das sobretensões transitórias geradas por manobras de chaveamento de linhas de transmissão. (COLCLASER, 1969; BARBOSA,1989). São instalados em paralelo com as câmaras dos disjuntores, um resistor para cada câmara.

Não é objetivo de esta dissertação negar a eficiência dos resistores de fechamento em reduzir sobretensões transitórias e as energias dissipadas por pára-raios. Ao contrário, pelos resultados obtidos poderá se comprovar, mais uma vez, a sua eficiência para a manobra de energização e religamento. Entretanto, os resistores de fechamento são componentes que podem apresentar um considerável índice de falhas quando em operação (LEGATE et al. 1988; CARVALHO et al., 1995). A possibilidade de sua eliminação ou da aplicação de um sincronizador de fechamento diminui a necessidade de peças de reposição, permitindo que o disjuntor continue a ser utilizado com um menor número de componentes mecânicos, aumentando a sua confiabilidade.

O arranjo de atuação do resistor, como se apresenta na Figura 14, é tal que quando a linha de transmissão é energizada, inicialmente, fecha-se o contato auxiliar que insere o resistor em série entre a fonte e a linha de transmissão. Ao inserir o resistor a tensão que seria imposta sobre a linha é dividida entre a linha e resistor. Após um breve período de tempo fecha-se o contato principal, curto-circuitando desta forma o resistor e trazendo para a linha a tensão plena da fonte.

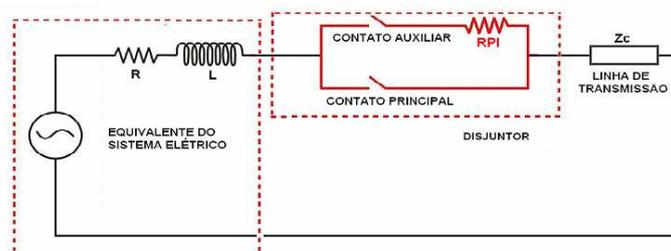


Figura 14. Circuito simplificado do resistor de pré-inserção.

Assim a linha é energizada ou religada em dois estágios, com cada um deles produzindo uma determinada sobretensão. A primeira delas é devida à energização ou religamento através do resistor e a segunda é causada pelo curto-circuito do resistor. Embora cada estágio produza sobretensões ao longo da linha, a escolha adequada do resistor assegura que as amplitudes das sobretensões sejam consideravelmente inferiores às obtidas sem o resistor. (CARVALHO, 1997).

As principais características do resistor de pré-inserção são:

- **Tempo de Inserção**

Para determinar o tempo de inserção do resistor, se verifica segundo DILLARD (1970), que a partir de um determinado valor, aproximadamente de $\frac{1}{2}$ ciclo, para linhas com comprimento elétrico menor do que $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda (λ), o valor da sobretensão se torna insensível ao aumento do tempo de permanência. Este fato, juntamente com a exigência térmica conduz a decisão de se adotarem valores médios de permanência do resistor normalmente na faixa de 6 a 15 ms. A condição a ser obedecida é que o resistor não deve ser curto-circuitado antes que a primeira reflexão das ondas de tensão/corrente na extremidade aberta da linha retorne ao terminal da fonte, isto é, de modo a ser efetivo, o tempo de permanência deve ser maior que duas vezes o tempo de trânsito da linha. (Figura 15)

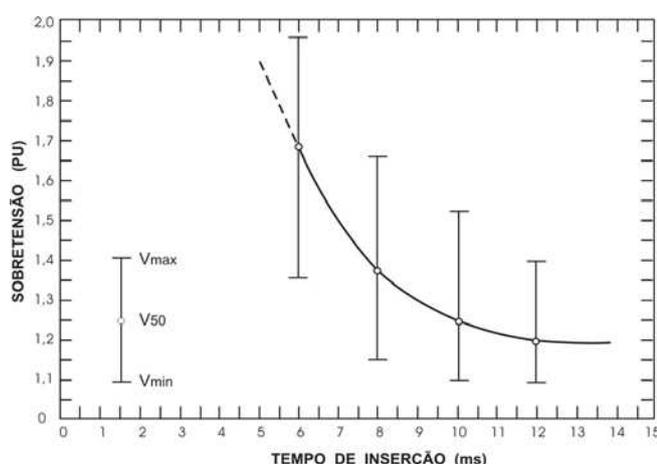


Figura 15. Efeito do tempo de inserção do RPI em uma manobra de religamento de LT.

LT de 322 km e com 75 % de compensação em derivação. RPI = 350 Ω (Fonte: DILLARD, 1970).

- Valor do Resistor de Pré-inserção

Definido o tempo médio de permanência do resistor, o seu valor de resistência é encontrado pesquisando-se a menor sobretensão, variando o valor ôhmico do resistor no instante do chaveamento. A escolha do resistor através desse procedimento é válida para qualquer configuração de sistema com linhas menores do que $\lambda/4$. (COLCLASER, 1970)

O valor ótimo do resistor depende basicamente dos seguintes fatores: potência de curto circuito da fonte, comprimento da linha e grau de compensação da linha. (Figura 16)

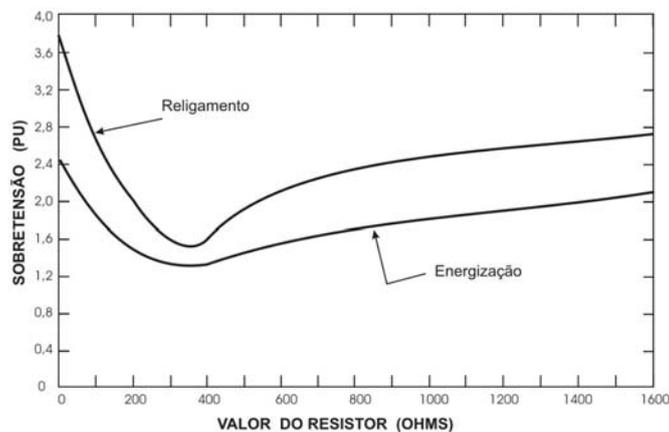


Figura 16. Valor ôhmico do RPI nas manobras de energização e religamento da L.T. LT de 322 km e com 75 % de compensação em derivação. RPI = 350 Ω (Fonte: DILLARD, 1970).

- Energia Dissipada

Um outro fator que deve ser levado em conta no dimensionamento do resistor é a quantidade de energia por ele dissipada. Com o aumento no valor do resistor, a corrente que flui através dele diminui, levando-o a absorver menos energia. Deve-se, portanto, selecionar um resistor igual àquele correspondente ao valor ótimo e que atenda as condições pré-determinadas de máxima sobretensão permitida e de energia dissipada.

CAPÍTULO 5

SIMULAÇÕES E ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados das simulações referentes ao desempenho dos métodos de controle de sobretensões para o caso de energização e religamento trifásico de linhas de transmissão.

5.1 Energização de linhas de transmissão

A energização da linha exemplo estudada se realiza por trechos, supondo que a barra a montante da manobra já se encontra estabilizada e em níveis adequados de tensão antes da energização do trecho seguinte. As manobras estudadas foram realizadas no último trecho da linha que corresponde a um comprimento de 252 km.

Para elaborar o perfil de tensão ao longo da linha de transmissão, as sobretensões transitórias foram registradas em 7 pontos do trecho de linha B4 → B5, ou seja, nos dois terminais e em 5 pontos intermediários. Foram obtidos os valores absolutos destas tensões para logo mediante um dispositivo de saída serem exibidos em um painel de controle e processados. (Figura 17)

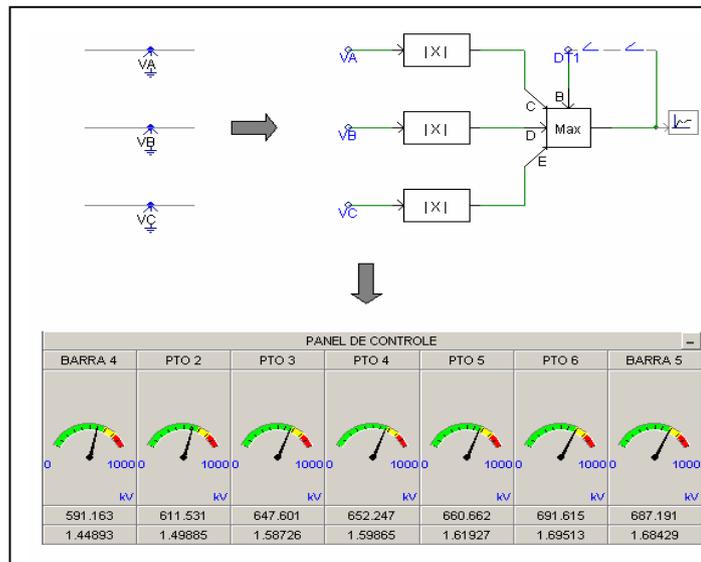


Figura 17. Sistema de medição do perfil de tensão ao longo da LT.

Para todos os métodos de controle foram realizadas simulações semelhantes com dois níveis de compensação reativa em derivação, verificando o efeito da variação do nível de compensação na manobra de energização e religamento tripolar para os seguintes casos:

- Linha de transmissão com 91 % de compensação reativa em derivação.
- Linha de transmissão com 75 % de compensação reativa em derivação.

No presente estudo não foi efetuada uma análise estatística do fechamento dos polos do disjuntor para comparar os métodos. Foi analisada somente uma condição de fechamento para cada método, especificamente:

- Fechamento de todos os polos no mesmo instante no máximo da tensão de uma fase para:
 - Pára-raios distribuídos
 - Resistor de pré-inserção
- Fechamento dos polos no zero da tensão de cada fase para:
 - Fechamento sincronizado

O fechamento estatístico deve ser considerado num estudo futuro.

5.1.1 Pára-raios

Três tipos de pára-raios de ZnO foram utilizados para as simulações:

- Pára-raios de tensão nominal 420 kV, Classe 5: estes pára-raios são os que normalmente se especifica para as linhas de transmissão de 500 kV nos sistemas do Brasil;
- Pára-raios com tensão nominal de 396 kV, Classe 5 que segundo Stenstrom et al, (1998), apresentam melhores resultados no que se refere ao controle de sobretensões de chaveamento;
- Pára-raios de 360 kV Classe 3. Estes pára-raios foram estudados mais com uma finalidade ilustrativa já que os requerimentos de energia para linhas de transmissão de 500 kV e 252 km são de Classe 5 segundo o IEC.

Para cada caso foram estudadas as seguintes situações:

- Sem pára-raios para limitar as sobretensões, sendo este um caso hipotético e que foi apresentado com uma finalidade comparativa, já que os pára-raios nos extremos devem estar sempre em operação;
- Pára-raios localizados somente nos terminais da linha;
- Pára-raios localizados nos terminais e no meio da linha. (Para este caso se apresenta a forma de onda de tensão e a energia dissipada nos pára-raios);
- Pára-raios localizados nos terminais e em dois pontos intermediários correspondentes a 1/3 e 2/3 do comprimento da linha.

O fechamento dos polos do disjuntor foi realizado no máximo da tensão na Barra 4 o que representa a pior condição em termos de sobretensão.

Foram realizadas também simulações com os pára-raios de campo utilizando suas característica de tensão máxima e mínima. Os resultados são apresentados no Anexo 3.

Linha de transmissão com 91 % de compensação reativa em derivação.

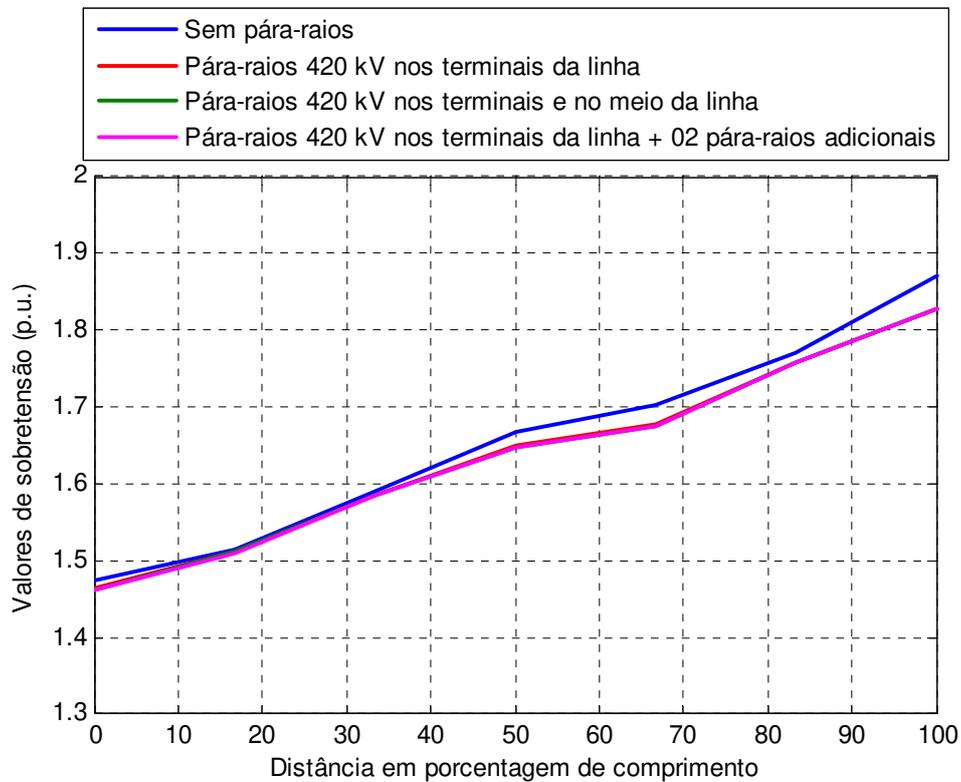


Figura 18. Perfil de tensão.- Manobra de energização utilizando pára-raios de tensão nominal 420 kV. LT com 91 % de compensação reativa em derivação

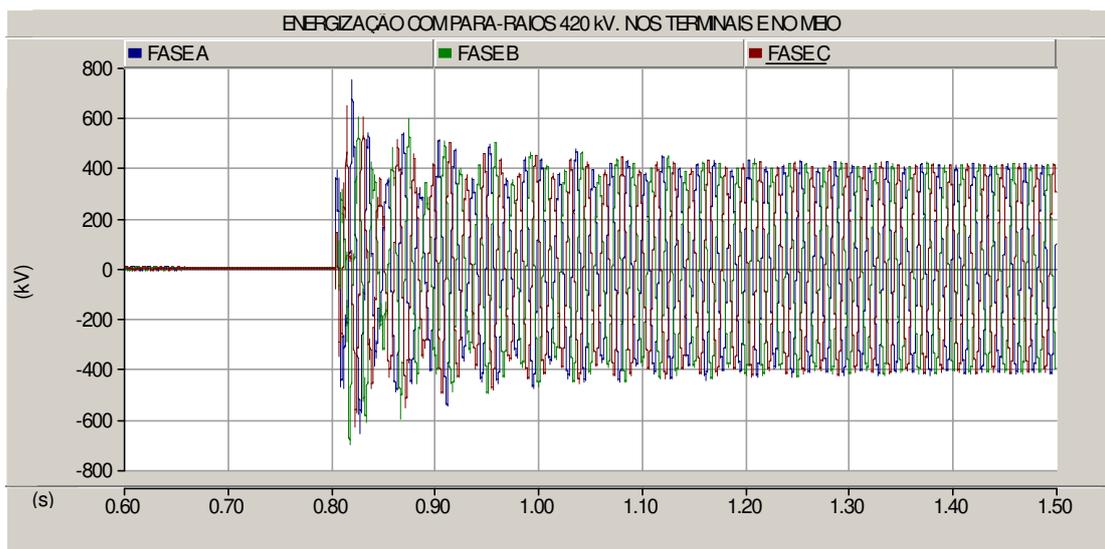
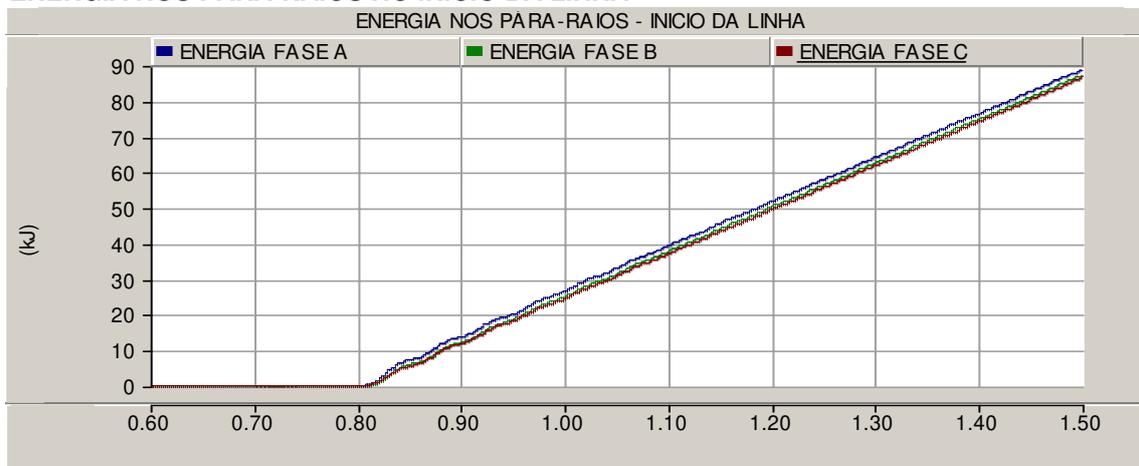
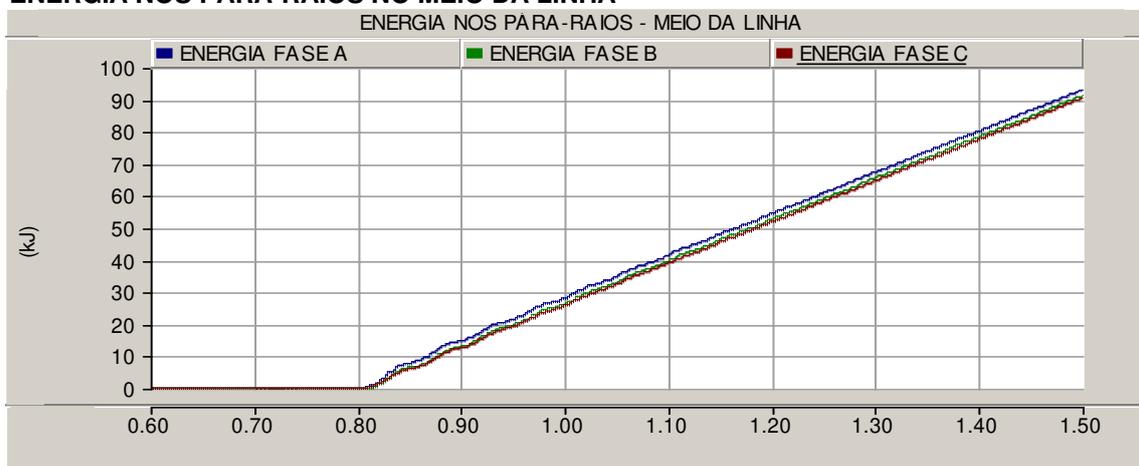


Figura 19. Tensão na Barra 5. Energização com pára-raios 420 kV nos terminais e no meio da linha. LT com 91 % de compensação reativa em derivação

ENERGIA NOS PÁRA-RAIOS NO INÍCIO DA LINHA



ENERGIA NOS PÁRA-RAIOS NO MEIO DA LINHA



ENERGIA NOS PÁRA-RAIOS NO FINAL DA LINHA



Figura 20. Energia dissipada nos pára-raios.- Manobra de energização utilizando pára-raios 420 kV nos terminais e no meio da linha – LT com 91 % de compensação reativa em derivação

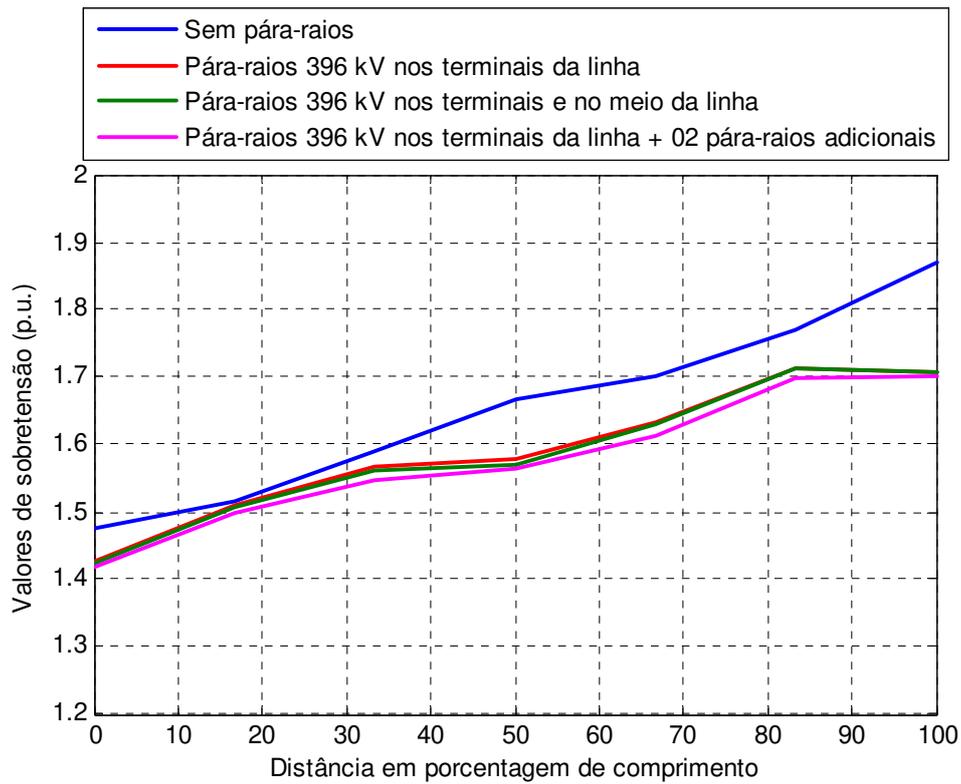


Figura 21. Perfil de tensão.- Manobra de energização utilizando pára-raios de tensão nominal 396 kV. LT com 91 % de compensação reativa em derivação

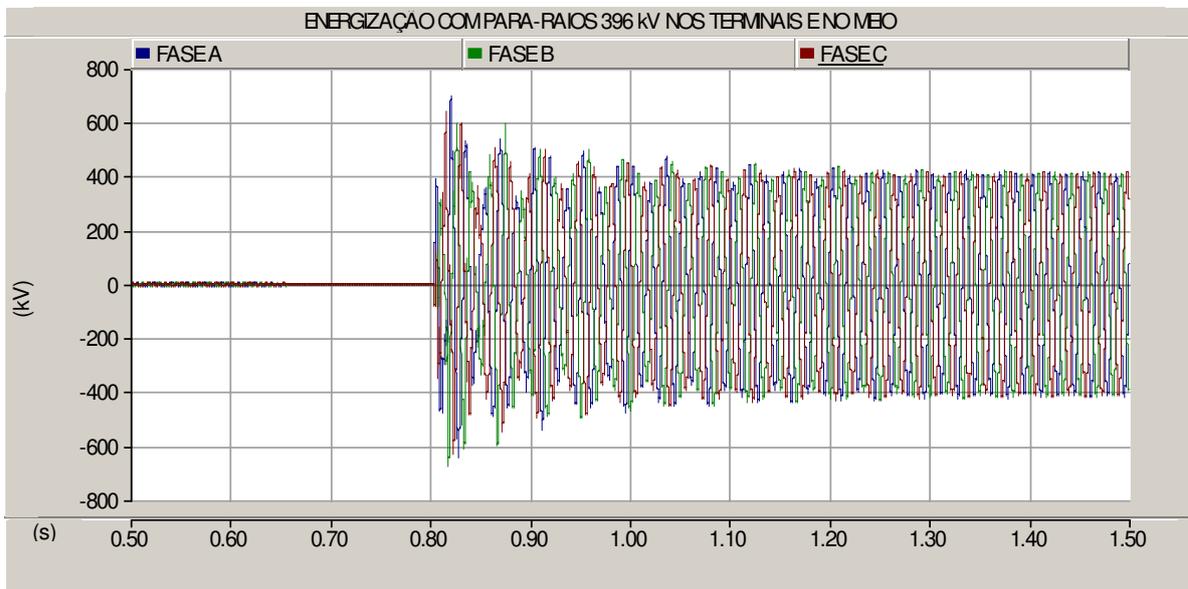
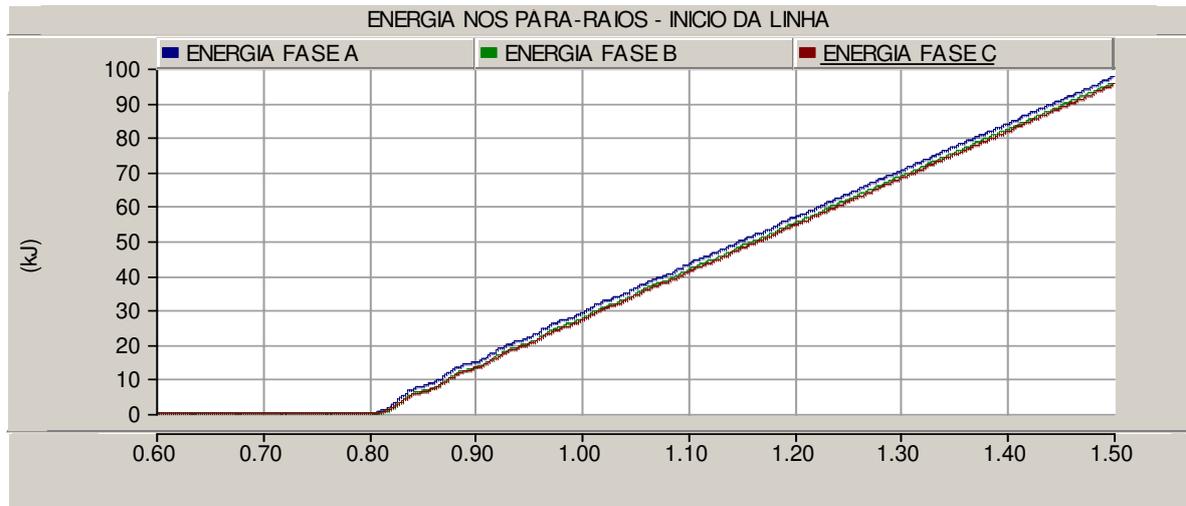
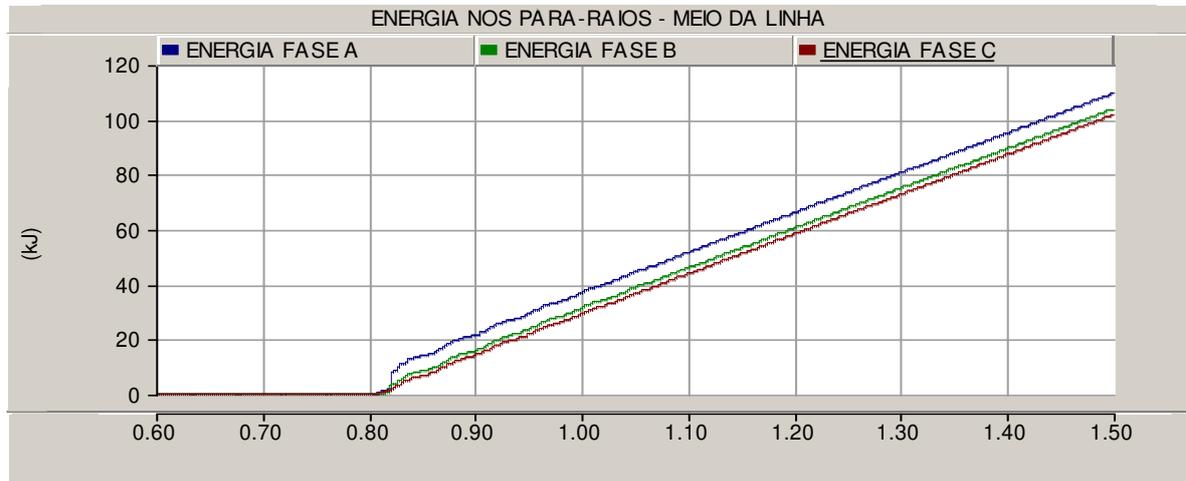


Figura 22. Tensão na Barra 5. Energização com pára-raios 396 kV nos terminais e no meio da linha. LT com 91 % de compensação reativa em derivação

ENERGIA NOS PÁRA-RAIOS NO INÍCIO DA LINHA



ENERGIA NOS PÁRA-RAIOS NO MEIO DA LINHA



ENERGIA NOS PÁRA-RAIOS NO FINAL DA LINHA

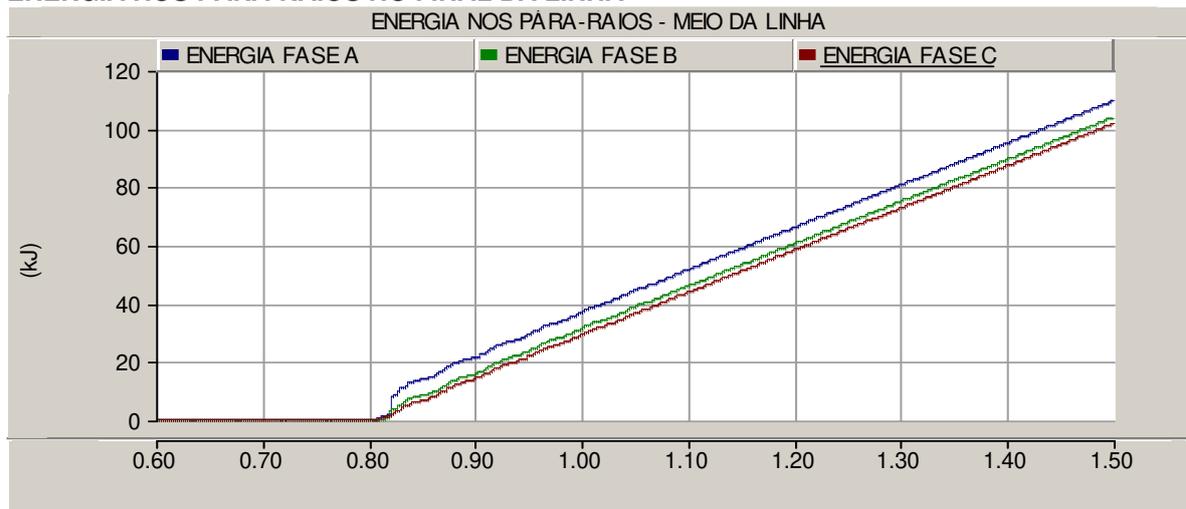


Figura 23. Energia dissipada nos pára-raios. Manobra de energização utilizando pára-raios 396 kV nos terminais e no meio da linha - 91 % de compensação reativa em derivação

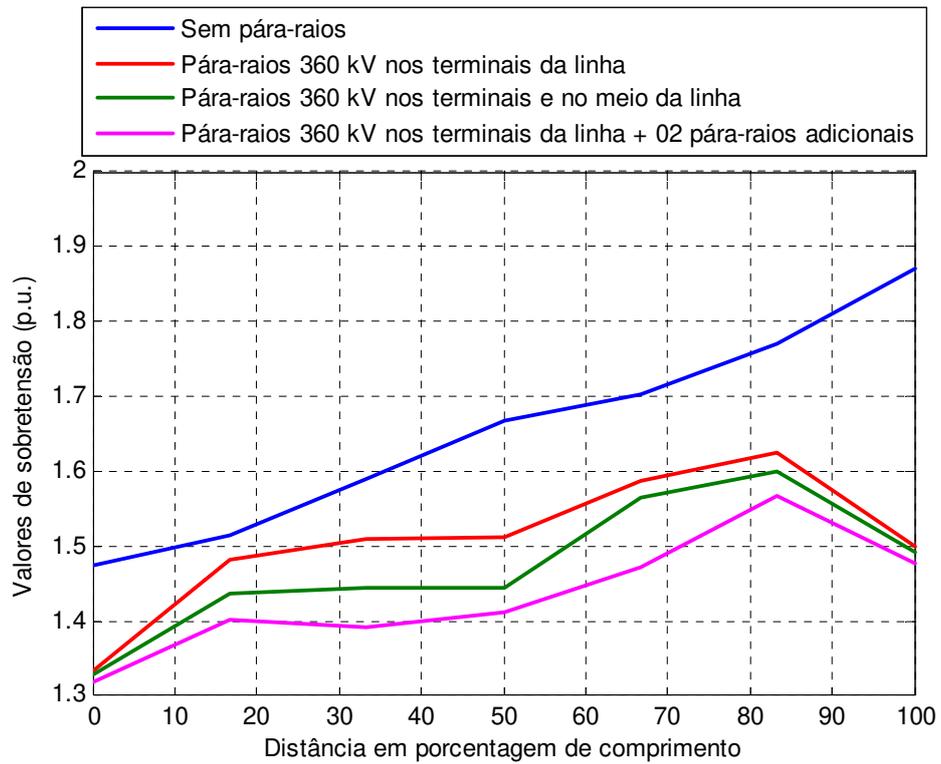


Figura 24. Perfil de tensão.- Manobra de energização utilizando pára-raios de tensão nominal 360 kV. LT com 91 % de compensação reativa em derivação

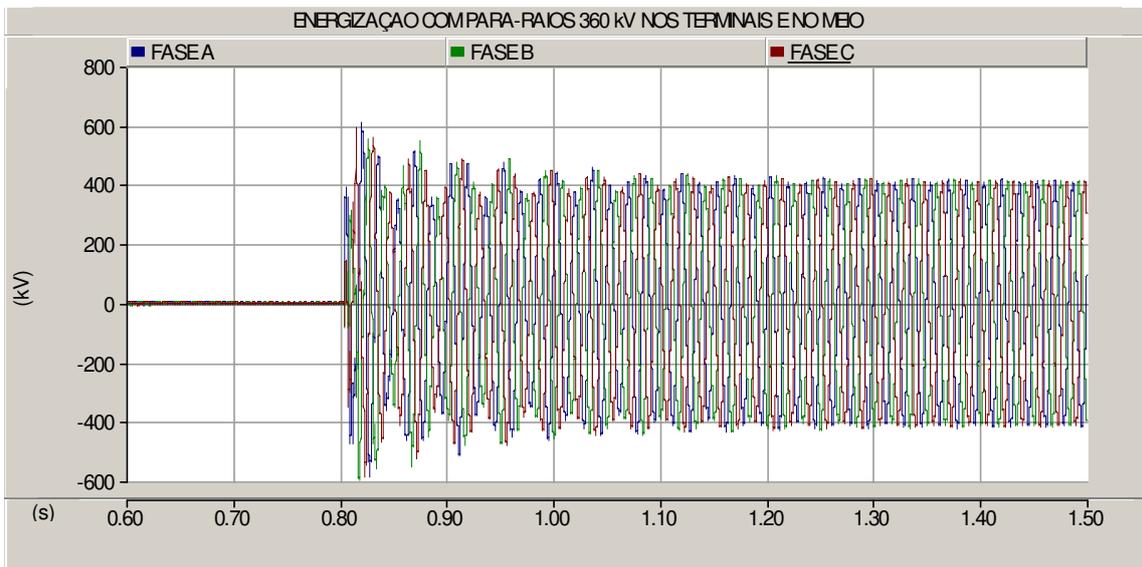
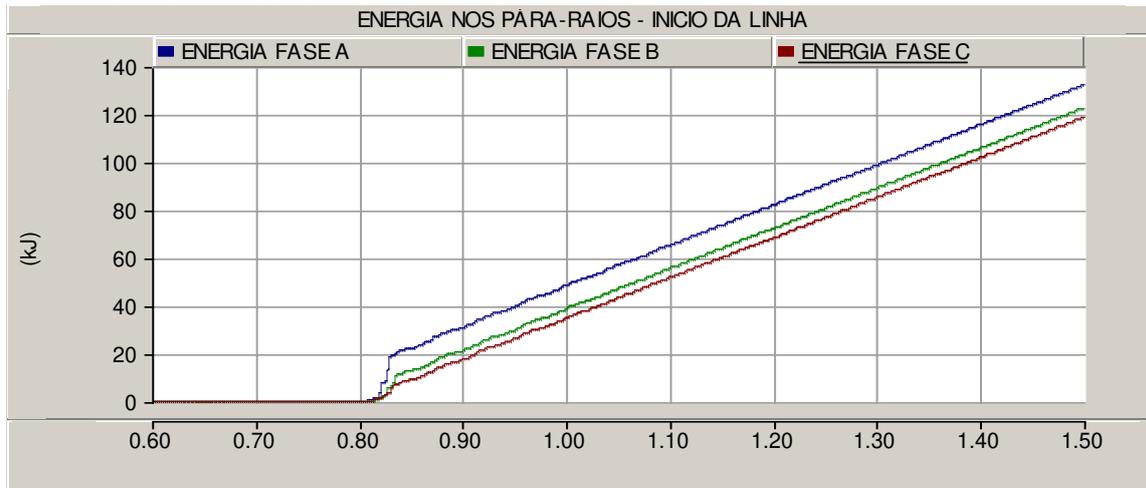
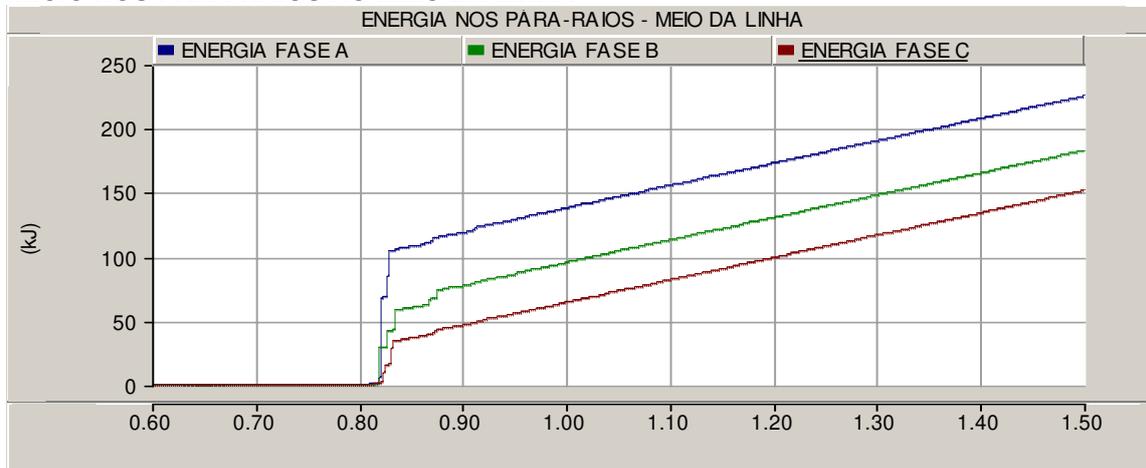


Figura 25. Tensão na Barra 5. Energização com pára-raios 360 kV nos terminais e no meio da linha. LT com 91 % de compensação reativa em derivação

ENERGIA NOS PÁRA-RAIOS NO INÍCIO DA LINHA



INÍCIO NOS PÁRA-RAIOS NO MEIO DA LINHA



ENERGIA NOS PÁRA-RAIOS NO FINAL DA LINHA

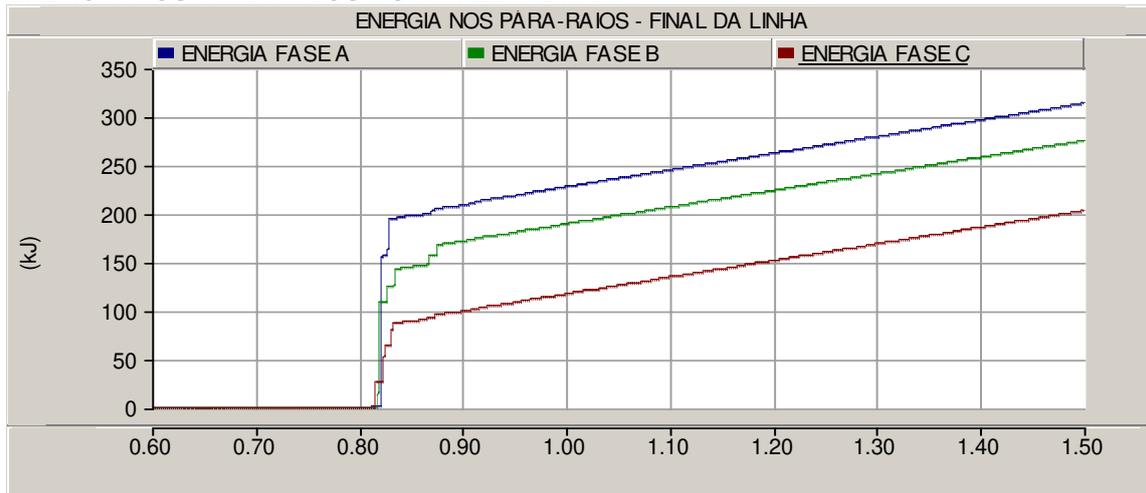


Figura 26. Energia dissipada nos pára-raios. Manobra de energização utilizando pára-raios 360 kV nos terminais e no meio da linha - 91 % de compensação reativa em derivação.

