

Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação
Departamento de Sistemas de Controle de Energia

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE UMA LINHA DE UM
POUCO MAIS DE MEIO COMPRIMENTO DE ONDA SOB
DIFERENTES CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO EM REGIME
PERMANENTE E DURANTE A MANOBRA DE ENERGIZAÇÃO**

Autor: Rodrigo Fernandes Vidigal

Orientador: Prof. Dra. Maria Cristina Dias Tavares

Trabalho apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da UNICAMP como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Comissão Examinadora:

Prof. Dra. Maria Cristina Dias Tavares – FEEC/UNICAMP

Prof. Dr. Luiz Carlos Pereira da Silva – FEEC/UNICAMP

Prof. Dr. Carlos Manuel de Jesus Cruz de Medeiros Portela – COPPE/UFRJ

Campinas, SP, Brasil

Agosto de 2010

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

V668a Vidigal, Rodrigo Fernandes
Análise do comportamento de uma linha de um pouco mais de meio comprimento de onda sob diferentes condições de operação em regime permanente e durante a manobra de energização / Rodrigo Fernandes Vidigal. - Campinas, SP: [s.n.], 2010.

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

1. Energia elétrica - Transmissão. I. Tavares, Maria Cristina Dias. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Título em Inglês: Analysis of the behavior of an isolated transmission line with a little more than half wave length for different operating conditions in steady state and during the energization manouver

Palavras-chave em Inglês: Electricity - Transmission

Área de concentração: Energia Elétrica

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: Luis Carlos Pereira da Silva, Carlos Manuel de Jesus Cruz de Medeiros Portela

Data da defesa: 20/08/2010

Programa de Pós Graduação: Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO

Candidato: Rodrigo Fernandes Vidigal

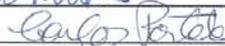
Data da Defesa: 20 de agosto de 2010

Título da Tese: "Análise do Comportamento de uma Linha de um Pouco Mais de Meio Comprimento de Onda sob Diferentes Condições de Operação em Regime Permanente e Durante a Manobra de Energização"

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



Prof. Dr. Carlos Manuel de Jesus Cruz de Medeiros Portela:



Prof. Dr. Luiz Carlos Pereira da Silva:



AGRADECIMENTOS

Agradeço, sobretudo, a Deus pela minha vida.

Dedico meus profundos agradecimentos ao meu Pai e minha Mãe que com amor e renúncia, superaram desafios para me presentear com a riqueza do estudo e sempre me incentivaram a prosseguir com humildade.

À Marina pelo carinho, companheirismo e compreensão.

À minha irmã Patrícia, pelo apoio e carinho.

Aos familiares, à "Vó Bia" e aos saudosos avós (presentes em minha memória).

Aos amigos que sempre me apoiaram e ajudaram a encarar a distância da família.

Dedico sinceros agradecimentos à professora Maria Cristina Dias Tavares pela oportunidade, orientação, apoio, confiança e amizade.

Aos colegas do laboratório pelas discussões produtivas que só enriqueceram este trabalho.

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

Dedico este trabalho à minha
mãe, Maria Imaculada; ao meu
pai, José Antônio.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise do comportamento de uma linha de transmissão isolada de um pouco mais de meio comprimento de onda (2600 km) na frequência fundamental, 60 Hz, alimentada a partir de uma barra infinita para diferentes condições de operação. Os perfis de tensão e de corrente, para diferentes condições de carregamento, são monitorados ao longo da linha. Uma análise do fator de potência da potência injetada no terminal emissor também é realizada e sua influência nos perfis de tensão e de corrente é verificada. As perdas ao longo da linha para diferentes níveis de potência transmitida são medidas e uma alternativa para minimização dessas perdas é apresentada.

Uma metodologia de análise sistemática na frequência fundamental de um sistema elétrico de potência identificando as condições críticas é também apresentada. A presente metodologia é aplicada em um sistema formado por linhas de transmissão de 500 kV existentes no sistema elétrico brasileiro, as quais são interligadas formando um tronco de 2600 km com a finalidade de representar uma linha de transmissão de um pouco mais de meio comprimento de onda. As análises feitas nesse trabalho consistem na verificação do comportamento do sistema na presença de diferentes tipos de curtos-circuitos em diferentes pontos da linha. Após a análise sistemática em regime permanente, as condições extremas podem ser simuladas em um programa de transitórios eletromagnéticos. Deste modo o comportamento da linha isolada alimentada a partir de uma barra infinita na presença de diferentes tipos de curtos-circuitos é discutido e os principais resultados são apresentados nesse trabalho.

O tronco de 2600 km formado por linhas de 500 kV existentes no Brasil foi utilizado para simular a manobra de energização. As simulações incluíram diferentes técnicas de energização como o fechamento direto das fases, a utilização de um resistor de pré-inserção e o chaveamento controlado. Para cada alternativa de chaveamento foram analisadas as sobretensões transitórias e o perfil de tensão ao longo da linha. As simulações foram feitas utilizando-se os softwares ATP e PSCAD/EMTDC.

ABSTRACT

This work presents an analysis of the behavior of an isolated transmission line with a little more than half-wave length (2600 km) on fundamental frequency, 60 Hz, connected to an infinite busbar for different operating conditions. The voltage and current profiles for different loading conditions are monitored along the line. An analysis of the influence of the power factor of the transmitted energy on the voltage and current profiles along the line is performed. The losses along the line for different levels of transmitted power are measured and a method to minimize these losses is presented.

A systematic review methodology in the fundamental frequency of a power system identifying the critical conditions is also presented. This methodology is applied to a system formed by 500 kV existing transmission lines in the Brazilian electrical system, which are interconnected forming an AC-link of 2600 km in order to represent a transmission line of a little more than half-wave length. The analysis made in this paper means to verify the system behavior in the presence of different types of short circuits at different points along the line. After systematic analysis in steady state, the extreme conditions can be simulated in an electromagnetic transient program. Thus the behavior of the isolated line connected to an infinite busbar in the presence of different types of short circuits is discussed and the main results are presented in this paper.

The 2600 km AC-link formed by actual Brazilian 500 kV lines was used to simulate the trunk energization. The simulations included different techniques such as direct closure energization, the use of a pre-insertion resistor and the controlled switching. For each alternative it was analyzed the transient overvoltage profile along the line. The simulations were done with the software ATP and PSCAD / EMTDC.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	V
RESUMO.....	IX
ABSTRACT	XI
SUMÁRIO.....	XIII
LISTA DE FIGURAS.....	XVII
LISTA DE TABELAS.....	XXIII
CAPÍTULO 1	1
INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO	1
1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	4
1.3 PUBLICAÇÕES	5
CAPÍTULO 2	7
ESTADO DA ARTE DA TRANSMISSÃO EM MEIO COMPRIMENTO DE ONDA	7
2.1 TRANSMISSÃO EM MEIO COMPRIMENTO DE ONDA NO MUNDO	7
2.2 TRANSMISSÃO EM MEIO COMPRIMENTO DE ONDA NO BRASIL	11
CAPÍTULO 3	15
CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTAIS DA TRANSMISSÃO EM UM POUCO MAIS DE MEIO COMPRIMENTO DE ONDA.....	15
3.1 REPRESENTAÇÃO DA LINHA DE TRANSMISSÃO COM BASE NO MODELO DE PARÂMETROS DISTRIBUÍDOS. ...	16
3.2 CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DAS LINHAS DE MEIO COMPRIMENTO DE ONDA.	22
3.2.1 <i>Linha Operando em Vazio</i>	22
3.2.2 <i>Tensão e Corrente no Meio da Linha</i>	23
3.2.3 <i>Estabilidade</i>	24
3.3 DESCRIÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO ANALISADO.	25
3.4 REGIME PERMANENTE PARA DIFERENTES CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO	26
3.4.1 <i>Perfil de Tensão e Corrente para Diferentes Carregamentos com Fator de Potência Unitário</i>	27
3.4.2 <i>Perfil de Tensão e Corrente para Diferentes Carregamentos com Variação do Fator de Potência</i>	28
3.4.3 <i>Perda Ativa</i>	33

3.5 CONCLUSÕES PARCIAIS.....	36
CAPÍTULO 4.....	37
METODOLOGIA OTIMIZADA PARA ESTUDO DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS EM UM SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA.....	37
4.1 CONSTANTES GENERALIZADAS DE UM CIRCUITO	38
4.2 REPRESENTAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO.	41
4.2.1 Modelo representativo dos estados de um disjuntor em regime permanente.....	41
4.2.2 Modelo representativo de uma linha de transmissão longa na operação em regime permanente.....	42
4.2.3 Modelo representativo de faltas envolvendo a terra em regime permanente.....	45
4.2.4 Modelo representativo para falta bifásica (A-B) em regime permanente.....	47
4.2.5 Modelo representativo para falta trifásica (A-B-C) em regime permanente.....	48
4.2.6 Cálculo das Tensões e Correntes ao Longo do Circuito.....	49
4.3 DESCRIÇÃO DO SISTEMA.....	51
4.4 DETERMINAÇÃO DA IMPEDÂNCIA LONGITUDINAL DO SISTEMA.....	53
4.5 ANÁLISE DE CURTO-CIRCUITO AO LONGO DO SISTEMA.....	55
4.6 CONCLUSÕES PARCIAIS.....	62
CAPÍTULO 5.....	65
SIMULAÇÃO DA MANOBRA DE ENERGIZAÇÃO DE UM TRONCO DE 2600 KM FORMADO POR LINHAS DE 500 KV	65
5.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA EM ESTUDO.....	66
5.2 MÉTODOS DE SUPRESSÃO DOS TRANSITÓRIOS PROVOCADOS PELA MANOBRA DE ENERGIZAÇÃO DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO.....	74
5.2.1 Dispositivos Pára-Raios.....	74
5.2.2 Resistor de Pré-Inserção.....	74
5.2.3 Chaveamento Controlado.....	75
5.3 MONTAGEM DOS CASOS.....	75
5.3.1 Simulação da energização das linhas propostas, no Software ATP.....	75
5.3.2 Simulação da energização das linhas propostas, no Software PSCAD/EMTDC.....	76
5.4 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES NOS PROGRAMAS DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS.....	77
5.4.1 Resultados obtidos com o ATP.....	78
5.4.2 Resultados PSCAD/EMTDC.....	96
5.5 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS.....	103
5.6 CONCLUSÕES PARCIAIS.....	107
CAPÍTULO 6.....	109
CONCLUSÃO.....	109

CAPÍTULO 7	113
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	113

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1 - SEGMENTO INFINITESIMAL DE UMA LINHA LONGA MONOFÁSICA	16
FIGURA 3.2 - PERFIL DE TENSÃO AO LONGO DE UMA LINHA, 500 kV, 2600 KM, PARA DIFERENTES NÍVEIS DE CARREGAMENTO COM FATOR DE POTÊNCIA UNITÁRIO. (PC - POTÊNCIA CARACTERÍSTICA DA LINHA; P - POTÊNCIA INJETADA NO TERMINAL EMISSOR).	28
FIGURA 3.3 - PERFIL DE CORRENTE AO LONGO DE UMA LINHA, 500 kV, 2600 KM, PARA DIFERENTES NÍVEIS DE CARREGAMENTO COM FATOR DE POTÊNCIA UNITÁRIO. (PC - POTÊNCIA CARACTERÍSTICA DA LINHA; P - POTÊNCIA INJETADA NO TERMINAL EMISSOR).	29
FIGURA 3.4 - PERFIL DE TENSÃO AO LONGO DE UMA LINHA, 500 kV, 2600 KM, PARA OPERAÇÃO COM POTÊNCIA TRANSMITIDA IGUAL À POTÊNCIA CARACTERÍSTICA DA LINHA COM VARIAÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA.	30
FIGURA 3.5 - PERFIL DE CORRENTE AO LONGO DE UMA LINHA, 500 kV, 2600 KM, PARA OPERAÇÃO COM POTÊNCIA TRANSMITIDA IGUAL À POTÊNCIA CARACTERÍSTICA DA LINHA COM VARIAÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA.	31
FIGURA 3.6 - PERFIL DE TENSÃO AO LONGO DE UMA LINHA, 500 kV, 2600 KM, PARA OPERAÇÃO COM POTÊNCIA TRANSMITIDA IGUAL A 0,5.PC DA LINHA COM VARIAÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA.	31
FIGURA 3.7 - PERFIL DE CORRENTE AO LONGO DE UMA LINHA, 500 kV, 2600 KM, PARA OPERAÇÃO COM POTÊNCIA TRANSMITIDA IGUAL A 0,5.PC DA LINHA COM VARIAÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA.	32
FIGURA 3.8 - PERFIL DE TENSÃO AO LONGO DE UMA LINHA, 500 kV, 2600 KM, PARA OPERAÇÃO COM POTÊNCIA TRANSMITIDA IGUAL A 1,5.PC DA LINHA COM VARIAÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA.	32
FIGURA 3.9 - PERFIL DE CORRENTE AO LONGO DE UMA LINHA, 500 kV, 2600KM, PARA OPERAÇÃO COM POTÊNCIA TRANSMITIDA IGUAL A 1,5.PC DA LINHA COM VARIAÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA.	33
FIGURA 3.10 - PERDA ATIVA AO LONGO DE UMA LINHA, 500 kV, 2600 KM, PARA DIFERENTES NÍVEIS DE TENSÃO DE OPERAÇÃO. (PC NA TENSÃO NOMINAL DE 500 kV É IGUAL A 1174,53 MW).	35
FIGURA 4.1 - DIAGRAMA SIMBÓLICO REPRESENTANDO UM CIRCUITO COM DOIS PARES DE TERMINAIS (QUADRIPOLO). 39	
FIGURA 4.2 - DOIS QUADRIPOLOS EM SÉRIE.	39
FIGURA 4.3 - QUADRIPOLO EQUIVALENTE DA ASSOCIAÇÃO EM SÉRIE DE DOIS OUTROS QUADRIPOLOS.	41
FIGURA 4.4 – REPRESENTAÇÃO DO SISTEMA.....	41
FIGURA 4.5 – REPRESENTAÇÃO DOS ESTADOS DE UM DISJUNTOR EM REGIME PERMANENTE.	42
FIGURA 4.6 – DIAGRAMA PARA REPRESENTAÇÃO DE CURTO-CIRCUITO ENVOLVENDO A TERRA.	46
FIGURA 4.7 –MODELO PARA UMA FALTA BIFÁSICA ENTRE AS FASES (A-B).	47
FIGURA 4.8 –MODELO PARA UMA FALTA TRIFÁSICA (A-B-C).	48
FIGURA 4.9 – ASSOCIAÇÃO EM SÉRIE DOS QUADRIPOLOS DO SISTEMA.....	49
FIGURA 4.10 – QUADRIPOLO EQUIVALENTE DA ASSOCIAÇÃO EM SÉRIE DOS QUADRIPOLOS DO SISTEMA.	50
FIGURA 4.11 - DIAGRAMA UNIFILAR REPRESENTANDO A INTERLIGAÇÃO DE LINHAS DE 500 kV FORMANDO UM TRONCO DE 2600 KM.	51

FIGURA 4.12 – MODELO Π EQUIVALENTE DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO MONOFÁSICA OU DE UM MODO DE PROPAGAÇÃO.....	53
FIGURA 4.13 – IMPEDÂNCIA LONGITUDINAL EM COMPONENTES HOMOPOLARES E NÃO-HOMOPOLARES, EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO DA LINHA PARA O MODELO Π DA LINHA PROPOSTO.	54
FIGURA 4.14 – QUADRIPOLO GENÉRICO REPRESENTANDO O MODELO DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO.....	55
FIGURA 4.15 – PERFIL DE TENSÃO E CORRENTE MONITORADOS EM SERRA DA MESA I (KM 0) PARA DIFERENTES CONDIÇÕES DE CURTO-CIRCUITO AO LONGO DA LINHA.....	56
FIGURA 4.16 – PERFIL DE TENSÃO E CORRENTE MONITORADOS EM GURUPI I (KM 256) PARA DIFERENTES CONDIÇÕES DE CURTO-CIRCUITO AO LONGO DA LINHA.	56
FIGURA 4.17 – PERFIL DE TENSÃO E CORRENTE MONITORADOS EM MIRACEMA I (KM 511) PARA DIFERENTES CONDIÇÕES DE CURTO-CIRCUITO AO LONGO DA LINHA.....	57
FIGURA 4.18 – PERFIL DE TENSÃO E CORRENTE MONITORADOS EM COLINAS I (KM 684) PARA DIFERENTES CONDIÇÕES DE CURTO-CIRCUITO AO LONGO DA LINHA.....	57
FIGURA 4.19 – PERFIL DE TENSÃO E CORRENTE MONITORADOS EM IMPERATRIZ (KM 1014) PARA DIFERENTES CONDIÇÕES DE CURTO-CIRCUITO AO LONGO DA LINHA.....	58
FIGURA 4.20 – PERFIL DE TENSÃO E CORRENTE MONITORADOS EM COLINAS II (KM 1344) PARA DIFERENTES CONDIÇÕES DE CURTO-CIRCUITO AO LONGO DA LINHA.	58
FIGURA 4.21 – PERFIL DE TENSÃO E CORRENTE MONITORADOS EM MIRACEMA II (KM 1517) PARA DIFERENTES CONDIÇÕES DE CURTO-CIRCUITO AO LONGO DA LINHA.....	59
FIGURA 4.22 – PERFIL DE TENSÃO E CORRENTE MONITORADOS EM GURUPI II (KM 1772) PARA DIFERENTES CONDIÇÕES DE CURTO-CIRCUITO AO LONGO DA LINHA.....	59
FIGURA 4.23 – PERFIL DE TENSÃO E CORRENTE MONITORADOS EM SERRA DA MESA II (KM 2028) PARA DIFERENTES CONDIÇÕES DE CURTO-CIRCUITO AO LONGO DA LINHA.....	60
FIGURA 4.24 – PERFIL DE TENSÃO E CORRENTE MONITORADOS EM RIO DAS ÉGUAS (KM 2279) PARA DIFERENTES CONDIÇÕES DE CURTO-CIRCUITO AO LONGO DA LINHA.	60
FIGURA 4.25 – PERFIL DE TENSÃO MONITORADO EM BOM JESUS DA LAPA (KM 2600) PARA DIFERENTES CONDIÇÕES DE CURTO-CIRCUITO AO LONGO DA LINHA.....	61
FIGURA 5.1 – CURVA DE SATURAÇÃO DOS TRANSFORMADORES ELEVADORES (15/525 kV).....	67
FIGURA 5.2 – CURVA CARACTERÍSTICA DOS PÁRA-RAIOS DE 420 kV.....	67
FIGURA 5.3 – SILHUETA DAS TORRES DAS LINHAS DO TRONCO NORTE-SUL I.	68
FIGURA 5.4 – SILHUETA DAS TORRES DAS LINHAS DO TRONCO NORTE-SUL II.	70
FIGURA 5.5 – SILHUETA DAS TORRES DAS LINHAS DO TRONCO NORDESTE SUDESTE.	71
FIGURA 5.6 – DIAGRAMA UNIFILAR REPRESENTANDO UMA LINHA DE 500 kV E 2600 KM DE EXTENSÃO ÚNICA (LINHA-II).	72
FIGURA 5.7 – DIAGRAMA TRIFILAR REPRESENTANDO UMA LINHA DE 500 kV E 400 KM DE EXTENSÃO (COM COMPENSAÇÃO EM DERIVAÇÃO).	72
FIGURA 5.8 – COMPORTAMENTO DA TENSÃO SUSTENTADA AO LONGO DAS LINHA I E II EM VAZIO.	78

FIGURA 5.9 – COMPORTAMENTO DAS TENSÕES NOS EXTREMOS DA LINHA E NOS PONTOS DE INTERLIGAÇÃO, DURANTE A MANOBRA DE ENERGIZAÇÃO APENAS COM O USO DOS PÁRA-RAIOS, NA LINHA-I – SIMULAÇÃO COM O ATP.....	80
FIGURA 5.10 – COMPORTAMENTO DAS TENSÕES NOS EXTREMOS DA LINHA E NOS PONTOS DE INTERLIGAÇÃO, DURANTE A MANOBRA DE ENERGIZAÇÃO COM A UTILIZAÇÃO DO RESISTOR DE PRÉ-INserÇÃO , NA LINHA-I – SIMULAÇÃO COM O ATP.....	81
FIGURA 5.11 – COMPORTAMENTO DAS TENSÕES NOS EXTREMOS DA LINHA E NOS PONTOS DE INTERLIGAÇÃO, DURANTE A MANOBRA DE ENERGIZAÇÃO COM A UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DO CHAVEAMENTO CONTROLADO , NA LINHA-I – SIMULAÇÃO COM O ATP.....	82
FIGURA 5.12 – MÁXIMAS SOBRETENSÕES AO LONGO DA LINHA-I PARA OS DIFERENTES MÉTODOS DE ENERGIZAÇÃO – SIMULAÇÕES COM O ATP	83
FIGURA 5.13 – ENERGIA ABSORVIDA PELOS DISPOSITIVOS PÁRA-RAIOS LOCALIZADOS NO INÍCIO DA LINHA DURANTE A ENERGIZAÇÃO DA LINHA I – SIMULAÇÃO COM O ATP	85
FIGURA 5.14 – ENERGIA ABSORVIDA PELOS DISPOSITIVOS PÁRA-RAIOS LOCALIZADOS NO FINAL DA LINHA DURANTE A ENERGIZAÇÃO DA LINHA I – SIMULAÇÃO COM O ATP.....	85
FIGURA 5.15 – MÁXIMAS SOBRETENSÕES NOS EXTREMOS DA LINHA PARA O CASO ESTATÍSTICO, DURANTE A MANOBRA DE ENERGIZAÇÃO COM A UTILIZAÇÃO APENAS DOS PÁRA-RAIOS, NA LINHA-I – SIMULAÇÃO COM O ATP.....	86
FIGURA 5.16 – MÁXIMAS SOBRETENSÕES NOS EXTREMOS DA LINHA PARA O CASO ESTATÍSTICO, DURANTE A MANOBRA DE ENERGIZAÇÃO COM A UTILIZAÇÃO DOS RESISTORES DE PRÉ-INserÇÃO, NA LINHA-I – SIMULAÇÃO COM O ATP	86
FIGURA 5.17 – MÁXIMAS SOBRETENSÕES NOS EXTREMOS DA LINHA PARA O CASO ESTATÍSTICO, DURANTE A MANOBRA DE ENERGIZAÇÃO COM A UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DO CHAVEAMENTO CONTROLADO, NA LINHA-I – SIMULAÇÃO COM O ATP.....	87
FIGURA 5.18 – COMPORTAMENTO DAS TENSÕES NOS EXTREMOS DA LINHA E NOS PONTOS DE INTERLIGAÇÃO, DURANTE A MANOBRA DE ENERGIZAÇÃO APENAS COM O USO DOS PÁRA-RAIOS, NA LINHA-II – SIMULAÇÃO COM O ATP ..	88
FIGURA 5.19 – COMPORTAMENTO DAS TENSÕES NOS EXTREMOS DA LINHA E NOS PONTOS DE INTERLIGAÇÃO, DURANTE A MANOBRA DE ENERGIZAÇÃO COM A UTILIZAÇÃO DO RESISTOR DE PRÉ-INserÇÃO , NA LINHA-II – SIMULAÇÃO COM O ATP.....	89
FIGURA 5.20 – COMPORTAMENTO DAS TENSÕES NOS EXTREMOS DA LINHA E NOS PONTOS DE INTERLIGAÇÃO, DURANTE A MANOBRA DE ENERGIZAÇÃO COM A UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DO CHAVEAMENTO CONTROLADO , NA LINHA-II – SIMULAÇÃO COM O ATP.....	90
FIGURA 5.21 – MÁXIMAS SOBRETENSÕES AO LONGO DA LINHA-II PARA OS DIFERENTES MÉTODOS DE ENERGIZAÇÃO. SIMULAÇÃO COM O ATP.....	91
FIGURA 5.22 – ENERGIA ABSORVIDA PELOS DISPOSITIVOS PÁRA-RAIOS LOCALIZADOS NO INÍCIO DA LINHA DURANTE A ENERGIZAÇÃO DA LINHA II – SIMULAÇÃO COM O ATP.	92
FIGURA 5.23 – ENERGIA ABSORVIDA PELOS DISPOSITIVOS PÁRA-RAIOS LOCALIZADOS NO TERMINAL EM VAZIO DA LINHA DURANTE A ENERGIZAÇÃO DA LINHA II – SIMULAÇÃO COM O ATP.....	92
FIGURA 5.24 – MÁXIMAS SOBRETENSÕES NOS EXTREMOS DA LINHA PARA O CASO ESTATÍSTICO, DURANTE A MANOBRA DE ENERGIZAÇÃO COM A UTILIZAÇÃO APENAS DOS PÁRA-RAIOS, NA LINHA-II – SIMULAÇÃO COM O ATP	94

FIGURA 5.25 – MÁXIMAS SOBRETENSÕES NOS EXTREMOS DA LINHA PARA O CASO ESTATÍSTICO, DURANTE A MANOBRA DE ENERGIZAÇÃO COM A UTILIZAÇÃO DOS RESISTORES DE PRÉ-INSERÇÃO, NA LINHA-II – SIMULAÇÃO COM O ATP	94
FIGURA 5.26 – MÁXIMAS SOBRETENSÕES NOS EXTREMOS DA LINHA PARA O CASO ESTATÍSTICO, DURANTE A MANOBRA DE ENERGIZAÇÃO COM A UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DO CHAVEAMENTO CONTROLADO, NA LINHA-II – SIMULAÇÃO COM O ATP	95
FIGURA 5.27 – COMPORTAMENTO DAS TENSÕES NOS EXTREMOS DA LINHA DE 400 KM DURANTE A MANOBRA DE ENERGIZAÇÃO UTILIZANDO O RESISTOR DE PRÉ-INSERÇÃO – SIMULAÇÃO COM O ATP	96
FIGURA 5.28 – COMPORTAMENTO DAS TENSÕES NOS EXTREMOS DA LINHA E NOS PONTOS DE INTERLIGAÇÃO, DURANTE A MANOBRA DE ENERGIZAÇÃO APENAS COM O USO DOS PÁRA-RAIOS, NA LINHA-I – SIMULAÇÃO COM O PSCAD	97
FIGURA 5.29 – COMPORTAMENTO DAS TENSÕES NOS EXTREMOS DA LINHA E NOS PONTOS DE INTERLIGAÇÃO, DURANTE A MANOBRA DE ENERGIZAÇÃO COM A UTILIZAÇÃO DO RESISTOR DE PRÉ-INSERÇÃO, NA LINHA-I – SIMULAÇÃO COM O PSCAD	98
FIGURA 5.30 – COMPORTAMENTO DAS TENSÕES NOS EXTREMOS DA LINHA E NOS PONTOS DE INTERLIGAÇÃO, DURANTE A MANOBRA DE ENERGIZAÇÃO COM A UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DO CHAVEAMENTO CONTROLADO, NA LINHA-I – SIMULAÇÃO COM O PSCAD	98
FIGURA 5.31 – MÁXIMAS SOBRETENSÕES AO LONGO DA LINHA-I PARA OS DIFERENTES MÉTODOS DE ENERGIZAÇÃO – SIMULAÇÃO COM O PSCAD	99
FIGURA 5.32 – COMPORTAMENTO DAS TENSÕES NOS EXTREMOS DA LINHA E NOS PONTOS DE INTERLIGAÇÃO, DURANTE A MANOBRA DE ENERGIZAÇÃO APENAS COM O USO DOS PÁRA-RAIOS, NA LINHA-II – SIMULAÇÃO COM O PSCAD	100
FIGURA 5.33 – COMPORTAMENTO DAS TENSÕES NOS EXTREMOS DA LINHA E NOS PONTOS DE INTERLIGAÇÃO, DURANTE A MANOBRA DE ENERGIZAÇÃO COM A UTILIZAÇÃO DO RESISTOR DE PRÉ-INSERÇÃO, NA LINHA-II – SIMULAÇÃO COM O PSCAD	100
FIGURA 5.34 – COMPORTAMENTO DAS TENSÕES NOS EXTREMOS DA LINHA E NOS PONTOS DE INTERLIGAÇÃO, DURANTE A MANOBRA DE ENERGIZAÇÃO COM A UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DO CHAVEAMENTO CONTROLADO, NA LINHA-II – SIMULAÇÃO COM O PSCAD	101
FIGURA 5.35 – MÁXIMAS SOBRETENSÕES AO LONGO DA LINHA-II PARA OS DIFERENTES MÉTODOS DE ENERGIZAÇÃO – SIMULAÇÃO COM O PSCAD	101
FIGURA 5.36 – COMPORTAMENTO DAS TENSÕES NOS EXTREMOS DA LINHA DURANTE A MANOBRA DE ENERGIZAÇÃO DE UMA LINHA DE 400 KM, UTILIZANDO-SE O RESISTOR DE PRÉ-INSERÇÃO – SIMULAÇÃO COM O PSCAD	102
FIGURA 5.37 – COMPORTAMENTO DAS TENSÕES NOS EXTREMOS DA LINHA DURANTE A MANOBRA DE ENERGIZAÇÃO DE UMA LINHA DE 2600 KM FORTEMENTE COMPENSADA, UTILIZANDO-SE O RESISTOR DE PRÉ-INSERÇÃO – SIMULAÇÃO COM O PSCAD	103
FIGURA 5.38 – COMPARAÇÃO NÍVEIS MÁXIMOS DE SOBRETENSÃO NO INÍCIO DA LINHA PARA OS TRÊS MÉTODOS DE ENERGIZAÇÃO APRESENTADOS, SIMULADOS NO SOFTWARE ATP.	103

FIGURA 5.39 – COMPARAÇÃO NÍVEIS MÁXIMOS DE SOBRETENSÃO NO FINAL DA LINHA PARA OS TRÊS MÉTODOS DE ENERGIZAÇÃO APRESENTADOS, SIMULADOS NO SOFTWARE ATP.	104
FIGURA 5.40 – COMPARAÇÃO NÍVEIS MÁXIMOS DE SOBRETENSÃO NO INÍCIO DA LINHA PARA OS TRÊS MÉTODOS DE ENERGIZAÇÃO APRESENTADOS, SIMULADOS NO SOFTWARE PSCAD/EMTDC.	105
FIGURA 5.41 – COMPARAÇÃO NÍVEIS MÁXIMOS DE SOBRETENSÃO NO FINAL DA LINHA PARA OS TRÊS MÉTODOS DE ENERGIZAÇÃO APRESENTADOS, SIMULADOS NO SOFTWARE PSCAD/EMTDC.	105
FIGURA 5.42 – COMPARAÇÃO NÍVEIS MÁXIMOS DE SOBRETENSÃO NO INÍCIO DA LINHA COM RESISTOR DE PRÉ-INSERÇÃO, SIMULADOS NO SOFTWARE PSCAD/EMTDC.	106
FIGURA 5.43 – COMPARAÇÃO NÍVEIS MÁXIMOS DE SOBRETENSÃO NO FINAL DA LINHA ENERGIZADA COM RESISTOR DE PRÉ-INSERÇÃO, SIMULADOS NO SOFTWARE PSCAD/EMTDC.	107

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 – PARÂMETROS UNITÁRIOS LONGITUDINAIS E TRANSVERSAIS DAS LINHAS DO TRONCO NORDESTE-SUDESTE, CALCULADOS PARA A FREQUÊNCIA DE 60 Hz.	26
TABELA 3.2 – PERDAS AO LONGO DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO, 500 kV, 2600 KM, PARA DIFERENTES CARREGAMENTOS E TENSÕES DE OPERAÇÃO.	35
TABELA 4.1 – PARÂMETROS UNITÁRIOS LONGITUDINAIS E TRANSVERSAIS DAS LINHAS DO TRONCO NORTE-SUL I, CALCULADOS PARA A FREQUÊNCIA DE 60 Hz.	52
TABELA 4.2 – PARÂMETROS UNITÁRIOS LONGITUDINAIS E TRANSVERSAIS DAS LINHAS DO TRONCO NORTE-SUL II CALCULADOS PARA A FREQUÊNCIA DE 60 Hz.	52
TABELA 4.3 – PARÂMETROS UNITÁRIOS LONGITUDINAIS E TRANSVERSAIS DAS LINHAS DO TRONCO NORDESTE SUDESTE CALCULADOS A 60 Hz.	53
TABELA 5.1 – PARÂMETROS BÁSICOS DOS GERADORES.	66
TABELA 5.2 – TRANSFORMADOR ELEVADOR DE SERRA DA MESA.	66
TABELA 5.3 – LIMITES DE ABSORÇÃO DE ENERGIA.	68
TABELA 5.4 – DADOS DOS CONDUTORES DA TORRES DAS LINHAS DO TRONCO NORTE-SUL I.	69
TABELA 5.5 – PARÂMETROS UNITÁRIOS LONGITUDINAIS E TRANSVERSAIS DAS LINHAS DO TRONCO NORTE-SUL I.	69
TABELA 5.6 – DADOS DOS CONDUTORES DA TORRES DAS LINHAS DO TRONCO NORTE-SUL II.	69
TABELA 5.7 – PARÂMETROS UNITÁRIOS LONGITUDINAIS E TRANSVERSAIS DAS LINHAS DO TRONCO NORTE-SUL II.	70
TABELA 5.8 – DADOS DOS CONDUTORES DA TORRES DAS LINHAS DO TRONCO NORDESTE-SUDESTE.	71
TABELA 5.9 – PARÂMETROS UNITÁRIOS LONGITUDINAIS E TRANSVERSAIS DAS LINHAS DO TRONCO NORDESTE SUDESTE CALCULADOS PARA 60 Hz.	71
TABELA 5.10 – VALORES DOS REATORES DE FASE E DE NEUTRO UTILIZADOS EM UMA LINHA DE 2600 KM FORTEMENTE COMPENSADA.	73
TABELA 5.11 – LOCAIS DE MEDIÇÃO PARA ACOMPANHAMENTO DAS TENSÕES AO LONGO DA LINHA.	77
TABELA 5.12 – SOBRETENSÕES AO LONGO DA LINHA PARA O CASO ESTATÍSTICO DA ENERGIZAÇÃO DA LINHA I SIMULADA COM O ATP.	84
TABELA 5.13 – SOBRETENSÕES AO LONGO DA LINHA II PARA O CASO ESTATÍSTICO – SIMULAÇÃO COM O ATP.	93

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

O potencial hidroelétrico brasileiro é estimado em torno de 260 GW dos quais somente 28% estavam sendo usados, em 2003, para produção de energia em usinas hidrelétricas de grande e médio porte.

O mapa hidráulico brasileiro é composto por oito grandes bacias hidrográficas. A região norte (na qual estão presentes as bacias dos Rios Amazonas e Tocantins) tem um potencial para geração hidráulica de 131,6 GW, 50,9% do potencial brasileiro, dos quais 120,6 GW ainda não estão sendo usados.

Na bacia do Rio Amazonas apenas 0,87 % do seu potencial hidroelétrico é atualmente utilizado. O potencial de geração dessa bacia não tem sido utilizado principalmente devido ao fato de estar localizada muito distante dos centros consumidores. Entretanto como as fontes hidroelétricas situadas próximas as grandes cargas já estão praticamente esgotadas, a utilização dos recursos hídricos em áreas remotas será extremamente necessária em um futuro próximo [1]-[4].

Dessa forma, para a expansão do setor elétrico brasileiro, a utilização dos recursos hidroelétricos da Bacia do Amazonas é fundamental. Entretanto a utilização desses recursos impõe uma solução adequada para transmitir a maior parte dessa energia a distâncias da ordem de 2500 km [2].

Uma solução bastante interessante para este problema seria basear a transmissão em linhas não convencionais, em corrente alternada, otimizadas para os condicionamentos específicos das transmissões em causa [3].

Os troncos de transmissão de pouco mais de meio comprimento de onda (em torno de 190°), aparecem com uma solução natural, já que os comprimentos envolvidos são desta ordem na frequência de operação do sistema (60 Hz) no Brasil [1]-[3].

A transmissão de energia em linhas de um pouco mais de meio comprimento de onda, basicamente não necessita de nenhum tipo de compensação reativa em derivação nem compensação reativa série. Assim os custos desse tipo de transmissão por unidade de comprimento para uma linha de 2600 km, por exemplo, são muito menores do que para uma linha de 400 km considerando linhas com potências características semelhantes. Os custos envolvidos na transmissão em meio comprimento de onda são da ordem de 24 % menores do que, por exemplo, para uma transmissão em corrente contínua para as distâncias envolvidas, e para linhas com capacidade de transmitir potências semelhantes [4].

Devido ao fato de não existir no mundo nenhuma linha de transmissão da ordem de 2600 km, os técnicos responsáveis pela expansão do sistema elétrico brasileiro estão cautelosos com os estudos desta nova solução de transmissão em corrente alternada. Foi proposto que se realizasse um teste de campo de uma manobra simples de energização da linha, em condições bem definidas e sobre as quais se tivesse grande controle, para se verificar o comportamento de uma linha de um pouco mais de meio comprimento de onda durante esta manobra.

Como no Brasil existem grandes interligações formadas por linhas de 500 kV semelhantes, deverá ser realizado em um futuro próximo um teste da manobra de energização de um tronco de um pouco mais de meio comprimento de onda. Estas linhas podem ser conectadas em série formando um elo CA de 2600 km sem qualquer tipo de compensação ao longo de seu comprimento [1].

O teste proposto por [1], o qual é tomado como referência por este trabalho, baseia-se na interligação das linhas Norte Sul I, Norte Sul II e de parte da interligação Nordeste-Sudeste. A interconexão Norte-Sul I e II é composta por duas linhas de 1014 km de comprimento, as quais somadas com parte da interligação Nordeste-Sudeste formam um tronco de aproximadamente 2601 km. As tensões nominais das linhas em questão são de 500 kV. Tais linhas apresentam características semelhantes, porém as torres são um pouco diferentes.

As linhas da interligação Norte-Sul são fortemente compensadas tanto em derivação quanto em série, e as linhas do tronco Nordeste-Sudeste são também fortemente compensadas em derivação.

Para o teste em causa todas as compensações em derivação deverão ser desconectadas e todas as compensações série devem ser curto-circuitadas. Todos os disjuntores que conectam as linhas em série devem ser mantidos bloqueados na posição fechada. Assim um tronco de 2600 km pode ser formado sem compensação reativa em derivação nem compensação reativa série e a manobra de energização pode ser feita com a utilização de apenas um disjuntor.

Neste contexto, este trabalho apresenta um estudo do comportamento de uma linha de transmissão de 2600 km, para as seguintes condições de operação:

- ✓ Análise em regime permanente, na frequência fundamental do sistema elétrico brasileiro, 60 Hz, da linha isolada alimentada a partir de uma barra infinita, para diferentes condições de operação.
- ✓ Determinação das tensões e correntes, sustentadas, ao longo da linha, isolada e alimentada a partir de uma barra infinita para ocorrência de diferentes tipos de curto-circuito em diferentes pontos.
- ✓ Simulação da manobra de energização de uma linha de 2600 km, formada pela interligação de linhas de transmissão de 500 kV existentes no sistema elétrico brasileiro, alimentada a partir dos geradores existentes na subestação de Serra da Mesa utilizando-se diferentes métodos para mitigar as sobretensões transitórias provocadas por esta manobra.
 - Comparação dos resultados da manobra de energização da linha teste com o de uma linha única de 2600 km para verificar a viabilidade de se utilizar linhas semelhantes para o teste.
 - Simulação da energização de uma linha de 400 km compensada e de um tronco de 2600 km CA altamente compensado para efeito de comparação das sobretensões obtidas na manobra.

