



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

MARIANA LARISSA AMÉRICO ALVES NUNES

**ESTUDO COMPUTACIONAL DE MANOBRAS PARA ENERGIZAÇÃO DE LINHAS
DE TRANSMISSÃO COM COMPENSAÇÃO DE REATIVOS**

Recife
2019

MARIANA LARISSA AMÉRICO ALVES NUNES

**ESTUDO COMPUTACIONAL DE MANOBRAS PARA ENERGIZAÇÃO DE LINHAS
DE TRANSMISSÃO COM COMPENSAÇÃO DE REATIVOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Engenharia Elétrica de Sistemas de Potência.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Milde Maria da Silva Lira.

Coorientador: Prof. Dr. Manoel Afonso de Carvalho Jr.

Recife

2019

Catálogo na fonte
Bibliotecário Josias Machado, CRB-4 / 1690

N972e Nunes, Mariana Larissa Américo Alves.

Estudo computacional de manobras para energização de linhas de transmissão com compensação de reativos / Mariana Larissa Américo Alves Nunes. – Recife, 2019.

130 folhas, il., figs., tabs.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Milde Maria da Silva Lira.

Coorientador: Prof. Dr. Manoel Afonso de Carvalho Jr.

TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Departamento de Graduação em Engenharia Elétrica, 2019.

Inclui Referências.

1. Sistema elétrico de potência. 2. Transmissão da energia elétrica. 3. Programa de transientes eletromagnéticos EMTP - ATP. 4. Compensação de reativos. 5. Reatores naturalmente saturados. I. Lira, Milde Maria da Silva (orientador). II. Carvalho Jr, Manoel Afonso de. III. Título.

UFPE

621.3 CDD (22. ed.)

BCTG/2019-348

MARIANA LARISSA AMÉRICO ALVES NUNES

**ESTUDO COMPUTACIONAL DE MANOBRAS PARA ENERGIZAÇÃO DE LINHAS
DE TRANSMISSÃO COM COMPENSAÇÃO DE REATIVOS**

Dissertação apresentada ao Programa de
Graduação em Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Pernambuco,
como requisito parcial para a obtenção do
título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Milde Maria da Silva Lira (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. José Filho da Costa Castro (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Alexander Barros Lima (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Acima de tudo, dedico este trabalho ao Deus do impossível, o qual me deu a força necessária para que eu chegasse até aqui, a Nossa Senhora, por abençoar e proteger a minha trajetória e ao meu avô Mariano (**in memorian**), fonte de eterna inspiração.

Dedico também às pessoas mais importantes da minha vida. Meus pais, Selma e Alexandre, pela vida e por nunca deixarem de acreditar no meu potencial. Aos meus irmãos, Neto e Duda, pela parceria e companheirismo diários. E ao amor da minha vida, Lucas, pela paciência e por se fazer presente até nos momentos onde acreditei estar na mais profunda solidão.

AGRADECIMENTOS

Seria injusto da minha parte começar agradecendo outra pessoa se não ao professor Manoel Afonso de Carvalho Júnior. Sem os seus ensinamentos à cerca do assunto apresentado e dedicação incansável, este Trabalho de Conclusão de Curso jamais haveria se concretizado. Minha eterna gratidão mestre. Também agradeço, de todo o coração, a minha professora e orientadora Milde Maria da Silva Lira por ter aceitado embarcar comigo neste desafio e pela torcida de sempre. Aos demais professores do Departamento de Engenharia Elétrica e Controle e Automação, meus sinceros agradecimentos por tudo que pude aprender com os senhores ao longo destes longos anos de graduação.

Sou eternamente grata também pelas pessoas que cruzaram o meu caminho ao longo da trajetória acadêmica, em especial meus amigos Jefferson, Rafael, Fernando e Filipe, os quais nunca hesitaram em compartilhar seus conhecimentos e companhia, e minha amiga Rayssa, por todas as vezes que se dispôs a me ajudar e ouvir os meus problemas. Vocês são insanamente incríveis! Não posso deixar de citar aqui os companheiros da Watt Consultoria, que direta ou indiretamente, contribuíram com o meu crescimento pessoal e profissional, e do LigAção, por aflorar em mim o nobre sentimento das causas sociais.

Por fim, mas nem um pouco menos importante, agradeço à minha família. Aos meus pais, Selma e Alexandre, pelo zelo, pela compreensão e por proporcionar toda a estrutura necessária para que o sonho de concluir a graduação viesse a se tornar realidade. À minha irmã, Duda, por me incentivar sempre, principalmente quando pensei em desistir. Ao meu irmão, Neto, por enfrentar, dia e noite, os desafios da Engenharia Elétrica ao meu lado. E ao meu namorado, Lucas, por ser o melhor amigo, companheiro e conselheiro que alguém pode ter na face da terra. Não posso esquecer de agradecer também aos meus avós: Alexandre, Salomé e Valdete, os quais vibram por cada conquista minha. Amo vocês incondicionalmente!

RESUMO

O presente trabalho descreve, através de simulações experimentais, realizadas com o auxílio do Programa de Transientes Eletromagnéticos EMTP – ATP, o comportamento de uma linha de transmissão fictícia com seiscentos quilômetros de extensão, compensada por reatores lineares e reatores naturalmente saturados, dada a ocorrência de manobras de energização da mesma. No primeiro momento, foram sucedidos os projetos dos reatores naturalmente saturados série e paralelo através do aplicativo para simulações de reatores R07121, desenvolvido por Leonardo Lemos, Engenheiro Eletricista graduado pela Universidade Federal de Pernambuco. Para tal, foram especificados os valores de tensão inicial de saturação, potência nominal e inclinação do reator e demais dados de entrada. Os reatores simulados que obtiveram os valores mais próximos dos valores de inclinação e/ou uma potência nominal, previamente determinados, foram os escolhidos para a compensação da linha em estudo. A posteriori, foram realizadas as manobras de energização da LT, promovendo o fechamento dos disjuntores que se mantinham em aberto. Desta forma, foi possível analisar o comportamento das formas de onda de tensão da linha experimental compensada por reatores lineares e pelos reatores naturalmente saturados anteriormente projetados. Com o intuito de se promover um estudo mais detalhado e preciso, minimizando o efeito de eventuais erros de simulação, a linha de transmissão experimental foi seccionada em duas partes iguais, cada uma com trezentos quilômetros de comprimento e examinada trecho a trecho. De modo a promover a diminuição dos picos de tensão oriundos do fechamento dos disjuntores no processo de energização da LT, também foi proposto neste projeto a análise do comportamento da linha experimental com compensação de reativos incluindo-se resistores de pré-inserção. Por fim, foram executadas as análises comparativas entre as LTs compensadas pelos três tipos de reatores: linear, naturalmente saturado série e naturalmente saturado paralelo. O objetivo é verificar qual destas configurações de linhas de transmissão longas apresenta o melhor comportamento, dados os níveis aceitáveis de tensão, em processos de energização.

Palavras-Chave: Sistema Elétrico de Potência. Transmissão da Energia Elétrica. Programa de Transientes Eletromagnéticos EMTP – ATP. Compensação de Reativos. Reatores Naturalmente Saturados.

ABSTRACT

This work describes, through experimental simulations, the behavior of a transmission line with six hundred kilometers of extension, compensated by linear reactors and naturally saturated reactors, with the aid of the EMTP - ATP Electromagnetic Transients Program. energizing it. At the first moment, the projects of the naturally saturated series and parallel reactors were accomplished through the application for simulations of reactors R07121, developed by Leonardo Lemos, Electrical Engineer graduated by the Federal University of Pernambuco. For this, the values of initial saturation voltage, nominal power and inclination of the reactor and other input data were specified. The simulated reactors that obtained the values closest to the predetermined values of inclination and / or nominal power were chosen to compensate the line under study. Subsequently, the energizing maneuvers of the LT were performed, promoting the closure of the circuit breakers that remained open. In this way, it was possible to analyze the behavior of experimental line voltage waveforms compensated by linear reactors and naturally saturated reactors previously projected. In order to promote a more detailed and precise study, minimizing the effect of possible simulation errors, the experimental transmission line was divided into two equal parts, each one hundred miles long and examined in the following sections. In order to promote the reduction of voltage peaks due to the closure of the circuit breakers in the LT energization process, it was also proposed in this project the behavior of the experimental line with reactive compensation including pre insertion resistors. Finally, we performed the comparative analyzes between the LTs compensated by the three types of reactors: linear, naturally saturated series and naturally saturated parallel. The objective is to verify which of these configurations of long transmission lines presents the best behavior, given the acceptable voltage levels, in energizing processes.

Keywords: Electric Power System. Electric Power Transmission. EMTP-ATP Electromagnetic Transient Program. Reactive Compensation. Naturally Saturated Reactors.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Sistema de Transmissão no Brasil Horizonte 2017.....	28
Figura 2 –	Curva Característica de Operação dos Reatores Saturados.....	33
Figura 3 –	Manobra para Energização de Linhas de Transmissão.....	36
Figura 4 –	Forma de Onda Típica da Tensão em Manobras de Energização de Linhas de Transmissão.....	37
Figura 5 –	Modelos de Resistores de Pré-Inserção.....	38
Figura 6 –	Valores Indicativos de Sobreensões de Manobra Admissíveis para Reatores em Derivação.....	40
Figura 7 –	Sistema de Transmissão Experimental.....	41
Figura 8 –	Informações Gerais da Fonte de Alimentação.....	42
Figura 9 –	Informações Gerais dos Disjuntores.....	44
Figura 10 –	Modelo da Linha de Transmissão Experimental.....	45
Figura 11 –	Informações Gerais dos Trechos da Linha de Transmissão Experimental.....	46
Figura 12 –	Interface do Programa R07121.....	47
Figura 13 –	Dados de Entrada do Reator Naturalmente Saturado Série	48
Figura 14 –	Dados Gerais do Reator Naturalmente Saturado Série.....	49
Figura 15 –	Dados de Entrada do Reator Naturalmente Saturado Paralelo.....	50
Figura 16 –	Dados Gerais do Reator Naturalmente Saturado Paralelo..	51
Figura 17 –	Dados Referentes aos Reatores Lineares.....	52
Figura 18 –	Primeiro Trecho da LT Compensada por Reator Linear.....	53
Figura 19 –	Segundo Trecho da LT Compensada por Reator Linear.....	57
Figura 20 –	Primeiro Trecho da LT Compensada por Reator Naturalmente Saturado Série.....	61
Figura 21 –	Segundo Trecho da LT Compensada por Reator Naturalmente Saturado Série.....	65
Figura 22 –	Primeiro Trecho da LT Compensada por Reator Naturalmente Saturado Paralelo.....	69

Figura 23 –	Segundo Trecho da LT Compensada por Reator Naturalmente Saturado Paralelo.....	73
Figura 24 –	Primeiro Trecho da LT Compensada por Reator Linear.....	79
Figura 25 –	Segundo Trecho da LT Compensada por Reator Linear.....	83
Figura 26 –	Primeiro Trecho da LT Compensada por Reator Naturalmente Saturado Série.....	87
Figura 27 –	Segundo Trecho da LT Compensada por Reator Naturalmente Saturado Série.....	91
Figura 28 –	Primeiro Trecho da LT Compensada por Reator Naturalmente Saturado Paralelo.....	95
Figura 29 –	Segundo Trecho da LT Compensada por Reator Naturalmente Saturado Paralelo.....	99

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 –	Forma de Onda da Tensão na Fase A Trecho 1.....	54
Gráfico 2 –	Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase A Trecho 1.....	54
Gráfico 3 –	Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase A Trecho 1.....	54
Gráfico 4 –	Forma de Onda da Tensão na Fase B Trecho 1.....	55
Gráfico 5 –	Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase B Trecho 1.....	55
Gráfico 6 –	Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase B Trecho 1.....	55
Gráfico 7 –	Forma de Onda da Tensão na Fase C Trecho 1.....	56
Gráfico 8 –	Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase C Trecho 1.....	56
Gráfico 9 –	Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase C Trecho 1.....	56
Gráfico 10 –	Forma de Onda da Tensão na Fase A Trecho 2.....	58
Gráfico 11 –	Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase A Trecho 2.....	58
Gráfico 12 –	Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase A Trecho 2.....	58
Gráfico 13 –	Forma de Onda da Tensão na Fase B Trecho 2.....	59
Gráfico 14 –	Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase B Trecho 2.....	59
Gráfico 15 –	Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase B Trecho 2.....	59
Gráfico 16 –	Forma de Onda da Tensão na Fase C Trecho 2.....	60
Gráfico 17 –	Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase C Trecho 2.....	60
Gráfico 18 –	Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase C Trecho 2.....	60
Gráfico 19 –	Forma de Onda da Tensão na Fase A Trecho 1.....	62

Gráfico 20 –	Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase A Trecho 1.....	62
Gráfico 21 –	Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase A Trecho 1.....	62
Gráfico 22 –	Forma de Onda da Tensão na Fase B Trecho 1.....	63
Gráfico 23 –	Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase B Trecho 1.....	63
Gráfico 24 –	Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase B Trecho 1.....	63
Gráfico 25 –	Forma de Onda da Tensão na Fase C Trecho 1.....	64
Gráfico 26 –	Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase C Trecho 1.....	64
Gráfico 27 –	Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase C Trecho 1.....	64
Gráfico 28 –	Forma de Onda da Tensão na Fase A Trecho 2.....	66
Gráfico 29 –	Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase A Trecho 2.....	66
Gráfico 30 –	Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase A Trecho 2.....	66
Gráfico 31 –	Forma de Onda da Tensão na Fase B Trecho 2.....	67
Gráfico 32 –	Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase B Trecho 2.....	67
Gráfico 33 –	Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase B Trecho 2.....	67
Gráfico 34 –	Forma de Onda da Tensão na Fase C Trecho 2.....	68
Gráfico 35 –	Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase C Trecho 2.....	68
Gráfico 36 –	Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase C Trecho 2.....	68
Gráfico 37 –	Forma de Onda da Tensão na Fase A Trecho 1.....	70
Gráfico 38 –	Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase A Trecho 1.....	70

Gráfico 39 –	Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase A Trecho 1.....	70
Gráfico 40 –	Forma de Onda da Tensão na Fase B Trecho 1.....	71
Gráfico 41 –	Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase B Trecho 1.....	71
Gráfico 42 –	Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase B Trecho 1.....	71
Gráfico 43 –	Forma de Onda da Tensão na Fase C Trecho 1.....	72
Gráfico 44 –	Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase C Trecho 1.....	72
Gráfico 45 –	Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase C Trecho 1.....	72
Gráfico 46 –	Forma de Onda da Tensão na Fase A Trecho 2.....	74
Gráfico 47 –	Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase A Trecho 2.....	74
Gráfico 48 –	Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase A Trecho 2.....	74
Gráfico 49 –	Forma de Onda da Tensão na Fase B Trecho 2.....	75
Gráfico 50 –	Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase B Trecho 2.....	75
Gráfico 51 –	Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase B Trecho 2.....	75
Gráfico 52 –	Forma de Onda da Tensão na Fase C Trecho 2.....	76
Gráfico 53 –	Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase C Trecho 2.....	76
Gráfico 54 –	Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase C Trecho 2.....	76
Gráfico 55 –	Forma de Onda da Tensão na Fase A Trecho 1.....	80
Gráfico 56 –	Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase A Trecho 1.....	80
Gráfico 57 –	Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase A Trecho 1.....	80
Gráfico 58 –	Forma de Onda da Tensão na Fase B Trecho 1.....	81

Gráfico 59 –	Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase B Trecho 1.....	81
Gráfico 60 –	Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase B Trecho 1.....	81
Gráfico 61 –	Forma de Onda da Tensão na Fase C Trecho 1.....	82
Gráfico 62 –	Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase C Trecho 1.....	82
Gráfico 63 –	Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase C Trecho 1.....	82
Gráfico 64 –	Forma de Onda da Tensão na Fase A Trecho 2.....	84
Gráfico 65 –	Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase A Trecho 2.....	84
Gráfico 66 –	Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase A Trecho 2.....	84
Gráfico 67 –	Forma de Onda da Tensão na Fase B Trecho 2.....	85
Gráfico 68 –	Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase B Trecho 2.....	85
Gráfico 69 –	Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase B Trecho 2.....	85
Gráfico 70 –	Forma de Onda da Tensão na Fase C Trecho 2.....	86
Gráfico 71 –	Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase C Trecho 2.....	86
Gráfico 72 –	Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase C Trecho 2.....	86
Gráfico 73 –	Forma de Onda da Tensão na Fase A Trecho 1.....	88
Gráfico 74 –	Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase A Trecho 1.....	88
Gráfico 75 –	Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase A Trecho 1.....	88
Gráfico 76 –	Forma de Onda da Tensão na Fase B Trecho 1.....	89
Gráfico 77 –	Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase B Trecho 1.....	89

Gráfico 78 –	Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase B Trecho 1.....	89
Gráfico 79 –	Forma de Onda da Tensão na Fase C Trecho 1.....	90
Gráfico 80 –	Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase C Trecho 1.....	90
Gráfico 81 –	Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase C Trecho 1.....	90
Gráfico 82 –	Forma de Onda da Tensão na Fase A Trecho 2.....	92
Gráfico 83 –	Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase A Trecho 2.....	92
Gráfico 84 –	Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase A Trecho 2.....	92
Gráfico 85 –	Forma de Onda da Tensão na Fase B Trecho 2.....	93
Gráfico 86 –	Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase B Trecho 2.....	93
Gráfico 87 –	Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase B Trecho 2.....	93
Gráfico 88 –	Forma de Onda da Tensão na Fase C Trecho 2.....	94
Gráfico 89 –	Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase C Trecho 2.....	94
Gráfico 90 –	Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase C Trecho 2.....	94
Gráfico 91 –	Forma de Onda da Tensão na Fase A Trecho 1.....	96
Gráfico 92 –	Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase A Trecho 1.....	96
Gráfico 93 –	Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase A Trecho 1.....	96
Gráfico 94 –	Forma de Onda da Tensão na Fase B Trecho 1.....	97
Gráfico 95 –	Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase B Trecho 1.....	97
Gráfico 96 –	Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase B Trecho 1.....	97
Gráfico 97 –	Forma de Onda da Tensão na Fase C Trecho 1.....	98

Gráfico 98 –	Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase C Trecho 1.....	98
Gráfico 99 –	Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase C Trecho 1.....	98
Gráfico 100 –	Forma de Onda da Tensão na Fase A Trecho 2.....	100
Gráfico 101 –	Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase A Trecho 2.....	100
Gráfico 102 –	Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase A Trecho 2.....	100
Gráfico 103 –	Forma de Onda da Tensão na Fase B Trecho 2.....	101
Gráfico 104 –	Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase B Trecho 2.....	101
Gráfico 105 –	Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase B Trecho 2.....	101
Gráfico 106 –	Forma de Onda da Tensão na Fase C Trecho 2.....	102
Gráfico 107 –	Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase C Trecho 2.....	102
Gráfico 108 –	Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase C Trecho 2.....	102
Gráfico 109 –	Análise Comparativa das Sobretensões Transitórias Fase A Trecho 1.....	116
Gráfico 110 –	Análise Comparativa das Sobretensões Transitórias Fase B Trecho 1.....	116
Gráfico 111 –	Análise Comparativa das Sobretensões Transitórias Fase C Trecho 1.....	117
Gráfico 112 –	Análise Comparativa das Sobretensões Transitórias Fase A Trecho 2.....	117
Gráfico 113 –	Análise Comparativa das Sobretensões Transitórias Fase B Trecho 2.....	117
Gráfico 114 –	Análise Comparativa das Sobretensões Transitórias Fase C Trecho 2.....	118
Gráfico 115 –	Análise Comparativa das Tensões em Regime Permanente Fase A Trecho 1.....	118

Gráfico 116 –	Análise Comparativa das Tensões em Regime Permanente Fase B Trecho 1	118
Gráfico 117 –	Análise Comparativa das Tensões em Regime Permanente Fase C Trecho 1.....	119
Gráfico 118 –	Análise Comparativa das Tensões em Regime Permanente Fase A Trecho 2.....	119
Gráfico 119 –	Análise Comparativa das Tensões em Regime Permanente Fase B Trecho 2.....	119
Gráfico 120 –	Análise Comparativa das Tensões em Regime Permanente Fase C - Trecho 2.....	120
Gráfico 121 –	Análise Comparativa das Sobretensões Transitórias Fase A Trecho 1.....	120
Gráfico 122 –	Análise Comparativa das Sobretensões Transitórias Fase B Trecho 1.....	120
Gráfico 123 –	Análise Comparativa das Sobretensões Transitórias Fase C Trecho 1.....	121
Gráfico 124 –	Análise Comparativa das Sobretensões Transitórias Fase A Trecho 2.....	121
Gráfico 125 –	Análise Comparativa das Sobretensões Transitórias Fase B Trecho 2.....	121
Gráfico 126 –	Análise Comparativa das Sobretensões Transitórias Fase C Trecho 2.....	122
Gráfico 127 –	Análise Comparativa das Tensões em Regime Permanente Fase A Trecho 1.....	122
Gráfico 128 –	Análise Comparativa das Tensões em Regime Permanente Fase B Trecho 1.....	122
Gráfico 129 –	Análise Comparativa das Tensões em Regime Permanente Fase C Trecho 1.....	123
Gráfico 130 –	Análise Comparativa das Tensões em Regime Permanente Fase A Trecho 2.....	123
Gráfico 131 –	Análise Comparativa das Tensões em Regime Permanente Fase B Trecho 2.....	123

Gráfico 132 – Análise Comparativa das Tensões em Regime
Permanente Fase C | Trecho 2..... 124

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Tensões Máximas em Regime Transitório no Fechamento da Chave 1.....	104
Tabela 2 –	Tensões Máximas em Regime Permanente após Fechamento da Chave 1.....	104
Tabela 3 –	Tensões Máximas em Regime Transitório no Fechamento da Chave 2.....	105
Tabela 4 –	Tensões Máximas em Regime Permanente após Fechamento da Chave 2.....	105
Tabela 5 –	Tensões Máximas em Regime Transitório no Fechamento da Chave 1.....	106
Tabela 6 –	Tensões Máximas em Regime Permanente após Fechamento da Chave 1.....	106
Tabela 7 –	Tensões Máximas em Regime Transitório no Fechamento da Chave 2.....	107
Tabela 8 –	Tensões Máximas em Regime Permanente após Fechamento da Chave 2.....	107
Tabela 9 –	Tensões Máximas em Regime Transitório no Fechamento da Chave 1.....	108
Tabela 10 –	Tensões Máximas em Regime Permanente após Fechamento da Chave 1.....	108
Tabela 11 –	Tensões Máximas em Regime Transitório no Fechamento da Chave 2.....	109
Tabela 12 –	Tensões Máximas em Regime Permanente após Fechamento da Chave 2.....	109
Tabela 13 –	Tensões Máximas em Regime Transitório no Fechamento da Chave 1.....	109
Tabela 14 –	Tensões Máximas em Regime Permanente após Fechamento da Chave 1.....	110
Tabela 15 –	Tensões Máximas em Regime Transitório no Fechamento da Chave 2.....	111

Tabela 16 –	Tensões Máximas em Regime Permanente após Fechamento da Chave 2.....	111
Tabela 17 –	Tensões Máximas em Regime Transitório no Fechamento da Chave 1.....	112
Tabela 18 –	Tensões Máximas em Regime Permanente após Fechamento da Chave 1.....	112
Tabela 19 –	Tensões Máximas em Regime Transitório no Fechamento da Chave 2.....	113
Tabela 20 –	Tensões Máximas em Regime Permanente após Fechamento da Chave 2.....	113
Tabela 21 –	Tensões Máximas em Regime Transitório no Fechamento da Chave 1.....	114
Tabela 22 –	Tensões Máximas em Regime Permanente após Fechamento da Chave 1.....	115
Tabela 23 –	Tensões Máximas em Regime Transitório no Fechamento da Chave 2.....	116
Tabela 24 –	Tensões Máximas em Regime Permanente após Fechamento da Chave 2.....	117

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
EMTP / ATP	Programa de Transientes Eletromagnéticos
EAT	Extra-Alta Tensão
LT	Linha de Transmissão
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
RPI	Resistor de Pré-Inserção
SEP	Sistemas Elétricos de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional
DITs	Demais Instalações de Transmissão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	Objetivos Gerais.....	24
1.2	Objetivos Específicos.....	24
2	OS SISTEMAS DE TRANSMISSÃO A LONGAS DISTÂNCIAS.....	26
2.1	O Sistema Interligado Nacional e suas Malhas de Transmissão.....	26
2.2	Órgãos Regulamentadores do SIN.....	28
2.3	A Problemática dos Sistemas de Transmissão a Longas Distâncias.....	31
2.4	Equipamentos para Compensação de Reativos em Linhas de Transmissão Longas.....	32
3	SOBRETENSÕES DE MANOBRA EM SISTEMAS DE TRANSMISSÃO.....	35
3.1	A Energização de Linhas de Transmissão.....	36
3.2	Técnicas para Mitigação de Sobretensões de Manobra em Linhas de Transmissão.....	37
3.3	Suportabilidade a Sobretensões de Manobra.....	38
4	MODELAGEM DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO EXPERIMENTAL..	41
4.1	Parâmetros de Base da Fonte de Alimentação.....	41
4.2	Parâmetros de Base dos Disjuntores.....	42
4.3	Parâmetros de Base da Linha de Transmissão.....	44
5	PROJETO DOS REATORES NATURALMENTE SATURADOS.....	47
5.1	Projeto do Reator Naturalmente Saturado Série.....	48
5.2	Projeto do Reator Naturalmente Saturado Paralelo.....	50
6	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA LINHA DE TRANSMISSÃO EXPERIMENTAL SEM RESISTOR DE PRÉ INSERÇÃO.....	52
6.1	Linha de Transmissão Compensada por Reator Linear.....	53
6.2	Linha de Transmissão Compensada por Reator Série.....	61
6.3	Linha de Transmissão Compensada por Reator Paralelo GEC	69
6.4	Conclusão.....	77
7	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA LINHA DE TRANSMISSÃO EXPERIMENTAL COM RESISTOR DE PRÉ INSERÇÃO.....	78
7.1	Linha de Transmissão Compensada por Reator Linear.....	79

7.2	Linha de Transmissão Compensada por Reator Série.....	87
7.3	Linha de Transmissão Compensada por Reator Paralelo GEC.....	95
7.4	Conclusão.....	103
8	RESULTADOS.....	104
8.1	Configuração da LT Compensada por Reator Linear.....	104
8.1.1	Sem Resistor de Pré-Inserção.....	104
8.1.2	Com Resistor de Pré-Inserção.....	106
8.2	Configuração da LT Compensada por Reator Naturalmente Saturado Série.....	108
8.2.1	Sem Resistor de Pré-Inserção.....	108
8.2.1	Com Resistor de Pré-Inserção.....	110
8.3	Configuração da LT Compensada por Reator Naturalmente Saturado Paralelo.....	112
8.3.1	Sem Resistor de Pré-Inserção.....	112
8.3.2	Com Resistor de Pré-Inserção.....	114
9	ANÁLISE COMPARATIVA.....	116
9.1	Linha de Transmissão sem Resistor de Pré-Inserção.....	116
9.2	Linha de Transmissão com Resistor de Pré-Inserção.....	120
9.3	Conclusão.....	124
10	CONCLUSÃO GERAL.....	126
	REFERÊNCIAS.....	128

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de novos modelos de geração, transmissão e fornecimento de energia elétrica tem sido a grande chave para o progresso industrial e a consequente melhoria do padrão de vida da sociedade em geral. Um dos maiores desafios, portanto, é atender, de maneira confiável, econômica e sustentável, as necessidades energéticas decorrentes dos aspectos evolutivos da humanidade. O Sistema Elétrico de Potência, ferramenta de conversão e transporte da energia elétrica, desempenha papel fundamental na superação desses desafios de crescimento. (STEVENSON, 1986) De modo geral, compete ao SEP, o fornecimento da energia elétrica aos consumidores no momento em que for solicitada, promovendo a qualidade de vida das pessoas, bem como o desenvolvimento econômico de comércios e indústrias.

O SEP é constituído por três setores principais: as centrais geradoras, o sistema de transmissão e o sistema de distribuição. As centrais geradoras, em sua maioria, estão localizadas próximas dos recursos naturais energéticos. As usinas hidrelétricas, principal meio de geração no Brasil, são instaladas em pontos onde o aproveitamento dos desníveis e quedas de água dos rios são mais favoráveis. As linhas de transmissão, por sua vez, compõem o elo responsável por promover a conexão entre as centrais geradoras e o sistema de distribuição. Já o sistema de distribuição, após a conversão, nas subestações, da tensão vinda através das linhas de transmissão, é a responsável por alimentar todas as cargas individuais dos centros de consumo.

Contudo, para que a conexão entre os centros de geração e distribuição aconteça, é primordial que os sistemas de transmissão percorram caminhos com dimensões quilométricas. Esta necessidade, por sua vez, é responsável pela ampliação dos efeitos indutivo-capacitivo nas linhas de transmissão, os quais podem promover variações significativas nos níveis de tensão ao longo da LT. Diante desta conjuntura, faz-se extremamente vital, a compensação da potência reativa presente, em excesso ou falta, nas linhas de transmissão longas. Visando a superação desta problemática, muitos equipamentos já foram desenvolvidos e se fazem aplicáveis nos sistemas de transmissão como: os bancos de capacitores, os reatores lineares e os reatores à núcleo saturado.

Outra grande preocupação relacionada aos sistemas de transmissão de longas extensões, tem origem na possibilidade de ruptura do isolamento de seus equipamentos em decorrência de surtos de manobra. Em processos de energização de linhas de transmissão em extra-alta tensão (EAT), por exemplo, sobretensões extremamente elevadas são observadas. A depender do patamar destas sobretensões, equipamentos podem ser danificados e o fornecimento da energia elétrica às barras de consumo interrompido. De modo a combater estes surtos de tensão, técnicas, como a utilização de resistores de pré-inserção, são frequentemente empregadas para mitigar as sobretensões de manobra em linhas de transmissão.

Em suma, é notório que um dos maiores desafios no projeto e na operação de Sistemas Elétricos de Potência relaciona-se com a conservação da tensão dentro dos limites aceitáveis. As linhas de transmissão a longas distâncias precisam, portanto, serem configuradas de modo que a entrega da potência solicitada pelas cargas seja efetuada com garantia de confiabilidade e segurança.

1.1. Objetivos Gerais

Neste Trabalho de Conclusão de Curso serão desenvolvidos estudos experimentais de uma linha de transmissão fictícia longa compensada por reatores lineares e reatores naturalmente saturados série e paralelo. O objetivo é analisar o comportamento, a nível de tensões suportáveis, destas configurações (em situação transitória e regime permanente) dada a ocorrência de manobras para energização da LT experimental. As simulações dos modelos propostos serão realizadas através do Programa de Transientes Eletromagnéticos EMTP – ATP.

1.2. Objetivos Específicos

- Agregar conhecimento na área de Sistemas Elétricos de Potência;
- Entender o princípio de funcionamento dos reatores naturalmente saturados para compensação de reativos em linhas de transmissão;
- Conhecer, de maneira mais aprofundada, as funções do EMTP – ATP;

- Entender melhor a ocorrência de sobretensões de manobras em linhas de transmissão;
- Estudar o comportamento da tensão em linhas de transmissão longas em processos de energização.