Linha de transmissão com 75 % de compensação reativa em derivação.

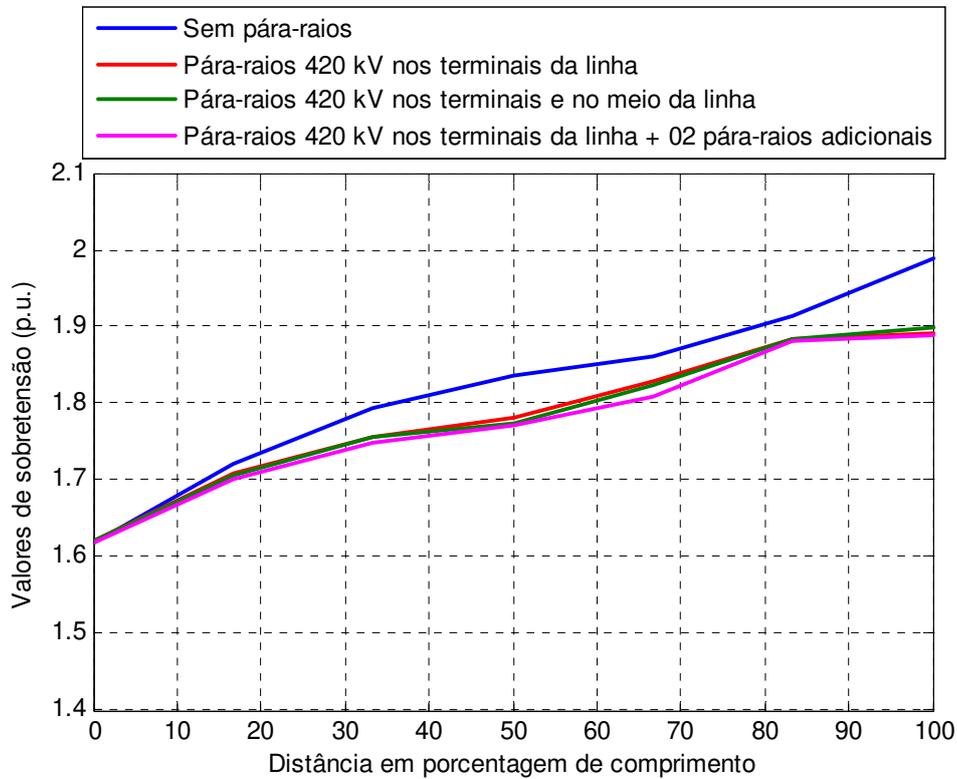


Figura 27. Perfil de tensão.- Manobra de energização utilizando pára-raios de tensão nominal 420 kV. LT com 75 % de compensação reativa em derivação

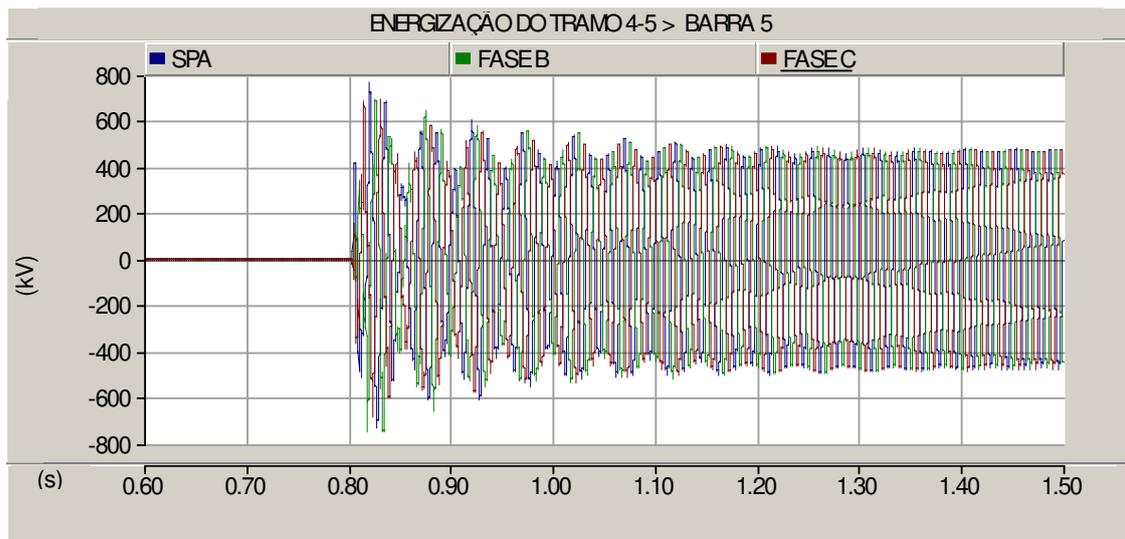


Figura 28. Tensão na Barra 5. Energização com pára-raios 420 kV nos terminais e no meio da linha. LT com 75 % de compensação reativa em derivação

ENERGIA NOS PÁRA-RAIOS NO INÍCIO DA LINHA



ENERGIA NOS PÁRA-RAIOS NO MEIO DA LINHA



ENERGIA NOS PÁRA-RAIOS NO FINAL DA LINHA



Figura 29. Energia dissipada nos pára-raios. Manobra de energização utilizando pára-raios 420 kV nos terminais e no meio da linha - 75 % de compensação reativa em derivação.

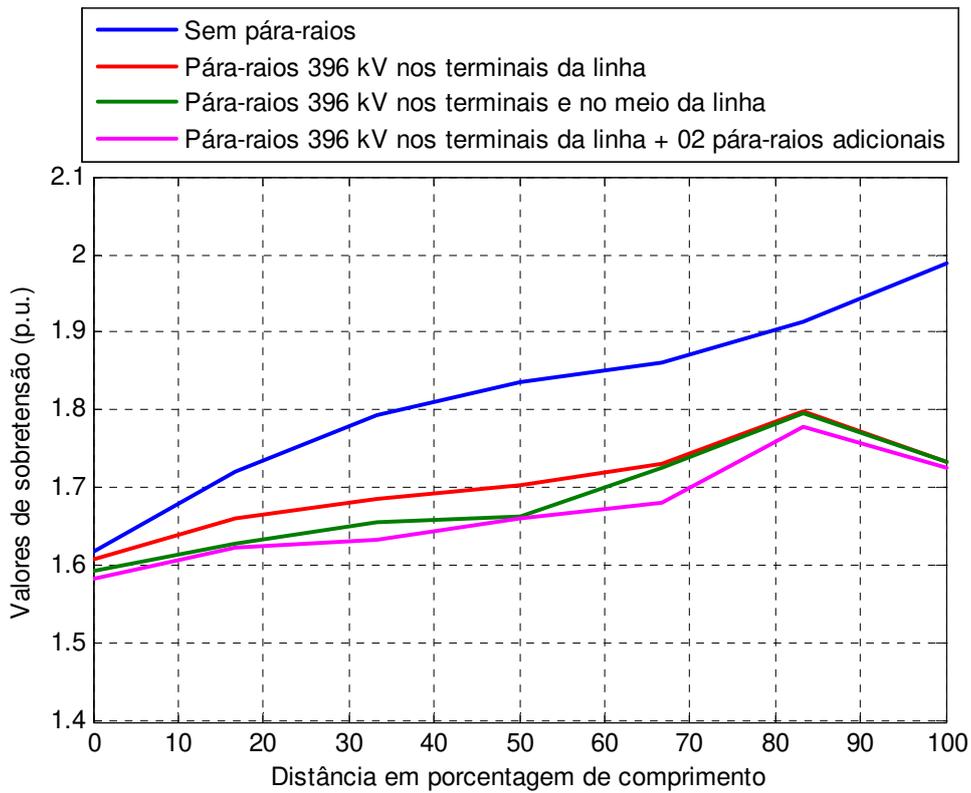


Figura 30. Perfil de tensão.- Manobra de energização utilizando pára-raios de tensão nominal 396 kV. LT com 75 % de compensação reativa em derivação

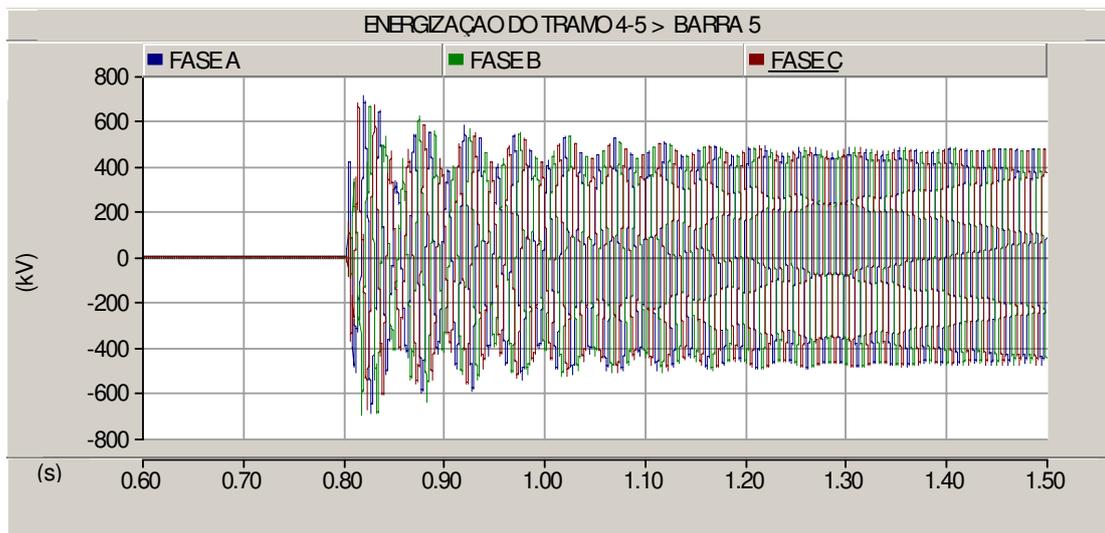
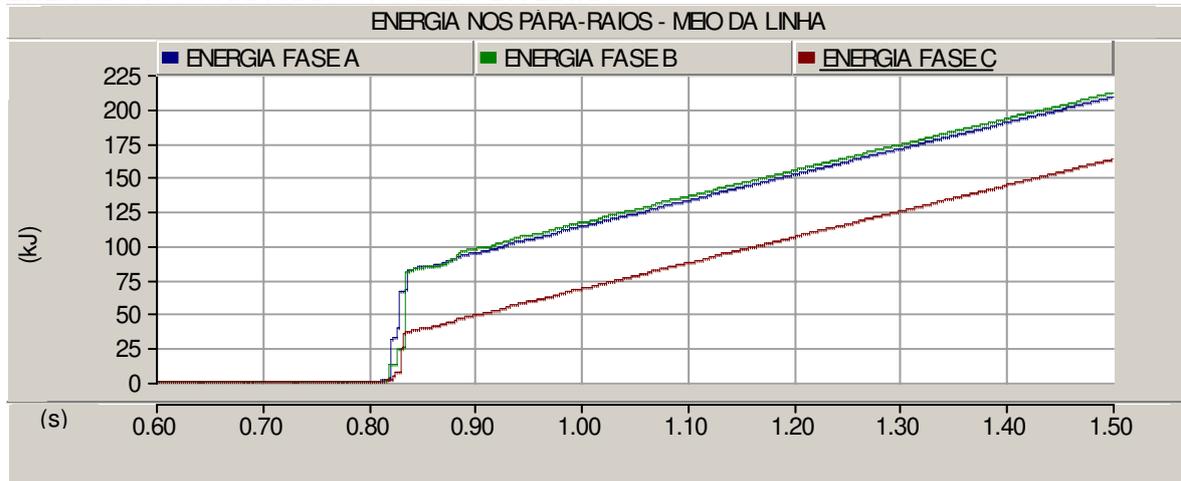


Figura 31. Tensão na Barra 5. Energização com pára-raios 396 kV nos terminais e no meio da linha. LT com 75 % de compensação reativa em derivação

ENERGIA NOS PÁRA-RAIOS NO INÍCIO DA LINHA



ENERGIA NOS PÁRA-RAIOS NO MEIO DA LINHA



ENERGIA NOS PÁRA-RAIOS NO FINAL DA LINHA

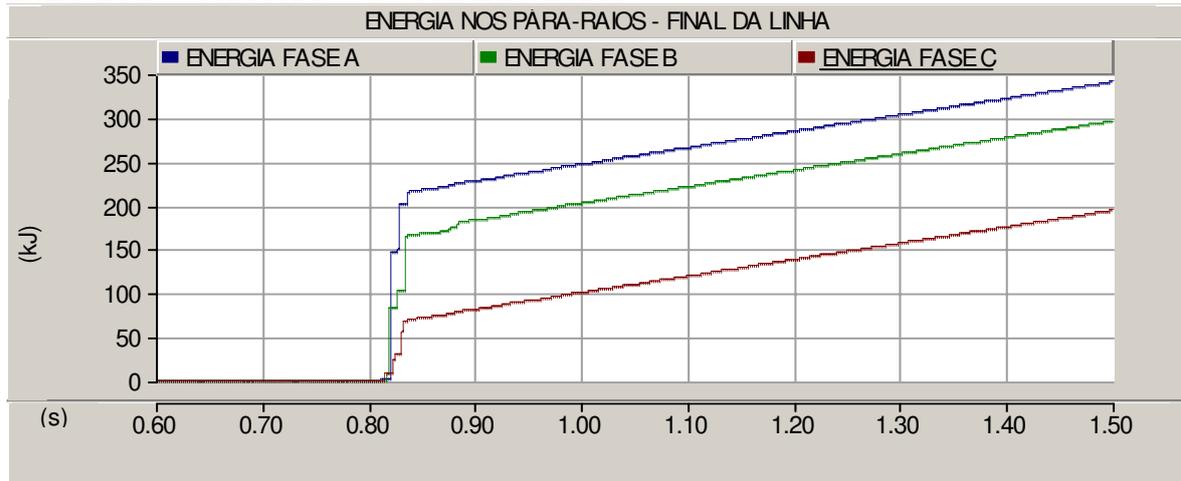


Figura 32. Energia dissipada nos pára-raios. Manobra de energização utilizando pára-raios 396 kV nos terminais e no meio da linha - 75 % de compensação reativa em derivação.

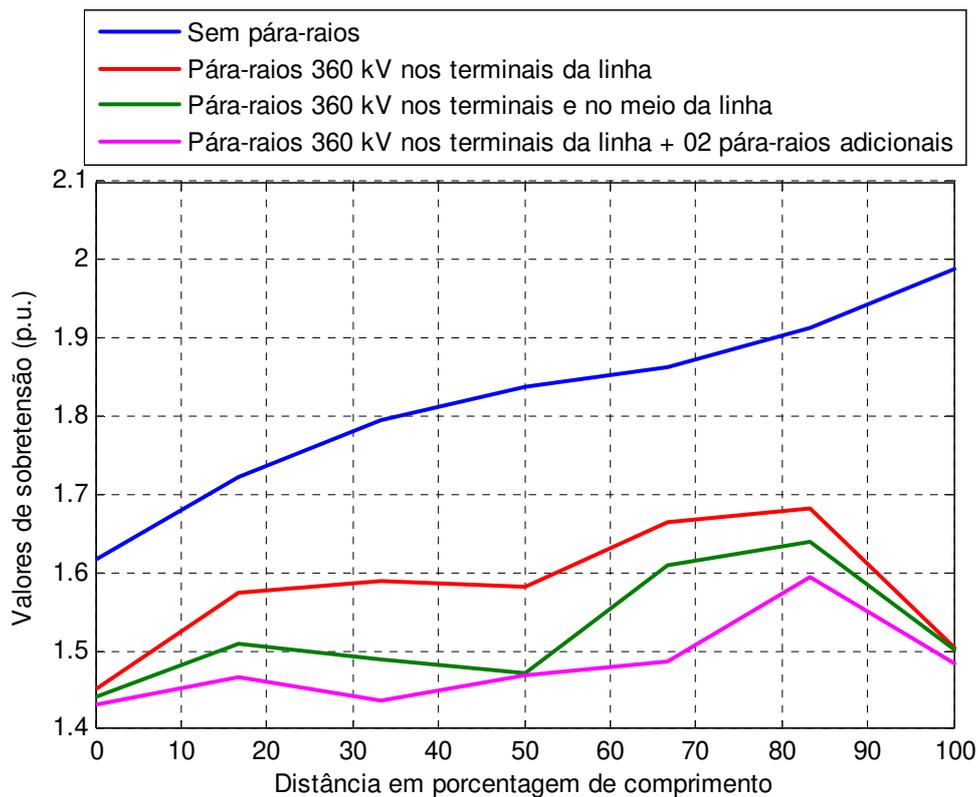


Figura 33. Perfil de tensão.- Manobra de energização utilizando Pára-raios de tensão nominal 360 kV. LT com 75 % de compensação reativa em derivação

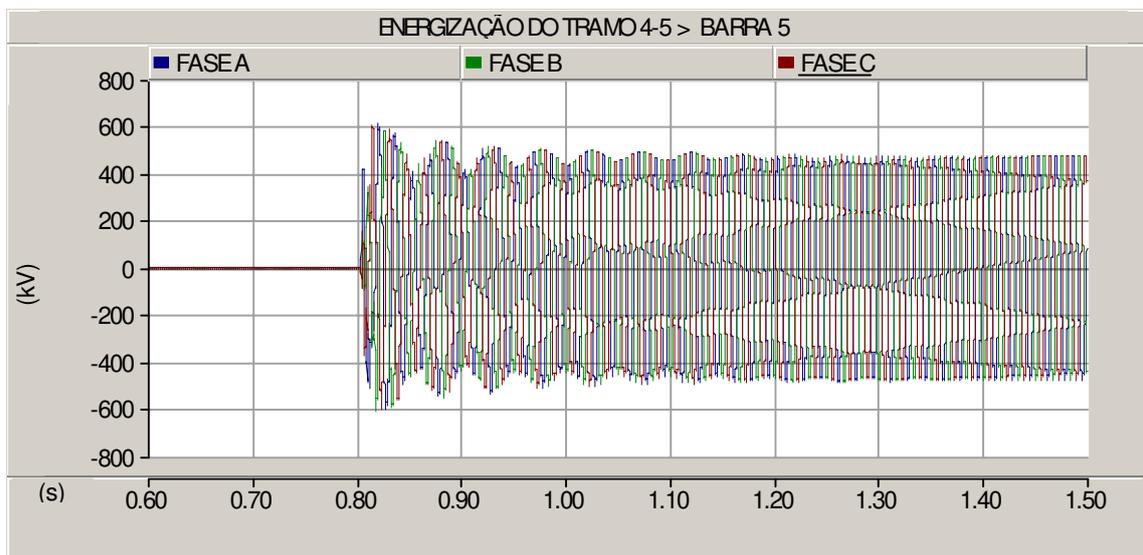
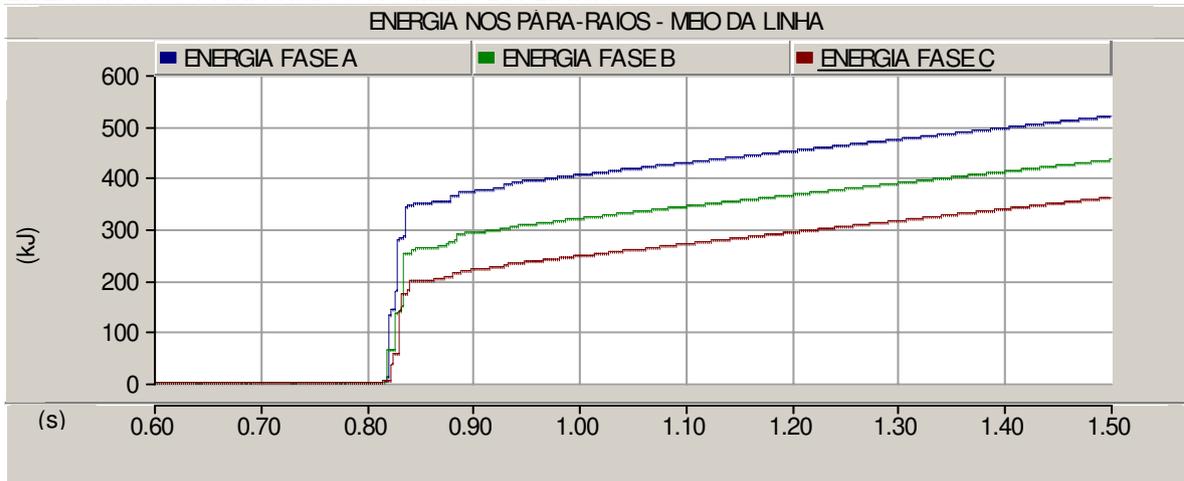


Figura 34. Tensão na Barra 5. Energização com pára-raios 360 kV nos terminais e no meio da linha. LT com 75 % de compensação reativa em derivação

ENERGIA NOS PÁRA-RAIOS NO INÍCIO DA LINHA



ENERGIA NOS PÁRA-RAIOS NO MEIO DA LINHA



ENERGIA NOS PÁRA-RAIOS NO FINAL DA LINHA

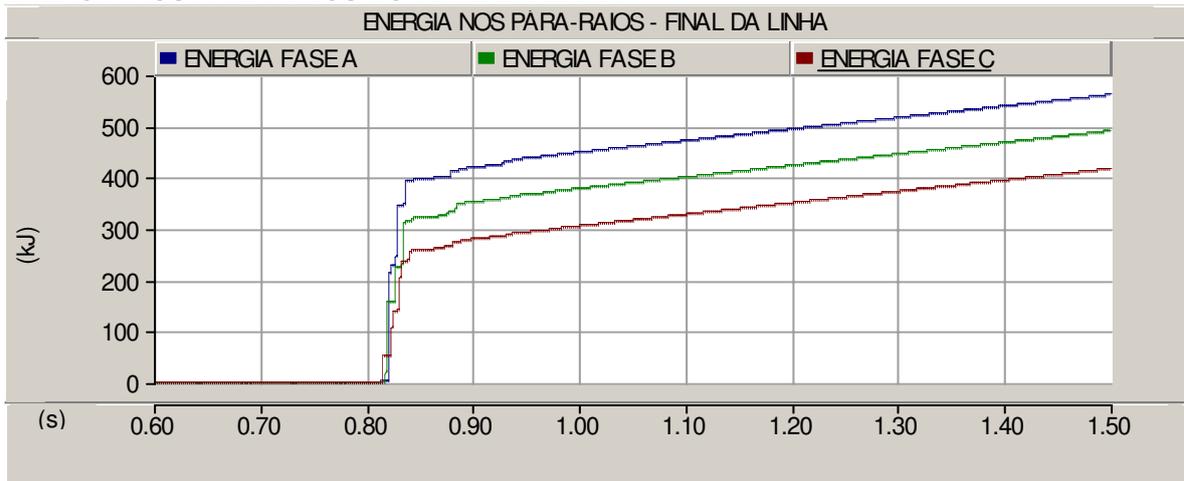


Figura 35. Energia dissipada nos pára-raios. Manobra de energização utilizando pára-raios 360 kV nos terminais e no meio da linha - 75 % de compensação reativa em derivação.

Tabela 13. Máximas sobretensões no terminal receptor e no meio da LT na manobra de energização utilizando pára-raios para o controle de sobretensões – 91 % de compensação.

Descrição	Máxima Sobretensão (pu)					
	Pára-raios 420 kV		Pára-raios 396 kV		Pára-raios 360 kV	
	Barra 5	Meio da LT	Barra 5	Meio da LT	Barra 5	Meio da LT
Sem pára-raios	1,87	1,67	1,87	1,67	1,87	1,67
Pára-raios somente nos extremos da LT	1,82	1,65	1,71	1,58	1,50	1,51
Pára-raios nos extremos e no meio da LT	1,82	1,65	1,71	1,57	1,49	1,45
Pára-raios nos extremos e 2 pára-raios adicionais	1,82	1,65	1,70	1,57	1,48	1,42

Tabela 14. Máximas sobretensões no terminal receptor e no meio da LT na manobra de energização utilizando pára-raios para o controle de sobretensões – 75 % de compensação.

Descrição	Máxima Sobretensão (pu)					
	Pára-raios 420 kV		Pára-raios 396 kV		Pára-raios 360 kV	
	Barra 5	Meio da LT	Barra 5	Meio da LT	Barra 5	Meio da LT
Sem pára-raios	1,98	1,83	1,98	1,83	1,98	1,83
Pára-raios somente nos extremos da LT	1,89	1,78	1,73	1,70	1,50	1,58
Pára-raios nos extremos e no meio da LT	1,89	1,77	1,73	1,66	1,50	1,47
Pára-raios nos extremos e 2 pára-raios adicionais	1,89	1,77	1,73	1,66	1,48	1,47

As Figuras 18, 21 e 24 mostram que para LT com 91 % de compensação em derivação, utilizando pára-raios com tensão nominal 420 kV Classe 5, o perfil de sobretensão ao longo da linha não foi reduzido notavelmente. No caso de pára-raios nos terminais e no meio da linha o nível de sobretensão no terminal remoto foi reduzido somente em 2,67 %. Para este mesmo caso, utilizando pára-raios 396 kV Classe 5 esta porcentagem aumenta para 8,56 % e utilizando pára-raios 360 kV Classe 3 a porcentagem aumenta a 20,32 %.

Para a LT com 91% de compensação em derivação, a tabela 13 resume os valores máximos das tensões no terminal receptor e no meio da linha para os casos simulados utilizando pára-raios. Pode-se observar que utilizando pára-raios com tensão nominal de 420 kV o aumento de números de pára-raios ao longo da linha não tem influência na tensão no terminal receptor nem no meio da linha. O uso de pára-raios com tensão nominal 396 kV e 360 kV no meio da linha traz uma redução adicional no nível de sobretensões neste ponto.

Como é esperado, na energização da linha com 75 % de compensação em derivação alcançam-se níveis de sobretensões maiores. Deste modo os pára-raios com tensão nominal 420 kV Classe 5 reduzem mais as sobretensões. Para o caso de pára-raios nos extremos e no meio da LT, o valor das sobretensões no terminal remoto é reduzido em 4,55 %. Já com pára-raios de tensão nominal 396 kV Classe 5 esta redução aumenta a 12,62 % e com pára-raios de tensão nominal 360 kV Classe 3 aumenta a 24,24 % (Figuras 27, 30 e 33).

A tabela 14 resume os valores das tensões na Barra 5 e no meio da linha para todos os casos simulados para LT com 75 % de compensação. Pode-se observar que a quantidade de pára-raios não teve grande influência, mas sim o nível de absorção de energia dos pára-raios (tensão nominal dos pára-raios).

Para o caso de energização da linha com pára-raios nos terminais e no meio da linha se apresentam as formas de onda no terminal receptor (Figuras 19, 22, 25, 28, 31 e 34), onde pode-se observar a diminuição da amplitude da tensão com a utilização de pára-raios com maior nível de absorção de energia. Para este mesmo caso, apresentam-se os gráficos com o nível de dissipação de energia dos pára-raios no início, no meio e no final da linha. (Figuras 20, 23, 26, 29, 32 e 35)

Tabela 15. Energia consumida pelos pára-raios. Energização da LT

Descrição	Máxima Energia Consumida (kJ)					
	LT com 91 % de compensação			LT com 75 % de compensação		
	PR 420 kV	PR 396 kV	PR 360 kV	PR 420 kV	PR 396 kV	PR 360 kV
Energia no início da LT	88	98	132	116	141	318
Energia no meio da LT	94	109	225	131	211	519
Energia no final da LT	101	110	313	170	341	561

A tabela 15 apresenta os valores das energias absorvidas pelos pára-raios para o caso da manobra de energização da LT com pára-raios nos terminais e no meio da LT. Em geral para todos os casos simulados, a capacidade de absorção da energia dos pára-raios não esteve excedida em nenhuma simulação. Os níveis de dissipação da energia são bastante menores do que a capacidade dos pára-raios, que no caso são 6,4 MJ, 6,1 MJ e 2,8 MJ para pára-raios com tensão nominal de 420 kV, 396 kV e 360 kV, respectivamente.

5.1.2 Chaveamento Controlado

O fechamento ótimo dos polos do disjuntor para reduzir ou não produzir a parcela transitória durante a manobra de energização da LT em vazio corresponde a fechar o polo do disjuntor no instante no qual a tensão a montante do disjuntor encontra-se próxima do zero, uma vez que a linha em vazio tem um comportamento semelhante a um capacitor sem carga.

O controle sincronizado do disjuntor foi implementado usando os componentes SEQUENCERS que são parte de um grupo especial de elementos do controle do PSCAD/EMTDC com duas variantes:

- Fechamento sincronizado das fases quando a onda de tensão de cada fase cruza consecutivamente os zeros da tensão.
- Fechamento da primeira fase (A) no instante do zero da tensão e fechamento subsequente das demais fases com um atraso de 60° (fase C e B, sucessivamente).

Fechamento sincronizado das fases no cruzamento exato pelo zero

A Figura 36 mostra a seqüência de eventos do sistema de controle para fechar os polos do disjuntor no instante exato quando a tensão é nula. No passo A se inicia a seqüência para cada fase, no passo B se determina a condição dos disjuntores como inicialmente abertos e no passo C se unifica a seqüência das três fases. Seguidamente no passo D se determina o período de espera antes de iniciar o fechamento do disjuntor da primeira fase, no passo E se reconhece o instante em que a onda de tensão cruza por zero e finalmente no passo F se fecha o disjuntor desta fase. A mesma rotina dos passos E e F se segue para o fechamento das outras fases, segundo E', E'' e F', F''.

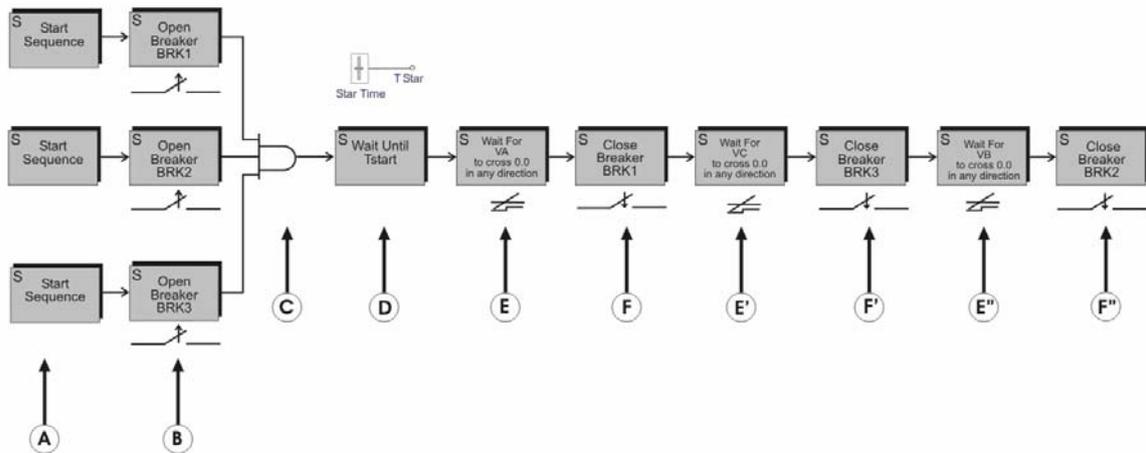


Figura 36. Seqüência de eventos. Fechamento dos polos do disjuntor no cruzamento exato pelo zero.

- **Fechamento das fases com um atraso de 60° entre cada fechamento.**

Consiste no fechamento do disjuntor da primeira fase (Fase A) na passagem pelo zero, seguido do fechamento do disjuntor das outras fases com um atraso de 60° entre cada fechamento (Fase C e B consecutivamente). A Figura 37 mostra a seqüência de eventos neste segundo caso, onde os passos A, B, C, D e E são os mesmos do cruzamento exato pelo zero variando no passo G onde se determina um atraso de 60° antes de fechar o disjuntor da fase seguinte. A mesma rotina segue-se para as outras fases segundo F', G' e F''.

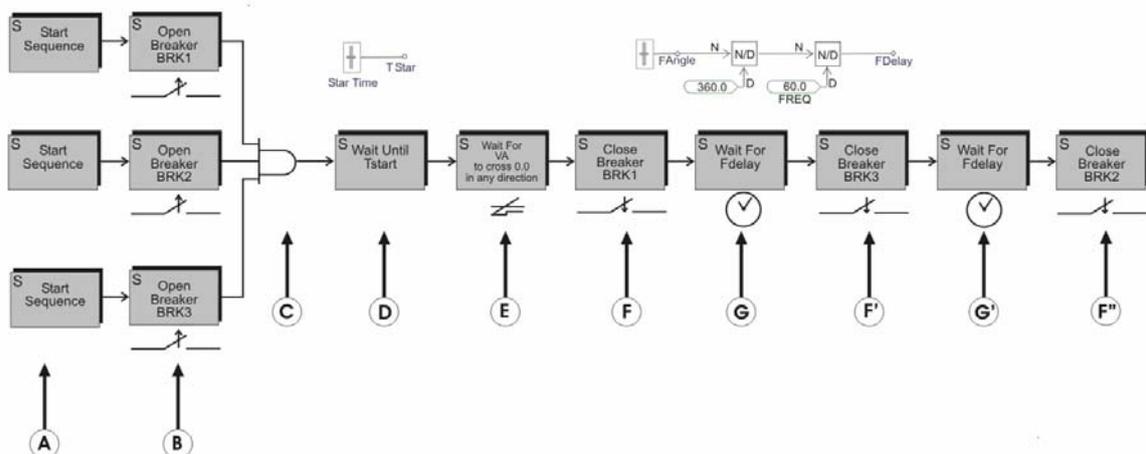


Figura 37. Seqüência de eventos. Fechamento dos polos do disjuntor com atraso de 60° entre fases

A simulação dos dois casos de controle permite verificar as diferenças entre ambos. O fechamento sincronizado com um atraso de 60° entre fases não coincide exatamente no cruzamento pelo zero, mas a diferença é mínima. O monitoramento das formas de onda de tensão na Barra 4 para ambas as modalidades de fechamento dos disjuntores é apresentado na Figura 38.

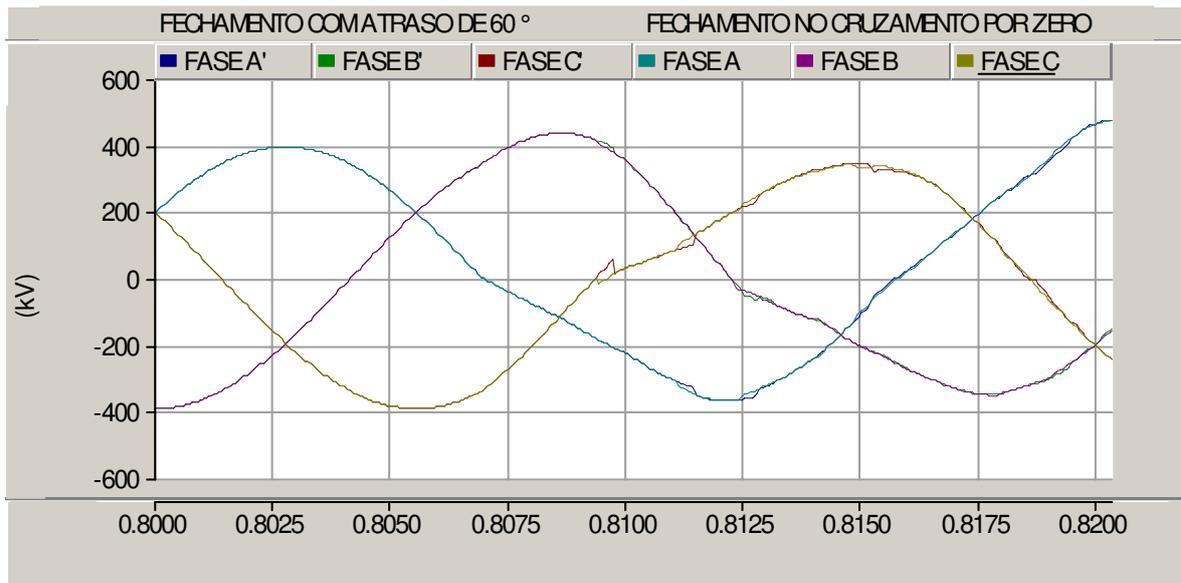


Figura 38. Diferenças nas formas de onda para as duas modalidades de fechamento dos polos do disjuntor – Tensão na Barra 4

As Figuras 39 e 40 correspondem ao perfil de tensão ao longo das linhas de transmissão com 91 e 75 % de compensação, respectivamente e mostram as diferenças quando estas são energizadas fechando o disjuntor na passagem exata pelo zero ou com um atraso de 60° entre fases, após o cruzamento da primeira fase por zero.

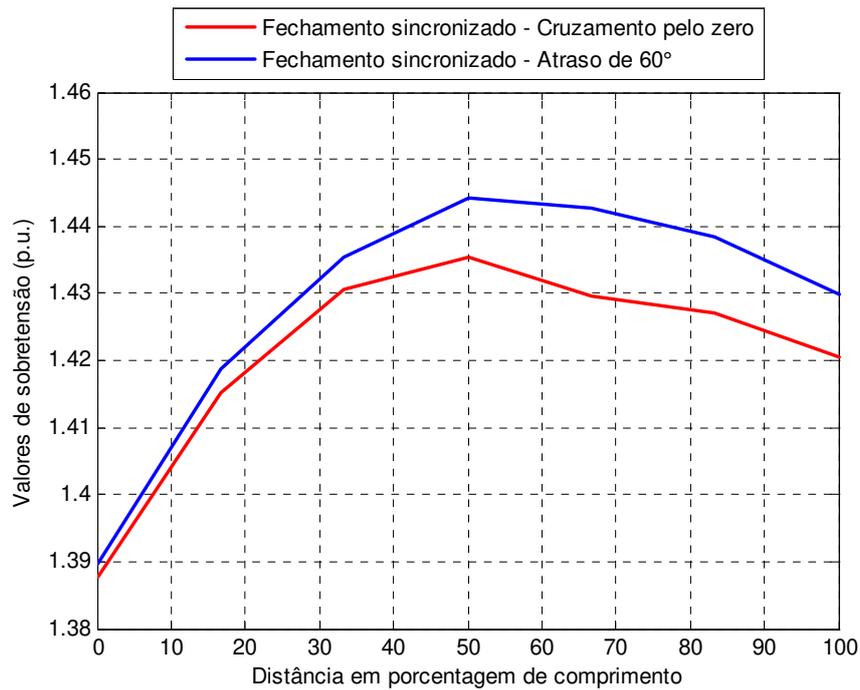


Figura 39. Diferenças nos perfis de tensão para as duas modalidades de fechamento do disjuntor. L.T. com 91 % de compensação em derivação

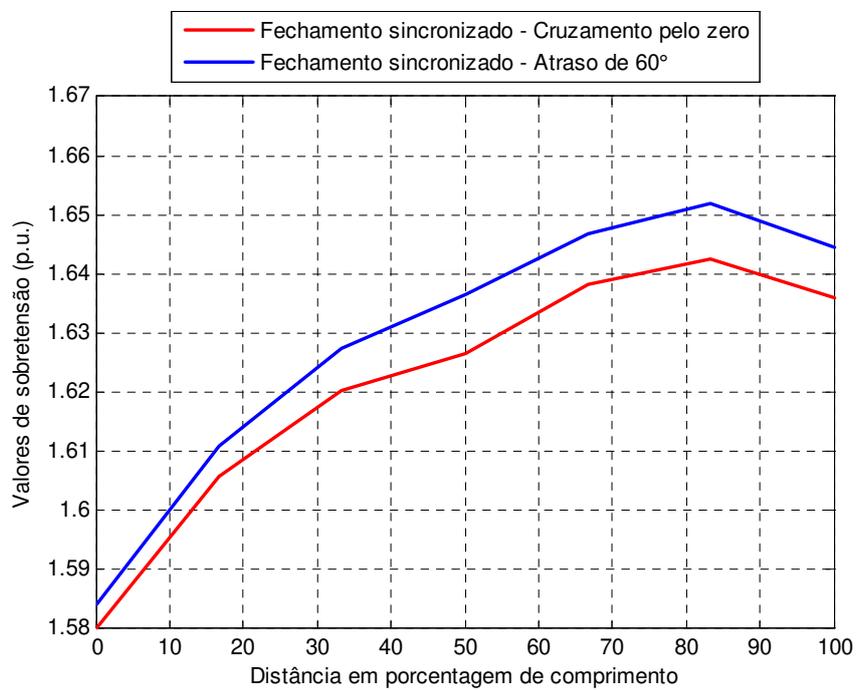


Figura 40. Diferenças nos perfis de tensão para as duas modalidades de fechamento do disjuntor. L.T. com 75 % de compensação em derivação

Para a LT com uma compensação reativa em derivação de 91%, a Figura 41 apresenta a forma das ondas de tensão durante a manobra de energização somente com pára-raios de tensão nominal 420 kV nos extremos para mitigar sobretensões, o fechamento dos polos do disjuntor se realiza na pior condição, ou seja, quando a onda de tensão passa pelo máximo. Já na Figura 42 se mostra a mesma manobra, mas utilizando além dos pára-raios nos terminais da linha o chaveamento sincronizado dos disjuntores para controlar as sobretensões identificando quando a tensão passa pelo zero. Pode-se observar que não somente a sobretensão foi reduzida com o chaveamento controlado como também a forma de onda apresenta menor conteúdo harmônico. Uma consequência da aplicação do chaveamento controlado é que os pára-raios geralmente são menos forçados e a capacidade de dissipação de energia requerida é reduzida.