Deve-se ressaltar que um tronco de um pouco mais de meio comprimento de onda deve ter capacidade de transmitir grandes blocos de energia, o que não ocorre com a linha de 500 kV estudada. No entanto, para objetivo da presente pesquisa a linha de 500 kV é adequada.

1.2 Estrutura da Dissertação.

Este trabalho está dividido em sete capítulos incluindo este de introdução.

No Capítulo 2 é feita uma descrição sobre os principais estudos desenvolvidos em todo o mundo ao longo dos anos sobre a transmissão em meio comprimento de onda. São analisadas as contribuições de cada autor para o desenvolvimento desta transmissão não convencional de energia. Na seqüência é feita uma abordagem sobre os principais estudos que estão sendo desenvolvidos sobre esta tecnologia e como esta pode ser aplicada no sistema elétrico brasileiro.

No Capítulo 3 é apresentada uma análise detalhada do comportamento de uma linha de transmissão de um pouco mais de meio comprimento de onda (2600 km) na frequência fundamental, 60 Hz, isolada e alimentada a partir de uma barra infinita para diferentes condições de operação. Os perfis de tensão e de corrente, para diferentes condições de carregamento, são monitorados ao longo da linha. Uma análise em função da variação do fator de potência na potência injetada no terminal emissor também é realizada e sua influência nos perfis de tensão e de corrente é verificada. As perdas ao longo da linha para diferentes níveis de potência transmitida são medidas e uma alternativa para minimização dessas perdas é apresentada.

O Capítulo 4 apresenta uma metodologia para auxiliar o estudo de transitórios eletromagnéticos em sistemas de transmissão. Ao se estudar os comportamentos em regime transitório de um sistema de transmissão inúmeros casos de chaveamento e de faltas ao longo do sistema podem gerar perturbações que atinjam níveis indesejáveis. Assim é importante efetuar uma análise sistemática prévia à frequência fundamental do sistema trifásico antes do estudo de transitórios eletromagnéticos. A metodologia desenvolvida e os resultados obtidos para a presente análise são apresentados neste capítulo.

O Capítulo 5 descreve a simulação da manobra de energização de um tronco de 2600 km formado por linhas de 500 kV existentes no Brasil a partir dos grupos de geradores da usina de Serra da Mesa. Neste capítulo são feitas simulações utilizando-se softwares de análise de transitórios eletromagnéticos ATP e PSCAD/EMTDC. É feita uma comparação entre os resultados e os níveis de sobretensões obtidos nas simulações. Uma comparação entre linhas de poucas centenas de quilômetros e a linha de meio comprimento de onda também é realizada.

O Capítulo 6 apresenta as conclusões do trabalho.

No Capítulo 7 são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas no trabalho.

1.3 Publicações

Durante essa pesquisa foram desenvolvidos os seguintes artigos:

- VIDIGAL, R. F.; TAVARES, M. C. *Conceitos Fundamentais da Transmissão em um Pouco mais de Meio Comprimento de Onda*. SBSE - Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Belém, Brasil, 2010.
- VIDIGAL, R. F.; TAVARES, M. C. *Análise Preliminar da Manobra de Energização de um Tronco de 2600 km de Linhas de 500 kV*. SISPOT - Encontro de Pesquisadores em Sistemas de Potência, UNICAMP, Campinas, Brasil, 2009.

Capítulo 2

ESTADO DA ARTE DA TRANSMISSÃO EM MEIO COMPRIMENTO DE ONDA

Este capítulo apresenta uma descrição sobre os principais estudos desenvolvidos em todo o mundo ao longo dos anos sobre a transmissão em meio comprimento de onda. São analisadas as contribuições de cada autor para o desenvolvimento desta transmissão não convencional de energia. Na seqüência é feita uma abordagem sobre os principais estudos que estão sendo desenvolvidos sobre esta tecnologia e como esta pode ser aplicada no sistema elétrico brasileiro.

2.1 Transmissão em Meio Comprimento de Onda no Mundo

Os primeiros estudos referentes à transmissão em meio comprimento de onda, sobre os quais se têm registro, se remetem à década de 30 na União das Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS).

Um dos trabalhos publicados nessa época, no idioma russo, o qual é descrito na referência [5], resume os principais trabalhos desenvolvidos pelos pesquisadores soviéticos sobre a compensação de linhas de transmissão longas para a sintonização em meio comprimento de onda.

Uma das principais características das linhas sintonizadas em meio comprimento de onda examinadas em [5] foi à proporcionalidade direta da tensão no ponto médio da linha em relação à corrente no terminal de carga. Este fato foi explicado devido ao ponto médio da linha simetricamente compensada de meio comprimento de onda estar localizado a um quarto de onda

dos pontos extremos da linha. Vários métodos simples, que sintonizam a linha em meio comprimento de onda foram analisados apresentando características bastante semelhantes, ou seja, as correntes e as tensões nos extremos são iguais em módulo, e contrárias em fase, mas suas características internas são diferentes.

Em [6], publicado no ano de 1964, é feita uma análise sobre linhas de transmissão longas sintonizadas para meio comprimento de onda, através de capacitores em derivação ou reatores série em diferentes métodos, tendo como motivação as linhas longas que estavam sendo construídas nos Estados Unidos e no Canadá nesta época. As análises consistiram em uma comparação das vantagens e desvantagens da transmissão ponto a ponto em meio comprimento de onda.

As principais conclusões obtidas por [6] foram que em 60 Hz, linhas com comprimento maior que 1448,4 km, apresentam um menor investimento de capital para serem sintonizadas para meia onda do que para serem compensadas para encurtar seu comprimento elétrico utilizando capacitores série e reatores em derivação. Foi verificado que o custo para sintonizar uma linha para meio comprimento de onda diminui à medida que o seu comprimento se aproxima de 2500 km.

Verificou-se também que linhas de transmissão de meio comprimento de onda apresentam ganho entre as tensões terminais unitários, não apresentam carregamento excessivo de corrente, e nem possibilidade de auto-excitação dos geradores na energização da linha de transmissão. A variação da tensão ao longo da linha é diretamente proporcional à potência transmitida, variando de acordo com os diferentes carregamentos submetidos. Além disto, o sistema é estável sob severas condições de falta.

Em 1968, foi publicado na URSS, um trabalho relatando a realização de um teste de campo, na rede de 500 kV do Sistema Único de Energia, para a parte européia da URSS, a qual interligada formava um sistema com condições naturais de meio comprimento de onda.

Este trabalho foi motivado pelos fatores naturais e econômicos da União Soviética, para a criação de transmissões de 2000 – 4000 km com capacidade de transmissão de 5000 MW ou mais por circuito.

Através dos estudos desenvolvidos pelo Instituto Siberiano e de outras organizações científicas do país, naquela época, este problema poderia ser resolvido não somente pela

transmissão em corrente contínua, mas também com base em transmissões trifásicas que seriam sintonizadas a um comprimento elétrico de um pouco mais que 180° elétricos.

Após a realização dos testes foi verificado que o programa de testes planejado foi consumado completamente. Ao longo de uma linha de cerca de 3000 km de comprimento com mínimos ajustes, a energia foi transmitida de acordo com as condições previstas. A transmissão sintonizada foi bem controlada e nenhuma dificuldade foi observada na operação do sistema.

Os resultados obtidos nos testes se aproximaram bastante dos resultados obtidos nos estudos teóricos. Entretanto percebeu-se a necessidade do uso de modelos mais completos para a representação dos fenômenos transitórios e para a representação do efeito coroa o que provocou distorção de alguns resultados obtidos nos testes e os calculados nos modelos teóricos. Foram também observadas as necessidades de se desenvolver esquemas especiais de relés para proteção do sistema [7].

Em 1969, também foram publicados trabalhos sobre a transmissão em meio comprimento de onda por pesquisadores do instituto de ciência indiano [8]-[9]. Estes estudos tiveram como principais objetivos o cálculo do fluxo de potência, análise de curto-circuito e estudos de estabilidade, para linhas com comprimento natural de pouco mais de meio comprimento de onda e linhas sintonizadas para este comprimento.

Nas análises desenvolvidas, verificou-se que para que o módulo da tensão no terminal de geração não varie em uma faixa maior que 10%, e para que o ângulo da tensão permaneça dentro dos limites de estabilidade, a potência transmitida pela linha não deve exceder 1,2 SIL (Potência Natural da Linha). Segundo a referência, isto seria devido ao comportamento da tensão na parte central da linha para uma transmissão de potência acima da SIL que pode atingir valores bastante elevados.

Foi também observado que a linha transmitindo uma potência cujo fator de potência é diferente do unitário, o perfil de corrente ao longo da linha é drasticamente alterado.

Para a sincronização da linha de um sistema de meia onda com o restante do sistema, um ajuste no ângulo da tensão no terminal de geração da linha de meia onda pode ser feito.

A eficiência para uma linha de meia onda é máxima quando a linha está transmitindo uma potência próxima a SIL e muito baixa quando a linha opera em carga leve ($< 0,5$ SIL).

Como a linha de meia onda não possui subestações intermediárias, na presença de faltas ao longo da linha todo o elo deve ser desligado. No caso de faltas monofásicas é possível utilizar a manobra monopolar, que deve ser adaptada para este tipo de transmissão

Para uma linha sintonizada para meio comprimento de onda, verificou-se que os métodos mais eficientes de sintonia são através de circuitos π ou T no lugar da utilização de capacitores em derivação colocados ao longo da linha.

O comportamento de uma linha sintonizada, para as diferentes simulações realizadas, apresentou resultados semelhantes aos obtidos para a linha de meia onda natural.

Uma abordagem envolvendo a inclusão das perdas por Efeito Coroa em linhas de transmissão de meia onda foi feita na Itália, por [11], em 1988.

Neste trabalho observou-se que a simulação do comportamento da linha de transmissão de meio comprimento de onda, desprezando-se as perdas por efeito coroa, para várias situações de sobretensão transitória, pode provocar uma superestimação da capacidade de transmissão de energia. Com a inclusão das perdas por efeito coroa, os níveis de sobretensão transitória devido a curtos-circuitos monofásicos, bifásicos e trifásicos, reduziram a níveis mais baixos comparado com as simulações onde este fenômeno foi desprezado. Devido às perdas por efeito Coroa uma maior transmissão de potência pode ser realizada, mantendo-se a estabilidade transitória.

Entretanto o modelo apresentado em [11] é questionado por alguns autores que dizem que tal modelo não representa de forma correta as perdas por efeito coroa, porém sabe-se que os níveis de sobretensão transitória realmente se reduzem drasticamente com a inclusão das perdas por efeito coroa.

Alguns dos principais problemas de operação de uma linha de meio comprimento de onda foram analisados por [12] em 1992. Nesta abordagem considerou-se a viabilidade de um religamento rápido monopolar, a possibilidade do uso de pára-raios nos extremos das linhas de meio comprimento de onda para limitação das sobretensões transitórias, e a operação em paralelo de linhas de meio comprimento de onda interconectadas em suas extremidades.

Assim foi verificado que o religamento monopolar para linhas de meio comprimento de onda apresenta dificuldades para sua implementação devido a uma corrente de arco secundário de valor muito elevado que não se extingue naturalmente. Soluções para a redução desta corrente encontram-se em desenvolvimento.

A utilização de pára-raios nos extremos da linha para limitar os níveis de sobretensão transitória apresentou um bom desempenho. Entretanto para determinados tipos de falta estes dispositivos absorveriam uma elevada energia, o que sugere que um sistema de proteção adequado deveria atuar em poucos ciclos impedindo que as sobretensões transitórias atinjam níveis muito elevados.

A operação de linhas de meio comprimento de onda em paralelo, em diferentes sentidos de fluxo, mostrou-se possível sem a necessidade de transformadores defasadores. Para se obter uma boa e estável solução para o fluxo de potência em linhas de meio comprimento de onda o ajuste dos ângulos elétricos para cada linha deveria ser um pouco maior que 180° .

Motivados pelo aumento de consumo de energia na Coréia do Sul, e pela dificuldade da construção de novas usinas de geração de energia no país, um estudo sobre a transmissão em meio comprimento de onda é feito em [14], visando à importação de energia de hidrelétricas Russas.

Técnicas para minimizar as perdas quando a linha transmite uma potência muito abaixo da nominal também foram contempladas nesse estudo, mostrando que uma variação nos níveis de tensão entre as épocas em que se transmite potência nominal e as épocas que se transmite uma baixa potência é a melhor alternativa na redução das perdas.

A transmissão em meio comprimento de onda também foi estudada como uma alternativa para transmissão de energia entre as hidrelétricas do rio Congo e o Egito, em distância da ordem de 4000 km, como apresentado em [15].

Nesse estudo alguns métodos de transmissão foram levados em consideração, sendo a transmissão em meia onda abordada em combinação com um circuito fortemente compensado completando os 4000 km de extensão desejados.

2.2 Transmissão em Meio Comprimento de Onda no Brasil

Na década de 80 foram publicados os primeiros trabalhos sobre a transmissão em meio comprimento de onda no Brasil. Uma análise detalhada sobre o comportamento de uma linha de transmissão de meio comprimento de onda é apresentada em [10]. Neste trabalho observou-se que a transmissão em meio comprimento de onda em linhas com comprimento superior a 1450 km, na frequência de 60 Hz, é possivelmente a solução mais econômica e também a mais

fácil de operar. A ausência de ramificações e de seccionamentos são problemas que podem ser contornados por um planejamento adequado.

Visando o aproveitamento do potencial hidroelétrico da Amazônia, foi desenvolvido em 1991, um estudo sobre a transmissão em meio comprimento de onda, com o objetivo de aprofundar conhecimentos acerca da tecnologia e identificando aspectos mais críticos para sua viabilização técnica e eventuais possibilidades de contorná-las sem uma preocupação sistematizada com a viabilidade econômica, como apresentado em [13].

Neste estudo foram verificadas as condições de operação em regime permanente verificando que o fator de potência da energia injetada no terminal de geração da linha não deve diferir do unitário uma vez que a transmissão com fator de potência diferente do unitário pode provocar deformações nas formas de onda de tensão e corrente ao longo da linha.

Os estudos realizados demonstraram que os curtos-circuitos trifásicos são os mais severos para as linhas de meio comprimento de onda, quer do ponto de vista das correntes de defeito, como das sobretensões associadas. As correntes de falta apresentaram magnitudes que não diferem muito das observadas em sistemas trifásicos convencionais, sendo, no entanto, as sobretensões sustentadas de valor extremamente elevadas, para curtos-circuitos ocorridos em determinados pontos da linha.

Vale ressaltar que os trabalhos publicados nessa época foram realizados para linhas de meio comprimento de onda exatos, o que não é recomendado uma vez que em meio comprimento de onda tem-se um ponto de singularidade o que pode provocar comportamento indesejável na operação da linha. Assim para uma operação correta do sistema, esta linha deveria ter um comprimento um pouco maior que o meio comprimento de onda saindo dessa forma dessa região de singularidade e operando com uma margem suficiente de estabilidade.

Uma seqüência de trabalhos motivados pela expansão do setor elétrico brasileiro com aproveitamento dos recursos energéticos das bacias do Rio Amazonas sobre métodos não convencionais de transmissão de energia são apresentados nas referências [2], [3], [4], [16], [17]. Nestes trabalhos os autores fazem uma comparação entre os métodos convencionais aplicados a linhas menores que $\lambda/4$ extrapolados para linhas longas e métodos não convencionais aplicados a linhas longas da ordem de um pouco mais de meio comprimento de onda.

Foi verificado que linhas que possuem comprimento elétrico da ordem de um pouco mais de meio comprimento de onda não necessitam de qualquer montante de compensação reativa, quer

em derivação quer em série, e dessa forma o custo por unidade de comprimento para uma linha de 2800 km é, por exemplo, menor do que para uma linha de 400 km, para linhas com potências transmitidas por unidade de comprimento semelhantes.

Outra questão interessante observada foi que a energização de uma linha de 2800 km em uma única manobra, sem compensação reativa origina sobretensões menores ou de mesma ordem que para uma linha de 300 km com compensação reativa.

Um modelo não convencional para otimização da transmissão em linhas longas, da ordem de um pouco mais de meio comprimento de onda também foi apresentado, com o objetivo de otimizar a linha às condições específicas da transmissão em causa.

Uma comparação entre diferentes tipos de linhas de transmissão para atender as distâncias envolvidas nas transmissões de energia da região das usinas da bacia do Amazonas para o Sudeste, as quais são da ordem de 2600 km, foram contempladas. Nesta análise foram incluídas linhas fortemente compensadas com subestações intermediárias e compensação reativa, elos de corrente contínua, e a transmissão CA em um pouco mais de meio comprimento de onda. Diferentes montantes de energia foram considerados nas simulações feitas, sendo a linha de um pouco mais de meio comprimento de onda a que apresentou o custo mais baixo para ser construída tendo um custo benefício excelente.

Estes trabalhos também apresentam simulações confirmando que a transmissão em um pouco mais de meio comprimento de onda, para as distâncias envolvidas na transmissão de energia das usinas da bacia do Amazonas para os centros consumidores localizados nas regiões Sul/Sudeste e Nordeste, aparece como a solução natural para atender de forma mais eficiente ao sistema.

Baseado nos trabalhos apresentados e motivados pela expansão do sistema elétrico brasileiro foi então proposto por [1], que fosse montado um tronco teste formado por linhas de 500 kV existentes no sistema elétrico brasileiro, as quais interligadas pudessem formar um elo de 2600 km. Nesse elo seria então realizada uma manobra de energização da linha, sobre a qual se teria grande controle, para verificar a resposta de uma linha de 2600 km analisando assim seu comportamento transitório e em regime permanente.

Sendo assim este trabalho faz um estudo detalhado do comportamento de regime permanente, análise de curto-circuito e comportamento transitório servindo como base para a implementação do ensaio de campo proposto. Os capítulos seguintes descrevem as abordagens feitas, assim como apresentam os resultados das simulações realizadas.

Capítulo 3

CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTAIS DA TRANSMISSÃO EM UM POUCO MAIS DE MEIO COMPRIMENTO DE ONDA

Este capítulo apresenta uma análise detalhada do comportamento de uma linha de transmissão de um pouco mais de meio comprimento de onda (2600 km) na frequência fundamental, 60 Hz, isolada, alimentada por uma fonte infinita, para diferentes condições de operação. Os perfis de tensão e de corrente, para diferentes condições de carregamento, são monitorados ao longo da linha. Uma análise em função da variação do fator de potência da energia injetada no terminal emissor também é realizada e sua influência nos perfis de tensão e de corrente são verificados. As perdas ao longo da linha para diferentes níveis de potência transmitida são medidas e uma alternativa para minimização dessas perdas é apresentada.

3.1 Representação da Linha de Transmissão com Base no Modelo de Parâmetros Distribuídos.

Seja a Figura 3.1, a representação de um segmento de linha monofásica de comprimento infinitesimal.

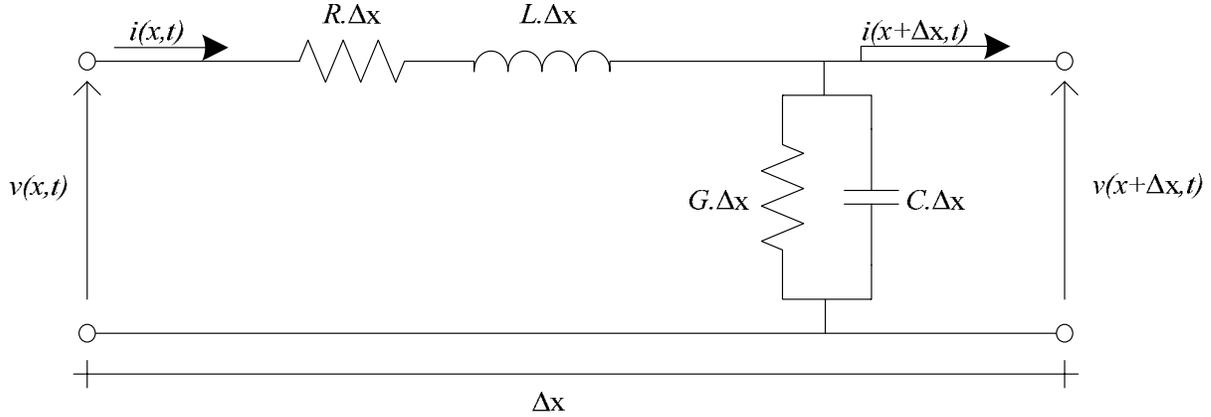


Figura 3.1 - Segmento infinitesimal de uma linha longa monofásica

Onde: R – Resistência série por unidade de comprimento em (Ω/km) ; L – Indutância série por unidade de comprimento em (H/km) ; C – Capacitância transversal por unidade de comprimento em (F/km) ; G – Condutância transversal por unidade de comprimento em (Ω^{-1}/km) .

Aplicando-se as leis de Kirchoff obtêm-se as seguintes equações:

$$v(x,t) - R \cdot \Delta x \cdot i(x,t) - L \cdot \Delta x \cdot \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} - v(x+\Delta x,t) = 0 \quad (3.1)$$

$$i(x,t) - G \cdot \Delta x \cdot v(x+\Delta x,t) - C \cdot \Delta x \cdot \frac{\partial v(x+\Delta x,t)}{\partial t} - i(x+\Delta x,t) = 0 \quad (3.2)$$

Dividindo-se as equações. (3.1) e (3.2) por Δx e aplicando o limite $\Delta x \rightarrow 0$, tem-se as seguintes equações diferenciais

$$\frac{\partial v(x,t)}{\partial x} = -R \cdot i(x,t) - L \cdot \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} = -G \cdot v(x,t) + C \cdot \frac{\partial v(x,t)}{\partial t} \quad (3.4)$$

Estas equações caracterizam o comportamento da linha no domínio do tempo. Passando as equações para o domínio da frequência, para uma operação em regime permanente tem-se:

$$\frac{dV(x)}{dx} = -(R + j\omega L) \cdot I(x) \quad (3.5)$$

$$\frac{dI(x)}{dx} = -(G + j\omega C) \cdot V(x) \quad (3.6)$$

Derivando-se novamente em relação à x têm-se:

$$\frac{d^2V(x)}{dx^2} = -(R + j\omega L) \cdot \frac{dI(x)}{dx} \quad (3.7)$$

$$\frac{d^2I(x)}{dx^2} = -(G + j\omega C) \cdot \frac{dV(x)}{dx} \quad (3.8)$$

Estas equações podem ser agora facilmente simplificadas substituindo-se os termos $\frac{dV(x)}{dx}$ e $\frac{dI(x)}{dx}$ das equações (3.7) e (3.8) pelas equações (3.5) e (3.6) obtendo-se:

$$\frac{d^2V(x)}{dx^2} = (R + j\omega L) \cdot (G + j\omega C) \cdot V(x) \quad (3.9)$$

$$\frac{d^2I(x)}{dx^2} = (R + j\omega L) \cdot (G + j\omega C) \cdot I(x) \quad (3.10)$$

Definindo-se o termo comum nas equações (3.9) e (3.10) como $\gamma^2 = (R + j\omega L) \cdot (G + j\omega C)$ tem-se:

$$\frac{d^2V(x)}{dx^2} = \gamma^2 \cdot V(x) \quad (3.11)$$

$$\frac{d^2I(x)}{dx^2} = \gamma^2 \cdot I(x) \quad (3.12)$$

Onde: γ é conhecido como constante de propagação da linha [km^{-1}].

A solução para as equações diferenciais apresentadas acima tem a seguinte forma:

$$V(x) = K_1 e^{\gamma x} + K_2 e^{-\gamma x} \quad (3.13)$$

$$I(x) = K_3 e^{\gamma x} + K_4 e^{-\gamma x} \quad (3.14)$$

Supondo que o terminal receptor esteja localizado na posição $x = 0$ e assim o terminal emissor esteja localizado na posição $x = x_0$, onde x_0 representa o comprimento total da linha, podemos escrever as condições de contorno, como representado a seguir:

$$V(0) = K_1 + K_2 \quad (3.15)$$

$$I(0) = K_3 + K_4 \quad (3.16)$$

Desta forma têm-se duas relações entre os parâmetros K_1 , K_2 , K_3 e K_4 . Outras duas relações podem ser obtidas derivando-se as expressões (3.13) e (3.14) e igualando-as com as expressões (3.5) e (3.6).

$$K_1 \gamma e^{\gamma x} - K_2 \gamma e^{-\gamma x} = -(R + j\omega L) \cdot I(x) \quad (3.17)$$

$$K_3 \gamma e^{\gamma x} - K_4 \gamma e^{-\gamma x} = -(G + j\omega C) \cdot V(x) \quad (3.18)$$

Substituindo-se os valores de $V(x)$ e $I(x)$ das equações (3.13) e (3.14) nas equações (3.17) e (3.18) tem-se:

$$K_1 e^{\gamma x} - K_2 e^{-\gamma x} = \frac{-(R + j\omega L)}{\gamma} \cdot (K_3 e^{\gamma x} + K_4 e^{-\gamma x}) \quad (3.19)$$

$$K_3 e^{\gamma x} - K_4 e^{-\gamma x} = \frac{-(G + j\omega C)}{\gamma} \cdot (K_1 e^{\gamma x} + K_2 e^{-\gamma x}) \quad (3.20)$$

Como:

$$\frac{(R + j\omega L)}{\gamma} = \frac{(R + j\omega L)}{\sqrt{(R + j\omega L) \cdot (G + j\omega C)}} = \sqrt{\frac{(R + j\omega L)}{(G + j\omega C)}} \quad (3.21)$$

$$\frac{(G + j\omega C)}{\gamma} = \frac{(G + j\omega C)}{\sqrt{(R + j\omega L) \cdot (G + j\omega C)}} = \sqrt{\frac{(G + j\omega C)}{(R + j\omega L)}} \quad (3.22)$$

Neste ponto pode ser então definido o termo impedância característica da linha que é dado por:

$$Z_c = \sqrt{\frac{(R + j\omega L)}{(G + j\omega C)}}, [\Omega] \quad (3.23)$$

Logo para $x = 0$ as equações (3.19) e (3.20) podem ser escritas como (3.24) e (3.25):

$$K_1 - K_2 = -Z_c \cdot (K_3 + K_4) \quad (3.24)$$

$$K_3 - K_4 = -\frac{1}{Z_c} \cdot (K_1 + K_2) \quad (3.25)$$

A partir destas modificações pode-se então escrever duas equações desacopladas das quais podem ser calculados os parâmetros K_1 , K_2 , K_3 e K_4 , substituindo-se as equações (3.15) e (3.16) nas equações (3.24) e (3.25).

$$K_1 - K_2 = -Z_c \cdot I(0) \quad (3.26)$$

$$K_3 - K_4 = -\frac{1}{Z_c} \cdot V(0) \quad (3.27)$$

Resolvendo o sistema de quatro equações desacopladas formado pelas equações (3.15), (3.16), (3.26) e (3.27) tem-se:

$$V(x) = \left(\frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2} \right) \cdot V(0) - Z_c \cdot \left(\frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2} \right) \cdot I(0) \quad (3.28)$$

$$I(x) = \left(\frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2} \right) \cdot I(0) - \frac{1}{Z_c} \cdot \left(\frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2} \right) \cdot V(0) \quad (3.29)$$

Sejam as seguintes funções:

$$\text{sen}(x) = \frac{e^{jx} - e^{-jx}}{2j} \quad (3.30)$$

$$\text{cos}(x) = \frac{e^{jx} + e^{-jx}}{2} \quad (3.31)$$

$$\text{senh}(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{2} \quad (3.32)$$

$$\text{cosh}(x) = \frac{e^x + e^{-x}}{2} \quad (3.33)$$

As equações (3.28) e (3.29) podem ser reescritas utilizando-se as funções seno hiperbólico e cosseno hiperbólico:

$$V(x) = \cosh(\gamma x) \cdot V(0) - Z_c \text{senh}(\gamma x) \cdot I(0) \quad (3.34)$$

$$I(x) = \cosh(\gamma x) \cdot I(0) - \frac{1}{Z_c} \text{senh}(\gamma x) \cdot V(0) \quad (3.35)$$

Ou ainda na forma matricial como:

$$\begin{bmatrix} V(x) \\ I(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma x) & -Z_c \sinh(\gamma x) \\ -\frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma x) & \cosh(\gamma x) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V(0) \\ I(0) \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

Logo considerando um extremo da linha como sendo o terminal emissor e o outro extremo da linha como sendo o terminal receptor e a referência de posição localizada no terminal receptor, a equação (3.36) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} V_e(x_0) \\ I_e(x_0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma x_0) & -Z_c \sinh(\gamma x_0) \\ -\frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma x_0) & \cosh(\gamma x_0) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_r(0) \\ I_r(0) \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

Ou também:

$$\begin{bmatrix} V_r(0) \\ I_r(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma x_0) & +Z_c \sinh(\gamma x_0) \\ +\frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma x_0) & \cosh(\gamma x_0) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_e(x_0) \\ I_e(x_0) \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

Onde: V_e é a tensão no terminal emissor da linha e V_r é a tensão no terminal receptor. [18].

Vale salientar que caso a referência de posição esteja agora no terminal emissor, ou seja, $x = 0$, e o terminal receptor na posição $x = x_0$ a equação (3.37) pode ser escrita como na equação (3.39).

$$\begin{bmatrix} V_r(x_0) \\ I_r(x_0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma x_0) & -Z_c \sinh(\gamma x_0) \\ -\frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma x_0) & \cosh(\gamma x_0) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_e(0) \\ I_e(0) \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

3.2 Características Básicas das Linhas de Meio Comprimento de Onda.

A partir do modelo de parâmetros distribuídos de uma linha de transmissão algumas considerações básicas sobre o comportamento de uma linha de meio comprimento de onda exatos podem ser definidas.

Seja o quadripolo de uma linha de transmissão monofásica de parâmetros distribuídos com o comprimento l medido a partir do terminal receptor dado por:

$$\begin{bmatrix} V_e \\ I_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma l) & -Z_c \sinh(\gamma l) \\ -\frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma l) & \cosh(\gamma l) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

Onde: V_e e I_e , são a tensão transversal no condutor e a corrente longitudinal ao longo do condutor no terminal emissor; V_r e I_r , são a tensão e a corrente no terminal receptor. γ é a constante de propagação da linha; Z_c é a impedância característica da linha.

A análise apresentada para a linha monofásica pode ser estendida para a resposta da componente de seqüência positiva de uma linha trifásica suposta idealmente transposta em regime permanente.

3.2.1 Linha Operando em Vazio

Considerando-se as condições de contorno da linha operando em vazio, ou seja, $I_r = 0$ e $V_r \neq 0$, a relação entre as tensões no terminal receptor e no terminal emissor pode ser dada por:

$$\frac{V_r}{V_e} = \frac{1}{\cosh(\gamma l)} \quad (3.41)$$

Analisando-se uma linha sem perdas (em que, $\gamma = \alpha + j\beta = j\beta$, onde α é a constante de atenuação da linha e β é a constante de fase) a equação (3.41) pode ser reescrita como em (3.42).

$$\frac{V_r}{V_e} = \frac{1}{\cos(\beta l)} \quad (3.42)$$

Para uma linha ideal operando na frequência fundamental de 60 Hz, o comprimento de onda (λ) pode ser calculado através da relação entre a velocidade da luz e a frequência de operação do sistema como em (3.43).

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{300.000}{60} = 5.000 \text{ km} \quad (3.43)$$

Como a constante de fase é dada por $\beta = 2\pi/\lambda$, a equação (3.42) para uma linha de meio comprimento de onda ideal ($\lambda/2 = 2500 \text{ km}$) pode ser reescrita como em (3.44).

$$\left| \frac{V_r}{V_e} \right| = \left| \frac{1}{\cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{\lambda}{2}\right)} \right| = \left| \frac{1}{\cos(\pi)} \right| = 1 \quad (3.44)$$

Assim verifica-se que o ganho de tensão da linha de transmissão de meio comprimento de onda em vazio é unitário [19].

3.2.2 Tensão e Corrente no Meio da Linha

Outra característica particular para uma linha de meio comprimento de onda é o comportamento da tensão e da corrente no meio da linha. Considerando-se novamente uma linha ideal monofásica, o modelo apresentado em (3.33) pode ser reescrito como (3.45).

$$\begin{bmatrix} V_{ml} \\ I_{ml} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\beta l) & -jZ_c \sin(\beta l) \\ -j1/Z_c \sin(\beta l) & \cos(\beta l) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

Onde: V_{ml} é a tensão transversal no meio da linha; e I_{ml} é a corrente longitudinal de fase, no meio da linha.

Considerando-se o comprimento l medido a partir do terminal receptor, a tensão e a corrente no meio da linha, ou seja, $l = \lambda/4$ e escrevendo-se $\beta = 2\pi/\lambda$, tem-se que $\beta l = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{\lambda}{4} = \frac{\pi}{2}$ e (3.45) pode ser reescrito como (3.46):

$$\begin{bmatrix} V_{ml} \\ I_{ml} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) & -jZ_c \operatorname{sen}\left(\frac{\pi}{2}\right) \\ -j\frac{1}{Z_c} \operatorname{sen}\left(\frac{\pi}{2}\right) & \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

A partir de (3.46) pode-se escrever as relações (3.47) e (3.48):

$$|V_{ml}| = |Z_c \cdot I_r| \quad (3.47)$$

$$|I_{ml}| = \left| \frac{1}{Z_c} \cdot V_r \right| \quad (3.48)$$

Logo é possível concluir que a tensão no meio de uma linha de meio comprimento de onda depende exclusivamente da corrente no terminal receptor. Como a tensão no terminal receptor se mantém próxima de 1,0 pu a corrente será proporcional à potência neste terminal, que, em pu, será proporcional à razão entre a potência no terminal receptor e a potência característica. Analisando-se a corrente no meio da linha esta é diretamente proporcional à tensão no terminal receptor, ou seja, mantém-se sempre, para qualquer condição de carga, próxima de 1,0 pu.

Porém sabe-se que em meio comprimento de onda exato, existe um ponto de singularidade, assim a seqüência deste trabalho é desenvolvida para uma linha de um pouco mais de meio comprimento de onda, com uma margem suficiente de estabilidade.

3.2.3 Estabilidade

A linha de meio comprimento de onda exato deve ser tratada com um pouco de cuidado uma vez que exatamente no ponto de meio comprimento de onda tem-se um ponto de singularidade o que pode tornar a linha instável para pequenas variações de carga.

Para se garantir uma operação dentro dos limites de estabilidade em um sistema de transmissão, a defasagem angular entre a tensão no terminal de geração e a tensão no terminal de recepção não deve se situar entre 90° e 180° graus elétricos. Além disto, para se garantir uma margem suficiente de segurança, no que diz respeito à estabilidade, uma defasagem da ordem de 30° elétricos para operação no primeiro quadrante entre a tensão no terminal do gerador e a tensão terminal de recepção é normalmente adotada como valor limite.

Para linhas longas, ou seja, quando o seu comprimento elétrico ultrapassa o limite de 30° , para comprimentos elétricos situados no primeiro ou no segundo quadrante, é necessário que uma compensação seja instalada encurtando o seu comprimento elétrico para as margens permitidas, o que eleva significativamente os custos por unidade de comprimento de uma linha.

Entretanto em uma linha de um pouco mais que meio comprimento de onda uma característica interessante é observada. Para o caso em que a defasagem entre as tensões no terminal de geração e no terminal de recepção situa-se em torno de 190° elétricos, o seu comportamento é semelhante ao de uma linha cuja defasagem entre as tensões na geração e na recepção é de 10° ($190^\circ - 180^\circ$) elétricos situando-se assim no terceiro quadrante onde também apresenta um comportamento estável. Logo uma defasagem acima de 180° à 210° é considerada uma margem razoável para linhas cujo comprimento elétrico se localiza no terceiro quadrante.

No caso de variações na frequência ocorre um afastamento do comprimento físico da linha em relação ao meio comprimento de onda, o que afeta adversamente as características descritas sobre a linha de meio comprimento de onda. Assim há um risco de perda de estabilidade, ou seja, operação no segundo quadrante. Por isso é necessária certa margem no comprimento de sintonia, sendo mais seguro se a linha operar perto de 190° elétricos [6], [8], [9], [11], [13].

3.3 Descrição do Sistema Elétrico Analisado.

O sistema de transmissão analisado tem como base os dados da interligação Nordeste-Sudeste, a qual foi supostamente considerada com um comprimento de 2600 km de comprimento o que corresponde a um comprimento elétrico de $191,6^\circ$ elétricos.

A Tabela 3.1 apresenta os parâmetros longitudinais e transversais por unidade de comprimento para esta linha, em modos, calculados para uma frequência de 60 Hz, supondo a linha idealmente transposta.

A resistividade do solo foi considerada constante com a frequência e igual a 4000 $\Omega \cdot m$ [20].

Para a linha em questão a velocidade de propagação de uma onda de seqüência positiva pode ser calculada de acordo com a equação (3.49).

$$v = \frac{2\pi f}{\beta} = 293.084 \text{ km/s} \quad (3.49)$$

Onde f é a frequência de operação do sistema (Hz).

E assim o comprimento de onda não homopolar para esta linha é dado por:

$$\lambda = \frac{v}{f} = 4884,73 \text{ km} \quad (3.50)$$

Tabela 3.1 – Parâmetros Unitários Longitudinais e Transversais das Linhas do Tronco Nordeste-Sudeste, calculados para a frequência de 60 Hz.

Modos	Resistência unitária [Ω/km]	Indutância unitária [mH/km]	Capacitância Unitária [$\mu F/km$]
Homopolar	0,4352	3,8257	0,00935
Não-Homopolar	0,0161	0,7252	0,01604

3.4 Regime Permanente para Diferentes Condições de Operação

A partir das características básicas descritas anteriormente para uma linha de meio comprimento de onda, alguns casos específicos de operação em regime permanente foram implementados com o objetivo de fornecer uma melhor visualização sobre a sua operação.

Analisando-se o quadripolo do modelo de parâmetros distribuídos para a seqüência positiva da linha de transmissão longa, o perfil de tensão e de corrente ao longo do comprimento da linha pode ser facilmente monitorado para diferentes condições de operação.

Inicialmente determinam-se os pontos em que se deseja monitorar e através de uma associação em série de quadripolos é possível verificar a tensão e a corrente ao longo de todos os pontos desejados.

As condições de operação em estudo são apresentadas nos itens a seguir.

3.4.1 Perfil de Tensão e Corrente para Diferentes Carregamentos com Fator de Potência Unitário.

O perfil de tensão e de corrente de uma linha de transmissão de 2600 km de comprimento isolada, alimentada a partir de um barramento infinito, em regime permanente para diferentes níveis de carregamento e com fator de potência unitário pode ser visualizado na Figura 3.2 e na Figura 3.3, respectivamente. A potência foi injetada no terminal emissor, não sendo resultado da interação da linha com um sistema existente.

Observa-se que com o aumento do carregamento na linha ocorre uma pequena queda de tensão no terminal receptor, que pode ser corrigida para os níveis aceitáveis com um aumento da tensão no terminal emissor para 1,04 pu, para que os dois extremos se mantenham dentro dos níveis de tensão aceitáveis. Outra alternativa seria a instalação de uma compensação capacitiva em derivação da ordem de 3%.