2. OS SISTEMAS DE TRANSMISSÃO A LONGAS DISTÂNCIAS

Os Sistemas Elétricos de Potência (SEP), em sua grande maioria, caracterizam-se por apresentar as unidades geradoras de energia em áreas bem distantes dos centros de consumo. As linhas de transmissão, portanto, tem como objetivo primordial o transporte da energia gerada, percorrendo longas distâncias, passando pelas subestações abaixadoras de tensão e abastecendo, por fim, os centros consumidores com o nível de tensão adequado.

No Brasil, por exemplo, o sistema de produção e transmissão de energia é constituído por quatro subsistemas interconectados e que compõem o chamado Sistema Interligado Nacional (SIN). A interligação desses sistemas elétricos, por meio da sua malha de transmissão, não apenas proporciona a transferência de energia, mas garante o atendimento do mercado energético com maior confiabilidade, segurança e economicidade. Além disso, maiores são os aproveitamentos das disponibilidades energéticas entre as regiões no país, o que proporciona uma exportação da energia elétrica de forma bastante adequada. (O que é o SIN?, 2019)

Em contrapartida, a imprescindível utilização de linhas de transmissão extremamente longas é um fato que dificulta consideravelmente a entrega da potência elétrica aos centros consumidores. De modo a evitar os inconvenientes provocados ao fornecimento da energia devido às linhas de transmissão longas, faz-se necessária a conexão de equipamentos que minimizem as perdas ao longo da LT e mantenham os níveis de tensão do sistema em um patamar aceitável pelos órgãos reguladores responsáveis.

2.1. O Sistema Interligado Nacional e suas Malhas de Transmissão

O Sistema Interligado Nacional – SIN é, de acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, em sua Resolução Normativa Nº 622, de 19 de agosto de 2014, o conjunto de instalações e de equipamentos que possibilitam o suprimento da energia elétrica nas regiões do país interligadas eletricamente, conforme regulamentação aplicável. (Resolução Normativa ANEEL Nº 622, 2014)

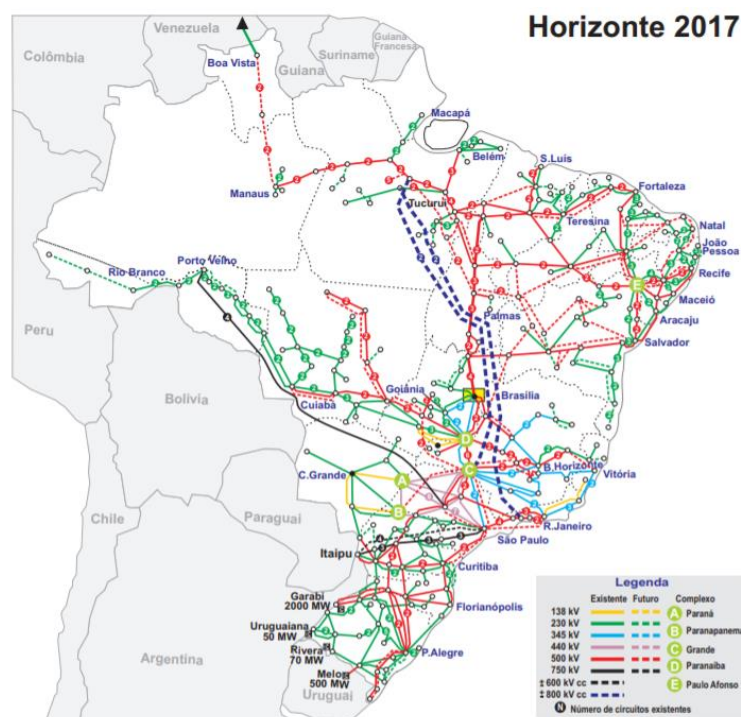
Segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, a capacidade instalada de geração do SIN é composta, principalmente, por usinas hidrelétricas distribuídas em dezesseis bacias hidrográficas nas diferentes regiões do país. As usinas térmicas, localizadas um pouco mais próximas dos centros de carga, desempenham, no Sistema Interligado Nacional, função estratégica de destaque. As térmicas são responsáveis por promover o complemento da geração das hidrelétricas, assegurando o fornecimento contínuo da energia elétrica nos períodos de baixos índices pluviométricos. (O que é o SIN?, 2019)

No decorrer dos últimos anos, novas fontes de geração de energia foram incorporadas ao SIN, em especial fontes de energia renováveis como as centrais eólicas. A instalação dessas centrais tem apresentado crescimento relevante, em especial, nas regiões Sul e Nordeste, elevando o mérito da geração eólica no atendimento do mercado energético.

O SIN é constituído pelos subsistemas Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e grande parte da região Norte. De toda a capacidade de produção da eletricidade no Brasil, uma parcela mínima está fora do Sistema Interligado Nacional, concentrando-se em pequenos sistemas isolados localizados, em sua maioria, na região amazônica.

A Figura 1 apresenta o mapa do Sistema de Transmissão no Brasil para o horizonte de 2017.

Figura 1 - Sistema de Transmissão no Brasil | Horizonte 2017



Fonte: Site do ONS

Como é possível observar no mapa anterior, as malhas de transmissão, são as responsáveis por proporcionar a interação entre todas as fontes de produção de energia do Sistema Interligado Nacional com as barras de carga. De modo geral, as dimensões quilométricas destes sistemas possibilitam o abastecimento adequado do mercado consumidor de energia elétrica.

Todavia, sistemas de transmissão longos possuem singularidades que dificultam o controle e a regulação de tensão nos seus centros de consumo. Por este fato, torna-se indispensável a utilização de técnicas que atuem na superação destes inconvenientes.

2.2. Órgãos Regulamentadores do SIN

Até o presente momento, ficou claro que, o principal inconveniente das linhas de transmissão longas encontra-se intimamente relacionado às oscilações de tensão que podem ser observadas nas barras de consumo, as quais podem atingir patamares de

tensão superiores ou inferiores aos pré-definidos pelo ONS e pela ANEEL, órgãos responsáveis por regular estas questões. Portanto, faz-se extremamente importante entender quais as responsabilidades destes órgãos e como os mesmos atuam frente a esta problemática.

- **ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica**

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é, conforme a **Lei nº 9.427/1996** e o **Decreto nº 2.335/1997**, uma autarquia sob regime especial, vinculada ao Ministério de Minas e Energia. Compete a este órgão a regulação e fiscalização da produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica, em conformidade com as políticas e diretrizes do Governo Federal. (A ANEEL, 2019)

Conforme site oficial da Agência Nacional de Energia Elétrica, enquadram-se nas atribuições da ANEEL os pontos abaixo. (A ANEEL, 2019)

- Regular a geração (produção), transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica;
- Fiscalizar, diretamente ou mediante convênios com órgãos estaduais, as concessões, as permissões e os serviços de energia elétrica;
- Implementar as políticas e diretrizes do governo federal relativas à exploração da energia elétrica e ao aproveitamento dos potenciais hidráulicos;
- Estabelecer tarifas;
- Dirimir as divergências, na esfera administrativa, entre os agentes e entre esses agentes e os consumidores e;
- Promover as atividades de outorgas de concessão, permissão e autorização de empreendimentos e serviços de energia elétrica, por delegação do Governo Federal.

Além disso, é de responsabilidade da ANEEL regular e fiscalizar as operações na geração e na transmissão da energia elétrica.

- **ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico**

Criado em 26 de agosto de 1998, por meio da **Lei nº 9.648**, com alterações previstas na **Lei nº 10.848/2004** e regulamentado pelo **Decreto nº 5.081/2004**, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) é, sob regulação e fiscalização da ANEEL, o órgão responsável por coordenar e controlar as operações nas instalações da geração e da transmissão da energia elétrica no SIN. Compete ainda, a este órgão não governamental, o planejamento da operação dos sistemas isolados do país. (O que é o ONS?, 2019)

De acordo com o site oficial, para que o exercício das atribuições legais e o cumprimento da missão institucional da ONS sejam exercidos, o mesmo é encarregado pelo desenvolvimento de uma série de estudos e ações realizadas sobre o sistema e seus agentes proprietários. A finalidade é que exista um gerenciamento das distintas fontes de energia e da rede de transmissão, de modo a garantir o fornecimento contínuo da energia elétrica no país, objetivando: (O que é o ONS?, 2019)

- Promover a otimização da operação do sistema eletroenergético, visando ao menor custo para o sistema, observados os padrões técnicos e os critérios de confiabilidade estabelecidos nos Procedimentos de Rede aprovados pela ANEEL;
- Garantir que todos os agentes do setor elétrico tenham acesso à rede de transmissão de forma não discriminatória e;
- Contribuir, de acordo com a natureza de suas atividades, para que a expansão do SIN se faça ao menor custo e vise às melhores condições operacionais futuras.

É por meio dos Procedimentos de Rede, que o ONS estabelece as regras necessárias para a operação das instalações de transmissão da rede básica do SIN. Estes documentos, de caráter normativo, propiciam transparência e embasamento técnico-operacional às atividades realizadas pelo ONS.

2.3. A Problemática dos Sistemas de Transmissão a Longas Distâncias

Como visto anteriormente, devido a extensão territorial vasta do nosso país, o transporte da energia gerada necessita de linhas de transmissão com centenas de quilômetros. Esta exigência, por sua vez, dificulta a entrega da potência gerada aos centros de consumo, pois o efeito indutivo-capacitivo das linhas torna-se ainda mais acentuado.

As linhas de transmissão longas em alta tensão, de modo particular, caracterizam-se por apresentar regulações de tensão precárias em suas barras de consumo, seja em regime permanente ou em situação transitória. Em operações a vazio ou a baixas cargas, dada a ocorrência de manobras de energização ou rejeição, a capacitância presente em linhas impele, sucessivamente, aumentos inadmissíveis no valor da tensão de suas barras de consumo. Todavia, quando o sistema opera a plena carga, observa-se uma atuação inversa. Em outras palavras, as tensões verificadas nas barras de consumo, para esta configuração, mostram-se muito abaixo dos seus valores nominais. (FONTE, 2004)

A fim de minimizar os efeitos causados pelas linhas de grandes extensões, as concessionárias nacionais utilizam-se de métodos para compensação de reativos, cada um com suas características e particularidades. Compensar uma linha de transmissão significa, segundo (MILLER, 1982), modificar as suas características elétricas a fim de aumentar a capacidade de transmissão de energia, satisfazendo os requisitos fundamentais da transmissão. Um sistema de compensação ideal deve, portanto, realizar as seguintes funcionalidades:

- Produzir perfis de tensão planos em todos os níveis da transmissão da energia;
- Melhorar a estabilidade do sistema e aumentar a potência máxima a ser transmitida;
- Promover um meio econômico para atender aos requisitos de energia reativa do sistema de transmissão.

Em suma, além de ajustar os valores de tensão de uma linha longa a patamares admissíveis e, conseqüentemente, maximizar a capacidade de transmissão de potências das redes, uma compensação de reativos adequada é garantia de um melhor aproveitamento do sistema elétrico bem como do equilíbrio no balanço geração-consumo de potência reativa.

Portanto, é notório que existe uma preocupação enorme, por parte das concessionárias e dos órgãos reguladores, com a ocorrência de reativos nos sistemas de transmissão de energia. Prever os índices de potência reativa é de grande relevância técnica e econômica visto que a necessidade de injetar ou absorver reativos em um sistema elétrico exigirá a introdução de equipamentos que o mantenha funcionando adequadamente.

2.4. Equipamentos para Compensação de Reativos em Linhas de Transmissão Longas

De modo a solucionar a problemática inerente às linhas de transmissão de longas distâncias, mantendo-se dentro dos níveis de tensão aceitáveis pela ONS e ANEEL, as concessionárias responsáveis pela geração e transmissão da energia elétrica recorrem, com frequência, à utilização de dispositivos fundamentados na compensação de reativos. Dentre os diversos equipamentos existentes com a finalidade de compensar reativos em linhas longas, os reatores lineares e os capacitores são os mais corriqueiros e de menor custo.

No entanto, nem sempre a utilização destes equipamentos é vantajosa, principalmente quando se leva em consideração a necessidade de execução de manobras para inserção ou remoção destes dispositivos da rede. Uma vez que os reatores lineares impedem que a tensão nas barras de carga atinja valores elevados, os bancos de capacitores fundamentam-se na operação contrária, evitando os afundamentos de tensão.

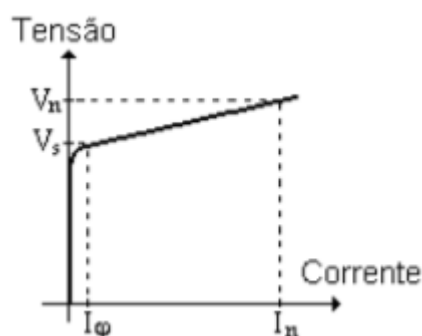
Ou seja, quando a potência requerida pelas barras de consumo aumenta (operação à plena carga), os bancos de capacitores deverão entrar imediatamente em operação de modo a controlar possíveis quedas de tensão. Em contrapartida, os

mesmos deverão ser gradativamente retirados de operação nos casos de baixos suprimentos de carga (operação à vazio ou à carga leve), dando lugar aos reatores lineares, os quais trabalharão na contenção de níveis elevados de tensão. (VASCONCELLOS, SANTILIO, et al.)

Diante desta conjuntura, é possível concluir que, ao passo que a operação de reatores lineares durante operações de carga mínima é positiva para o sistema, a mesma situação se transforma em ônus à plena carga. Por este fato, estudos de novos dispositivos, baseados nos inconvenientes da associação reatores lineares – banco de capacitores para compensação de reativos em linhas de transmissão longas, são apresentados como solução. São eles: os compensadores rotativos, os compensadores estáticos e os reatores saturados.

Os reatores saturados, de modo especial, possuem características muito particulares e enquadram-se muito bem à necessidade pretendida pelas linhas de transmissão de longas extensões. De maneira simplificada, estes dispositivos conseguem operar tanto em sua região linear quanto em sua região de saturação, como é possível perceber na Figura 2.

Figura 2 - Curva Característica de Operação dos Reatores Saturados



Fonte: (JR e FONTE, 2001)

Isto significa que, para tensões mais baixas (operação à plena carga), o reator estará operando em torno do ponto (V_s, I_φ) , exigindo do sistema uma potência reativa mais baixa. À medida que o sistema começa a operar com uma tensão mais elevada (operação à vazio ou à carga leve), o ponto de operação se desloca e o reator começa

a atuar em sua região de saturação (V_n, I_n), o que eleva o consumo de potência reativa do sistema. (JR e FONTE, 2001)

Diante do exposto até o momento, os reatores saturados mostraram-se bastante vantajosos no que tange a obtenção do controle de tensão contínuo, elevando-se assim, a capacidade de fornecimento da energia elétrica às cargas. Por outro lado, tais dispositivos tornam-se preocupantes no que se refere à injeção de distorções harmônicas no sistema.

3. SOBRETENSÕES DE MANOBRA EM SISTEMAS DE TRANSMISSÃO

As sobretensões de manobra caracterizam-se por sua natureza transitória e variável com o tempo. Elas são originadas por ações que causam mudanças bruscas na topologia dos sistemas elétricos de potência como: energização ou desligamento de linhas de transmissão, rejeição de carga, eliminação de faltas, dentre outras.

Além disso, as sobretensões de manobra possuem caráter probabilístico, o que significa que, diferentes níveis de sobretensão poderão ser obtidos a depender de determinadas variáveis do sistema (DANTAS, 2007). Em processos de energização ou religamento de linhas de transmissão, por exemplo, os parâmetros de maior influência na amplitude das sobretensões são:

- O comprimento das linhas de transmissão;
- O grau de compensação de reativos;
- A potência de curto-circuito;
- O instante de tempo da onda de tensão em que a manobra é executada;
- O intervalo entre o fechamento dos polos do disjuntor;
- A presença de equipamentos que minimizem os níveis de tensão.

Em sistemas de transmissão em extra-alta tensão (EAT), a exemplo do Sistema Interligado Nacional (SIN), o surgimento de sobretensões transitórias extremamente elevadas, em decorrência de manobras de energização, influenciam diretamente a coordenação de seu isolamento. É por isso que, em processos de expansão ou planejamento de novas linhas de transmissão, diversas condições e parâmetros referentes ao sistema precisam ser previamente avaliados pois, apesar de operarem, na maior parte do tempo, em regime permanente, é durante os períodos transitórios onde ocorrem as sobretensões mais severas. (CARVALHO, 2018)

Os fenômenos de caráter transitório, a exemplo das manobras de energização, podem ser, portanto, extremamente prejudiciais ao funcionamento das linhas de transmissão em EAT de grandes extensões. A depender dos níveis de sobretensão alcançados, tais distúrbios provocarão danos aos equipamentos do sistema, resultando no comprometimento da entrega de energia elétrica às barras de consumo.

Sendo assim, tornam-se indispensáveis a utilização de técnicas que visem o controle dos níveis de sobretensão em processos de manobras para energização de linhas de transmissão. Em suma, compete a este capítulo, a introdução da metodologia das manobras de energização de linhas de transmissão e o consequente surgimento de sobretensões transitórias, bem como a apresentação de técnicas utilizadas na mitigação destes elevados níveis de tensão.

3.1 A Energização de Linhas de Transmissão

As manobras para energização de linhas de transmissão são ações que acontecem corriqueiramente nos sistemas elétricos de potência. Estas manobras são executadas com o auxílio de disjuntores, os quais, ao serem solicitados, realizarão o fechamento de seus contatos mecânicos.

Figura 3 - Manobra para Energização de Linhas de Transmissão



Fonte: (CARVALHO, 2018)

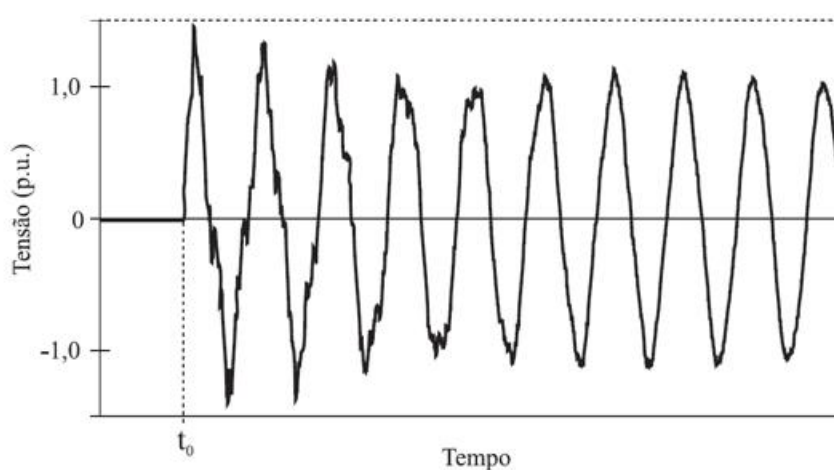
As elevadas sobretensões, provenientes dos processos de energização de LTs, surgem em decorrência dos efeitos de propagação e reflexão das ondas eletromagnéticas que percorrem estas linhas. Em sistemas de transmissão trifásicos é comum que, durante a operação de manobra de fechamento dos disjuntores, seus polos não atuem simultaneamente devido a discordância mecânica existente em seus contatos.

Desta forma, em decorrência do acoplamento eletromagnético entre as três fases de uma LT, o fechamento do primeiro polo do disjuntor provocará o surgimento de transitórios nas fases que ainda não foram energizadas. Ao passo que os polos subsequentes vão se fechando, novos transitórios surgem, somando-se aos transitórios anteriores, e percorrem a linha de transmissão até chegarem ao terminal

remoto. Ao atingir este ponto da LT, que na maioria das vezes encontra-se em aberto, as ondas transitórias se refletem e geram, neste local, os níveis mais elevados de sobretensão. (DANTAS, 2007)

A Figura 4 apresenta a forma de onda típica da tensão de uma linha de transmissão em processos de energização através de simulações digitais com o ATP.

Figura 4 - Forma de Onda Típica da Tensão em Manobras de Energização de Linhas de Transmissão



Fonte: (DANTAS, 2007)

3.2 Técnicas para Mitigação de Sobretensões de Manobra em Linhas de Transmissão

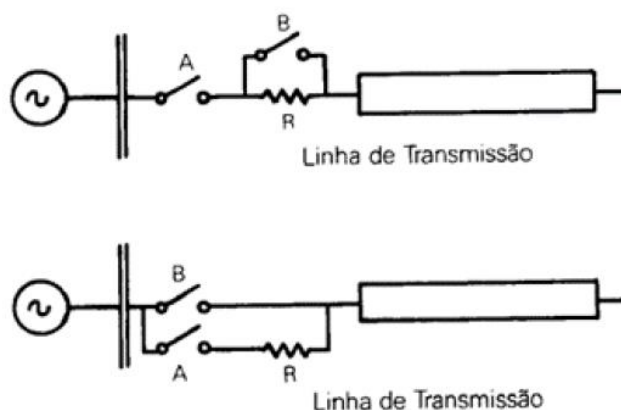
São inúmeros os métodos convencionais utilizados na limitação de sobretensões em decorrência de manobras de energização de linhas de transmissão. A inserção de resistores de pré-inserção (RPI) é considerada uma das técnicas mais tradicionais e efetivas para esta finalidade.

Esta técnica consiste num processo de chaveamento sequencial. Quando a LT é energizada, o disjuntor auxiliar realiza uma manobra de fechamento, inserindo um resistor em série entre a fonte de alimentação e a linha. Após alguns milésimos de

segundo, o disjuntor principal atua, fechando os seus contatos. Deste modo, o resistor que foi colocado em série pelo disjuntor auxiliar é curto-circuitado e a linha passa a receber novamente a tensão plena da fonte.

A Figura 5 a seguir apresenta dois modelos válidos de utilização desta técnica para redução de sobretensões de manobra em linhas de transmissão.

Figura 5 - Modelos de Resistores de Pré-Inserção



Fonte: (CARVALHO, 2018)

A eficiência dos resistores de pré-inserção, para a finalidade proposta, poderá ser claramente observada mais adiante no capítulo que apresenta as simulações.

3.3 Suportabilidade a Sobretensões de Manobra

De acordo com a **Lei 9.648/98**, em seu Artigo 13, alínea “f”, é atribuição do Operador Nacional do Sistema Elétrico, propor regras referentes à operação das instalações elétricas de transmissão da rede básica do Sistema Interligado Nacional, as quais devem ser aprovadas pela Agência Nacional de Energia Elétrica. Os Procedimentos de Rede, documentos de caráter normativo elaborado pela ONS em consonância com os agentes, são os responsáveis por consolidar essas regras. (Procedimentos de Rede, 2019)

Segundo o site oficial da ONS, são estabelecidos, pelos Procedimentos de Rede, os requisitos técnicos necessários para: (Procedimentos de Rede, 2019)

- Garantir o livre acesso às instalações de transmissão;
- A realização das atividades de planejamento e programação da operação eletroenergética;
- Administração de serviços de transmissão de energia elétrica;
- Proposição de ampliações e reforços para a Rede Básica e para as DITs;
- As atividades de supervisão, coordenação e controle da operação do SIN.

No que diz respeito aos transitórios de manobra, o Capítulo 10 – Critérios para Estudos de Transitórios Eletromagnéticos Sob Condições de Manobra do Submódulo 23.3 – Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos, presente nos Procedimentos de Rede da ONS, descreve, de maneira geral, a questão referente às suportabilidades dos equipamentos do sistema elétrico, garantidas pelos fabricantes e fornecidas pelos agentes. (REDE, 2017)

Referindo-se, mais especificamente, aos reatores, equipamentos de destaque neste Trabalho de Conclusão de Curso, de acordo com o Tópico 10.4 – Critérios Relativos a Reatores em Derivação do Submódulo 23.3 destaca-se que (REDE, 2017):

- Durante as manobras, reatores em derivação só podem ser submetidos a sobretensões no máximo iguais àquelas garantidas pelos fabricantes e fornecidas pelos agentes;
- Na falta dessa informação, devem ser utilizados os valores indicativos apresentados na Figura 6.

Figura 6 - Valores Indicativos de Sobretensões de Manobra Admissíveis para Reatores em Derivação

Tensão (pu) ⁽¹⁾	Tensão (pu) ⁽²⁾	Tempo (s)
2,0	2,10	0,1667
1,82	1,91	0,3333
1,50	1,57	1,667
1,40	1,47	3,6
1,05	1,10	Regime

(1) Valores em pu para tensão base de 230, 345, 440 e 525kV.

(2) Valores em pu para tensão base de 500kV.

Fonte: (REDE, 2017)

De posse destas informações, as análises propostas por este TCC, realizadas mais adiante, serão pautadas conforme os Procedimentos de Rede do ONS. Para tal, os níveis de tensão verificados serão comparados aos valores indicativos de sobretensão de manobra admissíveis para reatores em derivação como descrito na Figura 6, tendo em vista que as análises de sobretensão acontecerão nos nós onde os reatores serão conectados.

4. MODELAGEM DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO EXPERIMENTAL

A fim de dar início, efetivamente, ao objetivo deste trabalho, serão apresentados, neste capítulo, a modelagem computacional do sistema de transmissão experimental junto aos parâmetros de base necessários para a construção de cada um dos elementos do sistema em estudo. A construção de todo o sistema foi realizada por meio do ATPDraw, software que se dedica exclusivamente aos estudos eletromagnéticos. Por meio desta ferramenta foi possível moldar adequadamente o sistema elétrico de transmissão reproduzindo, de maneira fiel, a configuração de uma rede elétrica real.

Para realizar as análises propostas, optou-se por uma linha de transmissão experimental com seiscentos quilômetros de extensão e tensão nominal de operação de 500kV (valor eficaz ou RMS). Com a finalidade de promover um estudo mais adequado, a linha foi seccionada em dois trechos com comprimentos equivalentes a trezentos quilômetros cada. Além da linha de transmissão propriamente dita, fazem parte deste sistema, uma fonte de alimentação e dois disjuntores trifásicos, os quais são responsáveis pelas manobras de energização dos trechos da LT.

A Figura 7, abaixo, apresenta o modelo do sistema de transmissão experimental que será analisado.

Figura 7 - Sistema de Transmissão Experimental



Fonte: Autora via ATPDraw

4.1. Parâmetros de Base da Fonte de Alimentação

A fonte de alimentação, equipamento responsável pelo fornecimento de energia às cargas, foi o primeiro elemento do sistema a ser modelado. De modo a satisfazer a demanda de tensão da linha de transmissão experimental, anteriormente definida,

optou-se por escolher um modelo de fonte com tensão trifásica que operasse com amplitude igual a 408.248V e frequência de 60Hz.

A Figura 8 apresenta todas as informações referentes à fonte de alimentação do sistema de transmissão em estudo.

Figura 8 - Informações Gerais da Fonte de Alimentação

Component: ACSOURCE

DATA	UNIT	VALUE
AmplitudeA	Volt	408248
Frequency	Hz	60
PhaseAngleA	degrees	0
StartA	sec	-1
StopA	sec	100

NODE	PHASE	NAME
AC	ABC	

Copy Paste Reset Order: 0 Label:

Comment:

Type of source: ☐ Current ☒ Voltage

Num phases: ☐ Single ☒ 3-phase ☐ 3*1-phase

Angle units: ☒ Degrees ☐ Seconds

Amplitude: ☒ Peak L-G ☐ RMS L-G ☐ RMS L-L

Grounding: ☒ Grounded ☐ Ungrounded

☐ Hide

Edit definitions OK Cancel Help

Fonte: Autora via ATPDraw

4.2. Parâmetros de Base dos Disjuntores

Os disjuntores são, dentre as suas inúmeras funções, os dispositivos responsáveis pelas manobras de energização e rejeição de linhas de transmissão nos sistemas elétricos de potência. Para realizar os estudos de energização do sistema em questão, foram fixados, a montante de cada trecho da LT, um disjuntor trifásico.

O modelo dos disjuntores utilizados nas simulações também é caracterizado pela discordância de fases, ou seja, o fechamento dos seus polos não ocorre em instantes simultâneos. Vale salientar que, em processos de energização de linhas de

transmissão reais, a discordância de fases em um disjuntor é um fenômeno corriqueiro e precisa ser levado em consideração.

Os valores padrões, em milissegundos, do tempo de seccionamento de cada um dos polos de um disjuntor, dada a discordância de fechamento de seus terminais, são:

$$t_{cl_{fase\ A}} = 0\ ms$$

$$t_{cl_{fase\ B}} = 0,95\ ms$$

$$t_{cl_{fase\ C}} = 1,14\ ms$$

onde,

$$t_{cl_{fase\ A}} \rightarrow \text{Tempo de fechamento do disjuntor (fase A), ms}$$

$$t_{cl_{fase\ B}} \rightarrow \text{Tempo de fechamento do disjuntor (fase B), ms}$$

$$t_{cl_{fase\ C}} \rightarrow \text{Tempo de fechamento do disjuntor (fase C), ms}$$

É importante destacar que, neste estudo, o fechamento da fase A do primeiro disjuntor ocorreu após 2 ciclos ($t_a = 0,03333s$). Consequentemente, foram modificados os instantes de fechamento das fases B e C ($t_b = 0,03425s$ e $t_c = 0,03447s$), do mesmo disjuntor. Este procedimento foi importante pois garantiu que a rede estivesse funcionando adequadamente no início da energização do primeiro trecho da linha.

$$1\ ciclo = 1T = \frac{1}{f} = 0,01667s$$

Onde,

$$T \rightarrow \text{Período, s}$$

$$f \rightarrow \text{Frequência, Hz}$$

A Figura 9 refere-se às informações gerais do primeiro disjuntor do sistema, destacando o instante, em segundos, que ocorrerá o fechamento de cada um dos seus três polos.