A redução de sobretensões conseguida com este método foi importante. A sobretensão no terminal remoto é reduzida em 23,53 % e em 17,17 %, alcançando valores de 1,43 e 1,64 p.u para a linha com compensação em derivação de 91 % e de 75 %, como mostrado nas Figuras 43 e 45, respectivamente. No sistema estudado este método apresentou um desempenho melhor para a linha com 91 % de compensação em derivação. As figuras 44 e 46 mostram a forma de onda de tensão na Barra 5 para LT com 91 % e 75 % de compensação em derivação, respectivamente.

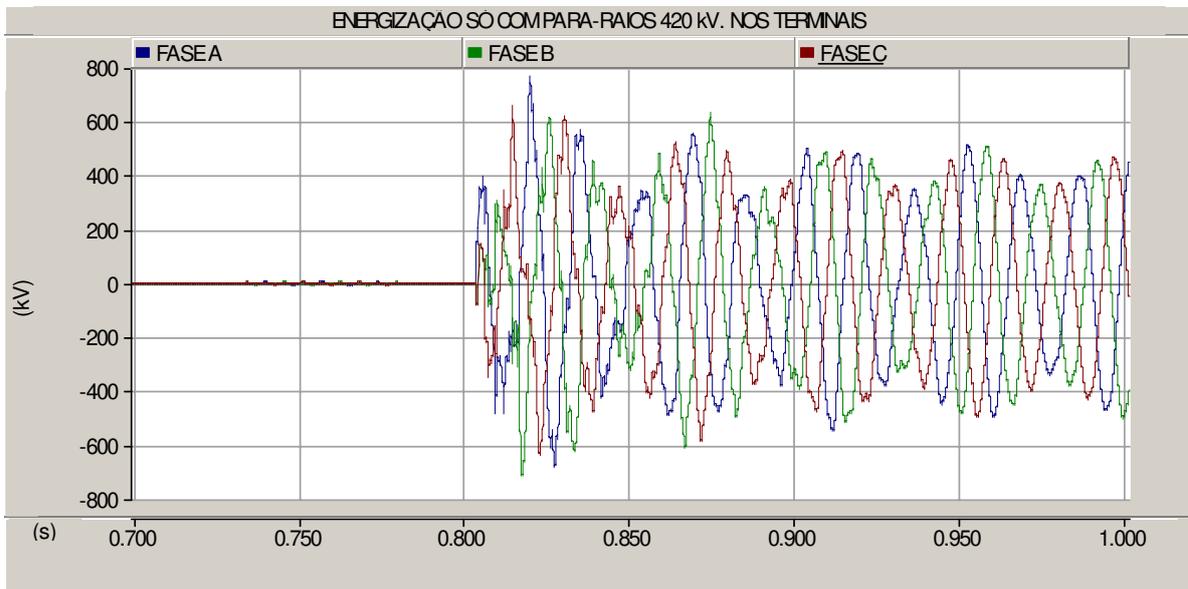


Figura 41. Tensão na Barra 5. Energização da linha sem chaveamento controlado.
LT com 91 % de compensação em derivação

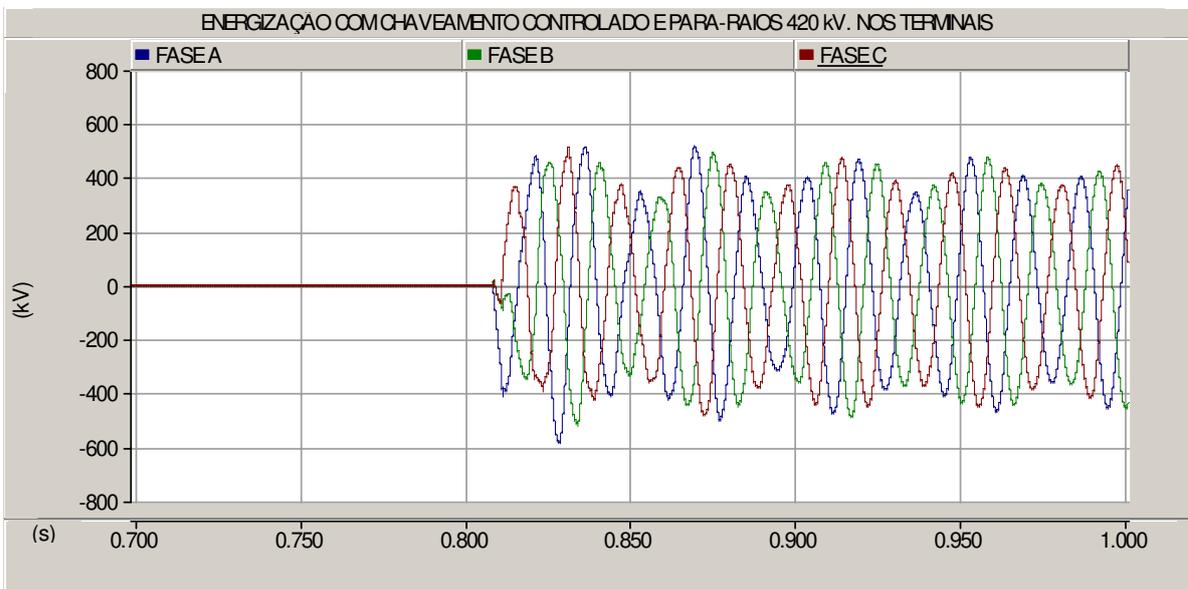


Figura 42. Tensão na Barra 5. Energização da linha com chaveamento controlado.
LT com 91 % de compensação em derivação

Linha de transmissão com 91 % de compensação reativa em derivação.

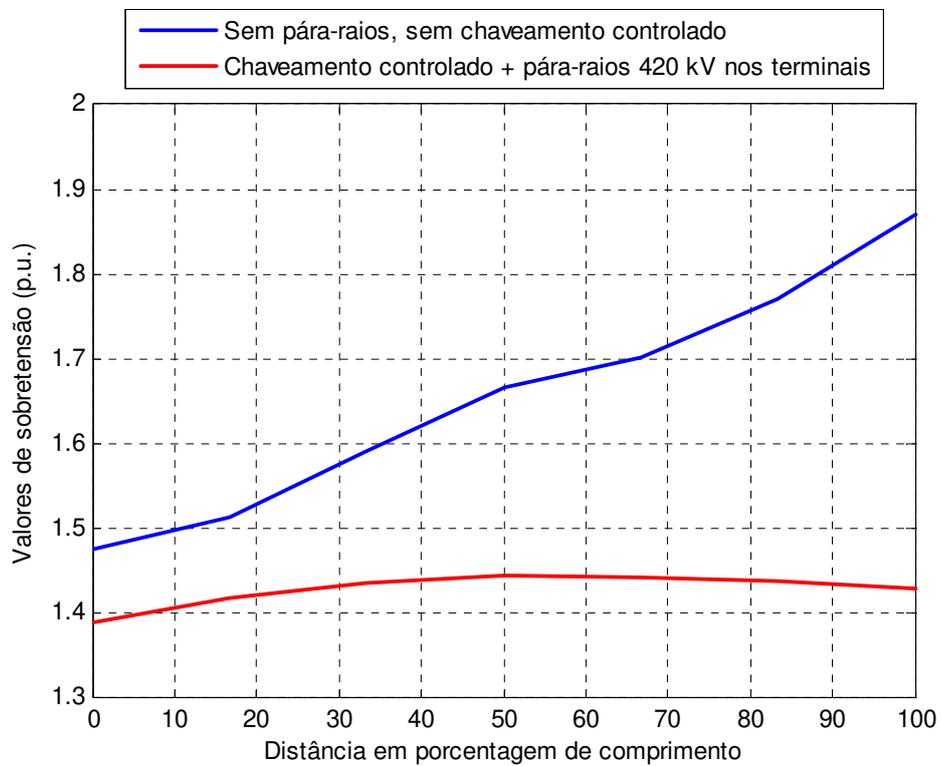


Figura 43. Perfis de tensão. Energização da linha utilizando chaveamento controlado. LT com 91 % de compensação em derivação

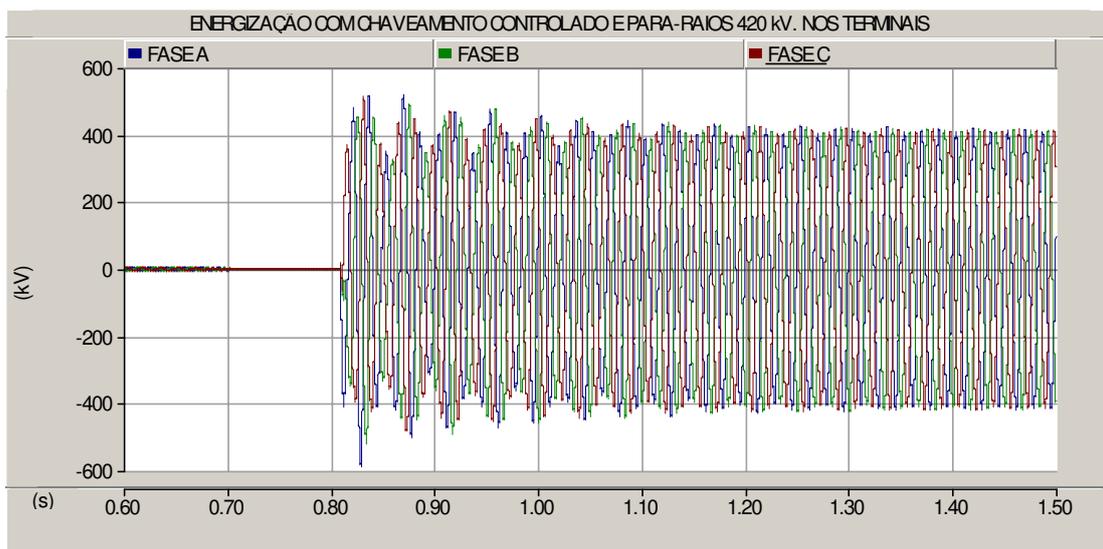


Figura 44. Tensão na Barra 5. Energização da linha utilizando chaveamento controlado. LT com 91 % de compensação em derivação

Linha de transmissão com 75 % de compensação reativa em derivação.

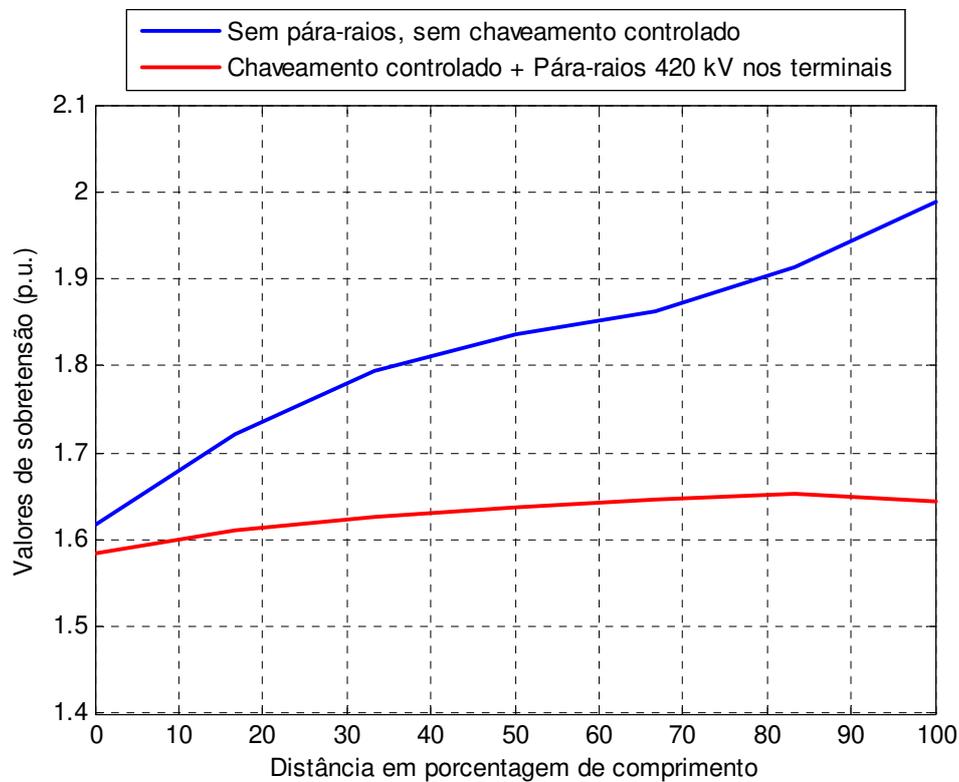


Figura 45. Perfis de tensão. Energização da linha utilizando chaveamento controlado. LT com 75 % de compensação em derivação

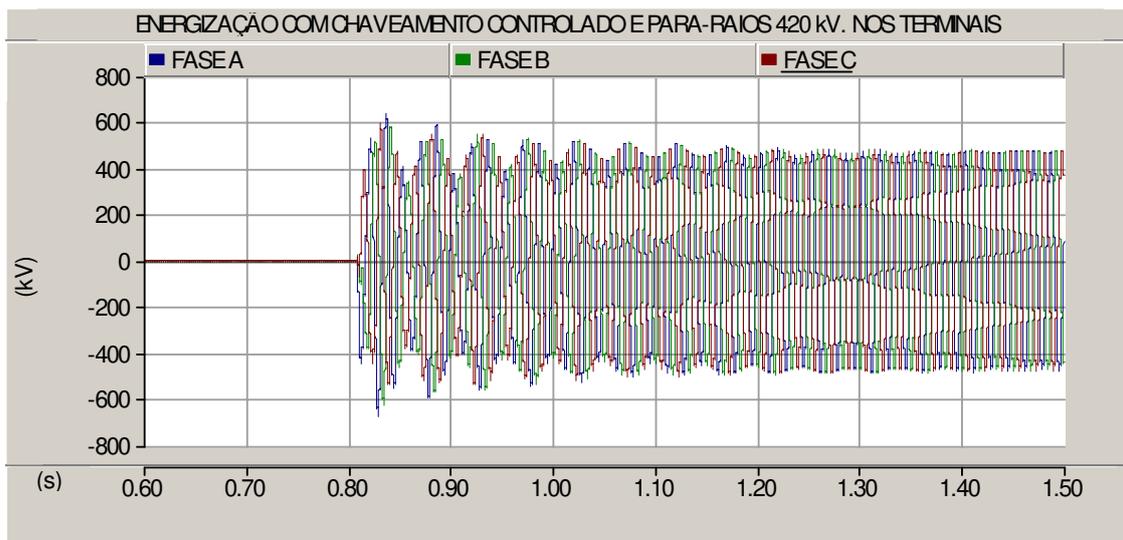


Figura 46. Tensão na Barra 5. Energização da linha utilizando chaveamento controlado. LT com 75 % de compensação em derivação

5.1.3 Resistor de Pré-inserção

Para nossas simulações se utilizou um resistor de pré-inserção de 400Ω que é o resistor que se encontra em campo. Este permanece no circuito durante 8 ms. O contato auxiliar que insere o resistor de pré-inserção é fechado no máximo da onda de tensão observada na Barra 4, simulando assim a pior condição.

As Figuras 47 e 49 apresentam o perfil de tensão para o caso de energização utilizando resistor de pré-inserção. Pode-se observar que usando este método, a sobretensão no terminal remoto foi reduzida em 26,74 % e em 17,17 %, alcançando valores de 1,37 e 1,64 pu para a linha com compensação em derivação de 91 % e de 75 %, respectivamente. Para o sistema em estudo este método apresenta um desempenho melhor para a linha com 91 % de compensação em derivação.

As figuras 48 e 50 mostram a forma de onda de tensão na Barra 5 para LT com 91 % e 75 % de compensação em derivação respectivamente.

Normalmente o valor do resistor de pré-inserção é especificado próximo ao valor da impedância característica da linha. No presente trabalho por se estar usando uma linha real como exemplo foi utilizado o valor do resistor existente no campo. Para complementar o estudo foram incluídas no Anexo 4 algumas simulações com o resistor de pré-inserção de 211Ω que é o valor da impedância característica. A sobretensão no terminal remoto alcançou valores de 1,39 e 1,65 pu para a linha com compensação em derivação de 91 % e de 75 %, respectivamente, não variando muito dos resultados encontrados com o resistor de campo.

Linha de transmissão com 91 % de compensação reativa em derivação.

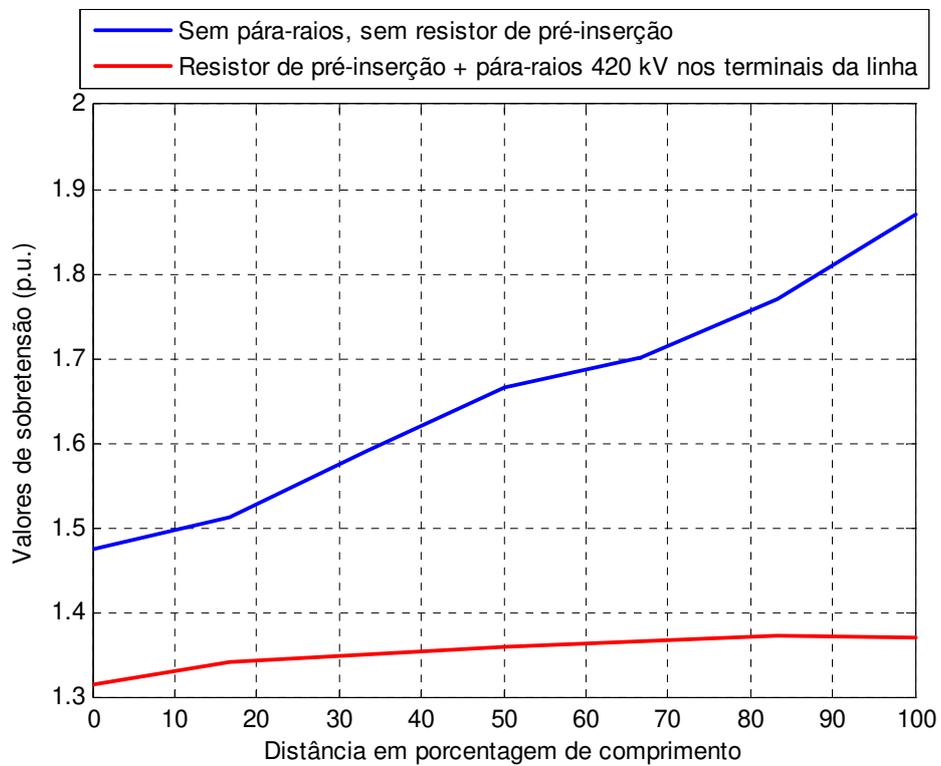


Figura 47. Perfis de tensão. Energização da linha utilizando resistor de pré-inserção. LT com 91 % de compensação em derivação.

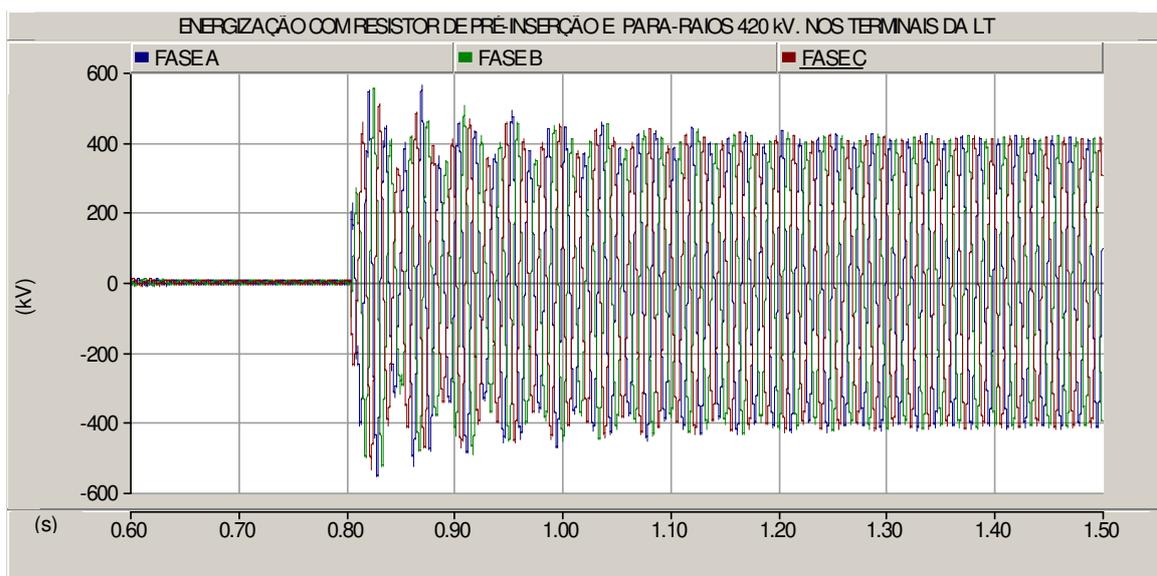


Figura 48. Tensão na Barra 5. Energização da linha utilizando resistor de pré-inserção. LT com 91 % de compensação em derivação.

Linha de transmissão com 75 % de compensação reativa em derivação.

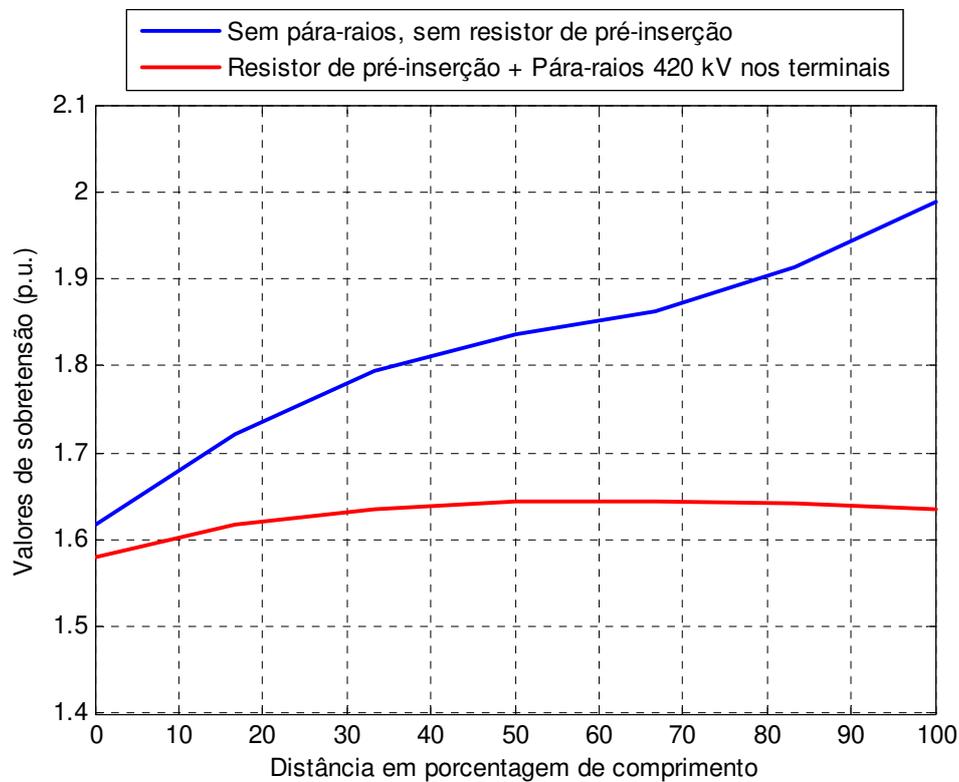


Figura 49. Perfil de tensão. Energização da linha utilizando resistor de pré-inserção. LT com 75 % de compensação em derivação.

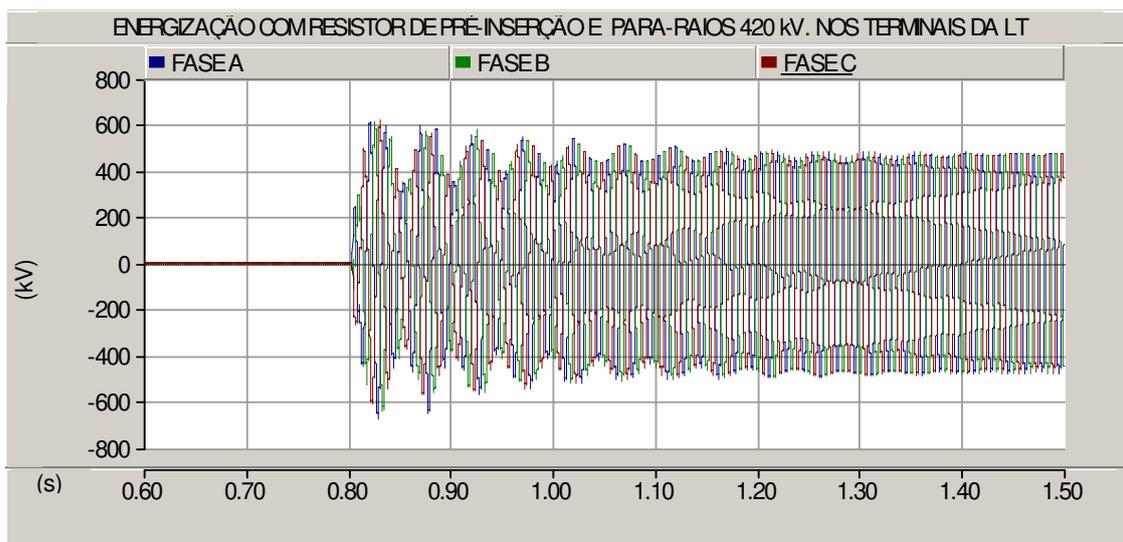


Figura 50. Tensão na Barra 5. Energização da linha utilizando resistor de pré-inserção. LT com 75 % de compensação em derivação.

5.2 Religamento trifásico de linhas de transmissão

A seguir é descrita a metodologia adotada nas simulações do presente estudo, considerando a linha com compensação reativa em derivação de 91 % e 75 % e levando em conta os aspectos relacionados à carga residual na linha e ao ponto da onda de tensão de fechamento do disjuntor:

- A simulação foi iniciada com a L.T. operando em condições normais.
- A seguir foi simulada a abertura trifásica da linha de transmissão em 0,7 s resultando no aparecimento de cargas residuais nas três fases.
- Na presença dessas cargas residuais, foi simulado o religamento da linha de transmissão com as três fases acionadas em instantes variando cada 0,001 s a partir de 0,7 s até 1,6 s. O monitoramento da tensão entre os polos do disjuntor se realiza segundo a Figura 51. A definição do instante de fechamento do disjuntor (a cada 1 ms) é implementado no PSCAD através do monitoramento da tensão no terminal receptor, conforme apresentado na Figura 52.
- Em seguida foram determinadas as máximas amplitudes de tensão no final da linha para cada uma das três fases que correspondem ao fechamento dos polos do disjuntor no máximo do primeiro batimento na tensão monitorada entre polos do disjuntor. Este instante corresponde a 0,8839 s e 0,7642 s para a linha com compensação reativa em derivação de 91 % e 75 %, respectivamente.
- Do mesmo modo foram determinados os valores mínimos das tensões no final da linha visando encontrar o instante ótimo para o religamento. Considerando um tempo morto da linha de 12 ciclos, este instante corresponde ao fechamento dos polos do disjuntor no mínimo do primeiro batimento para a linha com 91 % de compensação (Figura 53) e no mínimo do segundo batimento para a linha de 75 % de compensação (Figura 54). Os instantes de fechamento são 1,0694 s e 0,9576 s para a linha com compensação reativa em derivação de 91 % e 75 %, respectivamente.

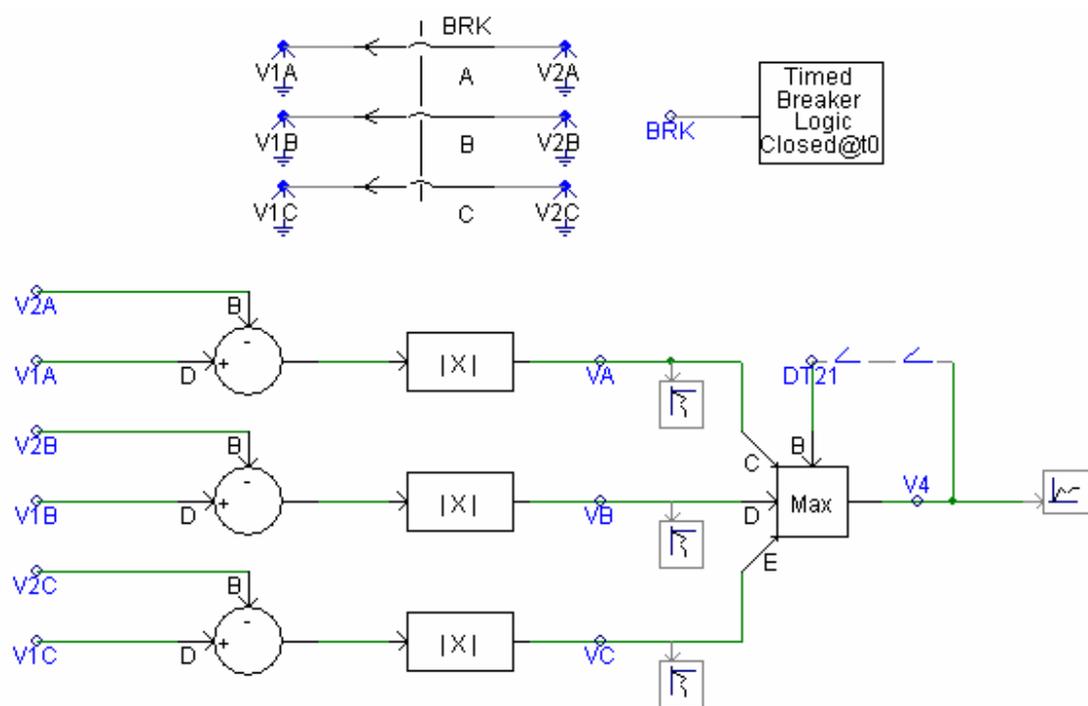


Figura 51. Monitoramento da tensão dos polos do disjuntor no PSCAD.

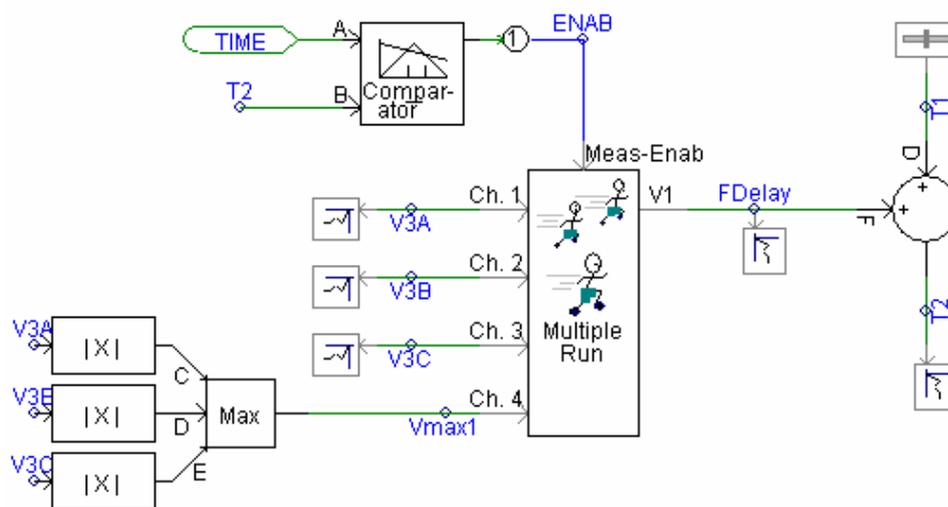


Figura 52. Monitoramento das prováveis condições de fechamento dos polos do disjuntor.

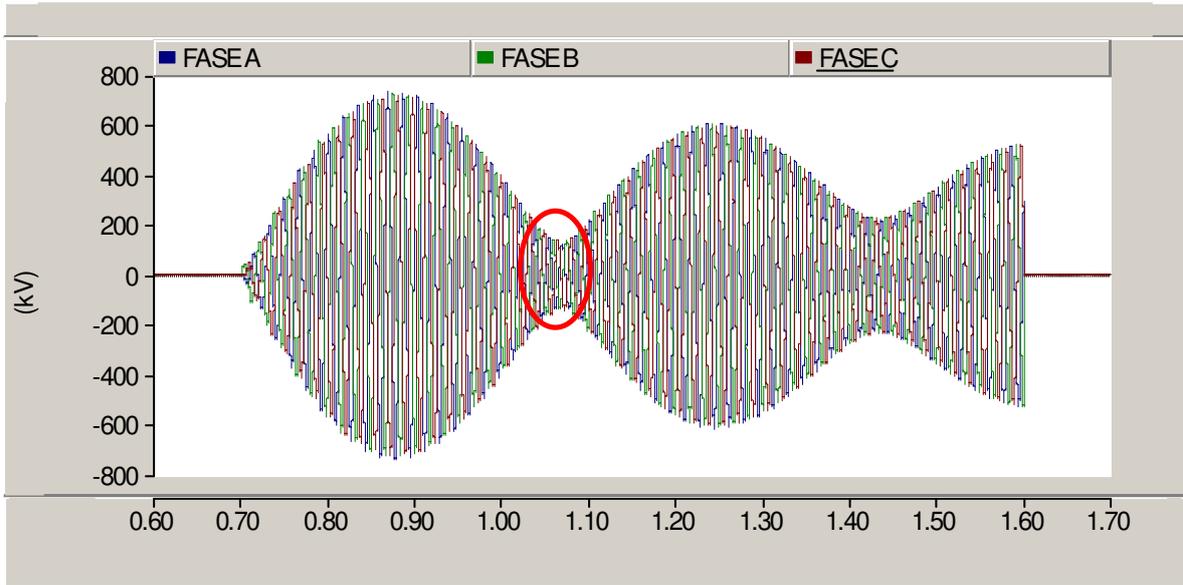


Figura 53. Tensão entre os terminais dos polos do disjuntor
LT com 91 % de compensação em derivação

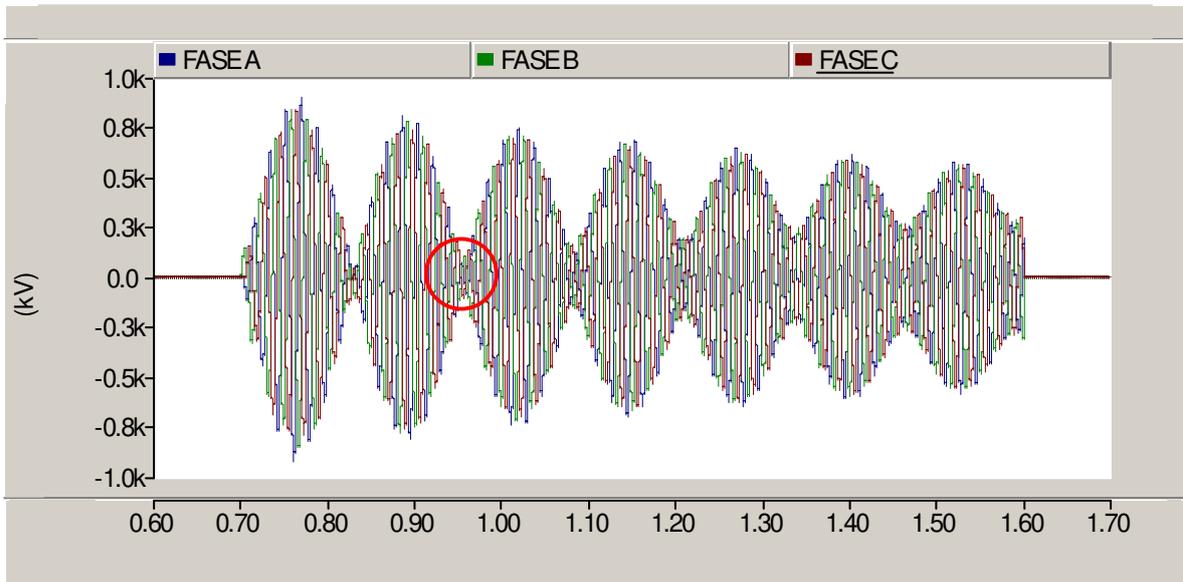


Figura 54. Tensão entre os terminais dos polos do disjuntor.
LT com 75 % de compensação em derivação

Para melhor entendimento da natureza da composição de frequências na descarga transitória, a frequência de oscilação pode ser obtida se a reatância da linha for desprezada. O erro assim introduzido é muito pequeno, visto ser esta reatância longitudinal da linha muito menor do que a do reator em derivação. Então considerando a admitância por unidade de comprimento da linha Y , temos:

$$Y = 6,123 \mu S / km$$

Para a linha de 252 km com 91 % de compensação temos:

$$L_{eq} = 1,8947 H$$

$$C_{eq} = 4,0570 \mu F$$

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{eq}C_{eq}}} = 57,40 Hz$$

$$f_o - f_{60} = 2,5970 Hz$$

$$T = 0,3850 s$$

Onde:

L_{eq} = Indutância do reator em derivação

C_{eq} = Capacitância transversal da linha

f_o = Frequência de oscilação

f_{60} = Frequência fundamental (60 Hz)

T = Período do batimento

De igual modo para 75 % de compensação em derivação temos:

$$L_{eq} = 2,292 H$$

$$C_{eq} = 4,0570 \mu F$$

$$f_o = 50,41 Hz$$

$$f_o - f_{60} = 7,8072 Hz$$

$$T = 0,1280 s$$

Para a LT com 91 % de compensação em derivação, 0,3850 s corresponde ao período do batimento das ondas de tensão monitoradas entre os terminais dos polos do disjuntor. Igualmente 0,1280 s corresponde ao período do batimento das ondas de tensão monitoradas entre os terminais dos polos do disjuntor da LT com 75 % de compensação em derivação.

Considerando o tempo de atuação da proteção, para a LT com 91 % de compensação o instante ótimo para o religamento tripolar corresponde à região quando a amplitude do primeiro batimento da tensão entre os polos do disjuntor é mínima, isto é, durante o primeiro período de menor amplitude do batimento da tensão, já que nas próximas regiões similares a amplitude do batimento da tensão será maior. Para a LT com 75 % de compensação o instante ótimo para o religamento corresponde ao segundo período de menor batimento da tensão, supondo um tempo de atuação da proteção de 150 ms.

Para a LT com 91 % de compensação em derivação, a Figura 55 apresenta a forma de onda de tensão para o caso em que os polos do disjuntor sejam fechados no instante desfavorável, ou seja, no máximo do primeiro batimento e utilizando somente pára-raios de tensão nominal 420 kV nos terminais. Já na Figura 56 pode-se observar que fechando os polos na região de mínimo batimento, não somente a sobretensão foi reduzida como também a forma de onda apresenta menor conteúdo harmônico.