O comportamento da tensão e da corrente na região central da linha para as diferentes situações de carregamento com fator de potência unitário pode ser observado analisando-se as equações (3.47) e (3.48).

As figuras 3.2 e 3.3 também mostram que o ponto ideal de operação, para uma linha de transmissão de um pouco mais de meio comprimento de onda, seria transmitindo próximo a sua potência característica. Nesta situação observa-se um perfil constante tanto de tensão quanto de corrente ao longo do comprimento da linha.

Outra característica relevante para o sistema em estudo é o comportamento da tensão no meio da linha para um carregamento acima da potência característica (P_c) da linha. Observa-se na Figura 3.2 que para este caso a tensão se mantém proporcional à razão entre a potência transmitida e a potência característica da linha, o que poderia ocasionar defeitos nessa região ou exigir isolamento diferenciado das torres ao longo da linha. Para a situação de operação em que a linha está transmitindo uma potência muito baixa, a tensão no meio da linha atinge valores extremamente reduzidos enquanto a corrente mantém-se próxima à nominal. Baseado nestas características, alternativas para reduzir as perdas nestas condições serão descritas na seqüência do texto.

3.4.2 Perfil de Tensão e Corrente para Diferentes Carregamentos com Variação do Fator de Potência.

O perfil de tensão e de corrente ao longo da linha para diferentes níveis de potência injetada no terminal emissor com fator de potência variável é apresentado nessa seção. A linha foi suposta isolada e conectada a uma barra infinita. A potência foi injetada no terminal emissor, não sendo, portanto, resultado da interação da linha com um sistema existente.

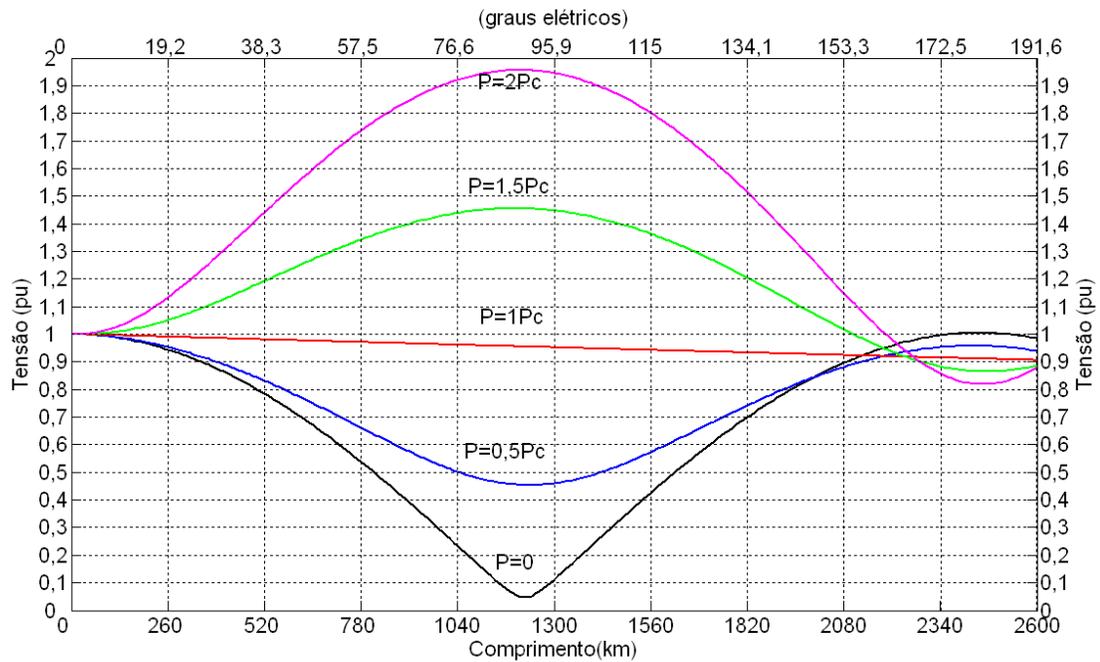


Figura 3.2 - Perfil de tensão ao longo de uma linha, 500 kV, 2600 km, para diferentes níveis de carregamento com fator de potência unitário. (P_c - potência característica da linha; P - potência injetada no terminal emissor).

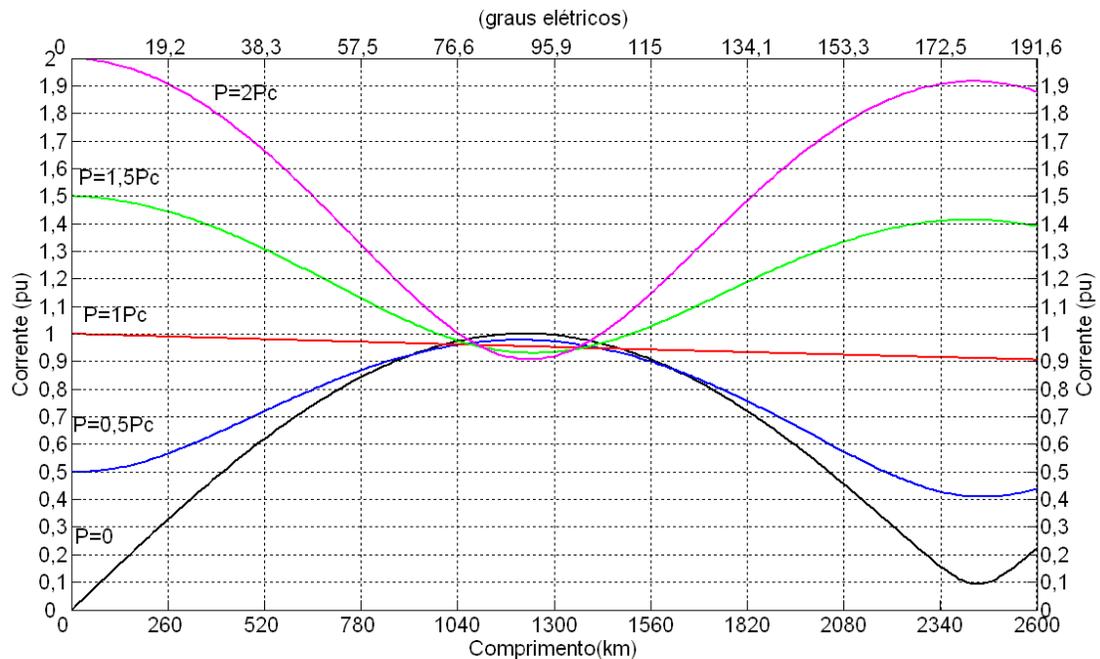


Figura 3.3 - Perfil de corrente ao longo de uma linha, 500 kV, 2600 km, para diferentes níveis de carregamento com fator de potência unitário. (P_c - potência característica da linha; P - potência injetada no terminal emissor)¹.

Como discutido anteriormente, o ponto de operação adequado para uma linha de um pouco mais de meio comprimento de onda corresponde à transmissão da potência característica. Nesta seção será analisado o impacto da potência transmitida ter fator de potência diferente do unitário. É importante destacar que não é economicamente justificável se efetuar o transporte de potência reativa ao longo das linhas de transmissão usuais no Brasil (400 km) e não é esperado que se transporte potência reativa em troncos muito longos.

Os perfis de tensão e de corrente para a linha operando com uma potência injetada no terminal emissor igual à potência característica, na tensão de 500 kV, variando-se o fator de potência, podem ser observados nas Figuras 3.4 e 3.5, respectivamente.

O perfil de tensão e de corrente ao longo da linha, apresentados nas Figuras 3.4 e 3.5 mostram que, para carregamentos cujo fator de potência difere do unitário, ocorrem sobretensões e sobrecorrentes em pontos da linha múltiplos de $\lambda/8$.

¹ O valor de 1,0 pu da corrente corresponde à razão entre a potência característica da linha e a tensão nominal.

Para o sistema operando com um fator de potência com características capacitivas a tensão no terminal de recepção se aproxima da tensão nominal. Por outro lado para o carregamento com características indutivas a tensão no terminal de recepção atinge nível muito baixo.

Para a operação com carregamentos com fator de potência diferente do unitário, o comportamento da tensão e da corrente na região central da linha ainda satisfaz as relações apresentadas em (3.47) e (3.48).

A operação com carregamentos em carga leve e pesada também é analisada com a variação do fator de potência. O perfil de tensão e de corrente para essas situações pode ser observado nas Figuras 3.6, 3.7, 3.8 e 3.9.

Analisando-se essas figuras é possível notar o efeito que uma carga reativa provoca na linha. Nota-se uma simetria dos perfis em relação ao quarto de onda e que os padrões dos perfis tanto de tensão quanto de corrente se repetem a cada meio comprimento de onda.

Percebe-se que, apesar dos perfis terem comportamentos bem diferentes de acordo com o carregamento da linha, na região de um quarto de comprimento de onda, o valor da corrente se mantém em níveis praticamente constantes, variando entre 0,94 a 0,98 pu para os casos em estudo.

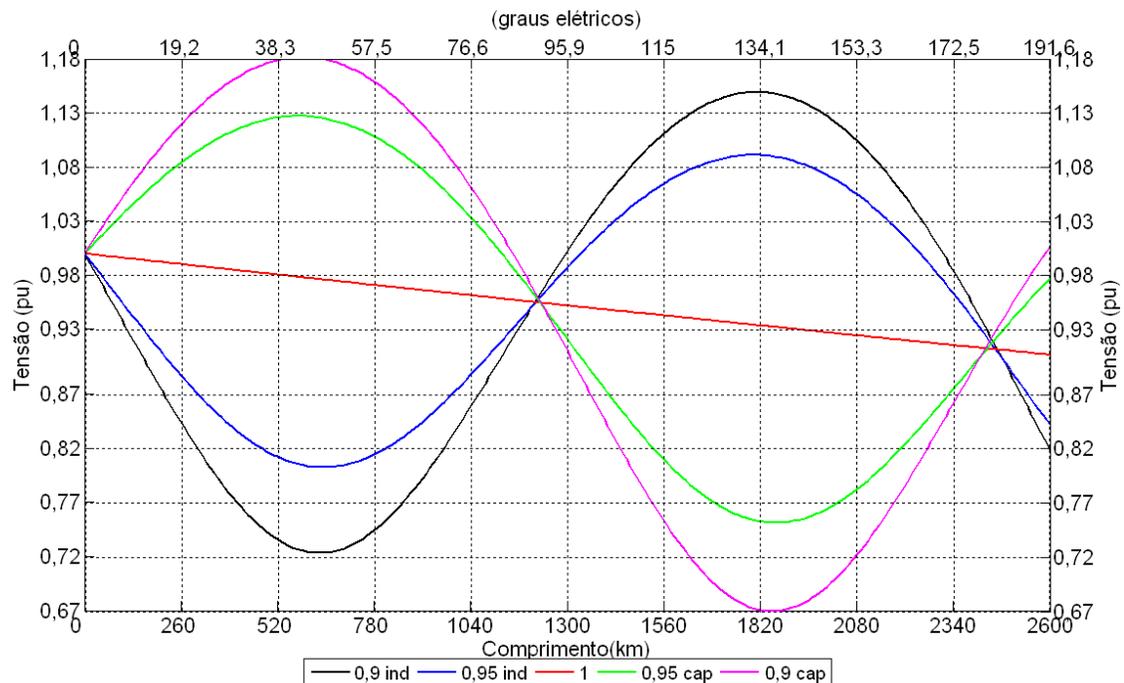


Figura 3.4 - Perfil de tensão ao longo de uma linha, 500 kV, 2600 km, para operação com potência transmitida igual à potência característica da linha com variação do fator de potência.

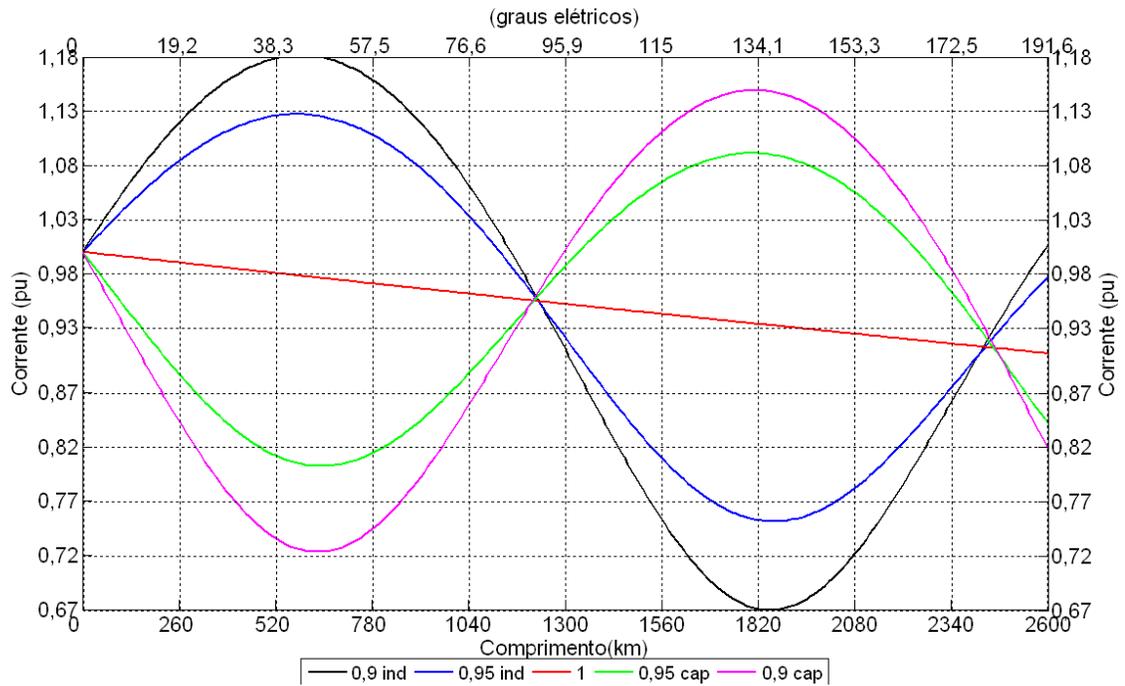


Figura 3.5 - Perfil de corrente ao longo de uma linha, 500 kV, 2600 km, para operação com potência transmitida igual à potência característica da linha com variação do fator de potência.

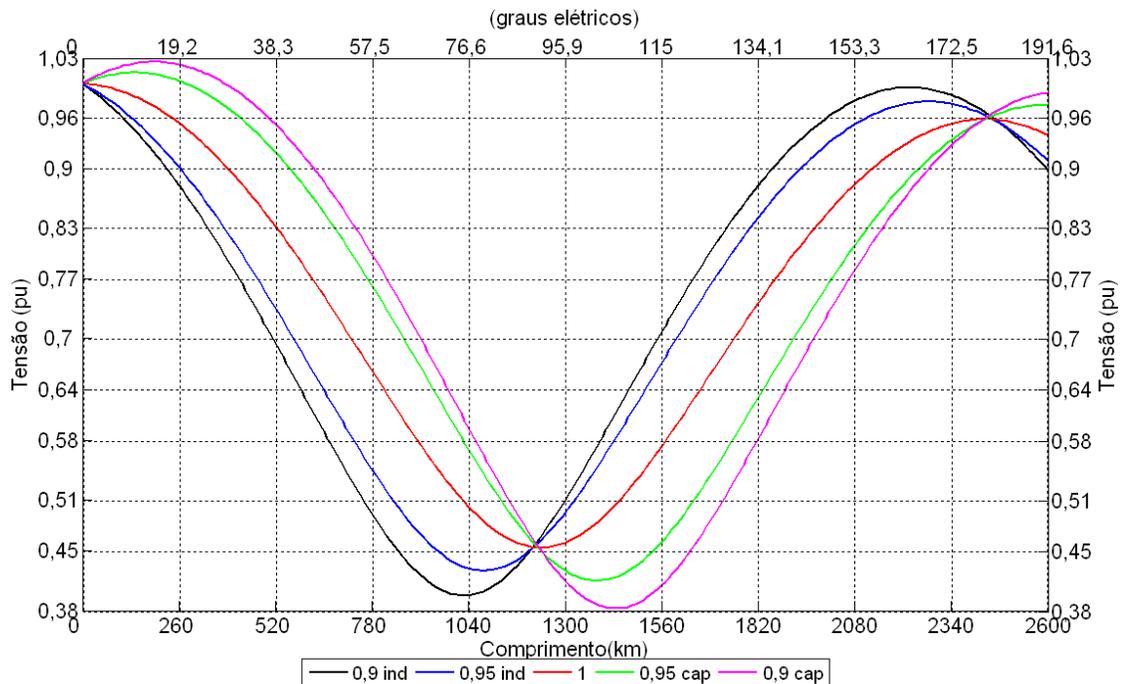


Figura 3.6 - Perfil de tensão ao longo de uma linha, 500 kV, 2600 km, para operação com potência transmitida igual a $0,5P_c$ da linha com variação do fator de potência.

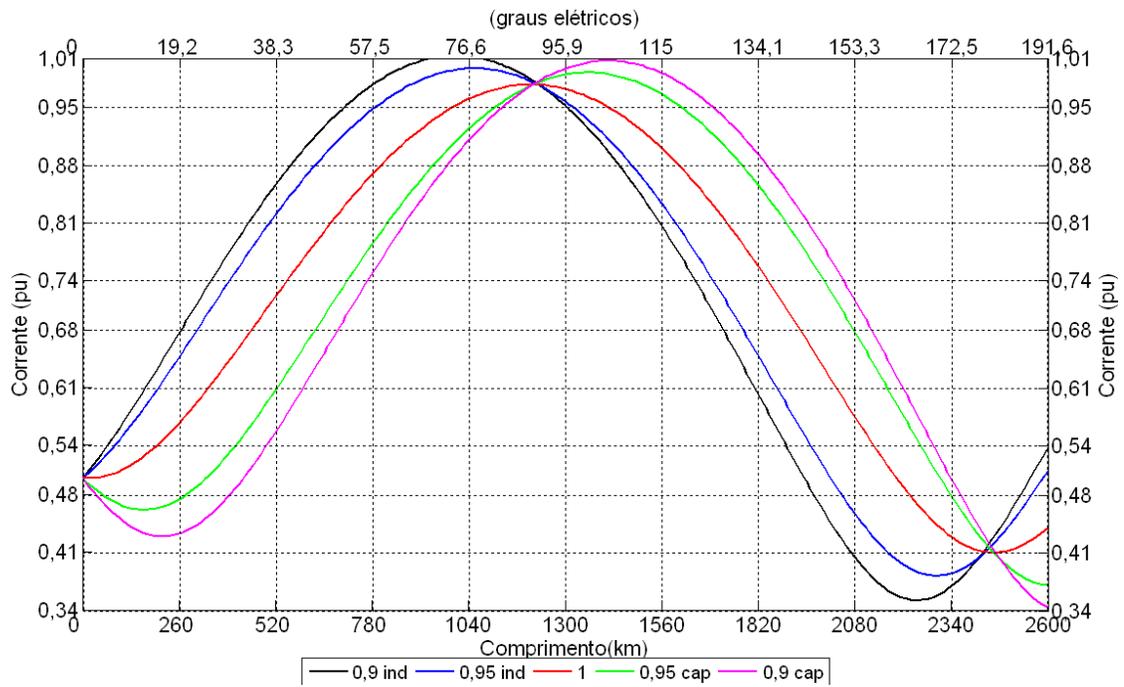


Figura 3.7 - Perfil de corrente ao longo de uma linha, 500 kV, 2600 km, para operação com potência transmitida igual a 0,5.Pc da linha com variação do fator de potência.

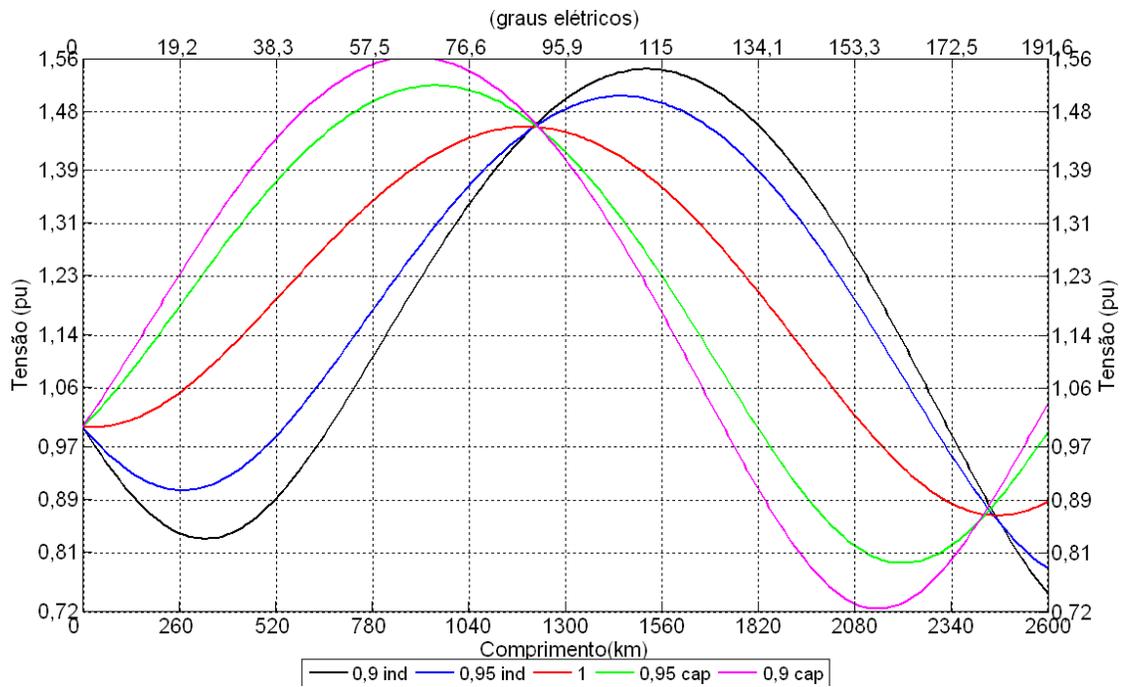


Figura 3.8 - Perfil de tensão ao longo de uma linha, 500 kV, 2600 km, para operação com potência transmitida igual a 1,5.Pc da linha com variação do fator de potência.

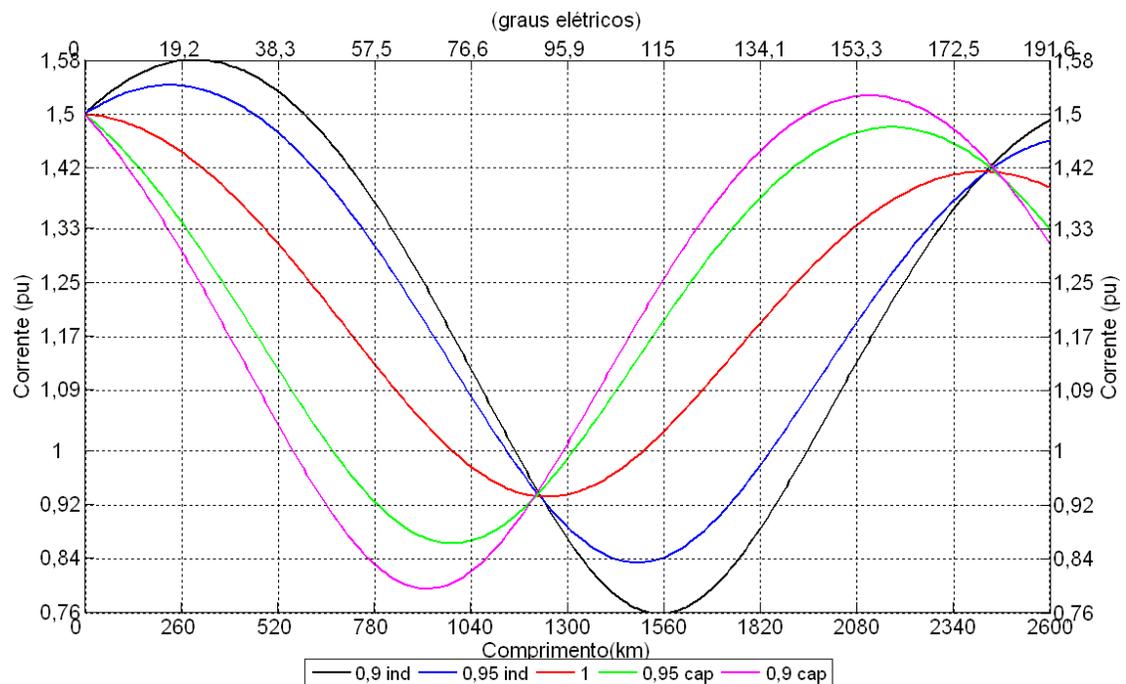


Figura 3.9 - Perfil de corrente ao longo de uma linha, 500 kV, 2600km, para operação com potência transmitida igual a 1,5.Pc da linha com variação do fator de potência.

Pelos resultados obtidos (Figura 3.4, Figura 3.6, Figura 3.8) pode-se perceber que uma linha com um pouco mais de meio comprimento de onda não deve transmitir potência com fator de potência diferente do unitário. No entanto, conforme explicado, não se espera que um tronco com as dimensões analisadas seja utilizado para transferir potência reativa de uma região para outra, mas sim para transporte de potência ativa.

3.4.3 Perda Ativa

Conforme apresentado nas Figuras 3.2 e 3.3 a tensão no meio da linha, para a situação de carga leve, assume valores muito baixos, enquanto a corrente se mantém próxima dos valores nominais na região central da linha. Assim as perdas ativas nessas situações podem atingir valores elevados.

Porém algumas alternativas visando diminuir estas perdas podem ser desenvolvidas resultando em reduções importantes.

Uma alternativa que se apresenta como uma forma natural para a redução das perdas ao longo da linha para diferentes níveis de carregamento é o uso de autotransformadores com tomadas variáveis conectados aos terminais emissores e receptores da linha.

Dessa forma, a tensão aplicada ao longo da linha pode ser controlada e assim, para baixos carregamentos, a tensão de operação da linha poderia ser reduzida a um nível em que a potência transmitida correspondesse à potência característica para esta nova tensão.

A potência característica para uma linha de transmissão pode ser calculada como sendo:

$$P_c = \frac{V^2}{Z_c} \quad (3.51)$$

Onde Z_c é a impedância característica da linha [Ω].

A potência característica da linha é diretamente proporcional ao quadrado da tensão de operação da linha. Assim, para uma determinada potência injetada no terminal emissor, se a tensão de operação da linha for ajustada para que esta potência seja da ordem da nova potência característica da linha, as perdas serão bruscamente reduzidas.

Os resultados apresentados mostram como é possível reduzir drasticamente as perdas ao longo de uma linha de transmissão de um pouco mais de meio comprimento de onda através do ajuste da tensão nos seus terminais.

Para a situação em que a linha está transmitindo 117,45 MW à redução das perdas utilizando-se uma tensão de 150 kV em relação às perdas na potência nominal de 500 kV chegam a mais de 80 %.

Verifica-se que para um nível de tensão em que a potência transmitida se aproxima da potência característica a redução das perdas é máxima.

A Tabela 3.2 e a Figura 3.10 apresentam as perdas ao longo de uma linha de transmissão para diferentes níveis de tensão nos terminais.

Na Tabela 3.2, P_c é a potência característica, P_t é a potência transmitida e p as perdas ao longo da linha (calculada como sendo a diferença entre potência no terminal emissor e a potência no terminal receptor).

Deve-se reforçar que o alto nível das perdas da linha de 500 kV estudada resulta do fato de esta não ter suas características otimizadas para uma transmissão de comprimento tão elevado. Um tronco de um pouco mais de meio comprimento de onda deve ter capacidade de transmitir grandes blocos de energia, ou seja, deve ter uma potência característica, muito maior do que a da linha de 500 kV sob análise. No entanto, a metodologia proposta para reduzir as perdas sob

condições de carga leve são adequadas para uma linha otimizada de um pouco mais de meio comprimento de onda de qualquer nível de tensão.

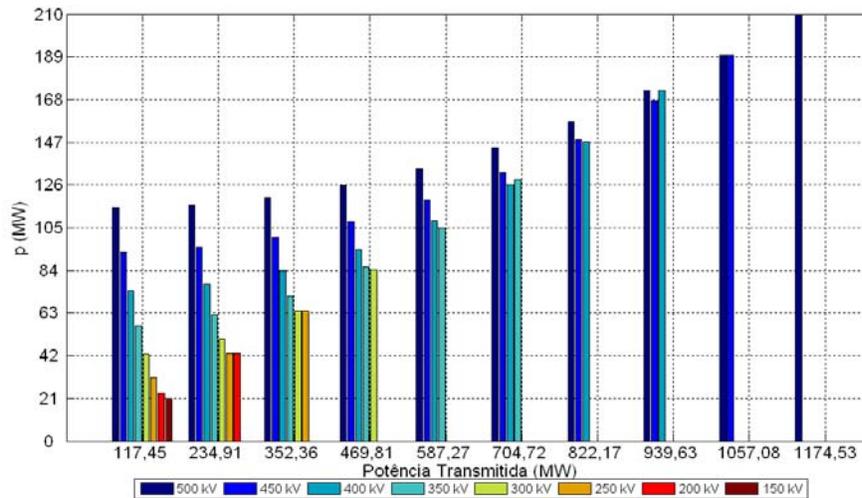


Figura 3.10 - Perda ativa ao longo de uma linha, 500 kV, 2600 km, para diferentes níveis de tensão de operação. (Pc na tensão nominal de 500 kV é igual a 1174,53 MW).

Tabela 3.2 – Perdas ao longo de uma linha de transmissão, 500 kV, 2600 km, para diferentes carregamentos e tensões de operação.

Pt (MW)	Tensão Nominal 500 kV		Tensão Nominal 400 kV		Tensão Nominal 300 kV		Tensão Nominal 200 kV		Tensão Nominal 150 kV	
	Pc=1174,5 (MW)		Pc=751,7 (MW)		Pc=422,8 (MW)		Pc=187,9 (MW)		Pc= 105,7 (MW)	
	Pt/Pc	p (MW)								
117,45	0,1	115,08	0,16	73,90	0,28	42,48	0,63	23,58	1,11	21,09
234,91	0,2	116,28	0,31	77,07	0,56	50,18	1,25	43,08	2,22	-
352,36	0,3	119,81	0,47	83,87	0,83	64,05	1,87	-	3,33	-
469,82	0,4	125,67	0,63	94,30	1,11	84,36	2,50	-	4,44	-
587,27	0,5	133,85	0,78	108,36	1,39	-	3,12	-	5,55	-
704,72	0,6	144,36	0,94	126,06	1,67	-	3,75	-	6,67	-
822,17	0,7	157,19	1,09	147,38	1,94	-	4,37	-	7,78	-
939,63	0,8	172,34	1,25	172,33	2,22	-	5,00	-	8,89	-
1057,08	0,9	189,82	1,41	-	2,5	-	5,62	-	10,00	-
1174,53	1,0	209,61	1,56	-	2,78	-	6,25	-	11,11	-

3.5 Conclusões Parciais

Pelas características básicas apresentadas para uma linha de transmissão de um pouco mais de meio comprimento de onda de acordo com as considerações feitas neste trabalho, esta transmissão se apresenta com uma solução natural para situações em que as distâncias de transmissão envolvidas são desta ordem de grandeza.

O perfil de tensão e de corrente ao longo da linha mostrou que a linha de um pouco mais de meio comprimento de onda, tomada como base neste estudo tem um melhor desempenho quando se está transmitindo uma potência próxima a sua potência característica.

Para carregamentos próximos ao da potência característica da linha, uma pequena queda de tensão pode ocorrer no terminal emissor para a linha estudada, que tem perda elevada e foi suposta isolada e conectada a um barramento infinito. No caso de um tronco de um pouco mais de meio comprimento de onda a linha seria otimizada para esta transmissão e teria um nível de perdas menor, não ocorrendo esta redução de tensão no terminal receptor. Entende-se também que o Elo CA seria conectado a um nó forte do sistema, o que iria auxiliar na manutenção do nível de tensão adequado no terminal receptor.

Conforme apresentado, para se manter uma margem de estabilidade em linhas de transmissão de um pouco mais de meio comprimento de onda recomenda-se que as linhas trabalhem com um comprimento elétrico em torno de 190° elétricos.

As perdas ao longo da linha de transmissão, para as situações em que um pequeno montante de potência está sendo transmitido, podem ser drasticamente reduzidas com a utilização de autotransformadores com tomadas (taps) variáveis reduzindo as tensões de operação na linha para que as perdas sejam mínimas.

Capítulo 4

METODOLOGIA OTIMIZADA PARA ESTUDO DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS EM UM SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

Ao se estudar o comportamento em regime transitório de um sistema de transmissão inúmeros casos de chaveamento e de faltas ao longo do sistema podem gerar perturbações que atinjam níveis indesejáveis.

Na maioria dos casos isto pode implicar na necessidade de processamento de inúmeros casos, considerando: os diferentes tipos de falta que podem ocorrer, a localização da falta, a condição anterior à perturbação na rede e a influência da seqüência de chaveamento (entre diferentes disjuntores e entre os pólos de cada disjuntor, incluindo eventuais falhas ou emperramento dos pólos, e as alternativas associadas ao religamento).

A não identificação de casos extremamente severos, assim como a interpretação equivocada ao se analisar a influência nos tempos de fechamento e abertura dos disjuntores podem trazer danos irreparáveis ao sistema [21].

Assim é importante efetuar uma análise sistemática à frequência fundamental do sistema trifásico antes do estudo de transitórios eletromagnéticos. A idéia básica dessa análise consiste em identificar as condições críticas (sobretensões sustentadas) para a frequência fundamental no sistema trifásico, e depois reprocessar estas condições utilizando um programa de simulação de transitórios eletromagnéticos, de modo a observar as sobretensões transitórias.

Este procedimento pode reduzir o número de simulações no domínio do tempo, já que as simulações na frequência fundamental também são realizadas com uma representação detalhada dos elementos da rede.

O presente método foi aplicado na localização das condições críticas, devido a diferentes tipos de curto-circuito, ao longo do sistema de transmissão de 2600 km proposto por [1], permitindo assim a identificação dos casos mais severos.

4.1 Constantes Generalizadas de um Circuito

Um dispositivo genérico de um sistema elétrico de potência pode ser representado por um circuito contendo quatro terminais, dois por onde entra a potência e dois por onde ela sai. Os dois terminais de entrada representam o lado emissor do circuito. Os dois terminais de saída, por sua vez, representam o lado receptor. Dizemos que o circuito é passivo, linear e bilateral; passivo porque não contém fontes de energia, linear porque as impedâncias de seus elementos são independentes da corrente que circula por eles e bilateral porque as impedâncias independem do sentido da corrente.

O circuito mais geral, constituído por um par de terminais de entrada e um par de terminais de saída, que possui uma impedância ligada entre cada dois dos quatro terminais, é chamado de circuito com dois pares de terminais ou quadripolo [22].

Qualquer elemento do sistema que seja linear, passivo e bilateral na forma de um quadripolo pode ser representado por um circuito T ou Π equivalente.

As relações entre as grandezas que compõe um quadripolo são dadas de acordo com as equações (4.1) e (4.2).

$$\begin{aligned} V_1 &= AV_2 + BI_2 \\ I_1 &= CV_2 + DI_2 \end{aligned} \tag{4.1}$$

$$\begin{aligned} V_2 &= AV_1 - BI_1 \\ I_2 &= -CV_1 + DI_1 \end{aligned} \tag{4.2}$$

Onde: V_1 e I_1 representam respectivamente a tensão e a corrente no terminal emissor; V_2 e I_2 representam respectivamente a tensão e a corrente no terminal receptor; e as constantes A, B, C, D, são chamadas de constantes generalizadas do circuito.

Um circuito geral de um quadripolo é representado por um diagrama similar ao da Figura 4.1, onde vemos um retângulo envolvendo os dois pares de terminais e contendo as letras que simbolizam as constantes generalizadas do circuito. As tensões e correntes que aparecem nas equações são também indicadas.

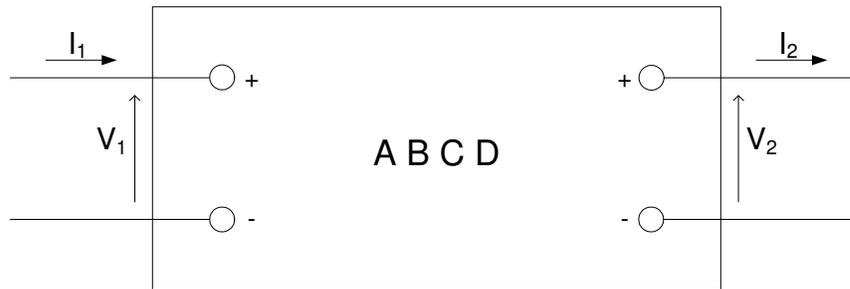


Figura 4.1 - Diagrama simbólico representando um circuito com dois pares de terminais (quadripolo).

Um sistema de potência pode ser representado por combinações, em série e em paralelo, de circuitos cujas constantes ABCD são conhecidas, sendo possível determinar as constantes do circuito equivalente aos diversos circuitos combinados [22].

A representação de dois circuitos em série pode ser feita de acordo com a Figura 4.2.

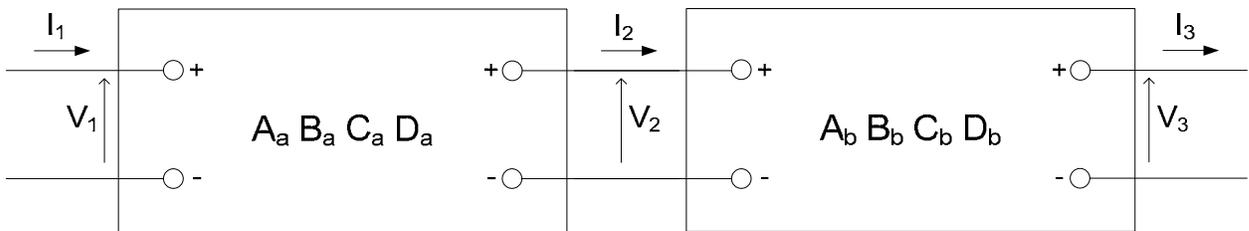


Figura 4.2 - Dois quadripolos em série.

Estes quadripolos em série podem ser reduzidos a um único quadripolo, escrevendo-se as equações de cada um separadamente e eliminando a tensão e a corrente na junção dos dois. Para o circuito “b” da Figura 4.2 teremos na junção a forma matricial de (4.3).

$$\begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_b & B_b \\ C_b & D_b \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_3 \\ I_3 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

A tensão e a corrente no terminal 1 em função da tensão e da corrente no terminal 2 são dados na forma matricial como em (4.4).

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_a & B_a \\ C_a & D_a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Logo a relação entre o terminal emissor e receptor para a associação em série na forma matricial é dada na equação (4.5).

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_a & B_a \\ C_a & D_a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_b & B_b \\ C_b & D_b \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_3 \\ I_3 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Assim temos que os valores das constantes generalizadas, para o quadripolo da associação em série, são iguais a (4.6).

$$\begin{aligned} A' &= A_a A_b + B_a C_b \\ B' &= A_a B_b + B_a D_b \\ C' &= A_b C_a + C_b D_a \\ D' &= B_b C_a + D_a D_b \end{aligned} \quad (4.6)$$

Dessa forma o quadripolo equivalente formado é mostrado na Figura 4.3.