Figura 9 - Informações Gerais dos Disjuntores

Component: SWIT_3XT

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
T-cl_1	s	0.03333
T-op_1	s	1000
T-cl_2	s	0.03425
T-op_2	s	1000
T-cl_3	s	0.03447
T-op_3	s	1000
Imar	Amps	0

NODE	PHASE	NAME
IN1	ABC	N01
OUT1	ABC	

Copy Paste Reset Order: 0 Label:

Comment:

Output

0 - No

☐ Hide

Edit definitions OK Cancel Help

Fonte: Autora via ATPDraw

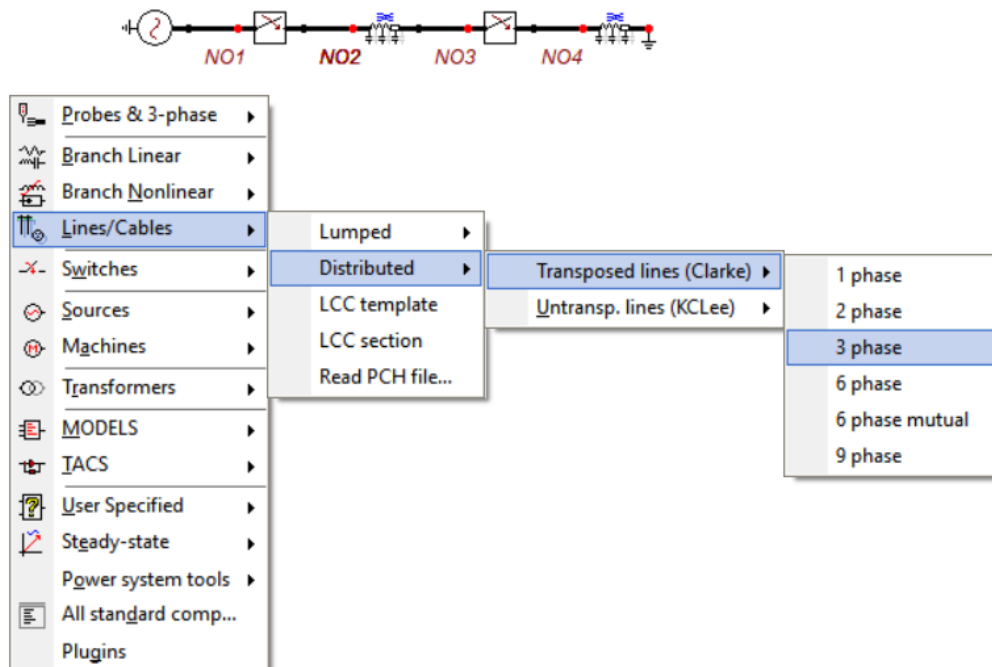
O tempo de fechamento dos polos do disjuntor a jusante ocorre no instante de tempo em que se verifica o início do regime permanente, ou seja, quando se observa, na simulação antecedente (fechamento do disjuntor 1), a estabilização das formas de onda da tensão para as três fases. Vale salientar que, atingido o regime permanente, a fase A do disjuntor que energiza o segundo trecho da LT fechará no momento em que a forma de onda referente a esta fase esteja passando pelo zero. O tempo de fechamento das demais fases do disjuntor segue a regra dos valores típicos da discordância de fases.

4.3. Parâmetros de Base da Linha de Transmissão

Como já pontuado anteriormente, a linha de transmissão experimental, escolhida para realizar as análises deste trabalho, possui extensão igual a seiscentos quilômetros. Por ser uma linha extremamente longa, foi necessário dividi-la em duas partes equivalentes, com trezentos quilômetros cada, de modo a facilitar o estudo pretendido.

O modelo da linha de transmissão, escolhida e simulada no Software ATPDraw, possui parâmetros distribuídos, é transposta (Modelo de Clarke) e possui alimentação trifásica como mostra a Figura 10.

Figura 10 - Modelo da Linha de Transmissão Experimental



Fonte: Autora via ATPDraw

Os parâmetros distribuídos de sequência positiva, negativa e zero da linha de transmissão experimental, previamente fornecidos, podem ser observados na Figura 11, correspondente aos dados gerais de um dos trechos da LT.

Figura 11 - Informações Gerais dos Trechos da Linha de Transmissão Experimental

Component: LINEZT_3 ×

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
R/l+	Ohm/m	1.39E-5
R/l0	Ohm/m	0.0003798
L' +		0.000221
L' 0		0.001331
C' +		0.007433
C' 0		0.003069

NODE	PHASE	NAME
IN1	ABC	NO2
OUT1	ABC	

Order:
 Label:

Comment:

Lines

Length: [m]

Output:

☒ L', C'
☐ Z, v
☐ Z, tau

Conductance
☒ G=0
☐ G=R*C/L

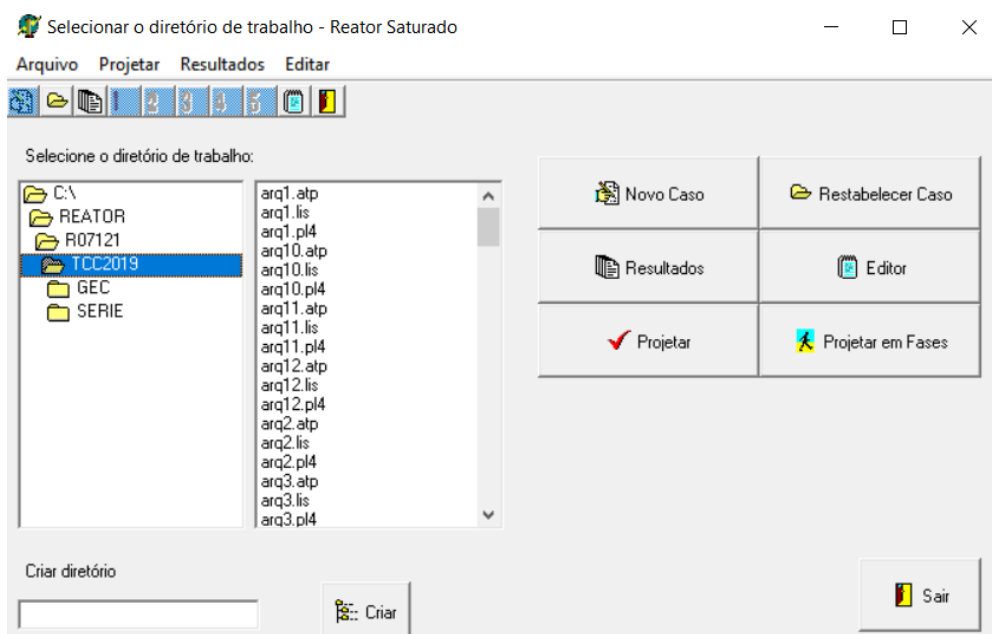
☐ Hide
☐ \$Vintage,1

Fonte: Autora via ATPDraw

5. PROJETO DOS REATORES NATURALMENTE SATURADOS

O presente capítulo apresenta o projeto de dimensionamento dos reatores naturalmente saturados (série e paralelo) que serão responsáveis pela compensação de reativos de duas, das três configurações da linha de transmissão experimental. Para tal finalidade, foi utilizado o software R07121, desenvolvido pelo Engenheiro Eletricista José Leonardo Lemos da Silva, graduado pela Universidade Federal de Pernambuco. A Figura 12 apresenta a interface do programa R07121.

Figura 12 - Interface do Programa R07121



Fonte: Autora via R07121

A priori, foram fornecidos, ao programa R07121, os dados de entrada necessários ao projeto dos reatores naturalmente saturados, especificando os valores de: tensão inicial de saturação, inclinação do reator e potência nominal do reator. Outras informações como: tipo de ligação, dados de chapa e número de núcleos também foram fornecidos de antemão ao software.

No que diz respeito aos dados referentes às estimativas iniciais do núcleo do reator como: altura, diâmetro, fator de utilização do ferro, indução magnética, indução do julgo, relação de espiras e densidade de corrente, apenas os valores de altura e

diâmetro do núcleo sofreram variações, de modo que fossem obtidos valores de inclinação do núcleo e/ou potência nominal do reator próximos aos previamente especificados. Vale salientar que os reatores projetados não possuem o mesmo joelho, ou seja, foram projetados, intencionalmente, para operar com diferente tensão de saturação e inclinação do reator.

5.1. Projeto do Reator Naturalmente Saturado Série

- Dados de Entrada:

Figura 13 - Dados de Entrada do Reator Naturalmente Saturado Série

Especificação

Tensão Inicial de Saturação: 500000 V

Potência Nom. do Reator: 200000 KVA

Inclinação do Reator: 5 %

Dados de Chapa

Modelo: 1 Steinmet

Fabricante: Mariana

Tipo: TCC2019

Fator Empilhamento: 0,98

Espessura: 0,004 mm

Curva de Mag e Perdas: e005.dad

Indução Magnética Máxima: 3,000 T

Estimativas Iniciais

Altura do Núcleo: 2800 mm

Diâmetro do Núcleo: 555 mm

Fator de Utilização do Fe: 0,953

Indução Magnética: 1,9 T

Indução do Julgo: 1,5 T

Relação de Espiras: 0,45 N3/N0

Densidade de Corrente: 1,8 A/mm2

Número de Núcleos do Reator

☐ 6 núcleos ☒ 9 núcleos

Tipo de Ligação

☒ Série Constante: 1764,3184

☐ Paralelo GEC

☐ Paralelo TTU

Diagrama das Ligações

Estrutura Magnética

☒ Acoplado

Dados do tanque e de refrigeração

Tanque Refrigeração

Clique Aqui Para Fornecer os Dados de Impedância

Atualizar Arquivos Fechar

- Dados de Projeto:

Figura 14 - Dados Gerais do Reator Naturalmente Saturado Série

Potência Nominal do Reator Especificada	200.000,00	KVA
Potência Nominal do Reator Calculada	199.023,73	KVA
Corrente Nominal do Reator Especificada	219,94	A
Corrente Nominal do Reator Calculada	218,87	A
Tensão Inicial de Saturação do Reator Especificada	500.000,00	V
Tensão Nominal do Reator	525.000,00	V
Corrente em Vazio do Reator	152,26	A
I_0 / I_n	69,57	%
Indução Magnética	1,90	T
Indução Magnética do Julgo	1,500	T
Indução Magnética Máxima	3,000	T
Altura	2.800,0	mm
Diâmetro	555,0	mm
Fator de Utilização do Fe	0,953	
Fator de Empilhamento	0,980	
N0	660,0	
N1	490,0	
N2	261,0	
N3	297,0	

Clique no botão ao lado para visualizar as correntes nos enrolamentos N0, N1, N2 e N3

Curva de magnetização: e005.dad
Modelo: 1 - Steinmetz

Obs: Os valores de tensão e corrente mostrados são RMS

Gráfico I x V do Reator Saturado

Inclinação do Reator Especificada: 5,00 %
Inclinação do Reator Calculada: 15,68 %
Inclinação do Reator Calc. entre 1.05 a 0.95 pu da Tensão Nom.: 15,66 %

Gravar Caso Gerar Relatório
Imprimir Fechar

Fonte: Autora via R07121

5.2. Projeto do Reator Naturalmente Saturado Paralelo

- Dados de Entrada:

Figura 15 - Dados de Entrada do Reator Naturalmente Saturado Paralelo

 Dados de Entrada - Reator Saturado

Especificação

Tensão Inicial de Saturação V

Potência Nom. do Reator KVA

Inclinação do Reator %

Dados de Chapa

Modelo

Fabricante

Tipo

Fator Empilhamento

Espessura mm

Curva de Mag e Perdas

Indução Magnética Máxima T

Impedância de Curto-Circuito e Fechamento

[Clique Aqui Para Fornecer os Dados de Impedância](#)

Estimativas Iniciais

Altura do Núcleo mm

Diâmetro do Núcleo mm

Fator de Utilização do Fe

Indução Magnética T

Indução do Julgo T

Relação de Espiras N3/N0

Densidade de Corrente A/mm2

Número de Núcleos do Reator

☐ 6 núcleos ☒ 9 núcleos

Tipo de Ligação

☐ Série ☒ Paralelo GEC ☐ Paralelo TTU

Constante:

[Diagrama das Ligações](#)

Estrutura Magnética

☒ Acoplado ☐ Desacoplado

Dados do tanque e de refrigeração

[Tanque](#) [Refrigeração](#)

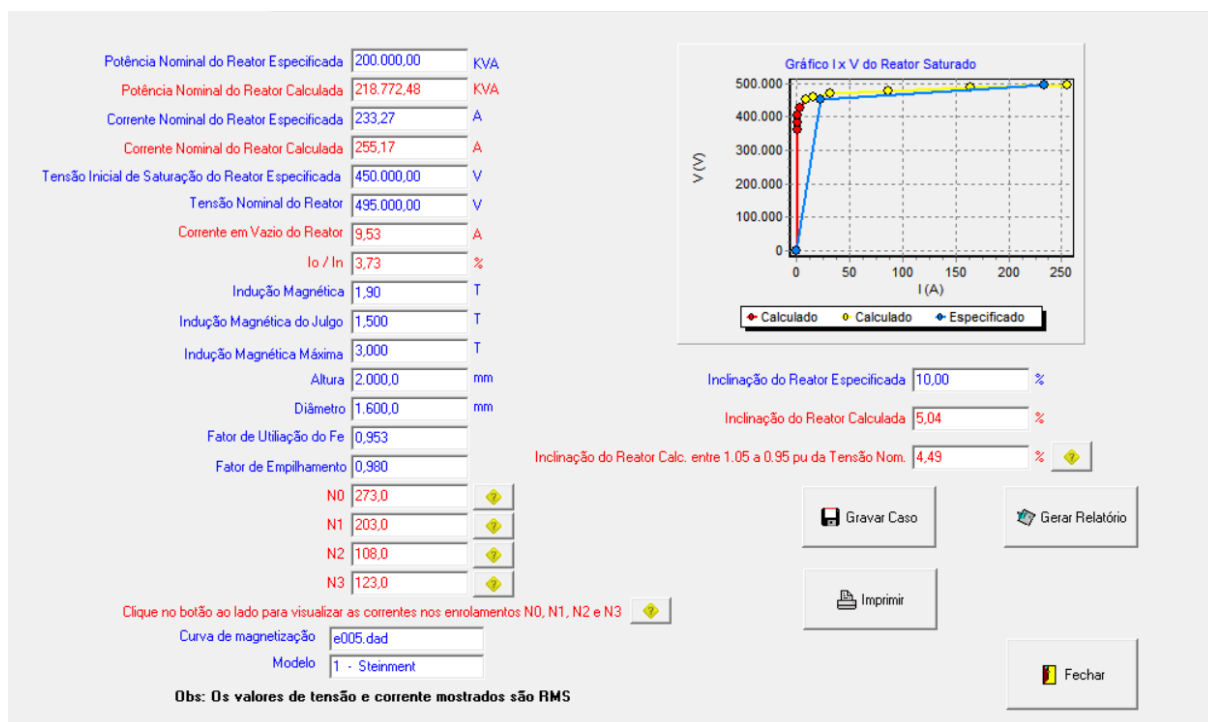
 Atualizar Arquivos

 Fechar

Fonte: Autora via R07121

- Dados de Projeto:

Figura 16 - Dados Gerais do Reator Naturalmente Saturado Paralelo



Fonte: Autora via R07121

6. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA LINHA DE TRANSMISSÃO EXPERIMENTAL SEM RESISTOR DE PRÉ INSERÇÃO

No presente capítulo serão apresentadas as formas de onda de tensão obtidas ao energizar as três configurações da linha de transmissão experimental: LT compensada por reator linear, LT compensada por reator naturalmente saturado série e LT compensada por reator naturalmente saturado paralelo.

O principal objetivo deste capítulo é mostrar o comportamento da tensão, em situação transitória e em regime permanente, destas configurações na ausência de resistores de pré-inserção.

A Figura 17 apresenta os parâmetros de base referentes aos reatores lineares, os quais foram previamente fornecidos e, que até então, não foram apresentados neste trabalho.

Figura 17 - Dados Referentes aos Reatores Lineares

Component: RLC3

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
R_1	Ohms	14.07
L_1	Ohm	1266
C_1	μ S	0
R_2	Ohms	14.07
L_2	Ohm	1266
C_2	μ S	0
R_3	Ohms	14.07
L_3	Ohm	1266

NODE	PHASE	NAME
IN1	ABC	NO2
OUT1	ABC	

Copy Paste Reset Order: 0 Label:

Comment:

Output

0 - No

☐ Hide ☐ \$Vintage,1

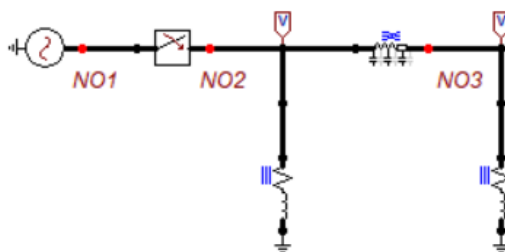
Edit definitions OK Cancel Help

Fonte: Autora via ATPDraw

6.1. Linha de Transmissão Compensada por Reator Linear

- Trecho 1

Figura 18 - Primeiro Trecho da LT Compensada por Reator Linear



Fonte: Autora via ATPDraw

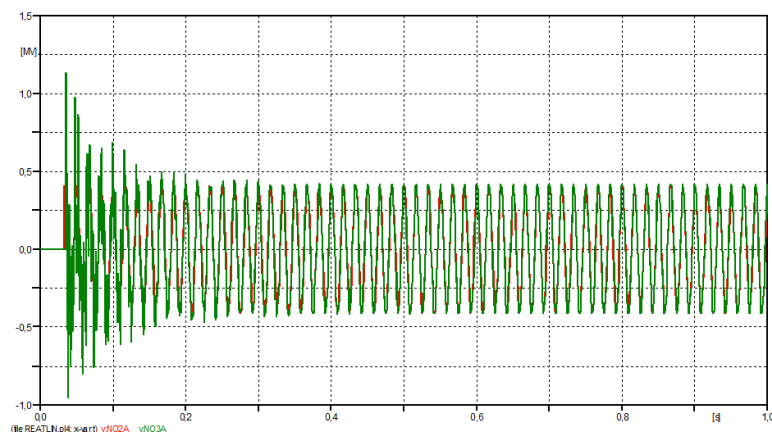
Fechamento da Disjuntor Principal 1:

$$t_{D1A} = 0,03333s$$

$$t_{D1B} = 0,03425s$$

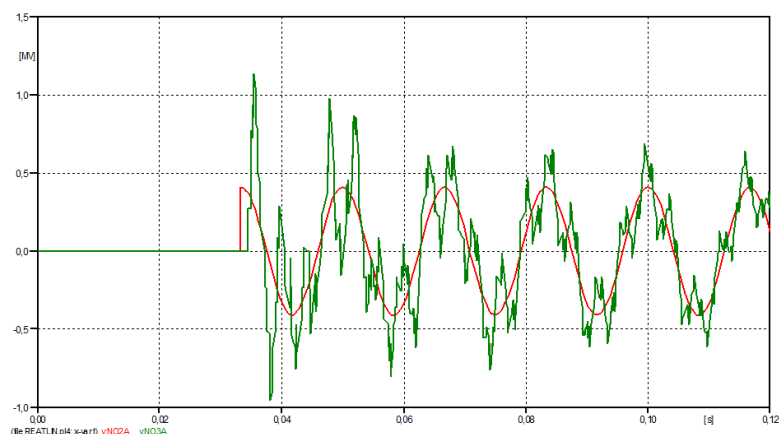
$$t_{D1C} = 0,03447s$$

Gráfico 1 - Forma de Onda da Tensão na Fase A | Trecho 1



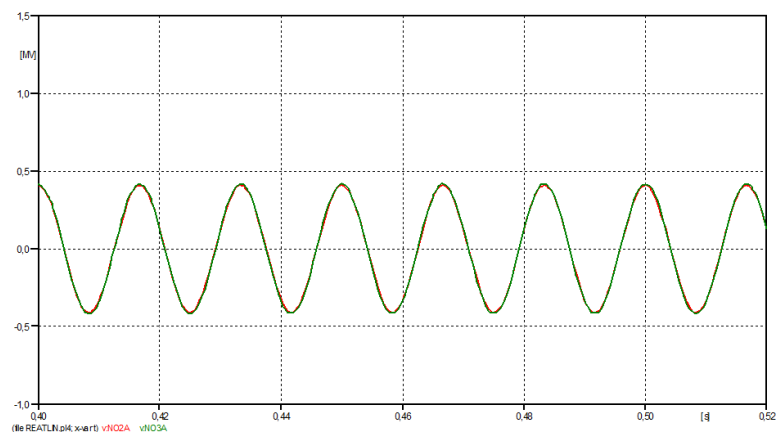
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 2 - Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase A | Trecho 1



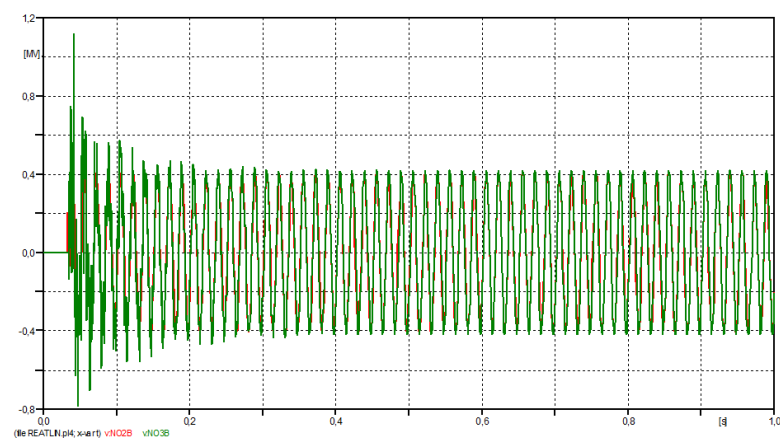
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 3 - Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase A | Trecho 1



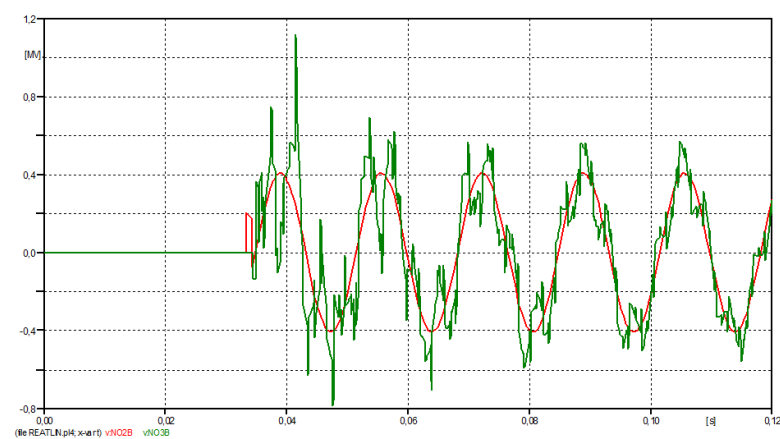
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 4 - Forma de Onda da Tensão na Fase B | Trecho 1



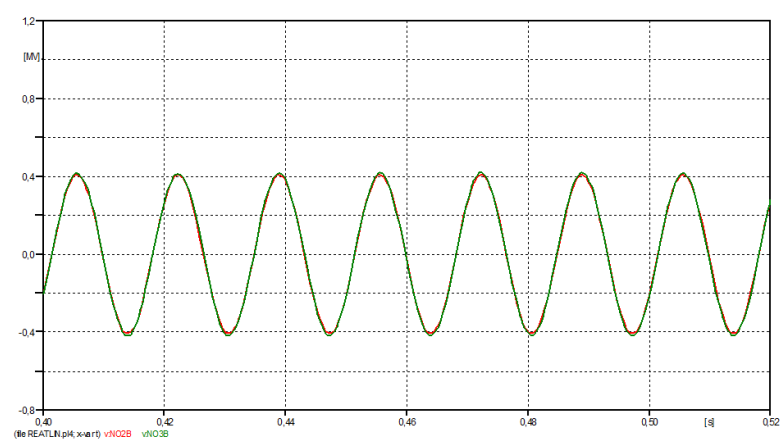
Fonte: Autor via ATP Launcher

Gráfico 5 - Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase B | Trecho 1



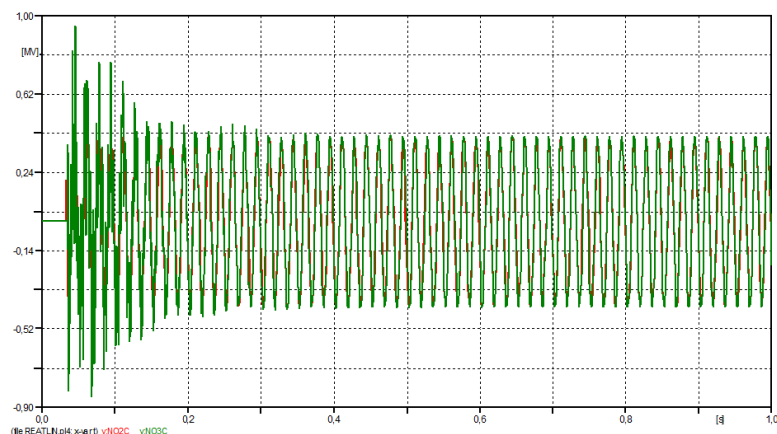
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 6 - Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase B | Trecho 1



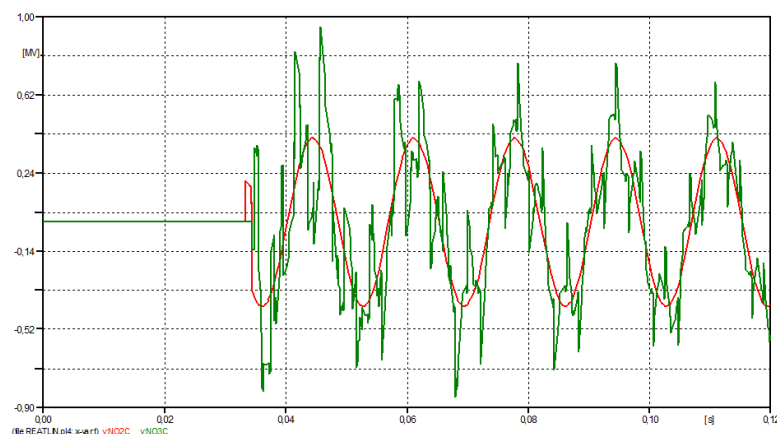
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 7 - Forma de Onda da Tensão na Fase C | Trecho 1



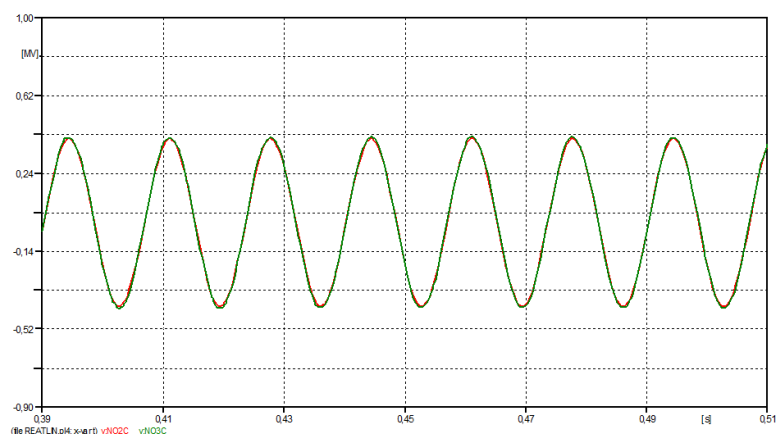
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 8 - Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase C | Trecho 1



Fonte: Autora via ATP Launcher

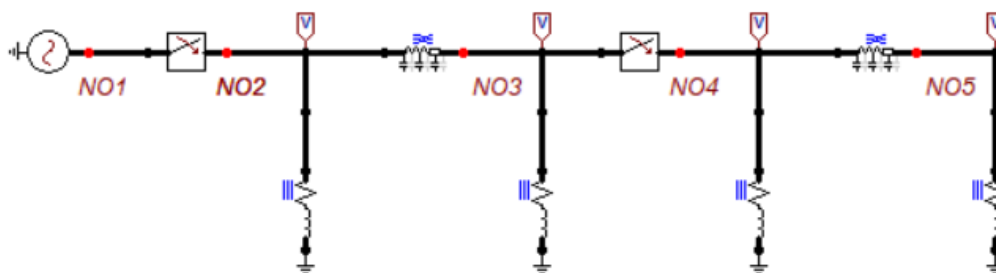
Gráfico 9 - Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase C | Trecho 1



Fonte: Autora via ATP Launcher

- Trecho 2

Figura 19 - Segundo Trecho da LT Compensada por Reator Linear



Fonte: Autora via ATPDraw

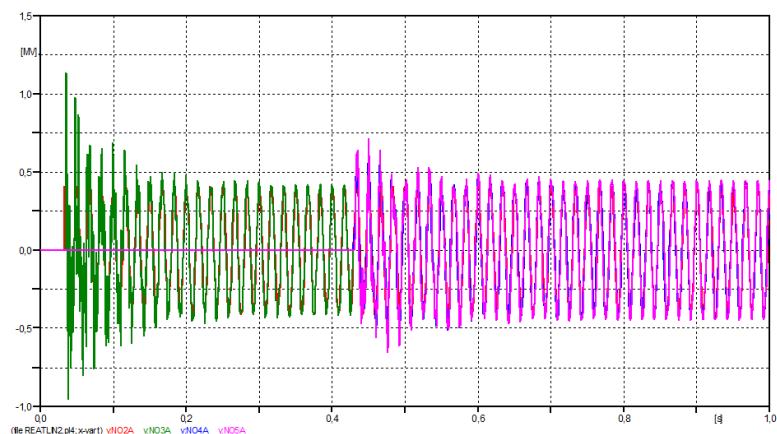
Fechamento do Disjuntor Principal 2:

$$t_{D2_A} = 0,42926s$$

$$t_{D2_B} = 0,43021s$$

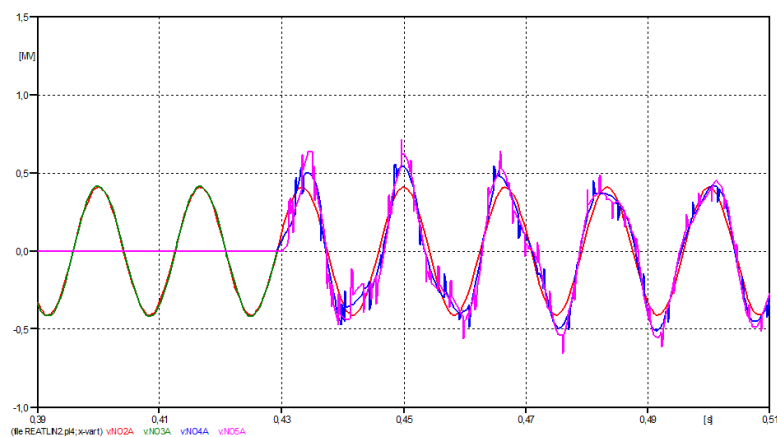
$$t_{D2_C} = 0,4304s$$

Gráfico 10 - Forma de Onda da Tensão na Fase A | Trecho 2



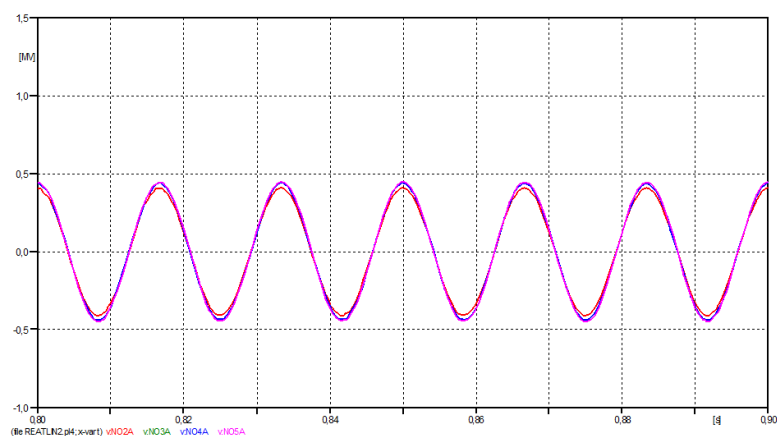
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 11 - Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase A | Trecho 2