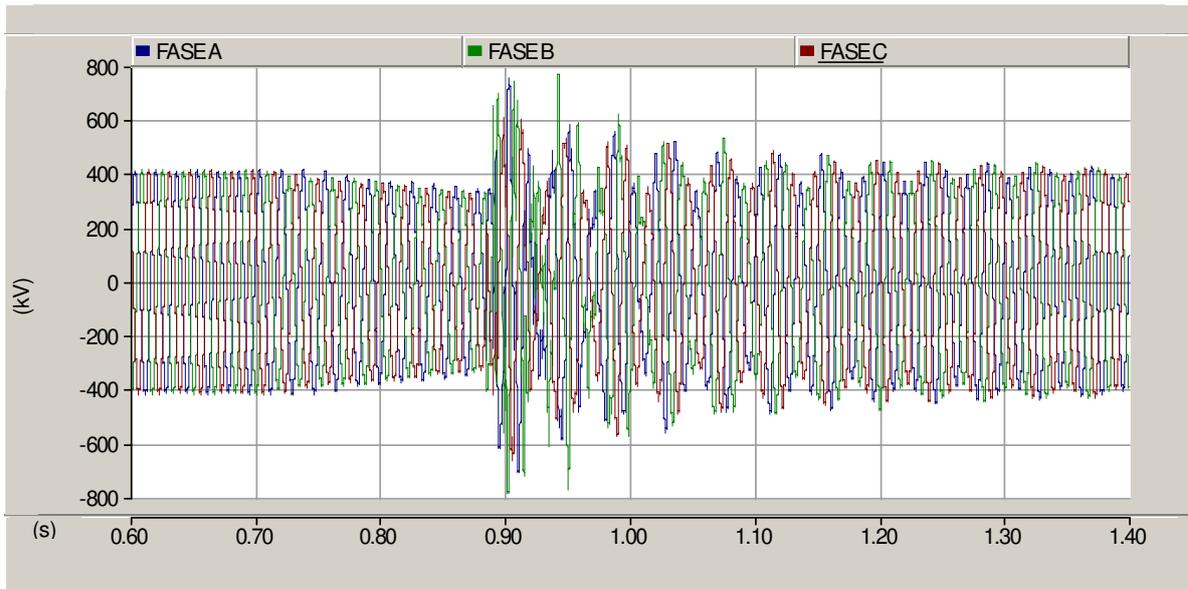


Figura 55. Tensão na Barra 5. Religamento tripolar com chaveamento no instante desfavorável.
LT com 91 % de compensação em derivação

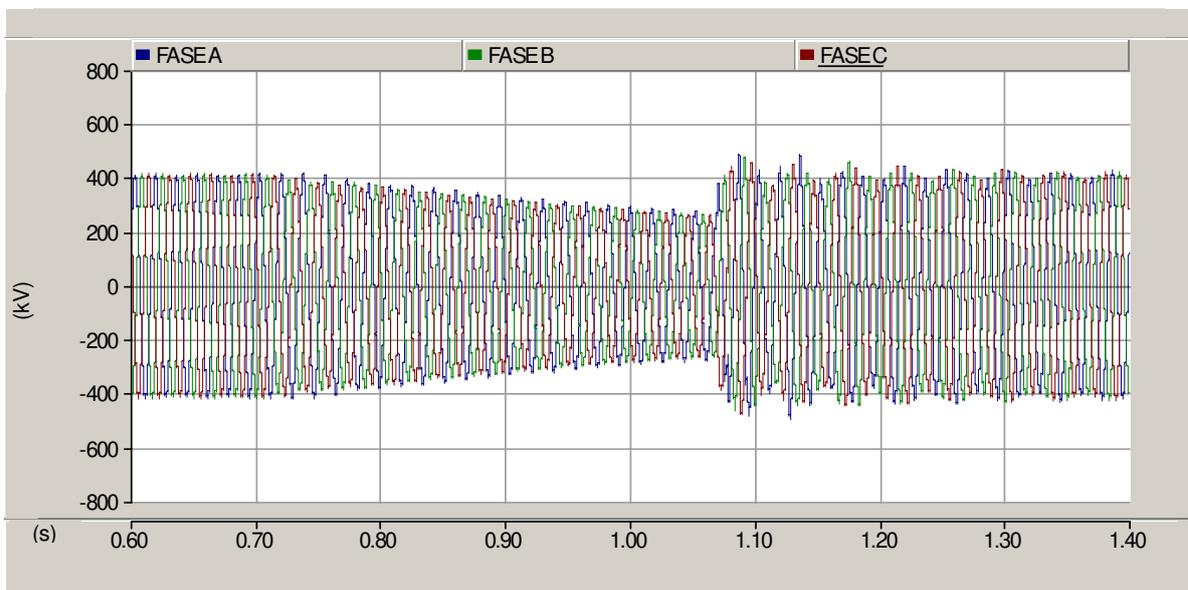


Figura 56. Tensão na Barra 5. Religamento tripolar com chaveamento no instante favorável.
LT com 91 % de compensação em derivação

5.2.1 Pára-raios

Para o caso de religamento tripolar estudado, o controle de sobretensões utilizando pára-raios foi simulado para a condição mais desfavorável, ou seja, fechando todos os polos no máximo do primeiro batimento. As simulações também foram feitas para a linha de transmissão com 91 % e 75 % de compensação reativa em derivação. Três tipos de pára-raios de ZnO foram utilizados para as simulações: Pára-raios de tensão nominal 420 kV, 396 kV e 360 kV. Para cada caso se estudou as seguintes situações: Pára-raios localizados somente nos terminais da linha, pára-raios localizados nos terminais e no meio da linha e finalmente pára-raios localizados nos terminais e em dois pontos intermediários correspondentes a 1/3 e 2/3 do comprimento da linha.

Para LT com 91 % de compensação em derivação, utilizando pára-raios com tensão nominal 420 kV, a Figura 57 mostra o perfil de tensão ao longo da linha. Para o caso de pára-raios nos terminais e no meio da LT, o nível de sobretensão é reduzido a 1,91 p.u. no terminal remoto (Barra 5). Para este mesmo caso, utilizando pára-raios de tensão nominal 396 kV esta redução alcança o valor de 1,72 pu (Figura 60) e com pára-raios de tensão nominal de 360 kV alcança o valor de 1,49 pu (Figura 63).

No religamento trifásico da linha com 75 % de compensação em derivação alcançam-se níveis de sobretensão maiores. Para o caso de pára-raios nos terminais e no meio da linha utilizando pára-raios de tensão nominal 420 kV, a redução de sobretensões no terminal remoto alcança o valor de 1,89 pu (Figura 69), já com pára-raios de tensão nominal 396 kV a redução alcança o valor de 1,73 p.u (Figura 69) e com pára-raios de tensão nominal 360 kV a redução alcança o valor de 1,48 pu. (Figura 72).

Para o caso específico de religamento da LT com pára-raios nos terminais e no meio da linha se apresentam as formas de onda no terminal receptor (Figuras 58, 61, 64, 67, 70, e 73), onde pode-se observar a diminuição da amplitude de onda com a utilização de pára-raios de maior capacidade de absorção de energia. Para este mesmo caso o nível de absorção de energia dos pára-raios no início, no meio e no final da linha é mostrado nas Figuras 59, 62, 65, 68, 71, e 74.

Linha de transmissão com 91 % de compensação reativa em derivação.

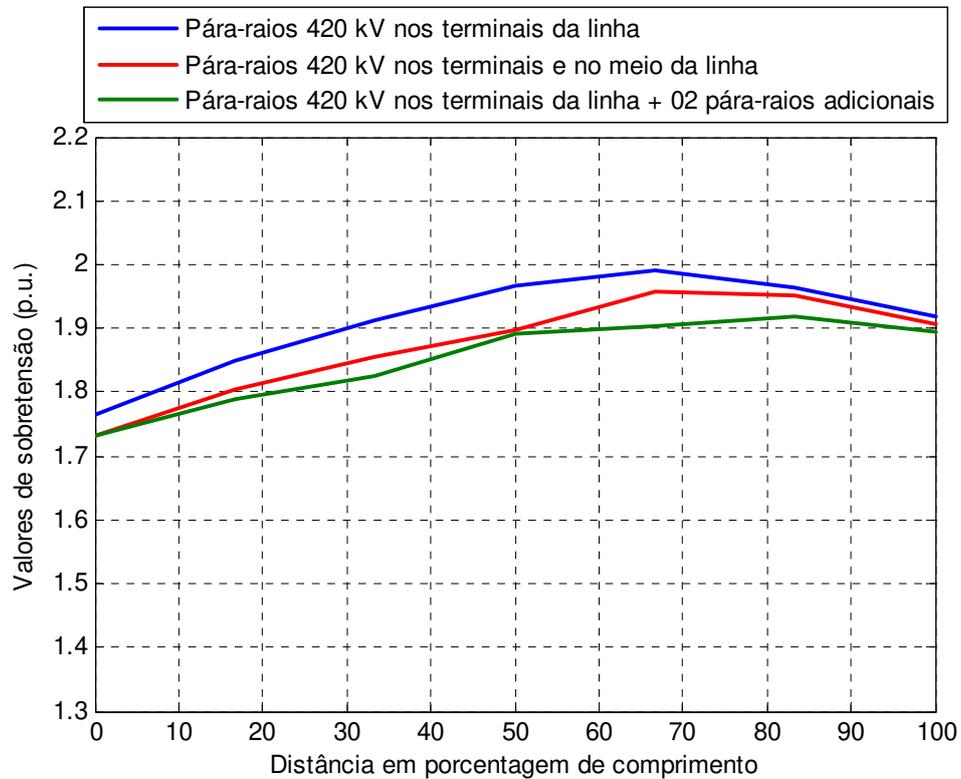


Figura 57. Perfil de tensão. Religamento trifásico utilizando pára-raios de tensão nominal 420 kV. LT com 91 % de compensação em derivação

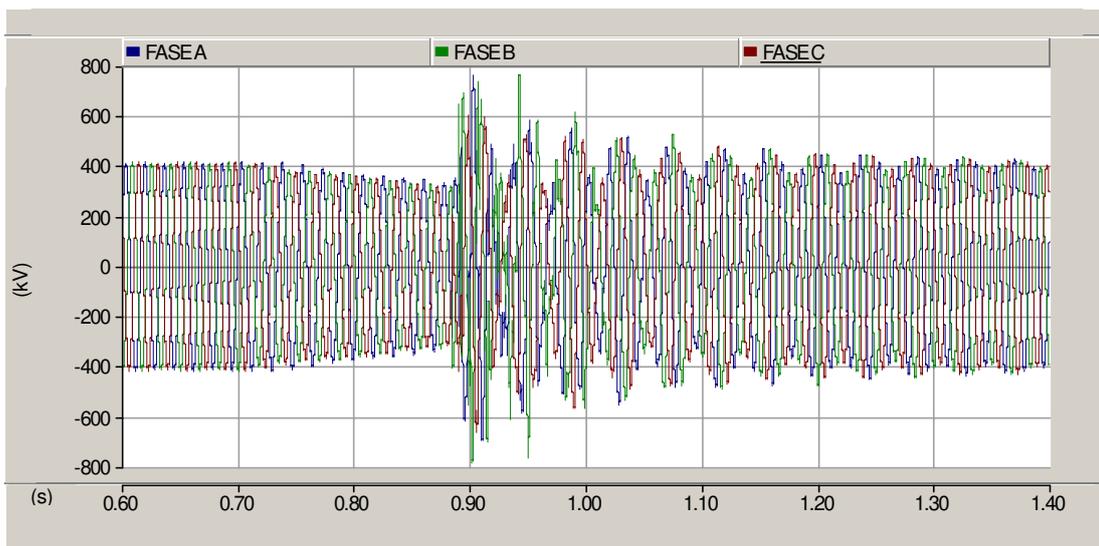
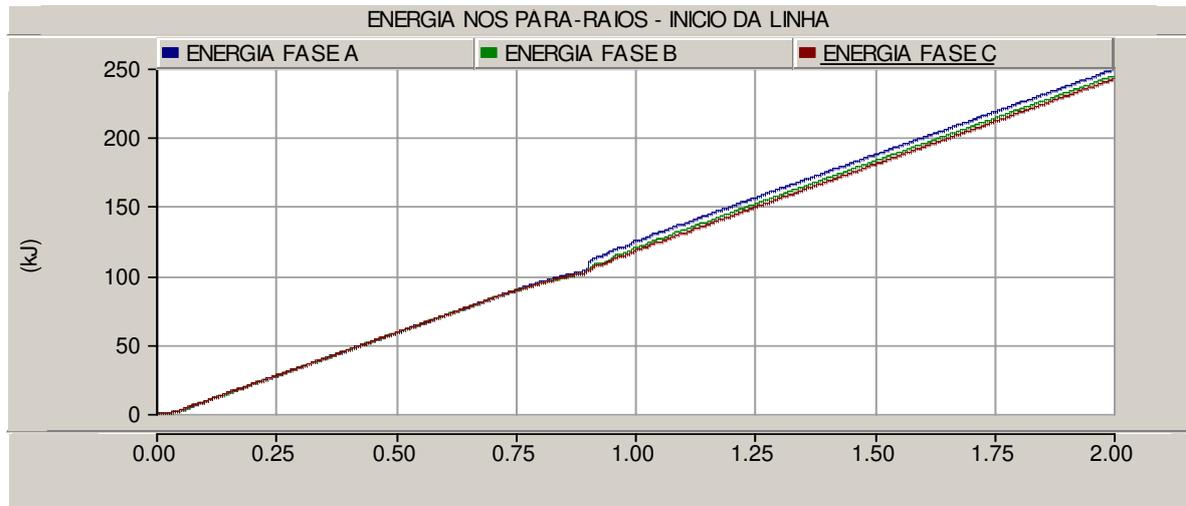
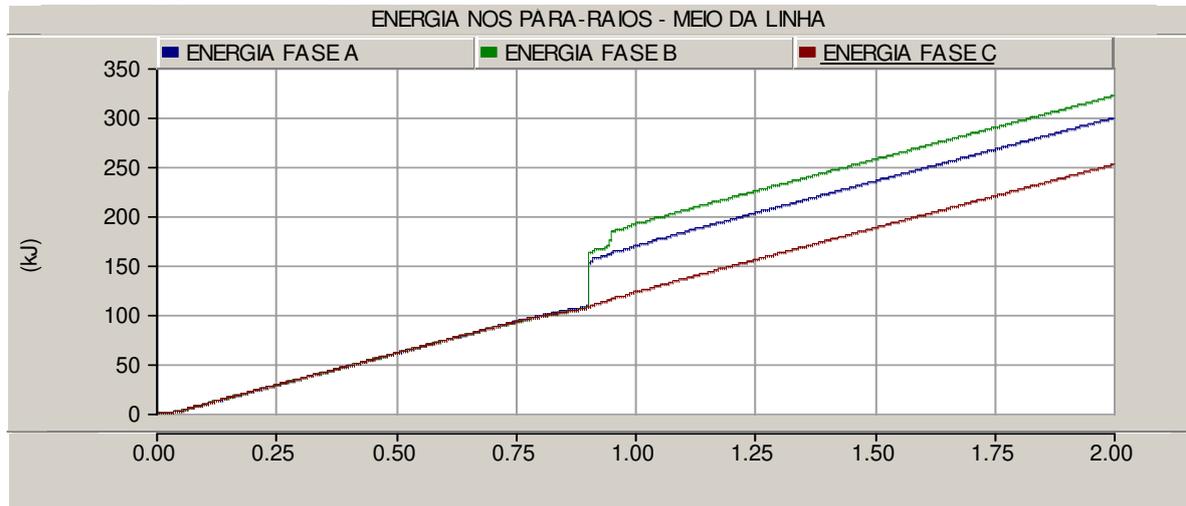


Figura 58. Tensão na Barra 5. Religamento trifásico da linha utilizando pára-raios 420 kV nos terminais e no meio da linha. - LT com 91 % de compensação em derivação

ENERGIA NOS PÁRA-RAIOS NO INÍCIO DA LINHA



ENERGIA NOS PÁRA-RAIOS NO MEIO DA LINHA



ENERGIA NOS PÁRA-RAIOS NO FINAL DA LINHA

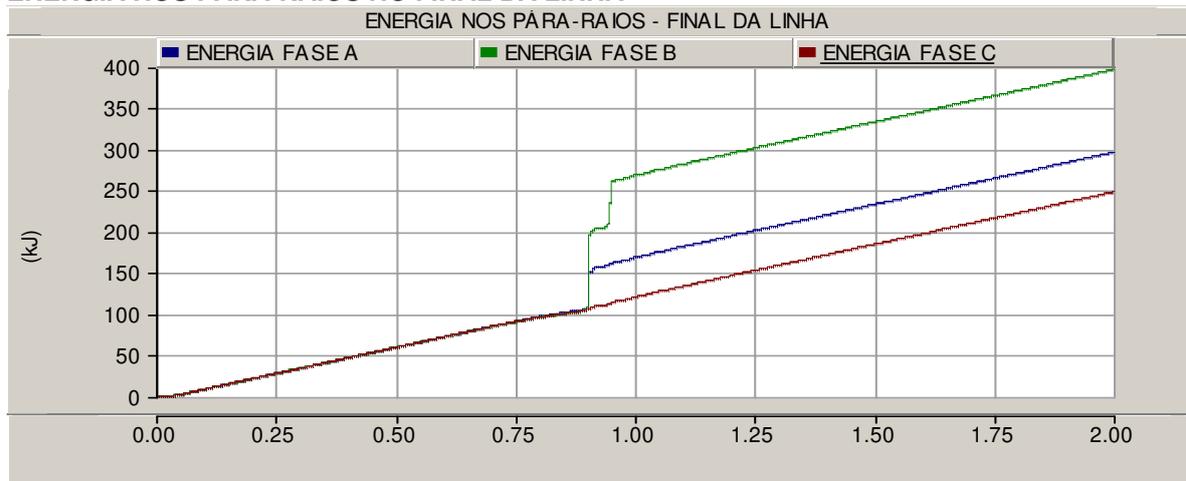


Figura 59. Energia dissipada nos pára-raios. Religamento trifásico da linha utilizando pára-raios 420 kV nos terminais e no meio da linha.- LT com 91 % de compensação em derivação

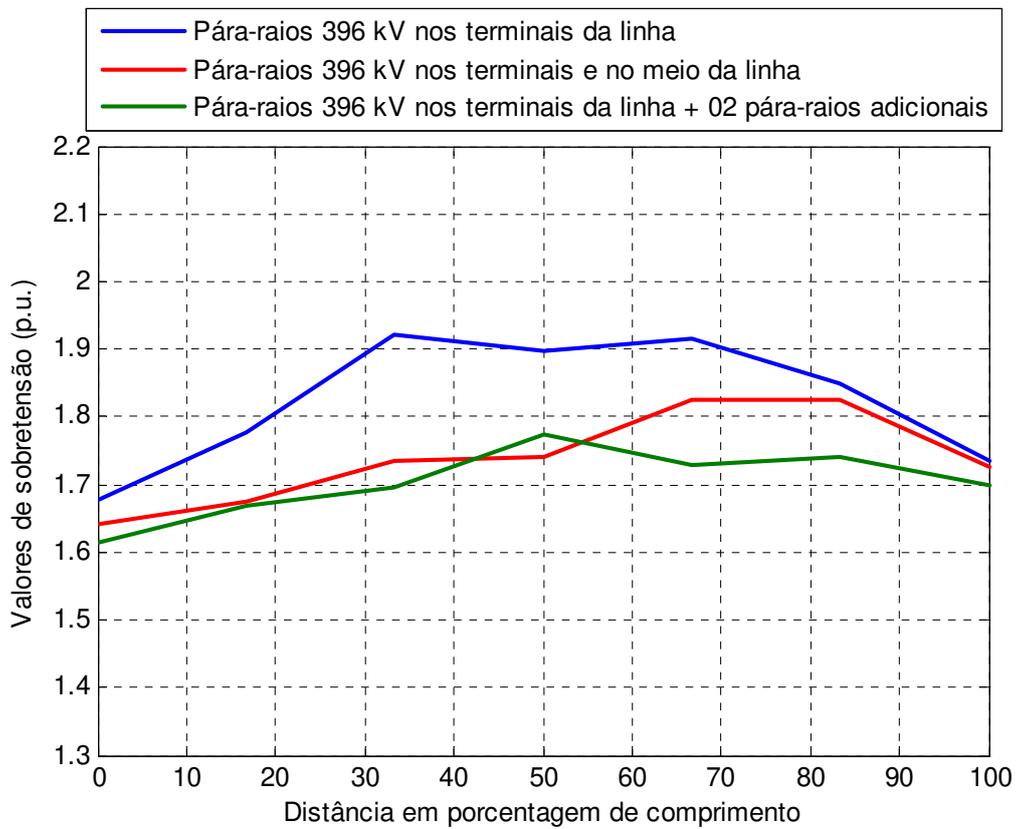


Figura 60. Perfil de tensão. Religamento trifásico da linha utilizando pára-raios 396 kV. LT com 91 % de compensação em derivação

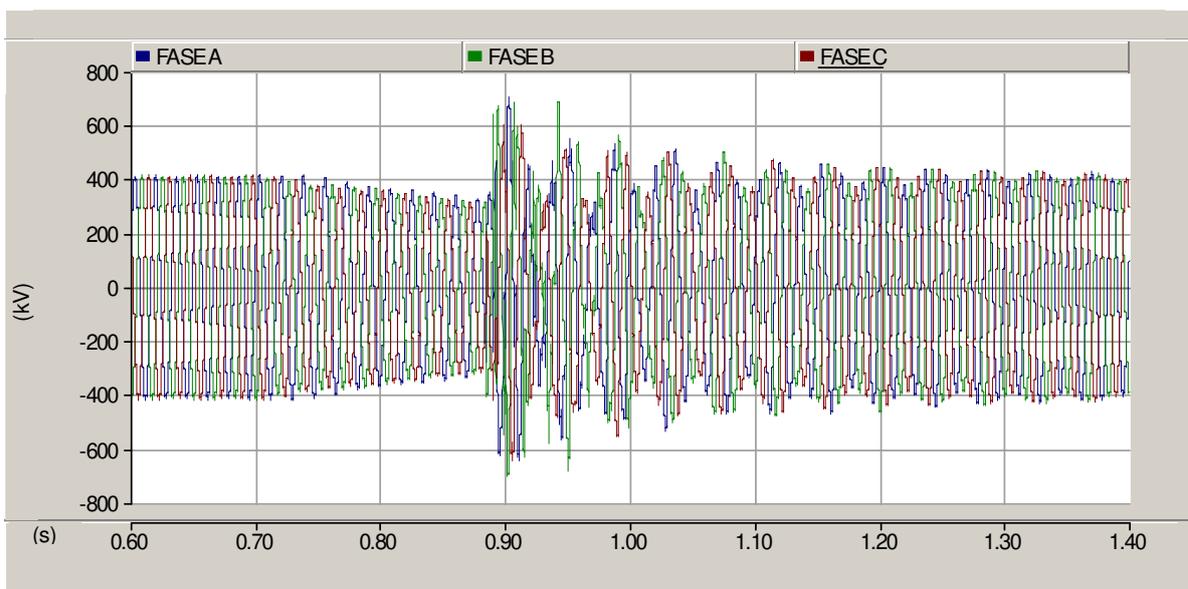
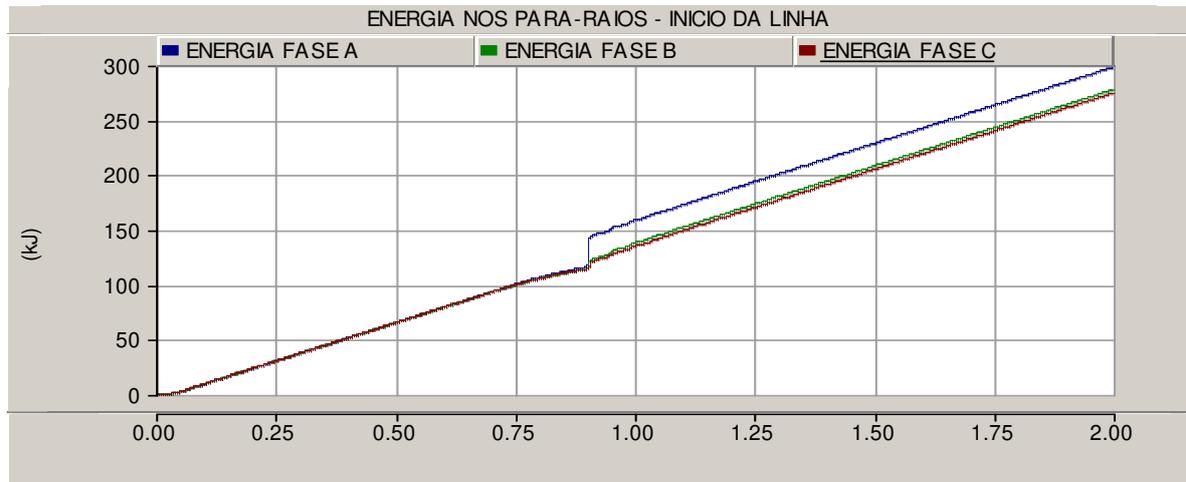
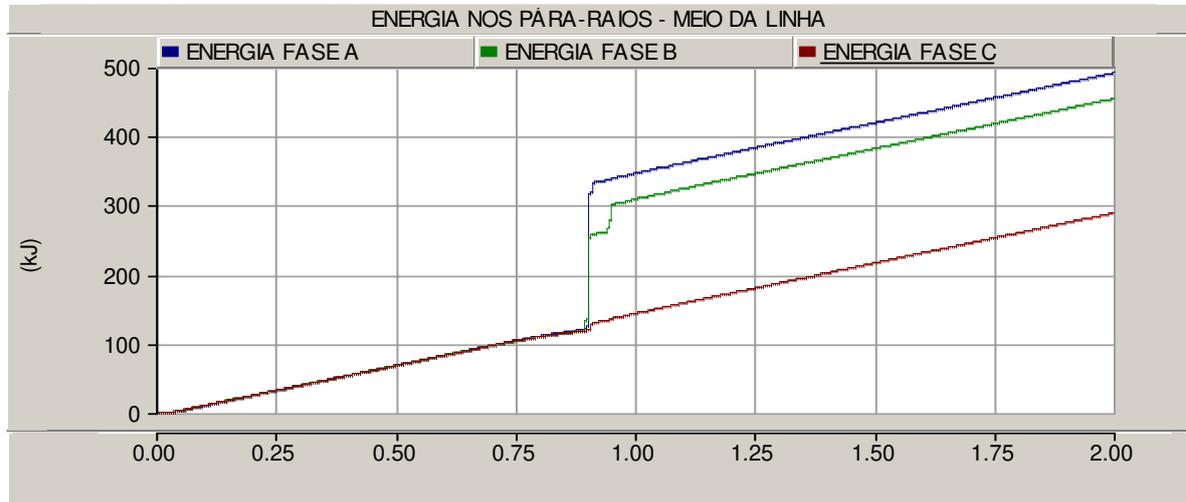


Figura 61. Tensão na Barra 5. Religamento trifásico da linha utilizando pára-raios 396 kV nos terminais e no meio da linha.- LT com 91 % de compensação em derivação

ENERGIA NOS PÁRA-RAIOS NO INÍCIO DA LINHA



ENERGIA NOS PÁRA-RAIOS NO MEIO DA LINHA



ENERGIA NOS PÁRA-RAIOS NO FINAL DA LINHA

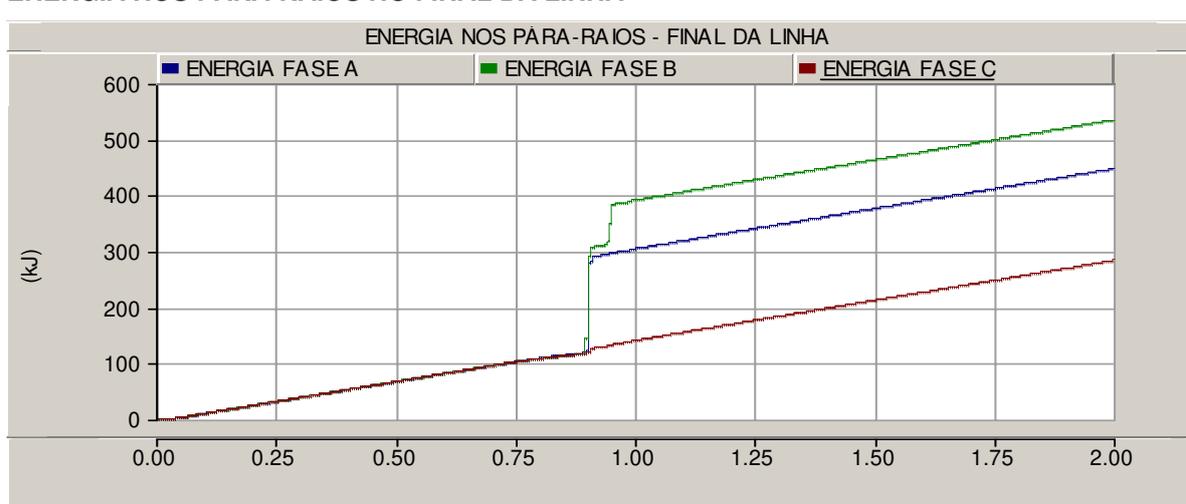


Figura 62. Energia dissipada nos pára-raios. Religamento trifásico da linha utilizando pára-raios 396 kV nos terminais e no meio da linha.- LT com 91 % de compensação em derivação

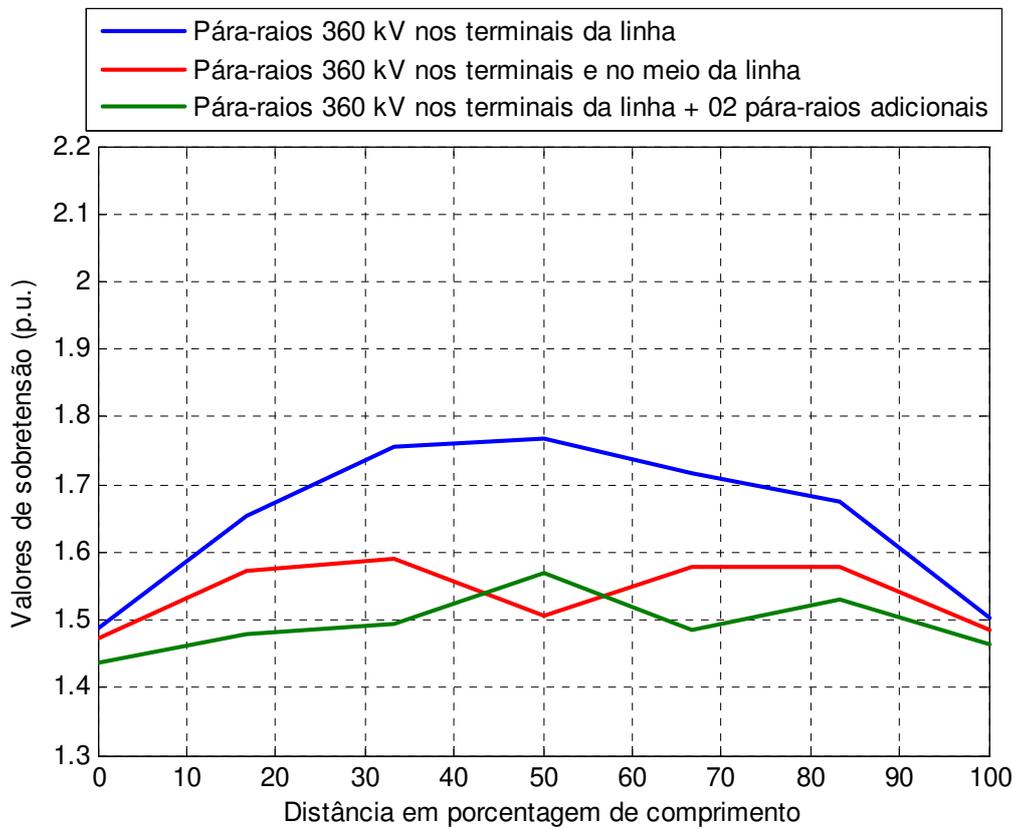


Figura 63. Perfil de tensão. Religamento trifásico da linha utilizando pára-raios 360 kV. LT com 91 % de compensação em derivação

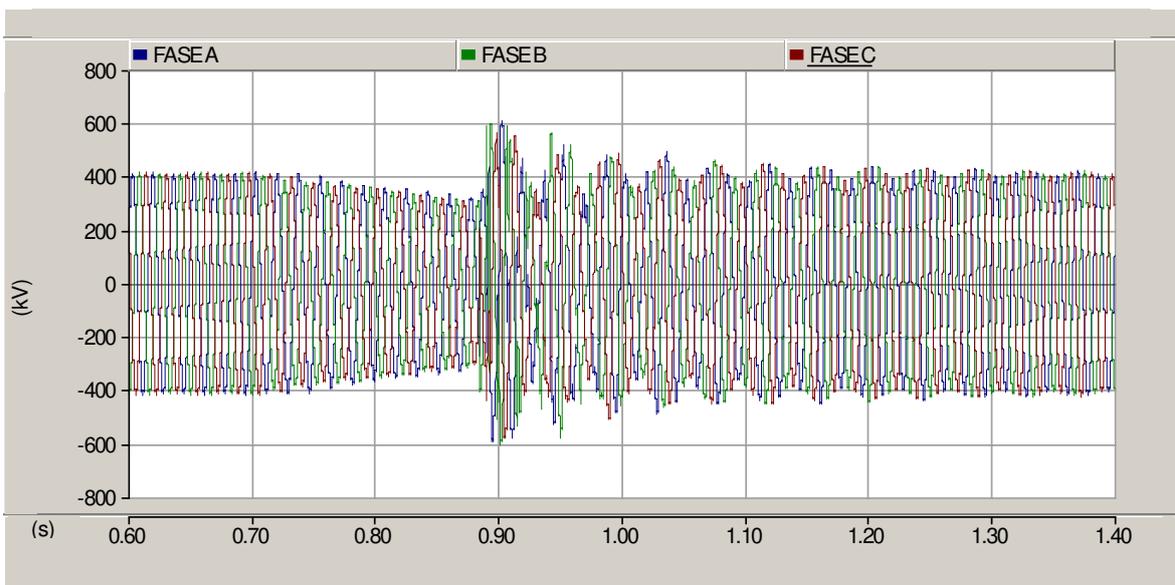
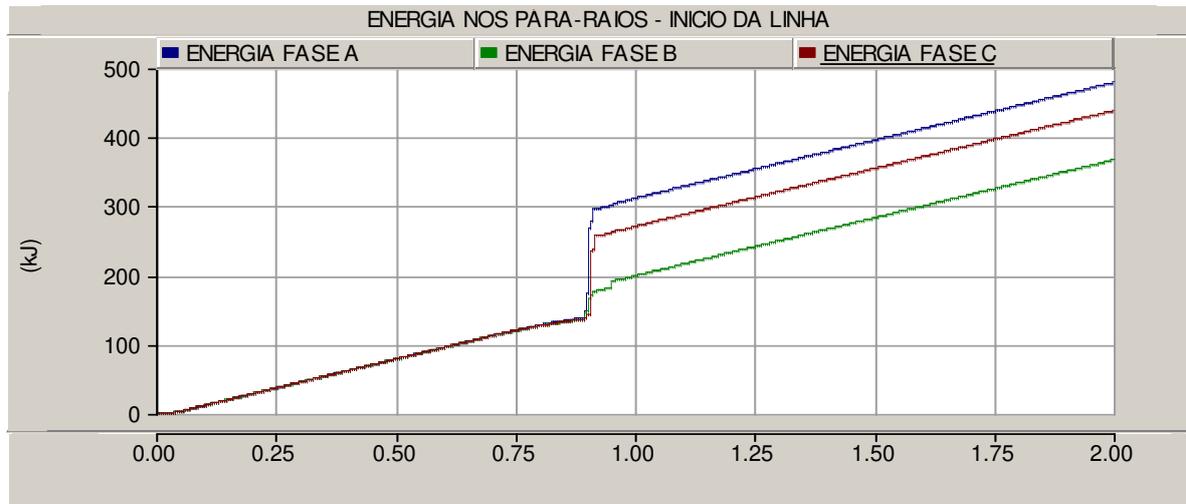
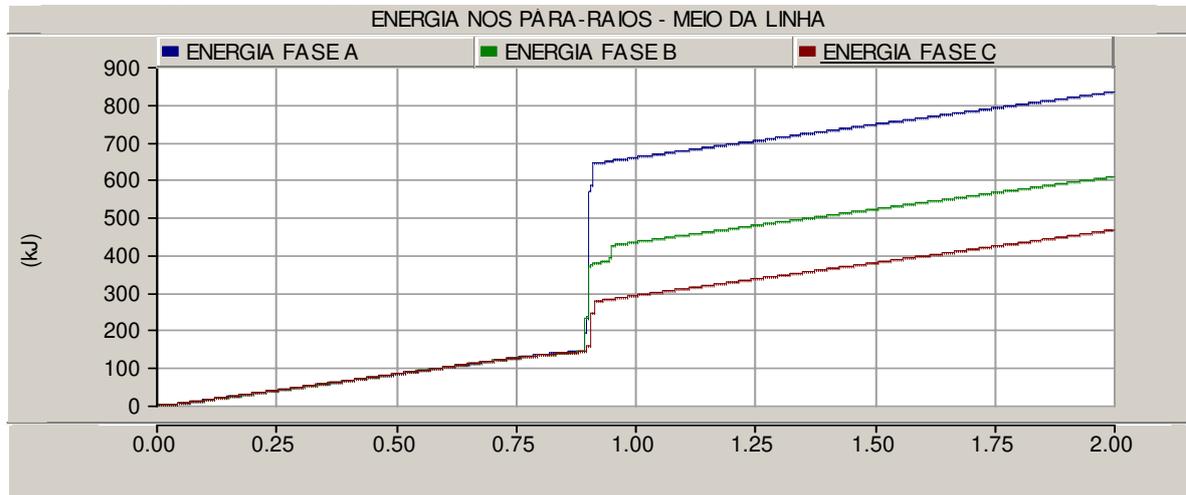


Figura 64. Formas de onda de tensão. Religamento trifásico da linha utilizando pára-raios 360 kV nos terminais e no meio da linha. - LT com 91 % de compensação em derivação

ENERGIA NOS PÁRA-RAIOS NO INÍCIO DA LINHA



ENERGIA NOS PÁRA-RAIOS NO MEIO DA LINHA



ENERGIA NOS PÁRA-RAIOS NO FINAL DA LINHA

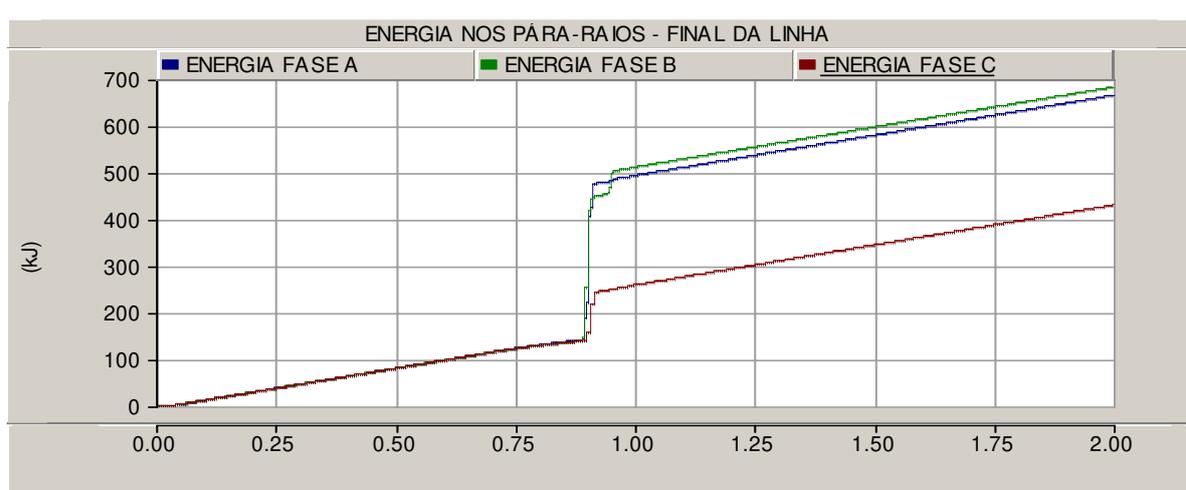


Figura 65. Energia dissipada nos pára-raios. Religamento trifásico da linha com pára-raios 360 kV nos terminais e no meio da linha. - LT com 91 % de compensação em derivação

Linha de transmissão com 75 % de compensação reativa em derivação.