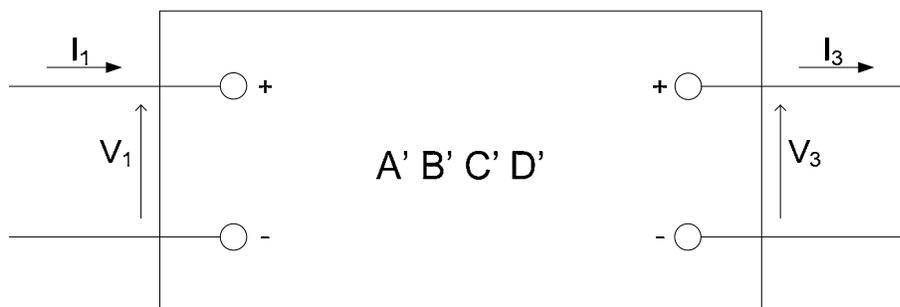


Figura 4.3 - Quadripolo equivalente da associação em série de dois outros quadripolos.

4.2 Representação do Sistema elétrico.

A partir da metodologia abordada no item anterior, a representação de um sistema elétrico genérico é apresentada na Figura 4.4. Neste sistema considerou-se apenas a barra de energização, os disjuntores colocados no início e no final da linha e a ocorrência de um curto-circuito ao longo da linha.

A modelagem de cada elemento deste sistema é então apresentada de acordo com a metodologia abordada.

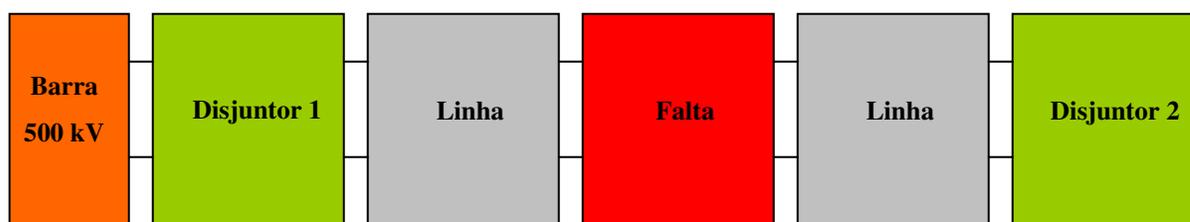


Figura 4.4 – Representação do Sistema

4.2.1 Modelo representativo dos estados de um disjuntor em regime permanente.

Os estados de cada pólo de um disjuntor podem ser representados por uma resistência com valor muito baixo no estado fechado ($R_D = 0,1 \Omega$), ou um valor muito elevado no estado aberto ($R_D = 10^6 \Omega$).

A Figura 4.5 mostra a representação de um modelo dos estados de um disjuntor em regime permanente de operação.

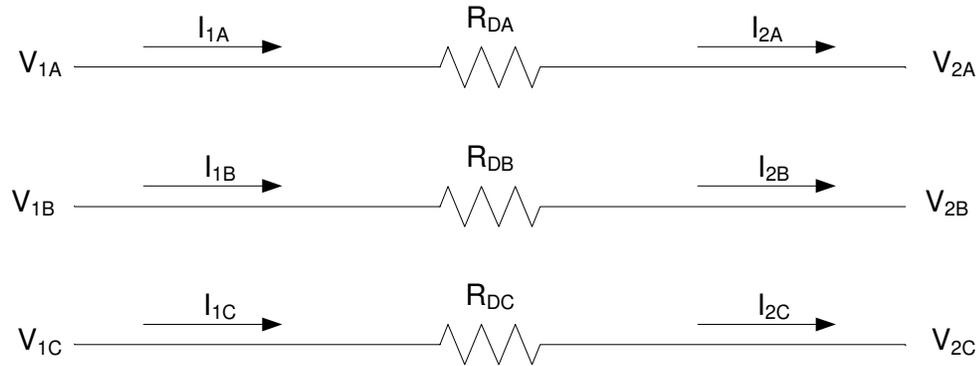


Figura 4.5 – Representação dos estados de um disjuntor em regime permanente.

Onde: V_{1A} , V_{1B} , V_{1C} , V_{2A} , V_{2B} , V_{2C} , representam a tensão entre a respectiva fase e a terra.

I_{1A} , I_{1B} , I_{1C} , I_{2A} , I_{2B} , I_{2C} , se referem às respectivas correntes nas fases.

R_{DA} , R_{DB} , R_{DC} , indicam a resistência de cada pólo do disjuntor.

Assim o quadripolo do disjuntor pode ser descrito por:

$$\begin{bmatrix} V_{2A} \\ V_{2B} \\ V_{2C} \\ I_{2A} \\ I_{2B} \\ I_{2C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -R_{DA} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -R_{DB} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -R_{DC} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{1A} \\ V_{1B} \\ V_{1C} \\ I_{1A} \\ I_{1B} \\ I_{1C} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

4.2.2 Modelo representativo de uma linha de transmissão longa na operação em regime permanente.

Seja a matriz impedância longitudinal em modos de uma linha de transmissão, suposta idealmente transposta, dada por:

$$Z = \begin{bmatrix} R_d + j\omega L_d & 0 & 0 \\ 0 & R_d + j\omega L_d & 0 \\ 0 & 0 & R_h + j\omega L_h \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Onde: R_d e L_d , representam, respectivamente, a resistência e a indutância não-homopolar (ou direta, e inversa, ou de seqüência positiva, neste caso igual a de seqüência negativa) por unidade de comprimento. R_h e L_h , representam respectivamente a resistência e a indutância homopolares (ou de seqüência zero) por unidade de comprimento.

A matriz admitância transversal em modos é dada por:

$$Y = \begin{bmatrix} j\omega C_d & 0 & 0 \\ 0 & j\omega C_d & 0 \\ 0 & 0 & j\omega C_h \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Onde: C_d e C_h , representam respectivamente a capacitância não-homopolar e a capacitância homopolar por unidade de comprimento.

Assim a matriz impedância característica tal como a matriz constante de propagação, em modos, pode ser obtida em (4.10) e (4.11), respectivamente.

$$Z_c = \sqrt{Z \cdot Y^{-1}} \quad (4.10)$$

$$\gamma = \sqrt{Z \cdot Y} \quad (4.11)$$

O quadripolo da linha em componentes modais, considerando-se a referência no terminal emissor, pode ser escrito da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} V_{2S} \\ I_{2S} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{1S} \\ I_{1S} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Onde: V_{2S} e I_{2S} são as matrizes de tensão e corrente em modos no terminal receptor, e V_{1S} e I_{1S} , são as matrizes tensão e corrente em modos no terminal emissor.

As constantes generalizadas da linha são dadas por:

$$A = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_d \cdot l) & 0 & 0 \\ 0 & \cosh(\gamma_d \cdot l) & 0 \\ 0 & 0 & \cosh(\gamma_h \cdot l) \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

$$B = \begin{bmatrix} -Z_{cd} \sinh(\gamma_d \cdot l) & 0 & 0 \\ 0 & -Z_{cd} \sinh(\gamma_d \cdot l) & 0 \\ 0 & 0 & -Z_{cd} \sinh(\gamma_h \cdot l) \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

$$C = \begin{bmatrix} -Z_{cd}^{-1} \sinh(\gamma_d \cdot l) & 0 & 0 \\ 0 & -Z_{cd}^{-1} \sinh(\gamma_d \cdot l) & 0 \\ 0 & 0 & -Z_{ch}^{-1} \sinh(\gamma_h \cdot l) \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

$$D = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_d \cdot l) & 0 & 0 \\ 0 & \cosh(\gamma_d \cdot l) & 0 \\ 0 & 0 & \cosh(\gamma_h \cdot l) \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

Onde: l , representa a distância em relação à referência, que no caso é o terminal emissor. Os termos Z_{cm} e γ_m indicam os elementos das matrizes de impedância característica e da constante de propagação, respectivamente, para as componentes não-homopolar e homopolar.

Como todo o sistema é representado em termo das componentes de fase é necessária a transformação das constantes generalizadas do quadripolo da linha.

A transformação das constantes generalizadas para componentes de fase é feita utilizando-se as matrizes de transformação de Clarke fase-modo e modo-fase, as quais são apresentadas em (4.17) e (4.18), já que a linha foi suposta idealmente transposta.

$$T_{CLARKE} = \begin{bmatrix} \frac{2}{\sqrt{6}} & -\frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{1}{\sqrt{6}} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

$$T_{CLARKE}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{2}{\sqrt{6}} & 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ -\frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ -\frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Dessa forma as novas constantes generalizadas podem ser obtidas como:

$$\begin{aligned} A' &= T_{CLARKE}^{-1} \cdot A \cdot T_{CLARKE} \\ B' &= T_{CLARKE}^{-1} \cdot B \cdot T_{CLARKE} \\ C' &= T_{CLARKE}^{-1} \cdot C \cdot T_{CLARKE} \\ D' &= T_{CLARKE}^{-1} \cdot D \cdot T_{CLARKE} \end{aligned} \quad (4.19)$$

Assim a linha de transmissão pode ser representada pelo seu respectivo quadripolo em componentes de fase como:

$$\begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A' & B' \\ C' & D' \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

4.2.3 Modelo representativo de faltas envolvendo a terra em regime permanente.

As faltas monofásicas, bifásicas e trifásicas envolvendo a terra podem ser representadas de acordo com o diagrama apresentado na Figura 4.6. A partir da configuração apresentada os quadripolos trifásicos para cada tipo de falta podem ser equacionados.

Assim um modelo genérico para os curtos-circuitos envolvendo a terra pode ser representado como em (4.21)

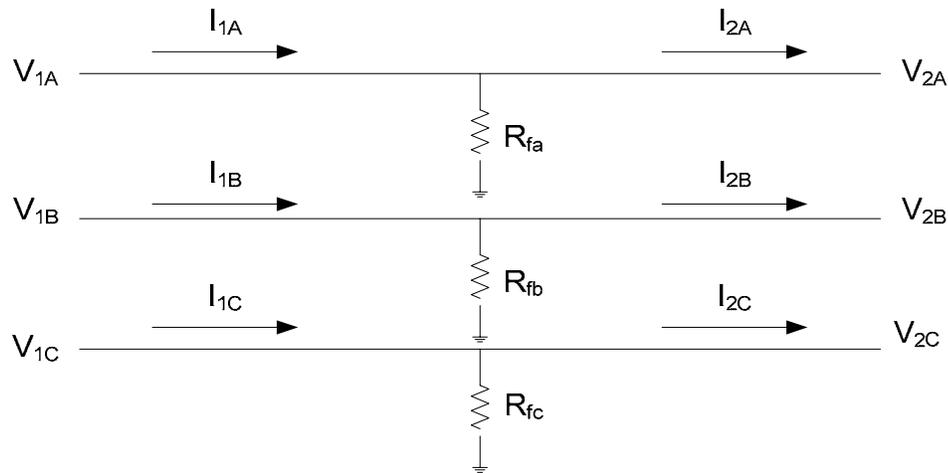


Figura 4.6 – Diagrama para representação de curto-circuito envolvendo a terra.

V_1 e V_2 representam a tensão entre a respectiva fase e a terra no terminal emissor e no terminal receptor do circuito, respectivamente.

I_1 e I_2 indicam as respectivas correntes nas fases no terminal emissor e receptor do circuito.

R_f representa a resistência de curto-circuito.

$$\begin{bmatrix} V_{2A} \\ V_{2B} \\ V_{2C} \\ I_{2A} \\ I_{2B} \\ I_{2C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\left(1/R_{fa}\right) & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\left(1/R_{fb}\right) & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -\left(1/R_{fc}\right) & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{1A} \\ V_{1B} \\ V_{1C} \\ I_{1A} \\ I_{1B} \\ I_{1C} \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

Onde: R_{fa} assume valor muito baixo para um curto-circuito envolvendo a fase A ($R_{fa} = 0,01 \Omega$) e um valor elevado quando não existir defeito na fase ($R_{fa} = 1 \text{ M}\Omega$). O mesmo procedimento se aplica para as demais fases.

4.2.4 Modelo representativo para falta bifásica (A-B) em regime permanente.

Outro tipo de falta estudado é a falta entre duas fases sem ligação com a terra. O modelo para essa situação pode ser observado na Figura 4.7:

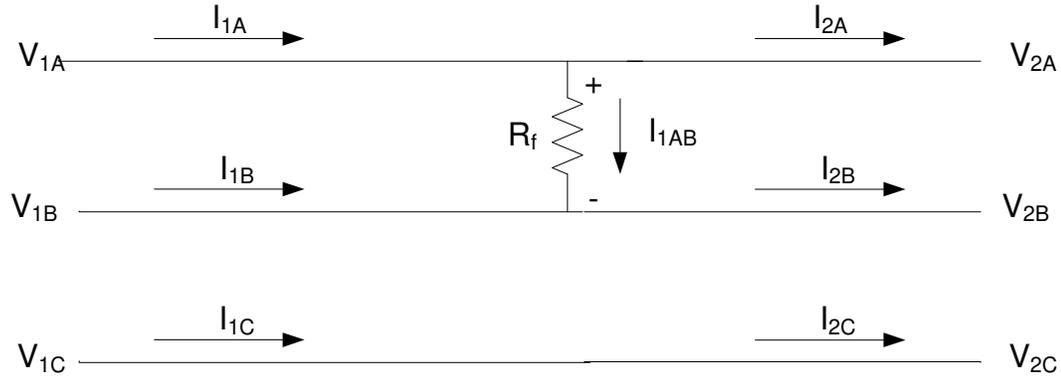


Figura 4.7 –Modelo para uma falta bifásica entre as fases (A-B).

Onde V_{1A} , V_{1B} , V_{1C} e V_{2A} , V_{2B} , V_{2C} representam a tensão entre a respectiva fase e a terra no terminal emissor e no terminal receptor do circuito, respectivamente.

I_{1A} , I_{1B} , I_{1C} e I_{2A} , I_{2B} , I_{2C} indicam as respectivas correntes nas fases no terminal emissor e receptor do circuito.

R_f representa a resistência de curto-circuito.

O quadripolo representando uma falta bifásica entre as fases (A-B) sem ligação com a terra é apresentado em:

$$\begin{bmatrix} V_{2A} \\ V_{2B} \\ V_{2C} \\ I_{2A} \\ I_{2B} \\ I_{2C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -(1/R_f) & (1/R_f) & 0 & 1 & 0 & 0 \\ (1/R_f) & -(1/R_f) & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{1A} \\ V_{1B} \\ V_{1C} \\ I_{1A} \\ I_{1B} \\ I_{1C} \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

Onde: R_f representa uma resistência de valor muito baixo para um curto-circuito envolvendo as fases (A-B) ($R_f = 0,01 \Omega$).

4.2.5 Modelo representativo para falta trifásica (A-B-C) em regime permanente.

A falta trifásica (A-B-C) sem contato com a terra pode ser modelada de acordo com a Figura 4.8.

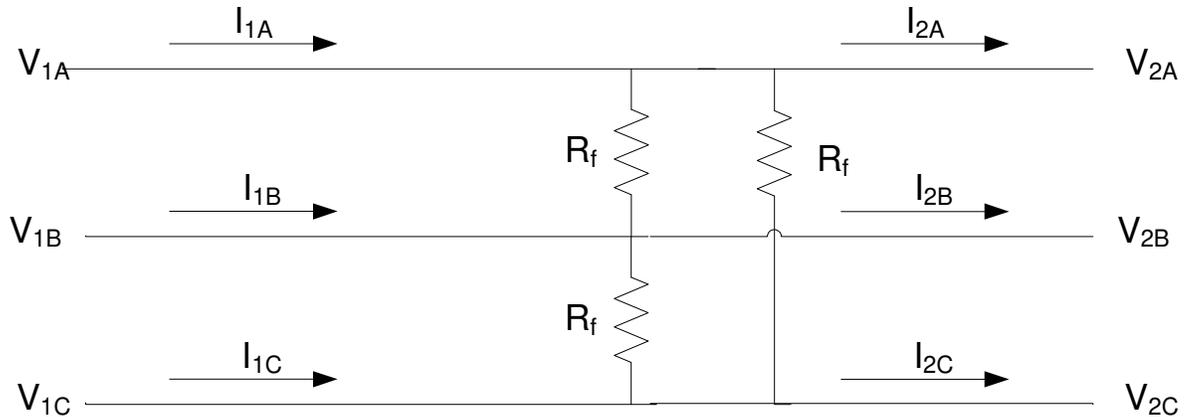


Figura 4.8 –Modelo para uma falta Trifásica (A-B-C).

Onde V_{1A} , V_{1B} , V_{1C} e V_{2A} , V_{2B} , V_{2C} representam a tensão entre a respectiva fase e a terra no terminal emissor e no terminal receptor do circuito, respectivamente.

I_{1A} , I_{1B} , I_{1C} e I_{2A} , I_{2B} , I_{2C} indicam as correntes nas fases no terminal emissor e receptor do circuito, respectivamente.

R_f representa a resistência de curto-circuito.

O quadripolo para a falta trifásica de acordo com o modelo apresentado é:

$$\begin{bmatrix} V_{2A} \\ V_{2B} \\ V_{2C} \\ I_{2A} \\ I_{2B} \\ I_{2C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -(2/R_f) & (1/R_f) & (1/R_f) & 1 & 0 & 0 \\ (1/R_f) & -(2/R_f) & (1/R_f) & 0 & 1 & 0 \\ (1/R_f) & (1/R_f) & -(2/R_f) & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{1A} \\ V_{1B} \\ V_{1C} \\ I_{1A} \\ I_{1B} \\ I_{1C} \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

Onde: R_f representa uma resistência de valor muito baixo para um curto-circuito trifásico ($R_f = 0,01 \Omega$).

4.2.6 Cálculo das Tensões e Correntes ao Longo do Circuito.

Para o sistema elétrico apresentado na Figura 4.4 o cálculo das tensões e correntes ao longo do circuito utilizando-se da metodologia apresentada nos itens anteriores pode ser feito seguindo-se os seguintes passos.

Escolha das características de cada elemento do sistema, como: o estado de cada pólo do disjuntor, tipo de falta, local de ocorrência da falta, parâmetros da linha de transmissão, comprimento da linha.

- Montagem do quadripolo equivalente.
- Definição das condições de contorno do sistema.
- Determinação das tensões e correntes nos terminais, emissor e receptor, do quadripolo equivalente.
- Determinação das tensões e correntes nos terminais, emissor e receptor, de cada quadripolo.

A associação de quadripolos em série para o sistema da Figura 4.4 pode ser feita da seguinte forma:

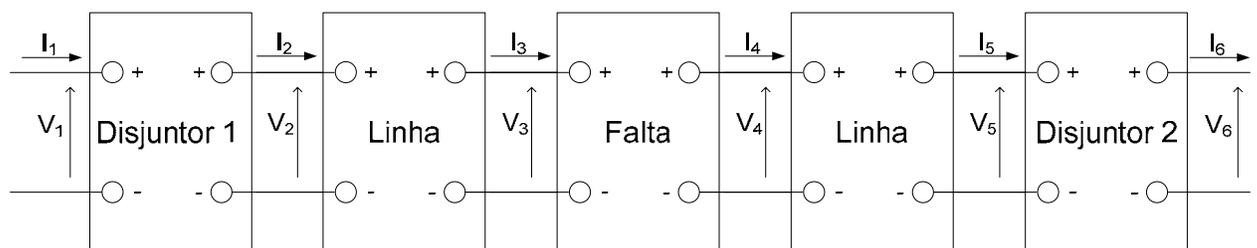


Figura 4.9 – Associação em série dos quadripolos do Sistema.

Logo o quadripolo equivalente do sistema pode ser representado pela Figura 4.10.

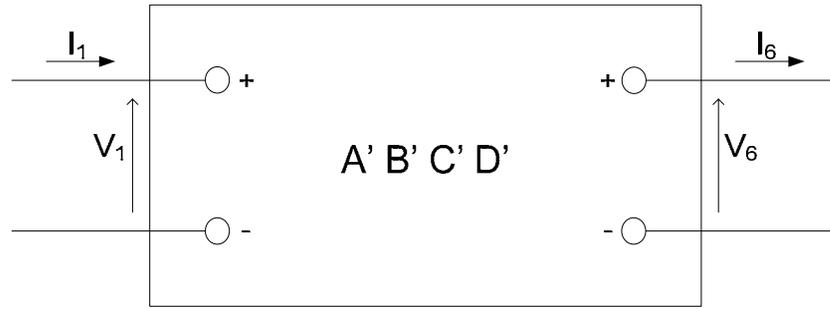


Figura 4.10 – Quadripolo equivalente da associação em série dos quadripolos do sistema.

Onde: $A' B' C' D'$ são as constantes generalizadas do quadripolo equivalente.

Considerando que para o sistema em estudo as condições de contorno são conhecidas, como por exemplo, no caso da linha se encontrar em vazio V_1 é a tensão no barramento de geração e I_6 é a corrente no terminal remoto da linha ($I_6=0$), logo as demais variáveis podem ser calculadas da seguinte forma:

$$\begin{aligned} V_6 &= (A' - (B' D'^{-1} C')) V_1 + (B' D'^{-1}) I_6 \\ I_1 &= (-D'^{-1} C') V_1 + (D'^{-1}) I_6 \end{aligned} \quad (4.24)$$

Aplicando as condições de contorno teremos então a seguinte situação:

$$\begin{aligned} V_6 &= (A' - (B' D'^{-1} C')) V_1 \\ I_1 &= (-D'^{-1} C') V_1 \end{aligned} \quad (4.25)$$

Como agora as variáveis (V_1 e I_1) tensão e corrente no início da linha são conhecidas, as tensões e correntes em qualquer ponto do sistema podem ser calculadas de acordo com a equação (4.2).

4.3 Descrição do Sistema.

Tomando-se como base os dados do sistema proposto por [1], o qual é formado pela interligação das linhas Norte-Sul I, Norte-Sul II e Nordeste-Sudeste, formou-se um tronco de aproximadamente 2600 km conforme mostrado na Figura 4.11.

Para o caso proposto considerou-se a barra de geração localizada em Serra da Mesa. A partir deste ponto o tronco foi então formado pelas interligações das linhas: Norte-Sul I, Norte-Sul II e de parte da Nordeste-Sudeste.

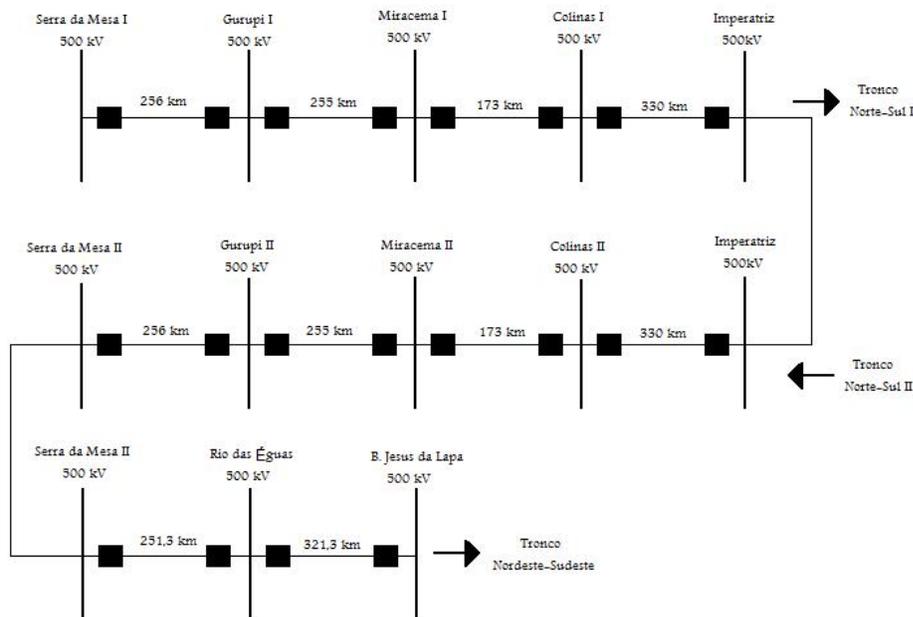


Figura 4.11 - Diagrama unifilar representando a interligação de linhas de 500 kV formando um tronco de 2600 km.

Como foram utilizados três trechos de linhas com características diferentes, representaram-se cada trecho de acordo com seus parâmetros:

- *Parâmetros do Tronco Norte-Sul I.*

O tronco Norte-Sul I é constituído pelas linhas Serra da Mesa – Gurupi – Miracema – Colinas – Imperatriz, conforme mostrado na Figura 4.11.

No cálculo dos parâmetros elétricos, a resistividade do solo foi considerada constante com a frequência e igual a $4000 \Omega.m$ [20].

Na Tabela 4.1 são apresentados os parâmetros elétricos longitudinais e transversais por unidade de comprimento para esta linha suposta idealmente transposta, em componentes modais, calculados para uma frequência de 60 Hz.

Tabela 4.1 – Parâmetros unitários longitudinais e transversais das linhas do tronco Norte-Sul I, calculados para a frequência de 60 Hz.

Modos	Resistência unitária [Ω /km]	Indutância unitária [mH/km]	Capacitância unitária [μ F/km]
Homopolar	0,4696	4,1849	0,00726
Não - Homopolar	0,0159	0,7081	0,01613

- *Parâmetros do Tronco Norte-Sul II.*

O tronco Norte-Sul II é constituído pelas linhas Imperatriz – Colinas – Miracema – Gurupi – Serra da Mesa, conforme mostrado na Figura 4.11.

Na Tabela 4.2 são apresentados também os parâmetros elétricos longitudinais e transversais por unidade de comprimento para esta linha, em componentes modais, calculados para a frequência de 60 Hz, considerando a resistividade do solo constante com a frequência e igual a 4000 Ω .m [20], supondo a linha idealmente transposta.

Tabela 4.2 – Parâmetros unitários longitudinais e transversais das linhas do tronco Norte-Sul II calculados para a frequência de 60 Hz.

Modos	Resistência unitária [Ω /km]	Indutância unitária [mH/km]	Capacitância unitária [μ F/km]
Homopolar	0,4352	3,8257	0,00936
Não - Homopolar	0,0161	0,7253	0,01603

- *Parâmetros do Tronco Nordeste Sudeste.*

Parte do tronco Nordeste - Sudeste utilizado nestas simulações é constituído pelas linhas Serra da Mesa – Rio da Éguas – Bom Jesus da Lapa, conforme mostrado na Figura 4.11.

Na Tabela 4.3 são apresentados também os parâmetros longitudinais e transversais por unidade de comprimento para esta linha, em componentes modais, calculados para uma frequência de 60 Hz, supondo a linha idealmente transposta.

A resistividade do solo foi considerada constante com a frequência e igual a 4000 Ω .m [20].

Tabela 4.3 – Parâmetros unitários longitudinais e transversais das linhas do tronco Nordeste Sudeste calculados a 60 Hz.

Modos	Resistência [Ω /km]	Indutância [mH/km]	Capacitância [μ F/km]
Homopolar	0,4352	3,8257	0,00935
Não - Homopolar	0,0161	0,7252	0,01604

4.4 Determinação da Impedância Longitudinal do Sistema.

A partir dos parâmetros longitudinais e transversais da linha apresentados na seção anterior, a impedância longitudinal em função do comprimento da linha pode ser representada como a seguir.

Devido ao grande comprimento da linha em estudo, a sua representação matemática foi feita utilizando-se as equações hiperbólicas. Assim o modelo Π equivalente da linha de transmissão pode ser montado como na Figura 4.12.

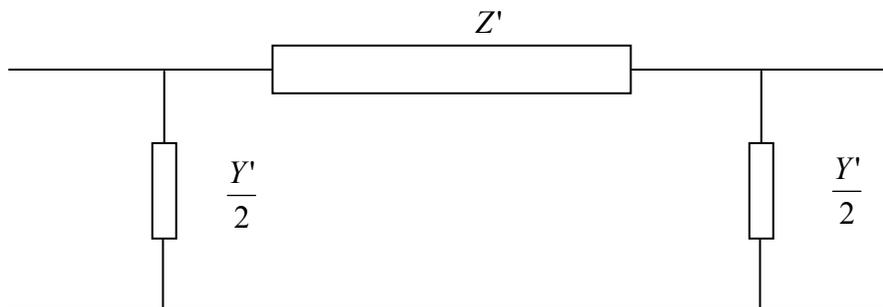


Figura 4.12 – Modelo Π equivalente de uma linha de transmissão monofásica ou de um modo de propagação.

Onde:

$$Z' = Z_c \sinh(\gamma l) \quad (4.26)$$

$$\frac{Y'}{2} = \frac{1}{Z_c} \tanh(\gamma l) \quad (4.27)$$

Sendo: Z_c a impedância característica da linha monofásica; γ a constante de propagação da linha monofásica; l comprimento da linha.

De posse dos parâmetros longitudinais unitários homopolares e não-homopolares, as impedâncias longitudinais homopolar e não-homopolar foram calculadas de acordo com o modelo Π mostrado anteriormente e são apresentadas na Figura 4.13 em função do comprimento da linha. Neste caso utilizou-se somente os parâmetros da linha Norte-Sul I suposta de 2600 km.

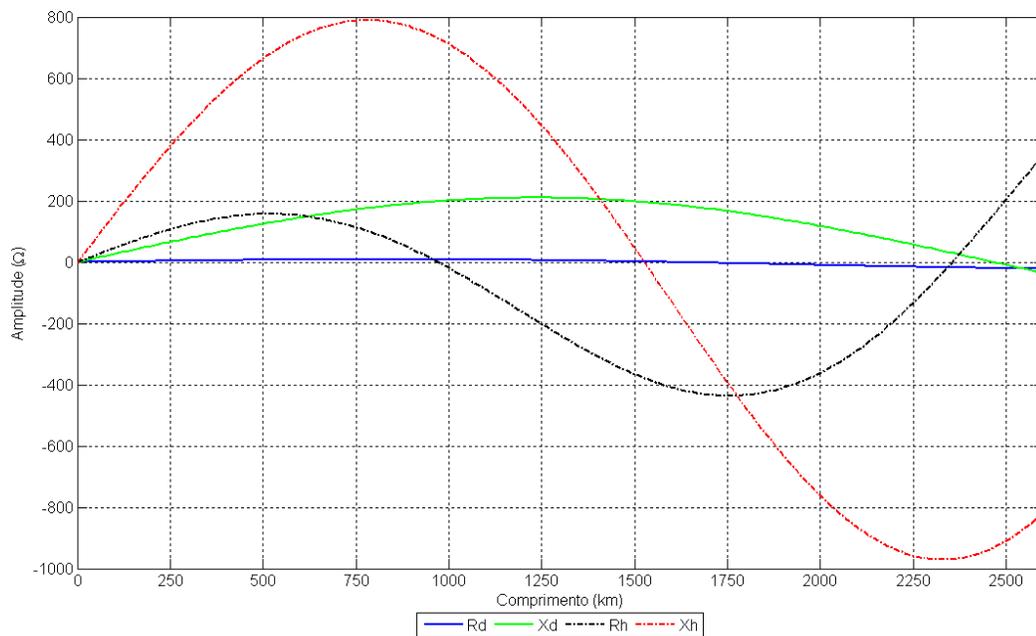


Figura 4.13 – Impedância Longitudinal em componentes homopolares e não-homopolares, em função do comprimento da linha para o modelo Π da linha proposto.

Onde: R_d e X_d representam a resistência e a reatância não-homopolares.

R_h e X_h representam a resistência e a reatância homopolar.

A Figura 4.13 apresenta claramente a característica de meia onda, da linha isolada em estudo, observando-se a impedância longitudinal não-homopolar.

Analisando-se o comportamento da impedância longitudinal homopolar, verifica-se que em 2600 km essa componente tem aproximadamente um comprimento de onda completo.

A análise da impedância longitudinal em função do comprimento da linha é de extrema importância antes de se iniciar a análise de curto-circuito no sistema, uma vez que é possível

determinar corretamente as características do sistema tanto para as componentes não-homopolares quanto para a componente homopolar.

4.5 Análise de curto-circuito ao longo do sistema.

Para a análise de curto-circuito ao longo do sistema, cada trecho de linha representado na Figura 4.11 foi modelado como um quadripolo, como o quadripolo genérico apresentado na Figura 4.14.

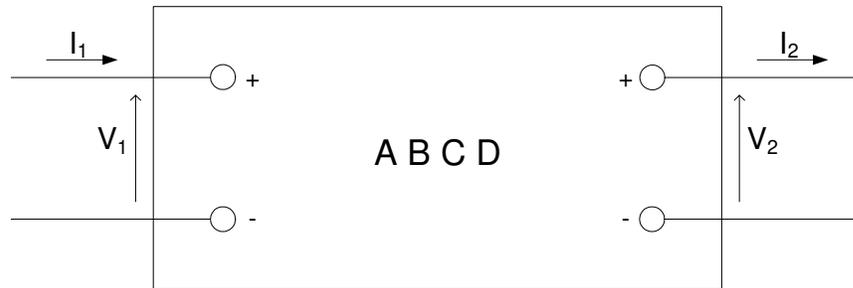


Figura 4.14 – Quadripolo genérico representando o modelo de uma linha de transmissão.

Onde: V_1 e I_1 representam a tensão e a corrente no terminal emissor; V_2 e I_2 são a tensão e a corrente no terminal receptor; A, B, C e D são as constantes generalizadas do quadripolo.

A modelagem matemática utilizada para a representação de cada trecho da linha de transmissão na forma de quadripolo foi feita de acordo com a equação (4.20).

Na montagem do sistema também foram considerados disjuntores no início e no fim da linha, os quais foram modelados matematicamente na forma de quadripolos conforme modelo apresentado em (4.7).

Para a análise de curto-circuito ao longo do sistema foram inseridos ao longo da linha os quadripolos representando os modelos de curto-circuito fase-terra, bifásico terra (AB-t), trifásico terra (ABC-t), bifásico (A-B) e trifásico (A-B-C), cujos modelos matemáticos estão apresentados nas equações (4.21), (4.22) e (4.23).

Para as simulações em estudo considerou-se o sistema como sendo alimentado por uma barra infinita de 500 kV de tensão de linha, e o terminal remoto da linha aberto.

Assim foi montado um processo iterativo no qual a cada 10 km da linha os níveis de tensão e de corrente, nos pontos de monitoração, eram calculados para os diferentes tipos de curto-circuito, varrendo assim toda a extensão da linha.

Foram monitorados os valores sustentados a 60 Hz da tensão e da corrente em cada subestação apresentada na Figura 4.11. Os resultados para essas simulações podem ser conferidos nas Figuras 4.15 a 4.25.

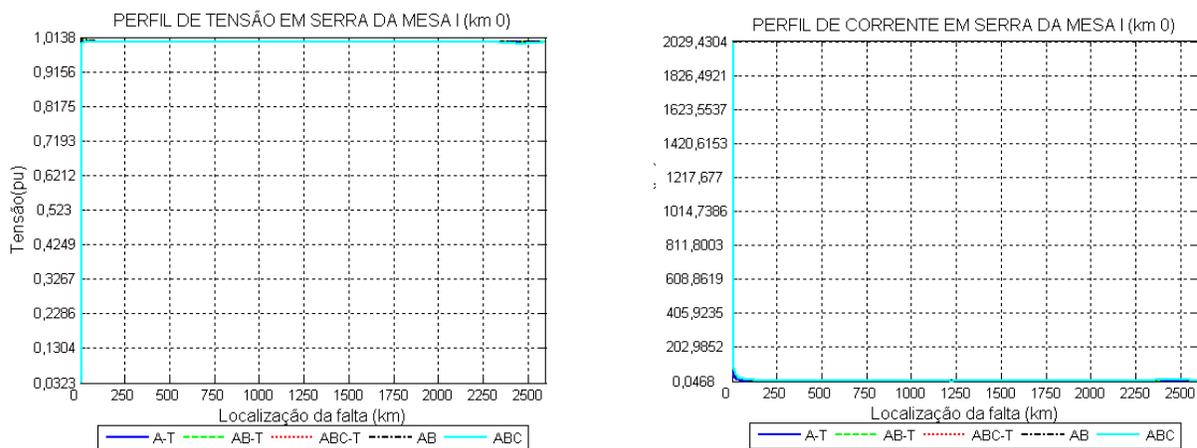


Figura 4.15 – Perfil de tensão e corrente monitorados em SERRA DA MESA I (km 0) para diferentes condições de curto-circuito ao longo da linha.

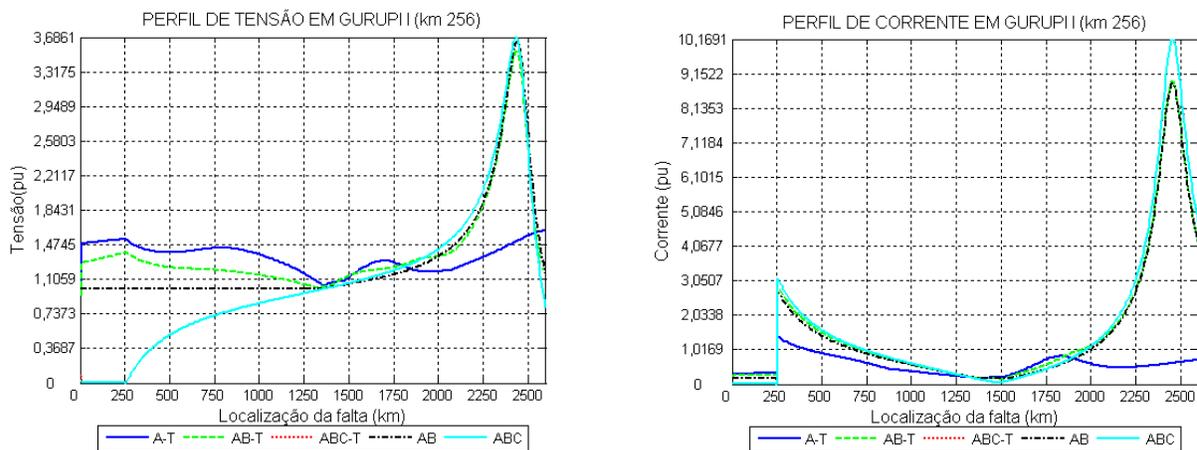


Figura 4.16 – Perfil de tensão e corrente monitorados em GURUPI I (km 256) para diferentes condições de curto-circuito ao longo da linha.