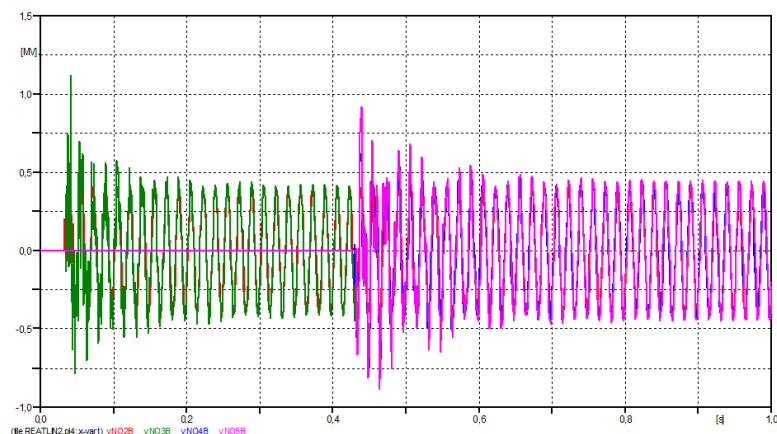
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 12 - Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase A | Trecho 2



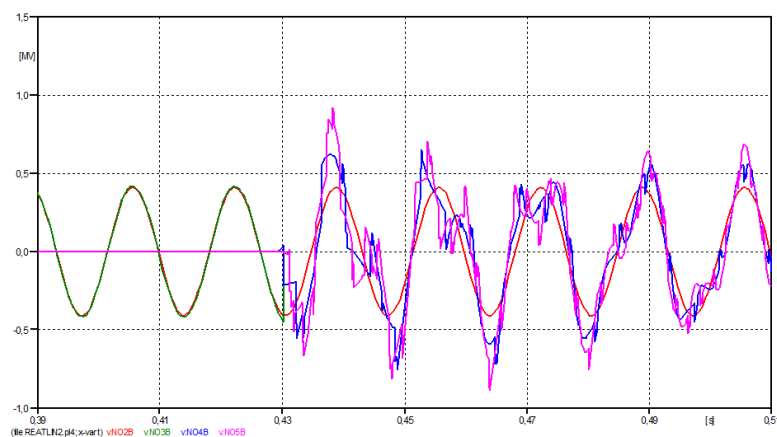
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 13 - Forma de Onda da Tensão na Fase B | Trecho 2



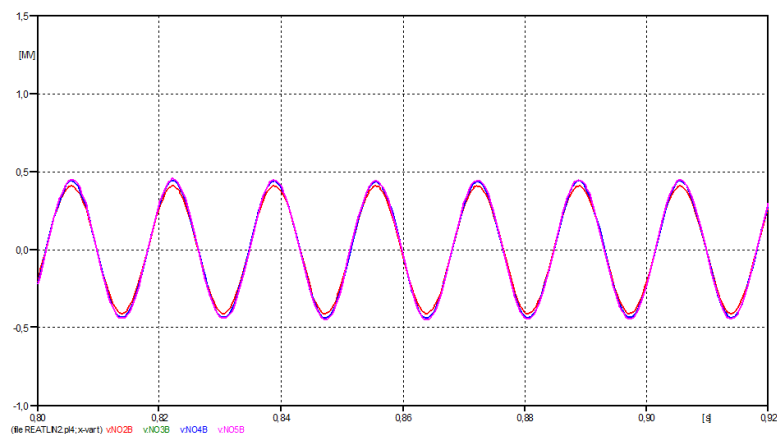
Fonte: Autor via ATP Launcher

Gráfico 14 - Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase B | Trecho 2



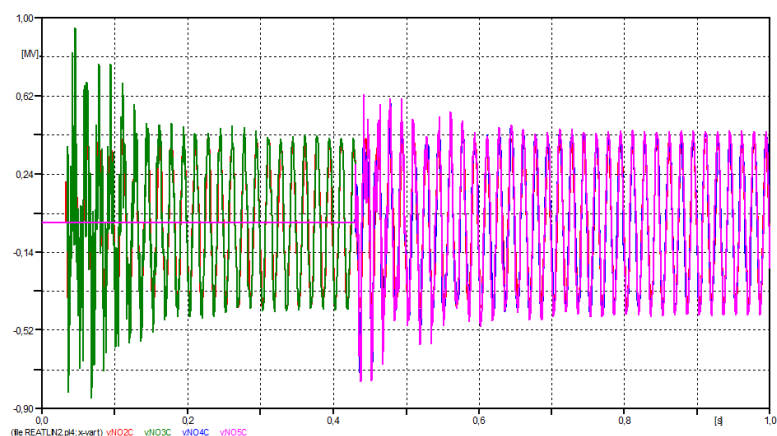
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 15 - Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase B | Trecho 2



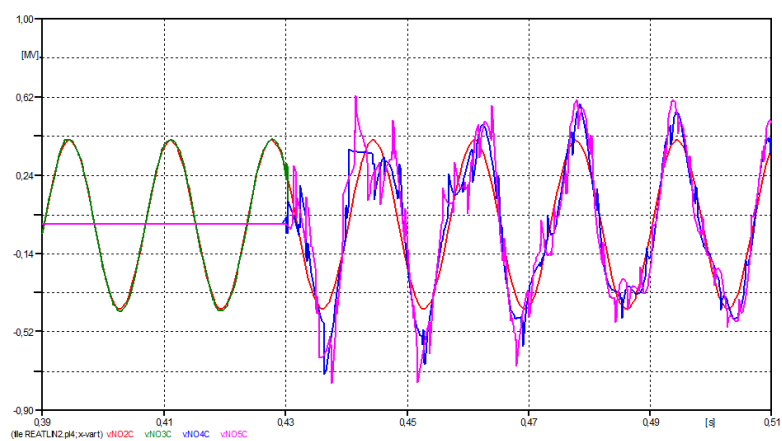
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 16 - Forma de Onda da Tensão na Fase C | Trecho 2



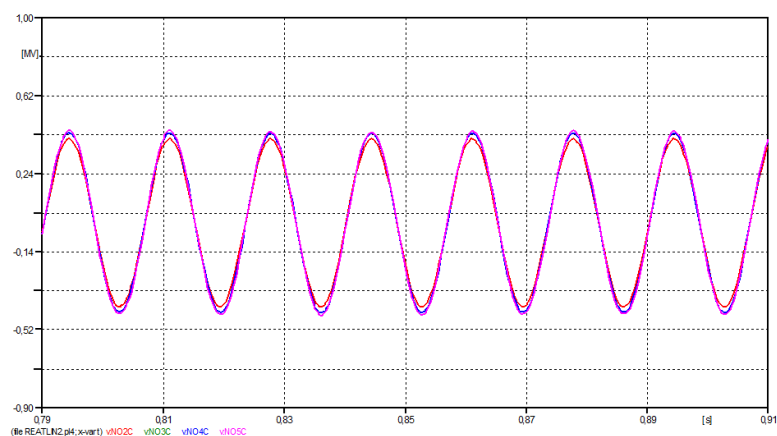
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 17 - Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase C | Trecho 2



Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 18 - Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase C | Trecho 2

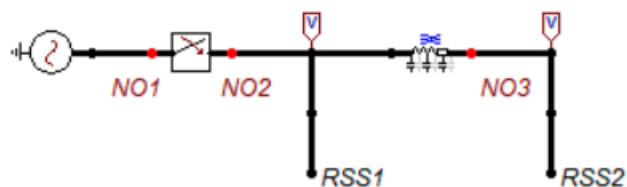


Fonte: Autora via ATP Launcher

6.2. Linha de Transmissão Compensada por Reator Série

- Trecho 1

Figura 20 - Primeiro Trecho da LT Compensada por Reator Naturalmente Saturado Série



Fonte: Autora via ATPDraw

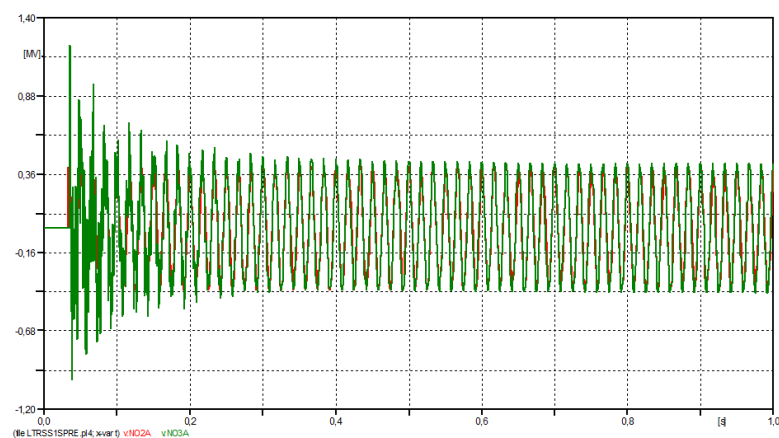
Fechamento do Disjuntor Principal 1:

$$t_{D1A} = 0,03333s$$

$$t_{D1B} = 0,03425s$$

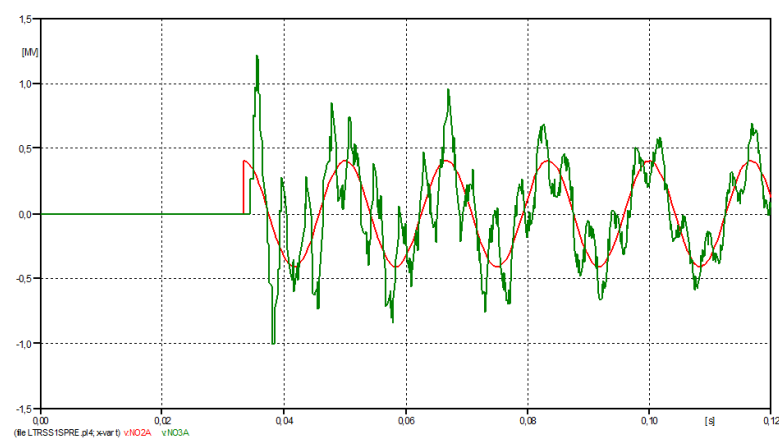
$$t_{D1C} = 0,03447s$$

Gráfico 19 - Forma de Onda da Tensão na Fase A | Trecho 1



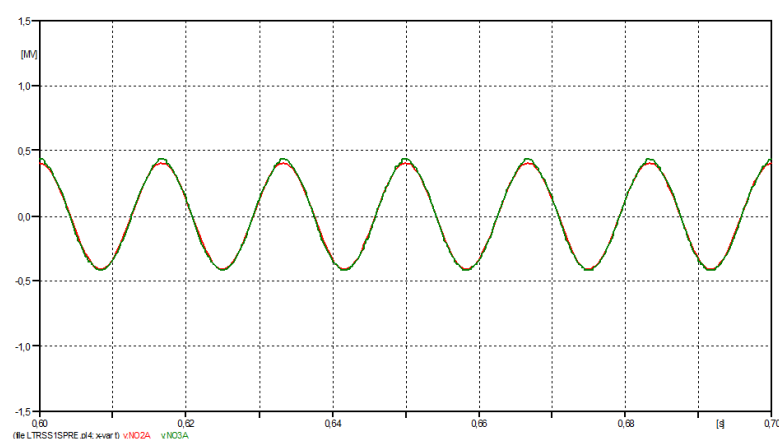
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 20 - Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase A | Trecho 1



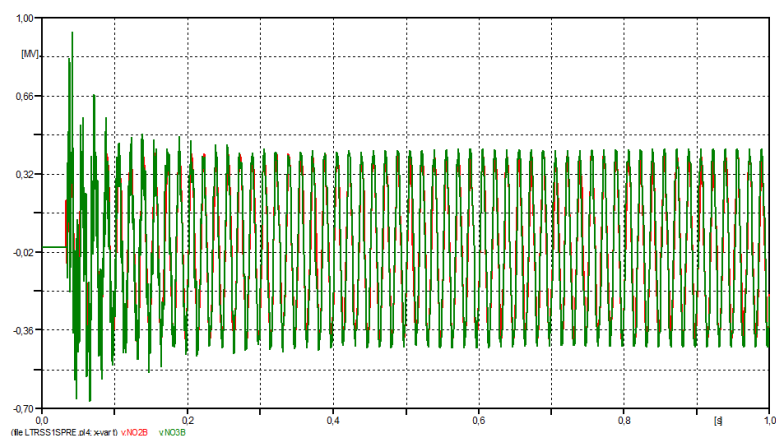
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 21 - Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase A | Trecho 1



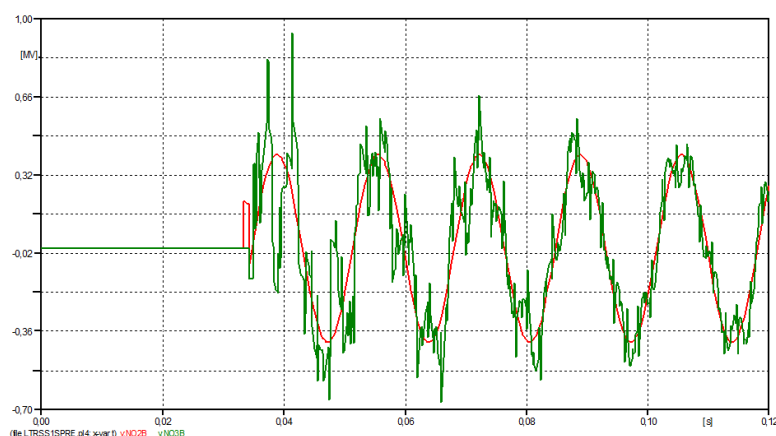
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 22 - Forma de Onda da Tensão na Fase B | Trecho 1



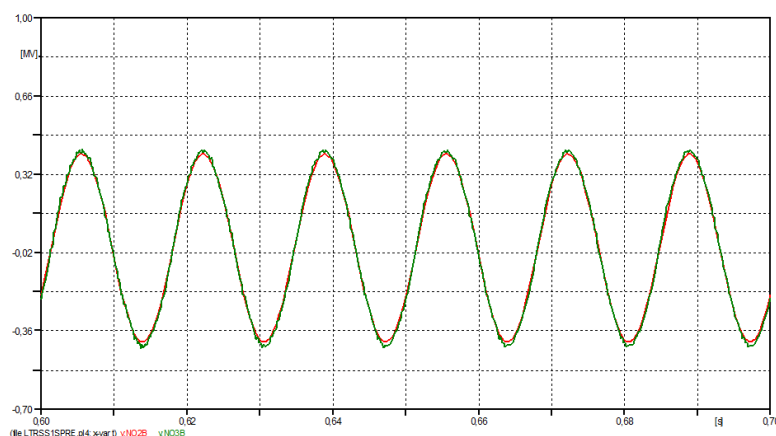
Fonte: Autor via ATP Launcher

Gráfico 23 - Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase B | Trecho 1



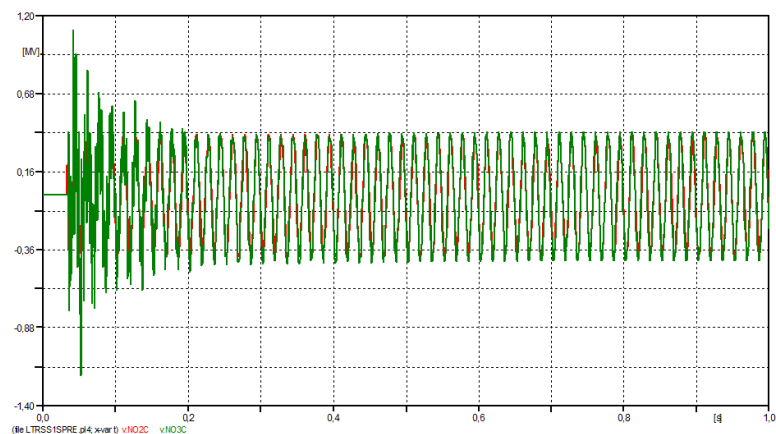
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 24 - Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase B | Trecho 1



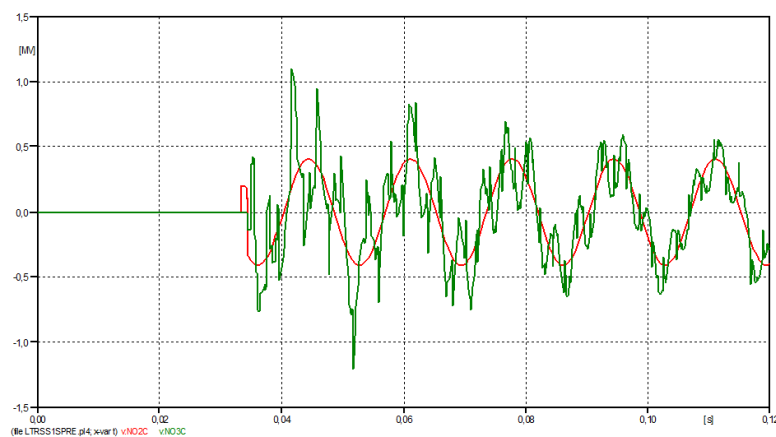
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 25 - Forma de Onda da Tensão na Fase C | Trecho 1



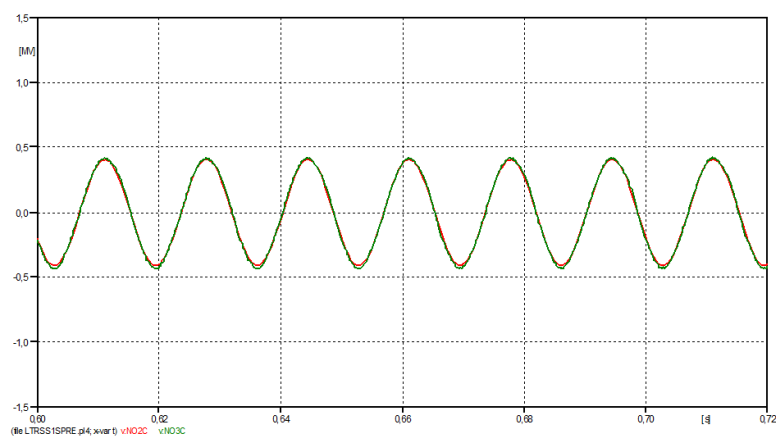
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 26 - Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase C | Trecho 1



Fonte: Autora via ATP Launcher

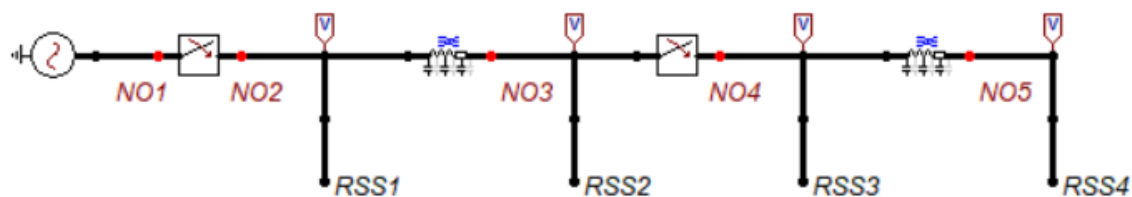
Gráfico 27 - Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase C | Trecho 1



Fonte: Autora via ATP Launcher

- Trecho 2

Figura 21 - Segundo Trecho da LT Compensada por Reator Naturalmente Saturado Série



Fonte: Autora via ATPDraw

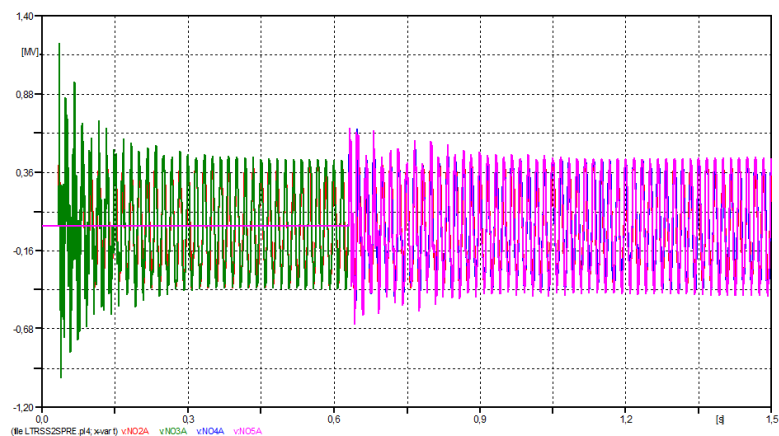
Fechamento do Disjuntor Principal 2:

$$t_{D2_A} = 0,62929s$$

$$t_{D2_B} = 0,63024s$$

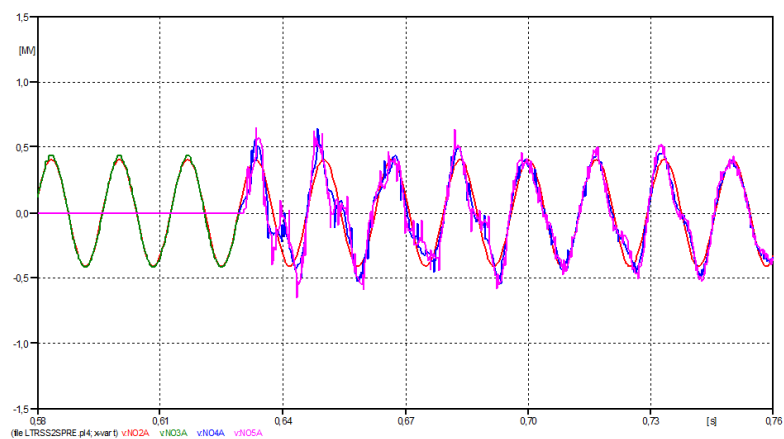
$$t_{D2_C} = 0,63043s$$

Gráfico 28 - Forma de Onda da Tensão na Fase A | Trecho 2



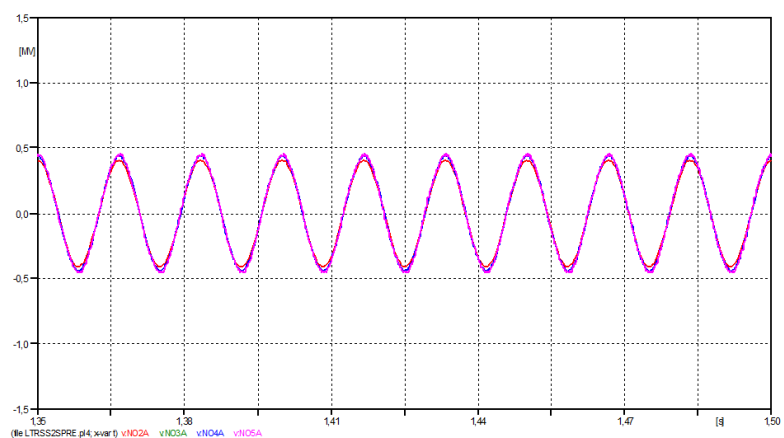
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 29 - Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase A | Trecho 2



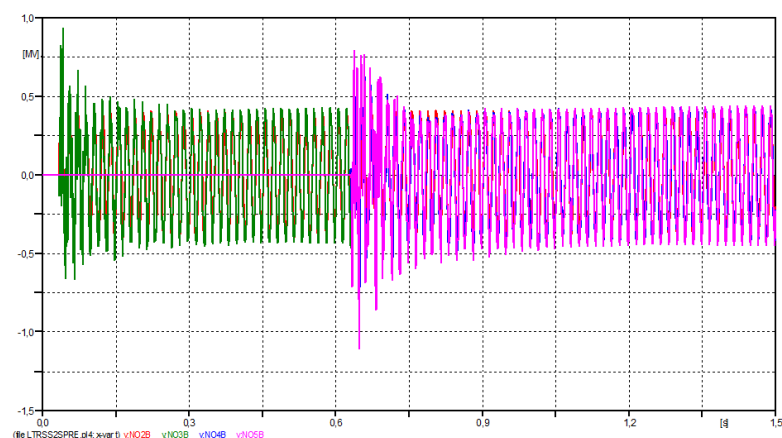
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 30 - Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase A | Trecho 2



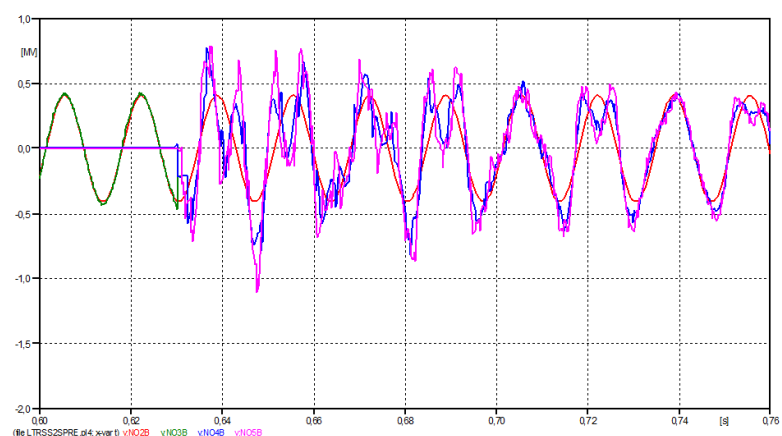
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 31 - Forma de Onda da Tensão na Fase B | Trecho 2



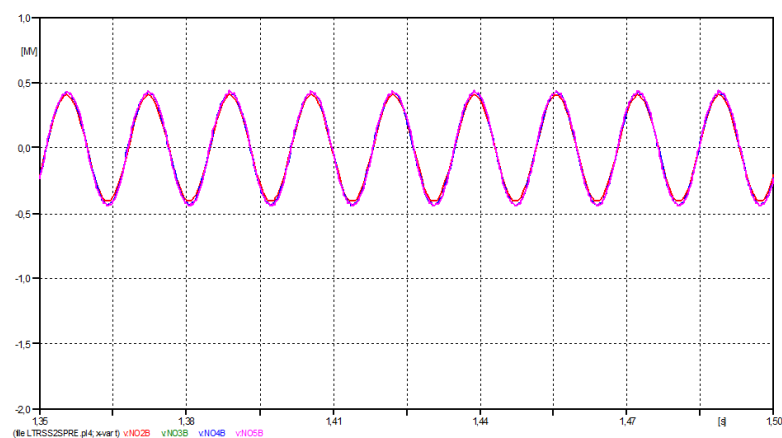
Fonte: Autor via ATP Launcher

Gráfico 32 - Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase B | Trecho 2



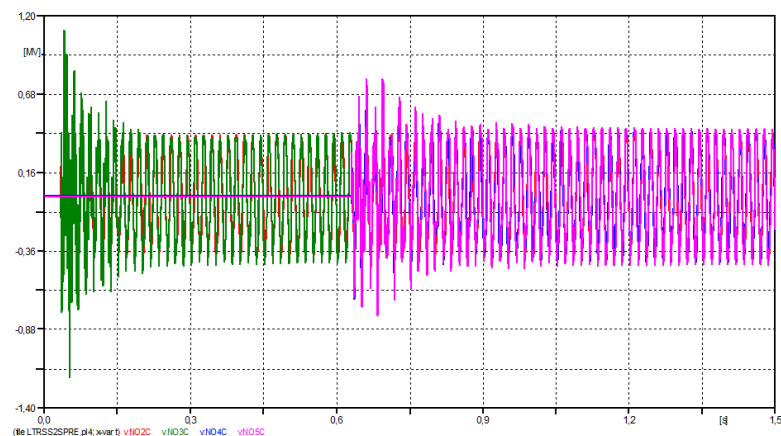
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 33 - Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase B | Trecho 2



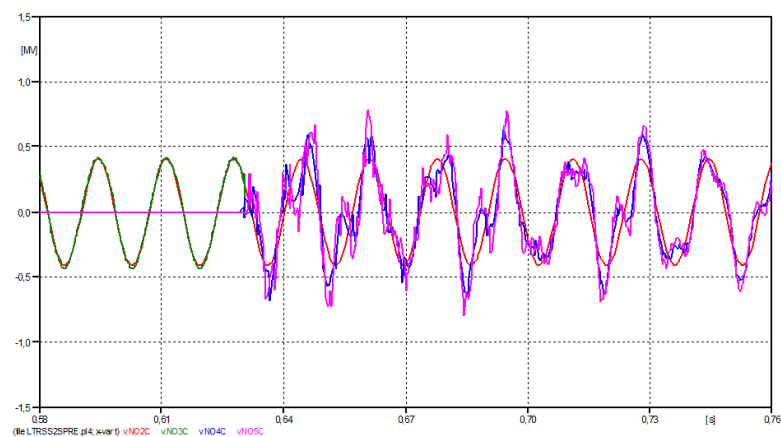
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 34 - Forma de Onda da Tensão na Fase C | Trecho 2



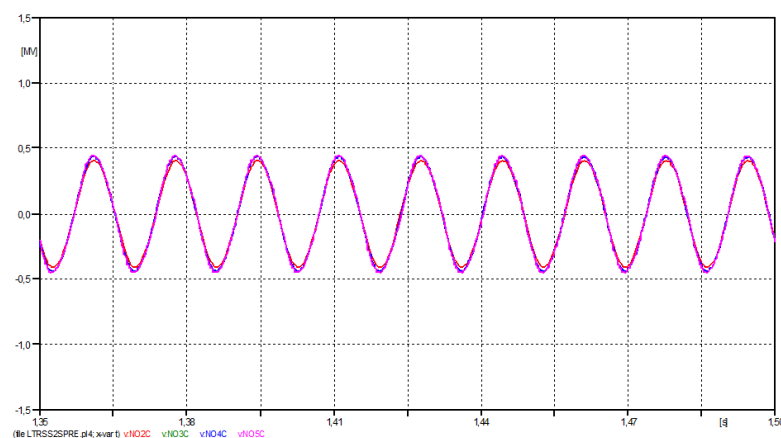
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 35 - Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase C | Trecho 2



Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 36 - Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase C | Trecho 2

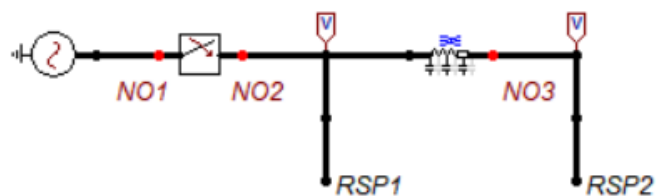


Fonte: Autora via ATP Launcher

6.3. Linha de Transmissão Compensada por Reator Paralelo GEC

- Trecho 1

Figura 22 - Primeiro Trecho da LT Compensada por Reator Naturalmente Saturado Paralelo