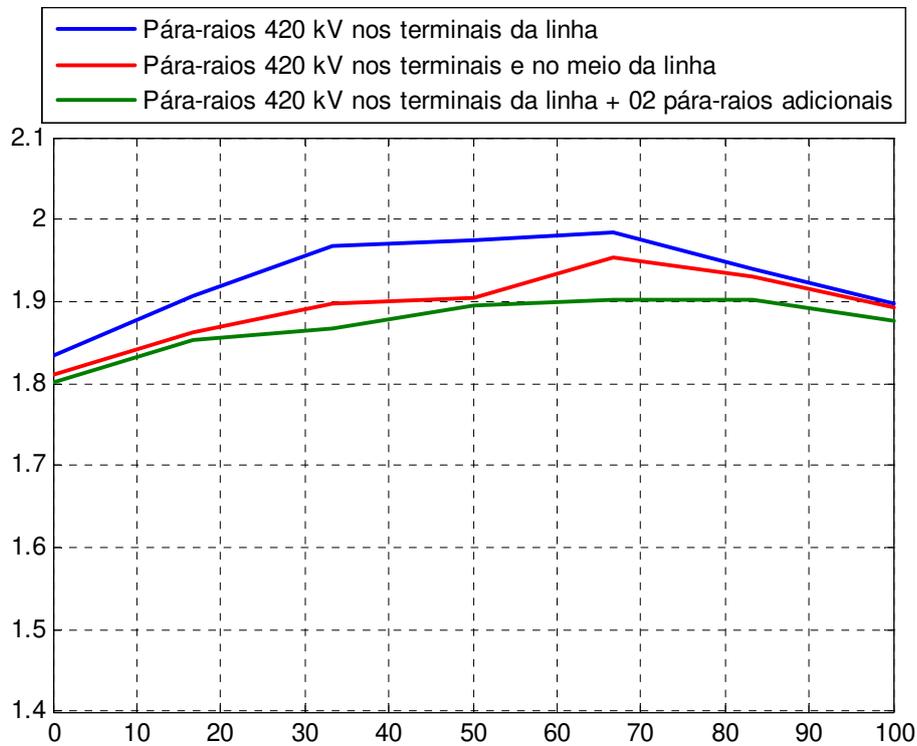


Figura 66. Perfil de tensão. Religamento trifásico da linha utilizando pára-raios 420 kV. LT com 75 % de compensação em derivação

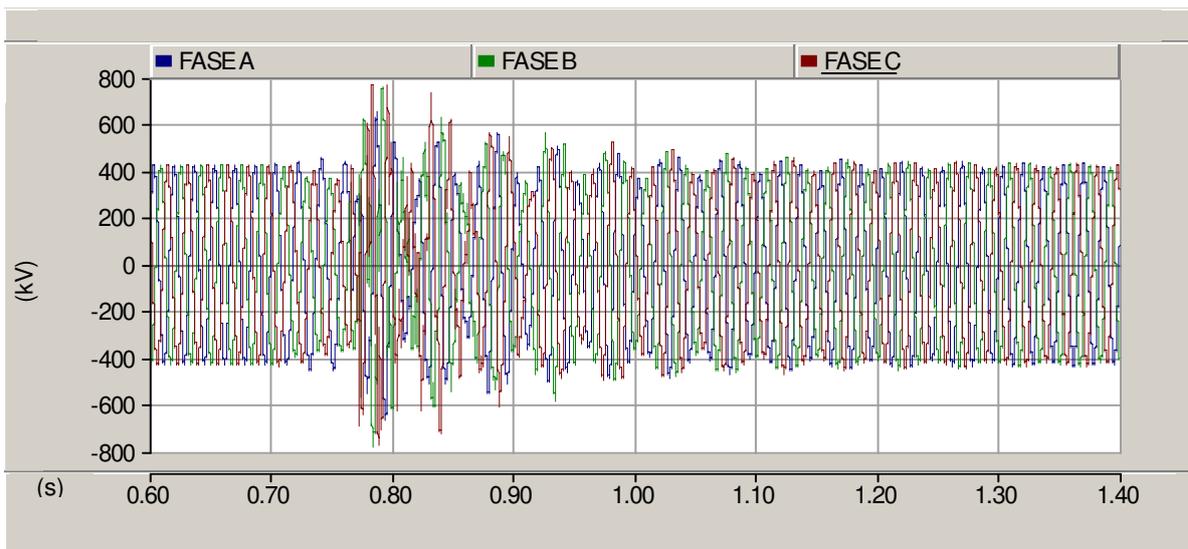
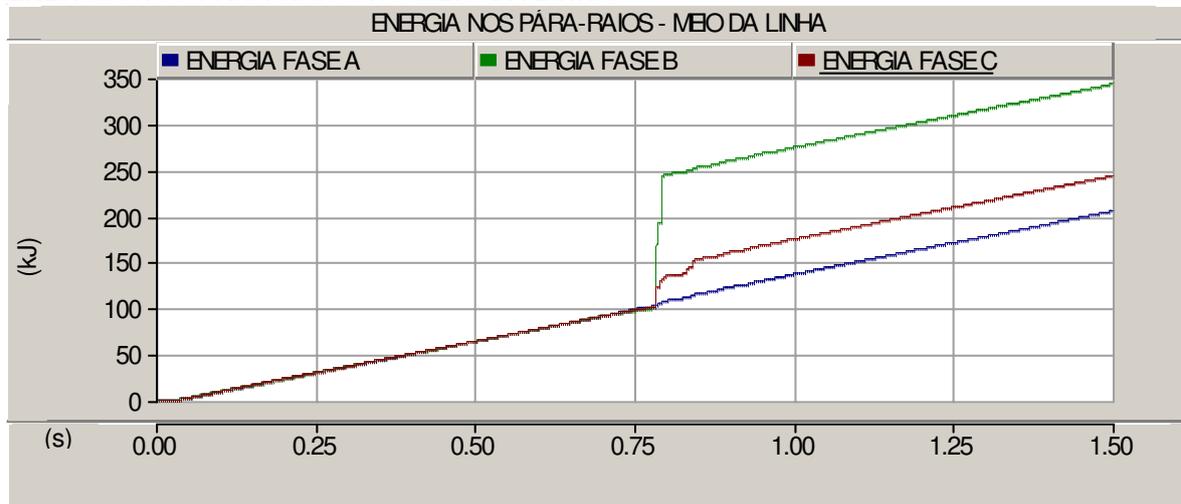


Figura 67. Tensão na Barra 5. Religamento trifásico da linha utilizando pára-raios 420 kV nos terminais e no meio da linha. LT com 75 % de compensação em derivação

ENERGIA NOS PÁRA-RAIOS NO INÍCIO DA LINHA



ENERGIA NOS PÁRA-RAIOS NO MEIO DA LINHA



ENERGIA NOS PÁRA-RAIOS NO FINAL DA LINHA

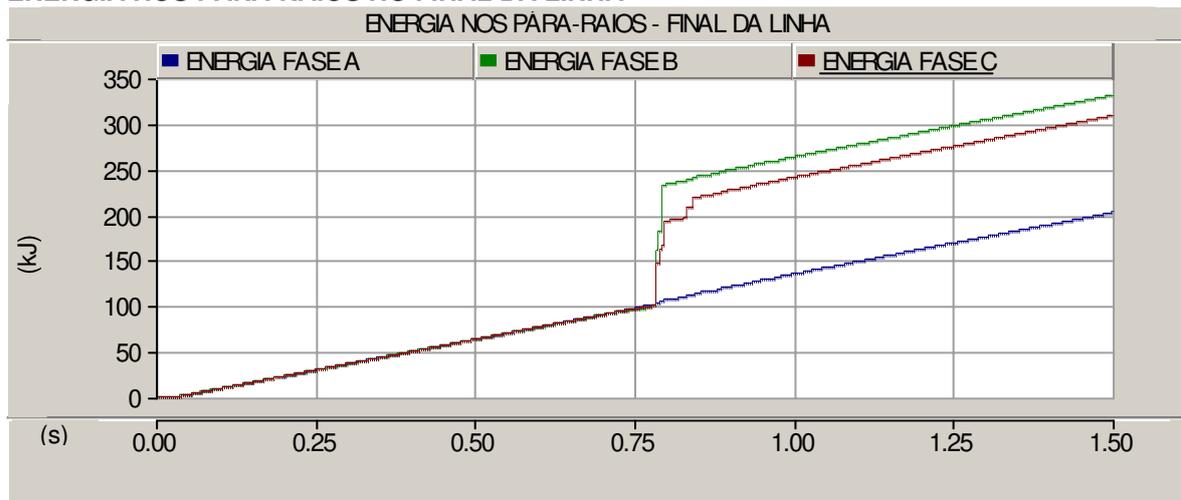


Figura 68. Energia dissipada nos pára-raios. Religamento trifásico da linha utilizando pára-raios 420 kV nos terminais e no meio da linha. LT com 75 % de compensação em derivação

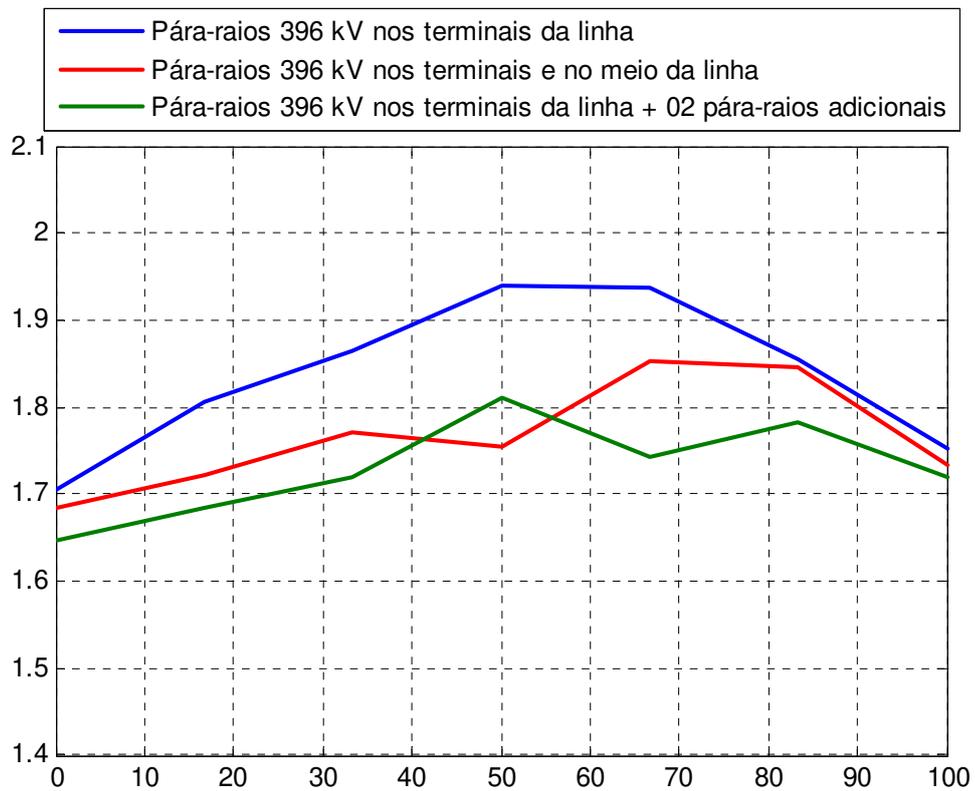


Figura 69. Perfil de tensão. Religamento trifásico da linha utilizando pára-raios 396 kV. LT com 75 % de compensação em derivação

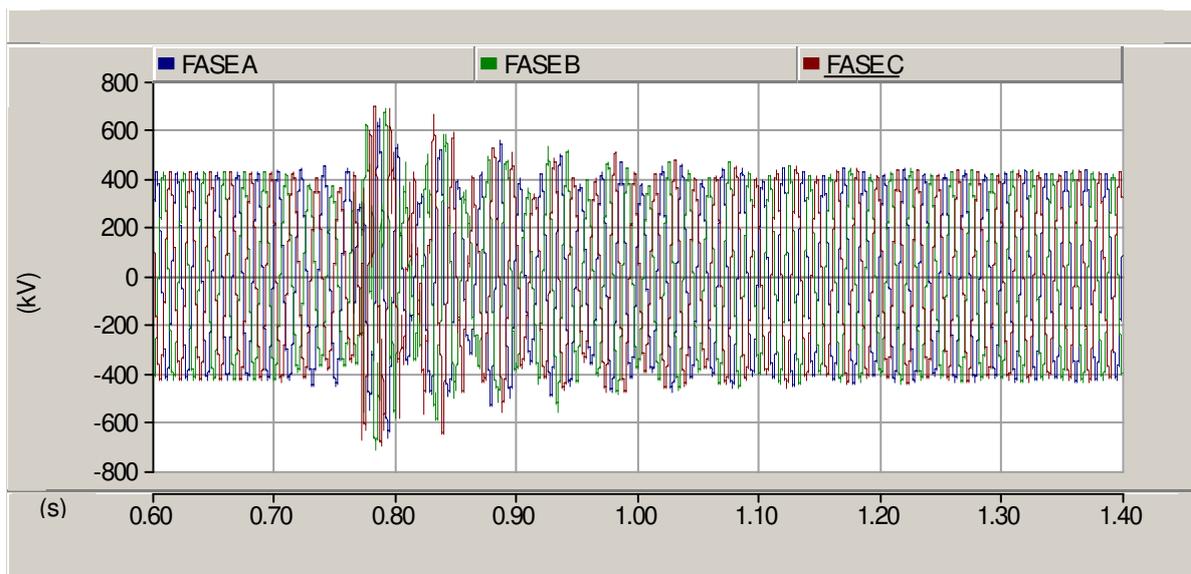


Figura 70. Tensão na Barra 5. Religamento trifásico da linha utilizando pára-raios 396 kV nos terminais e no meio da linha. LT com 75 % de compensação em derivação

ENERGIA NOS PÁRA-RAIOS NO INÍCIO DA LINHA



ENERGIA NOS PÁRA-RAIOS NO MEIO DA LINHA



ENERGIA NOS PÁRA-RAIOS NO FINAL DA LINHA

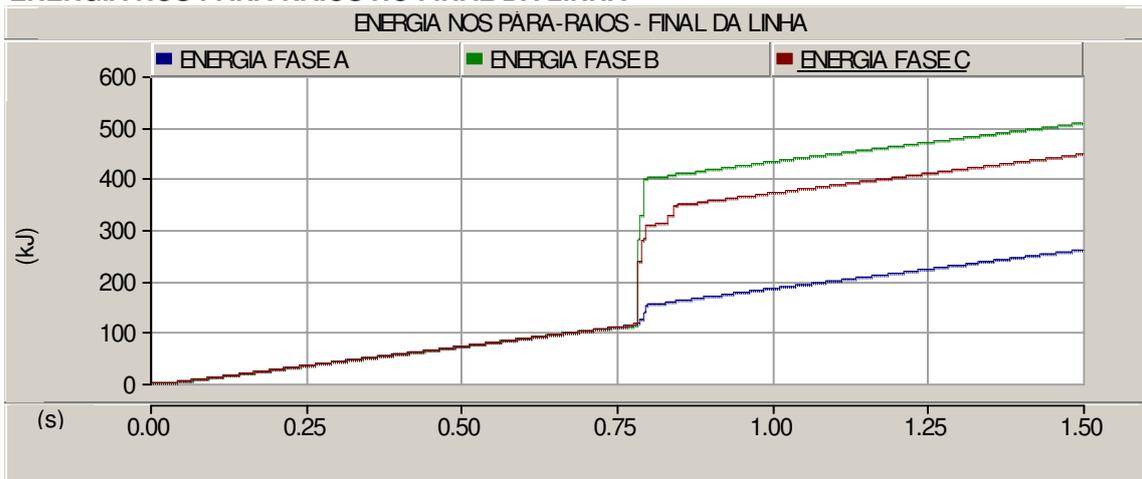


Figura 71. Energia dissipada nos pára-raios. Religamento trifásico da linha utilizando pára-raios 396 kV nos terminais e no meio da linha. LT com 75 % de compensação em derivação

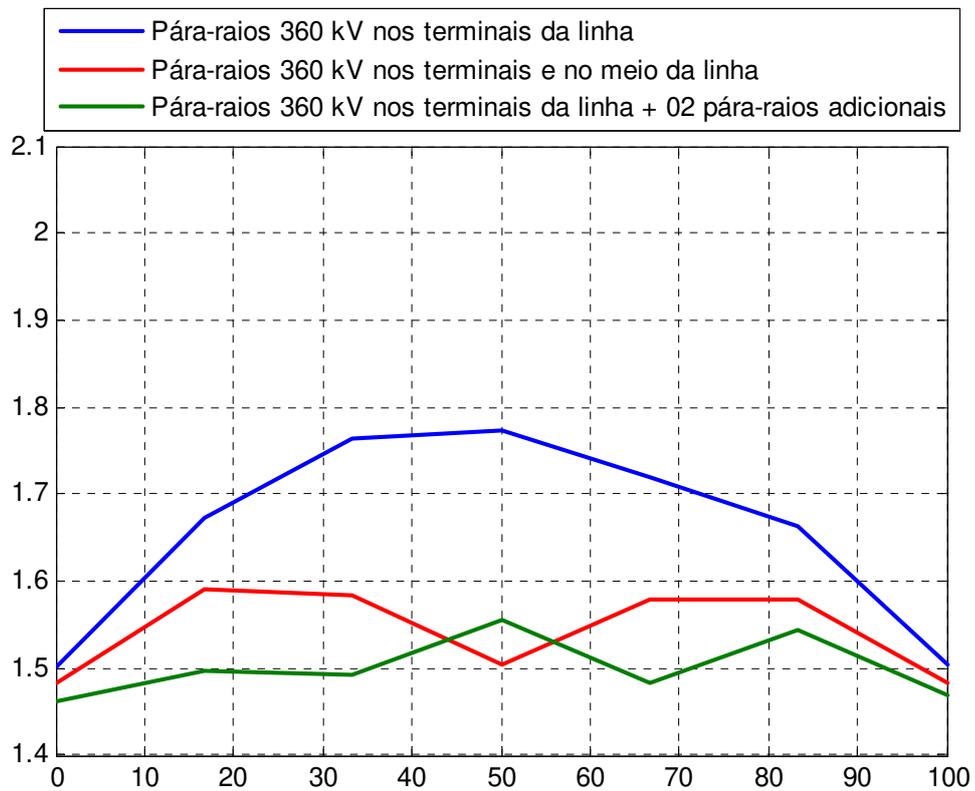


Figura 72. Perfil de tensão. Religamento trifásico da linha utilizando pára-raios 360 kV. LT com 75 % de compensação em derivação

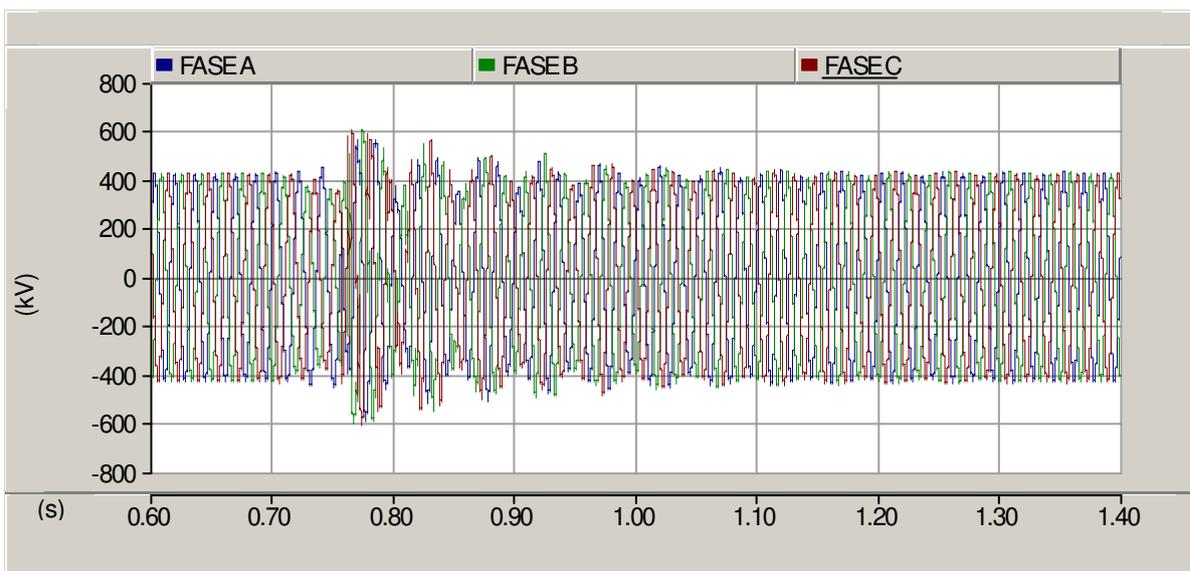
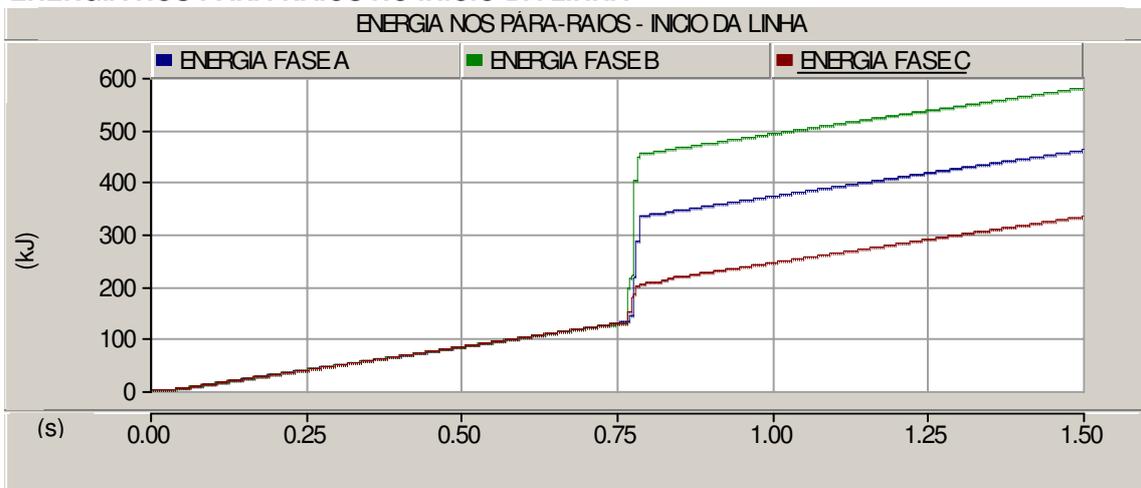
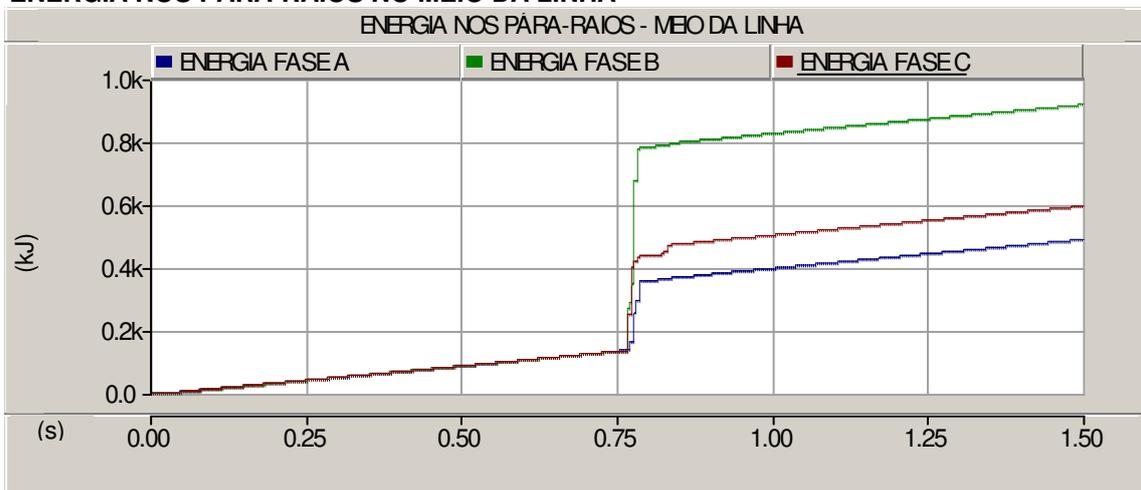


Figura 73. Tensão na Barra 5. Religamento trifásico da linha utilizando pára-raios 360 kV nos terminais e no meio da linha.- LT com 75 % de compensação em derivação.

ENERGIA NOS PÁRA-RAIOS NO INÍCIO DA LINHA



ENERGIA NOS PÁRA-RAIOS NO MEIO DA LINHA



ENERGIA NOS PÁRA-RAIOS NO FINAL DA LINHA

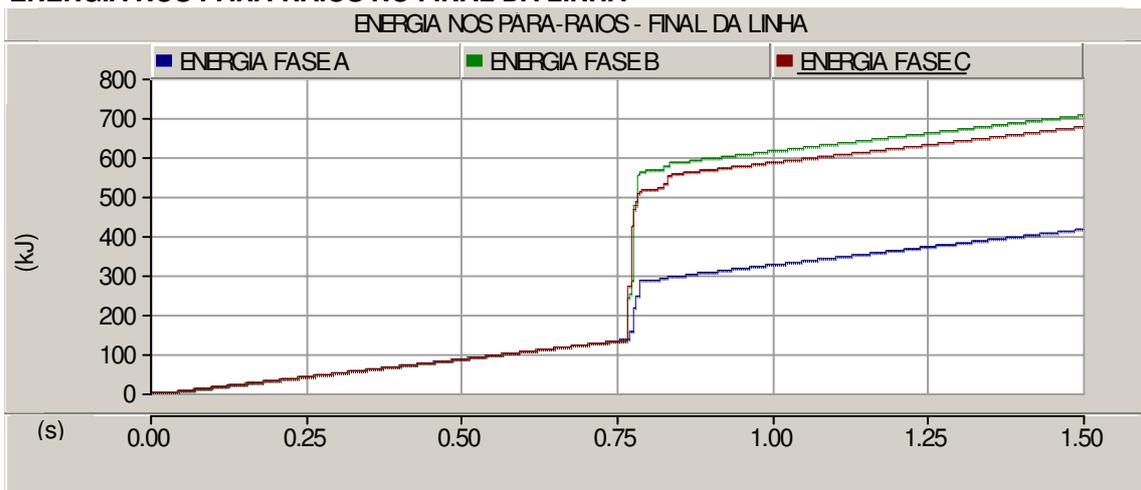


Figura 74. Energia dissipada nos pára-raios. Religamento trifásico da linha utilizando pára-raios 360 kV nos terminais e no meio da linha. LT com 75 % de compensação em derivação.

Tabela 16. Máximas sobretensões na manobra de religamento trifásico no terminal e no meio da LT utilizando pára-raios como método de controle – 91 % de compensação.

Descrição	Pára-raios 420 kV		Pára-raios 396 kV		Pára-raios 360 kV	
	Máxima Sobretensão (pu)					
	Barra 5	Meio da LT	Barra 5	Meio da LT	Barra 5	Meio da LT
Pára-raios somente nos extremos da LT	1,92	1,97	1,73	1,90	1,50	1,77
Pára-raios nos extremos e no meio da LT	1,91	1,90	1,72	1,74	1,49	1,50
Pára-raios nos extremos e 2 pára-raios adicionais	1,90	1,89	1,70	1,77	1,47	1,57

Tabela 17. Máximas sobretensões na manobra de religamento trifásico no terminal e no meio da LT utilizando pára-raios como método de controle – 75 % de compensação.

Descrição	Pára-raios 420 kV		Pára-raios 396 kV		Pára-raios 360 kV	
	Máxima Sobretensão (pu)					
	Barra 5	Meio da LT	Barra 5	Meio da LT	Barra 5	Meio da LT
Pára-raios somente nos extremos da LT	1,90	1,98	1,75	1,94	1,50	1,77
Pára-raios nos extremos e no meio da LT	1,89	1,90	1,73	1,76	1,48	1,50
Pára-raios nos extremos e 2 pára-raios adicionais	1,88	1,90	1,72	1,81	1,47	1,56

Tabela 18. Energia consumida pelos pára-raios. Religamento da LT

Descrição	Máxima Energia Consumida (kJ)					
	LT com 91 % de compensação			LT com 75 % de compensação		
	PR 420 kV	PR 396 kV	PR 360 kV	PR 420 kV	PR 396 kV	PR 360 kV
Energia no início da LT	248	297	478	220	292	579
Energia no meio da LT	321	498	830	343	591	917
Energia no final da LT	397	534	683	331	507	704

Para a LT com 91% de compensação em derivação, a tabela 16 resume os máximos valores das tensões no terminal receptor e no meio da linha, para os casos simulados de religamento trifásico utilizando pára-raios para o controle de sobretensões. Pode-se observar que utilizando pára-raios com tensão nominal de 420 kV o aumento de pára-raios ao longo da linha não tem grande influência na tensão no terminal receptor nem no meio da linha. Utilizando pára-raios com tensão nominal 396 kV e 360 kV um terceiro pára-raios no meio da linha traz uma redução adicional no nível de sobretensões neste ponto.

A tabela 17 resume os valores das tensões na Barra 5 e no meio da linha para todos os casos simulados para LT com 75 % de compensação. Pode-se observar que a quantidade de pára-raios não teve grande influência, mas sim o nível de absorção de energia dos pára-raios (tensão nominal dos pára-raios).

A tabela 18 apresenta os valores das energias absorvidas pelos pára-raios para o caso de religamento trifásico da LT com pára-raios nos terminais e no meio da LT. Em geral para todos os casos simulados, a capacidade de absorção da energia dos pára-raios não esteve excedida em nenhuma simulação. Os níveis de dissipação da energia são bastante menores do que a capacidade dos pára-raios, que no caso são 6,4 MJ, 6,1 MJ e 2,8 MJ para pára-raios com tensão nominal de 420 kV, 396 kV e 360 kV, respectivamente.

5.2.2 Chaveamento Controlado

Para o religamento trifásico utilizando chaveamento controlado, os polos do disjuntor são fechados no instante em que o batimento da onda tensão monitorada entre os terminais dos polos do disjuntor é mínima. Este instante corresponde a 1,0694 s para o caso da linha com 91 % de compensação e 0,9576 s para o caso da linha com 75 % de compensação.

A Figura 75 apresenta o perfil de tensão LT para a manobra de religamento trifásico com chaveamento controlado. Neste caso, a redução alcança 1,21 pu e 1,23 pu no terminal receptor para a LT com 91 % e 75 % de compensação reativa em derivação, respectivamente.

Os pára-raios de tensão nominal 420 kV localizados nos terminais da linha não foram solicitados.

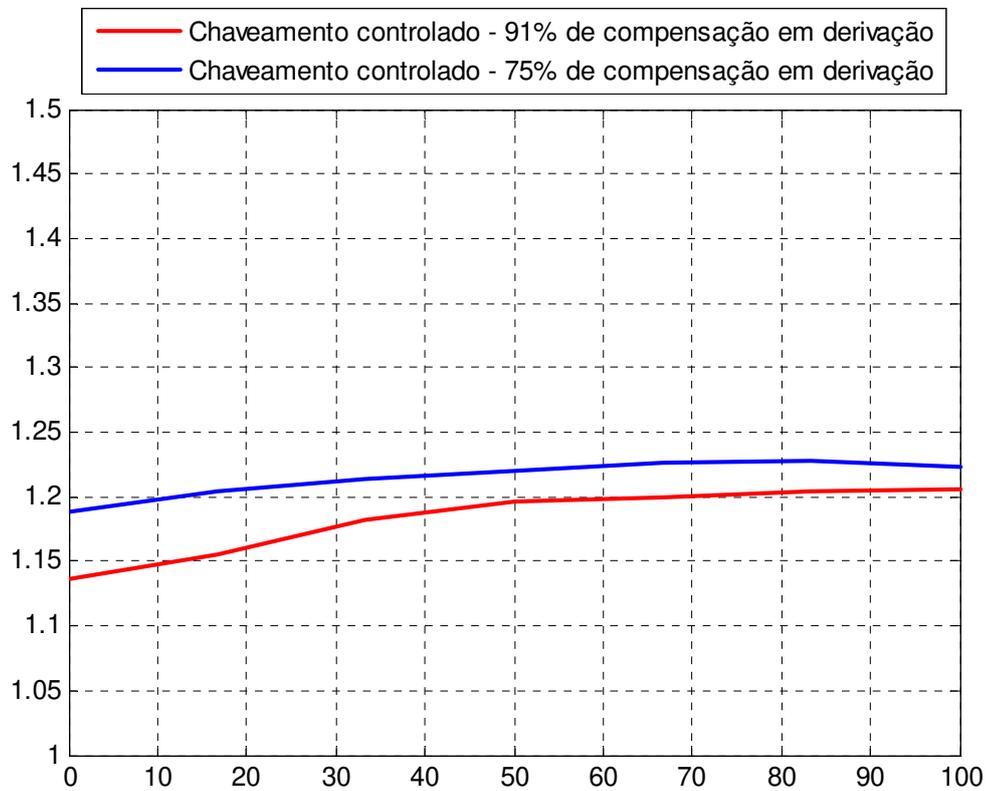


Figura 75. Perfil de tensão. Religamento trifásico com chaveamento controlado.

As formas de onda de tensão no terminal remoto para ambos os níveis de compensação em derivação utilizando o fechamento dos polos do disjuntor no ponto de menor amplitude do batimento são apresentadas nas Figuras 76 e 77. Pode-se observar o baixo nível das sobretensões assim como também o menor conteúdo harmônico.

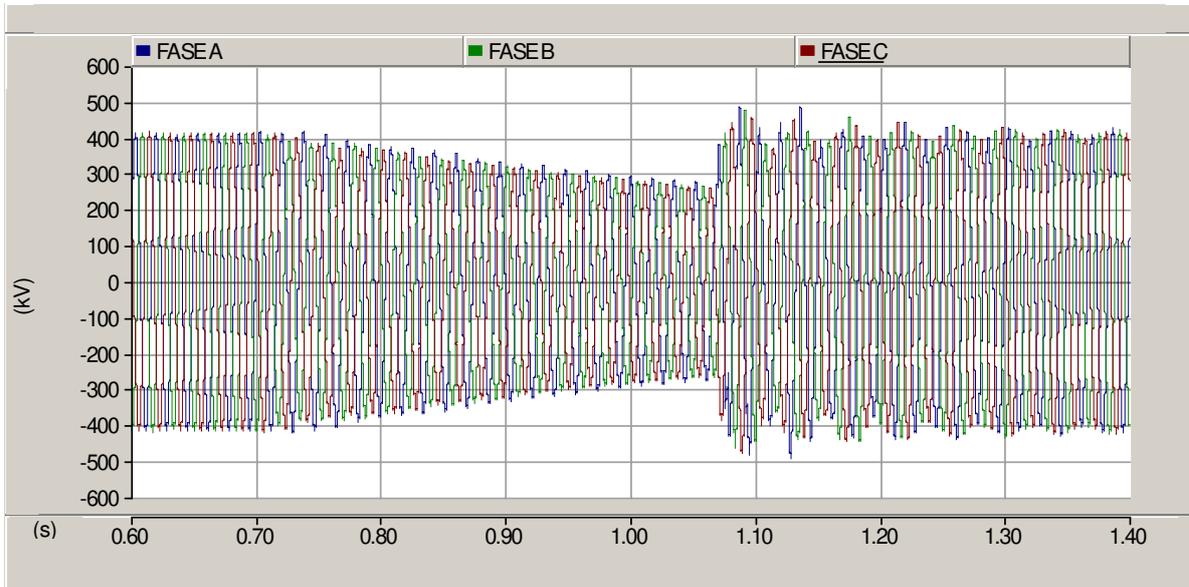


Figura 76. Tensão na Barra 5. Religamento trifásico utilizando chaveamento controlado. LT com 91 % de compensação reativa em derivação

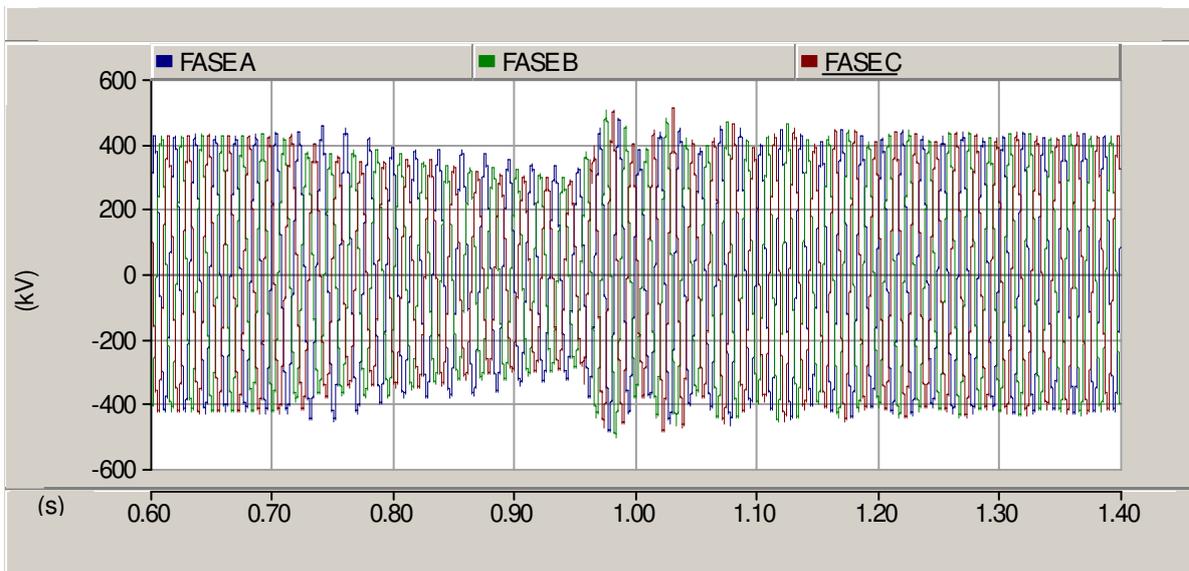


Figura 77. Tensão na Barra 5. Religamento trifásico utilizando chaveamento controlado. LT com 75 % de compensação reativa em derivação

5.2.3 Resistor de Pré-inserção

Neste item se realizam simulações de religamento trifásico utilizando um resistor de pré-inserção de 400Ω que permanece no circuito durante 8 ms. O fechamento dos polos do disjuntor do contato auxiliar que insere o resistor de pré-inserção é fechado no máximo da onda de tensão monitorada nos terminais dos polos do disjuntor, simulando a pior condição.

As sobretensões no terminal remoto alcançaram valores de 1,66 pu e 1,70 pu para a linha com compensação em derivação de 91 % e de 75 %, respectivamente (Figura 78). As Figuras 79 e 80 apresentam as formas de onda no terminal receptor da LT com compensação de 91 % e 75 % respectivamente.

A energia dissipada pelo resistor de pré-inserção é de 965 kJ para linha com 91 % de compensação e de 1170 kJ para linha com 75 % de compensação. Os pára-raios de tensão nominal 420 kV localizados nos terminais da linha não foram solicitados.

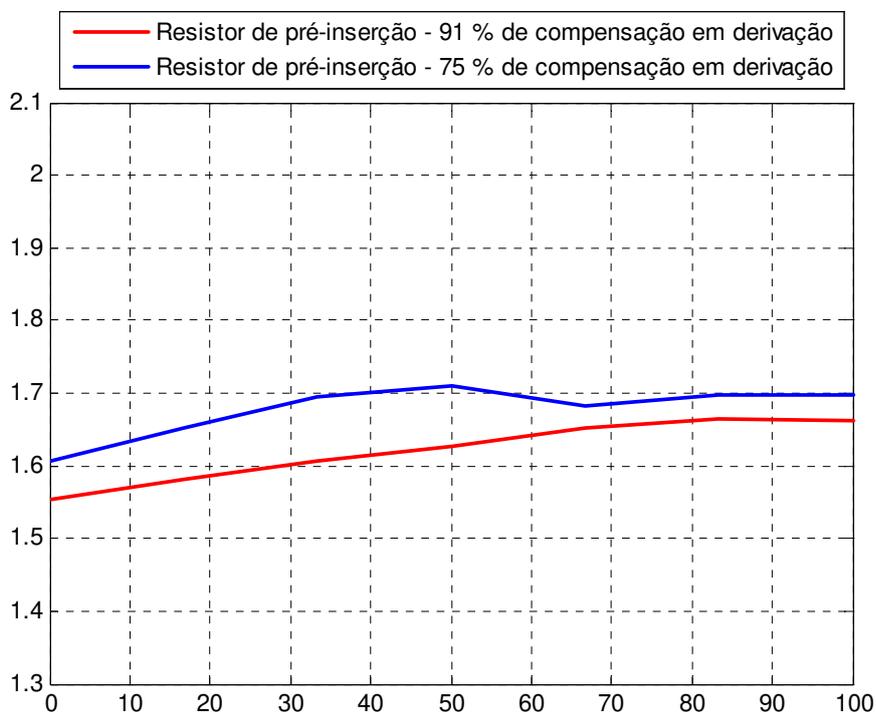


Figura 78. Perfil de tensão. Religamento trifásico utilizando resistor de pré-inserção.