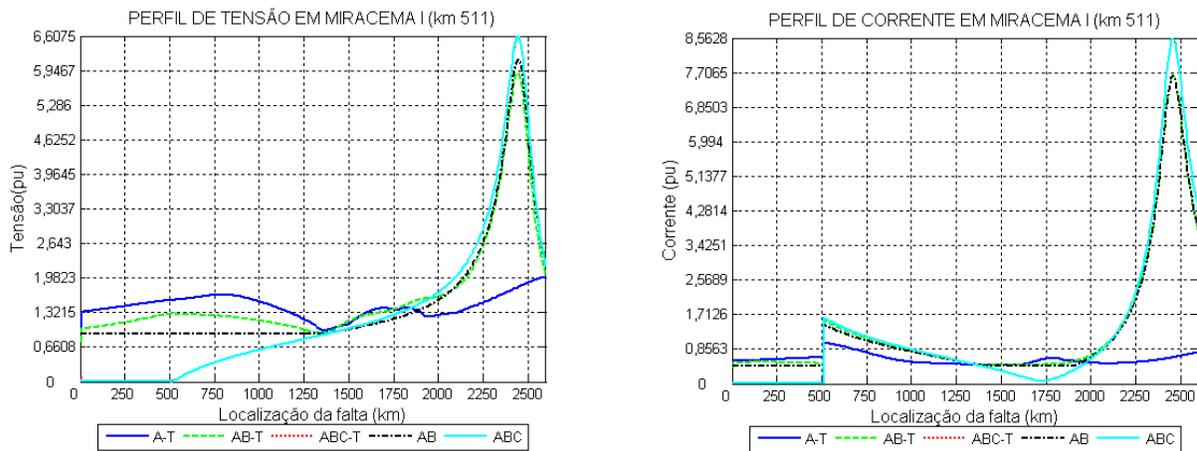


Figura 4.17 – Perfil de tensão e corrente monitorados em MIRACEMA I (km 511) para diferentes condições de curto-circuito ao longo da linha.

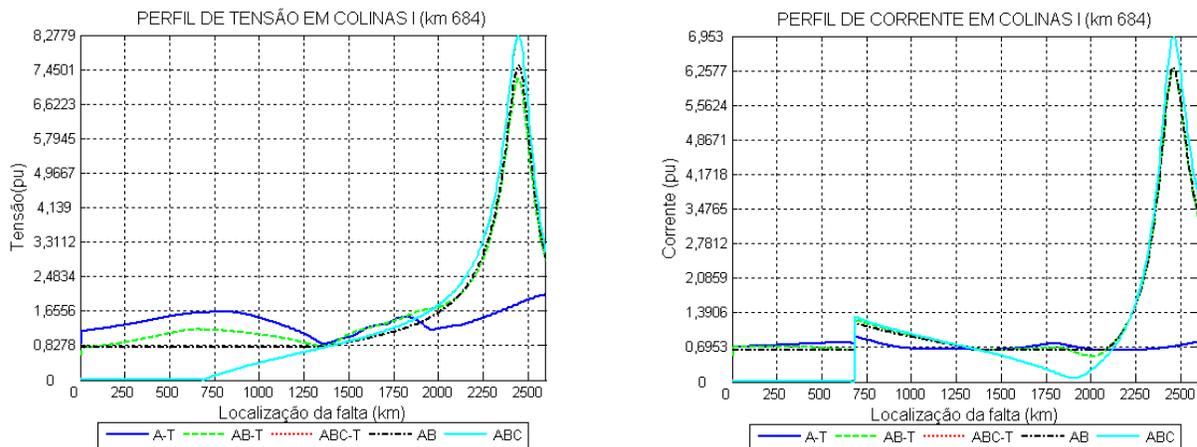


Figura 4.18 – Perfil de tensão e corrente monitorados em COLINAS I (km 684) para diferentes condições de curto-circuito ao longo da linha.

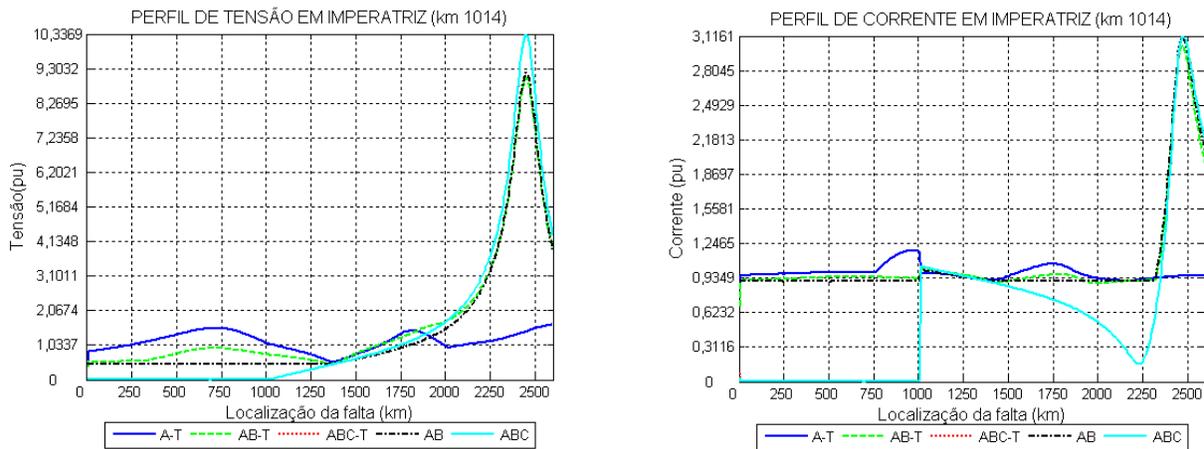


Figura 4.19 – Perfil de tensão e corrente monitorados em IMPERATRIZ (km 1014) para diferentes condições de curto-circuito ao longo da linha.

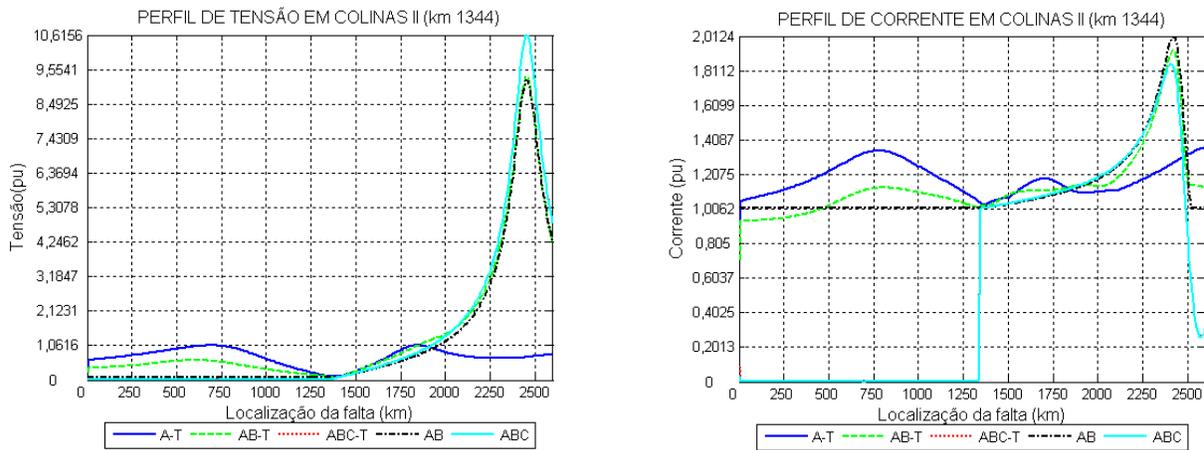


Figura 4.20 – Perfil de tensão e corrente monitorados em COLINAS II (km 1344) para diferentes condições de curto-circuito ao longo da linha.

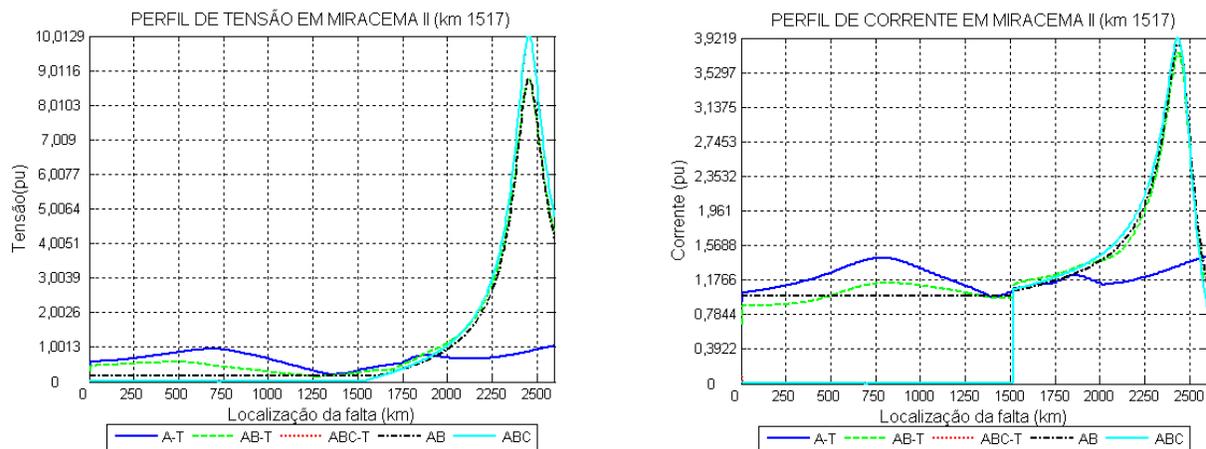


Figura 4.21 – Perfil de tensão e corrente monitorados em MIRACEMA II (km 1517) para diferentes condições de curto-circuito ao longo da linha.

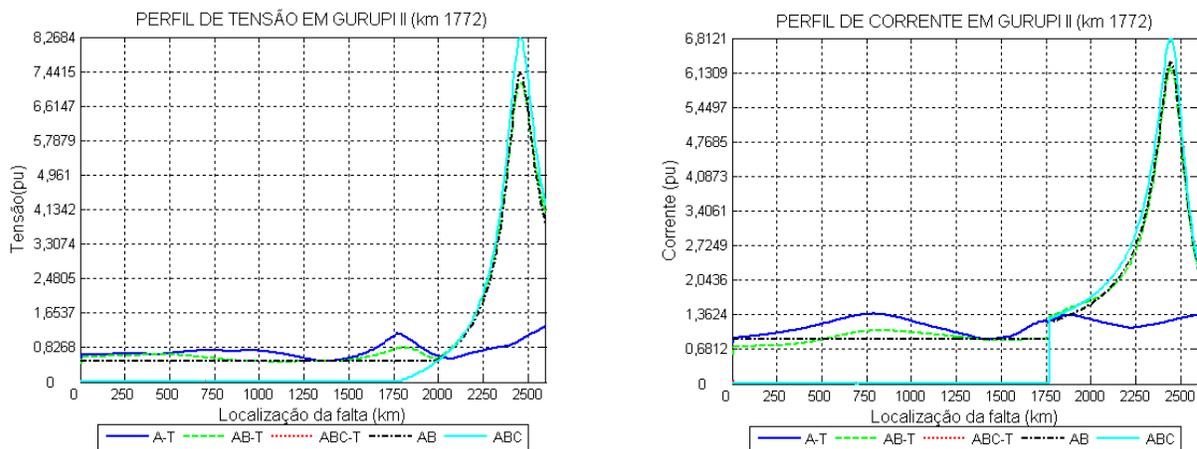


Figura 4.22 – Perfil de tensão e corrente monitorados em GURUPI II (km 1772) para diferentes condições de curto-circuito ao longo da linha.

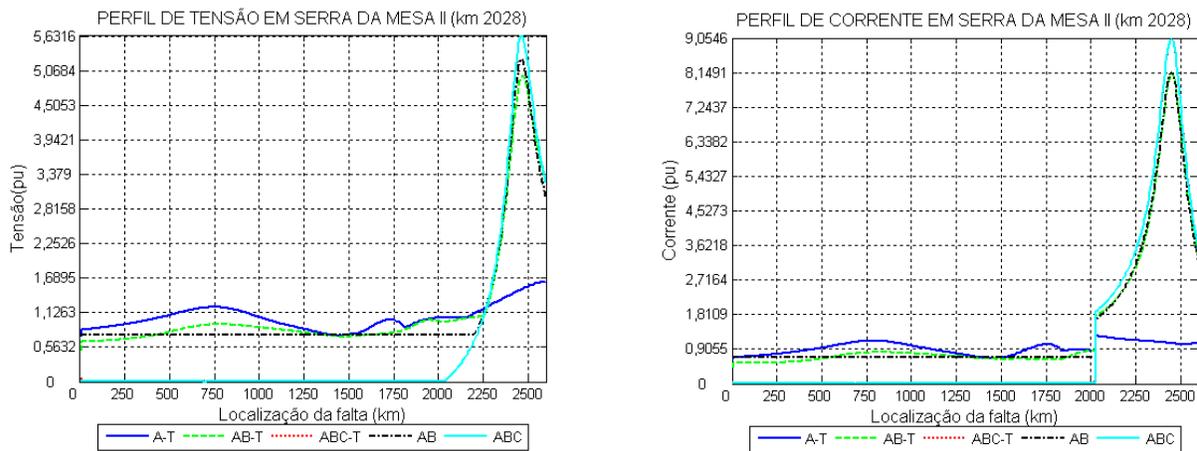


Figura 4.23 – Perfil de tensão e corrente monitorados em SERRA DA MESA II (km 2028) para diferentes condições de curto-circuito ao longo da linha.

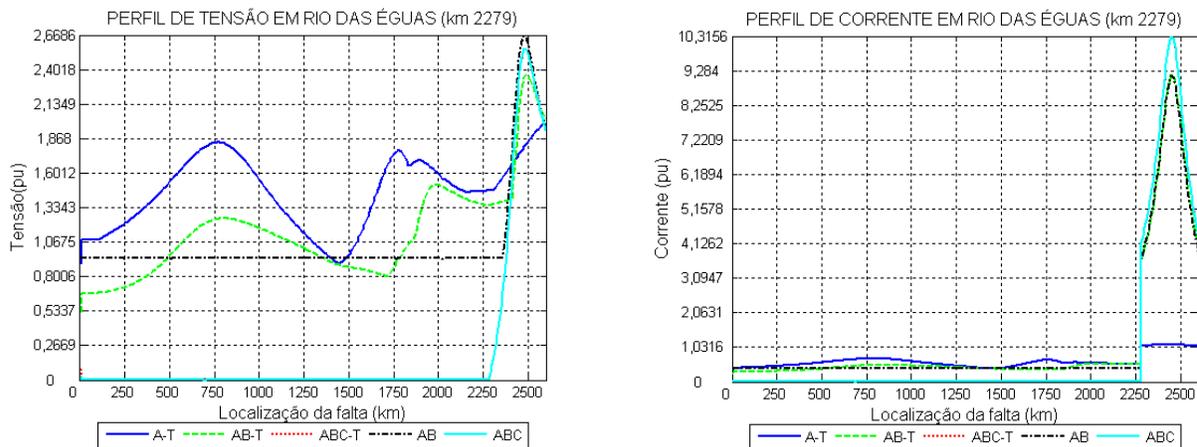


Figura 4.24 – Perfil de tensão e corrente monitorados em RIO DAS ÉGUAS (km 2279) para diferentes condições de curto-circuito ao longo da linha.

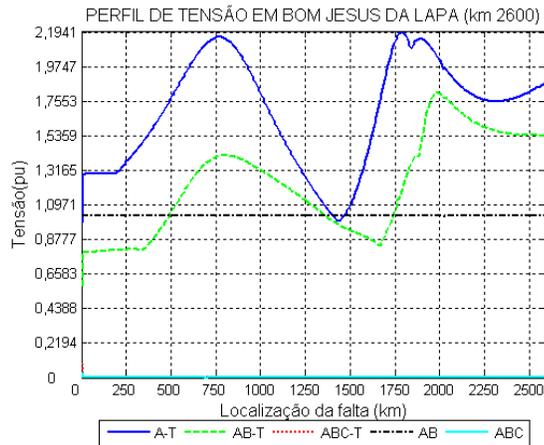


Figura 4.25 – Perfil de tensão monitorado em BOM JESUS DA LAPA (km 2600) para diferentes condições de curto-circuito ao longo da linha.

Analisando-se os resultados apresentados para os níveis de tensão e corrente ao longo da linha isolada alimentada por uma fonte infinita no terminal emissor, para diferentes condições de curto-circuito, verifica-se que as piores condições de sobretensão sustentada ocorrem em um ponto próximo ao meio da linha (aproximadamente 1344 km), monitoradas em Colinas II, para faltas trifásicas ocorridas próximo ao ponto de meio comprimento de onda da linha (2449 km). Tal fato se justifica devido à distância entre esses dois pontos ser em torno de $\frac{1}{4}$ de comprimento de onda o que provoca uma ressonância para a componente de seqüência positiva (que apresenta baixo amortecimento).

Para a componente de seqüência zero, observa-se que os maiores níveis de sobretensão sustentada ocorrem próximo ao km 2600, monitorada em Bom Jesus da Lapa, para faltas localizadas em aproximadamente $\frac{1}{4}$ e $\frac{3}{4}$ de comprimento de onda da seqüência zero mostrando que para a componente de seqüência zero ocorrem dois pontos de ressonância. Isto se deve, ao fato de em 2600 km a componente de seqüência zero ter em torno de um comprimento de onda completo.

Nas simulações realizadas não foram consideradas as perdas por efeito coroa, o que reduziria drasticamente os níveis de sobretensão atingidos. Outro ponto que deve ser considerado é o fato de os resultados obtidos serem valores em regime permanente. Num sistema real uma proteção rápida deve ser ajustada para interromper o circuito logo nos primeiros ciclos evitando que a tensão atinja níveis tão elevados.

Observa-se também que as correntes de curto-circuito trifásicas possuem níveis extremamente elevados para curtos-circuitos francos ocorridos no terminal de geração, já que se trata de uma barra infinita com um curto circuito de impedância muito baixa, por isso as altas corrente encontradas neste ponto. À medida que o ponto de curto-circuito se distancia em direção ao centro da linha os níveis de corrente apresentam valores bem mais baixos. Entretanto ao se aplicar curtos-circuitos trifásicos próximos à região de meio comprimento de onda de seqüência positiva os níveis de corrente se tornam extremamente elevados novamente, haja vista que este é um ponto de ressonância para a componente de seqüência positiva. Fazendo uma análise da impedância longitudinal em função do comprimento da linha, apresentada na Figura 4.13 o comportamento da corrente de curto-circuito trifásica ao longo da linha pode ser facilmente entendido.

4.6 Conclusões Parciais.

No estudo desenvolvido é mostrado como uma análise sistemática do sistema, na frequência fundamental, é uma importante ferramenta auxiliar para os estudos de transitórios eletromagnéticos.

Com a análise realizada na frequência fundamental foi possível determinar as condições mais severas para diferentes condições de defeito, exclusivamente para o sistema proposto. Neste trabalho foram feitas apenas combinações dos diferentes tipos de falta com o local de ocorrência.

A metodologia utilizada na análise à frequência fundamental também pode ser aplicada a sistemas com linhas de comprimento usual para avaliar o impacto da variação da situação dos pólos dos disjuntores nos terminais da linha, do religamento e da abertura monopolar, do chaveamento de reatores em caso de faltas, da otimização do reator de neutro, e de outras análises que se julguem necessárias.

Para o sistema proposto observou-se a ocorrência de sobretensões muito elevadas nas regiões próximas ao meio da linha (em torno do km 1300) quando os curtos-circuitos, envolvendo mais que uma fase, ocorriam próximos à extremidade da linha (próximos ao km 2500). Tal fato se deve a ressonância de seqüência positiva nessa região devido à distância entre essa região e o ponto de ocorrência da falta estar em torno de $\frac{1}{4}$ de comprimento de onda. Estes elevados valores

são obtidos uma vez que não foram consideradas nas simulações as perdas por efeito coroa que reduziriam drasticamente esses valores de tensão sustentada.

Os valores representados referem-se às sobretensões sustentadas para o sistema proposto que se encontra isolado e alimentado por uma barra infinita. Em um sistema real recomenda-se também que uma proteção rápida seja ajustada para interromper o circuito logo nos primeiros ciclos do transitório impedindo que se atinjam sobretensões muito elevadas.

Para as faltas monofásicas, as piores condições foram monitoradas no final da linha para faltas entre fase-terra, ocorridas em dois diferentes pontos, localizadas em pontos distantes em torno de $\frac{1}{4}$ e $\frac{3}{4}$ do comprimento da linha. Esta situação pode ser justificada devido à ressonância de seqüência zero ocorrida nessas regiões, já que para o circuito de seqüência zero em 2600 km tem-se quase que um comprimento de onda completo.

Para os valores de seqüência zero obtidos deve-se ressaltar que as perdas por efeito coroa não foram representadas nas simulações e que o sistema foi suposto isolado e sendo alimentado por uma barra infinita o que contribuiu significativamente para ocorrência de valores tão elevados. Num sistema real uma proteção rápida deve ser configurada para que o circuito seja interrompido antes que níveis tão elevados de tensão e corrente sejam atingidos.

É importante avaliar o comportamento do Elo CA sob condições de defeito integrado a um sistema elétrico, uma vez que a interação rede – Elo CA poderá alterar os níveis das sobretensões / correntes encontradas, assim como os pontos críticos de defeitos.

Capítulo 5

SIMULAÇÃO DA MANOBRA DE ENERGIZAÇÃO DE UM TRONCO DE 2600 km FORMADO POR LINHAS DE 500 kV

As simulações abordadas neste capítulo estão divididas em três partes:

- A primeira parte consiste na análise preliminar da manobra de energização de um tronco de 2600 km formado por linhas de transmissão de 500 kV, existentes no Brasil, as quais seriam interligadas formando assim um elo de 2600 km.
- A segunda parte consiste na manobra de energização de uma suposta linha de 500 kV e 2600 km única.
- A terceira e última parte consiste em uma comparação de resultados entre os níveis de sobretensão nas linhas apresentadas na parte um e dois, durante a manobra de energização, com os de uma linha de 400 km, e também uma linha de 2600 km CA convencional, fortemente compensada, energizada por trechos.

Para cada situação três métodos para mitigar as sobretensões transitórias nas linhas foram utilizados, sendo estes: uso de pára-raios nos extremos da linha; chaveamento controlado; uso de resistores de pré-inserção nos disjuntores.

5.1 Descrição do Sistema em estudo.

Tomando-se como base os dados das linhas Norte-Sul I, Norte-Sul II e Nordeste-Sudeste, formou-se um tronco de aproximadamente 2600 km como mostrado na Figura 4.11, o qual se denominou Linha-I.

Para o caso proposto considerou-se a barra de geração localizada em Serra da Mesa. A partir deste ponto a linha foi então formada pelas interligações das linhas: Norte-Sul I, Norte-Sul II, e de parte da Nordeste-Sudeste.

Os dados referentes à geração estão apresentados na Tabela 5.1 A geração do sistema foi organizada em um grupo de três geradores em paralelo. Ligados à geração foram também conectados os transformadores elevadores (15/525 kV) os quais estão ligados a cada gerador do sistema.

Os dados de cada transformador estão contidos na Tabela 5.2 e na Figura 5.1.

Tabela 5.1– Parâmetros básicos dos Geradores

Nº de Unidades	3
P_{\max} [MW]	472,5
P_{\min} [MW]	108
Q_{\max} [MVAr]	190
Q_{\min} [MVAr]	-190
$X_t\%$ (base 100 MVA)	2,507
$X_d\%$ (base máq)	93,4
$X_q\%$	61,1
$X'_d\%$	29
$X''_d\%$	27,2

Tabela 5.2 – Transformador Elevador de Serra da Mesa.

Transformador Elevador de Serra da Mesa 525(Y) / 15.0(Δ) – 472,6 MVA	
Reatância de dispersão do primário (525 kV)	31,338 (Ω)
Reatância de dispersão do secundário (15 kV)	0,0846 (Ω)
Resistência do enrolamento primário (525 kV)	0,795 (Ω)
Resistência do enrolamento secundário (15 kV)	0,003 (Ω)

Nos extremos da linha foram incluídos dispositivos pára-raios com a finalidade de mitigar as sobretensões transitórias. A curva característica desses dispositivos pode ser observada na Figura 5.2.

Outra característica importante sobre os pára-raios é o seu limite de absorção de energia, conforme apresentado na Tabela 5.3.

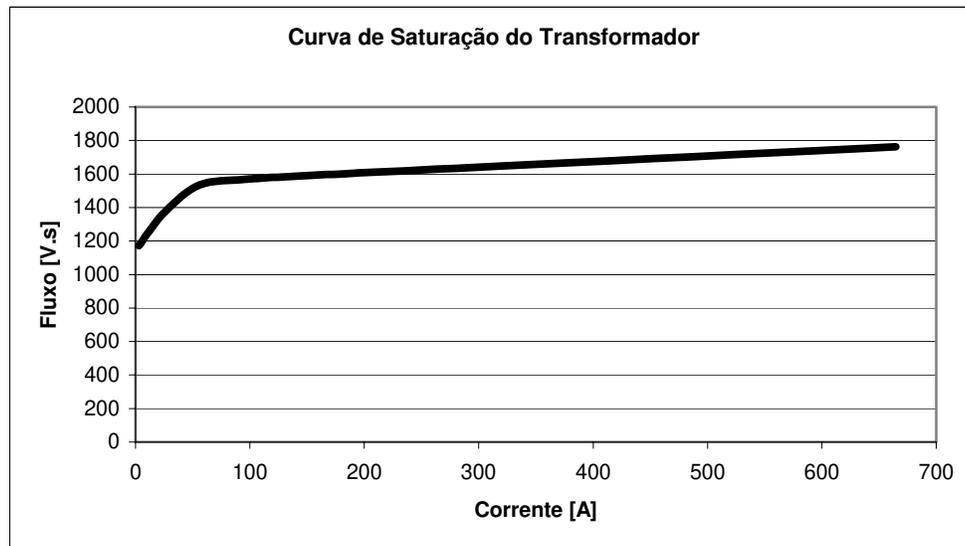


Figura 5.1 – Curva de Saturação dos Transformadores Elevadores (15/525 kV).

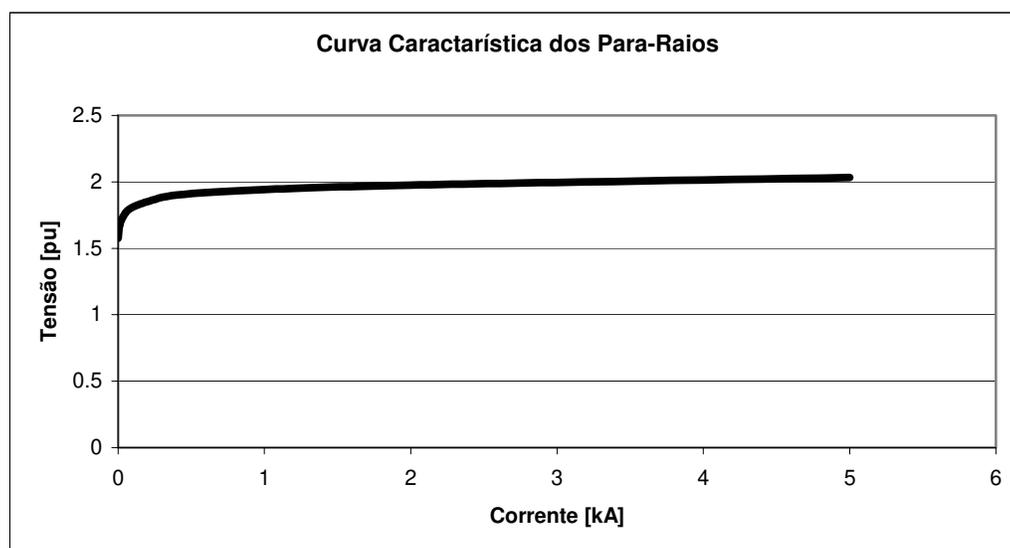


Figura 5.2 – Curva característica dos Pára-Raios de 420 kV.

Tabela 5.3 – Limites de absorção de Energia.

Sistema [kV]	Valor único impulso [MJ]	Capacidade Térmica [MJ] IEC99-4/91	Capacidade Térmica [MJ] fabricante
500	4,83	7,56	8,40

Como foram utilizados três trechos de linhas com características diferentes, representou-se cada trecho de acordo com seus parâmetros, sendo assim para cada linha tem-se:

- *Parâmetros do Tronco Norte-Sul I.*

O tronco Norte-Sul I é constituído pelas linhas Serra da Mesa – Gurupi -Miracema – Colinas – Imperatriz, conforme mostrado na Figura 4.11.

A silhueta das torres utilizadas neste tronco assim como os dados dos condutores da linha pode ser visto na Figura 5.3 e na Tabela 5.4.

A resistividade do solo foi considerada igual a 4000 $\Omega.m$ [20].

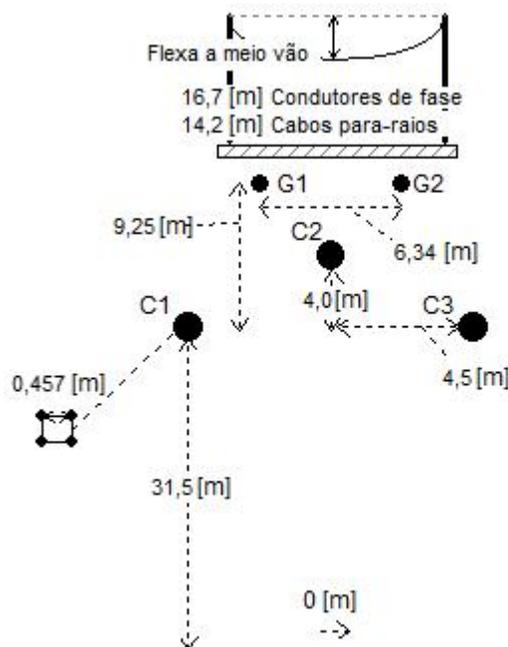


Figura 5.3 – Silhueta das torres das linhas do tronco Norte-Sul I.

Na Tabela 5.5 são apresentados também os parâmetros longitudinais e transversais por unidade de comprimento para esta linha, em modos, calculados para uma frequência de 60 Hz supondo a linha transposta. Estes valores são idênticos aos apresentados na Tabela 4.1 e são aqui reproduzidos para facilitar a análise.

Tabela 5.4 – Dados dos condutores da torres das linhas do tronco Norte-Sul I.

Condutor	Resistência Unitária [Ω /km]	Rext [m]	Rint [m]	μ_r
RAIL	0,0614	0,014795	0,0037	1
PR-Aço galv EHS	3,51	0,00457	-	1

Tabela 5.5 – Parâmetros unitários longitudinais e transversais das linhas do tronco Norte-Sul I calculados para frequência de 60 Hz.

Modos	Resistência [Ω /km]	Indutância [mH/km]	Capacitância [μ F/km]
Homopolar	0,4696	4,1849	0,00726
Não - Homopolar	0,0159	0,7081	0,01613

Os valores de μ_r utilizados iguais a um se devem às restrições do modelo de linha no programa de simulação ATP.

- *Parâmetros do Tronco Norte-Sul II.*

O tronco Norte-Sul II é constituído pelas linhas Imperatriz – Colinas – Miracema – Gurupi – Serra da Mesa, conforme mostrado na Figura 4.11.

A silhueta das torres utilizadas neste tronco assim como os dados dos condutores da linha pode ser visto na Figura 5.4 e na Tabela 5.6.

A resistividade do solo foi considerada como sendo igual a 4000 Ω .m [20].

Na Tabela 5.7 (idêntica a Tabela 4.2) são apresentados também os parâmetros longitudinais e transversais por unidade de comprimento para esta linha, em modos, calculados para uma frequência de 60 Hz, para a linha transposta.

Tabela 5.6 – Dados dos condutores da torres das linhas do tronco Norte-Sul II.

Condutor	Resistência Unitária [Ω /km]	Rext [m]	Rint [m]	μ_r
RAIL	0,0614	0,014795	0,0037	1
PR-Aço galv EHS	3,51	0,00457	-	1

Tabela 5.8 – Dados dos condutores da torres das linhas do tronco Nordeste-Sudeste.

Condutor	Resistência Unitária [Ω/km]	Rext [m]	Rint [m]	μr
RAIL	0,0614	0,014795	0,0037	1
PR-Aço galv EHS	3,51	0,00457	-	1

Uma suposta linha de 500 kV única de 2600 km de extensão foi também montada utilizando-se os parâmetros iguais aos da linha Nordeste-Sudeste como descrito na Figura 5.5 e nas Tabela 5.8 e Tabela 5.9.

O diagrama unifilar para este sistema é mostrado na Figura 5.6 o qual foi denominado de Linha-II.

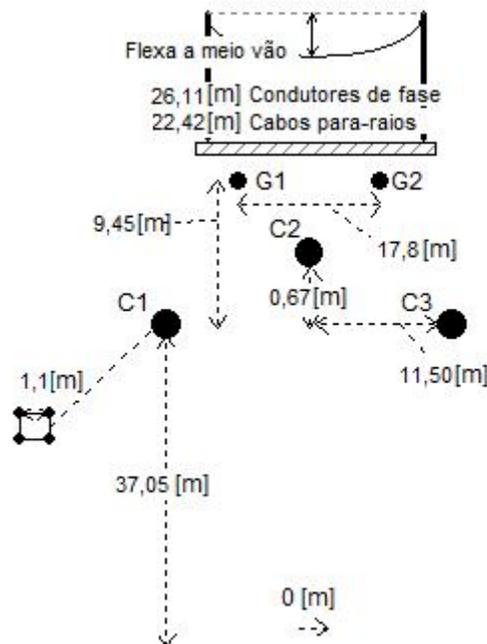


Figura 5.5 – Silhueta das torres das linhas do tronco Nordeste Sudeste.

Tabela 5.9 – Parâmetros unitários longitudinais e transversais das linhas do tronco Nordeste Sudeste calculados para 60 Hz.

Modos	Resistência [Ω/km]	Indutância [mH/km]	Capacitância [μF/km]
Homopolar	0,4352	3,8257	0,00935
Não - Homopolar	0,0161	0,7252	0,01604

Para a linha de 2600 km fortemente compensada foi utilizado um diagrama semelhante ao representado na Figura 4.11. Para esta linha foram também utilizados os dados da interligação Nordeste-Sudeste. Nesta representação foram feitas compensações shunt da ordem de 98% em cada trecho de linha e compensação série de 65% em três trechos. Foi considerado um fator de qualidade de 400 para os reatores de fase e 40 para os reatores de neutro.

Os valores dos reatores utilizados assim como sua localização podem ser visualizados na Tabela 5.10

Tabela 5.10 – Valores dos reatores de fase e de neutro utilizados em uma linha de 2600 km fortemente compensada.

Trecho	Comp (m)	Reator de fase		Reator de Neutro	
		Resistência (Ohm)	Indutância (H)	Resistência (Ohm)	Indutância (H)
Serra da Mesa I – Gurupi I	256	3,2484	3,4466	10,8281	1,1489
Gurupi I – Miracema I	255	3,2613	3,4604	10,8714	1,1535
Miracema I – Colinas I	173	4,8302	5,1250	16,1012	1,7083
Colinas I - Imperatriz	330	2,5050	2,6578	8,3501	0,8859
Imperatriz – Colinas II	330	2,5199	2,6737	8,3999	0,8912
Colinas II – Miracema II	173	4,8600	5,1566	16,2005	1,7189
Miracema II – Gurupi II	255	3,2811	3,4814	10,9374	1,1605
Gurupi II – Serra da Mesa II	256	3,2681	3,5771	10,8939	1,1559
Serra da Mesa II-Rio da Éguas	251,3	3,3282	3,5314	11,0944	1,1771
Rio das Éguas – Bom Jesus da Lapa	321,3	2,5886	2,7466	8,6288	0,9155

Os valores utilizados para os compensadores série foram:

Primeiro trecho: Gurupi I – Miracema I = 20,2225 μ F.

Segundo trecho: Colinas II – Miracema II = 19,8557 μ F.

Terceiro trecho: Serra da Mesa II – Rio das Éguas = 28,5318 μ F.

As simulações propostas foram realizadas utilizando-se os softwares ATP e o PSCAD/EMTDC. As linhas simuladas foram supostas idealmente transpostas para toda a gama de frequência, apesar da aproximação desta hipótese, uma vez que para frequências maiores o ciclo de transposição que foi dimensionado para 60 Hz não iria equilibrar os parâmetros da linha.

O detalhamento sobre a metodologia de implementação das simulações está apresentado no tópico seguinte.

5.2 Métodos de supressão dos transitórios provocados pela manobra de energização de uma linha de transmissão.

5.2.1 Dispositivos Pára-Raios.

A eficiência dos dispositivos pára-raios em mitigar os níveis de sobretensão transitória se deve a sua característica não linear, como apresentado na Figura 5.2. Entretanto sua atuação é limitada aos limites de absorção de energia.

Nos casos em estudo foram utilizados pára-raios somente nos dois extremos da linha.

5.2.2 Resistor de Pré-Inserção.

A utilização dos resistores de pré-inserção com a finalidade de reduzir os níveis de sobretensão transitória consiste em uma energização em duas etapas. Na primeira etapa o fechamento é feito com o resistor inserido em série com o sistema criando assim um divisor de tensão. Com isso a tensão aplicada à linha é reduzida a um valor bem abaixo da tensão nominal. Na segunda etapa o resistor de pré-inserção é curto-circuitado e assim a tensão nominal é aplicada a linha. Dessa forma os níveis de sobretensão transitória são reduzidos significativamente uma vez que a energização da linha é feita com aplicações de 0,5 pu em cada etapa.

O valor do resistor de pré-inserção é normalmente especificado como próximo ao módulo da impedância característica da linha, e o tempo de ajuste para que o resistor de pré-inserção seja curto-circuitado deve ser maior que duas vezes o tempo de propagação da onda viajante até o extremo da linha. [23].

Para a linha de 400 km o tempo de propagação da onda viajante é de aproximadamente 1,5 ms, e para as linhas de 2600 km é da ordem de 9 ms.

5.2.3 Chaveamento Controlado.

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.

O método do chaveamento controlado consiste no fechamento de cada pólo do disjuntor no instante em que cada tensão fase-terra passa por zero. Dessa forma os transitórios provocados pela manobra podem ser consideravelmente reduzidos [23].

5.3 Montagem dos casos

5.3.1 Simulação da energização das linhas propostas, no Software ATP.

No software ATP os seguintes casos foram montados para a Linha-I, Linha-II e para a Linha de 400 km, utilizando-se o modelo de parâmetros distribuídos sem dependência dos parâmetros longitudinais com a frequência.

Cada técnica de energização foi implementada da seguinte forma:

- ✓ Energização apenas com os Pára-Raios:
 - Pára-Raios inseridos nos dois extremos da linha.
 - Fechamento dos pólos das três fases do disjuntor no máximo da tensão fase-terra na fase A.

- ✓ Energização com utilização de resistores de pré-inserção:
 - Os resistores de pré-inserção utilizados possuem valores próximos a impedância característica da linha, 213 Ω .
 - O resistor de pré-inserção foi curto-circuitado em 8 ms para a linha de 400 km e 20 ms para as Linhas I e II.
 - Fechamento dos pólos das três fases do disjuntor no máximo da tensão fase-terra da fase A.

- ✓ Energização através do chaveamento controlado:
 - Fechamento de cada pólo do disjuntor no instante em que cada tensão fase-terra nas fases, passa pelo zero, na seqüência A, C, B.

Devido ao fato de existir uma dispersão entre os tempos de fechamento dos pólos dos disjuntores, e também pelo fato de os disjuntores serem dispositivos mecânicos, foi também simulado o chaveamento estatístico dos disjuntores de acordo com uma distribuição gaussiana [24].