Fonte: Autora via ATPDraw

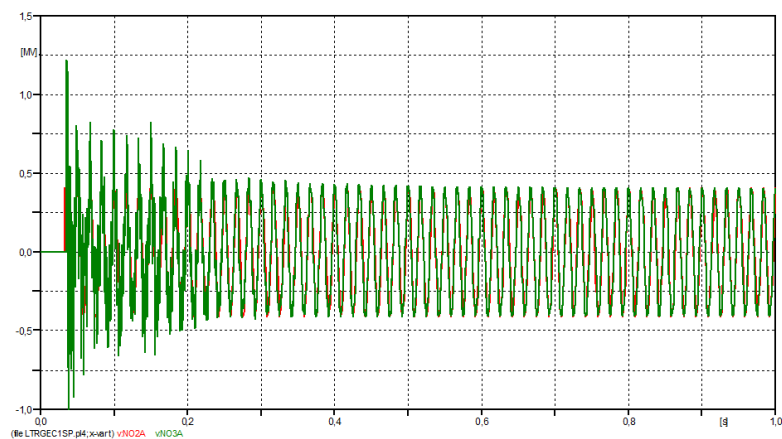
Fechamento do Disjuntor Principal 1:

$$t_{D1A} = 0,03333s$$

$$t_{D1B} = 0,03425s$$

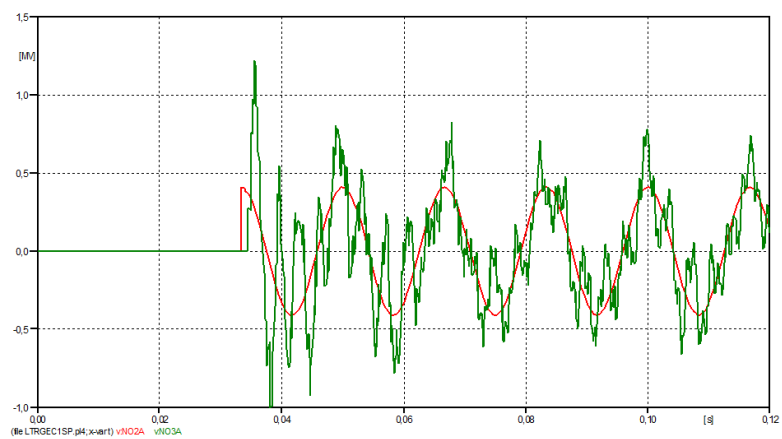
$$t_{D1C} = 0,03447s$$

Gráfico 37 - Forma de Onda da Tensão na Fase A | Trecho 1



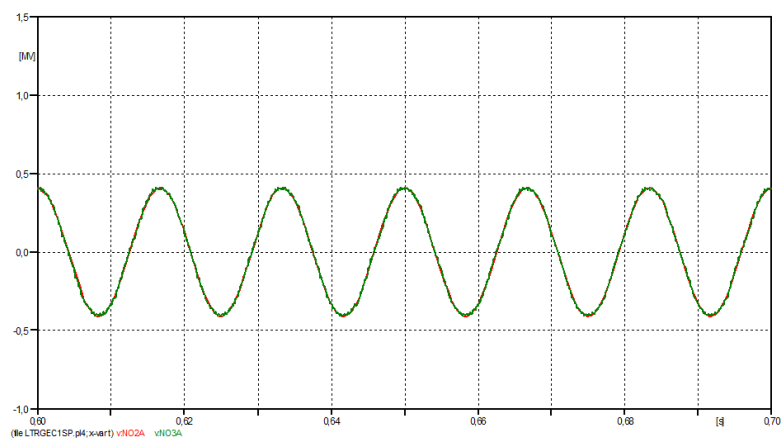
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 38 - Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase A | Trecho 1



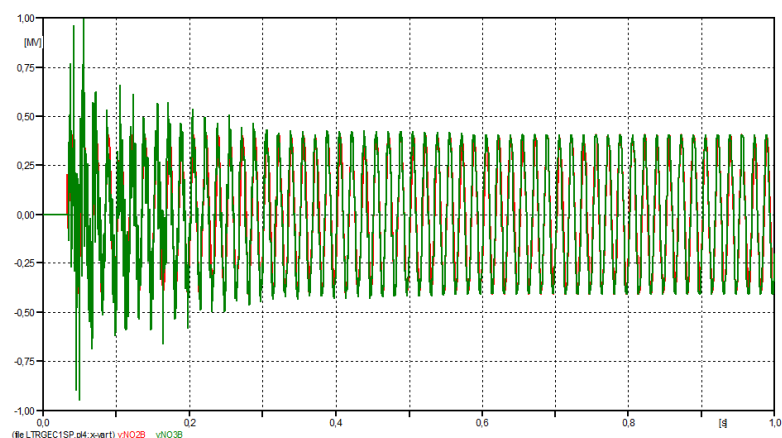
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 39 - Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase A | Trecho 1



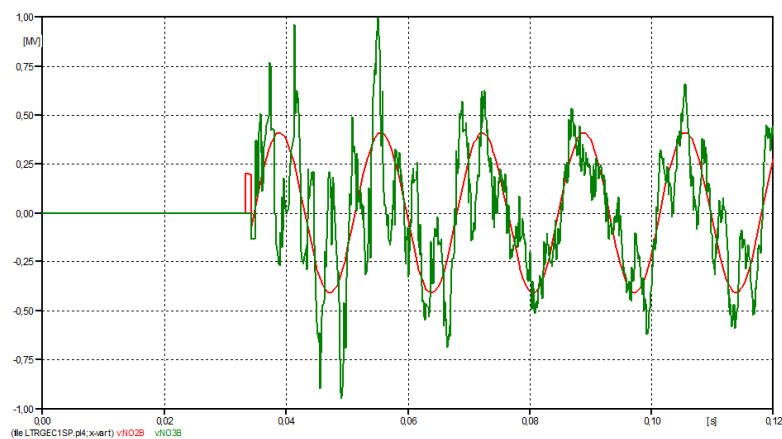
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 40 - Forma de Onda da Tensão na Fase B | Trecho 1



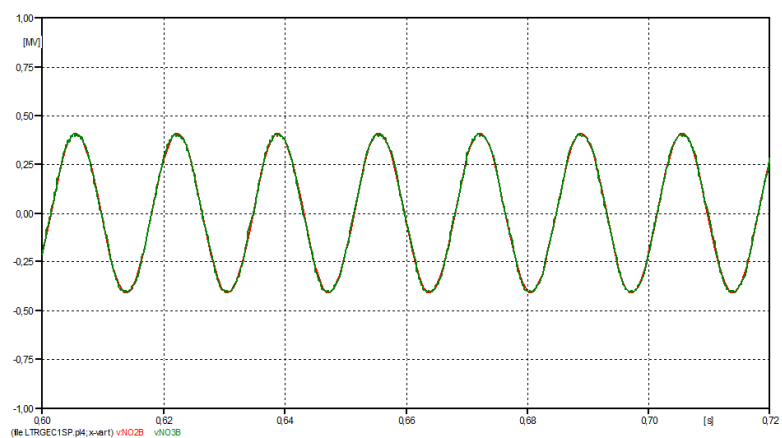
Fonte: Autor via ATP Launcher

Gráfico 41 - Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase B | Trecho 1



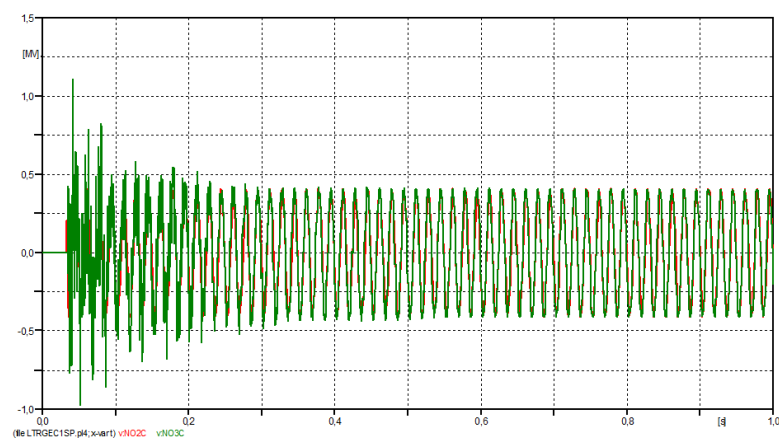
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 42 - Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase B | Trecho 1



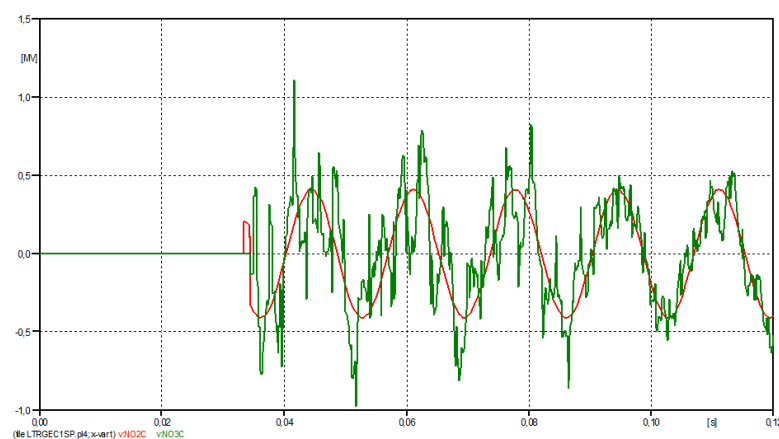
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 43 - Forma de Onda da Tensão na Fase C | Trecho 1



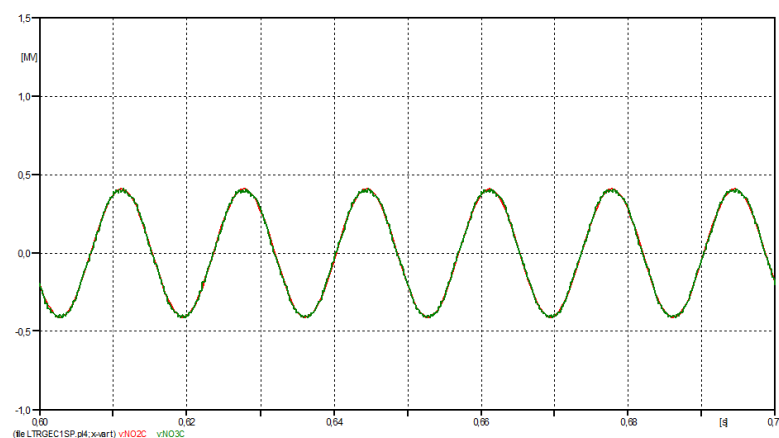
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 44 - Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase C | Trecho 1



Fonte: Autora via ATP Launcher

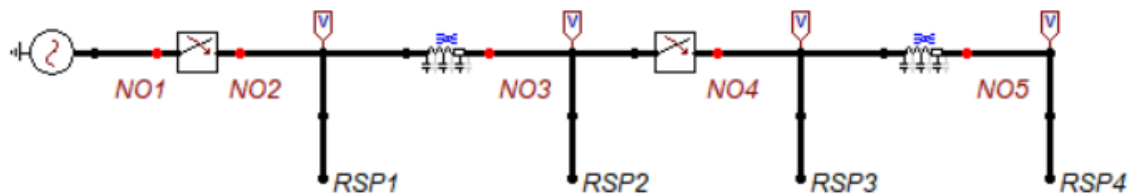
Gráfico 45 - Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase C | Trecho 1



Fonte: Autora via ATP Launcher

- Trecho 2

Figura 23 - Segundo Trecho da LT Compensada por Reator Naturalmente Saturado Paralelo



Fonte: Autora via ATPDraw

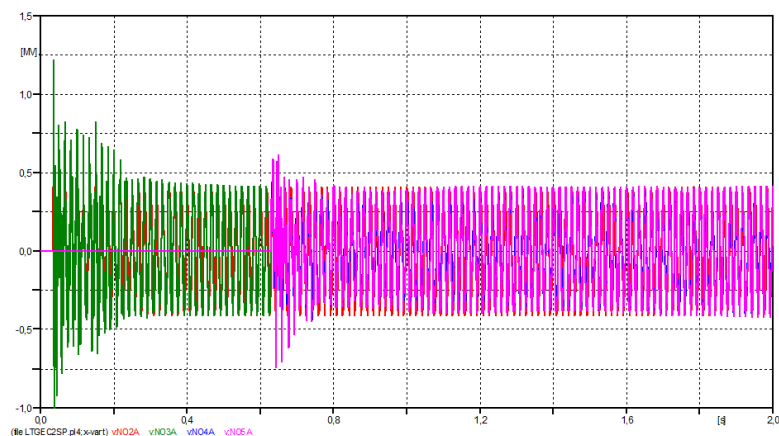
Fechamento do Disjuntor Principal 2:

$$t_{D2A} = 0,62919s$$

$$t_{D2B} = 0,63014s$$

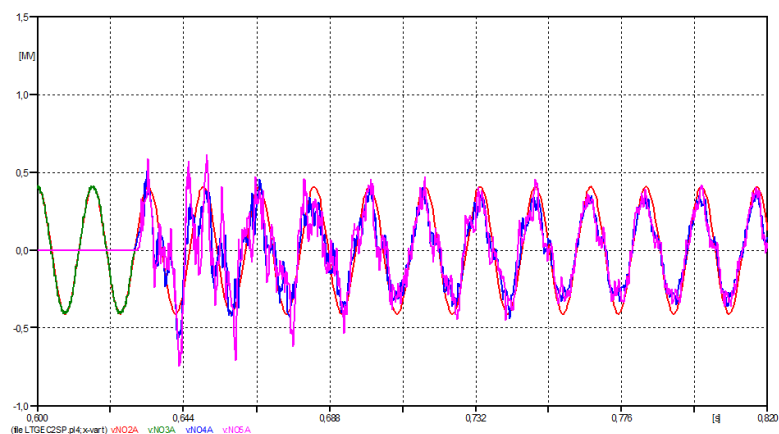
$$t_{D2C} = 0,63033s$$

Gráfico 46 - Forma de Onda da Tensão na Fase A | Trecho 2



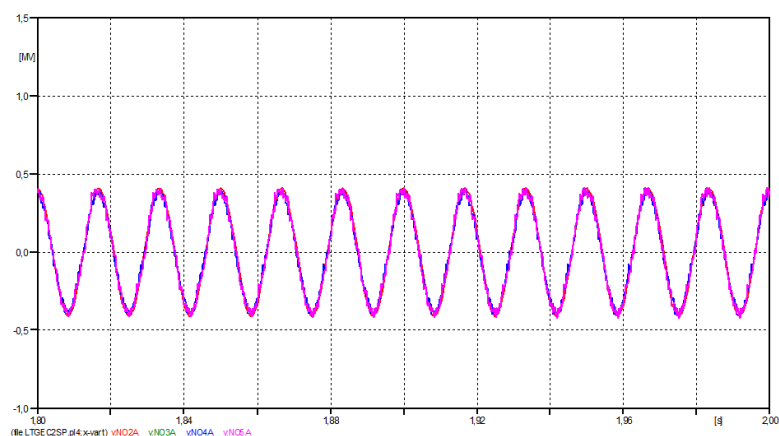
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 47 - Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase A | Trecho 2



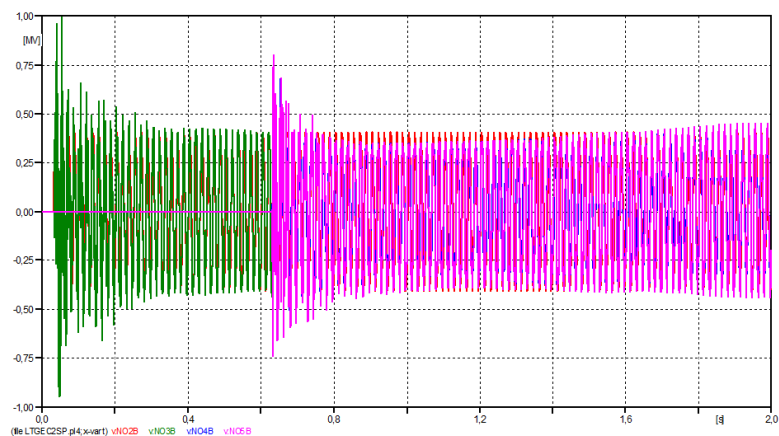
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 48 - Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase A | Trecho 2



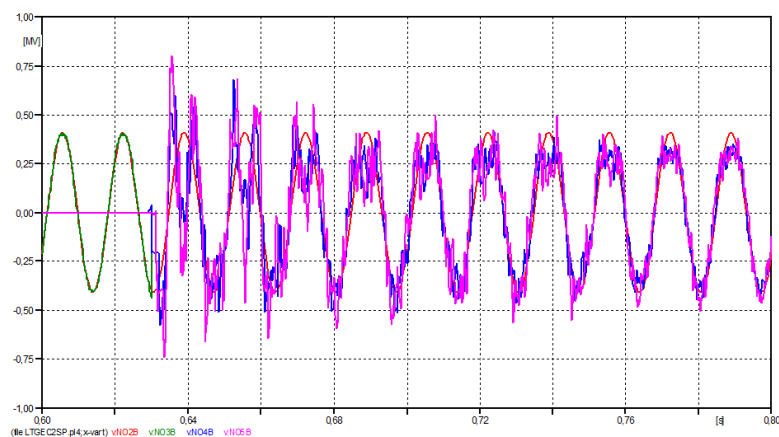
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 49 - Forma de Onda da Tensão na Fase B | Trecho 2



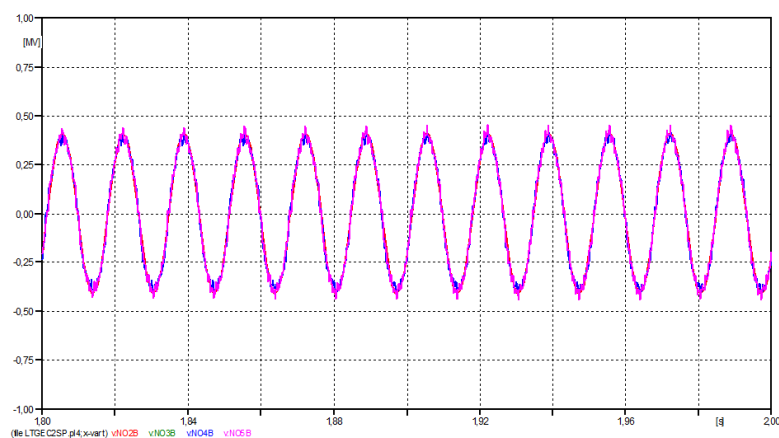
Fonte: Autor via ATP Launcher

Gráfico 50 - Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase B | Trecho 2



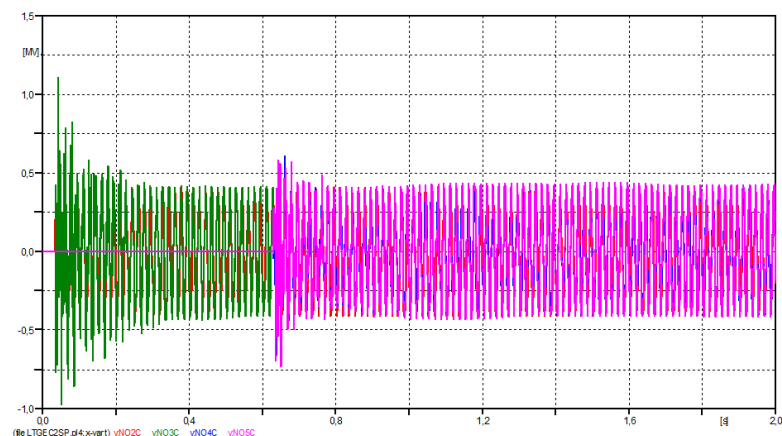
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 51 - Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase B | Trecho 2



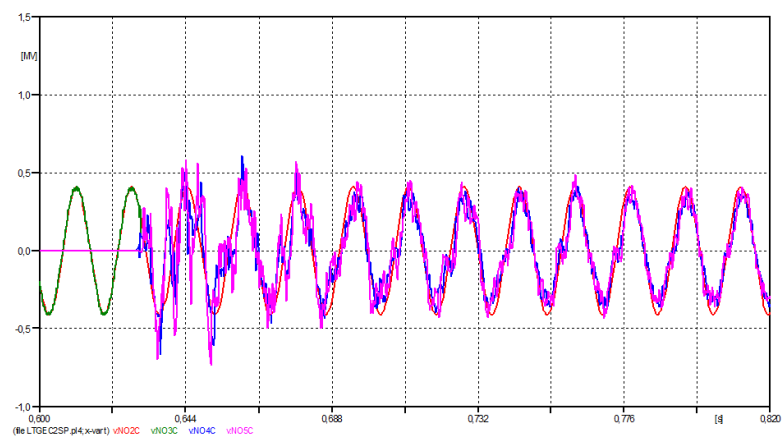
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 52 - Forma de Onda da Tensão na Fase C | Trecho 2



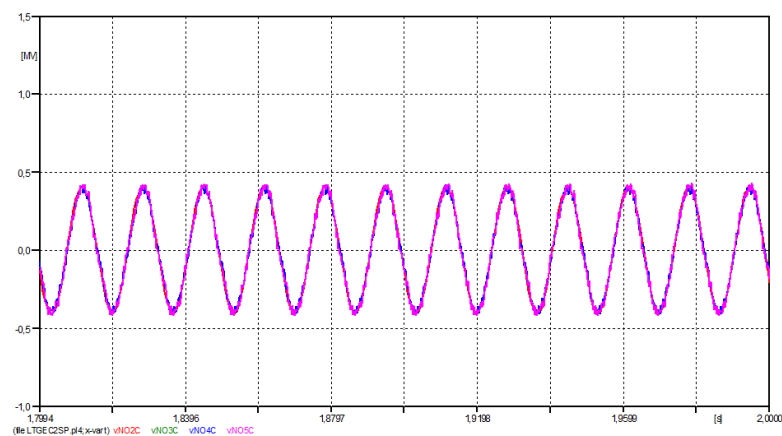
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 53 - Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase C | Trecho 2



Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 54 - Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase C | Trecho 2



Fonte: Autora via ATP Launcher

6.4. Conclusão

Analisando as formas de onda da tensão obtidas com a simulação computacional para energização, das três configurações de LT, na ausência de resistores de pré-inserção, é possível notar que, logo que se energizam as linhas de transmissão, níveis de tensão extremamente elevados são atingidos. Na maior parte dos casos, os níveis de tensão mais agressivos foram observados ao energizar o primeiro trecho das três configurações de LT.

Este fenômeno, comum às três configurações de linha, caracteriza-se pela ausência de reatores no momento em que ocorre a energização do primeiro trecho das LTs. Ao passo que o segundo trecho é energizado, dois reatores já se encontram em operação. Tais reatores, portanto, contribuem para a redução dos níveis de tensão atingidos ao energizar o segundo trecho destas configurações de linhas de transmissão.

A onda senoidal pura, observada nos primeiros nós (NO2) das simulações, representam justamente a forma de onda gerada pela fonte de tensão. Como não há nenhum elemento que promova uma diferença de tensão entre a fonte e o início do primeiro trecho da linha de transmissão, a forma de onda verificada neste ponto será exatamente a forma de onda gerada pela fonte de tensão.

Alguns ciclos após a energização dos dois trechos das linhas de transmissão em questão, o regime permanente é estabelecido. Para a configuração que apresenta reatores lineares, é possível observar uma onda de tensão limpa, ou seja, sem distorções. No entanto, ao que se refere às configurações com reatores naturalmente saturados, distorções harmônicas são perceptíveis. Este fato ocorre uma vez que tais equipamentos possuem caráter não linear. Apesar disso, todos os reatores se mostraram eficientes quanto a questão da regulação de tensão, promovendo níveis aceitáveis ao longo da LT.

7. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA LINHA DE TRANSMISSÃO EXPERIMENTAL COM RESISTOR DE PRÉ INSERÇÃO

No presente capítulo serão apresentadas as formas de onda de tensão obtidas ao energizar as três configurações da linha de transmissão experimental: LT compensada por reator linear, LT compensada por reator naturalmente saturado série e LT compensada por reator naturalmente saturado paralelo.

Diferentemente do capítulo anterior, este capítulo possui a finalidade de mostrar o comportamento da tensão, em situação transitória e em regime permanente, destas configurações na presença de resistores de pré-inserção.

Os parâmetros de base referentes aos resistores de pré-inserção (RPI), utilizados nas simulações realizadas neste capítulo, podem ser verificados a seguir.

$$RPI_A = 400\Omega$$

$$RPI_B = 400\Omega$$

$$RPI_C = 400\Omega$$

As chaves dos disjuntores auxiliares, utilizados para curto-circuitar os resistores de pré-inserção, possuem tempo de fechamento igual a 0,01s após o fechamento das chaves dos disjuntores principais.

$$t_{DP_A} = t_{D_A} + 0,01s$$

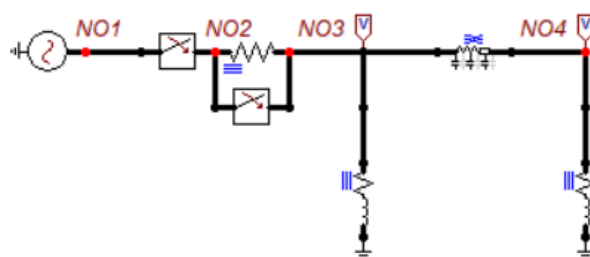
$$t_{DP_B} = t_{D_B} + 0,01s$$

$$t_{DP_C} = t_{D_C} + 0,01s$$

7.1. Linha de Transmissão Compensada por Reator Linear

- Trecho 1

Figura 24 - Primeiro Trecho da LT Compensada por Reator Linear



Fonte: Autora via ATPDraw

Fechamento do Disjuntor Principal 1:

$$t_{D1A} = 0,03333s$$

$$t_{D1B} = 0,03425s$$

$$t_{D1C} = 0,03447s$$

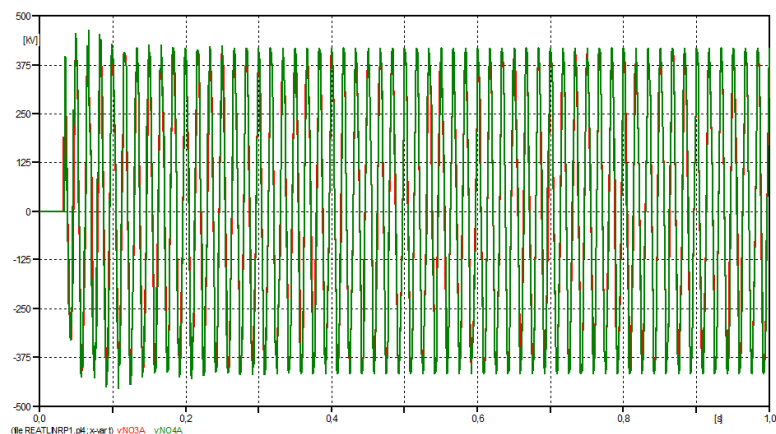
Fechamento do Disjuntor de Pré Inserção 1:

$$t_{DP1A} = 0,04333s$$

$$t_{DP1B} = 0,04425s$$

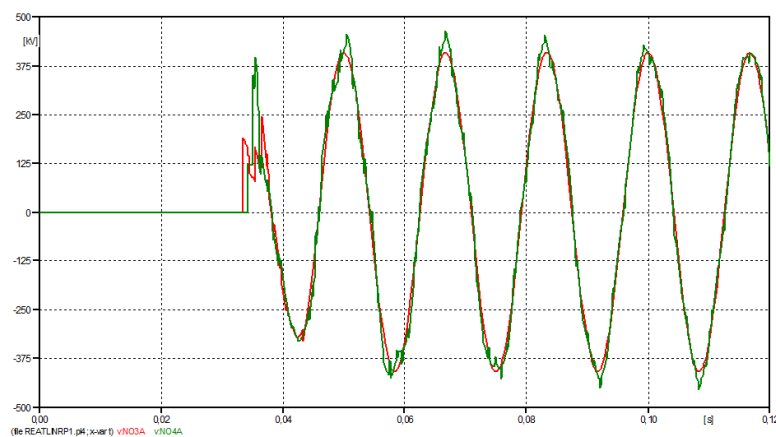
$$t_{DP1C} = 0,04447s$$

Gráfico 55 - Forma de Onda da Tensão na Fase A | Trecho 1



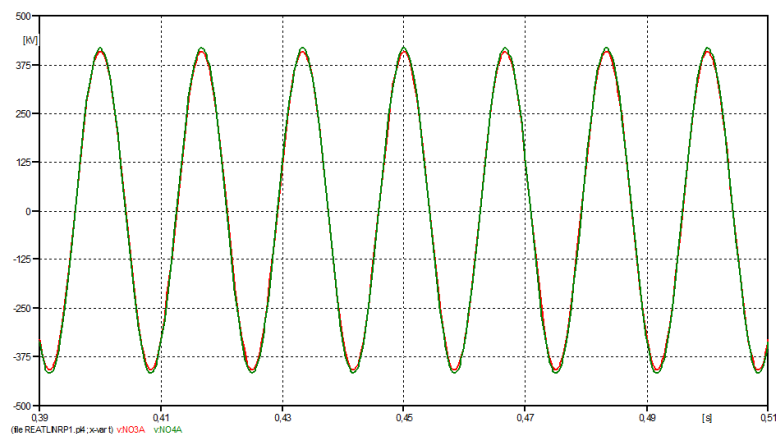
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 56 - Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase A | Trecho 1



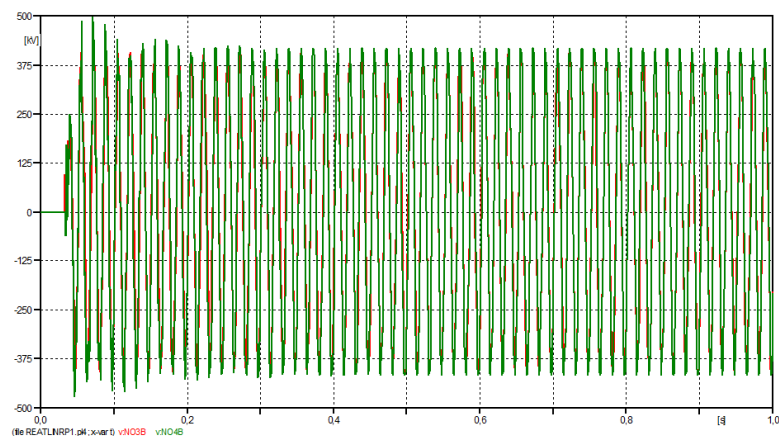
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 57 - Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase A | Trecho 1



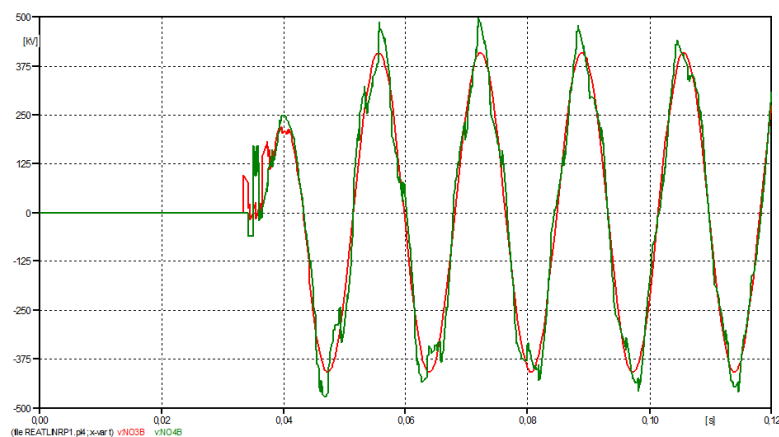
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 58 - Forma de Onda da Tensão na Fase B | Trecho 1