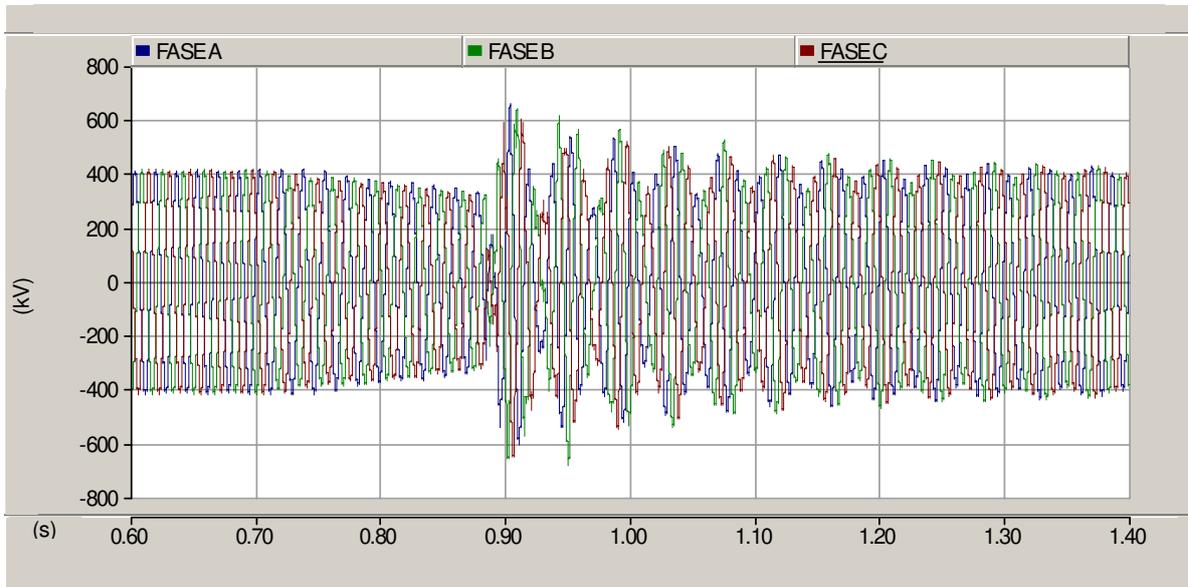


Figura 79. Tensão na Barra 5. Religamento trifásico com resistor de pré-inserção.
LT com 91 % de compensação reativa em derivação

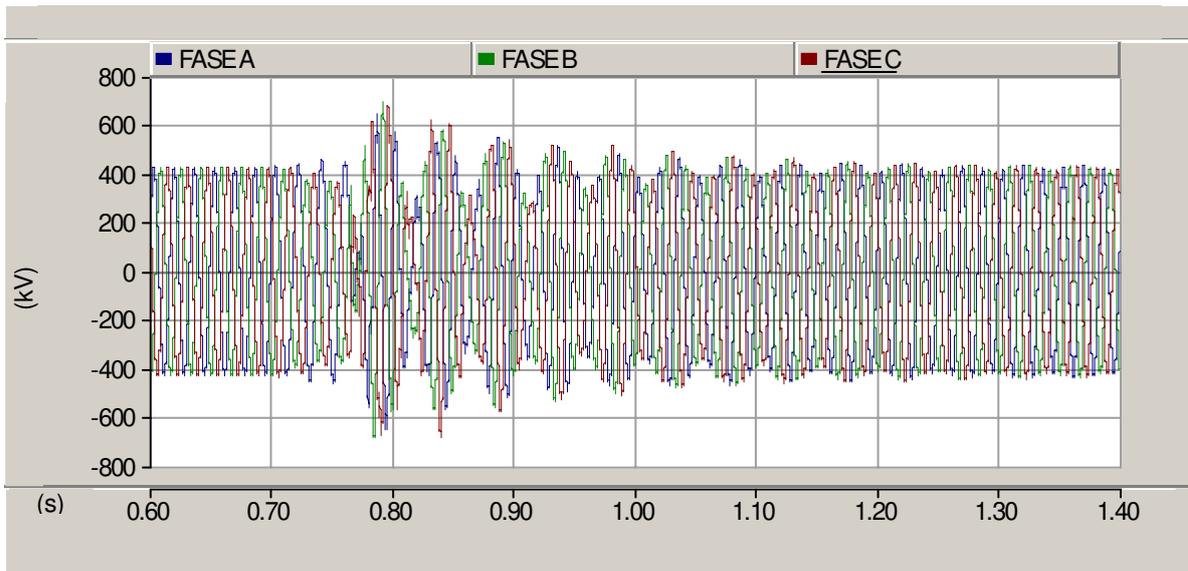


Figura 80. Tensão na Barra 5. Religamento trifásico com resistor de pré-inserção.
LT com 75 % de compensação reativa em derivação

5.3 Análise comparativa

Neste item é feita uma análise comparativa dos três métodos estudados para a manobra de energização e religamento trifásico de LT. Os níveis de sobretensões comparados são medidos no terminal receptor. Para o caso de pára-raios foi escolhido para comparação o caso de pára-raios de tensão nominal 396 kV localizados nos terminais e no meio da linha.

Pode-se observar segundo a Figura 81, que para o caso de energização da LT com 91 % de compensação a utilização de pára-raios de tensão nominal 396 kV nos terminais com um pára-raios adicional no meio da linha têm um bom desempenho na redução das sobretensões, alcançando um nível de tensão 1,71 pu. O resistor de pré-inserção apresenta neste caso um melhor desempenho que os outros dos métodos alcançando um nível de tensão de 1,37 pu, embora o fechamento sincronizado consiga reduzir as sobretensões a 1,43 pu que é um ótimo valor.

Para a LT com 75 % de compensação os três métodos apresentaram um desempenho muito similar. O nível de sobretensão no terminal receptor utilizando pára-raios de tensão 396 kV nos terminais e no meio da linha é reduzido a 1,72 pu. Utilizando chaveamento controlado o nível de tensão é reduzido até 1,64 pu. e com o resistor de pré - inserção alcança um valor semelhante.

Para o caso de religamento trifásico, segundo a Figura 82, pode-se observar que o chaveamento controlado dos polos do disjuntor para reduzir sobretensões é mais eficiente que os outros dois métodos, alcançando valores de 1,21 pu e 1,23 pu para LT de 91 % e 75 % de compensação, respectivamente. Utilizando este método se observa também que o perfil de tensão ao longo da linha é uniforme.

Nas simulações realizadas, pode-se observar também que para o caso de energização da linha com chaveamento controlado, uma dispersão de 4 ms no tempo do fechamento do disjuntor pode resultar em um incremento significativo nas sobretensões. Já para o caso de

religamento trifásico isto não acontece, pois a região de amplitude mínima do batimento é de alguns ciclos.

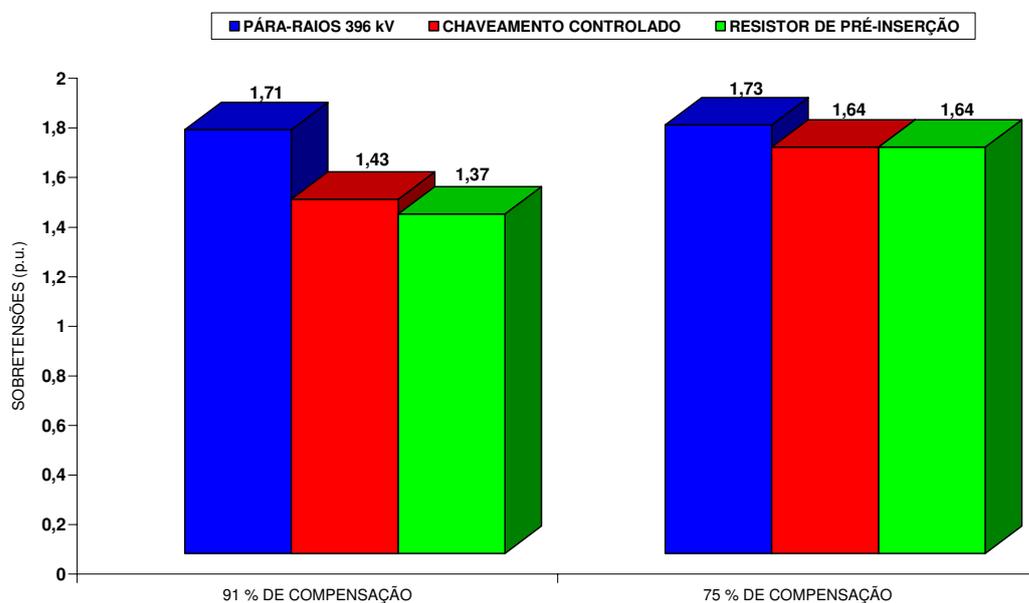


Figura 81. Máximas Sobretensões - Barra 5. Manobra de energização da LT.

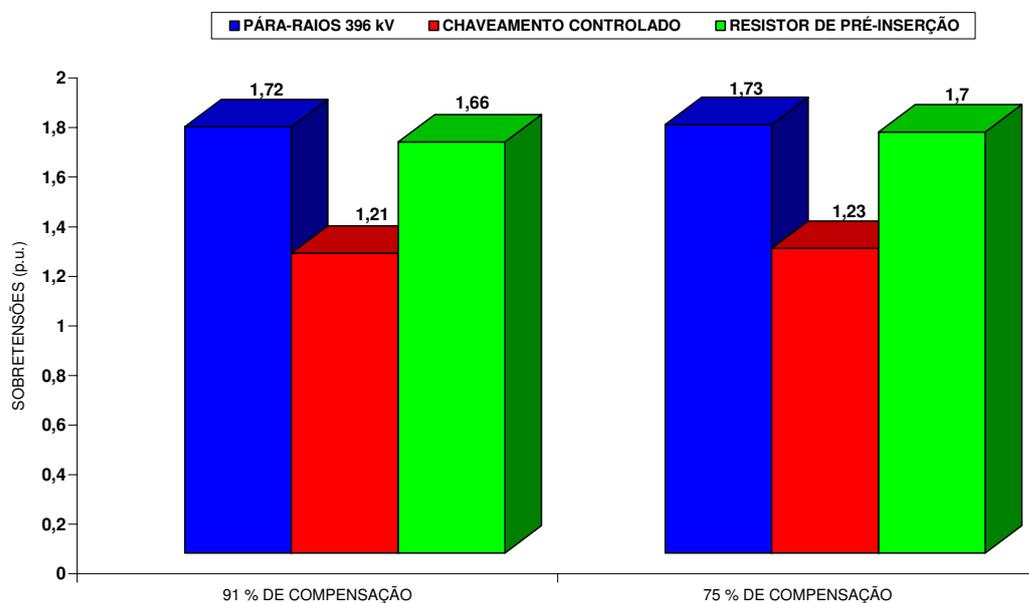


Figura 82. Máximas Sobretensões na Barra 5. Manobra de religamento da LT.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusões

Mediante simulações realizadas com o programa PSCAD/EMTDC foram apresentados os resultados do comportamento do pára-raios, chaveamento controlado e resistor de pré-inserção no controle de sobretensões transitórias na manobra de energização e religamento trifásico de linhas de transmissão. Este estudo analisa as piores condições do sistema, porém os resultados apresentados nesta dissertação não devem ser generalizados. Cada sistema deve ser estudado de forma específica e com suas particularidades já que um grande número de parâmetros influi nas sobretensões de chaveamento, como a configuração da linha, comprimento da linha, resistividade do solo, características da propagação dos componentes modais, grau de compensação em derivação, características do pára-raios e outros.

O uso de pára-raios de ZnO com uma tensão nominal menor (396 kV) do que a especificada normalmente (420 kV) é uma alternativa na limitação de sobretensões na manobra de energização. A solução tradicional é a instalação de pára-raios somente nos terminais da linha, no entanto, um terceiro pára-raios no meio da linha traz uma redução adicional no nível de sobretensões. Os requerimentos de energia dos pára-raios devido ao

transitório de energização de linhas de transmissão são consideravelmente menores do que a capacidade térmica permitida segundo norma IEC, mas a tensão máxima de operação do sistema e as sobretensões temporárias devem ser cuidadosamente consideradas para a especificação dos pára-raios.

O chaveamento sincronizado em manobras de energização e religamento trifásico de linhas de transmissão reduz o nível de sobretensões. A partir dos resultados obtidos nas simulações realizadas, pode-se afirmar que na manobra de energização do sistema estudado, o chaveamento sincronizado é um método tão adequado para o controle das sobretensões quanto o resistor de pré-inserção. Este último, apesar de ser um método efetivo, apresenta uma aceitação de sua tecnologia tendente a diminuir devido ao alto custo de implementação e manutenção.

Analisando-se o chaveamento controlado para a manobra de energização de linha, não foi encontrada diferença importante entre o controle do primeiro cruzamento da tensão por zero, com as demais fases sendo fechadas após 60° ou o controle por fase a cada cruzamento por zero da tensão.

Para o caso de religamento trifásico, a forma de onda de tensão é definida pela existência ou não de compensação reativa. A tensão entre os polos do disjuntor assume forma oscilatória (batimento) com um amortecimento na sua amplitude no decorrer do tempo. O período deste batimento é função do nível de compensação reativa da linha. Pode-se determinar que o ponto ótimo para manobrar o disjuntor corresponde à região onde a amplitude do batimento da tensão entre os polos do disjuntor é mínima, sendo necessário considerar o tempo morto da proteção para se definir a região de mínimo adequada ao fechamento. No caso estudado as regiões ótimas foram o primeiro e segundo batimento para linhas com 91 % e 70 % de compensação, respectivamente. As amplitudes das regiões de mínimo subseqüentes tendem a aumentar devido à descarga de linha.

Na manobra de religamento trifásico o chaveamento controlado dos polos do disjuntor é o método mais eficiente para reduzir sobretensões comparado com a utilização de pára-raios ou resistor de pré-inserção.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

A seguir são apresentadas as sugestões para futuros trabalhos:

- Implementar um modelo de chave que inclua a característica dielétrica do disjuntor durante a operação de fechamento, bem como a dispersão do disjuntor e imprecisão do instante ótimo determinado pelo controlador. Este modelo poderia determinar de forma mais realista a tensão de pré-arco do disjuntor, oferecendo uma avaliação mais precisa do desempenho do disjuntor e do controlador numa manobra controlada. A análise estatística deve ser estendida aos demais métodos de controle.
- Implementar uma rotina de controle para o fechamento controlado do religamento trifásico, com a finalidade de que os polos do disjuntor possam fechar automaticamente quando a tensão entre mesmos é mínima, considerando o tempo morto de atuação da proteção.
- Analisar o efeito do resistor de neutro na redução dos transitórios associados à manobra de energização de uma linha de transmissão.
- Analisar os métodos de mitigação de sobretensões para manobras de energização e religamento para linhas com comprimento elétrico maiores que as usuais, especificamente para linhas com comprimento elétrico acima de meia onda.
- Efetivar uma análise de sensibilidade dos métodos de mitigação das sobretensões devido às manobras de energização e religamento considerando:
 - Diferentes níveis de tensão das linhas de transmissão.
 - Diferentes comprimentos das linhas de transmissão.
 - Diferentes níveis de compensação das linhas de transmissão.
 - Diferentes sistemas junto aos terminais emissor e receptor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABB. **Controlled switching - Application guide**, Edição 1, 2004.

ABB. **Surge Arrester. Technical information**, 1HSM 9543 13-01, Edição 2, 2004.

ABB. **Surge Arrester – Buyer’s guide**, Edição 5, 2005 .

ATP. **Alternative Transient Program Rule Book**, Ku Leuven, Leuven EMTP Center, 1997.

BARBOSA M. A. **Sobretensões de manobra - dimensionamento do resistor de pré-insercão**. Dissertação mestrado Faculdade de Engenharia Elétrica Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 1989.

BLADOW, J.K.; WEAVER T.L, **Switching surge control for the 500 kV California – Oregon Transmission Project**, CIGRE, Paper 13-304, Agosto 1990.

CARVALHO F.M.S, ESMERALDO P.V.C, DE OLIVEIRA C.M.F, CÂMARA A.S.B, VAISMAN R. **Interligação Norte - Sul: Controle de sobretensões transitórias de manobra - Métodos convencionais versus chaveamento síncrono de disjuntores de linhas de transmissão de 500 kV** In: Grupo XI: Sobretensões, Coordenação de Isolamento e Interferências do XIV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Belém, Pará, Brasil, 1997.

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—A State-of-the-art Survey**. Part 1, ELECTRA, No. 162, Outubro 1995, pp. 65-97. Part 2, ELECTRA, No. 164, Fevereiro 1996, pp. 39-61.

CIGRE WG 13.07, **Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers – Planning, Specification and Testing of Controlled Switching Systems**, ELECTRA No. 197, Agosto 2001.

CIGRÉ Working Group A3.07, **Controlled switching of HVAC circuit breakers. Benefits & economic aspects**, Janeiro, 2004.

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.

D'AJUZ A., FONSECA C.S., CARVALHO F.M.S., AMON FILHO J., DIAS L.N.E., PEREIRA M.P., ESMERALDO P.C.V., VAISMAN R., FRONTIN S. O. **Transitórios elétricos e coordenação de isolamento - aplicação em sistemas de potência de alta tensão**, Editora da Universidade Fluminense e FURNAS Centrais Elétricas, Niterói, Rio de Janeiro, 1987.

D'AJUZ A.; RESENDE F.M.; CARVALHO F.M.S.; NUNES I.G.; AMON F. J.; DIAS L.N.E.; PEREIRA M.P.; KASTRUP FILHO O.; MORAIS S. A. **Equipamentos elétricos**.

Especificação e aplicação em subestações de alta tensão, Editora da Universidade Fluminense e FURNAS Centrais Elétricas, Niterói, Rio de Janeiro, 1985.

DILLARD, J.K.; CLAYTON, J.M.; KILLARD L.A.. **Controlling switching surges on 1100 kV transmission systems**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems vol. PAS-89 pp. 1752-1762, Novembro/Dezembro 1970.

DOMMEL, H. W. **Electromagnetic Transient Program Reference Manual- EMTP Theory Book**, Department of Electrical Engineering-The University of British Columbia, Vancouver, Canadá, 1986.

DOMMEL, H.W.. **Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single and Multiphase Networks**, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-88, pp. 388-399, Abril 1969.

ESMERALDO P.C.V.; AMON F.J.; ARVALHO F.M.S.; ARVALHO 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.

FERNANDEZ P. C., ESMERALDO P.C.V., CÂMARA A.S.B., ZANI C.R., BRONZEADO H., VAISMAN R. **Mitigation of power system switching transients to improve power quality**. In: VII Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning (SEPOPE), Curitiba, Paraná, Maio, 2000.

FERNANDEZ P.C.; ESMERALDO P.C.V.; CARVALHO F.M.S.; CÂMARA A.S.B. **Mitigation of power system switching transients to improve power quality**. In: 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power ICHQP '98, Atenas, Grécia, Outubro, 1998.

FERNANDEZ P.C.;ESMERALDO P.C.V.; AMON J.; ZANI C.R. **Use of controlled switchintg systems in power system to mitigate switching transients. trends and benefits**

– **Brazilian Experience** In: IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, São Paulo, 2004.

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** IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 2, pp. 741 -746, Abril 1997.

GUSTAVSEN, B; IRWIN G; MANGELROD, R; BRANDT, D; KENT, K, **Transmission Line Models for the Simulation of Interaction Phenomena Between Parallel AC and DC Overhead Lines**, IPST '99 Proceedings, pp. 61-67, Budapest, Hungria Junho 20-24, 1999.

ITO H. “**Controlled Switching Technologies, State-of-the-Art**”, Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002, pp. 1455-1460, Vol.2, Ásia Pacífica, 2002.

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.

MOBEDJINA, M.; JOHNNERFELT, J.; STENSTROM, L. **Design and Testing of Polymer-Housed Surge Arresters**, GCC CIGRE 9th Symposium, Abu Dhabi, Emiratos Árabes Unidos Outubro, 1998.

MORCHED, A.; GUSTAVSEN, B.; TARTIBI, M. **A Universal Model for Accurate Calculation of Electromagnetic Transients on Overhead Lines and Underground Cables**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 3, Julho 1999.

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.

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.

ANEXO 1

PROGRAMA COMPUTACIONAL

PSCAD[®]/EMTDC[™]

Para as simulações realizadas nesta dissertação utilizou-se o programa PSCAD/EMTDC, ferramenta de simulação de fenômenos transitórios em redes polifásicas com configurações arbitrárias que tem sua aplicação principal em sistemas elétricos de potência. Este programa foi escolhido para as simulações, pois permite representar a linha de transmissão considerando a dependência de seus parâmetros longitudinais com a frequência, resultando numa melhor representação do comportamento físico real das linhas.

- PSCAD (Power System Computer Aided Design) é a interface gráfica para criação e edição de arquivos de dados de entrada. Processador interativo em ambiente Windows. Define um ambiente de trabalho atuando como núcleo central do pacote completo de onde o usuário pode controlar o processamento. Dispõe de modelos para os principais componentes de uma rede elétrica.
- EMTDC (Electromagnetic Transients incluindo CC) é programa principal para a simulação de transitórios eletromagnéticos.

1. Histórico

O programa computacional EMTDC se baseia no clássico artigo de DOMMEL, 1969, que estabelece os princípios do programa EMTP. (PSCAD/EMTDC User Guide, 2005)

O programa EMTP (Electromagnetic Transients Program) foi criado inicialmente por Herman W. Dommel na década de 60, com base no trabalho de Frey e Althammer (Brown Boveri, Switzerland), em Munique, na Alemanha (ATP-EMPT RULE BOOK, 1997).

As primeiras linhas do código do EMTDC foram escritas em 1975, na Manitoba Hydro por Dennis Woodford (Diretor Técnico do Centro entre 1986 - 2001), como uma necessidade de uma ferramenta para simulação suficientemente poderosa e flexível para o estudo do Sistema de Potência CCAT Nelson River em Manitoba, Canadá.

Continuando o sucesso deste estudo, o desenvolvimento do programa seguiu por duas décadas. Durante este tempo, um grupo de profissionais desenvolveu modelos que foram acumulados como necessidade de vários projetos de simulação os quais foram adicionados resultando na versão 1.

Em 1988, a interface gráfica começou sua evolução como uma ferramenta para gerar arquivos de dados para o programa de simulação EMTDC. A Versão 1 foi principalmente experimental, não obstante, representou um grande passo com relação a velocidade e produtividade, já que os usuários de EMTDC poderiam desenhar agora seus sistemas, em lugar de criar listas de texto. O PSCAD foi introduzido pela primeira vez como um produto comercial na sua Versão 2 objetivado para a plataforma UNIX em 1994. Atualmente é comercializada a Versão 4.2 .

Em termos gerais, todos os programas baseados nos princípios estabelecidos por DOMMEL,1969 podem ser resumidamente apresentados como:

- Os componentes básicos (resistências, capacitâncias, indutâncias e linhas de transmissão) modelados por meio de suas correspondentes equações diferenciais ordinárias, descrevendo as relações de tensão e corrente.
- As equações diferenciais são integradas utilizando-se a regra de integração trapezoidal, sendo o tempo discretizado em intervalos de tempo constantes, Δt . Esta discretização resulta em um circuito equivalente de Norton para cada componente. A regra de integração trapezoidal é utilizada devido à sua simplicidade (baixo esforço computacional), sua estabilidade e pela precisão satisfatória.
- Os equivalentes de Norton de todos os componentes do sistema em estudo são combinados, de acordo com a topologia deste, resultando em um conjunto de equações nodais. Estas equações são resolvidas a cada intervalo de tempo produzindo as soluções de tensão e corrente no domínio do tempo.

2. Modelagem Matemática dos Componentes Básicos

2.1 Resistência

Os transitórios em resistências não precisam de equações diferenciais para sua solução. (Figura A1-1)

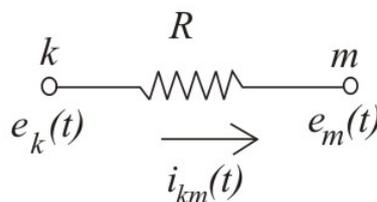


Figura A1-1. Resistência conectada entre os nós k e m de uma rede

$$i_{km}(t) = \frac{1}{R} [e_k(t) - e_m(t)] \quad (1)$$

2.2 Indutância

Partindo de uma indutância conectada entre nós k e m de uma rede, como mostrado na Figura A1-2, explicam-se os princípios para elementos de circuitos modelados por parâmetros concentrados.

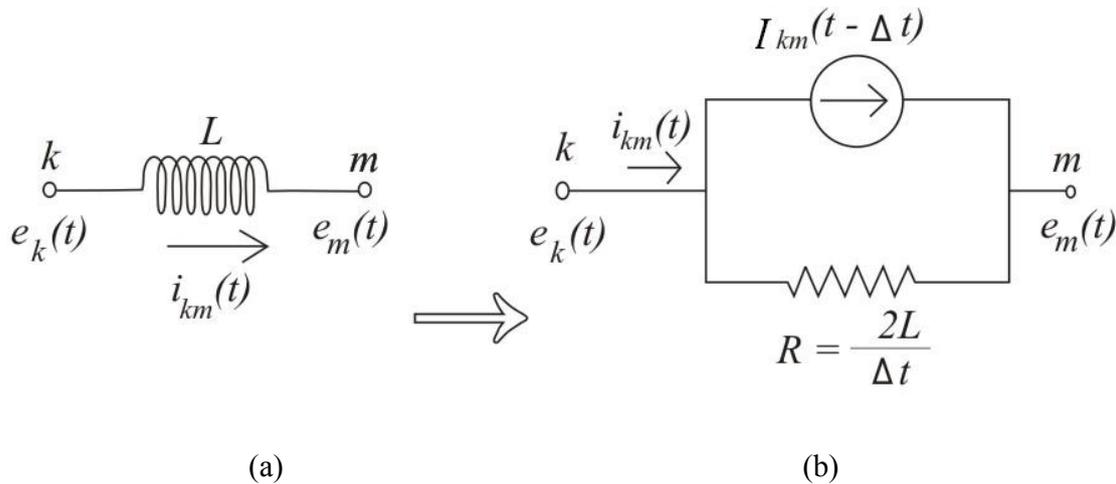


Figura A1- 2. (a) Indutância conectada entre os nós k e m de uma rede (b) Equivalente Norton

A equação diferencial ordinária para a indutância L conectada entre os nós k e m é dada como segue:

$$e_k(t) - e_m(t) = L \frac{di_{km}(t)}{dt} \quad (2)$$

A derivada pode-se expressar em termos de diferenças finitas como:

$$\frac{di_{km}(t)}{dt} \approx \frac{i_{km}(t) - i_{km}(t - \Delta t)}{\Delta t} \quad (3)$$

Esta expressão dá o valor da derivada num ponto intermediário do intervalo $[t - \Delta t, t]$, então é mais preciso substituir a diferença de tensões em t por seu valor médio no intervalo:

$$e_k(t) - e_m(t) = \frac{1}{\Delta t} \int_{t-\Delta t}^t (e_k(t) - e_m(t)) dt \quad (4)$$

A Equação 2 fica:

$$i_{km}(t) = i_{km}(t - \Delta t) + \frac{1}{L} \int_{t-\Delta t}^t (e_k(t) - e_m(t)) dt \quad (5)$$

A regra de integração trapezoidal é então aplicada à equação diferencial ordinária que descreve o comportamento dinâmico da indutância, como mostrado a seguir.

$$i_{km}(t) = \frac{\Delta t}{2L} (e_k(t) - e_m(t)) + I_{km}(t - \Delta t) \quad (6)$$

$$I_{km}(t - \Delta t) = i_{km}(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2L} (e_k(t - \Delta t) - e_m(t - \Delta t)) \quad (7)$$

Analisando a Equação 6, percebemos que a mesma também descreve um equivalente de Norton, conectado entre os nós k e m quando substituimos $2L / \Delta t$ por uma resistência e consideramos o termo $I_{km}(t - \Delta t)$ como uma fonte de corrente.

Observamos também que tal fonte de corrente é calculada baseada em valores passados da tensão e corrente na indutância, conforme a Equação 7. Isto permite que a Equação 2 seja resolvida através de um processo iterativo: calcula-se o valor da fonte de corrente segundo a Equação 7; obtém-se o valor presente (correspondente ao tempo t) da corrente através da indutância $2L / \Delta t$ (Equação 6); calcula-se novamente o valor da fonte de corrente, (Equação 7), e assim por diante.

Esta é a estratégia básica para a solução de elementos modelados por parâmetros concentrados e regidos por equações diferenciais ordinárias: os elementos são substituídos por resistências equivalentes e a “dinâmica” do elemento é considerada por meio de uma fonte de corrente “histórica”, que é calculada a partir da solução obtida no passo de tempo anterior.

2.3 Capacitância

As capacitâncias são tratadas da mesma maneira que as indutâncias, resultando em equações similares. Na Figura A1-3 é mostrado o equivalente de Norton para capacitâncias resultantes da discretização do tempo em intervalos.

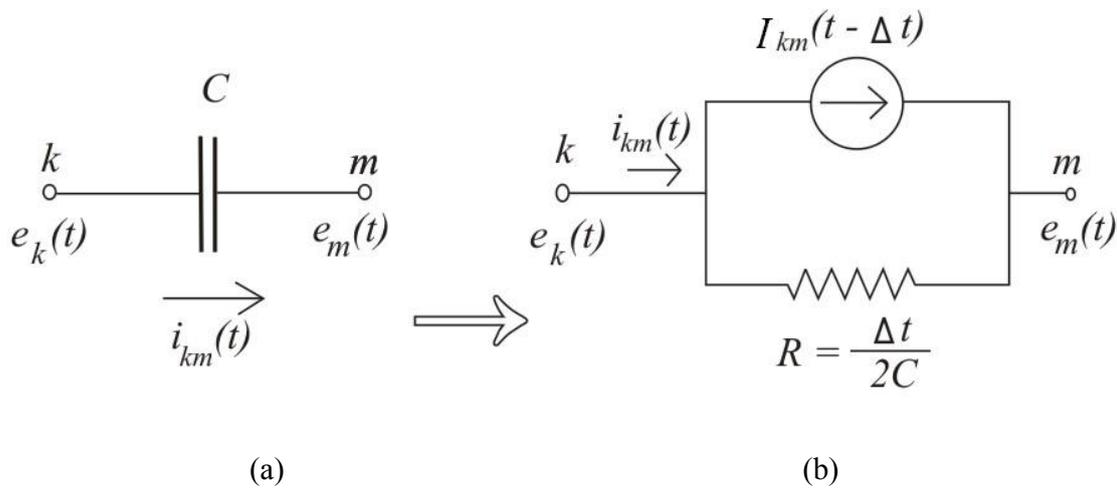


Figura A1-3. (a) Capacitância conectada entre os nós k e m de uma rede (b) Equivalente Norton

A equação diferencial ordinária para a capacitância C conectada entre os nós k e m é dada como segue:

$$e_k - e_m = \frac{1}{C} \int i_{km} \quad (8)$$

$$\frac{d}{dt}(e_k - e_m) = \frac{i_{km}}{C} \quad (9)$$

A derivada pode ser expressa em termos de diferenças finitas como:

$$\frac{d}{dt}(e_k - e_m) \approx \frac{[e_k(t) - e_m(t)] - [e_k(t - \Delta t) - e_m(t - \Delta t)]}{\Delta t} \quad (10)$$

e também:

$$\frac{i_{km}}{C} \approx \frac{1}{C \Delta t} \int_{t-\Delta t}^t i_{km} dt \approx \frac{1}{2C} [i_{km}(t-\Delta t) + i_{km}(t)] \quad (11)$$

de onde:

$$\frac{[e_k(t) - e_m(t)] - [e_k(t-\Delta t) - e_m(t-\Delta t)]}{\Delta t} = \frac{1}{2C} [i_{km}(t-\Delta t) + i_{km}(t)] \quad (12)$$

$$i_{km}(t) = \frac{2C}{\Delta t} [e_k(t) - e_m(t)] + I_{km}(t-\Delta t) \quad (13)$$

$$I_{km}(t-\Delta t) = -i_{km}(t-\Delta t) - \frac{2C}{\Delta t} [e_k(t-\Delta t) - e_m(t-\Delta t)] \quad (14)$$

2.4 Conexão RL

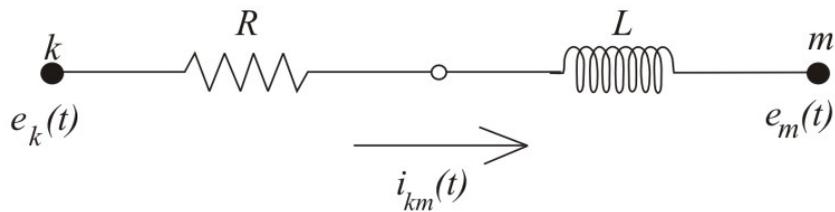


Figura A1- 4. Conexão RL entre os nós k e m de uma rede

Segundo a Figura A1-4 e aplicando o método de integração trapezoidal, obtemos a equação para o ramo RL, a resistência equivalente e os termos históricos.

$$i_{km}(t) = \frac{1}{\left(\frac{2L}{\Delta t} + R\right)} [e_k(t) - e_m(t)] + I_{km}(t - \Delta t) \quad (15)$$

$$I_{km}(t - \Delta t) = \frac{\left(1 - R \frac{\Delta t}{2L}\right)}{\left(1 + R \frac{\Delta t}{2L}\right)} i_{km}(t - \Delta t) + \frac{1}{\left(\frac{2L}{\Delta t} + R\right)} (e_k(t - \Delta t) - e_m(t - \Delta t)) \quad (16)$$

2.5 Conexão RLC

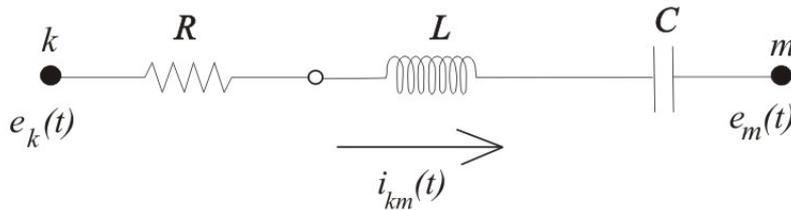


Figura A1- 5. Conexão RLC entre os nós k e m de uma rede

Para o caso geral de conexão série RLC da Figura A1-5 as quedas de tensão são somadas.

$$v_k(t) - v_m(t) = v_R(t) + v_L(t) + v_C(t) \quad (17)$$

A queda de tensão é expressa como função da corrente com as Equações 1, 6 e 13. Depois de substituir os termos do histórico, dados pelas Equações 7 e 14, a equação de ramo é obtida:

$$i_{km}(t) = \frac{1}{\left(R + \frac{2L}{\Delta t} + \frac{\Delta t}{2C}\right)} [e_k(t) - e_m(t)] + I_{km}(t - \Delta t) \quad (18-a)$$

$$I_{km}(t - \Delta t) = \frac{1}{\left(R + \frac{2L}{\Delta t} + \frac{\Delta t}{2C}\right)} \left[\left(\frac{2L}{\Delta t} - R - \frac{\Delta t}{2C} \right) i_{km}(t - \Delta t) + e_k(t - \Delta t) - e_m(t - \Delta t) - 2e_c(t - \Delta t) \right] \quad (18-b)$$

$$e_c(t) = e_c(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2C} (i(t) + i(t - \Delta t)) \quad (19)$$

3. Modelagem Matemática de Linhas de Transmissão

Devido às suas particularidades, as linhas de transmissão podem ser modeladas de diferentes formas, de acordo com a precisão e a eficiência necessária. Existem três técnicas básicas de modelagem de linhas de transmissão no EMTDC: Modelo a parâmetros concentrados, modelo a parâmetros distribuídos e os modelos de linha com representação de dependência na frequência dos parâmetros longitudinais.

3.1 Modelo a parâmetros concentrados. - Seção π

A linha de transmissão é representada por elementos concentrados. Para se obter aproximadamente o comportamento de uma linha de transmissão real é necessário o uso de várias seções em série.

O EMTDC não considera as seções π como o melhor método para representar uma linha de transmissão pelas seguintes razões:

- Precisa de um maior tempo computacional e o tamanho da matriz é crescente (para seções PI em série)
- A atenuação da propagação de ondas, dependente da frequência, não é exatamente incorporada.

3.2 Modelo a parâmetros distribuídos. - Modelo de Bergeron

Neste modelo a natureza distribuída dos parâmetros elétricos da linha é levada em consideração através da representação da propagação de ondas. Assim um distúrbio se propaga sujeito a atenuações até ser refletido nos terminais da linha, existindo um atraso entre tensões (e correntes) nos terminais opostos.

As equações diferenciais descrevem as relações entre tensão e corrente ao longo do comprimento da linha, envolvendo variáveis para o tempo e para o espaço, no caso t e x . Desta maneira, são levadas em consideração as distribuições dos parâmetros das linhas de transmissão (indutância L , capacitância C , resistência R e condutância G por unidade de comprimento) ao longo do comprimento da linha. Os parâmetros são supostos constantes com a frequência, sendo calculados para uma determinada frequência.

Tomando como base uma linha composta por um único condutor entre terminais k e m , mostra-se, resumidamente, a representação interna do modelo de linha de transmissão com parâmetros distribuídos utilizada no EMTDC. (Figura A1-6)

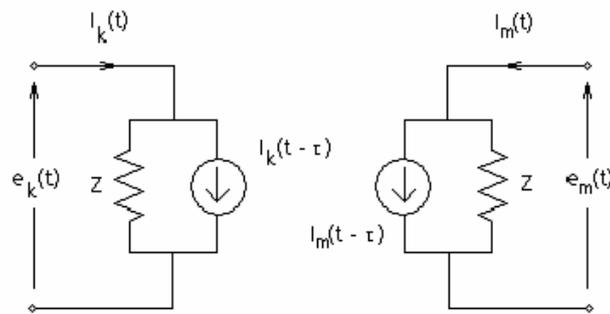


Figura A1-6. Representação interna do modelo a parâmetros distribuídos do EMTDC

Quando os parâmetros L , C , R e G são considerados constantes, as seguintes equações diferenciais descrevem as relações entre a tensão $e(x,t)$ e corrente $i(x,t)$ em uma linha de transmissão.

$$-\frac{\partial e}{\partial x} = Ri + L \frac{\partial i}{\partial t} \quad (20-a)$$

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = Ge + C \frac{\partial e}{\partial t} \quad (20-b)$$

As Equações (20-a) e (20-b) são facilmente integráveis no caso de linhas sem perdas, isto é $R = 0$ e $G = 0$. A solução geral é dada por meio de funções arbitrárias nas variáveis x e t :

$$i(x, t) = f(x - vt) + b(x + vt) \quad (21-a)$$

$$e(x, t) = Z f(x - vt) + Z b(x + vt) \quad (21-b)$$

Para linhas sem perdas, nas Equações 21-a e 21-b, Z é a impedância característica da linha de transmissão e v é a velocidade de propagação, expressas em função dos parâmetros da linha como:

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (22-a)$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (22-b)$$

A interpretação física para $f(x - vt)$ é uma onda viajante de corrente na direção de crescimento de x e para $b(x - vt)$ uma onda viajante de corrente no sentido contrário ao crescimento de x . As relações de tensão e corrente no início e final da linha (terminais k e m) fazem uso do tempo de trânsito das ondas viajantes, definido como $\tau = l/v$, onde l é o comprimento da linha. Desta maneira, são referenciadas as tensões e correntes em um terminal em função das tensões e correntes no outro terminal em um intervalo de tempo passado, igual a τ . Usando este conceito e após manipulações algébricas envolvendo as equações (21-a) e (21-b), tem-se:

$$i_{km}(t) = \left(\frac{1}{Z}\right) e_k(t) + I_k(t - \tau) \quad (23-a)$$

$$i_{mk}(t) = \left(\frac{1}{Z}\right)e_m(t) + I_m(t - \tau) \quad (23-b)$$

$$I_k(t - \tau) = \left(\frac{1}{Z}\right)e_m(t - \tau) - i_{mk}(t - \tau) \quad (24-a)$$

$$I_m(t - \tau) = \left(\frac{1}{Z}\right)e_k(t - \tau) - i_{km}(t - \tau) \quad (24-b)$$

Pode-se observar que as Equações (23-a) e (23- b) representam equivalentes de Norton, sendo as correntes k e m dadas pelas equações (24-a) e (24- b), calculadas apenas a partir de valores passados das tensões e correntes nos terminais k e m . Esta formulação é equivalente àquelas apresentadas para indutâncias e capacitâncias e permite a sua solução pelo mesmo procedimento iterativo, ou seja: indutâncias, capacitâncias e linhas de transmissão sem perdas podem ser integradas em uma mesma rotina para cálculo de transitórios. As perdas são incorporadas ao modelo através de elementos R concentrados. (Figura a1-7)

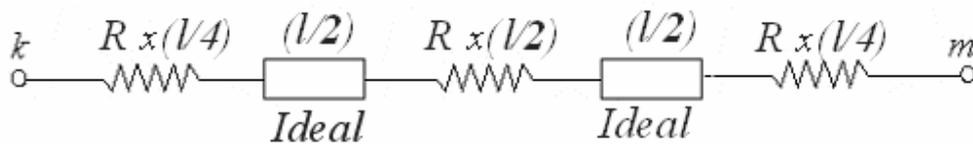


Figura A1-7. Representação da linha de transmissão com perdas

3.3 Modelos a parâmetros dependentes da frequência.

Estes modelos representam com maior precisão o fenômeno físico da propagação de ondas, pois considera os efeitos da frequência sobre seus parâmetros. A propagação de ondas nas linhas de transmissão polifásicas podem ainda ser resolvidas usando a técnica modal ou usando técnicas mais avançadas no domínio das fases.