5.3.2 Simulação da energização das linhas propostas, no Software PSCAD/EMTDC.

No software PSCAD/EMTDC os seguintes casos foram montados para a Linha-I, Linha-II, para a Linha de 400 km, e para a linha de 2600 km CA convencional, utilizando-se o modelo de linha no domínio das fases com a representação da dependência dos parâmetros longitudinais com a frequência. Os programas ATP e PSCAD atingem as mesmas condições pré-manobra em instantes de tensão diferentes em função do processo de inicialização das variáveis. O ATP obtém as condições iniciais de cada variável a partir das condições de contorno fornecidas (estado dos disjuntores e das máquinas) já no início da simulação. O PSCAD inicia a simulação com todas as fontes zeradas e as fontes têm uma taxa de subida do seu sinal (dado de entrada). Somente quando o sistema atinge o regime pode-se iniciar o transitório.

Cada técnica de energização foi implementada da seguinte forma:

- ✓ Energização apenas com os Pára-Raios:
 - Pára-Raios inseridos nos dois extremos da linha.
 - Fechamento dos pólos das três fases do disjuntor no máximo da tensão fase-terra da fase A.

- ✓ Energização com utilização de resistores de pré-inserção:
 - Os resistores de pré-inserção utilizados possuem valores próximos da impedância característica da linha, 213 Ω .
 - O resistor de pré-inserção foi curto-circuitado em 8 ms para a linha de 400 km e 20 ms para as Linhas I e II.
 - Fechamento dos pólos das três fases do disjuntor no máximo da tensão fase-terra da fase A.

- ✓ Energização através do chaveamento controlado:
 - Fechamento de cada pólo do disjuntor no instante em que cada tensão fase-terra nas fases passa pelo zero, na seqüência A, C, B.

A linha de 2600 km CA convencional foi simulada apenas para o caso de energização com resistor de pré-inserção. Para essa linha a energização foi feita por trechos e não ponto a ponto como as outras em estudo. Os trechos utilizados na manobra são os mesmos apresentados na Figura 4.11.

5.4 Resultados das simulações nos programas de transitórios eletromagnéticos.

Neste ponto serão apresentados os resultados referentes às simulações da energização das linhas de transmissão nos dois softwares.

Na Tabela 5.11 são listados os locais de medição para acompanhamento das tensões ao longo da linha. Estes pontos de medição são válidos tanto para a Linha-I quanto para a Linha-II, que mesmo sendo única teve o acompanhamento das tensões feito nos mesmos pontos em caráter de comparação. O mesmo vale para a linha CA convencional.

Tabela 5.11 – Locais de medição para acompanhamento das tensões ao longo da linha.

Subestação	km
Serra da Mesa	0
Gurupi I	256
Miracema I	511
Colinas I	684
Imperatriz	1014
Colinas II	1344
Miracema II	1517
Gurupi II	1772
Serra da Mesa II	2028
Rio das Éguas	2279,3
Bom Jesus da Lapa	2600,6

Inicialmente será apresentado o perfil de tensão sustentada ao longo da linha para a condição de linha em vazio após o transitório da manobra de energização, de acordo com a Figura 5.8.

Observa-se que os níveis de tensão no início e no fim da linha são da ordem de 1 pu, sem a necessidade de qualquer compensação ao longo de seu comprimento. Outro fato relevante é que o comportamento da Linha I é muito semelhante ao da Linha II para a operação em regime permanente, o que indica que um conjunto de linhas semelhantes pode representar o comportamento de um tronco de 2600 km formado por uma linha única.

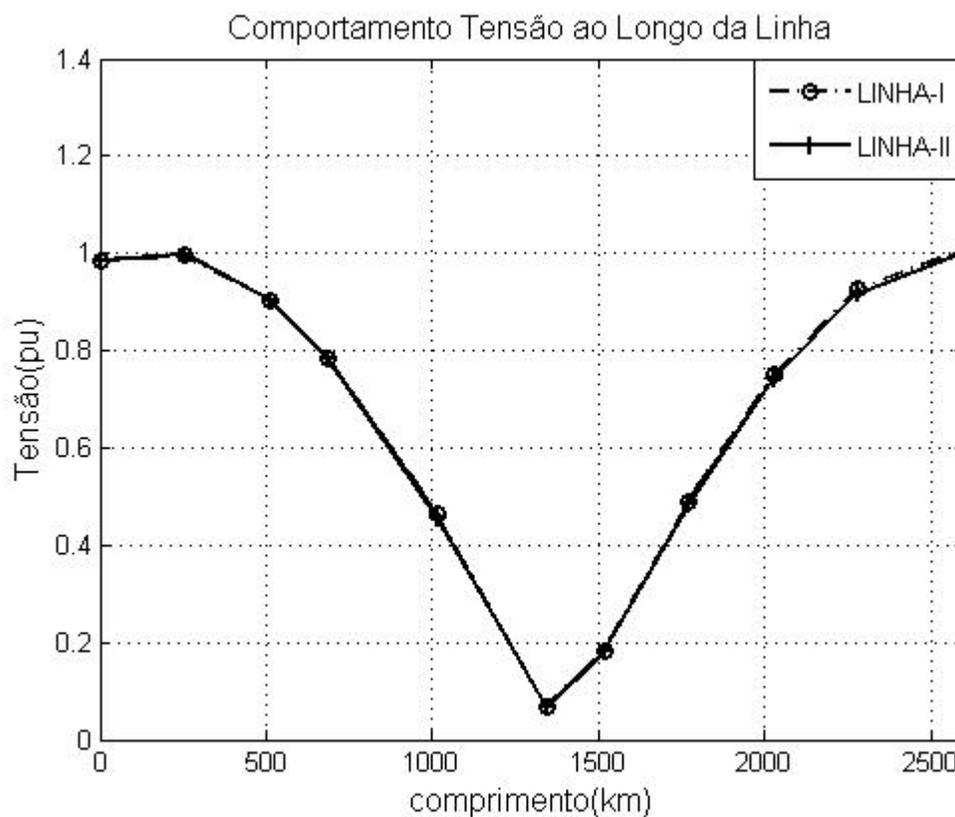


Figura 5.8 – Comportamento da tensão sustentada ao longo das Linha I e II em vazio.

5.4.1 Resultados obtidos com o ATP.

Os resultados para essa seção serão divididos em três itens, sendo eles referentes à energização da Linha-I, energização da Linha-II e energização de uma linha de 400 km.

5.4.1.1 Energização Linha-I

Os principais resultados observados nessas simulações foram os níveis máximos de sobretensões ao longo da linha assim como as formas de onda das tensões nos pontos de interligação na Linha I para as diferentes técnicas de energização.

Para uma correta análise sobre as formas de onda apresentadas uma análise sobre a teoria de ondas viajantes em linhas de transmissão com o terminal remoto aberto se faz necessário.

A característica de um circuito aberto é a corrente nula no terminal em vazio durante todo o tempo. Então, quando a onda de corrente $+I$ viajando no sentido positivo de x (do terminal gerador ao terminal receptor) alcança o ponto de circuito aberto, uma onda de corrente $-I$ viajando no sentido negativo de x é iniciada para satisfazer a condição de contorno do terminal em vazio (corrente zero). Esta onda de corrente negativa irá viajar para a fonte juntamente com uma onda de tensão, sendo, contudo a onda de tensão viajando no sentido negativo de x igual à onda incidente de tensão $+V$. Logo, a tensão na linha, à medida que as ondas de tensão e corrente refletidas viajam, irá dobrando o seu valor e a corrente se anulando. Quando estas ondas atingirem a fonte ideal, esta irá manter a tensão V no ponto.

A Figura 5.9 apresenta as formas de onda das tensões nos extremos da linha e nos pontos de interligação para a Linha-I durante a manobra de energização utilizando-se apenas os dispositivos pára-raios para mitigar as sobretensões.

Observa-se que os maiores níveis de sobretensão apresentados ocorrem nos pontos de monitoração de Serra da Mesa I e de Bom Jesus da Lapa. Este fato é justificado pelo comportamento de uma linha de 2600 km que apresenta valores de tensão mais elevados nas suas extremidades do que no meio da linha para a operação em vazio.

Na SE Serra da Mesa I, que corresponde ao terminal de geração, observa-se que o maior nível de sobretensão ocorre exatamente no instante em que a onda refletida pelo terminal remoto, após a propagação do primeiro ciclo, retorna ao início da linha dobrando o valor da tensão. Esta por sua vez se propaga novamente em direção ao terminal remoto provocando no instante de sua incidência no terminal em aberto a maior sobretensão neste instante.

À medida que a onda viajante refletida se propaga ao longo da linha os níveis de sobretensão em cada ponto de monitoração vão se elevando até que a onda atinja novamente a origem.

A partir do segundo ciclo o sinal de tensão se atenua devido ao longo trecho percorrido pelas ondas viajantes.

Observam-se também alguns batimentos na forma de onda os quais se devem a interação entre as indutâncias e capacitâncias da linha.

O sistema atinge o estado de regime permanente após aproximadamente 300 ms da manobra de energização.

A atuação dos pára-raios para suprimir níveis mais elevados de sobretensão também pode ser analisada através da Figura 5.13 e da Figura 5.14. Pode ser verificado que o nível de energia absorvida pelos dispositivos se mantém dentro dos limites de operação definidos pelo fabricante.

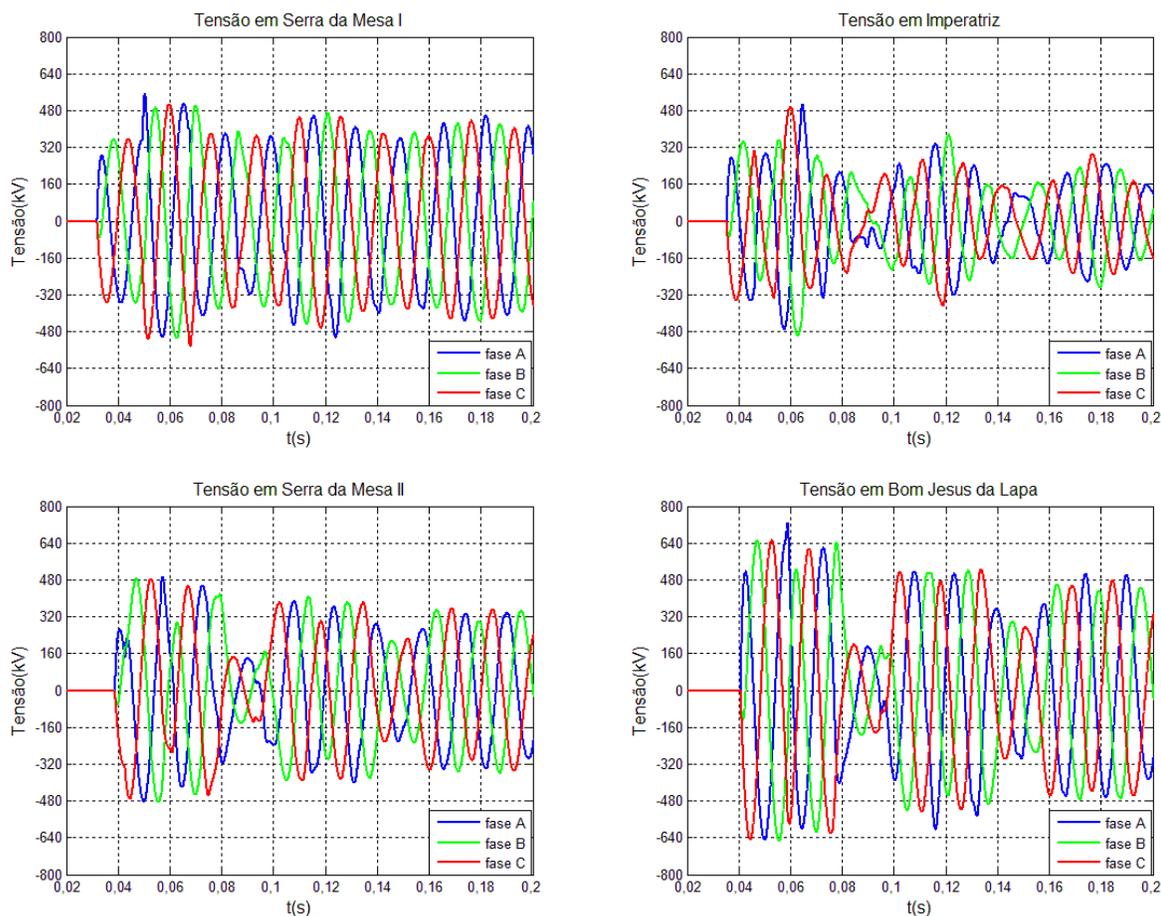


Figura 5.9 – Comportamento das tensões nos extremos da linha e nos pontos de interligação, durante a manobra de energização apenas com o uso dos pára-raios, na Linha-I – Simulação com o ATP

O uso do resistor de pré-inserção para a redução do nível das sobretensões foi também implementado e as formas de onda nos extremos da linha e nos pontos de interligação das linhas é mostrado na Figura 5.10.

É possível observar claramente a redução nos níveis de sobretensão que o resistor de pré-inserção proporciona ao sistema comparado com a energização da linha apenas com os pára-raios nos seus terminais.

Como um nível de tensão menor é aplicado à linha no instante da energização os níveis de sobretensão provocados pela reflexão da onda viajante no terminal remoto são menores. Ao se curto-circuitar o resistor um novo degrau de 0,5 pu é aplicado à linha novamente e não causa grandes sobretensões.

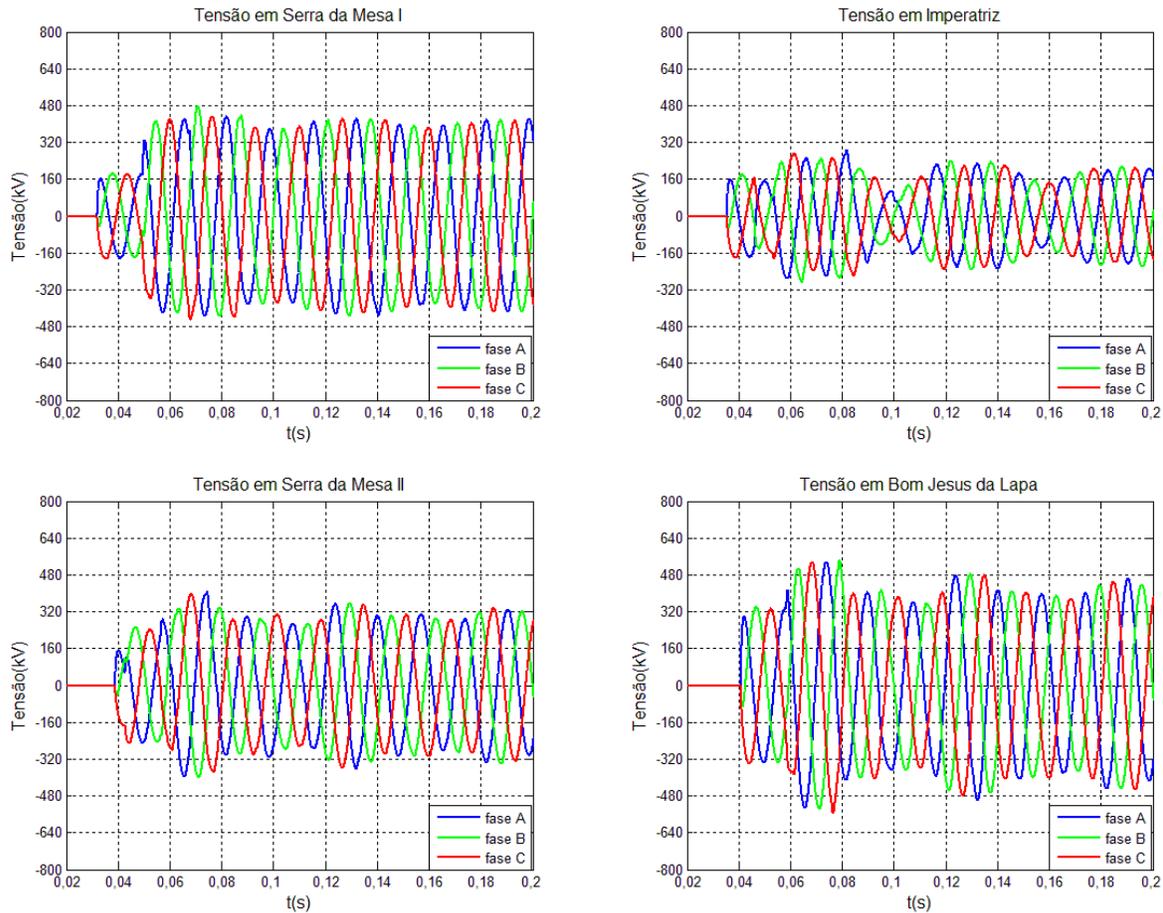


Figura 5.10 – Comportamento das tensões nos extremos da linha e nos pontos de interligação, durante a manobra de energização com a utilização do resistor de pré-inserção , na Linha-I – Simulação com o ATP

Foram também realizadas simulações utilizando-se a técnica de chaveamento controlado para redução dos níveis de sobretensões transitórias. As formas de onda da tensão no extremo da linha e nos pontos de interligação das linhas podem ser observadas na Figura 5.11.

O chaveamento sincronizado para a linha de transmissão em estudo não apresentou um resultado muito eficiente comparado aos outros métodos utilizados.

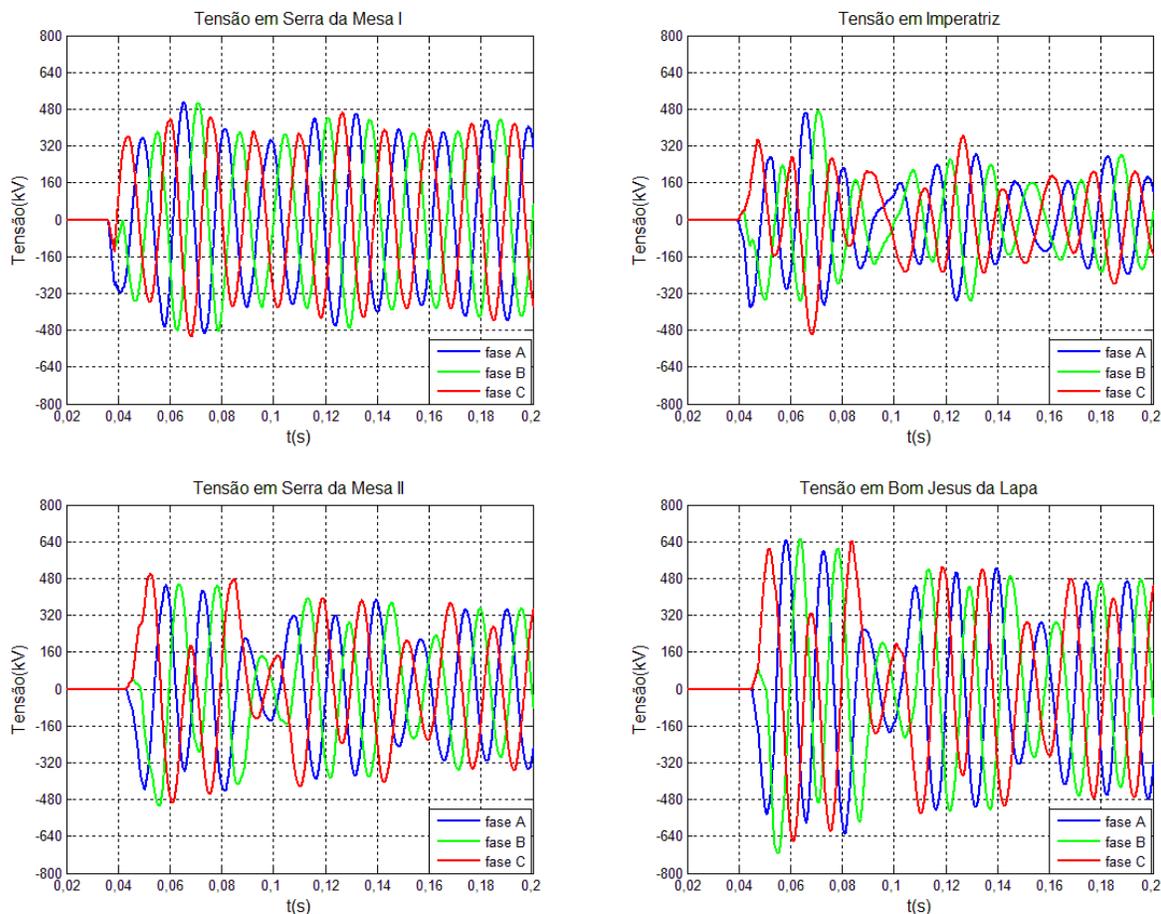


Figura 5.11 – Comportamento das tensões nos extremos da linha e nos pontos de interligação, durante a manobra de energização com a utilização do método do Chaveamento Controlado, na Linha-I – Simulação com o ATP

Uma curva contendo as máximas sobretensões transitórias para cada método de energização também foi gerada e está mostrada na Figura 5.12.

A utilização do resistor de pré-inserção como método de supressão dos níveis de sobretensão transitória para a Linha I foi o método que obteve o melhor desempenho, conseguindo reduzir de forma significativa os níveis de sobretensão. Vale ressaltar que o resultado obtido com o uso do resistor de pré-inserção para a Linha I é da mesma ordem de grandeza ou menor do que para linhas de poucas centenas de quilômetros.

Em contrapartida o método de chaveamento controlado não deve ser utilizado para linhas dessa ordem de comprimento uma vez que não contribuíram com a redução dos surtos transitórios.

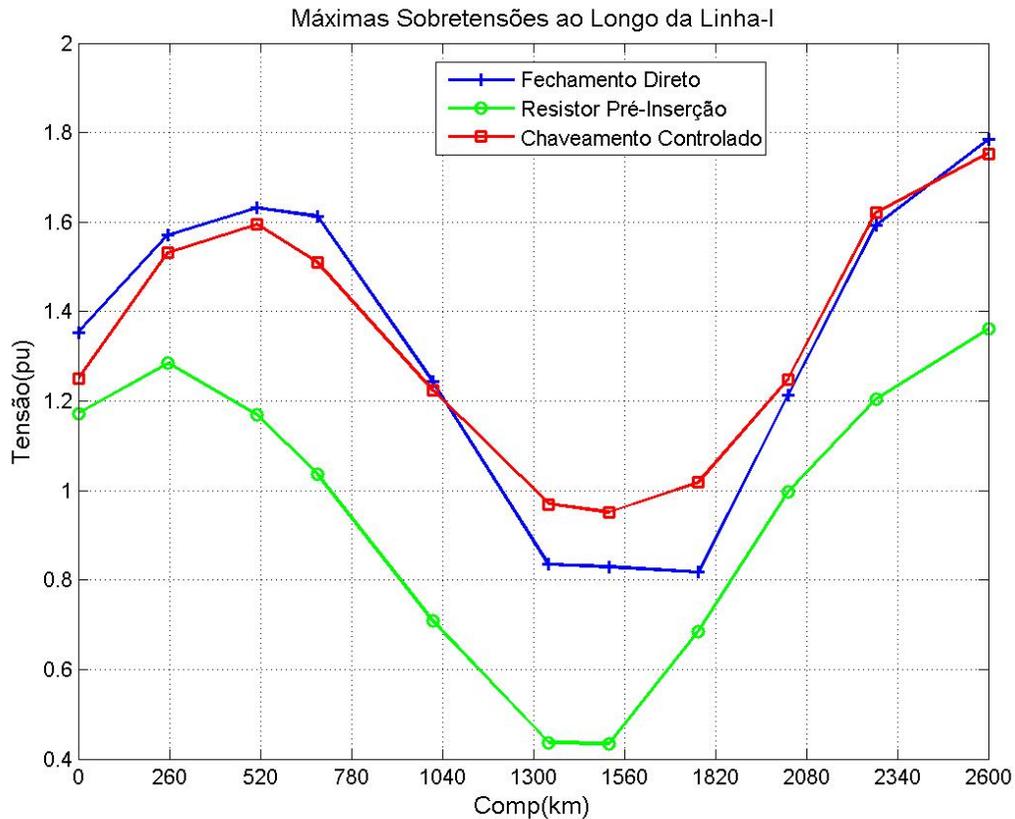


Figura 5.12 – Máximas sobretensões ao longo da Linha-I para os diferentes métodos de energização – Simulações com o ATP

Os níveis de energia absorvida pelos dispositivos pára-raios para cada método de energização podem ser vistos na Figura 5.13 e na Figura 5.14 onde se verifica que para nenhum dos casos o seu limite de absorção de energia foi excedido.

A seguir são apresentados os resultados obtidos nas simulações feitas para o caso estatístico. As simulações foram feitas utilizando a ferramenta de chaveamento estatístico do ATP.

Foram simulados casos de energização com os diferentes métodos de energização considerando-se 100 fechamentos. Para a realização da manobra as chaves foram fechadas no máximo da tensão fase-terra da fase A. Foi também considerado um desvio padrão para os fechamentos de 2 ms. Para o caso do fechamento sincronizado considerou-se que os pólos do

disjuntor eram fechados no instante em que cada tensão fase-terra em cada uma das fases passa pelo zero na seqüência A, C, B.

Os resultados para esse caso podem ser observados na Tabela 5.12.

Nas Figuras 5.15, 5.16 e 5.17 são mostrados graficamente a probabilidade de ocorrência de sobretensões nos extremos da linha para o caso estatístico para cada método de redução de sobretensões utilizado durante a manobra de energização.

Tabela 5.12 – Sobretensões ao longo da linha para o caso estatístico da energização da Linha I simulada com o ATP

Subestação	Local [km]	Fechamento Direto		Resistor de Pré-Inserção		Chaveamento Controlado	
		Tensão [pu]	Probabilidade [%]	Tensão [pu]	Probabilidade [%]	Tensão [pu]	Probabilidade [%]
Serra da Mesa I	0	1,40-1,45	19	1,25-1,30	3	1,40-1,45	11
Gurupi I	256	1,70-1,75	1	1,35-1,40	5	1,75-1,80	1
Miracema I	511	1,70-1,75	2	1,30-1,45	2	1,75-1,80	1
Colinas I	684	1,65-1,70	1	1,20-1,25	1	1,65-1,70	2
Imperatriz	1014	1,30-1,35	4	0,85-0,90	1	1,30-1,35	2
Colinas II	1344	1,05-1,10	15	0,60-0,65	21	1,05-1,10	5
Miracema II	1517	1,05-1,10	8	0,60-0,65	9	1,05-1,10	1
Gurupi II	1772	1,00-1,05	25	0,70-0,75	11	1,20-1,25	3
Serra da Mesa II	2028	1,35-1,40	5	1,05-1,10	3	1,45-1,45	1
Rio das Éguas	2279	1,70-1,75	1	1,30-1,35	2	1,80-1,85	1
B.J. da Lapa	2601	1,85-1,90	5	1,45-1,45	4	1,85-1,90	21

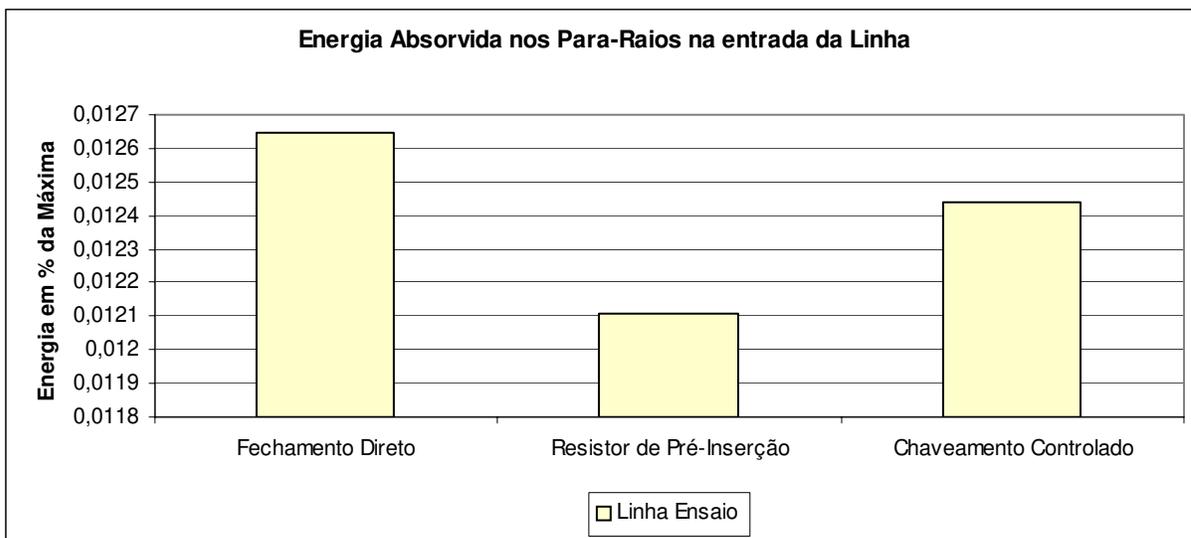


Figura 5.13 – Energia absorvida pelos dispositivos pára-raios localizados no início da linha durante a energização da Linha I – Simulação com o ATP



Figura 5.14 – Energia absorvida pelos dispositivos pára-raios localizados no final da linha durante a energização da Linha I – Simulação com o ATP.

Analisando os resultados obtidos para o caso estatístico verifica-se que os piores casos de sobretensão transitória para a manobra de energização ocorrem para os casos de uso apenas dos dispositivos pára-raios e para o chaveamento controlado.

Uma probabilidade de 21% para ocorrência de sobretensões entre 1,85 e 1,90 pu para o método de chaveamento controlado pode ser observada, sendo este o pior caso observado.

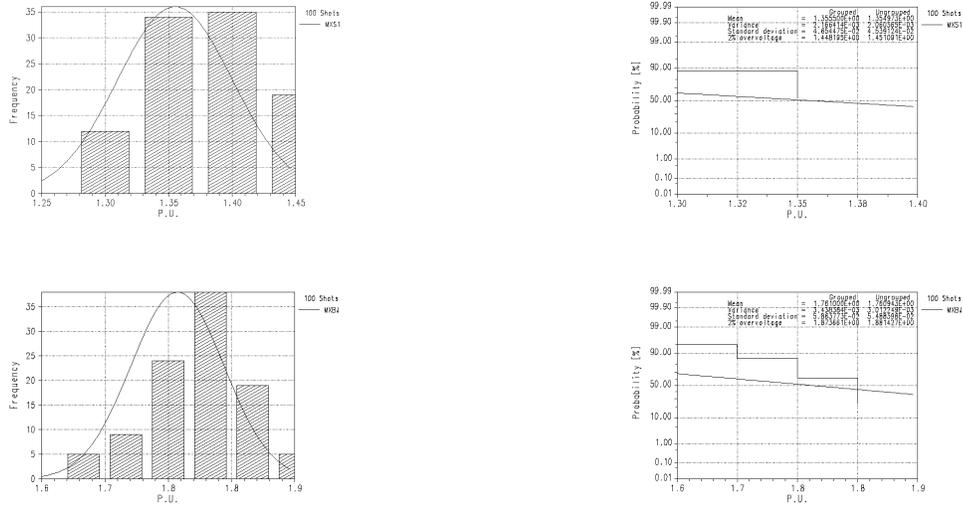


Figura 5.15 – Máximas sobretensões nos extremos da linha para o caso estatístico, durante a manobra de energização com a utilização apenas dos pára-raios, na Linha-I – Simulação com o ATP

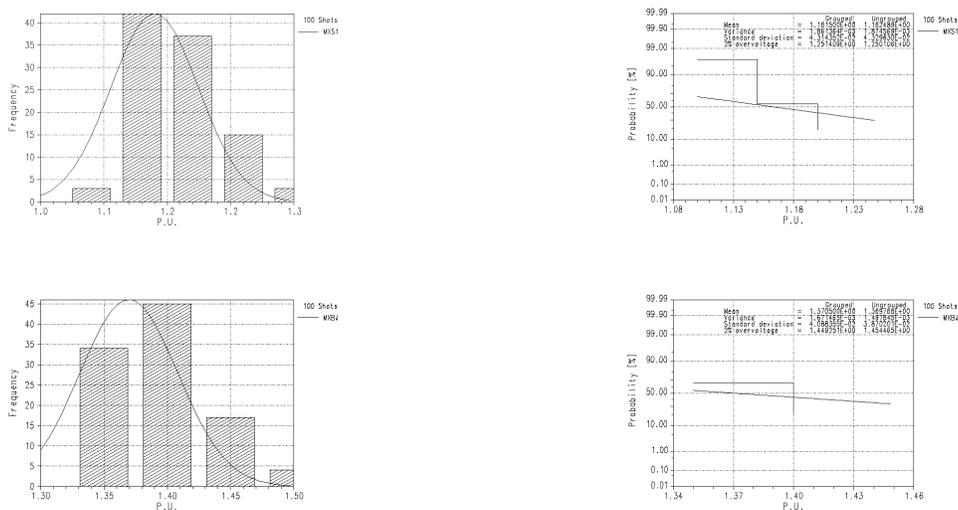


Figura 5.16 – Máximas sobretensões nos extremos da linha para o caso estatístico, durante a manobra de energização com a utilização dos resistores de pré-inserção, na Linha-I – Simulação com o ATP

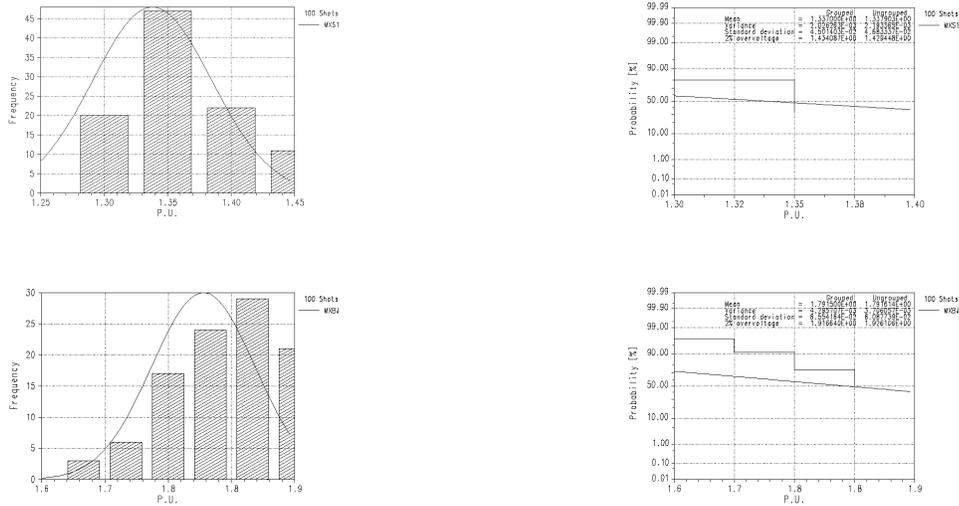


Figura 5.17 – Máximas sobretensões nos extremos da linha para o caso estatístico, durante a manobra de energização com a utilização do método do chaveamento controlado, na Linha-I – Simulação com o ATP

5.4.1.2 Energização Linha-II

Os principais resultados observados nessas simulações foram os níveis máximos de sobretensões ao longo da linha assim como as formas de onda das tensões nos pontos de interligação na Linha II para as diferentes técnicas de energização.

A Figura 5.18 apresenta as formas de onda das tensões nos extremos da linha e nos pontos de interligação para a Linha-II durante a manobra de energização utilizando-se apenas os dispositivos pára-raios para mitigar as sobretensões.

Assim como verificado nas simulações para a Linha I, observa-se que na Linha II os maiores níveis de sobretensão apresentados ocorrem nos pontos de monitoração de Serra da Mesa I e de Bom Jesus da Lapa. Este fato é justificado pelo comportamento de uma linha de 2600 km que apresenta valores de tensão mais elevados nas suas extremidades do que no meio da linha para a operação em vazio.

Na SE Serra da Mesa I, que corresponde ao terminal de geração, observa-se que o maior nível de sobretensão ocorre exatamente no instante em que a onda refletida pelo terminal remoto, após a propagação do primeiro ciclo, retorna ao início da linha dobrando o valor da tensão. Esta por sua vez se propaga novamente em direção ao terminal remoto provocando no instante de sua incidência no terminal em aberto a maior sobretensão.

As mesmas considerações sobre a energização da Linha I se aplicam para a energização da Linha II.

A atuação dos pára-raios para suprimir níveis mais elevados de sobretensão também pode ser analisada através da Figura 5.22 e da Figura 5.23. Pode ser verificado que o nível de energia absorvida pelos dispositivos se mantém dentro dos limites de operação definidos pelo fabricante.

O uso do resistor de pré-inserção para a redução do nível das sobretensões foi também implementado e as formas de onda nos extremos da linha e nos pontos de interligação das linhas é mostrado na Figura 5.19.

É possível observar claramente a redução nos níveis de sobretensão que o resistor de pré-inserção proporciona ao sistema comparado com a energização apenas com os pára-raios.