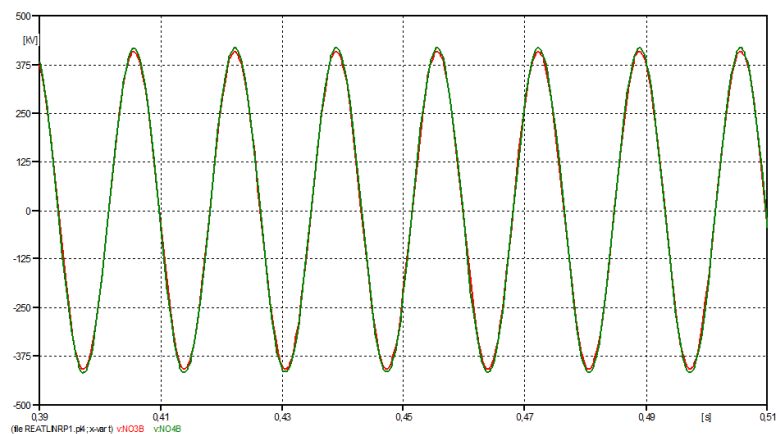
Fonte: Autor via ATP Launcher

Gráfico 59 - Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase B | Trecho 1



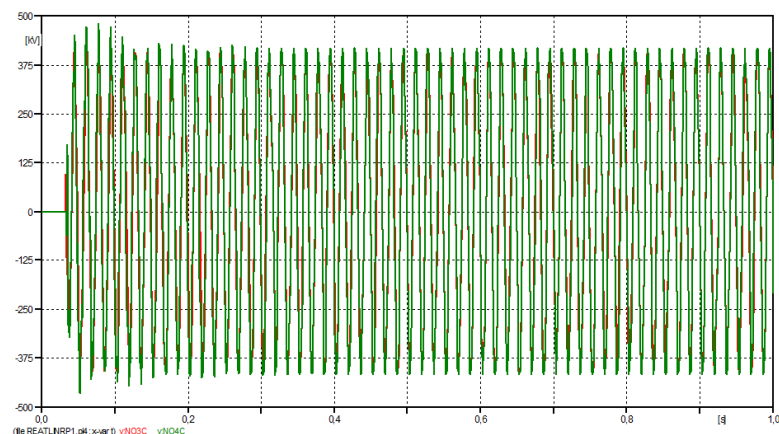
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 60 - Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase B | Trecho 1



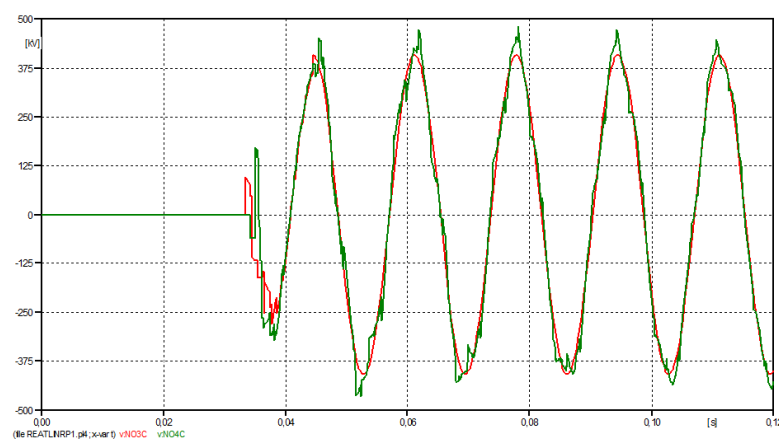
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 61 - Forma de Onda da Tensão na Fase C | Trecho 1



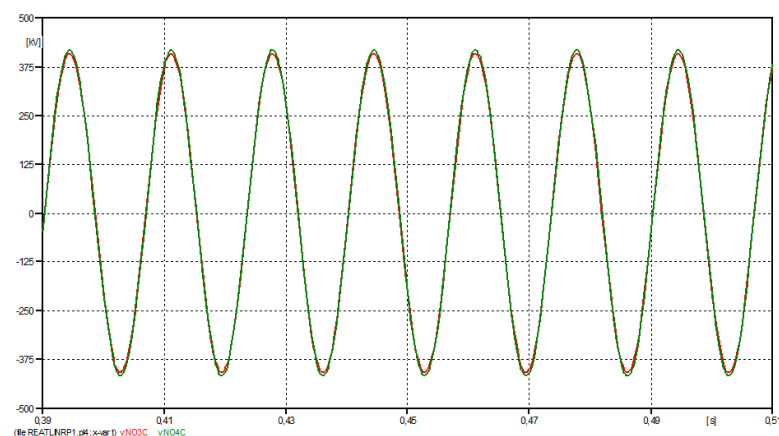
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 62 - Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase C | Trecho 1



Fonte: Autora via ATP Launcher

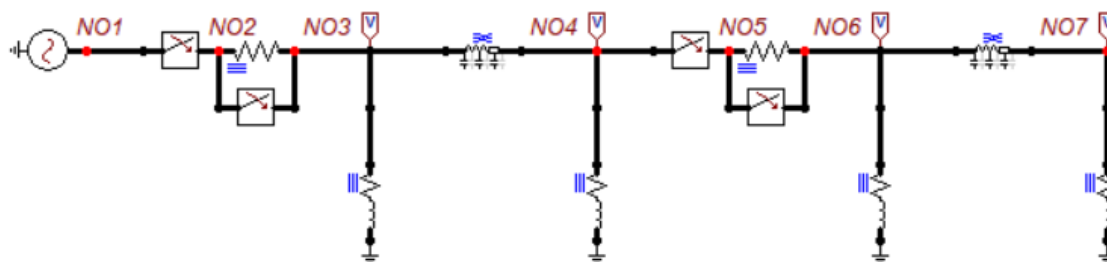
Gráfico 63 - Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase C | Trecho 1



Fonte: Autora via ATP Launcher

- Trecho 2

Figura 25 - Segundo Trecho da LT Compensada por Reator Linear



Fonte: Autora via ATPDraw

Fechamento do Disjuntor Principal 2:

$$t_{D2A} = 0,41254s$$

$$t_{D2B} = 0,41349s$$

$$t_{D2C} = 0,41368s$$

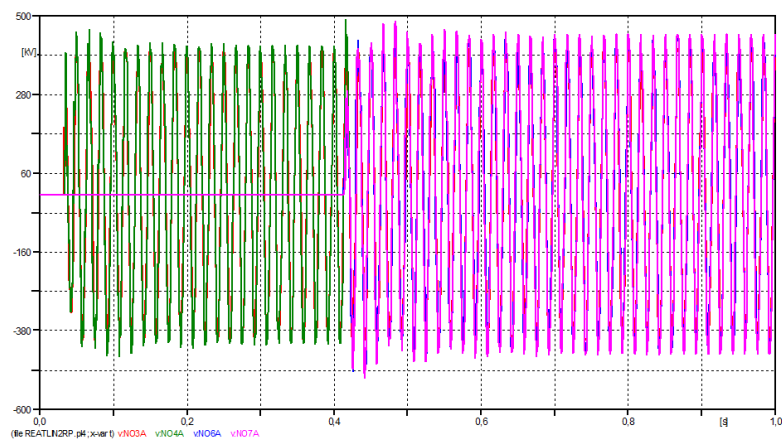
Fechamento do Disjuntor de Pré Inserção 2:

$$t_{DP2A} = 0,42254s$$

$$t_{DP2B} = 0,42349s$$

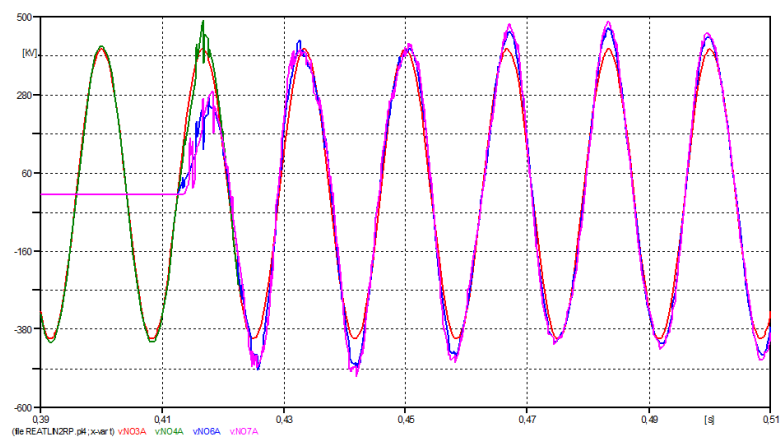
$$t_{DP2C} = 0,42368s$$

Gráfico 64 - Forma de Onda da Tensão na Fase A | Trecho 2



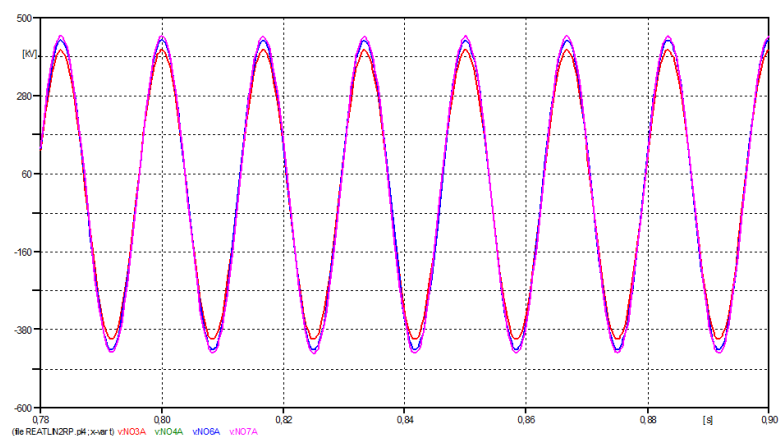
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 65 - Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase A | Trecho 2



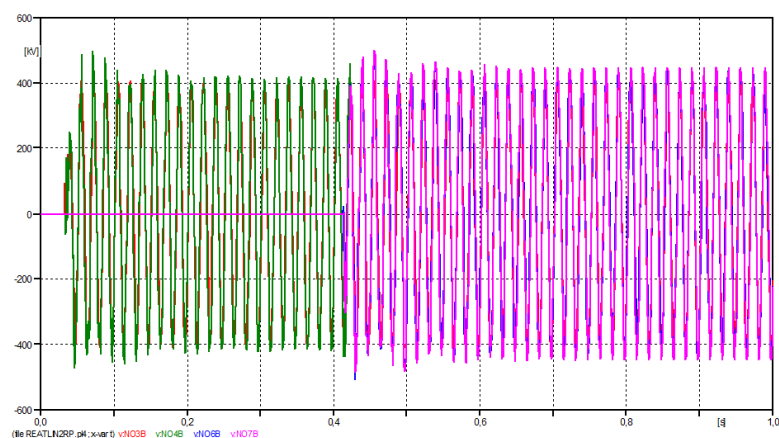
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 66 - Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase A | Trecho 2



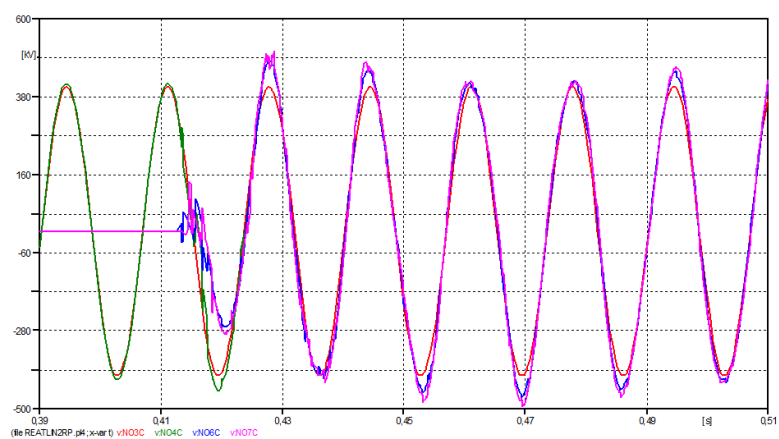
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 67 - Forma de Onda da Tensão na Fase B | Trecho 2



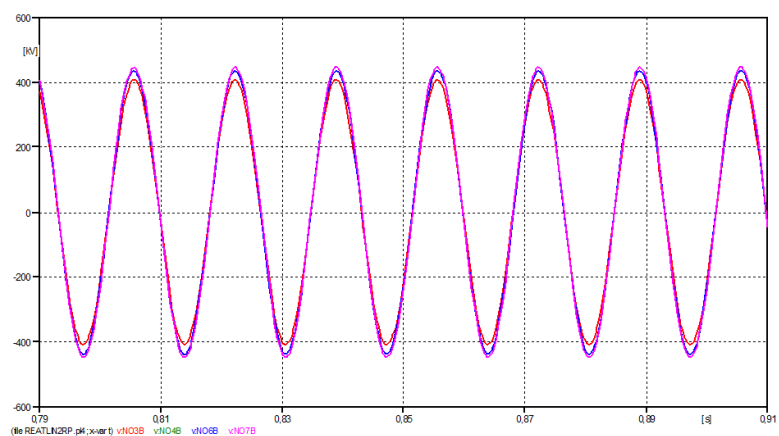
Fonte: Autor via ATP Launcher

Gráfico 68 - Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase B | Trecho 2



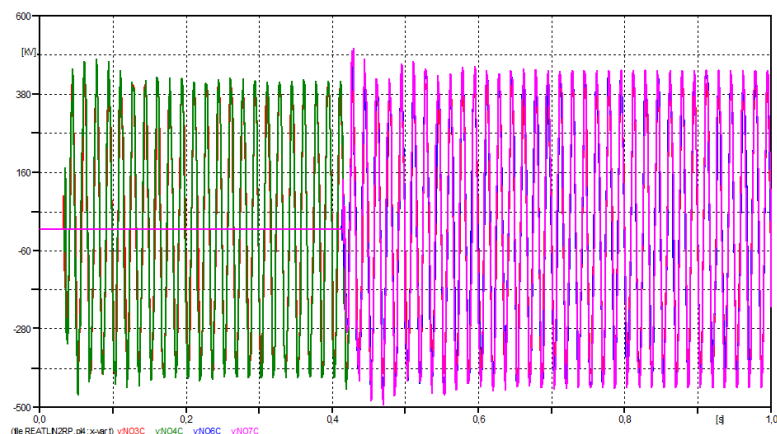
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 69 - Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase B | Trecho 2



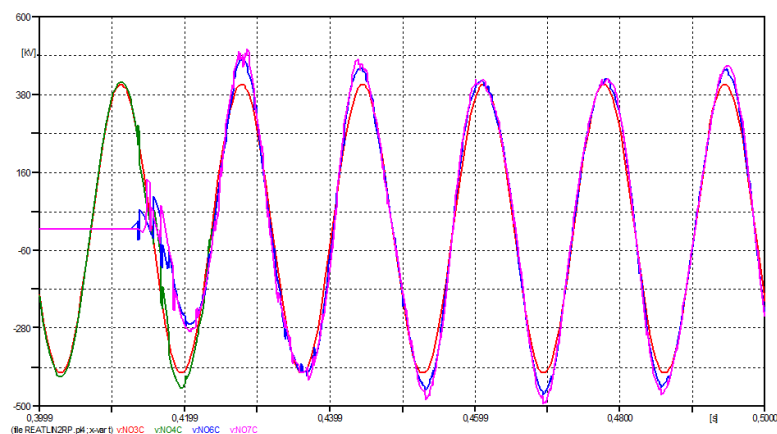
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 70 - Forma de Onda da Tensão na Fase C | Trecho 2



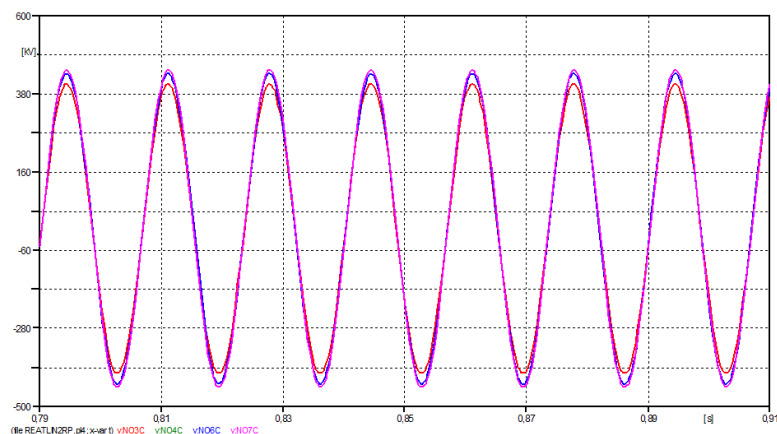
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 71 - Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase C | Trecho 2



Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 72 - Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase C | Trecho 2

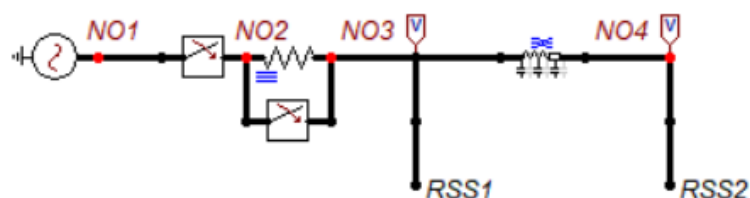


Fonte: Autora via ATP Launcher

7.2. Linha de Transmissão Compensada por Reator Série

- Trecho 1

Figura 26 - Primeiro Trecho da LT Compensada por Reator Naturalmente Saturado Série



Fonte: Autora via ATPDraw

Fechamento do Disjuntor Principal 1:

$$t_{D1_A} = 0,03333s$$

$$t_{D1_B} = 0,03425s$$

$$t_{D1_C} = 0,03447s$$

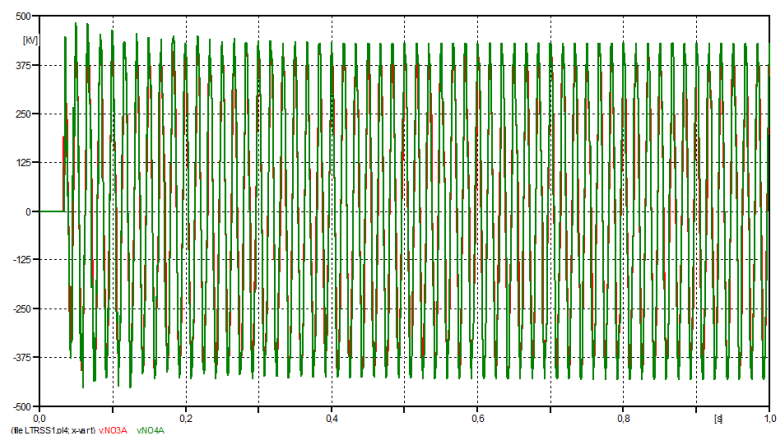
Fechamento do Disjuntor de Pré Inserção 1:

$$t_{DP1_A} = 0,04333s$$

$$t_{DP1_B} = 0,04425s$$

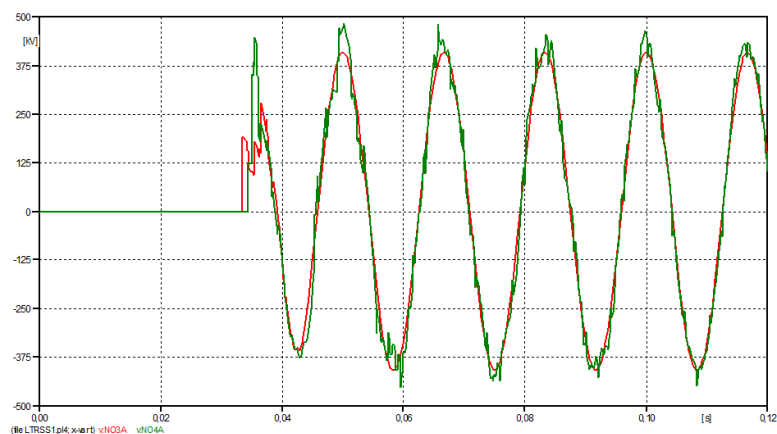
$$t_{DP1_C} = 0,04447s$$

Gráfico 73 - Forma de Onda da Tensão na Fase A | Trecho 1



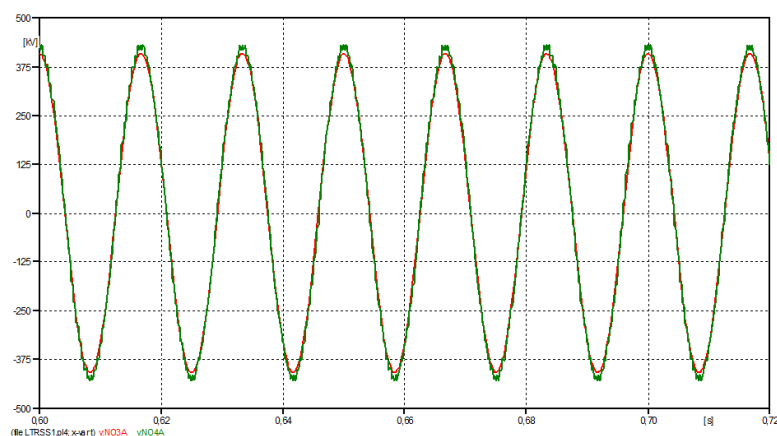
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 74 - Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase A | Trecho 1



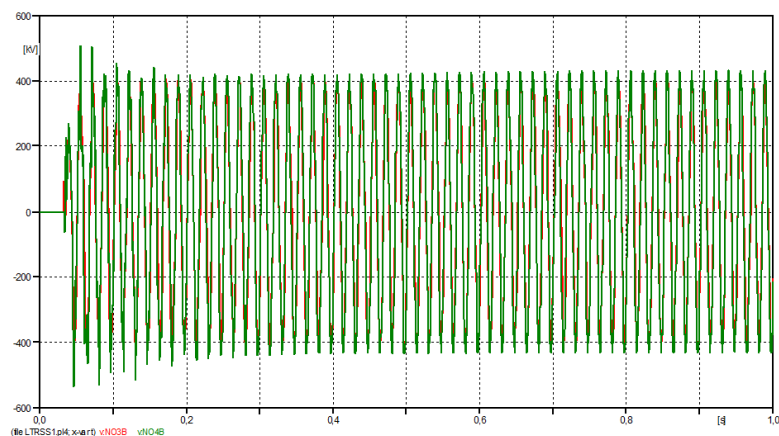
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 75 - Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase A | Trecho 1



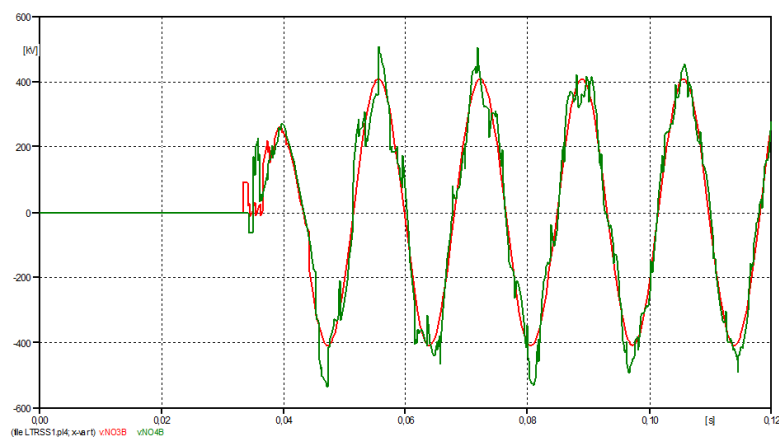
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 76 - Forma de Onda da Tensão na Fase B | Trecho 1



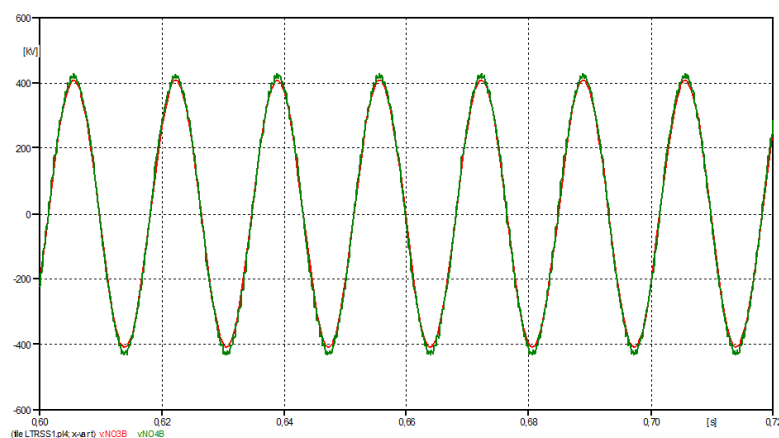
Fonte: Autor via ATP Launcher

Gráfico 77 - Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase B | Trecho 1



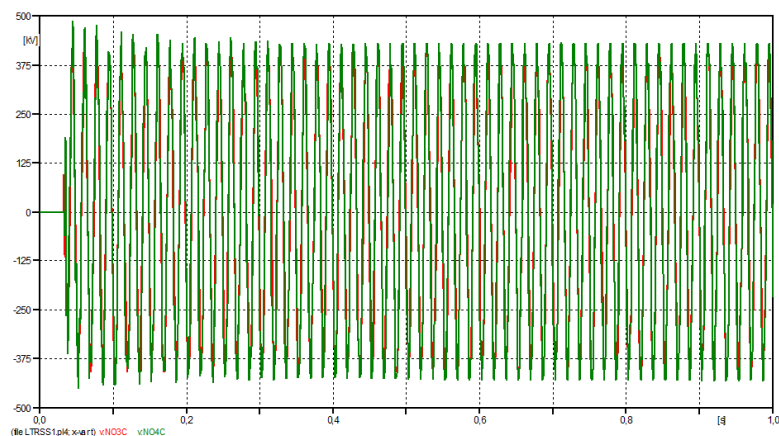
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 78 - Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase B | Trecho 1



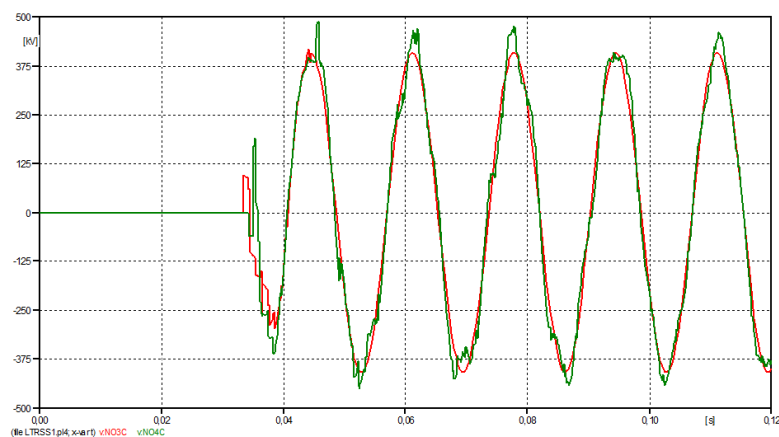
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 79 - Forma de Onda da Tensão na Fase C | Trecho 1



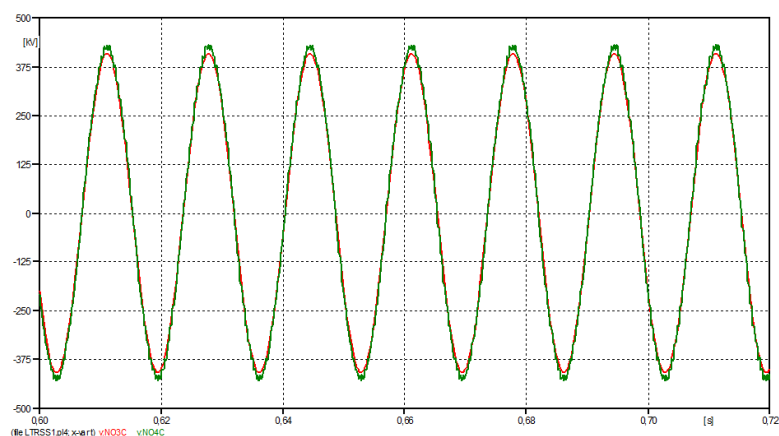
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 80 - Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase C | Trecho 1



Fonte: Autora via ATP Launcher

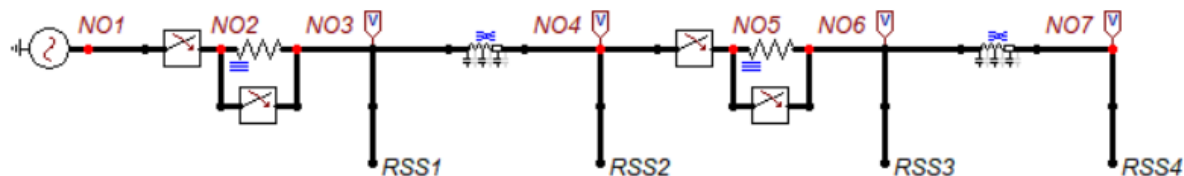
Gráfico 81 - Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase C | Trecho 1



Fonte: Autora via ATP Launcher

- Trecho 2

Figura 27 - Segundo Trecho da LT Compensada por Reator Naturalmente Saturado Série



Fonte: Autora via ATPDraw

Fechamento do Disjuntor Principal 2:

$$t_{D2_A} = 0,62919s$$

$$t_{D2_B} = 0,63014s$$

$$t_{D2_C} = 0,63033s$$

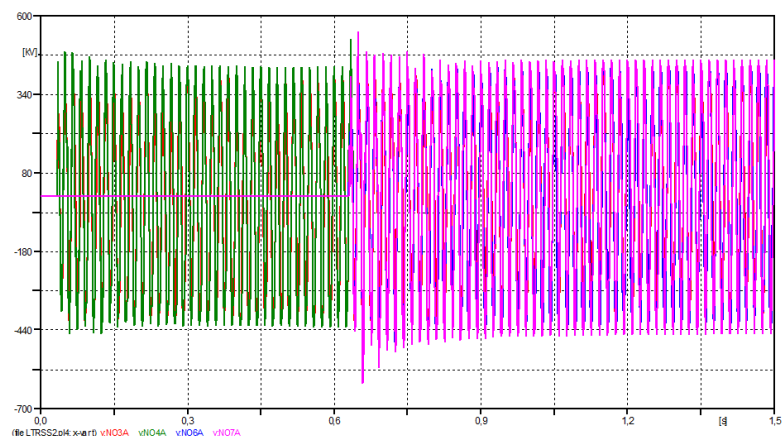
Fechamento do Disjuntor de Pré Inserção 2:

$$t_{DP2_A} = 0,63919s$$

$$t_{DP2_B} = 0,64014s$$

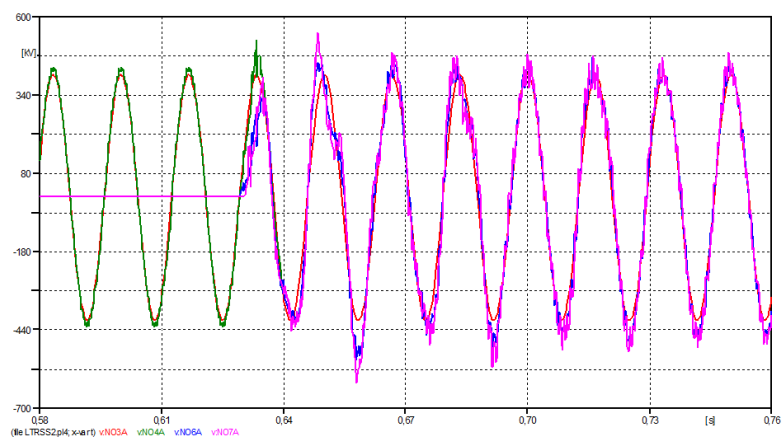
$$t_{DP2_C} = 0,64033s$$

Gráfico 82 - Forma de Onda da Tensão na Fase A | Trecho 2



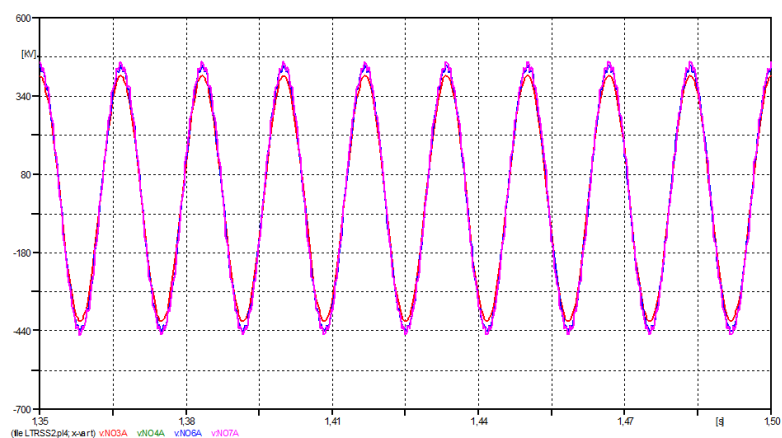
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 83 - Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase A | Trecho 2