Modelo no Domínio Modal

Este modelo faz uso da técnica de transformação modal. Através do cálculo de autovalores e autovetores das matrizes que caracterizam a linha, as n fases de uma linha polifásica podem ser desacopladas em n “linhas monofásicas” independentes. É um modelo de grande utilização, embora no atual estágio de desenvolvimento do PSCAD não ser recomendado pela sua baixa precisão para todos os tipos de configurações de linhas. São bastante precisos no caso de linhas de transmissão aéreas supostas idealmente transpostas, mas perdem em precisão, quando aplicados a linhas aéreas com alto grau de assimetria, linhas em configurações de circuitos múltiplos e cabos subterrâneos.

Modelo no Domínio de Fases

Este modelo não apresenta as restrições quanto à geometria ou natureza das linhas de transmissão e propõe modelar a linha de transmissão diretamente no domínio de fases, evitando a transição para o domínio modal durante a simulação no tempo. Este modelo tem despertado muito interesse e tem se mostrado preciso quando os modelos modais convencionais existentes no PSCAD se mostram mais limitados.

MORCHED et al. (1999) apresentam um modelo de linhas de transmissão no domínio das fases, denominado de modelo universal (Universal Model). Esse modelo faz uso do método de ajuste vetorial (GUSTAVSEN et. al, 1999) para obter aproximações racionais para a Admitância Característica $Y_c(j\omega)$ e a Matriz de Propagação $A(j\omega)$ no domínio de fases. Inicialmente a matriz fator de propagação no domínio modal é aproximada por funções racionais, na forma:

$$A_{mod-i}(j\omega) \cong P_i(j\omega)e^{-j\omega\tau_i} \quad (25)$$

Sendo o modo i do fator de propagação, com módulo $e^{-\alpha_i(j\omega)d}$ e fase $(\beta_i(j\omega) \cdot d)$ na frequência ω .

$P_i(j\omega)$ = Função polinomial racional de fase mínima.

τ_i = Menor tempo de trânsito (tempo de propagação) da componente do modo i (associado à maior velocidade de propagação).

Sendo o processo de ajuste vetorial um método linear não é capaz de levar em consideração o tempo de trânsito na Equação (25) como uma variável do processo de ajuste. Desse modo, é necessária a determinação do tempo de trânsito em uma etapa anterior ao processo de ajuste para cada um dos i modos de fator de propagação. Uma vez calculados os tempos de propagação de cada modo i , as rotações de fase devidas a estes são extraídas.

$$e^{+s\tau_i} \cdot A_{mod-i}(s) \cong \sum_{m=1}^N \frac{c_m}{s - p_m} \quad \text{para } s=j\omega \quad (26)$$

Sendo:

c_m = resíduos da função racional aproximada para o modo i

p_m = pólos da função racional aproximada para o modo i

MORCHED et al. (1999), agrupam os modos com tempos de propagação muito próximos, com o intuito de tornar o modelo mais eficiente. Este artifício reduz o número de convoluções no tempo, contribuindo com um ganho em eficiência computacional. Os modos para os quais o critério da Equação (27) é satisfeito são agrupados sob um tempo de trânsito comum τ^* (igual ao menor tempo de trânsito individual entre os modos agrupados).

$$\Omega \Delta\tau_{ij} < 2 \cdot \pi \left(\frac{10}{360} \right) \quad (27)$$

Sendo: $\Delta\tau_{ij} = \tau_i - \tau_j$ Diferença entre os tempos de trânsito dos modos i e j .

De posse dos pólos calculados no domínio modal, os elementos de $A(j\omega)$ no domínio de fases são calculados de modo a compartilharem todos os pólos calculados no domínio modal, e assim:

$$A_{ij}(s) \cong \sum_{k=1}^n \left[\left(\sum_{m=1}^{N_k} \frac{C_{mk-ij}}{s - P_{mk}} \right) \cdot e^{-s \cdot \tau_k} \right] \quad (28)$$

Sendo:

$A_{ij}(s)$ = elemento (i,j) da matriz A(s) no domínio de fases;

p_{mk} = pólos da função racional aproximada para o modo k

τ_k = tempo de trânsito do modo k

N_k = ordem da aproximação racional para modo k

C_{mk-ij} = resíduo da função racional para o modo k

n = número de modos (ou grupos, caso haja agrupamento de modos).

Note-se que a cada elemento da matriz fator de propagação estão associados n tempos de propagação modal. O compartilhamento de pólos contribui para um aumento na eficiência computacional em simulações no domínio do tempo.

Como as aproximações racionais para os n modos $A_{mod-i}(j\omega)$ são obtidas de forma independente eventualmente alguns pólos de diferentes modos podem estar muito próximos. Se isto ocorre em baixas frequências, os respectivos resíduos da função racional aproximada no domínio de fases podem ter valores elevados com sinais opostos. Isto pode levar a instabilidades em simulações no tempo. A probabilidade disto ocorrer é proporcional à ordem do ajuste.

Os elementos da admitância característica $Y_c(j\omega)$, por sua vez, são aproximados diretamente no domínio de fases, também compartilhando os mesmos pólos.

$$Y_{c-ij}(s) \cong d_{ij} + \sum_{k=1}^n \frac{C_{k-ij}}{s - p_k} \quad \text{para } s=j\omega \quad (29)$$

Sendo:

$Y_{c-ij}(s)$ = Elemento (i,j) da matriz $Y_c(s)$ no domínio de fases.

ANEXO 2

GUIA DE INTRODUÇÃO AO PSCAD/EMTDC

SUMARIO

1. INTRODUÇÃO	131
2. ARQUIVOS GERADOS PELO PSCAD.....	131
3. O AMBIENTE GRÁFICO DO PSCAD	131
4. MASTER LIBRARY.....	133
5. FUNÇÕES BÁSICAS.....	134
5.1 Criar o projeto.....	134
5.2 Guardar o Projeto	135
5.3 Controle do Projeto.....	135
6. PROJETO BÁSICO DE SIMULAÇÃO.....	136
6.1 Localizar o elemento	137
6.2 Situar o elemento na área de desenho.....	137
6.3 Parâmetros da fonte de tensão	138
6.4 Parâmetros da resistência e bobina.....	139
6.5 Conexão de componentes	140
6.7 Localização de medidores	141
7. GRÁFICOS	142
7.1 Variáveis a representar	142
7.2 Localizar o quadro do gráfico.....	143
7.3 Incluir nos gráficos as variáveis a representar.....	145
8. SIMULAÇÃO	146
8.1 Parâmetros de simulação	146

8.2	Simulação	147
8.3	Possíveis erros na simulação	147
8.4	Resultados.....	148
9.	LINHA DE TRANSMISSÃO	148
9.1	Interface da Linha de Transmissão.....	148
9.2	Configuração da Linha de Transmissão	150
9.3	Edição da Configuração da Linha de Transmissão	150
9.5	O modelo de Linha de Transmissão	151
9.6	Entrada de dados.....	152

1. Introdução

O objetivo deste Anexo é de servir como uma fácil e rápida introdução ao programa de simulação PSCAD/EMTDC. Este software permite realizar simulações de sistemas elétricos e eletrônicos de potencia.

PSCAD (Power System Computer Aided Design) 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.

Primeiro se fará uma breve descrição do software para logo mediante um exemplo simples mostrar o funcionamento do programa. Os dados do circuito elétrico são inseridos por meio de uma interface gráfica, para isto se dispõe de uma importante biblioteca de modelos de equipamentos de potência e eletrônicos já desenvolvidos. Uma vez ingressado o caso a estudar se realiza sua simulação. Como resultado da simulação pode-se visualizar em forma gráfica e mediante instrumentos de medição os parâmetros elétricos de interesse.

2. Arquivos Gerados Pelo Pscad

No PSCAD se geram vários arquivos em cada simulação. O principal é aquele onde se guarda o esquema e cuja extensão é “.psc”, após a simulação é gerado um arquivo com extensão .emt onde são armazenados todos os arquivos temporarios utilizados na simulação. Para abrir um esquema criado anteriormente tem que se ir ao comando “Load Project” do menu principal e caso precise guardar com outro nome se utiliza o comando “Save Project as”.

3. O Ambiente Gráfico do PSCAD

O PSCAD trabalha em um Ambiente Windows e no início apresenta uma janela que possui principalmente uma área de desenho, uma área de projetos, uma janela de saída, uma paleta de componentes e uma barra principal de tarefas como é mostrado na Figura A1- 1.

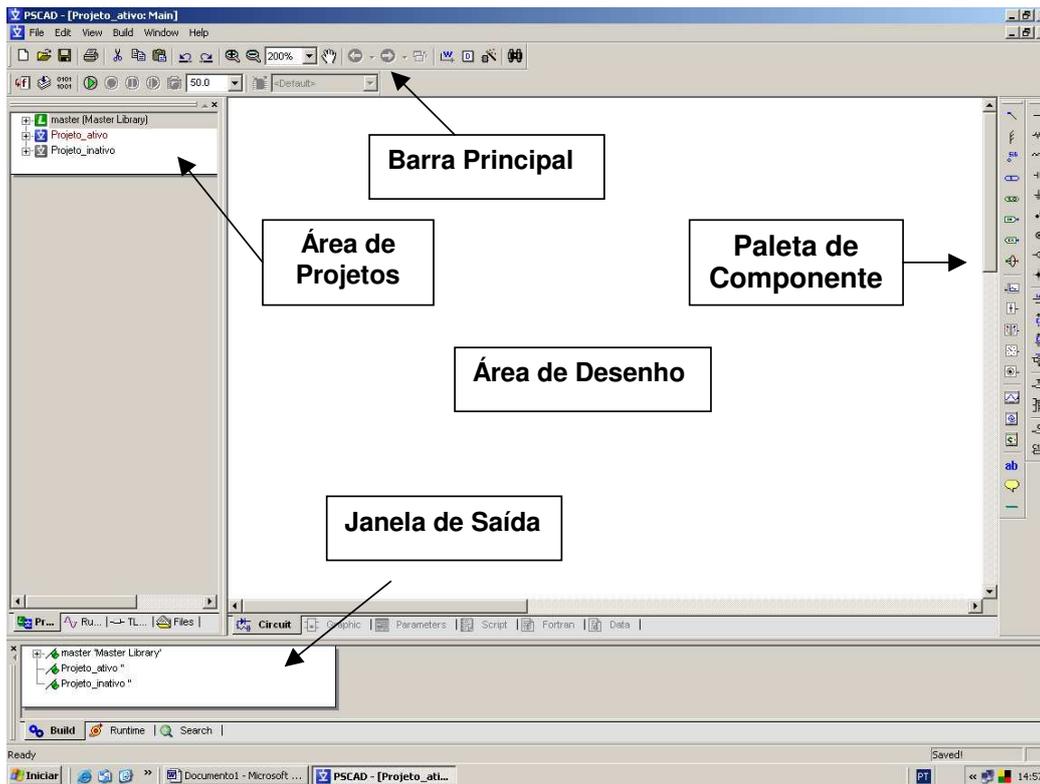


Figura A2-1. Ambiente Gráfico do PSCAD

- **Área de Projetos:** A seção de projetos é usada principalmente para o controle de projetos carregados, estes podem estar ativos ou inativos e a *Master Library* é sempre o primeiro projeto listado nesta seção como se mostra na Figura A2-2.

-  Library Project
-  Inactive Case Project
-  Active Case Project

Figura A2-2. Principais status dos projetos

- **Área de Desenho:** É a parte central em branco onde serão desenhados os sistemas elétricos.
- **Janela de Saída:** Esta seção permite monitorar o estado da simulação, localização de erros, mensagens de alerta etc, as mais comuns se mostram na Figura A2-3.

-  OK
-  Warning
-  Error

Figura A2-3. Principais mensagens da janela de saída

- **Barra Principal de Ferramentas:** Esta barra possui as operações utilizadas com mais frequência do menu principal. Permite ordenar e organizar arquivos e realizar todas as atividades de manipulação de arquivos como copiar, colar, apagar, etc. (Figura A2-4)



Figura A2-4. Barra Principal de Ferramentas

- **Paleta de componentes:** É uma maneira fácil e rápida de ter acesso às funções do menu principal incluindo as tarefas mais comumente utilizadas. Está dividida em paleta de elementos elétricos e paleta de elementos de controle. (Figura A2-5)



Figura A2-5. Paleta de Elementos elétricos e de controle.

4. Master Library

O PSCAD possui uma biblioteca de componentes denominada *Master Library*, que permite a utilização direta dos componentes mais usuais nos sistemas elétricos. A *Master Library* é sempre o primeiro projeto listado na seção de projetos da Área de Projetos do *Workspace* quando o PSCAD é iniciado. Contém a maioria dos componentes requeridos para

construir os circuitos elétricos. Para abrir a biblioteca de componentes tem que se fazer “duplo clique” em Master Library ou “click direito” e selecionar *Open* para abrir o menu que lista os componentes como se mostra na Figura A2-6.

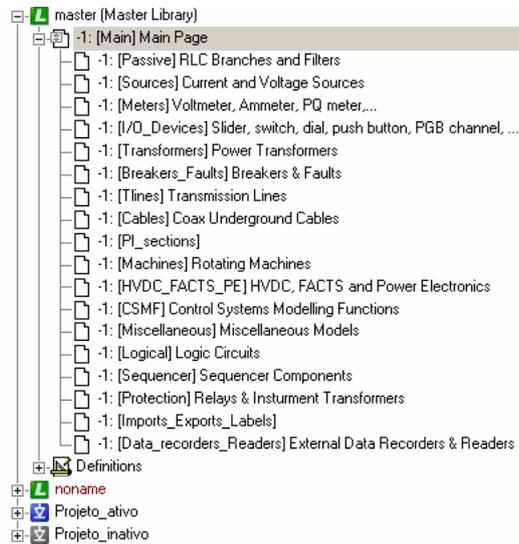


Figura A2-6. Caixa aberta da biblioteca de componentes

5. Funções Básicas

5.1 Criar o projeto

Pode-se criar um novo projeto desde a barra de ferramentas  ou a partir do menu principal “File>New>Case Ctrl+N. (Figura A2-7)

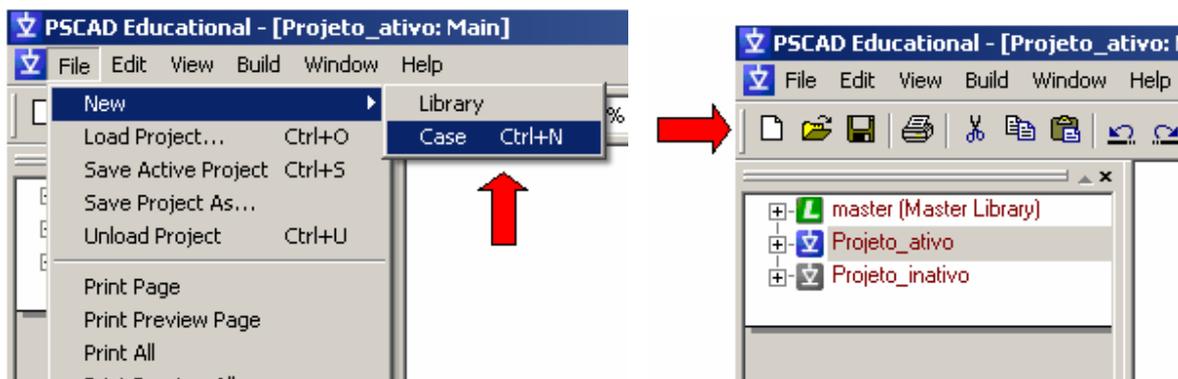


Figura A2-7. Criar um projeto novo

5.2 Guardar o Projeto

Para guardar o projeto criado com um nome diferente se utiliza o comando “Save Project As” ou diretamente desde a barra principal  (Figura A2-8)

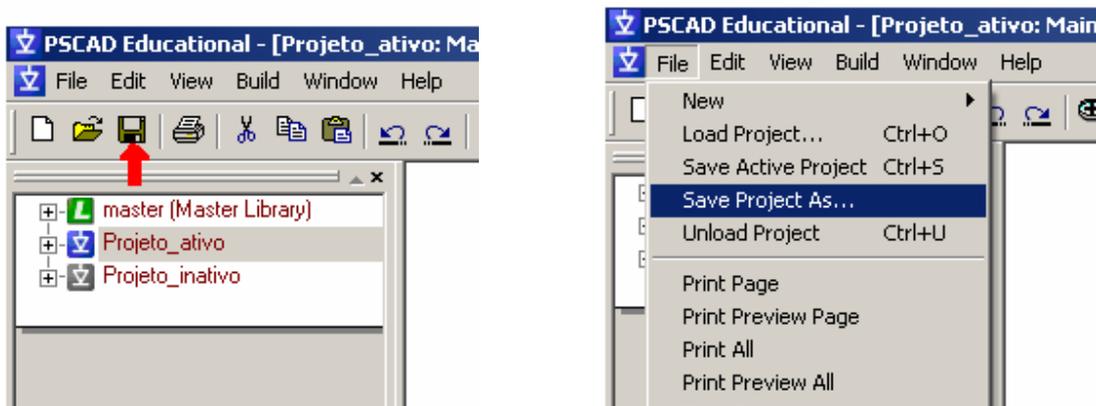


Figura A2-8. Guardar um projeto

5.3 Controle do Projeto

Uma vez criado e guardado o projeto, este deve aparecer na janela de projetos junto com a biblioteca de componentes e outros projetos que tenham sido carregados anteriormente.

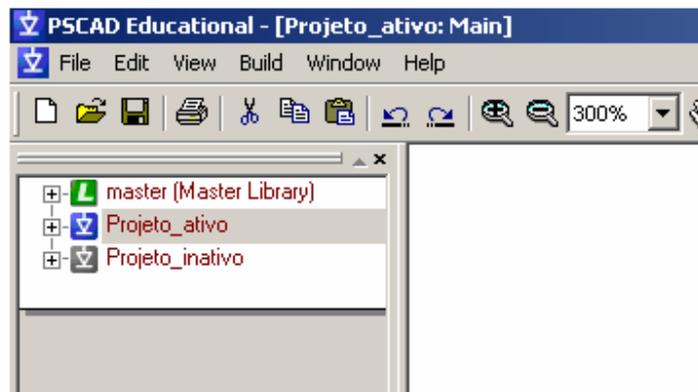


Figura A2-9. Área de projetos

Quando se tem vários projetos carregados, é necessário determinar qual se vai utilizar, ou seja, devemos ativá-lo. O projeto ativo tem o ícone de cor azul , o projeto inativo vai ter o ícone de cor cinza  e a biblioteca principal tem sempre o ícone de cor verde .

Para ativar um projeto devemos apertar o botão direito do mouse sobre o nome do projeto e no menu que surge escolher a opção “Set as Active”. Já com o projeto ativo deve-se selecionar o nome do projeto para ver o esquema associado a ele. (Figura A2-10)

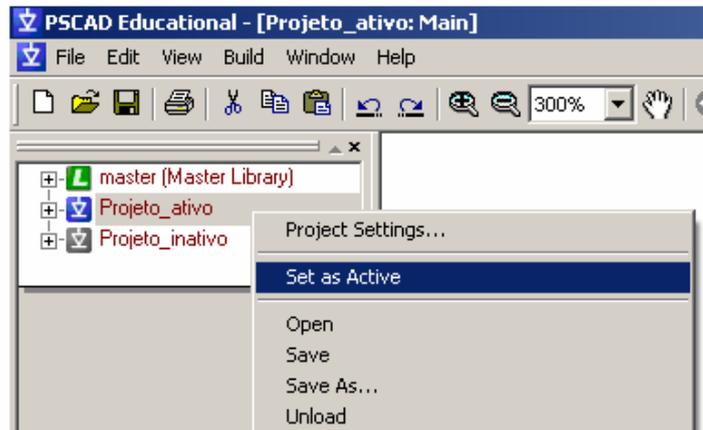


Figura A2-10. Ativação de um projeto

Outros elementos importantes do menu de controle de projetos mostrado na figura anterior são:

- *Project Setting*: Neste elemento se definem os parâmetros de simulação.
- *Open*: Abre um projeto novo.
- *Save*: Guarda o projeto no disco
- *Save as*: Guarda o projeto pondo um nome novo.
- *Unload*: Elimina o projeto da lista de projetos abertos.

6. Projeto Básico de Simulação

Para melhor entender o procedimento, é desenhado um exemplo simples de um circuito de CA com uma fonte de tensão, uma resistência e uma bobina como mostrado na Figura A2-11, cujos parâmetros são:

- Resistência: $R = 1 \Omega$
- Bobina: $L = 0,1 \text{ H}$
- Fonte de tensão:

Valor eficaz da tensão: $E = 230 \text{ V}$

Frequência: 60 Hz

Resistência Interna: $R_g = 0,1 \Omega$

Este esquema será representado no PSCAD e mediante simulação se mostrará a tensão na bobina e a intensidade no circuito.

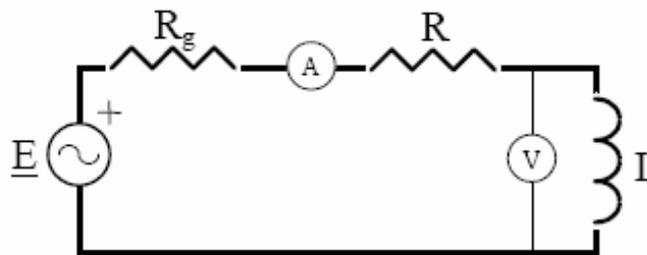


Figura A2-11. Circuito CA a simular

6.1 Localizar o elemento

Selecionando a *Master Library*  aparece na área de desenho os elementos da biblioteca. Na caixa de *Sources* se faz “duplo clique” na fonte de tensão monofásica. Colocando o cursor acima dela fonte se aperta o botão direito do mouse e no menu que surge se escolhe a opção “*Copy*”.

6.2 Situar o elemento na área de desenho

Copiada a fonte de tensão se aperta o botão direito do mouse na da área de desenho de nosso projeto e se cola a fonte mediante o a opção *Paste* como se mostra na Figura A2-12.

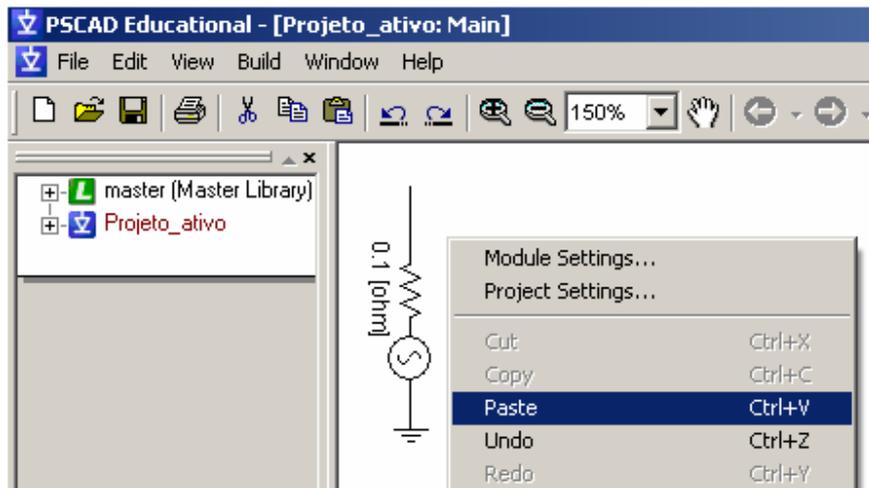


Figura A2-12. Copiando a fonte de tensão

6.3 Parâmetros da fonte de tensão

Fazendo “duplo clique” sobre a fonte de tensão aparecem os parâmetros da mesma, agrupados em categorias (*Configuração*, *Signal Parameters*, *Resistance*, etc) como se mostra na Figura A2-13.

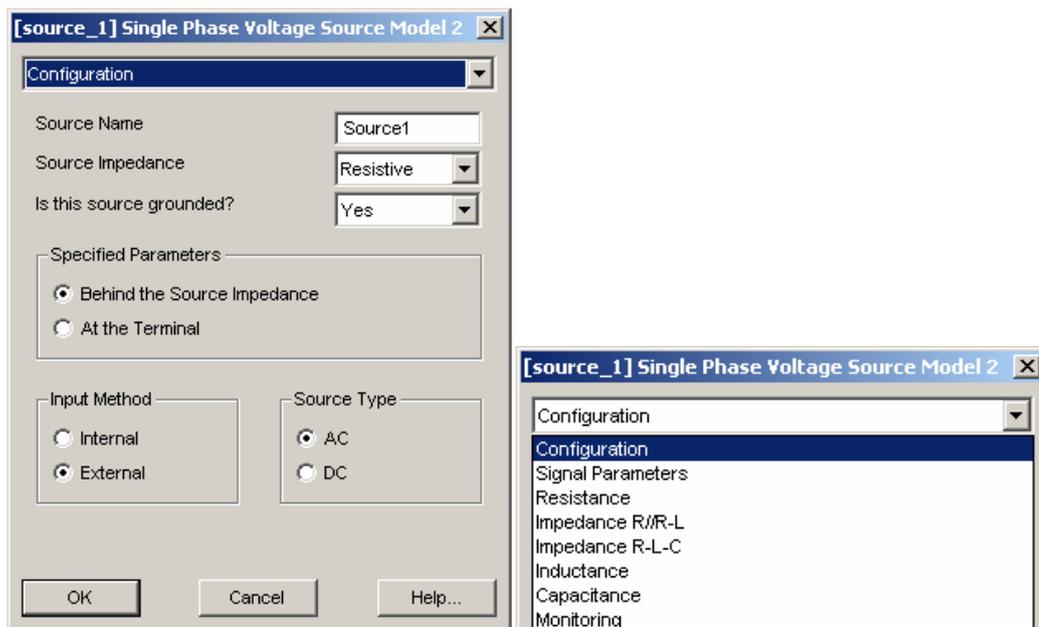


Figura A2-13. Parâmetros da fonte de tensão monofásica

Os parâmetros fornecidos para a fonte de tensão do exemplo serão os seguintes:

Configuration: (Principais parâmetros da fonte)

- *Source Name:* Fonte (Nome da fonte)
- *Source Impedance:* Resistive (Tipo de impedância em série com a fonte)
- *Is this source grounded?* Yes (Indica se a fonte está ou não aterrada)
- *Input Method:* Internal
- *Source Type:* AC

Signal Parameters: (Parâmetros nominais da fonte)

- *Mag.:* 230 kV (Tensão eficaz)
- *Frequency:* 60 Hz
- *Initial Phase:* 0,0 [°]
- *Ramp up Time:* 0,05 [sec] (Tempo de início, a tensão da fonte vale zero ao início e demora 0,05 segundos para alcançar 230 kV).

O EMTDC inicia a simulação com todas as fontes zeradas, diferentemente dos programas da família EMTP que partem da condição de regime da rede. Esta informação corresponde ao tempo necessário para a fonte atingir a tensão plena. No EMTDC é portanto necessário esperar normalmente no mínimo 100 ms para poder começar a efetuar as manobras desejadas sendo que este tempo deve ser ajustado para cada caso.

- *Resistance:* 0,1 [Ω]

Monitoring: (Variáveis de monitorização da fonte)

- *Name for Source Current:* Ia (nome da variável associada à corrente da fonte)

6.4 Parâmetros da resistência e bobina

Para incluir uma resistência  e uma bobina , pode-se selecionar os botões existentes nas paletas de componentes. (Figura A2-14) ou copiar da *Master Library*.

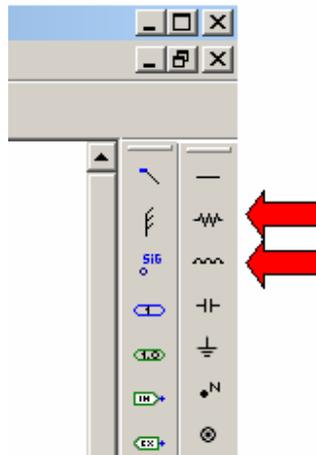


Figura A2-14. Resistência e bobina na paleta de componentes

Fazendo “duplo clique” nos elementos se coloca os valores da resistência a $1,0 \Omega$ e o da bobina a $0,01 \text{ H}$, também se pode girar os elementos apertando o botão esquerdo acima deles e apertando a tecla R.

6.5 Conexão de componentes

Para a conexão elétrica dos distintos componentes se utiliza o elemento *Wire* (cabo) que pode-se encontrar na *Master Library* ou diretamente na paleta de elementos  (Figura A2-15). Os elementos se unem pondo em contato seus extremos, ou bem unindo eles com o elemento *Wire*. É muito importante que o comprimento dos elementos seja exatamente igual à distância que se tem entre os elementos. O comprimento pode ser variado fazendo “click” nos terminais e se gira apertando a tecla R.

No PSCAD o nó de referência (a terra) se denomina *Ground* e se representa como . Muitos dos componentes já são aterrados.

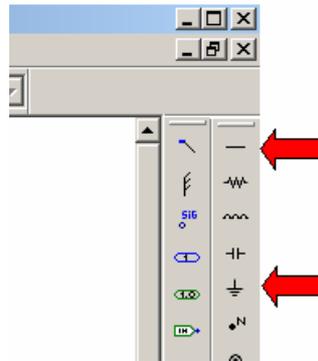


Figura A2-15. Condutor e aterramento na paleta de componentes

No PSCAD os condutores que se cruzam, mas que não fazem contato elétrico podendo ser unidos utilizando o elemento “pin” da paleta de controles. (Figura A2-16)

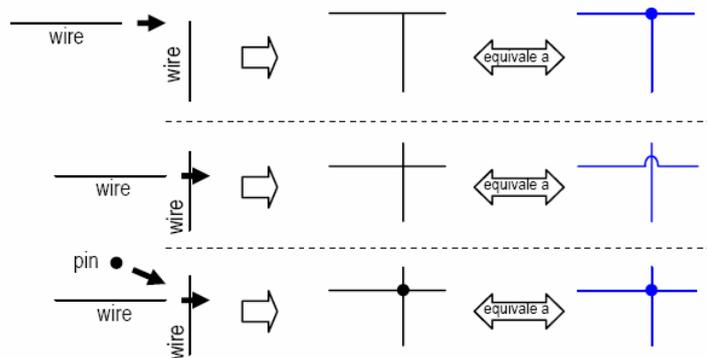


Figura A2-16. Tipos de uniões de condutores elétricos

6.7 Localização de medidores

No exemplo vamos a colocar um voltímetro entre um dos extremos da bobina e a terra para medir a tensão nesse elemento. Para isto se escolhe o voltímetro da paleta de elementos



(Figura A2-17), ou da caixa de *Meters* na *Master Library*.

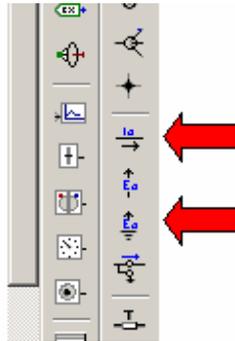


Figura A2-17. Medidores na paleta de componentes elétricos

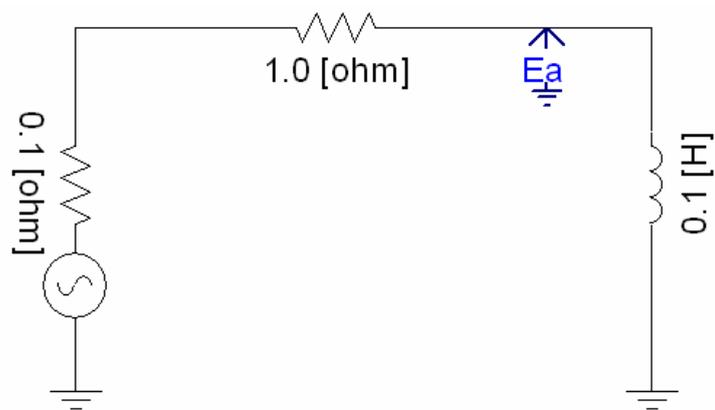


Figura A2-18. Circuito representado no PSCAD

7. Gráficos

Estando já representado o circuito e localizados os medidores nas variáveis que se precisa medir, pode-se proceder à implementação dos elementos que permitam obter os gráficos das variáveis desejadas. No exemplo temos duas variáveis, a tensão na bobina “Ea” e a intensidade da corrente na fonte “Ia”. (Figura A2-18)

7.1 Variáveis a representar

Escolhe-se na paleta de controle (ou na *Master Library*) o elemento *Data Label*  e o elemento *Output Channel*  unindo eles mediante o elemento *Wire*  (Figura 19).

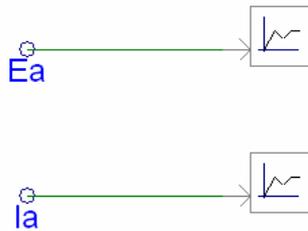


Figura A2-19 . Variáveis a representar

No elemento *Data Label* se dá o nome da variável a representar fazendo “duplo clique” nele, e no elemento *Output Channel* se indicam o título, unidades, fator de escala etc. No exemplo se representa as variáveis *Ea* e *Ia* respectivamente como Tensão Bobina e Corrente Fonte. (Figura A2-20)

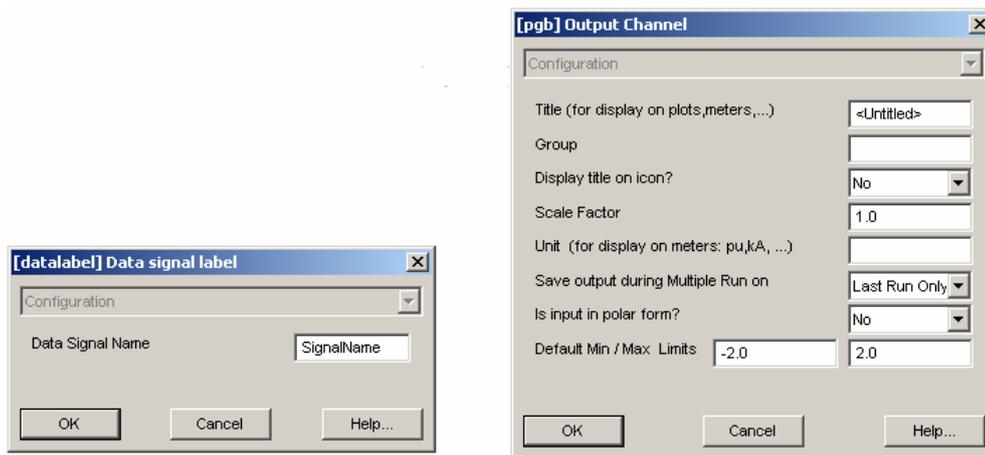


Figura A2-20. Configuração de *Data Label* e *Output Channel*

7.2 Localizar o quadro do gráfico

Uma vez realizada a simulação, as variáveis serão representadas em um gráfico (Graph Frame)  que é preciso configurar. Com esta finalidade se escolhe da paleta (ou da *Master Library*) o ícone *Graph Frame*  e coloca-se na área de desenho. A janela que aparece pode ter seu tamanho ajustado fazendo “click” e arrastando os quadros verdes que a rodeiam. (Figura A2-21)

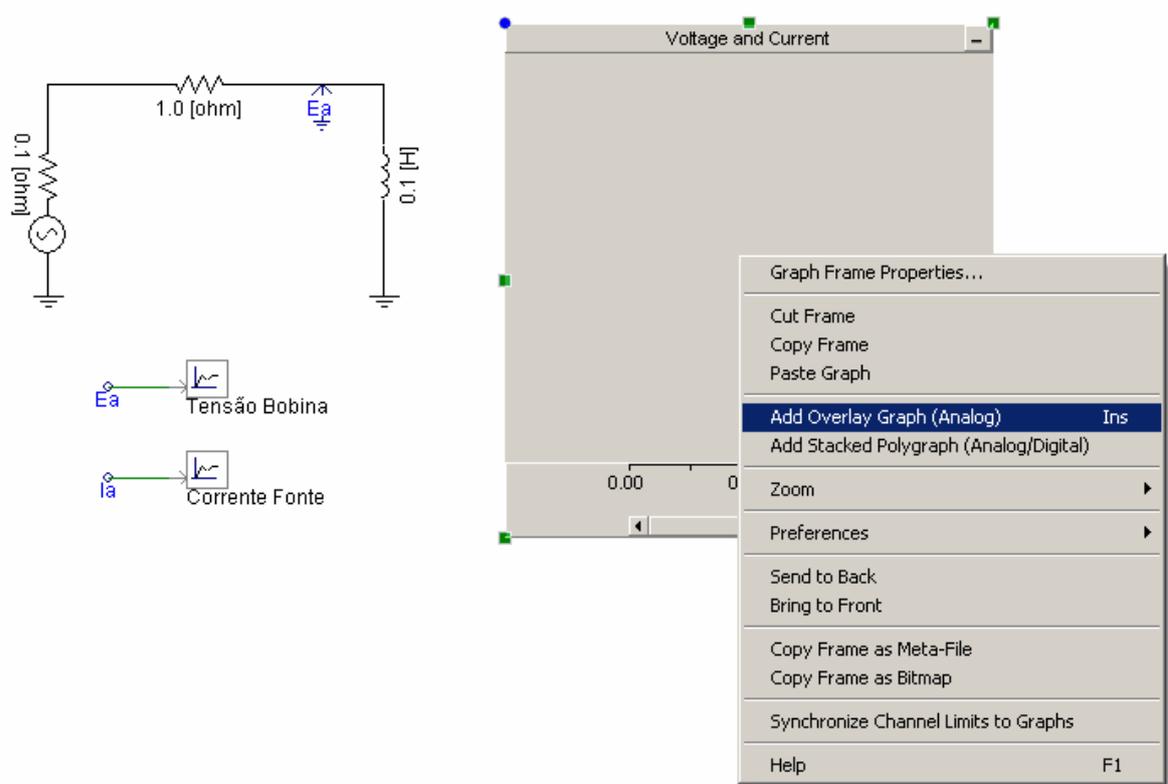


Figura A2-21. Menu de configuração do quadro de gráfico

Apertando o botão direito do mouse na barra do título do quadro criado, aparece um menu de configuração. Seleciona-se *Add Analog Graph* de forma que se cria um gráfico de representação. Pode-se criar vários gráficos ao se repetir este processo. (Figura A2-22)

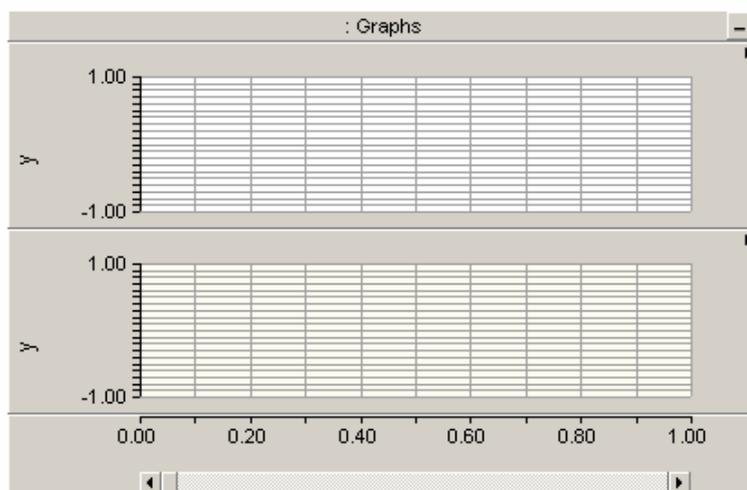


Figura A2-22. Quadro de gráficos criado

7.3 Incluir nos gráficos as variáveis a representar

Para enviar variáveis aos gráficos criados se aperta o botão direito do mouse no *Output Channel* denominado Tensão Bobina. Aparece o menu mostrado na Figura A2-23 e se escolhe “Add As Curve”.