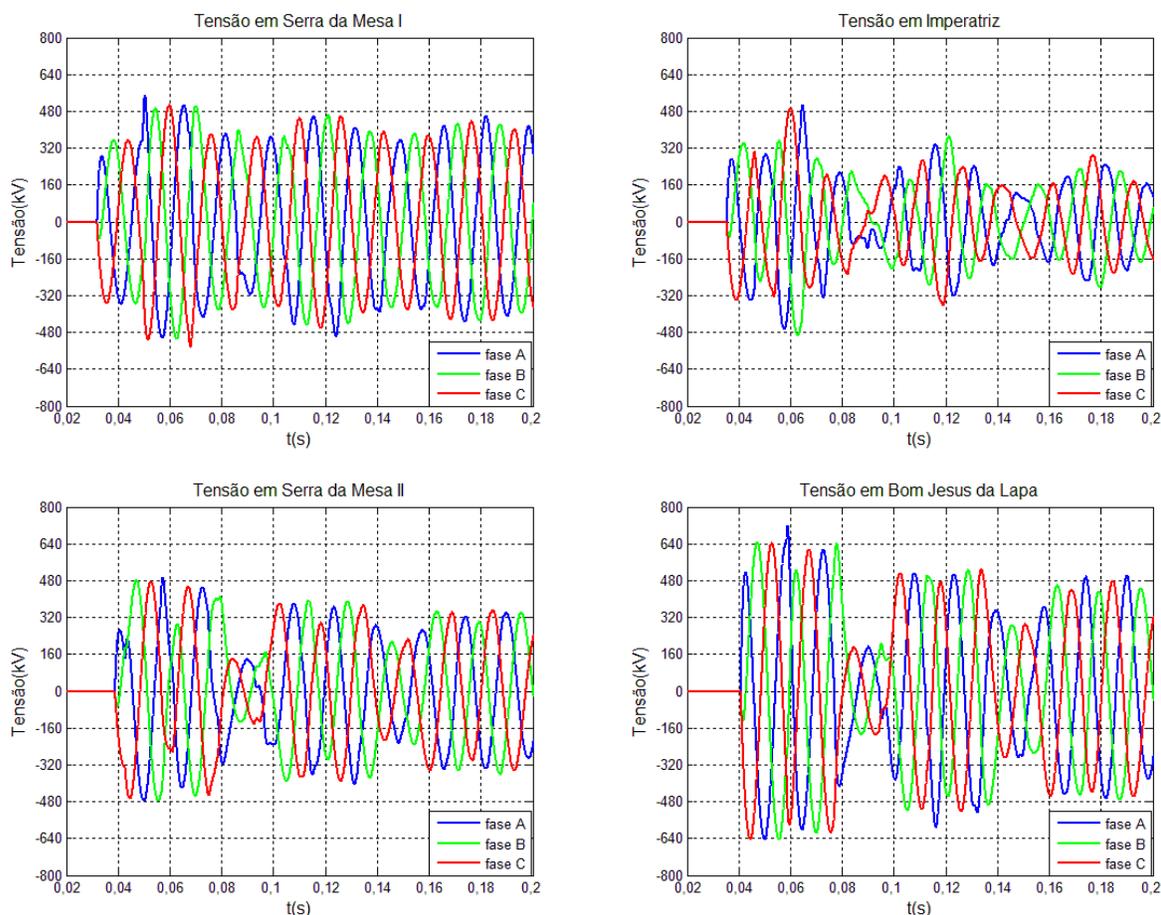


Figura 5.18 – Comportamento das tensões nos extremos da linha e nos pontos de interligação, durante a manobra de energização apenas com o uso dos pára-raios, na Linha-II – Simulação com o ATP

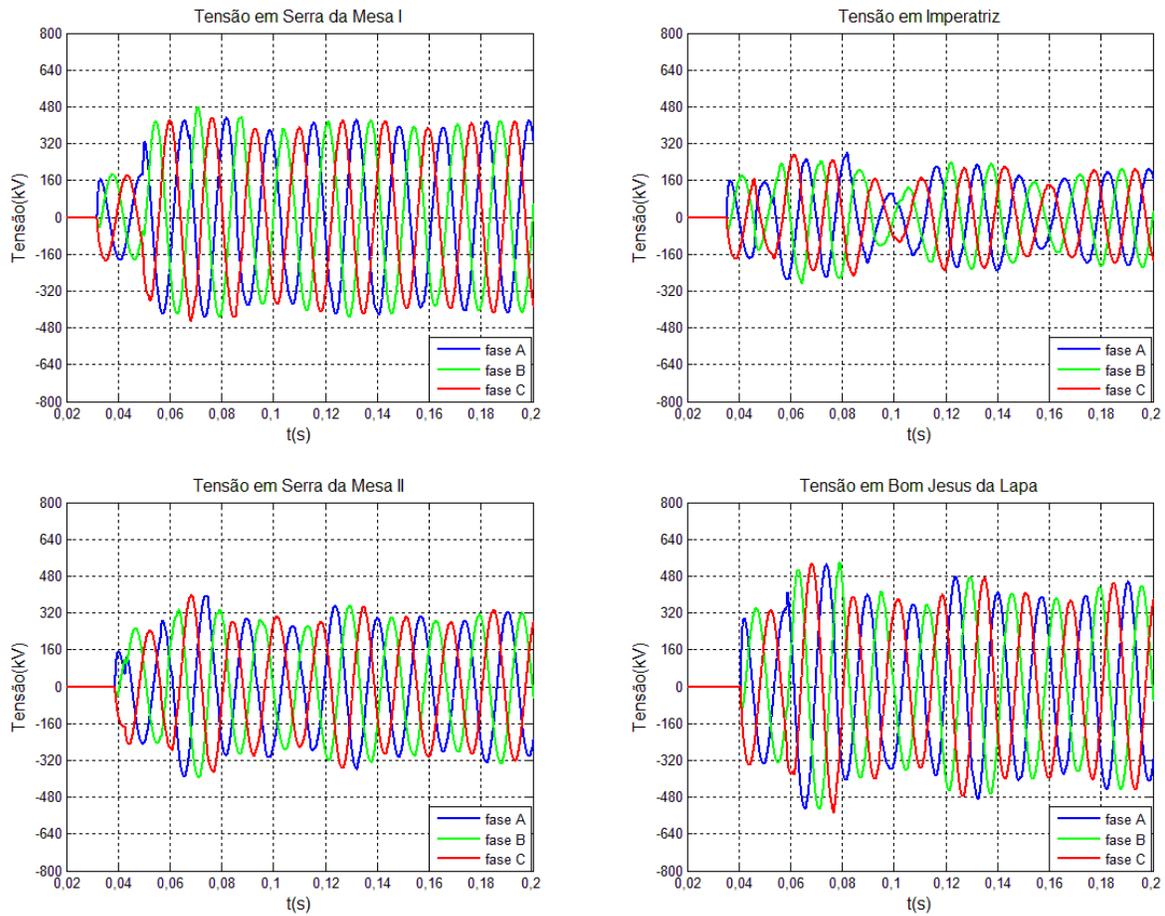


Figura 5.19 – Comportamento das tensões nos extremos da linha e nos pontos de interligação, durante a manobra de energização com a utilização do resistor de pré-inserção , na Linha-II – Simulação com o ATP

Foram também realizadas simulações utilizando-se a técnica de chaveamento controlado para redução dos níveis de sobretensões transitórias e as formas de onda da tensão no extremo da linha e nos pontos de energização podem ser observadas na Figura 5.20.

Da mesma forma que para a Linha I, o chaveamento controlado para a Linha II não apresentou resultados satisfatórios.

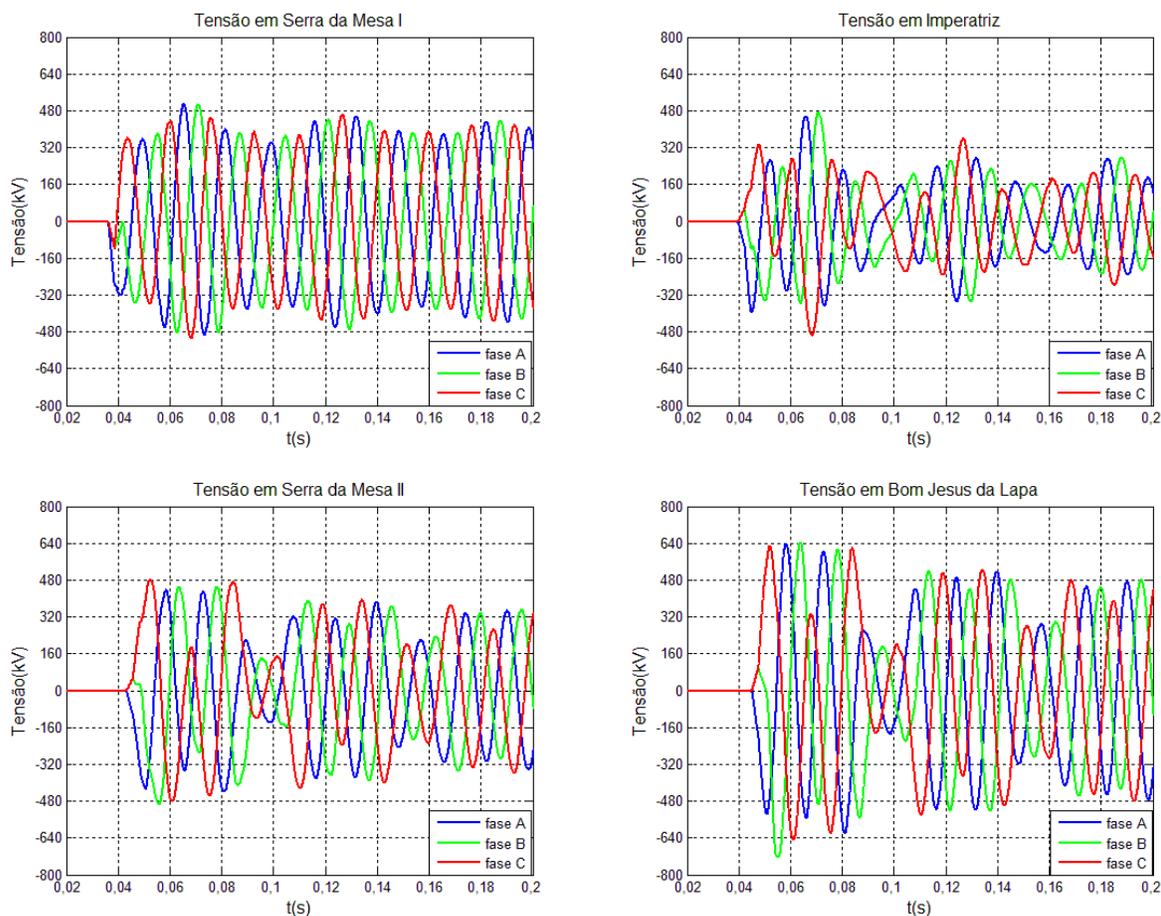


Figura 5.20 – Comportamento das tensões nos extremos da linha e nos pontos de interligação, durante a manobra de energização com a utilização do método do Chaveamento Controlado, na Linha-II – Simulação com o ATP

Uma curva contendo as máximas sobretensões transitórias para cada método de energização também foi gerada e está mostrada na Figura 5.21.

Os resultados obtidos para a Linha II mostram que a utilização do resistor de pré-inserção como método de supressão dos níveis de sobretensão transitória foi o método que obteve o melhor desempenho, conseguindo reduzir de forma significativa os níveis de sobretensão. Vale ressaltar que o resultado obtido com o uso do resistor de pré-inserção para a Linha II é da mesma ordem de grandeza ou menor do que para linhas de poucas centenas de quilômetros.

Em contrapartida o método de chaveamento controlado não deve ser utilizado para linhas dessa ordem de comprimento uma vez que não contribuíram com a redução dos surtos transitórios.

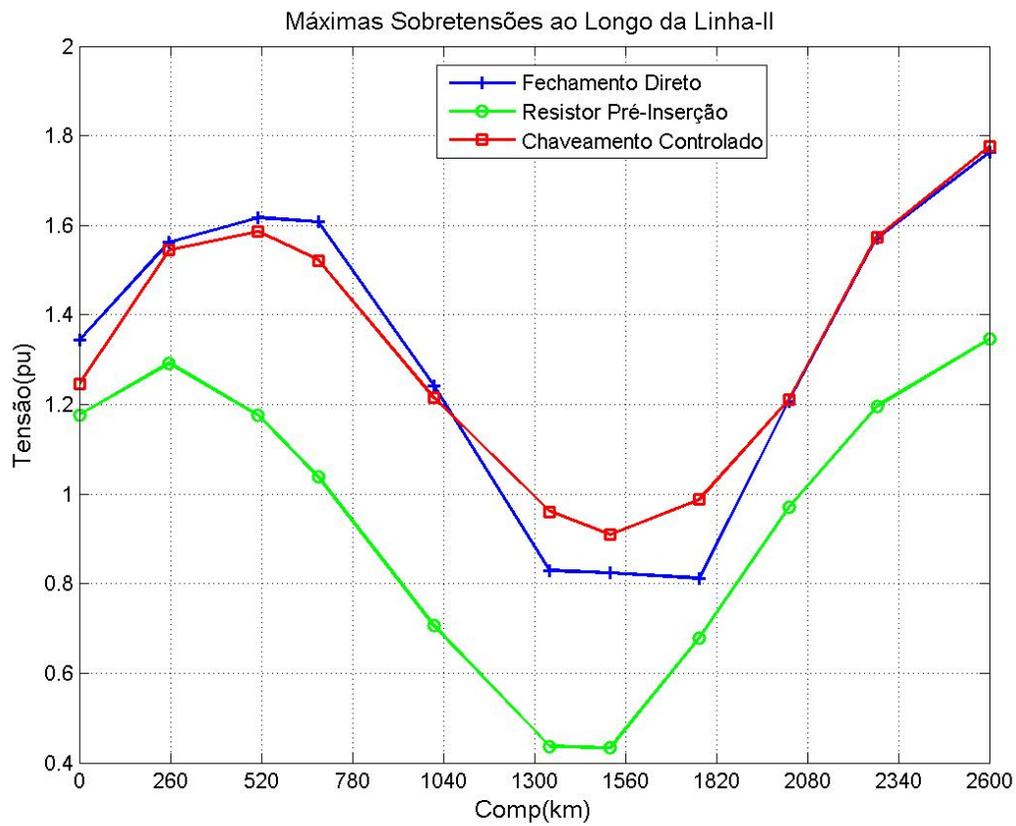


Figura 5.21 – Máximas sobretensões ao longo da Linha-II para os diferentes métodos de energização. Simulação com o ATP

Os níveis de energia absorvida pelos dispositivos pára-raios para cada método de energização podem ser vistos na Figura 5.22 e na Figura 5.23.



Figura 5.22 – Energia absorvida pelos dispositivos pára-raios localizados no início da linha durante a energização da Linha II – Simulação com o ATP.



Figura 5.23 – Energia absorvida pelos dispositivos pára-raios localizados no terminal em vazio da linha durante a energização da Linha II – Simulação com o ATP.

A seguir são apresentados os resultados obtidos nas simulações feitas para o caso estatístico.

Foram simulados casos de energização com os diferentes métodos de energização considerando-se 100 fechamentos. As mesmas condições descritas na Linha I para a manobra de fechamento também se aplicam a Linha II.

Os resultados para esse caso podem ser observados na Tabela 5.13.

Nas Figuras 5.24, 5.25 e 5.26 são mostradas graficamente a probabilidade de ocorrência de sobretensões nos extremos da linha para o caso estatístico, para cada método de redução de sobretensões utilizado durante a manobra de energização.

Analisando os resultados obtidos para o caso estatístico verifica-se que os piores casos de sobretensão transitória para a manobra de energização ocorrem para os casos de uso apenas dos dispositivos pára-raios e para o chaveamento controlado.

Uma probabilidade de 18% para ocorrência de sobretensões entre 1,85 e 1,90 pu para o método de chaveamento controlado podem ser observadas.

Os resultados obtidos para a energização da Linha II corroboram a utilização de um conjunto de linhas semelhantes para ensaiar a manobra de energização de um tronco de um pouco mais de meio comprimento de onda, uma vez que as sobretensões encontradas nas Linhas I e II foram muito próximas.

Tabela 5.13 – Sobretensões ao longo da Linha II para o caso estatístico – Simulação com o ATP

Subestação	Local [km]	Fechamento Direto		Resistor de Pré-Inserção		Chaveamento Controlado	
		Tensão [pu]	Probabilidade [%]	Tensão [pu]	Probabilidade [%]	Tensão [pu]	Probabilidade [%]
Serra da Mesa I	0	1,40-1,45	17	1,25-1,30	4	1,40-1,45	11
Gurupi I	256	1,70-1,75	5	1,45-1,50	2	1,75-1,80	2
Miracema I	511	1,70-1,75	3	1,35-1,40	5	1,75-1,80	1
Colinas I	684	1,65-1,70	1	1,30-1,35	3	1,65-1,70	2
Imperatriz	1014	1,30-1,35	2	1,15-1,20	3	1,30-1,35	3
Colinas II	1344	1,05-1,10	16	0,85-0,90	1	1,05-1,10	5
Miracema II	1517	1,05-1,10	11	0,60-0,65	1	1,05-1,10	3
Gurupi II	1772	1,05-1,10	2	0,60-0,65	11	1,15-1,20	3
Serra da Mesa II	2028	1,35-1,40	5	0,70-0,75	9	1,40-1,45	2
Rio das Éguas	2279	1,70-1,75	2	1,05-1,10	1	1,80-1,85	1
B.J. da Lapa	2601	1,85-1,90	3	1,45-1,50	2	1,85-1,90	18

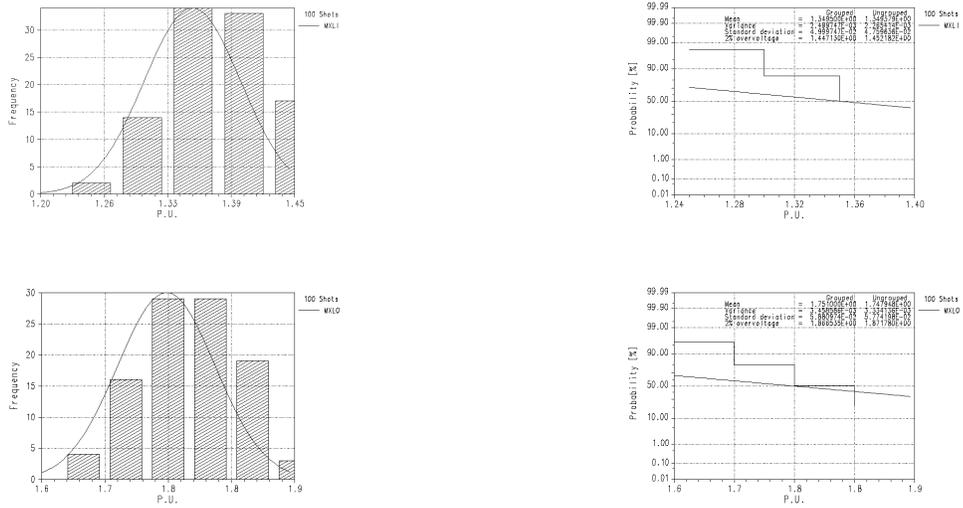


Figura 5.24 – Máximas sobretensões nos extremos da linha para o caso estatístico, durante a manobra de energização com a utilização apenas dos pára-raios, na Linha-II – Simulação com o ATP

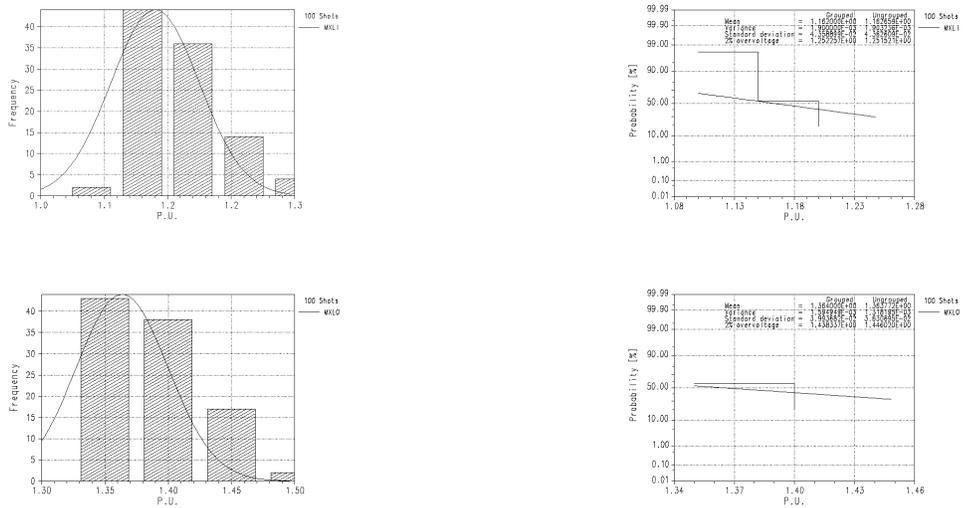


Figura 5.25 – Máximas sobretensões nos extremos da linha para o caso estatístico, durante a manobra de energização com a utilização dos resistores de pré-inserção, na Linha-II – Simulação com o ATP

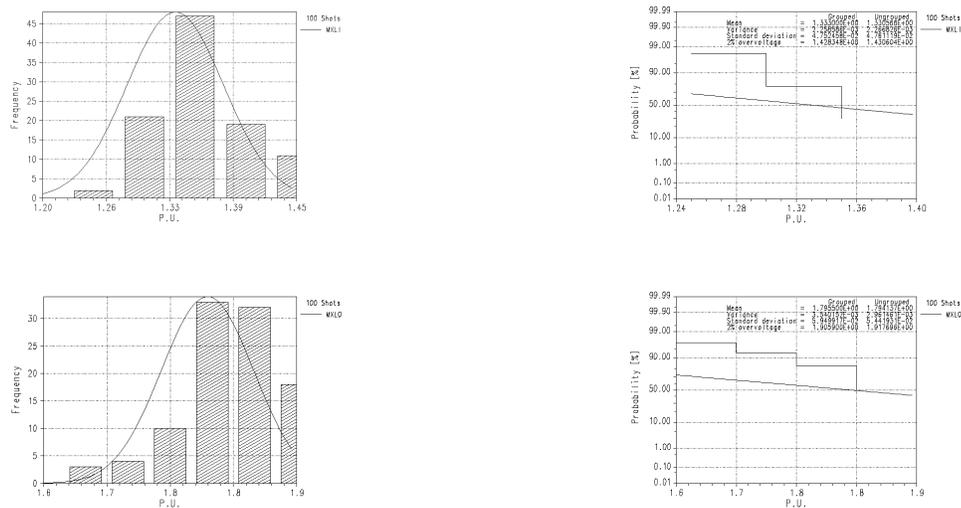


Figura 5.26 – Máximas sobretensões nos extremos da linha para o caso estatístico, durante a manobra de energização com a utilização do método do chaveamento controlado, na Linha-II – Simulação com o ATP

5.4.1.3 Energização de uma Linha de 400 km

A energização da linha de 400 km, com 65 % de compensação shunt, foi feita utilizando-se apenas o método do resistor de pré-inserção para suprimir os surtos transitórios, para comparação com os resultados obtidos com as linhas de 2600 km.

Os resultados obtidos nessas simulações utilizando o software ATP são apresentados na Figura 5.27. Assim é possível verificar as sobretensões transitórias de uma linha de poucas centenas de quilômetros durante a manobra de energização com a utilização de resistores de pré-inserção.

Observa-se que os níveis de sobretensões transitórias obtidas nesta manobra são de mesma ordem que para as linhas de um pouco mais de meio comprimento de onda.

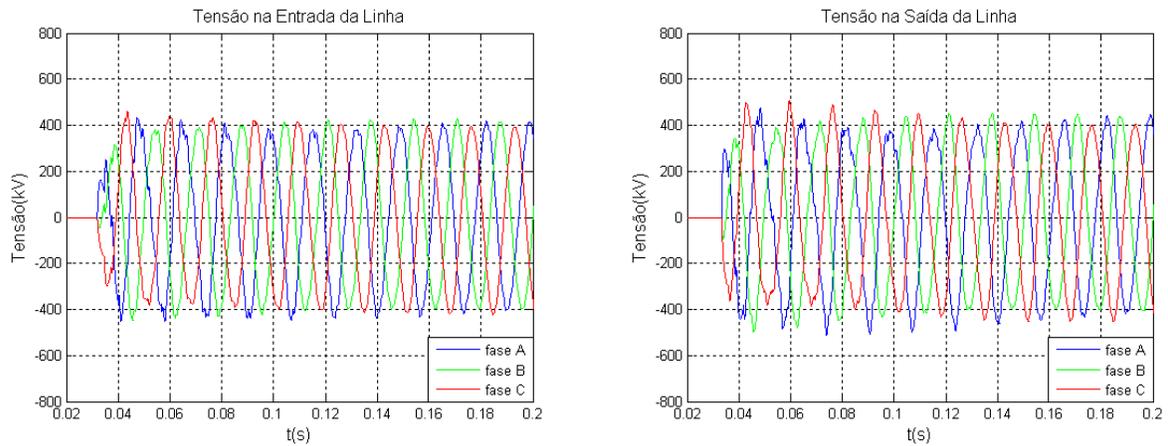


Figura 5.27 – Comportamento das tensões nos extremos da linha de 400 km durante a manobra de energização utilizando o resistor de pré-inserção – Simulação com o ATP

5.4.2 Resultados PSCAD/EMTDC.

Os resultados para essa seção serão divididos em quatro itens, sendo eles referentes à energização da Linha-I, à energização da Linha-II, energização de uma linha de 400 km e a energização de uma linha de 2600 km fortemente compensada.

5.4.2.1 Energização Linha-I

Os principais resultados observados nestas simulações foram os níveis máximos de sobretensões ao longo da linha assim como as formas de onda das tensões nos pontos de interligação na Linha I para as diferentes técnicas de energização.

A Figura 5.28 apresenta as formas de onda das tensões nos extremos da linha e nos pontos de interligação para a Linha-I durante a manobra de energização utilizando-se apenas os dispositivos pára-raios para mitigar as sobretensões.

Analisando os resultados obtidos verifica-se que as formas de onda para as simulações feitas no PSCAD/EMTDC em muito se assemelham às obtidas no ATP. Entretanto algumas diferenças nas formas de onda podem ser verificadas, o que se explica pela diferença nos modelos utilizados para representação da linha de transmissão, já que no software ATP foi utilizado o modelo de parâmetros distribuídos sem dependência dos parâmetros longitudinais com a frequência ao passo que no PSCAD/EMTDC utilizou-se o modelo do domínio das fases com a representação da

dependência dos parâmetros longitudinais com a frequência. As sobretensões obtidas com o PSCAD são menores do que as obtidas com o ATP.

O uso do resistor de pré-inserção para a redução do nível das sobretensões foi também implementado e as formas de onda nos extremos da linha e nos pontos de interligação das linhas é mostrado na Figura 5.29.

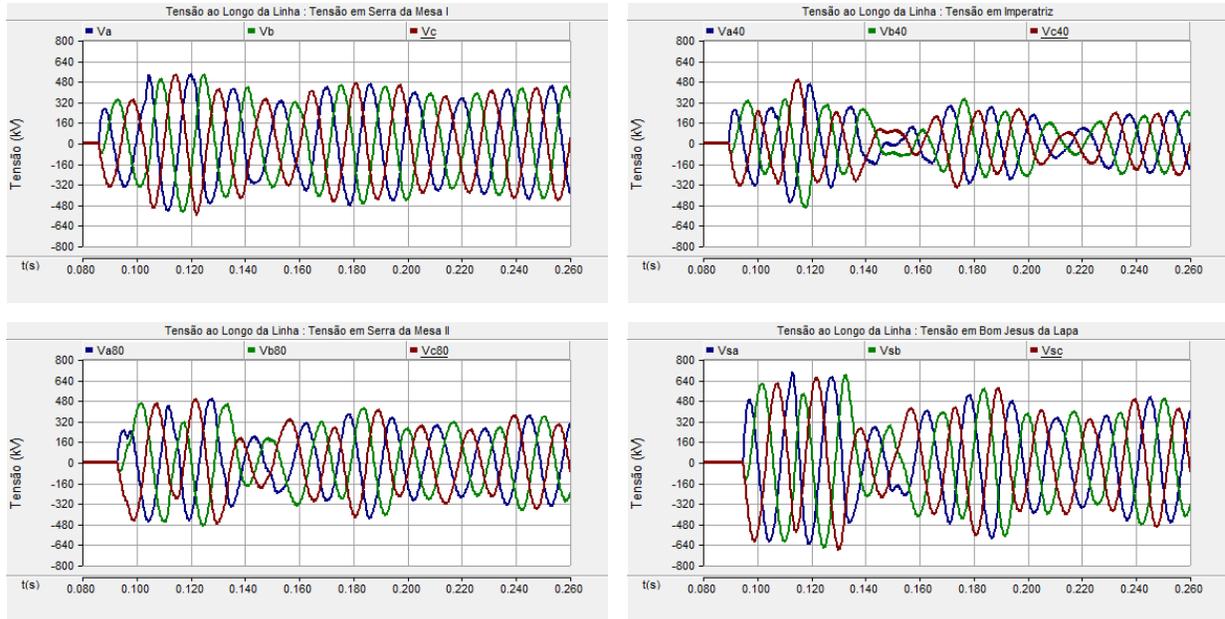


Figura 5.28 – Comportamento das tensões nos extremos da linha e nos pontos de interligação, durante a manobra de energização apenas com o uso dos pára-raios, na Linha-I – Simulação com o PSCAD

Foram também realizadas simulações utilizando-se a técnica de chaveamento controlado para redução dos níveis de sobretensões transitórias e as formas de onda da tensão no extremo da linha e nos pontos de energização podem ser observadas na Figura 5.30.

Uma curva contendo as máximas sobretensões transitórias para cada método de energização também foi gerada e está mostrada na Figura 5.31.

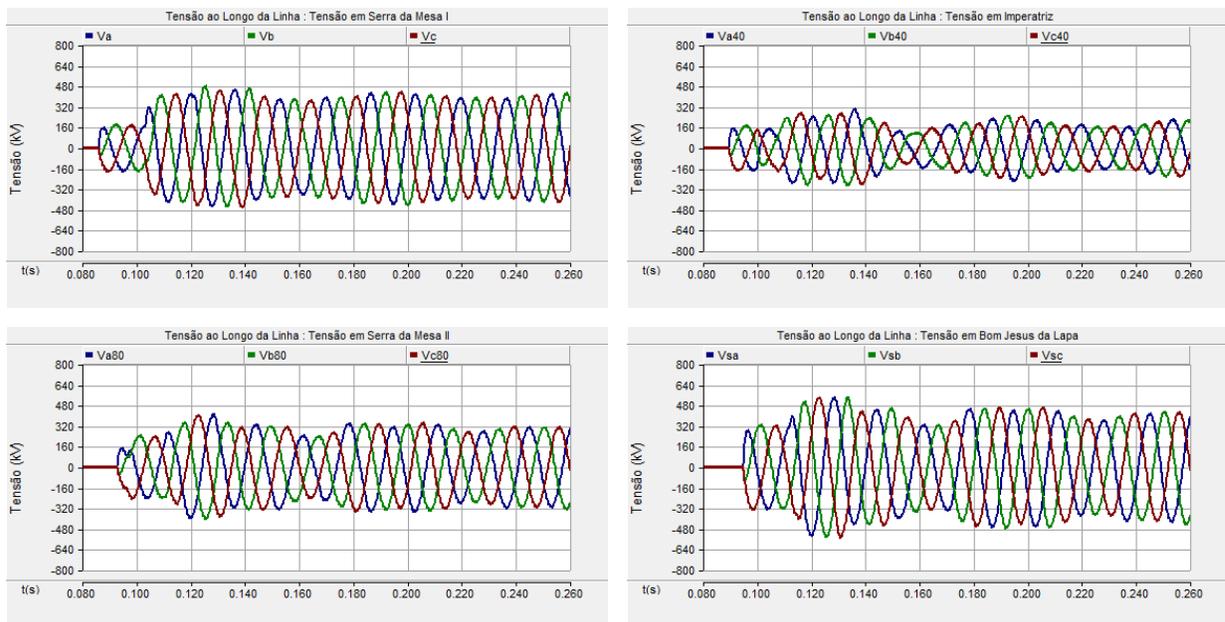


Figura 5.29 – Comportamento das tensões nos extremos da linha e nos pontos de interligação, durante a manobra de energização com a utilização do resistor de pré-inserção, na Linha-I – Simulação com o PSCAD

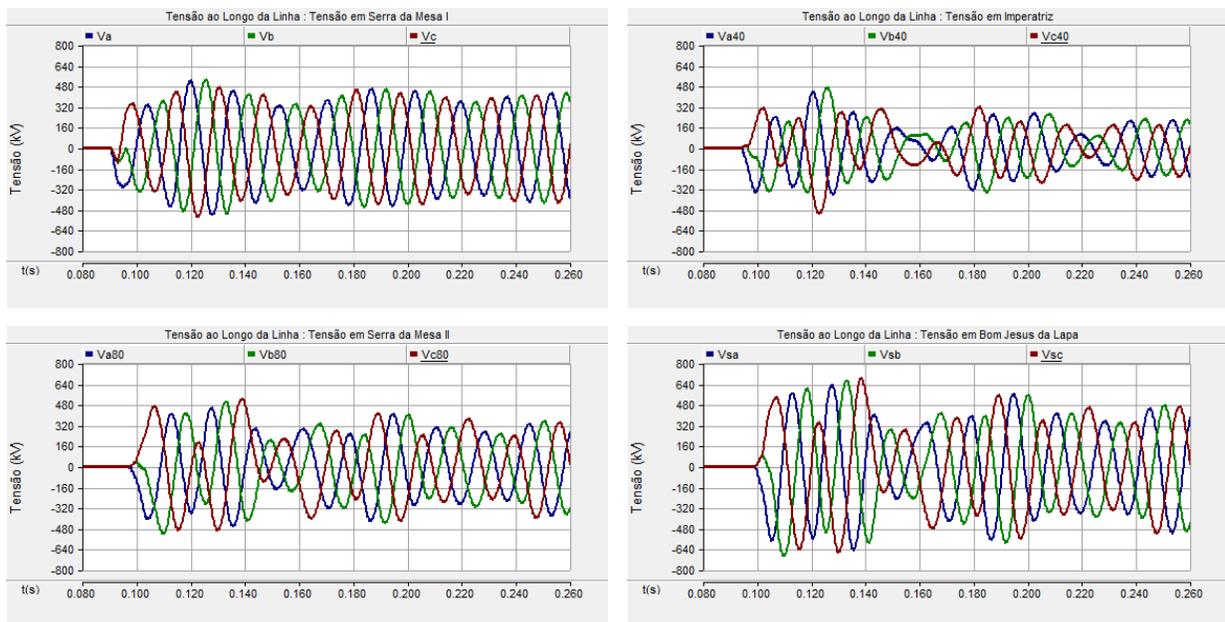


Figura 5.30 – Comportamento das tensões nos extremos da linha e nos pontos de interligação, durante a manobra de energização com a utilização do método do chaveamento controlado, na Linha-I – Simulação com o PSCAD

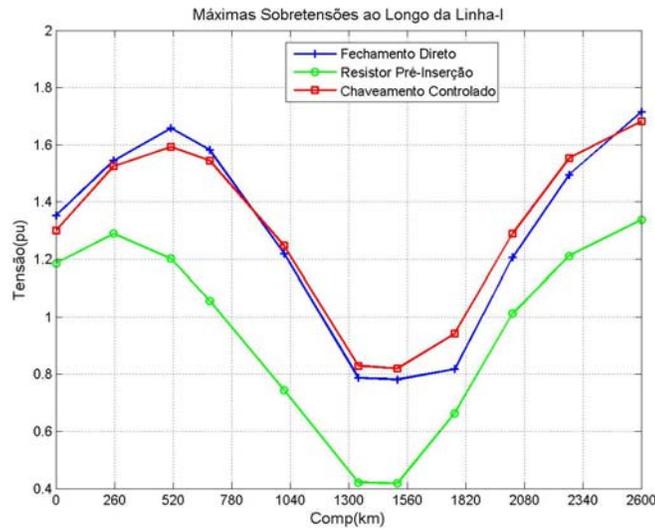


Figura 5.31 – Máximas sobretensões ao longo da Linha-I para os diferentes métodos de energização – Simulação com o PSCAD

5.4.2.2 Energização Linha-II

Os principais resultados observados nessas simulações foram os níveis máximos de sobretensões ao longo da linha assim como as formas de onda das tensões nos pontos de interligação na Linha II para as diferentes técnicas de energização.

A Figura 5.32 apresenta as formas de onda das tensões nos extremos da linha e nos pontos de interligação para a Linha-II durante a manobra de energização utilizando-se apenas os dispositivos pára-raios para mitigar as sobretensões.

O uso do resistor de pré-inserção para a redução do nível das sobretensões foi também implementado e as formas de onda nos extremos da linha e nos pontos de interligação das linhas é mostrado na Figura 5.33.

Foram também realizadas simulações utilizando-se a técnica de chaveamento controlado para redução dos níveis de sobretensões transitórias e as formas de onda da tensão no extremo da linha e nos pontos de energização podem ser observadas na Figura 5.34.

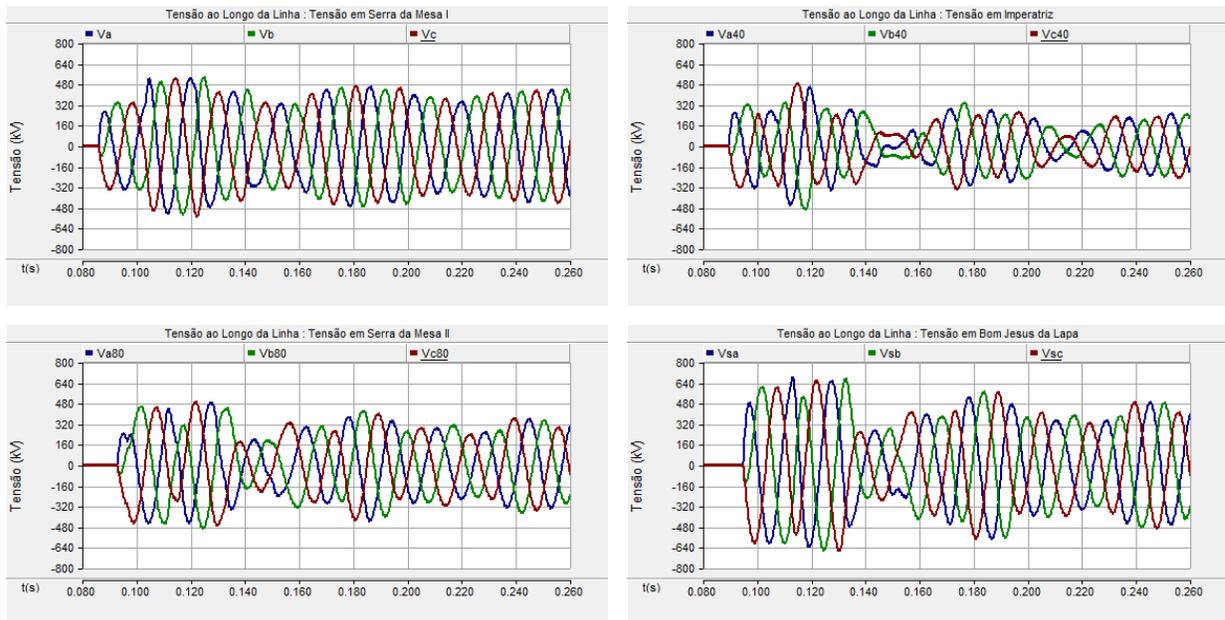


Figura 5.32 – Comportamento das tensões nos extremos da linha e nos pontos de interligação, durante a manobra de energização apenas com o uso dos pára-raios, na Linha-II – Simulação com o PSCAD

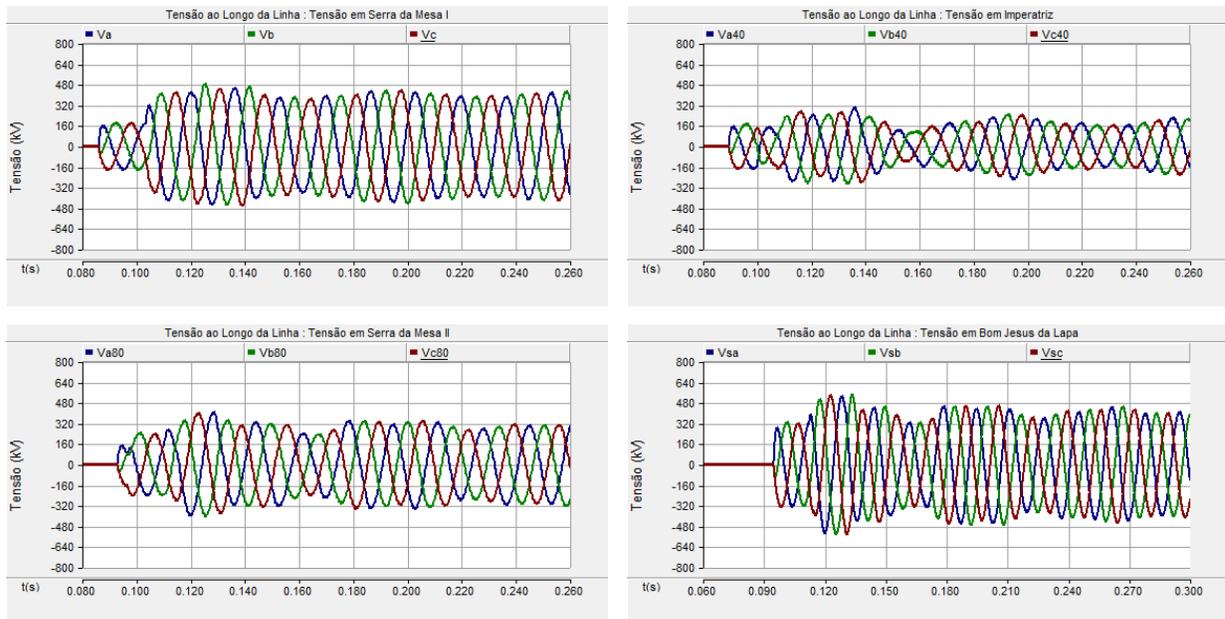


Figura 5.33 – Comportamento das tensões nos extremos da linha e nos pontos de interligação, durante a manobra de energização com a utilização do resistor de pré-inserção, na Linha-II – Simulação com o PSCAD

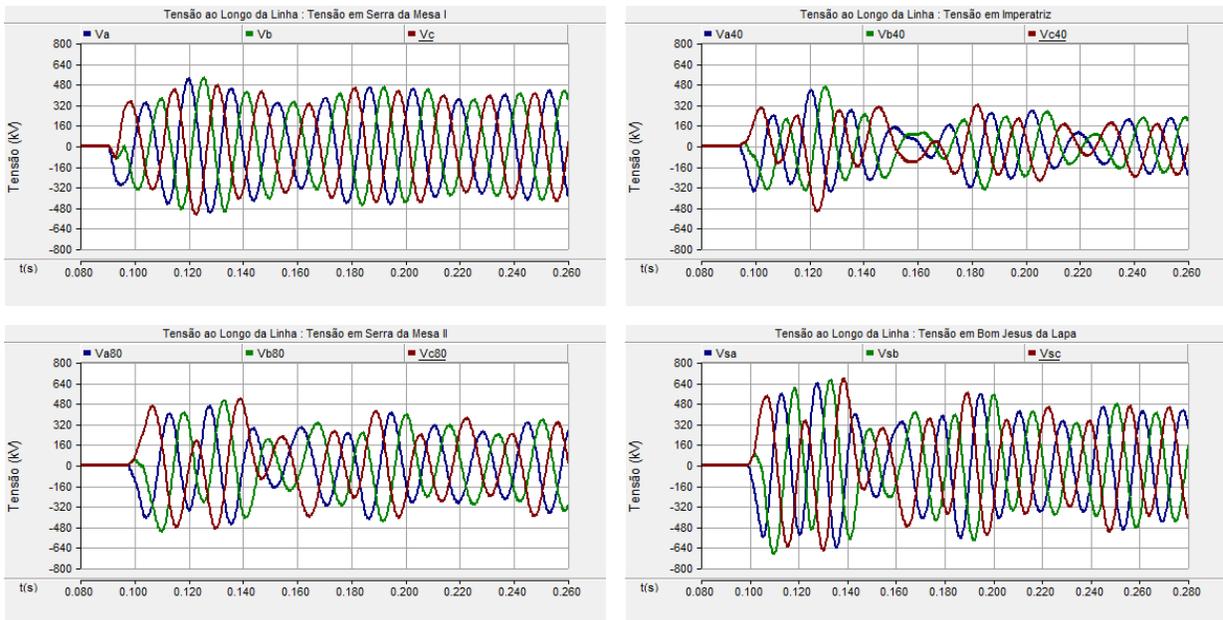


Figura 5.34 – Comportamento das tensões nos extremos da linha e nos pontos de interligação, durante a manobra de energização com a utilização do método do Chaveamento Controlado, na Linha-II – Simulação com o PSCAD

Uma curva contendo as máximas sobretensões transitórias para cada método de energização também foi gerada e está mostrada na Figura 5.35. Os resultados obtidos são semelhantes aos da energização da Linha I indicando que um tronco formado por linhas semelhantes pode ser utilizado numa manobra real de energização de um Elo CA.