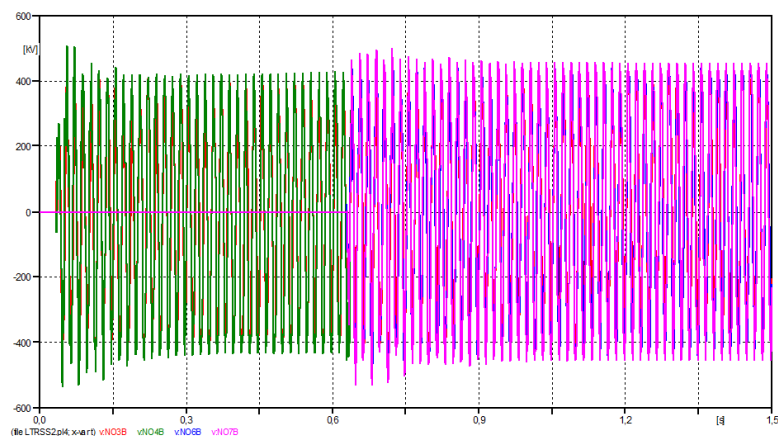
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 84 - Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase A | Trecho 2



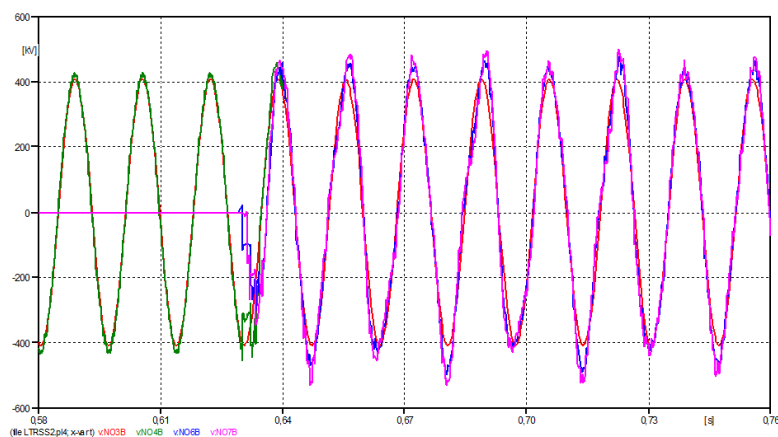
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 85 - Forma de Onda da Tensão na Fase B | Trecho 2



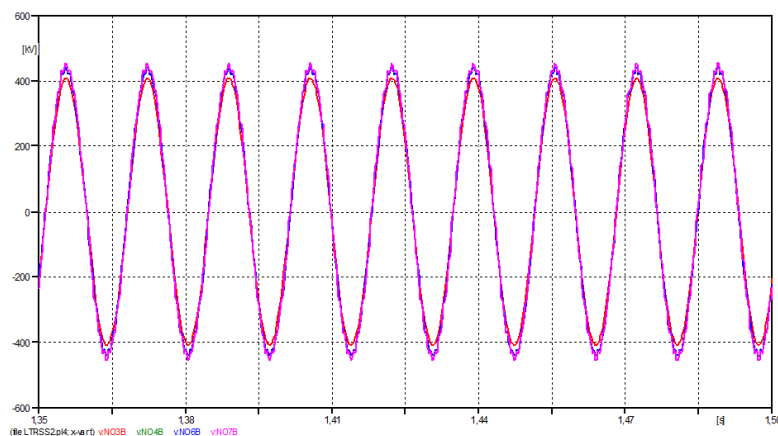
Fonte: Autor via ATP Launcher

Gráfico 86 - Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase B | Trecho 2



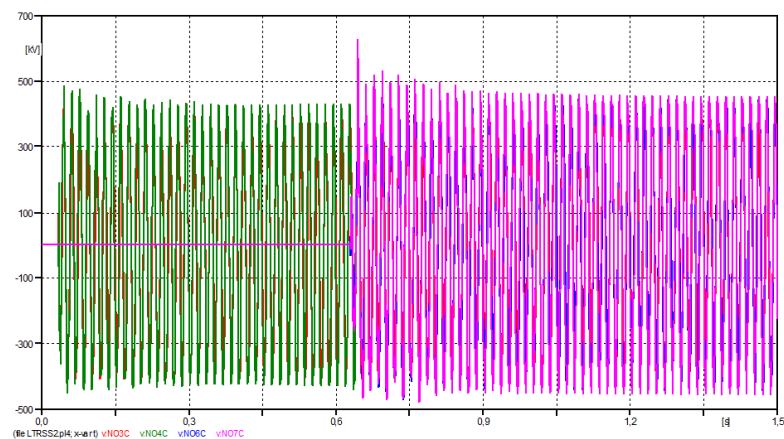
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 87 - Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase B | Trecho 2



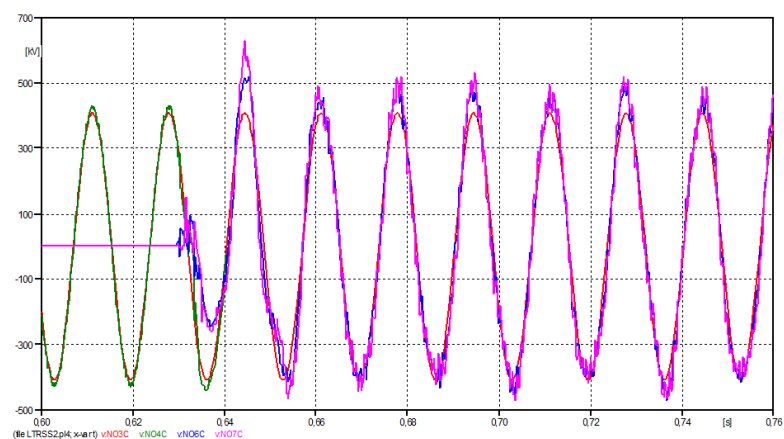
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 88 - Forma de Onda da Tensão na Fase C | Trecho 2



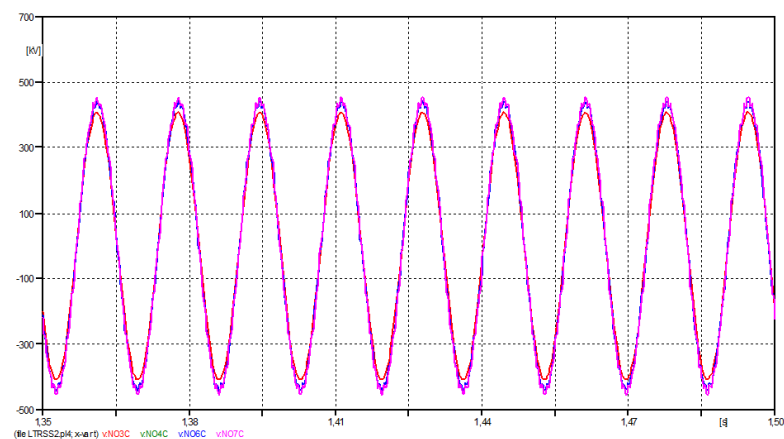
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 89 - Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase C | Trecho 2



Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 90 - Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase C | Trecho 2

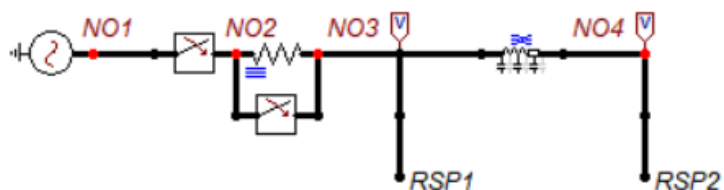


Fonte: Autora via ATP Launcher

7.3. Linha de Transmissão Compensada por Reator Paralelo GEC

- Trecho 1

Figura 28 - Primeiro Trecho da LT Compensada por Reator Naturalmente Saturado Paralelo



Fonte: Autora via ATPDraw

Fechamento do Disjuntor Principal 1:

$$t_{D1A} = 0,03333s$$

$$t_{D1B} = 0,03425s$$

$$t_{D1C} = 0,03447s$$

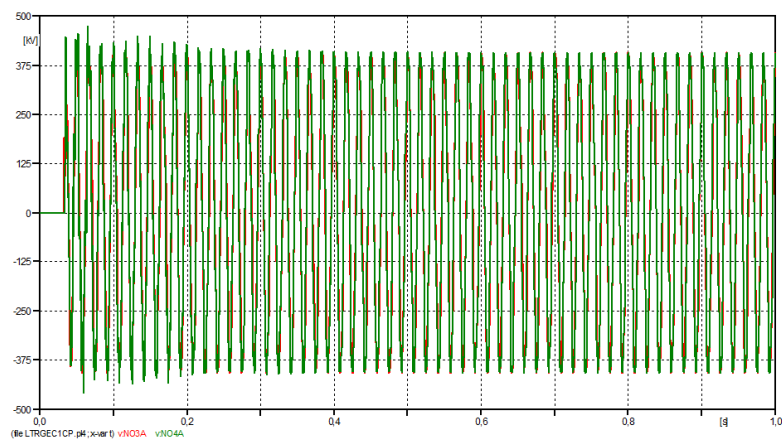
Fechamento do Disjuntor de Pré Inserção 1:

$$t_{DP1A} = 0,04333s$$

$$t_{DP1B} = 0,04425s$$

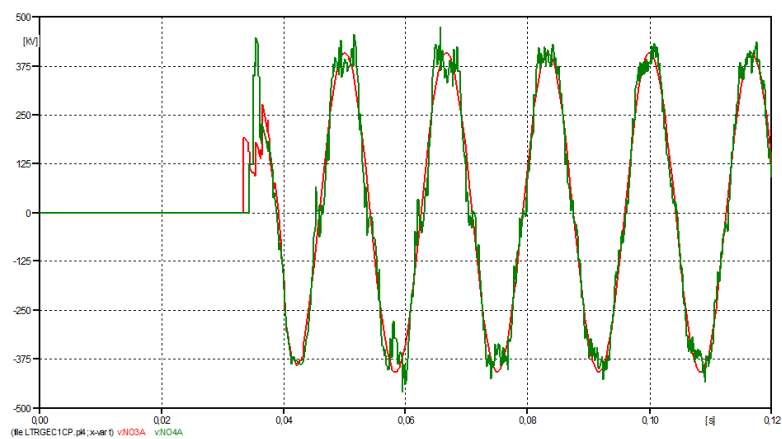
$$t_{DP1C} = 0,04447s$$

Gráfico 91 - Forma de Onda da Tensão na Fase A | Trecho 1



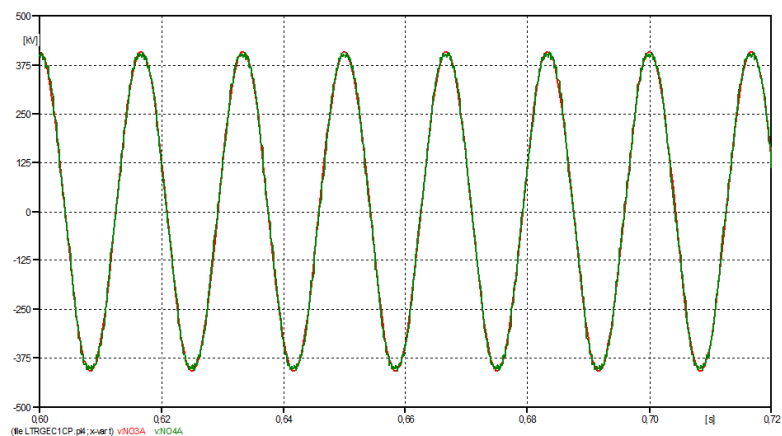
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 92 - Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase A | Trecho 1



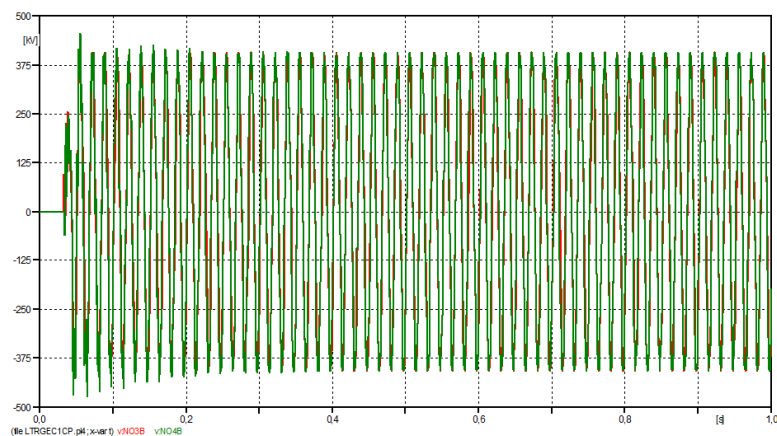
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 93 - Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase A | Trecho 1



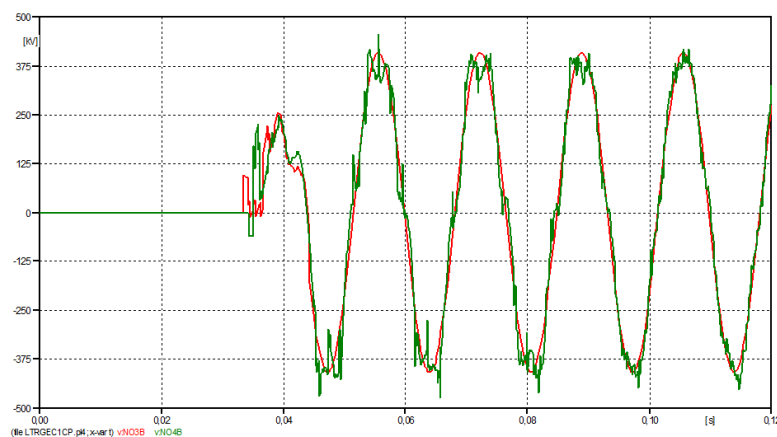
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 94 - Forma de Onda da Tensão na Fase B | Trecho 1



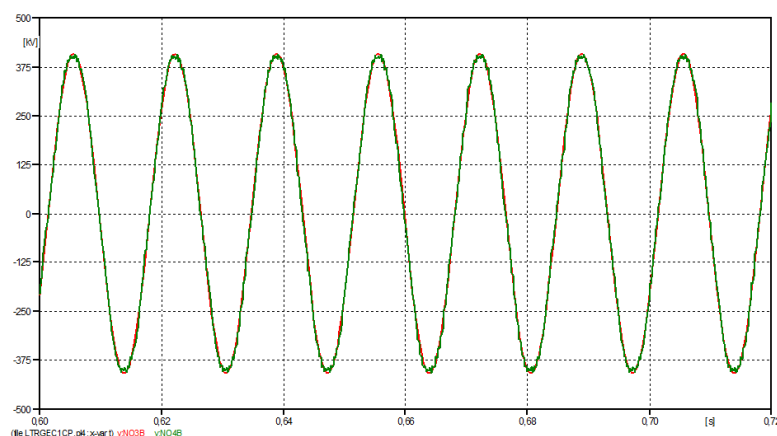
Fonte: Autor via ATP Launcher

Gráfico 95 - Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase B | Trecho 1



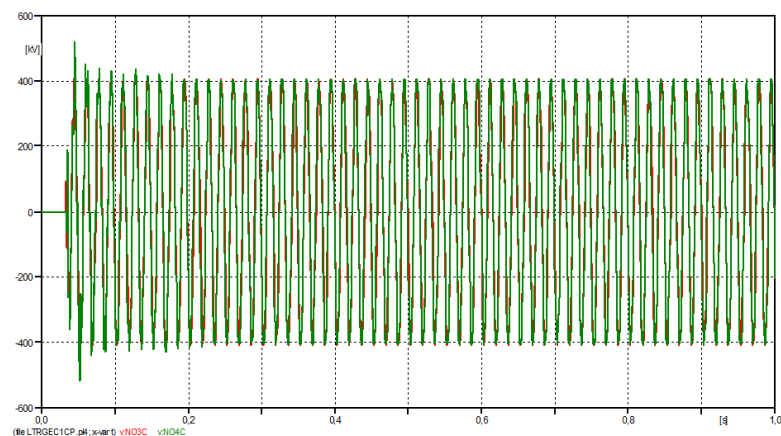
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 96 - Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase B | Trecho 1



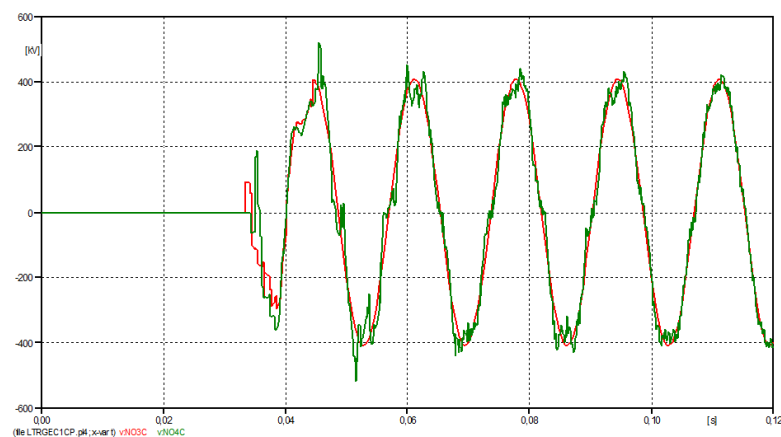
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 97 - Forma de Onda da Tensão na Fase C | Trecho 1



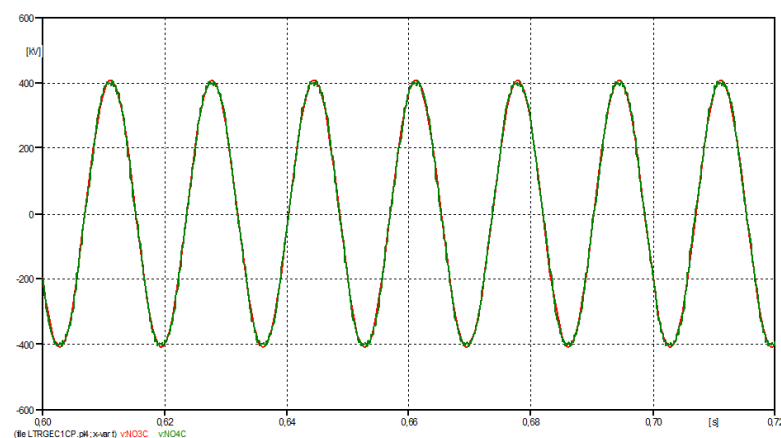
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 98 - Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase C | Trecho 1



Fonte: Autora via ATP Launcher

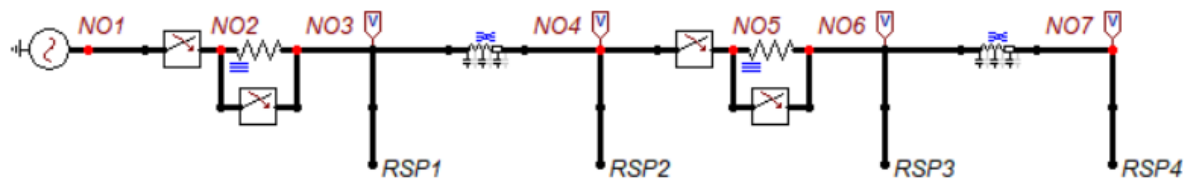
Gráfico 99 - Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase C | Trecho 1



Fonte: Autora via ATP Launcher

- Trecho 2

Figura 29 - Segundo Trecho da LT Compensada por Reator Naturalmente Saturado Paralelo



Fonte: Autora via ATPDraw

Fechamento do Disjuntor Principal 2:

$$t_{D2_A} = 0,62919s$$

$$t_{D2_B} = 0,63014s$$

$$t_{D2_C} = 0,63033s$$

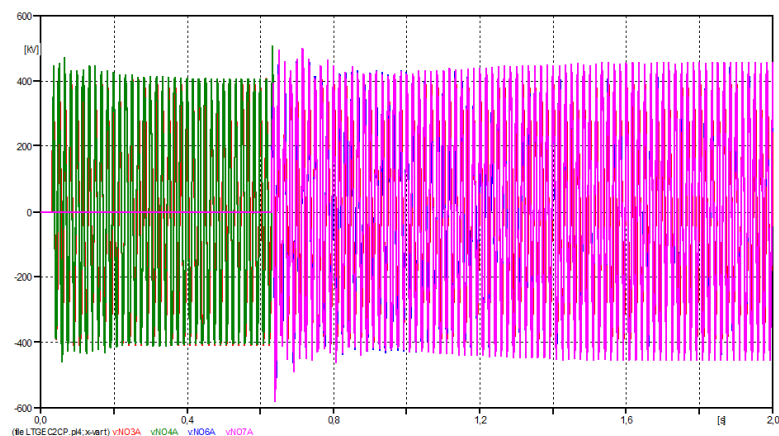
Fechamento do Disjuntor de Pré Inserção 2:

$$t_{DP2_A} = 0,63919s$$

$$t_{DP2_B} = 0,64014s$$

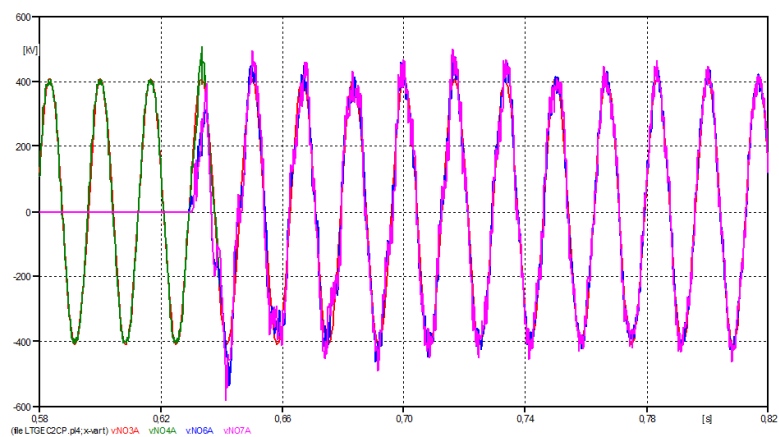
$$t_{DP2_C} = 0,64033s$$

Gráfico 100 - Forma de Onda da Tensão na Fase A | Trecho 2



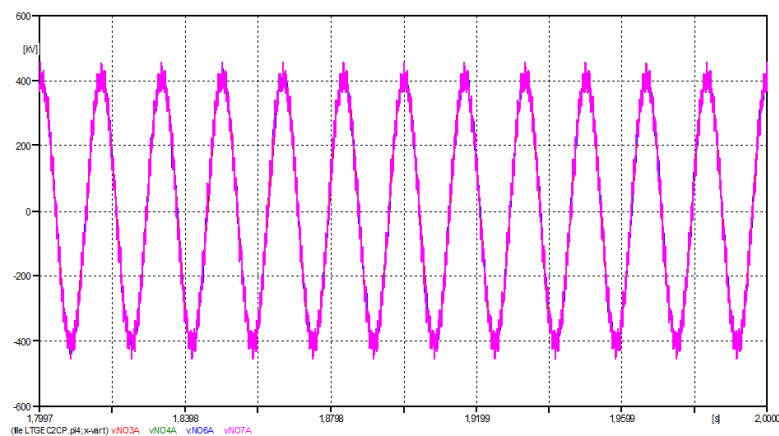
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 101 - Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase A | Trecho 2



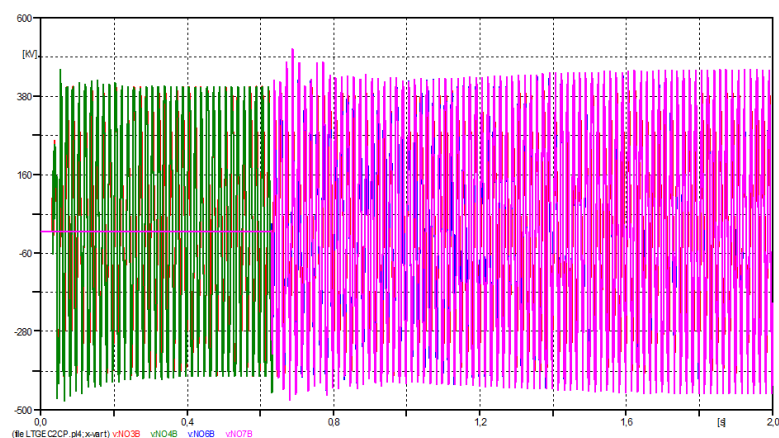
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 102 - Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase A | Trecho 2



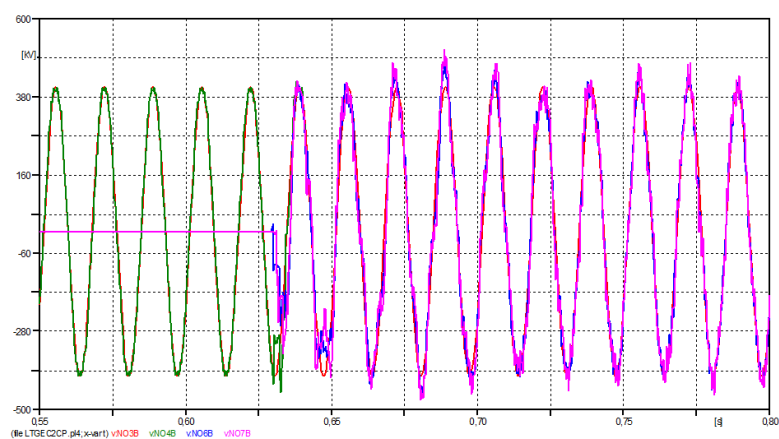
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 103 - Forma de Onda da Tensão na Fase B | Trecho 2



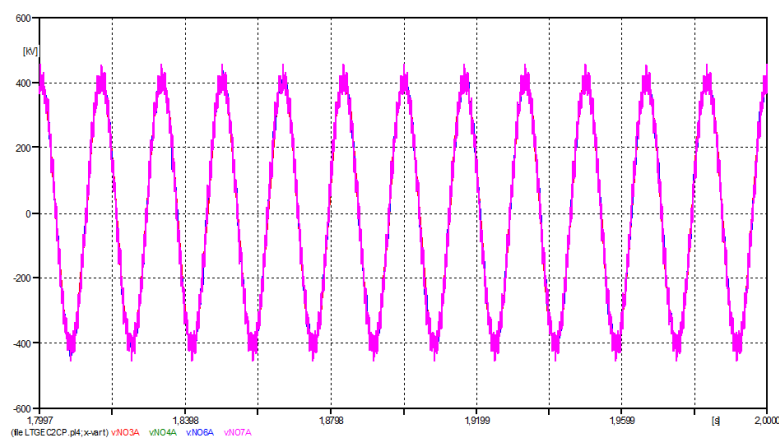
Fonte: Autor via ATP Launcher

Gráfico 104 - Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase B | Trecho 2



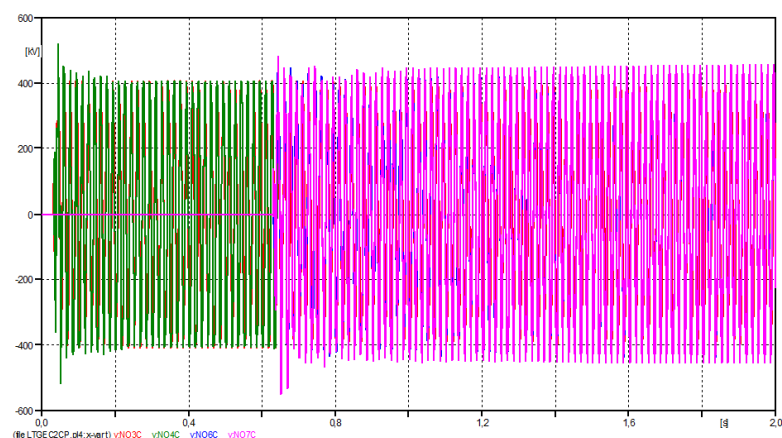
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 105 - Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase B | Trecho 2



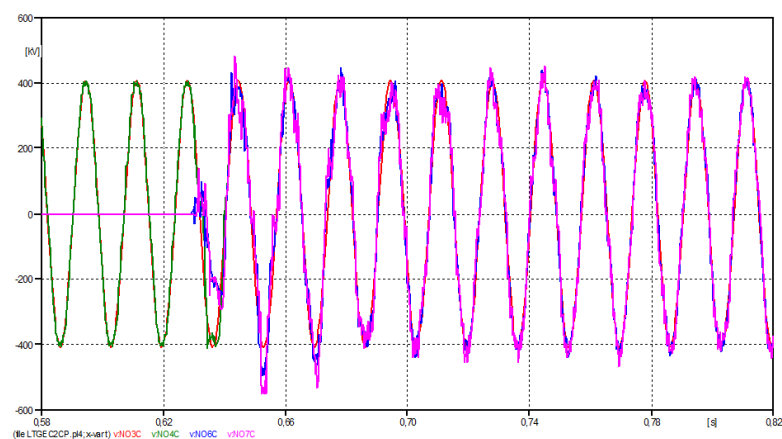
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 106 - Forma de Onda da Tensão na Fase C | Trecho 2



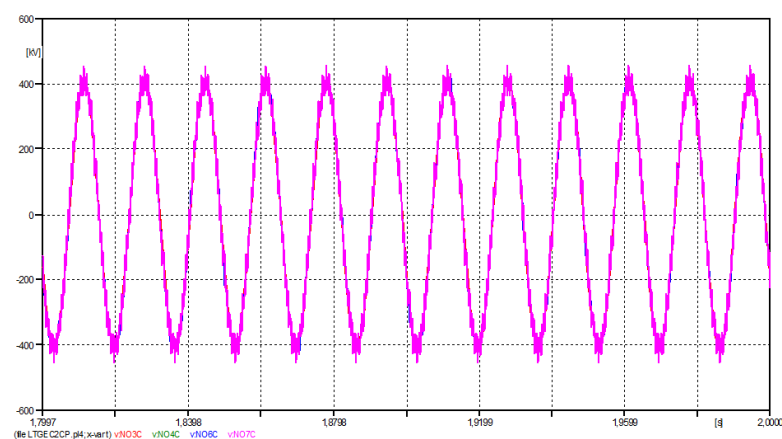
Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 107 - Forma de Onda da Tensão em Situação Transitória na Fase C | Trecho 2



Fonte: Autora via ATP Launcher

Gráfico 108 - Forma de Onda da Tensão em Regime Permanente na Fase C | Trecho 2



Fonte: Autora via ATP Launcher

7.4. Conclusão

Analisando as formas de onda da tensão obtidas com a simulação computacional para energização, das três configurações de LT, na presença de resistores de pré-inserção, é possível notar que, logo que se energizam as linhas de transmissão, os níveis de tensão, agora observados, atingem níveis bastante aceitáveis. Nota-se, portanto, a eficácia dos resistores de pré-inserção na mitigação de sobretensões de manobra em processos de energização de linhas de transmissão.