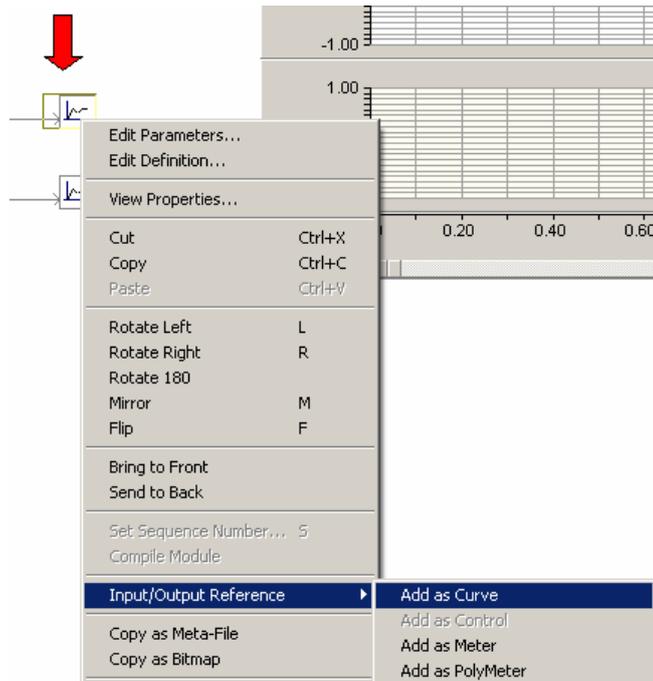


Figura A2-23. Menu de configuração de *Output Channel*

Seguidamente se aperta o botão direito do mouse em um dos gráficos e se seleciona *Paste Curve*. Repete-se o processo com o outro *Output Channel* denominado “Corrente Fonte” para se obter os quadros respectivos. (Figura A2-24)

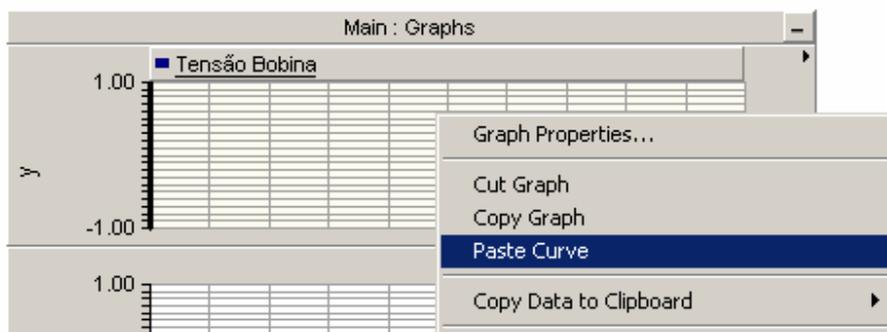


Figura A2-24. Menu de configuração da gráfica

8. Simulação

Nesta seção se definem os passos necessários para a simulação do circuito e visualização dos resultados.

8.1 Parâmetros de simulação

Fazendo “click direito” no nome do projeto, aparece o menu de configuração de projetos. Nesse menu se escolhe a opção *Project Settings*, que dá lugar à janela da Figura A2-25. Nesta janela os parâmetros mais importantes são:

- *File*: Nome do projeto
- *Description*: Descrição do projeto (texto)
- *Duration of run*: Tempo de simulação para o circuito, (no exemplo será de 0,5 s).
- *EMTDC time step* (μs): É o passo de integração.
- *PSCAD plot step* (μs): É o tempo que tem entre dois valores consecutivos representados nos gráficos, tem que ser igual ou maior que o valor anterior.
-

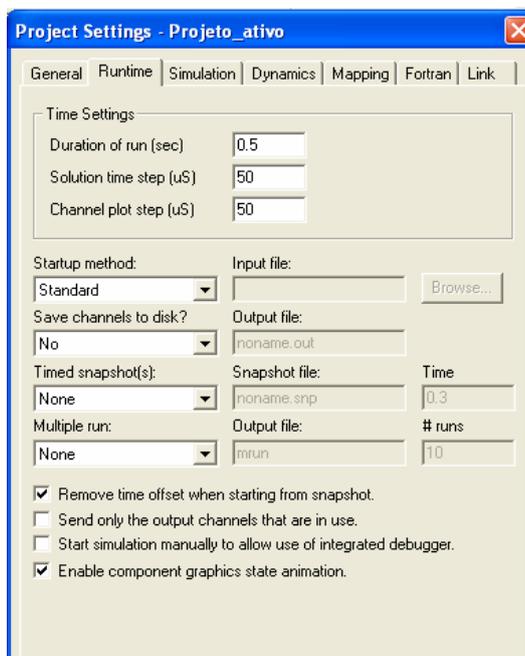


Figura A2-25. Parâmetros de simulação

8.2 Simulação

Uma vez configurada a simulação se pressiona o botão de início de simulação *Run*  da barra de ferramentas ou desde o menu *Build*> *Run*. O PSCAD começa a compilar o projeto e isto é representado pelo movimento das engrenagens  da parte inferior direita da tela.

8.3 Possíveis erros na simulação

Se ao ser iniciada a simulação não aparece resultado nenhum ou aparece uma mensagem de erro, tem que se ir à Janela de Saída (Figura A2-26) e conferir os erros do circuito. Ao fazer “duplo clique” no erro se mostra no circuito elétrico em que lugar do circuito está o erro marcando este com uma caixa de mensagem.

No exemplo o erro que aparece é “*Branch is a short*” e ao fazer “duplo clique” nele aparece uma caixa rosa no esquema que indica foi utilizada uma conexão muito longa. Logo de corrigir o erro se pressiona novamente *Run*.

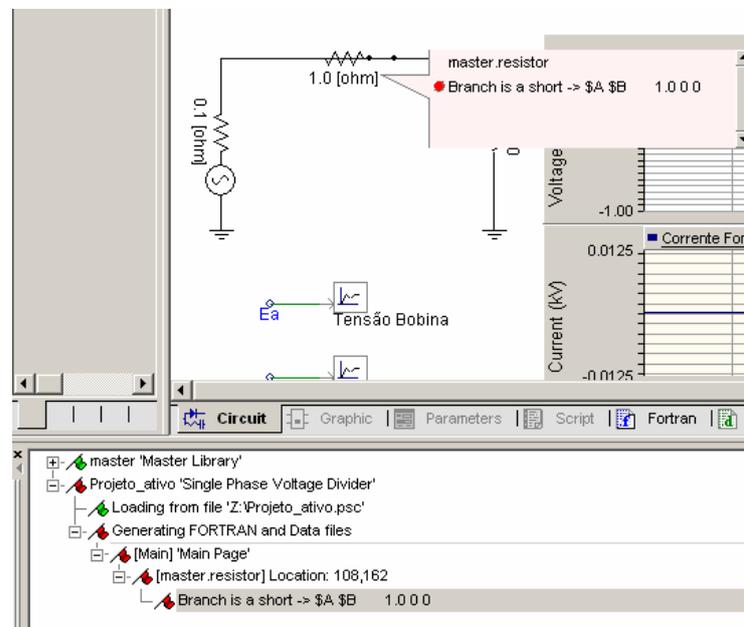


Figura A2-26. Visualização de erros na janela de saída

8.4 Resultados

Finalizada a simulação pode se observar nos quadros criados o gráfico da evolução das variáveis desejadas. (Figura A2-27)

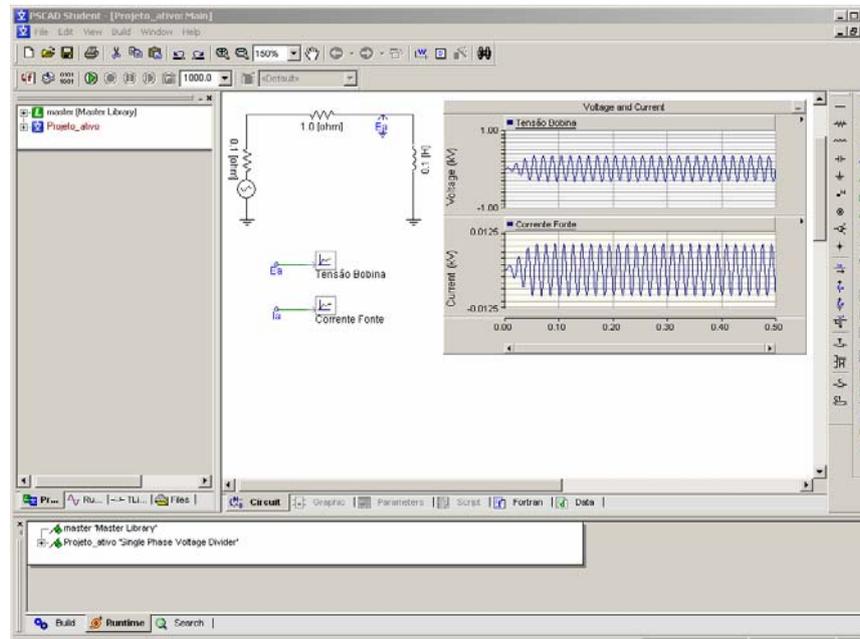


Figura A2-27. Resultados da simulação

9. Linha de Transmissão

Nesta seção se definem os passos a seguir para a simulação de uma linha de transmissão.

9.1 Interface da Linha de Transmissão

Este componente serve como uma conexão de linha de transmissão com o resto da rede. Para inserir o componente da interface da linha de transmissão em um novo circuito deve-se apertar o botão direito do mouse na área de desenho > *Add Component* > *TLine* > *Interface*. (Figura A2-28)

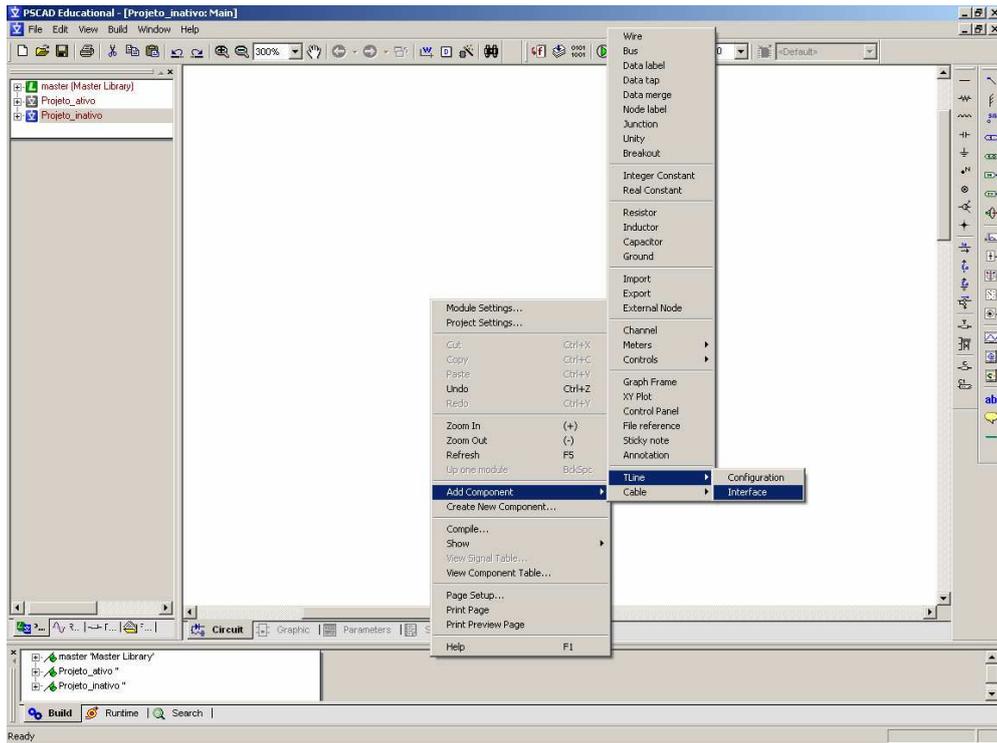


Figura A2-28. Criando a Interface da Linha de Transmissão

Fazendo “duplo clique” no elemento criado pode-se inserir o nome da linha, o número de condutores e a forma de apresentação na tela. O nome inserido para a interface deve ser único no circuito.

Para completar a interface deve-se copiar o componente criado para o outro terminal da linha, para isto pode-se copiar o mesmo elemento e girar ele apertando o botão direito do mouse nele e escolhendo a função *Mirror*. (Figura A2-29)



Figura A2-29. Interface nos terminais da linha

9.2 Configuração da Linha de Transmissão

O elemento para configuração da linha de transmissão se insere no projeto com o mesmo procedimento que para a interface, isto é, apertando o botão direito do mouse na área de desenho > *Add Component* > *TLine* > *Configuration*. Uma vez criado o elemento de configuração, fazendo “duplo clique” no elemento se insere o mesmo nome que no processo para incluir o elemento da interface, informando o comprimento da linha, a frequência e o número de condutores. (Figura A2-30)

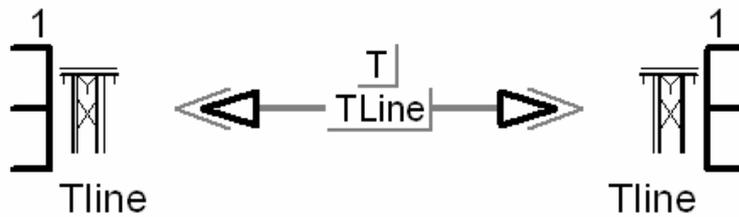


Figura A2-30. Elementos de interface e configuração criados

9.3 Edição da Configuração da Linha de Transmissão

Para editar a configuração da Linha de Transmissão deve-se fazer “duplo clique” no componente de configuração e logo fazer “clique” em *Edit*. (Figura A2-31)

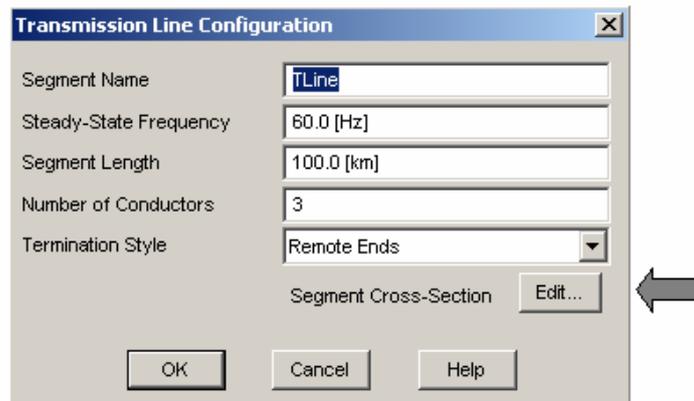


Figura A2-31. Edição da configuração da Linha de Transmissão

Ao editar o elemento de configuração da linha de transmissão, o PSCAD apresenta por padrão (default) a tela da Figura A2-32. Nesta tela podem se observar os dados inseridos com o elemento da interface, o modelo de linha de transmissão e os dados do aterramento que podem ser mudados fazendo “duplo clique” neles.

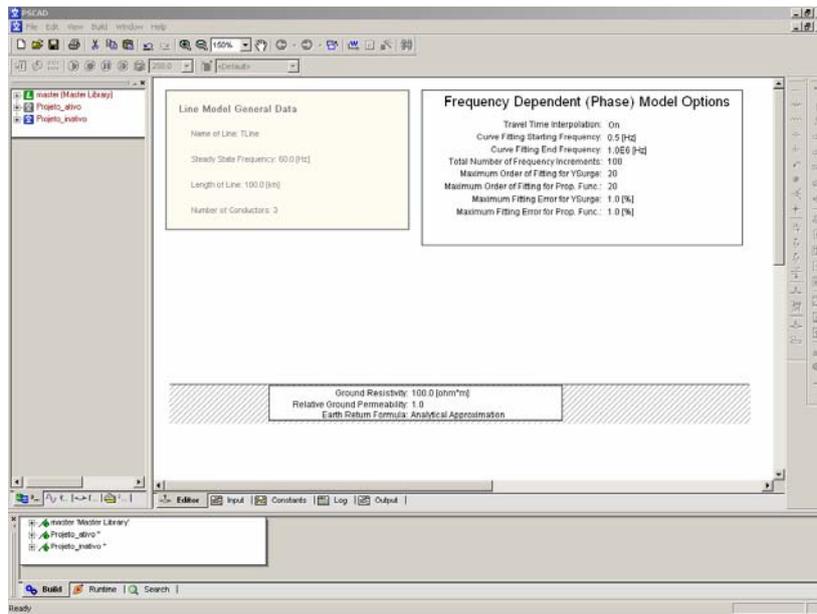


Figura A2-32. Tela de configuração da linha de transmissão

9.5 O modelo de Linha de Transmissão

Em caso de se precisar trabalhar com outro modelo de linha de transmissão, pode-se escolhê-lo na caixa *Transmission Line* da *Master Library*, onde se encontram disponíveis os três modelos do PSCAD (Figura A2-33), para isto deve-se apertar o botão direito do mouse no quadro com o modelo desejado, copiar e colar na configuração do *TLine* criado.

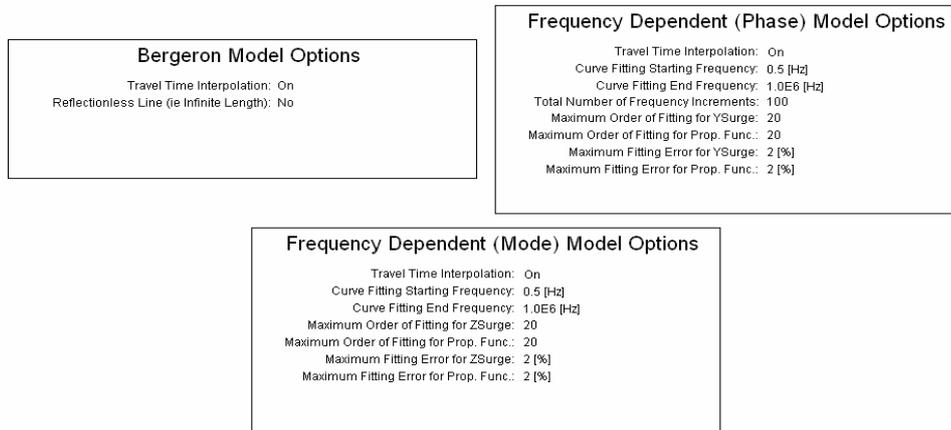


Figura A2-33. Modelos de linha de transmissão disponíveis no PSCAD

9.6 Entrada de dados

Para entrar os dados correspondentes à torre e aos condutores é preciso primeiro seleccionar o tipo de torre. Para isto se pressiona o botão direito do mouse na tela de configuração > *Add Tower* > Seleccionar o tipo de torre desejado. (Figura A2-34). Fazendo “duplo clique” na torre criada (Figura A2-35) pode-se inserir os dados dos cabos de fase, os dados do cabo pára-raios e os dados de geometria de torre.

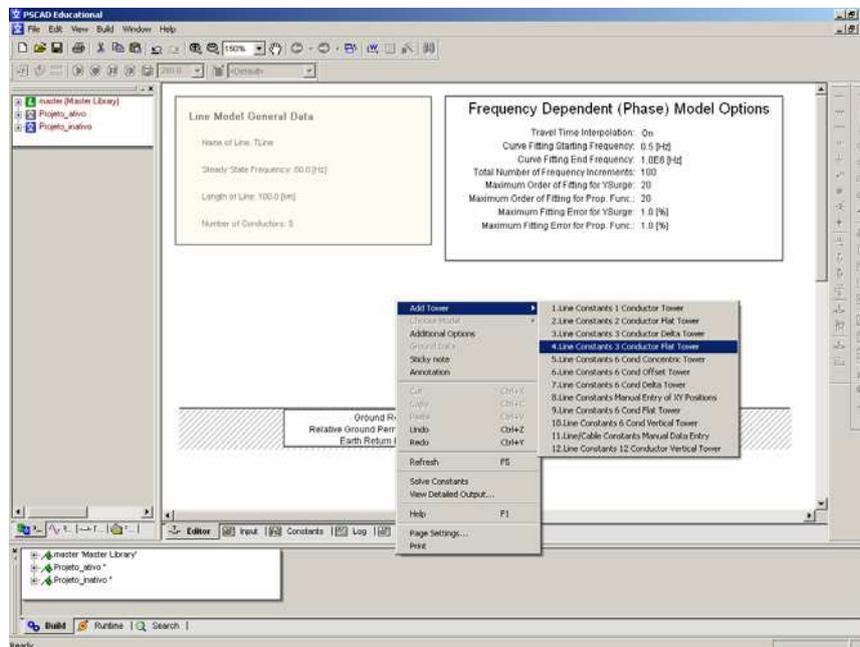


Figura A2-34. Incluído o tipo de torre

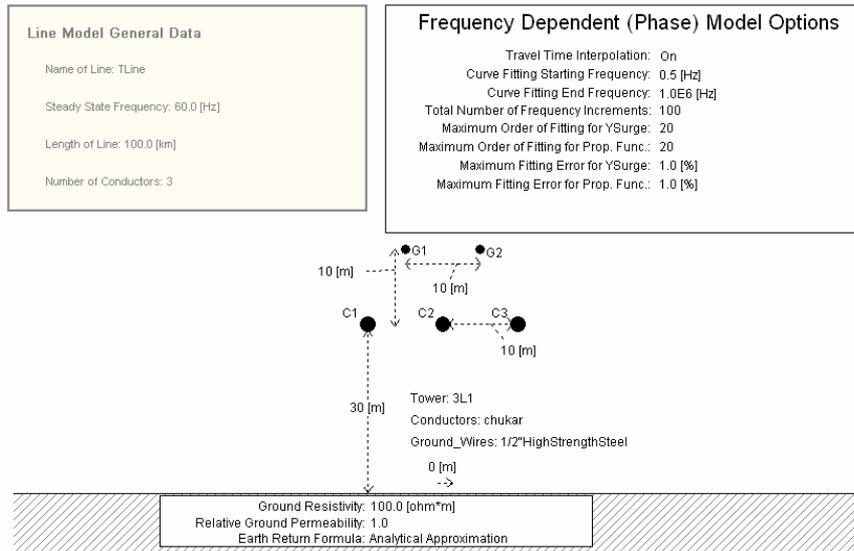


Figura A2-35. Modelo da torre selecionada

ANEXO 3

DADOS E SIMULAÇÕES UTILIZANDO PÁRA-RAIOS DE CAMPO

Neste Anexo são apresentados os dados e as simulações realizadas utilizando pára-raios de tensão nominal 420 kV de campo. As Tabelas A3-1 e A3-2 apresentam as características de tensão residual máxima e mínima, respectivamente.

Tabela A3-1. Curva dos pára-raios de Tensão Nominal de 420 kV. Característica máxima

Característica Máxima	
Corrente [kA]	Tensão [kV]
0,001	643,72
0,01	681,23
0,05	721,27
0,1	738,70
0,2	756,14
0,4	775,75
0,7	793,18
1	806,26
2	830,23
5	873,81

Tabela A3-2. Curva dos pára-raios de Tensão Nominal 420 kV. Característica mínima

Característica Mínima	
Corrente [kA]	Tensão [kV]
0,01	641,22
0,25	718,48
0,5	736,49
1	760,86
2	787,34
3	801,14

As Tabelas A3-3 e A3-4 apresentam as características máxima e mínima dos pára-raios de tensão nominal 72 kV localizados junto aos reatores de neutro.

Tabela A3-4. Curva dos pára-raios de 72 kV: Característica máxima.

Característica Máxima	
Corrente [kA]	Tensão [kV]
0,01	130,92
0,05	146,69
0,1	149,10
0,2	151,50
0,4	155,34
0,7	159,68
1	163,03
2	171,22
4	181,34

Tabela A3-3 Curva dos pára-raios de 72 kV: Característica mínima.

Característica Mínima	
Corrente [kA]	Tensão [kV]
0,01	121,31
0,143	135,92
0,239	138,90
0,485	143,46
1,02	149,87
1,95	156,72
3,03	162,65

Tabela A3-5. Tabela com os valores limites de absorção de energia dos pára-raios

Tensão Nominal [kV]	Valor para um único impulso [MJ]	Capacidade térmica segundo norma IEC99-4/91 [MJ]	Capacidade térmica segundo dados do fabricante [MJ]
420	4,83	7,56	8,06
72	0,187	0,36	0,36

Foram simuladas as seguintes situações: Sem pára-raios para limitar as sobretensões, pára-raios localizados nos terminais da linha, pára-raios localizados nos terminais e no meio da linha e pára-raios localizados nos terminais e em dois pontos intermediários.

Para a LT com 91 % de compensação reativa, a Figura A3-1 mostra o perfil de tensão utilizando a característica máxima de tensão dos pára-raios para sua modelagem. Já a Figura A3-2 apresenta o perfil de tensão utilizando a característica mínima.

Para a LT com 75 % de compensação reativa, a Figura A3-3 e a Figura A3-4 mostram os perfis de tensão utilizando as características máxima e mínima de tensão dos pára-raios, respectivamente.

Linha de transmissão com 91 % de compensação reativa em derivação.

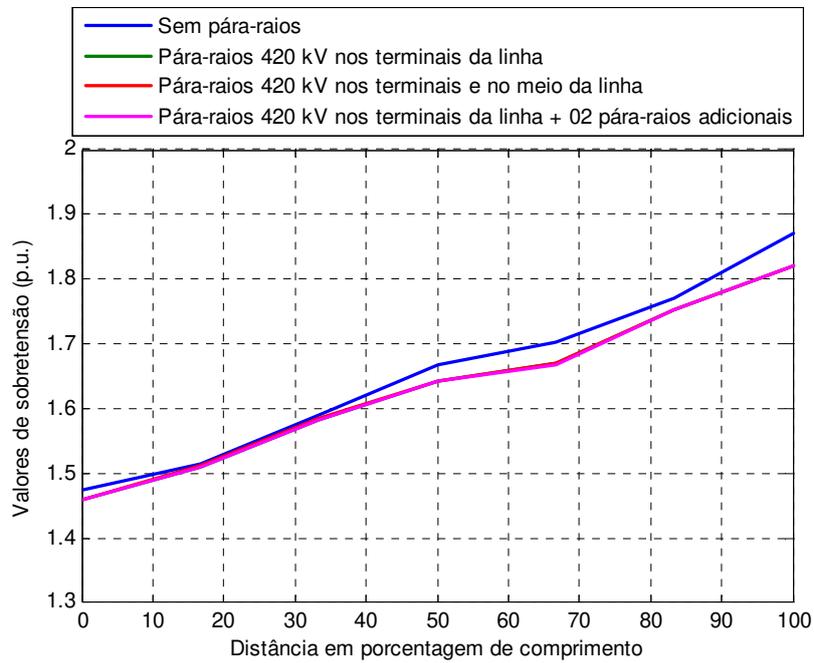


Figura A3-1. Perfil de tensão. – Pára-raios de tensão nominal 420 kV. Característica Máxima

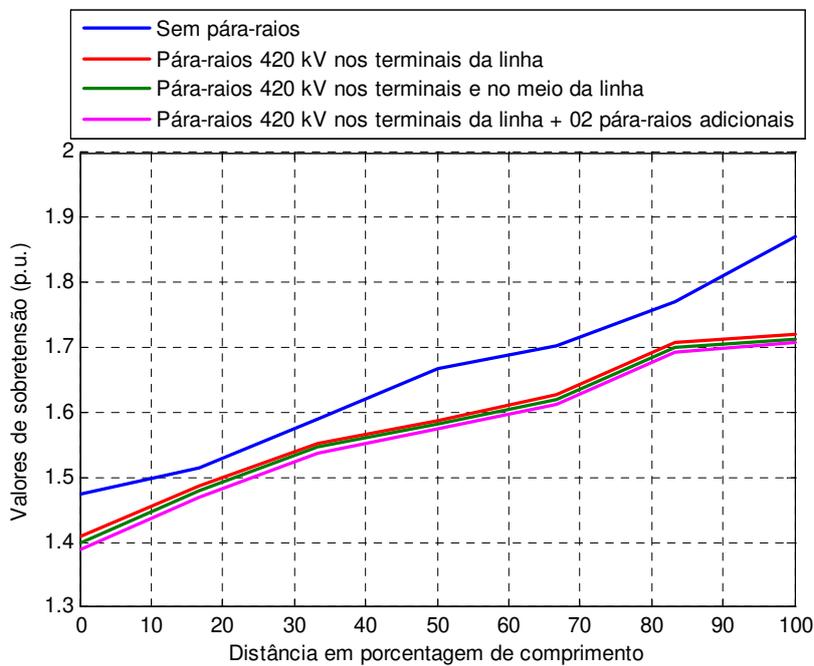


Figura A3-2. Perfil de tensão. – Pára-raios de tensão nominal 420 kV. Característica Mínima.

Linha de transmissão com 75 % de compensação reativa em derivação.

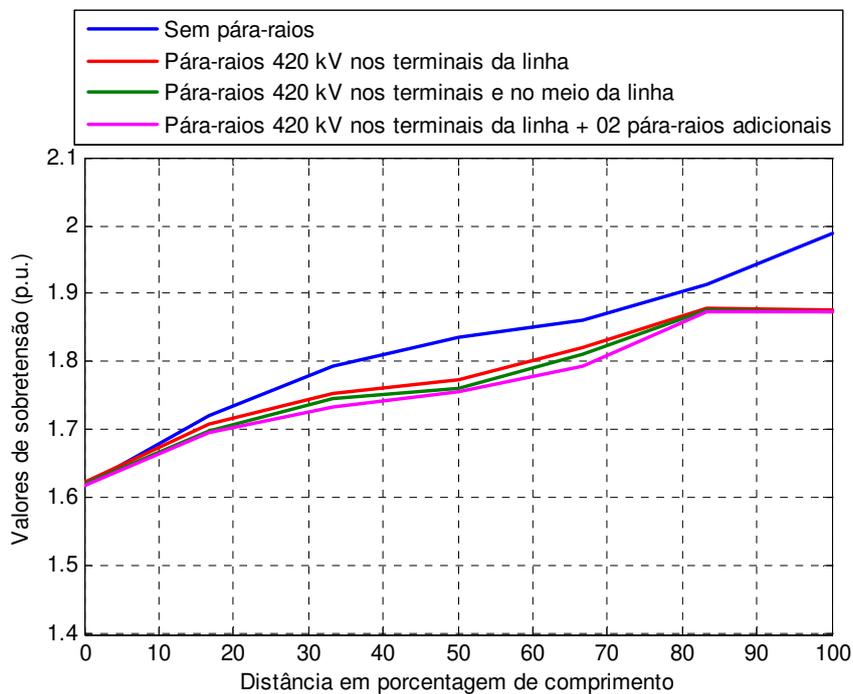


Figura A3-3. Perfil de tensão. – Para-raios de tensão nominal 420 kV. Característica Máxima.

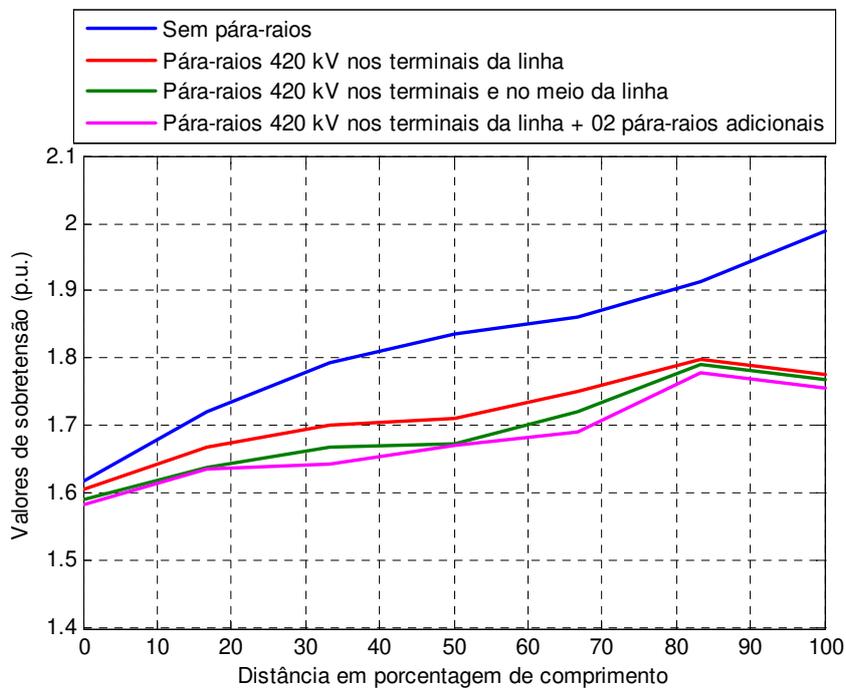


Figura A3-4. Perfil de tensão. – Para-raios de tensão nominal 420 kV. Característica Mínima.

ANEXO 4

SIMULAÇÕES REALIZADAS UTILIZANDO RESISTOR DE PRÉ-INSERÇÃO DE 211 Ω

Normalmente o valor do resistor de pré-inserção é especificado próximo ao valor da impedância característica da linha. No presente trabalho por se estar usando uma linha real como exemplo foi utilizado o valor do resistor existente no campo (400 Ω). Para complementar o estudo foram incluídas neste anexo algumas simulações com o resistor de pré-inserção de 211 Ω que é o valor da impedância característica. As figuras A4-1 e A4-2 mostram o perfil de tensão durante a manobra de energização, onde a sobretensão no terminal remoto alcançou valores de 1,39 pu e 1,65 pu para a linha com compensação em derivação de 91 % e de 75 %, respectivamente, não variando muito dos resultados encontrados com o resistor de campo (1,37 pu e 1,64 pu).

A figura A4-3 mostra o perfil de tensão da manobra de religamento trifásico. As sobretensões no terminal remoto alcançaram valores de 1,67 pu e 1,75 pu pra a linha com compensação em derivação de 91 % e 75 %, respectivamente. Neste caso também os resultados com o resistor de campo foram semelhantes (1,66 pu e 1,70 pu).

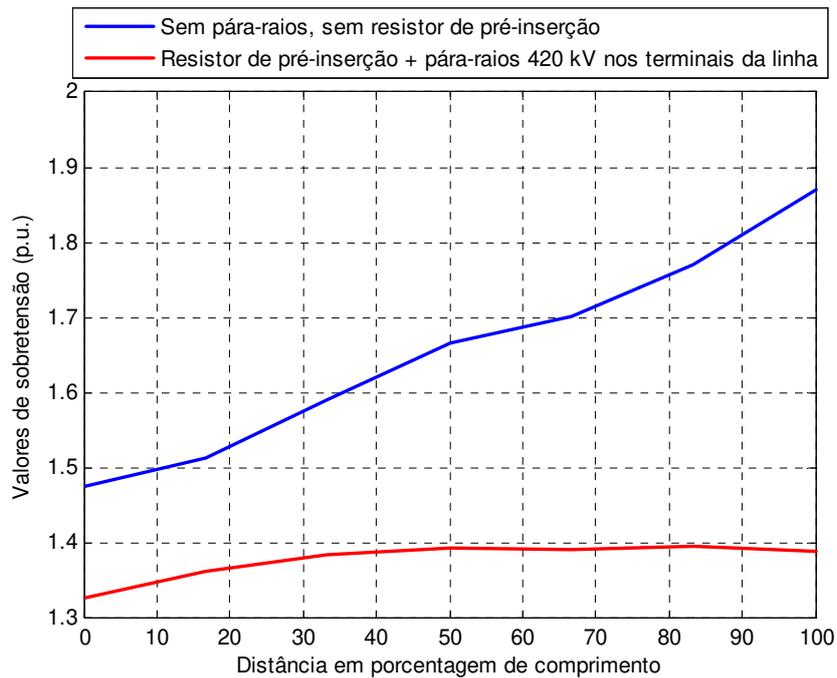


Figura A4-1. Perfil de tensão. Energização da linha com resistor de pré-inserção de 211 Ω 91 % de compensação em derivação

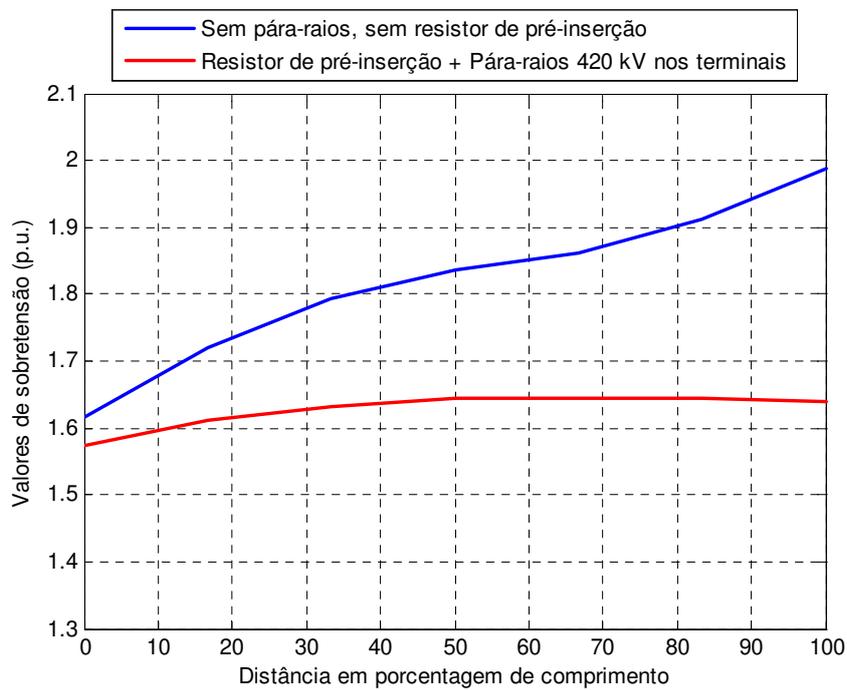


Figura A4-2. Perfil de tensão. Energização da linha com resistor de pré-inserção de 211 Ω 75 % de compensação em derivação

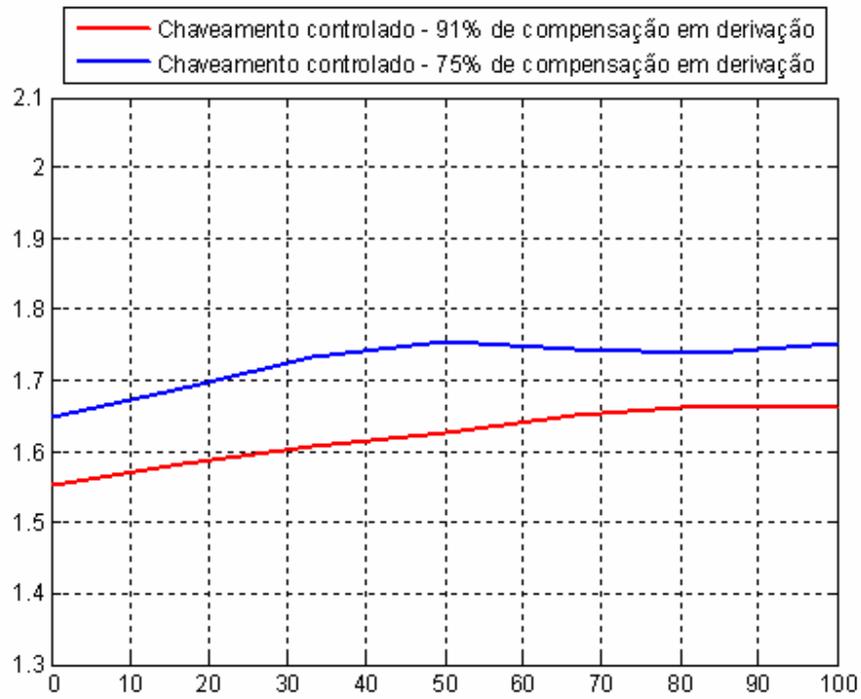


Figura A4-3. Perfil de tensão. Religamento da linha com resistor de pré-inserção de 211 Ω . 91 % e 75 % de compensação em derivação