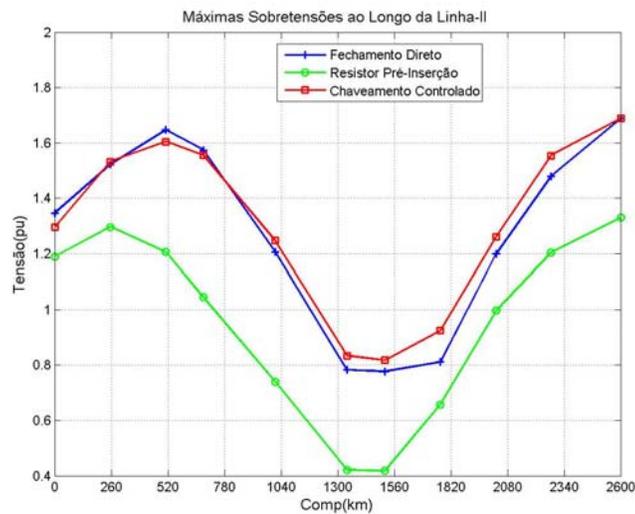


Figura 5.35 – Máximas sobretensões ao longo da Linha-II para os diferentes métodos de energização – Simulação com o PSCAD

5.4.2.3 Energização de uma Linha de 400 km

Assim como para as simulações realizadas no software ATP, foram também realizadas no PSCAD/EMTDC a manobra de energização de uma linha de 400 km com compensação shunt de 65%, utilizando o método do resistor de pré-inserção para mitigar as sobretensões transitórias.

Os resultados obtidos nessas simulações são apresentados na Figura 5.36. As sobretensões obtidas são da mesma ordem das da energização da Linha I ou II.

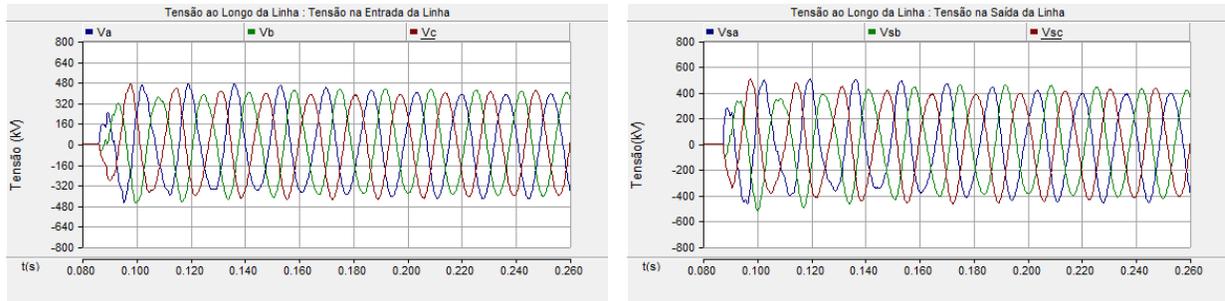


Figura 5.36 – Comportamento das tensões nos extremos da linha durante a manobra de energização de uma linha de 400 km, utilizando-se o resistor de pré-inserção – Simulação com o PSCAD

5.4.2.4 Energização de uma Linha de 2600 km CA convencional fortemente compensada.

Com a finalidade de comparação da manobra de energização de uma linha de 2600 km com características de meio comprimento de onda foi realizada no PSCAD/EMTDC a manobra de energização de uma linha 2600 km CA convencional fortemente compensada.

Essa manobra foi feita energizando cada trecho da linha apresentada na Figura 4.11, separadamente. Cada trecho foi fortemente compensado conforme descrito anteriormente.

Sendo assim o trecho da manobra que apresentou as piores condições de sobretensão transitória foi o último trecho da linha. As sobretensões resultantes desta manobra são então apresentadas na Figura 5.37.

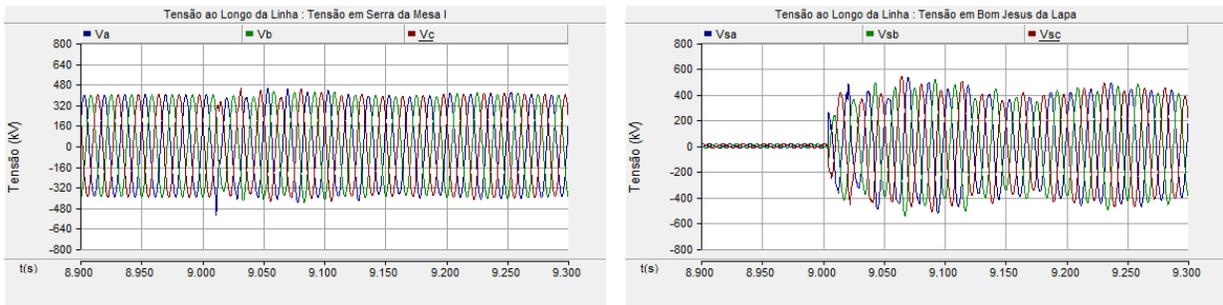


Figura 5.37 – Comportamento das tensões nos extremos da linha durante a manobra de energização de uma linha de 2600 km fortemente compensada, utilizando-se o resistor de pré-inserção – Simulação com o PSCAD

5.5 Comparação dos Resultados.

Nesta seção, será feita uma comparação das máximas sobretensões obtidas para as Linhas I e II, com os níveis de sobretensão de uma linha de 400 km, conforme mencionado anteriormente.

Inicialmente será apresentada uma comparação entre as máximas sobretensões obtidas nas simulações realizadas no ATP, para os três diferentes métodos de energização propostos, conforme mostrado na Figura 5.38 e na Figura 5.39.

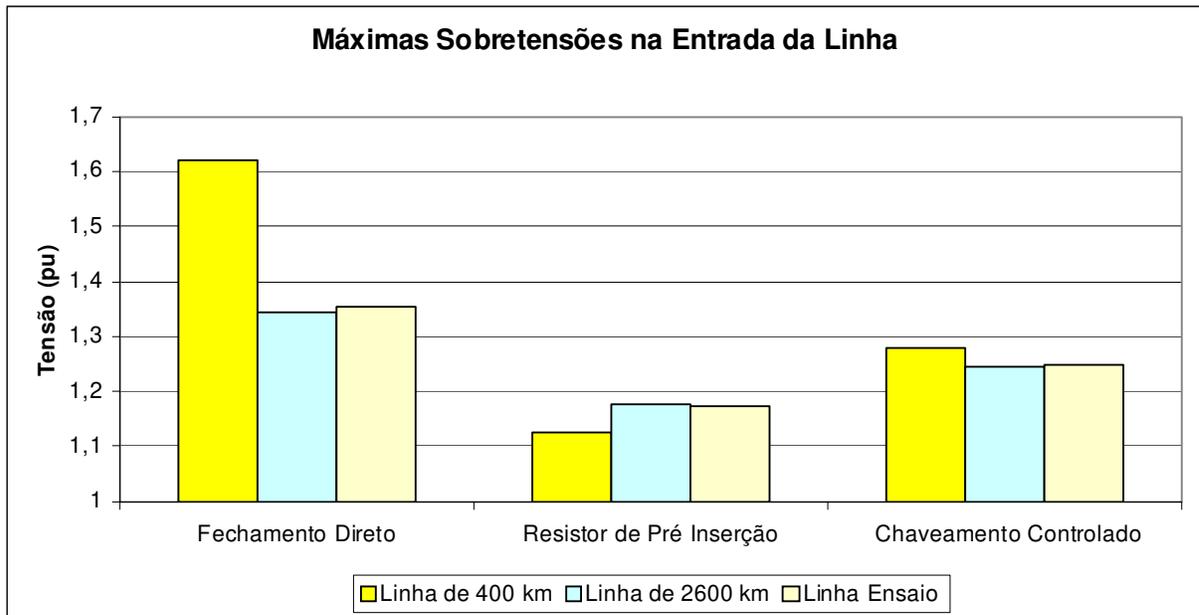


Figura 5.38 – Comparação níveis máximos de sobretensão no início da linha para os três métodos de energização apresentados, simulados no software ATP.

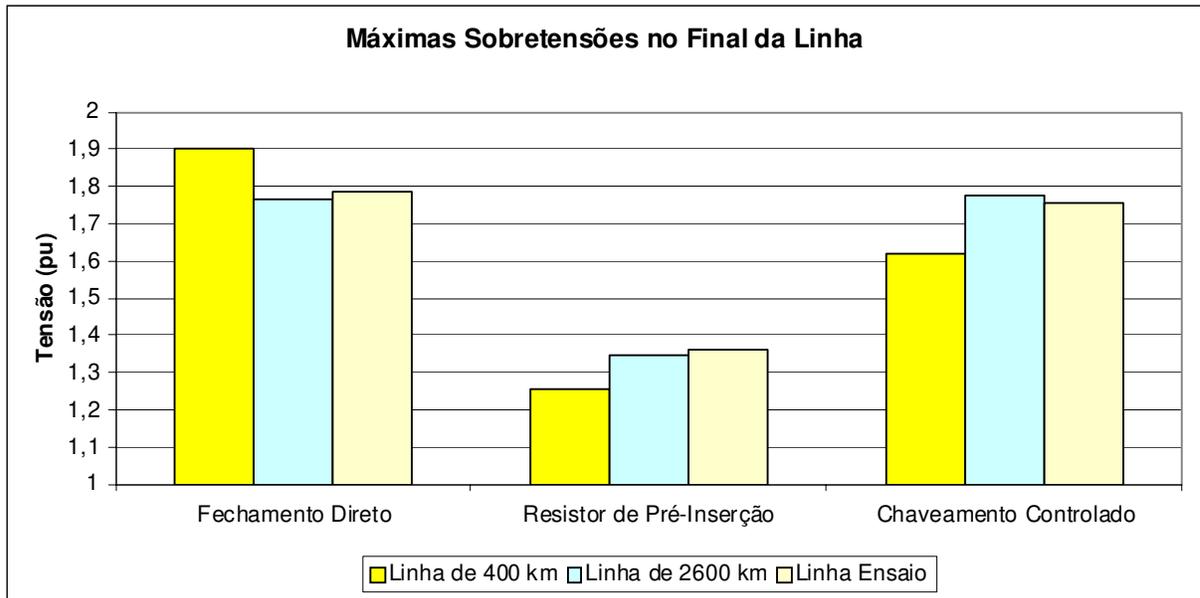


Figura 5.39 – Comparação níveis máximos de sobretensão no final da linha para os três métodos de energização apresentados, simulados no software ATP.

Comparando-se as Linhas I e II, para os diferentes métodos de energização, verifica-se que no que diz respeito aos níveis de sobretensão transitória elas apresentam características bastante semelhantes.

Ao se comparar as linhas de 2600 km com uma linha de 400 km verifica-se que as linhas de meia onda apresentam níveis de sobretensão de mesma ordem ou até menores do que a linha de poucas centenas de quilômetros.

Em todos os casos o uso do resistor de pré-inserção para mitigar as sobretensões transitórias foi o que apresentou o melhor resultado reduzindo de forma significativa os surtos transitórios.

Na seqüência, foi feita uma análise dos resultados obtidos nas simulações realizadas no PSCAD/EMTDC, onde se comparou os níveis de sobretensão das Linhas I e II com as máximas sobretensões em uma linha de 400 km, conforme apresentado na Figura 5.40 e na Figura 5.41.

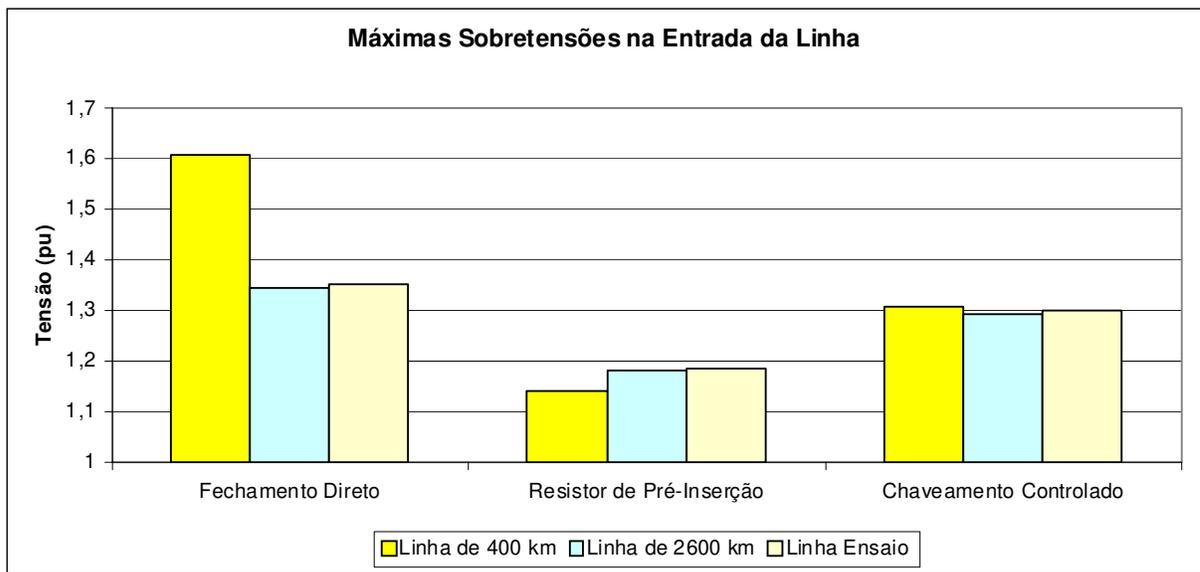


Figura 5.40 – Comparação níveis máximos de sobretensão no início da linha para os três métodos de energização apresentados, simulados no software PSCAD/EMTDC.

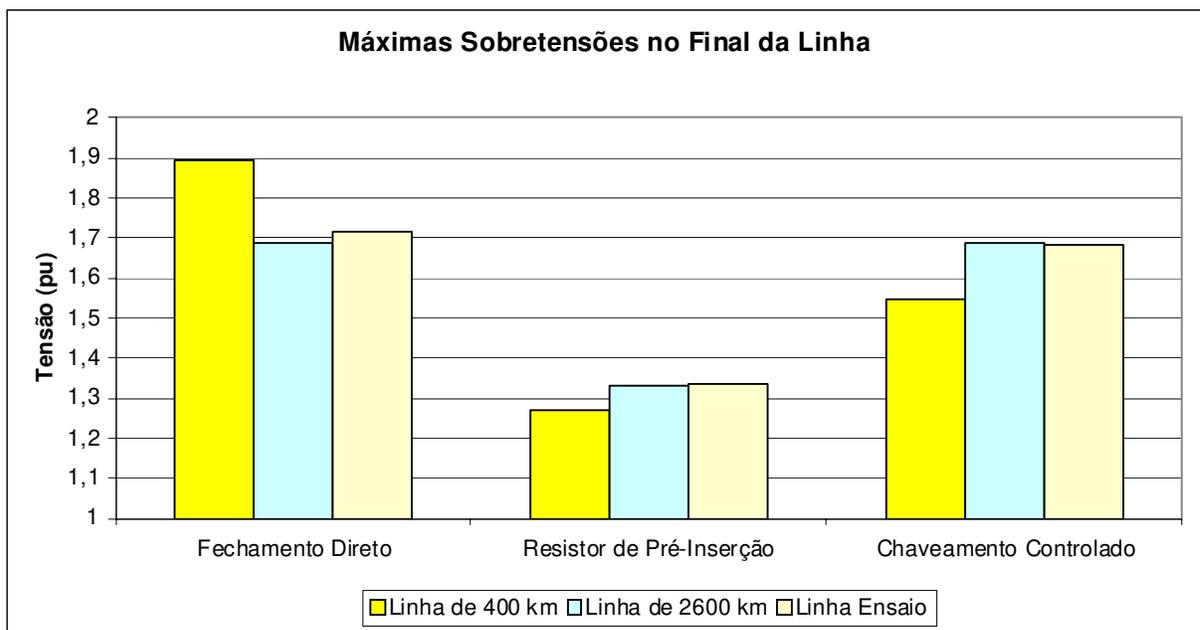


Figura 5.41 – Comparação níveis máximos de sobretensão no final da linha para os três métodos de energização apresentados, simulados no software PSCAD/EMTDC.

Posteriormente compararam-se estes resultados com uma linha CA convencional apenas para a manobra de energização com a utilização do resistor de pré-inserção e está apresentado na Figura 5.42 e na Figura 5.43.

A comparação das linhas de meia onda com uma linha de 400 km para os resultados obtidos no PSCAD/EMTDC foram de mesma ordem que os obtidos no ATP. Sendo que nas simulações feitas no PSCAD/EMTDC os níveis de sobretensão transitória foram um pouco menores devido ao modelo de linha utilizado.

Comparando-se os níveis de sobretensão para as linhas de meia onda e uma linha CA convencional fortemente compensada, observou-se que as máximas sobretensões foram de mesma ordem. Entretanto na linha CA convencional a energização foi feita por trechos, enquanto nas linhas de meia onda foi fechado o elo inteiro.

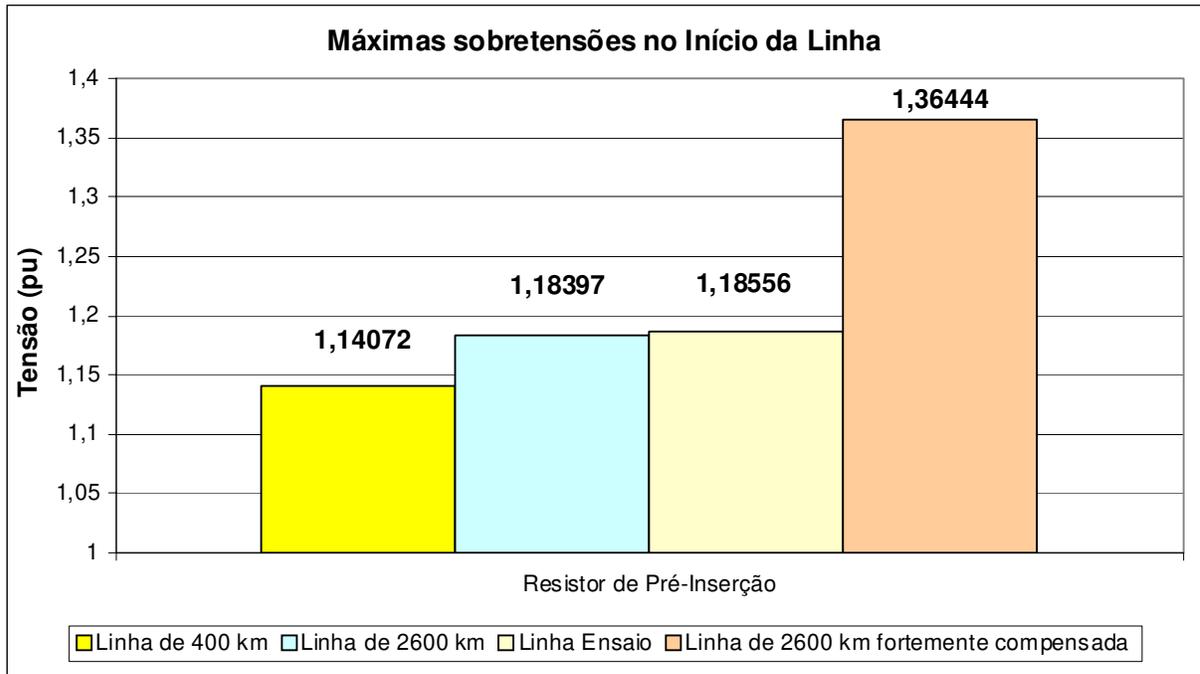


Figura 5.42 – Comparação níveis máximos de sobretensão no início da linha com resistor de pré-inserção, simulados no software PSCAD/EMTDC.

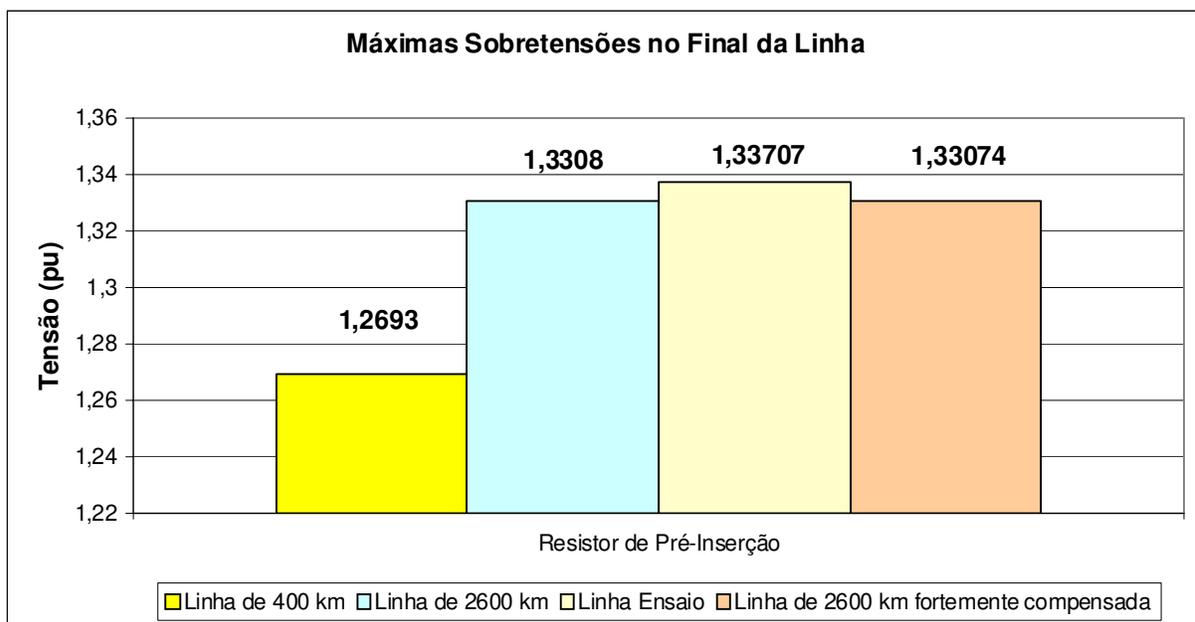


Figura 5.43 – Comparação níveis máximos de sobretensão no final da linha energizada com resistor de pré-inserção, simulados no software PSCAD/EMTDC.

5.6 Conclusões Parciais.

Com base nos resultados obtidos nas simulações, pode-se verificar que as Linhas I e II têm desempenhos semelhantes tanto em regime permanente quanto durante a energização. Isto implica que a Linha I representa razoavelmente um Elo CA para a manobra de energização.

Dentre os métodos de energização analisados, o uso do resistor de pré-inserção foi o que apresentou menores sobretensões durante a manobra, sendo assim o mais indicado para linhas deste comprimento.

Os resultados apresentados tanto para as simulações feitas no ATP quanto no PSCAD tiveram resultados semelhantes sendo as diferenças encontradas resultantes dos modelos utilizados em cada simulador.

A energia dissipada nos pára-raios manteve-se dentro dos limites de operação do dispositivo.

Comparando-se o nível de sobretensões ocorridas nas linhas I e II com o nível de sobretensões de uma linha longa durante a manobra de energização, verificou-se que as linhas de “meio

comprimento de onda” apresentaram sobretensões menos severas ou de mesma ordem para alguns casos do que as normalmente encontradas em linhas de poucas centenas de quilômetros.

Entretanto nas simulações realizadas não foram consideradas a variação da resistividade do solo com a frequência o que traria resultados mais próximos a realidade. Outro fator que também não foi representado é a representação da permeabilidade relativa dos cabos pára-raios diferente da unidade devido à limitação dos programas de simulação de transitórios eletromagnéticos, ficando a inclusão dessas características como sugestão para futuros trabalhos.

Capítulo 6

CONCLUSÃO

Pelas características básicas sob condições de operação em regime permanente apresentadas para uma linha de transmissão de um pouco mais de meio comprimento de onda ao longo deste trabalho, esta transmissão se apresenta com uma solução natural para situações em que as distâncias de transmissão envolvidas são desta ordem de grandeza, o que para o sistema elétrico brasileiro corresponde a 2600 km.

O perfil de tensão e de corrente ao longo da linha mostrou que as linhas de um pouco mais de meio comprimento de onda, consideradas neste estudo, têm um melhor desempenho para transmissão de potência próxima a sua potência característica.

Para carregamentos próximos ao da potência característica da linha, uma pequena queda de tensão foi observada junto ao terminal receptor do Elo CA isolado. É importante lembrar que o estudo foi realizado para uma linha de 500 kV não otimizada para distâncias tão longas. É de se esperar que um Elo CA otimizado tenha perdas muito menores do que as encontradas no estudo.

Em uma linha real para a transmissão em um pouco mais de meio comprimento de onda no qual grandes montantes de energia seriam transmitidos, a barra de recepção seria conectada a um nó forte. Dessa forma nenhum montante de compensação seria necessário para a transmissão ponto a ponto. E por ser tratar de uma transmissão ponto a ponto nenhuma subestação intermediária seria necessária.

Conforme apresentado para se manter uma margem de estabilidade em linhas de transmissão de aproximadamente meio comprimento de onda recomenda-se que as linhas trabalhem com um comprimento elétrico em torno de 190° elétricos.

As perdas ao longo da linha de transmissão, para as situações em que um pequeno montante de potência está sendo transmitido, podem ser drasticamente reduzidas com a utilização de autotransformadores com tomadas variáveis reduzindo as tensões de operação na linha. As perdas encontradas no estudo são mais elevadas porque a linha utilizada não foi otimizada para esta transmissão. Um Elo CA otimizado apresentaria perdas muito menores. No entanto, o método proposto para reduzir as perdas durante a operação em carga leve pode ser aplicado para um Elo CA otimizado.

No estudo desenvolvido é mostrado como uma análise sistemática do sistema, na frequência fundamental, é uma importante ferramenta auxiliar para os estudos de transitórios eletromagnéticos.

Com a análise realizada na frequência fundamental foi possível determinar as condições mais severas para diferentes condições de defeito. Neste trabalho foram feitas apenas combinações dos diferentes tipos de falta com o local de ocorrência do defeito.

A metodologia utilizada na análise à frequência fundamental também pode ser utilizada em sistemas com linhas de comprimentos de poucas centenas de quilômetros para avaliação da influência da variação da situação dos pólos do disjuntor nos terminais da linha, religamento e abertura monopolar, chaveamento de reatores em caso de faltas, otimização do reator de neutro, e outras análises que se julguem necessárias.

Para o sistema proposto (isolado e alimentado por fonte infinita) observou-se a ocorrência de sobretensões muito elevadas nas regiões próximas ao meio da linha (em torno do km 1300) quando os curtos-circuitos, envolvendo mais que uma fase, ocorriam próximos a extremidade da linha (próximos ao km 2500). Tal fato se deve a ressonância de sequência positiva nessa região devido à distância entre esta região e o ponto de ocorrência da falta estar em torno de $\frac{1}{4}$ de comprimento de onda.

Para as faltas monofásicas, as piores condições foram monitoradas no final da linha para faltas entre fase-terra, ocorridas em dois diferentes pontos, localizadas em pontos em torno de $\frac{1}{4}$ e $\frac{3}{4}$ do comprimento da linha. Esta situação ocorre devido à ressonância de sequência zero

ocorrida nessas regiões, já que para o circuito de seqüência zero em 2600 km tem-se quase que um comprimento de onda completo.

Porém para os resultados obtidos nos cálculos de curto circuito deve ser levado em consideração que as perdas por efeito coroa não foram representadas, o que reduziria drasticamente os níveis de sobretensão de curto-circuito sustentadas obtidas.

Em um sistema real o Elo CA estaria integrado a um sistema elétrico e a interação do Elo CA com o sistema iria modificar os resultados obtidos, principalmente em relação ao nível das sobretensões obtidas. Como a análise apresentada consiste em identificar sobretensões sustentadas, esta ferramenta indica que é necessário implementar uma proteção rápida que atue nos primeiros ciclos do transitório, protegendo adequadamente o sistema.

Com base nos resultados obtidos nas simulações de energização da linha foi verificado que um tronco de 2600 km formado por linhas semelhantes (Linha I) apresenta resposta semelhante a um tronco formado por uma linha única de 2600 km, (Linha II). Isto implica que a Linha I pode representar razoavelmente um Elo CA para a manobra de energização.

Dentre os métodos de energização analisados, o uso do resistor de pré-inserção foi o que apresentou menores sobretensões durante a manobra, sendo assim o mais indicado para linhas deste comprimento.

Os resultados apresentados tanto para as simulações feitas no ATP quanto no PSCAD foram semelhantes, sendo as diferenças encontradas resultantes dos modelos utilizados em cada simulador.

A energia dissipada nos pára-raios manteve-se dentro dos limites de operação do dispositivo.

Comparando-se o nível de sobretensões ocorridas nas linhas I e II com o nível de sobretensões de uma linha longa de poucas centenas de quilômetros durante a manobra de energização, verificou-se que as linhas de “meio comprimento de onda” apresentaram sobretensões menos severas ou de mesma ordem de grandeza.

Pelos resultados obtidos pode-se concluir que o comportamento do Elo CA é robusto e adequado para a transmissão de grandes montantes de energia por muito longa distância. Além disto foi verificado que é possível realizar a manobra de energização de um Elo CA constituído por linhas semelhantes para avaliar o comportamento de um Elo CA formado por uma linha única.

Como trabalhos futuros sugere-se que:

- Avalie-se o desempenho do Elo CA otimizado, ou seja, com a linha projetada para transmitir grandes blocos de energia por longas distâncias, integrado a um sistema de transmissão, visando:
 - A operação em regime permanente;
 - Ocorrência de faltas ao longo do tronco;
 - Desempenho do tronco frente a manobras usuais;
 - Análise das perdas do tronco;
- Seja desenvolvido um modelo de efeito coroa para permitir uma análise adequada do nível das sobretensões durante a ocorrência de defeitos em locais críticos;
- Inclua-se a correta representação da transposição da linha, assim como da permeabilidade magnética do aço nos cabos pára-raios, o que irá refletir na representação adequada do modo de propagação homopolar.

Capítulo 7

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] Tavares, M. C.; Portela C. M.. "Half-Wave Length Line Energization Case Test-Proposition of a Real Test", International Conference on High Voltage Engineering and Application. Chongqing, China, Novembro 2008.
- [2] Portela, C.; Alvim, M. "Soluções não Convencionais em CA Adequadas para Transmissão a Distância muito Longa – Uma Alternativa para o Sistema de Transmissão da Amazônia"; Seminário: Transmissão de Energia Elétrica a Longa Distância. Recife, PE, Outubro,2007.
- [3] Portela, C.; Arruda, C. K. C.; Silva, C. J.; Miranda, J. A. "Solicitações de Disjuntores na Manobra de Linhas Não Convencionais". In: XIX SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica,v. X. p. 1-8.,CIGRE Brasil, 2007, Rio de Janeiro, RJ.
- [4] Portela, C. ; Aredes, M. "Very Long Distance Transmission". Proceedings 2003 International Conference on AC Power Delivery at Long and Very Long Distances, 8 p., Novosibirsk, Rússia, Setembro de 2003.
- [5] Wolf, A. A; Scherbatchov, O. V. "Operação em Regime Permanente de Linhas Compensadas com Características de Meio Comprimento de Onda" (em Russo). Elektrichestvo, nº 10-11, 1939.
- [6] Hubert, F.J.; Gent, M.R., "Half-Wavelength Power Transmission Lines". IEEE Transac. on PAS, vol 84, no. 10, pp. 966-973, Outubro 1965.

-
- [7] Vershkov, V.A.; Nakhapetyan, K. T., “ Testes Complexos de uma Transmissão Elétrica de Meia Onda na Interconexão 500 kV – CEE da Parte Européia da URSS” (em Russo). *Elektrichestvo*, nº 8, 1968.
- [8] Prabhakara, F.S.; Parthasarathy, K; Ramachandra Rao , H.N., “Analysis of Natural Half-Wave-Length Power Transmission Lines”. *Transac. On PAS*, vol 88, no. 12, pp. 1787-1794, Dezembro 1969.
- [9] Prabhakara, F.S.; Parthasarathy, K; Ramachandra Rao , H.N., “Performance of Tuned half – wave-length Power Transmission Lines”. *Transac. On PAS*, vol 88, pág. 1795, Dezembro 1969.
- [10] Pavel. C. O., “Linhas de Transmissão de Meio Comprimento de Onda.” *VI SNPTEE*, 1981, Balneário Camboriú, SC.
- [11] Iliceto, F.; Cinieri, E. “Analysis of Half-Wave Length Transmission Lines With Simulation of Corona Losses”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 3, No. 4, pp. 2081-2091, Outubro 1988.
- [12] Gatta, F.M.; Iliceto, F., “Analysis of some operation problems of half wave length power transmission lines”. *IEEE AFRICON’92 Proc. Conference*, Setembro 1992.
- [13] Souza, H. Moss ; Coutinho, Carlos Eduardo. “Avaliação da Tecnologia de Meio Comprimento de Onda para a Transmissão da Amazônia”. In: *XI SNPTEE*, 1991, Rio de Janeiro, RJ.
- [14] Drujinin, A. A.; Samorodov G. I.; Kobylin V. P. “Methods of Active Loss Minimization in Half-wave Lines (by the Example of Power Export from Uchur Hydro Power Plants to South Korea)”. *AEC*, 2004, Irkutsk, Rússia.
- [15] Alexandrov, G.N.; Dardeer, M.M. “Long distance transmission line with controlled shunt reactors (CSRT)”. *IEEE Power System Conference*, 2008. *MEPCON 2008*. 12th International Middle-East, Aswan, Egito.
- [16] Portela, C.; Silva, J.; Alvim, M. “Non-Conventional AC Solutions Adequate for Very Long Distance Transmission - An Alternative for the Amazon Transmission System” - *IEC/CIGRE UHV Symposium Beijing 2007-07-18/21*, paper 2-2-5, 29 p. - Pequim, China, 18-21 Julho de 2007.
- [17] Portela, C. “Non-Conventional AC Solutions Adequate for Very Long Distance Transmission” – *XI SEPOPE*, Belém, Brasil, 17-20 Março de 2009.

-
- [18] Monticelli, A. J.; Garcia, A.V. “Introdução a Sistemas de Energia Elétrica”. Editora UNICAMP. Campinas, SP, 2003.
- [19] D’Azuz, Ary (org.). “Transitórios elétricos e coordenação de isolamento - aplicação em sistemas de potência de alta tensão”. Editora da Universidade Federal Fluminense - EDUFF. Rio de Janeiro, RJ, 1987.
- [20] Portela, C.; Gertrudes, J.B.; Tavares, M.C.; Filho, J.P. “Influence of earth conductivity and permittivity frequency dependence in electromagnetic transient phenomena - more measurements results in new sites”, Proceedings of the IEEE/PES Latin America Transmission and Distribution Conference and Exposition, pp. 941 – 946, 8-11, São Paulo, SP, Novembro 2004.
- [21] Tavares, M. C.; Portela, C. M. “Proposing a new methodology to optimize transient study of a transmission system”. Electric Power Systems Research, ISSN: 03787796, Vol: 69, Maio, 2004, Pages: 143-153.
- [22] Stevenson Jr.; William D. “Elementos de Análise de Sistemas de Potência”. Ed. McGraw – Hill do Brasil - 2a Impressão, São Paulo, SP, Brasil, 1976.
- [23] Valero, P. M. “Análise comparativa de técnicas de controle de sobretensões transitórias nas manobras de energização e religamento de linhas de transmissão”. Campinas, 2007. 170f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Campinas, Unicamp, 2007.
- [24] Martinez, J.A.; Natarjan, R.; Camm, E. “Comparison of statistical switching results using gaussian, uniform and systematic switching approaches”, in Proc. 2000 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, vol. 2, pp. 884-889, Seattle, WA.