A onda senoidal pura, observada nos primeiros nós (NO3) das simulações, representam justamente a forma de onda gerada pela fonte de tensão. Para este caso, a presença momentânea dos resistores de pré-inserção, promovem leves distorções nas formas de onda observadas no início do primeiro trecho da LT. No momento é que o resistor de pré-inserção é curto-circuitado, não haverá mais nenhum elemento que provoque uma diferença de tensão entre a fonte e o início do primeiro trecho da linha de transmissão. Portanto, a forma de onda verificada neste ponto volta a se comportar exatamente igual à forma de onda gerada pela fonte de tensão.

Diferentemente da situação exposta no capítulo anterior, não foi possível notar uma participação direta dos reatores na redução de sobretensões transitórias. Este fato pode ser explicado justamente pela presença de equipamentos específicos para esta finalidade, os resistores de pré-inserção. Em contrapartida, os três reatores (linear, naturalmente saturado série e naturalmente saturado paralelo) apresentaram excelentes desempenhos, mantendo a regulação dos níveis de tensão dentro dos limites aceitáveis.

8. RESULTADOS

Este capítulo dedica-se à análise dos resultados numéricos (níveis de tensão em situação transitória e em regime permanente) obtidos através dos gráficos apresentados nos dois capítulos anteriores.

8.1 Configuração da LT Compensada por Reator Linear

8.1.1 Sem Resistor de Pré-Inserção

- Trecho 1

Tabela 1 - Tensões Máximas em Regime Transitório no Fechamento da Chave 1

	NO2		NO3	
	Tensão (V)	Instante (s)	Tensão (V)	Instante (s)
Fase A	4,0816E5	0,033388	1,123E6	0,035537
Fase B	4,0822E5	0,038921	1,0939E6	0,041411
Fase C	4,0821E5	0,044407	9,4398E5	0,045738

Fonte: Autora

Tabela 2 - Tensões Máximas em Regime Permanente após Fechamento da Chave 1

	Tensão NO2 (V)	Tensão NO3 (V)
Fase A	4,0823E5	4,1201E5
Fase B	4,0824E5	4,1371E5
Fase C	4,0823E5	4,1604E5

Fonte: Autora

$$t_A = 0,41669s \mid t_B = 0,42224s \mid t_C = 0,42775s$$

- Trecho 2

Tabela 3 - Tensões Máximas em Regime Transitório no Fechamento da Chave 2

	NO2		NO3	
	Tensão (V)	Instante (s)	Tensão (V)	Instante (s)
Fase A	4,0823E5	0,43331	5,5284E5	0,44868
Fase B	-4,0823E5	0,43053	-6,9366E5	0,44859
Fase C	-4,082E5	0,43607	-7,1765E5	0,43657
	NO4		NO5	
	Tensão (V)	Instante (s)	Tensão (V)	Instante (s)
Fase A	5,5284E5	0,44868	7,1033E5	0,44959
Fase B	-6,9366E5	0,44859	9,1897E5	0,43826
Fase C	-7,1765E5	0,43657	-7,6599E5	0,45179

Fonte: Autora

Tabela 4 - Tensões Máximas em Regime Permanente após Fechamento da Chave 2

	Tensão NO2 (V)	Tensão NO3 (V)	Tensão NO4 (V)	Tensão NO5 (V)
Fase A	4,0825E5	4,3597E5	4,3597E5	4,4496E5
Fase B	4,0825E5	4,4082E5	4,4082E5	4,5443E5
Fase C	4,0823E5	4,3522E5	4,3522E5	4,4466E5

Fonte: Autora

$$t_A = 0,81667s \mid t_B = 0,82223s \mid t_C = 0,82775s$$

8.1.2 Com Resistor de Pré-Inserção

- Trecho 1

Tabela 5 - Tensões Máximas em Regime Transitório no Fechamento da Chave 1

	NO3		NO4	
	Tensão (V)	Instante (s)	Tensão (V)	Instante (s)
Fase A	4,0823E5	0,049972	4,5859E5	0,066796
Fase B	-4,0824E5	0,047238	4,927E5	0,072017
Fase C	-4,0824E5	0,05279	4,7865E5	0,078066

Fonte: Autora

Tabela 6 - Tensões Máximas em Regime Permanente após Fechamento da Chave 1

	Tensão NO3 (V)	Tensão NO4 (V)
Fase A	4,0823E5	4,1693E5
Fase B	4,0824E5	4,1742E5
Fase C	4,0824E5	4,1726E5

Fonte: Autora

$$t_A = 0,40003s \mid t_B = 0,42224s \mid t_C = 0,42779s$$

- Trecho 2

Tabela 7 - Tensões Máximas em Regime Transitório no Fechamento da Chave 2

	NO3		NO4	
	Tensão (V)	Instante (s)	Tensão (V)	Instante (s)
Fase A	4,0824E5	0,41668	-4,9255E5	0,4253
Fase B	-4,0823E5	0,41387	-5,07001E5	0,42961
Fase C	-4,0823E5	0,41942	4,812E5	0,42804
	NO6		NO7	
	Tensão (V)	Instante (s)	Tensão (V)	Instante (s)
Fase A	-4,9255E5	0,4258	-5,1288E5	0,44188
Fase B	-5,0701E5	0,42961	5,0065E5	0,45613
Fase C	4,812E5	0,42804	5,0641E5	0,42862

Fonte: Autora

Tabela 8 - Tensões Máximas em Regime Permanente após Fechamento da Chave 2

	Tensão NO3 (V)	Tensão NO4 (V)	Tensão NO6 (V)	Tensão NO7 (V)
Fase A	4,0823E5	4,3772E5	4,3772E5	4,478E5
Fase B	4,0823E5	4,3609E5	4,3609E5	4,456E5
Fase C	4,0823E5	4,3743E5	4,3743E5	4,4725E5

Fonte: Autora

$$t_A = 0,799971s \mid t_B = 0,80558s \mid t_C = 0,81113s$$

8.2 Configuração da LT Compensada por Reator Naturalmente Saturado Série

8.2.1 Sem Resistor de Pré-Inserção

- Trecho 1

Tabela 9 - Tensões Máximas em Regime Transitório no Fechamento da Chave 1

	NO2		NO3	
	Tensão (V)	Instante (s)	Tensão (V)	Instante (s)
Fase A	4,081E5	0,033405	1,2117E6	0,035547
Fase B	4,0823E5	0,038913	9,399E5	0,041412
Fase C	-4,0825E5	0,036108	-1,2006E6	0,051816

Fonte: Autora

Tabela 10 - Tensões Máximas em Regime Permanente após Fechamento da Chave 1

	Tensão NO2 (V)	Tensão NO3 (V)
Fase A	4,0823E5	4,3425E5
Fase B	4,0823E5	4,1468E5
Fase C	4,0824E5	4,1967E5

Fonte: Autora

$$t_A = 0,61669s \mid t_B = 0,6222s \mid t_C = 0,62776s$$

- Trecho 2

Tabela 11 - Tensões Máximas em Regime Transitório no Fechamento da Chave 2

	NO2		NO3	
	Tensão (V)	Instante (s)	Tensão (V)	Instante (s)
Fase A	4,0824E5	0,63332	6,4693E5	0,64857
Fase B	-4,082E5	0,63051	7,7974E5	0,63658
Fase C	-4,0813E5	0,63617	-6,6637E5	0,63663
	NO4		NO5	
	Tensão (V)	Instante (s)	Tensão (V)	Instante (s)
Fase A	6,4693E5	0,64857	6,5698E5	0,63342
Fase B	7,7974E5	0,63658	-1,0764E6	0,6476
Fase C	-6,6637E5	0,63663	-7,8968E5	0,68437

Fonte: Autora

Tabela 12 - Tensões Máximas em Regime Permanente após Fechamento da Chave 2

	Tensão NO2 (V)	Tensão NO3 (V)	Tensão NO4 (V)	Tensão NO5 (V)
Fase A	4,0824E5	4,4097E5	4,4097E5	4,4068E5
Fase B	4,0824E5	4,3078E5	4,3078E5	4,3787E5
Fase C	4,0824E5	4,3489E5	4,3489E5	4,4841E5

Fonte: Autora

$$t_A = 1,3666s \mid t_B = 1,3722s \mid t_C = 1,3778s$$

8.2.2 Com Resistor de Pré-Inserção

- Trecho 1

Tabela 13 - Tensões Máximas em Regime Transitório no Fechamento da Chave 1

	NO3		NO4	
	Tensão (V)	Instante (s)	Tensão (V)	Instante (s)
Fase A	4,0824E5	0,04998	4,8202E5	0,050235
Fase B	-4,0825E5	0,047226	-5,3582E5	0,047226
Fase C	4,1572E5	0,044064	4,8625E5	0,045747

Fonte: Autora

Tabela 14 - Tensões Máximas em Regime Permanente após Fechamento da Chave 1

	Tensão NO3 (V)	Tensão NO4 (V)
Fase A	4,0823E5	4,3118E5
Fase B	4,0823E5	4,2841E5
Fase C	4,0824E5	4,3226E5

Fonte: Autora

$$t_A = 0,61664s \mid t_B = 0,6222s \mid t_C = 0,62776s$$

- Trecho 2

Tabela 15 - Tensões Máximas em Regime Transitório no Fechamento da Chave 2

	NO3		NO4	
	Tensão (V)	Instante (s)	Tensão (V)	Instante (s)
Fase A	4,0824E5	0,63332	-5,386E5	0,65795
Fase B	-4,0815E5	0,63061	-4,97E5	0,68019
Fase C	-4,0824E5	0,63612	5,2028E5	0,6453
	NO6		NO7	
	Tensão (V)	Instante (s)	Tensão (V)	Instante (s)
Fase A	-5,386E5	0,65795	-6,1332E5	0,65795
Fase B	-4,97E5	0,68019	-5,2916E5	0,64688
Fase C	5,2028E5	0,6453	6,3049E5	0,64433

Fonte: Autora

Tabela 16 - Tensões Máximas em Regime Permanente após Fechamento da Chave 2

	Tensão NO3 (V)	Tensão NO4 (V)	Tensão NO6 (V)	Tensão NO7 (V)
Fase A	4,0822E5	4,4083E5	4,4083E5	4,5195E5
Fase B	4,0821E5	4,3956E5	4,3956E5	4,5418E5
Fase C	4,0824E5	4,4079E5	4,4079E5	4,5426E5

Fonte: Autora

$$t_A = 1,3667s \mid t_B = 1,3723s \mid t_C = 1,3778s$$

8.3 Configuração da LT Compensada por Reator Naturalmente Saturado Paralelo

8.3.1 Sem Resistor de Pré-Inserção

- Trecho 1

Tabela 17 - Tensões Máximas em Regime Transitório no Fechamento da Chave 1

	NO2		NO3	
	Tensão (V)	Instante (s)	Tensão (V)	Instante (s)
Fase A	4,081E5	0,033405	1,2113E6	0,035547
Fase B	4,0823E5	0,038913	9,9763E5	0,055131
Fase C	-4,0825E5	0,036108	9,0456E5	0,041667

Fonte: Autora

Tabela 18 - Tensões Máximas em Regime Permanente após Fechamento da Chave 1

	Tensão NO2 (V)	Tensão NO3 (V)
Fase A	4,0823E5	4,0571E5
Fase B	4,0823E5	3,9743E5
Fase C	4,0824E5	3,9211E5

Fonte: Autora

$$t_A = 0,61669s \mid t_B = 0,6222s \mid t_C = 0,62776s$$

- Trecho 2

Tabela 19 - Tensões Máximas em Regime Transitório no Fechamento da Chave 2

	NO2		NO3	
	Tensão (V)	Instante (s)	Tensão (V)	Instante (s)
Fase A	4,0824E5	0,63332	5,7192E5	0,63332
Fase B	-4,082E5	0,63051	6,7588E5	0,65254
Fase C	-4,082E5	0,6307	-6,5011E5	0,63653
	NO4		NO5	
	Tensão (V)	Instante (s)	Tensão (V)	Instante (s)
Fase A	5,7192E5	0,63332	-7,4423E5	0,6427
Fase B	6,7588E5	0,65254	7,984E5	0,63546
Fase C	-6,5011E5	0,63653	-7,2232E5	0,65153

Fonte: Autora

Tabela 20 - Tensões Máximas em Regime Permanente após Fechamento da Chave 2

	Tensão NO2 (V)	Tensão NO3 (V)	Tensão NO4 (V)	Tensão NO5 (V)
Fase A	4,0825E5	3,9152E5	3,9152E5	3,8028E5
Fase B	4,0819E5	3,9052E5	3,9052E5	4,3682E5
Fase C	4,082E5	3,9528E5	3,9528E5	4,048E5

Fonte: Autora

$$t_A = 1,8167s \mid t_B = 1,8222s \mid t_C = 1,8277s$$

8.3.2 Com Resistor de Pré-Inserção

- Trecho 1

Tabela 21 - Tensões Máximas em Regime Transitório no Fechamento da Chave 1

	NO3		NO4	
	Tensão (V)	Instante (s)	Tensão (V)	Instante (s)
Fase A	4,0824E5	0,04998	4,7263E5	0,065637
Fase B	-4,0825E5	0,047226	-4,7457E5	0,065637
Fase C	-4,0825E5	0,052785	5,2091E5	0,045492

Fonte: Autora

Tabela 22 - Tensões Máximas em Regime Permanente após Fechamento da Chave 1

	Tensão NO3 (V)	Tensão NO4 (V)
Fase A	4,0823E5	4,0049E5
Fase B	4,0823E5	4,0093E5
Fase C	4,0824E5	4,0075E5

Fonte: Autora

$$t_A = 0,61664s \mid t_B = 0,6222s \mid t_C = 0,62776s$$

- Trecho 2

Tabela 23 - Tensões Máximas em Regime Transitório no Fechamento da Chave 2

	NO3		NO4	
	Tensão (V)	Instante (S)	Tensão (V)	Instante (s)
Fase A	4,0821E5	0,63337	-5,3435E5	0,6425
Fase B	4,082E5	0,63893	4,734E5	0,68865
Fase C	4,082E5	0,64449	-4,9655E5	0,65244
	NO6		NO7	
	Tensão (V)	Instante (s)	Tensão (V)	Instante (s)
Fase A	-5,3435E5	0,6425	-5,3654E5	0,64148
Fase B	4,734E5	0,68865	5,1428E5	0,68845
Fase C	-4,9655E5	0,65244	-5,4688E5	0,65295

Fonte: Autora

Tabela 24 - Tensões Máximas em Regime Permanente após Fechamento da Chave 2

	Tensão NO3 (V)	Tensão NO4 (V)	Tensão NO6 (V)	Tensão NO7 (V)
Fase A	4,0825E5	4,3354E5	4,3354E5	4,534E5
Fase B	4,0825E5	4,3559E5	4,3559E5	4,5059E5
Fase C	4,082E5	4,4372E5	4,4372E5	4,5538E5

Fonte: Autora

$$t_A = 1,8167s \mid t_B = 1,8222s \mid t_C = 1,8277s$$

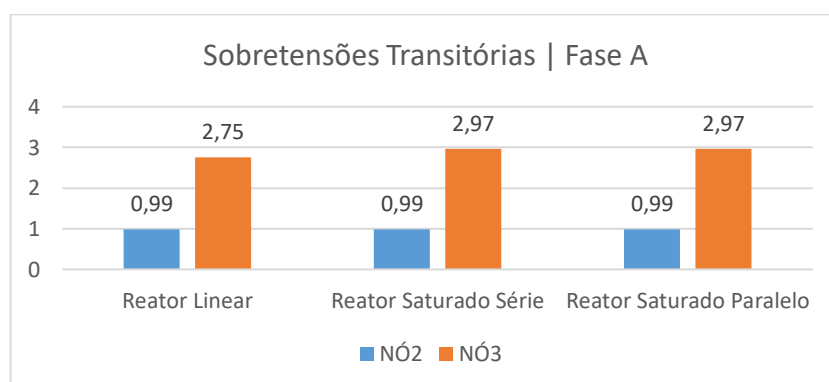
9. ANÁLISE COMPARATIVA

No presente capítulo serão realizadas as análises comparativas dos níveis de tensão (em situação transitória e em regime permanente) apresentados no capítulo anterior. O objetivo é verificar se as três configurações da linha de transmissão experimental (LT compensada por reator linear, LT compensada por reator naturalmente saturado série e LT compensada por reator naturalmente saturado paralelo) atingem níveis de tensão aceitáveis pela ANEEL e ONS.

9.1 Linha de Transmissão sem Resistor de Pré-Inserção

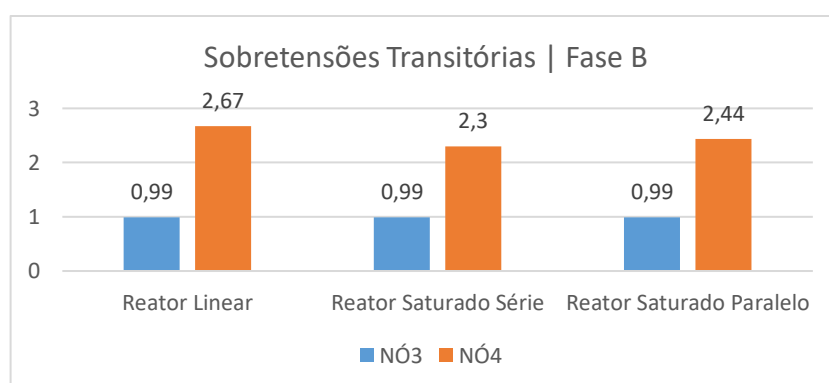
- Trecho 1

Gráfico 109 - Análise Comparativa das Sobretensões Transitórias Fase A | Trecho 1



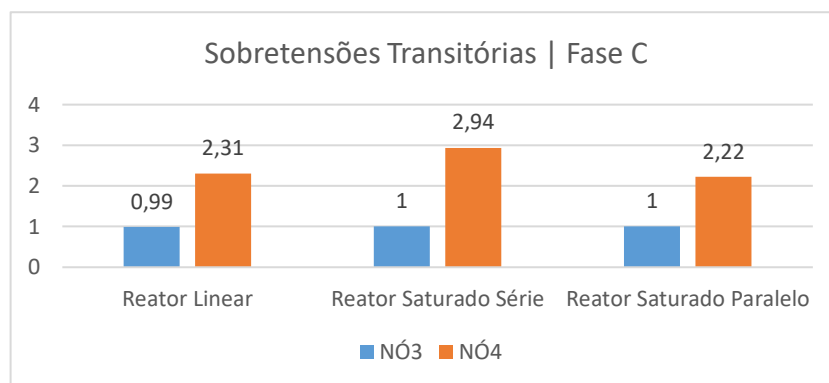
Fonte: Autora

Gráfico 110 - Análise Comparativa das Sobretensões Transitórias Fase B | Trecho 1



Fonte: Autora

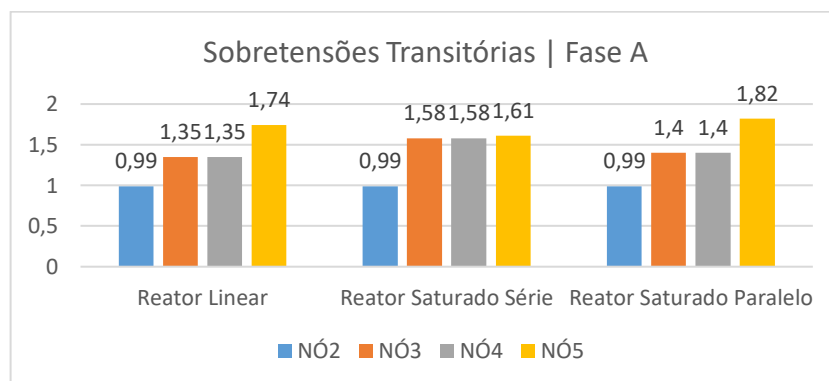
Gráfico 111 - Análise Comparativa das Sobreensões Transitórias Fase C | Trecho 1



Fonte: Autora

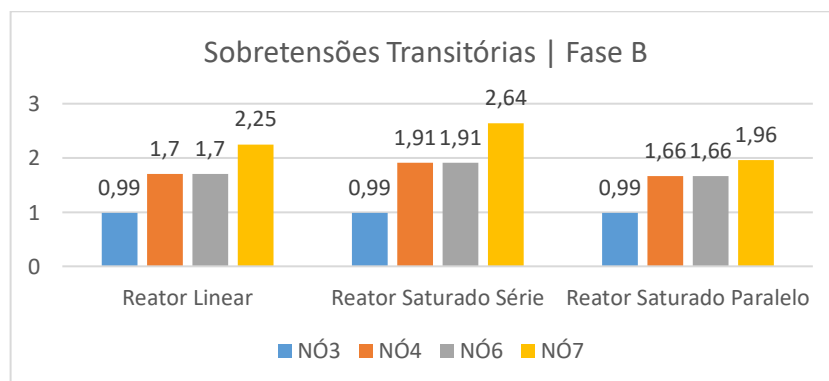
- Trecho 2

Gráfico 112 - Análise Comparativa das Sobreensões Transitórias Fase A | Trecho 2



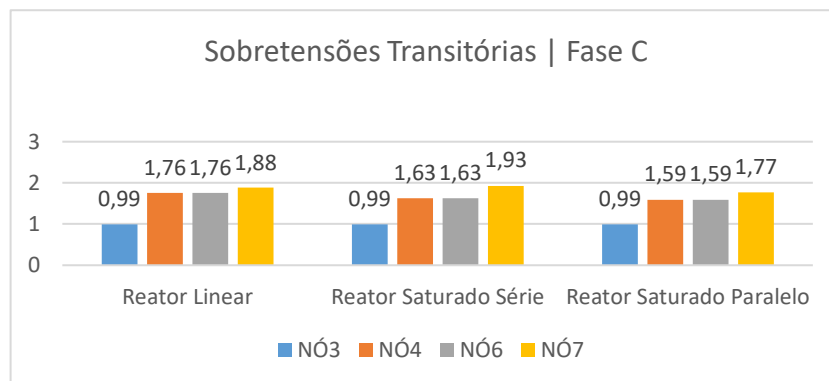
Fonte: Autora

Gráfico 113 - Análise Comparativa das Sobreensões Transitórias Fase B | Trecho 2



Fonte: Autora

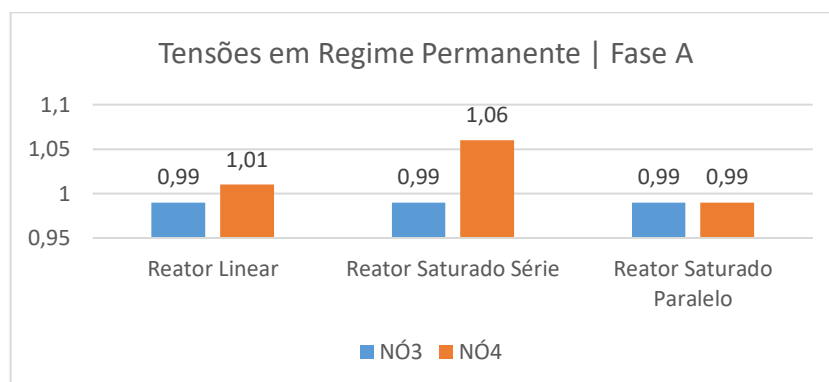
Gráfico 114 - Análise Comparativa das Sobretensões Transitórias Fase C | Trecho 2



Fonte: Autora

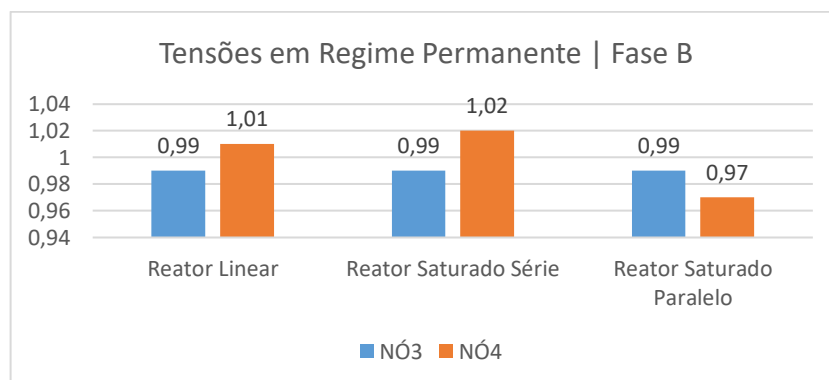
- Trecho 1

Gráfico 115 - Análise Comparativa das Tensões em Regime Permanente Fase A | Trecho 1



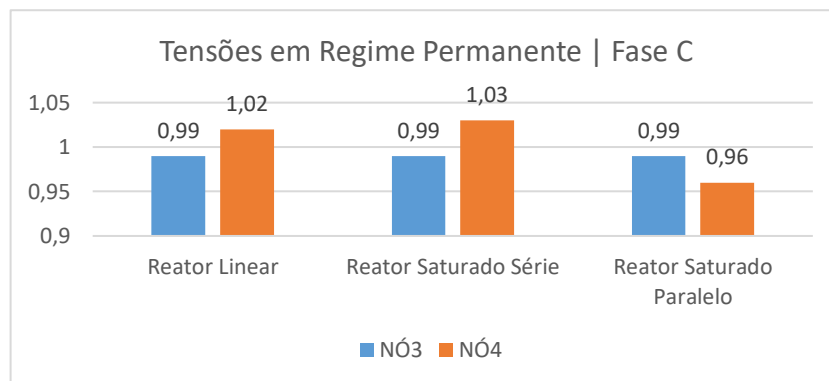
Fonte: Autora

Gráfico 116 - Análise Comparativa das Tensões em Regime Permanente Fase B | Trecho 1



Fonte: Autora

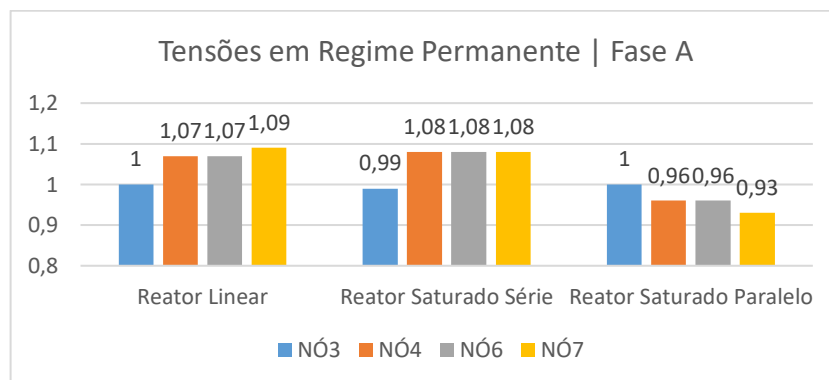
Gráfico 117 - Análise Comparativa das Tensões em Regime Permanente Fase C | Trecho 1



Fonte: Autora

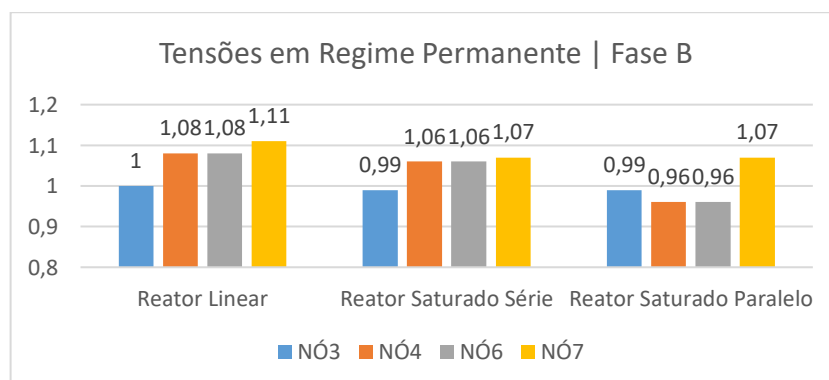
- Trecho 2

Gráfico 118 - Análise Comparativa das Tensões em Regime Permanente Fase A | Trecho 2



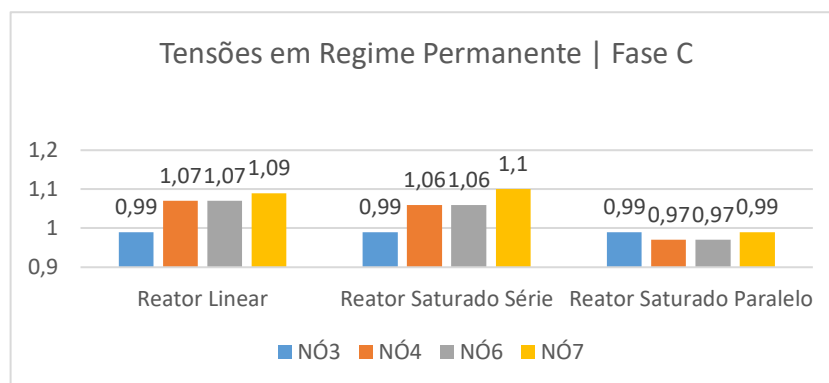
Fonte: Autora

Gráfico 119 - Análise Comparativa das Tensões em Regime Permanente Fase B | Trecho 2



Fonte: Autora

Gráfico 120 - Análise Comparativa das Tensões em Regime Permanente Fase C - Trecho 2

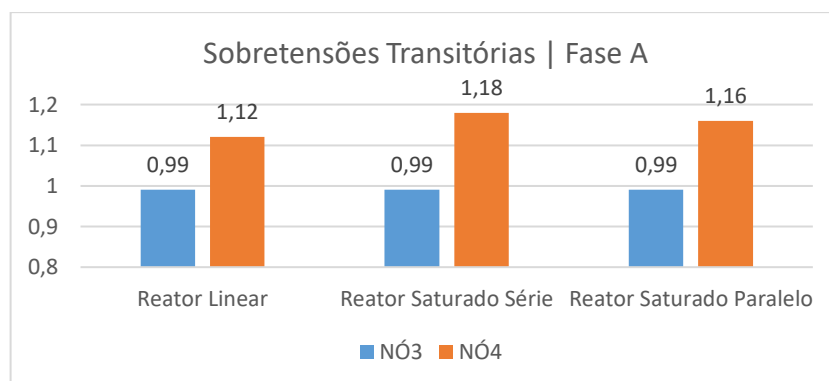


Fonte: Autora

9.2 Linha de Transmissão com Resistor de Pré-Inserção

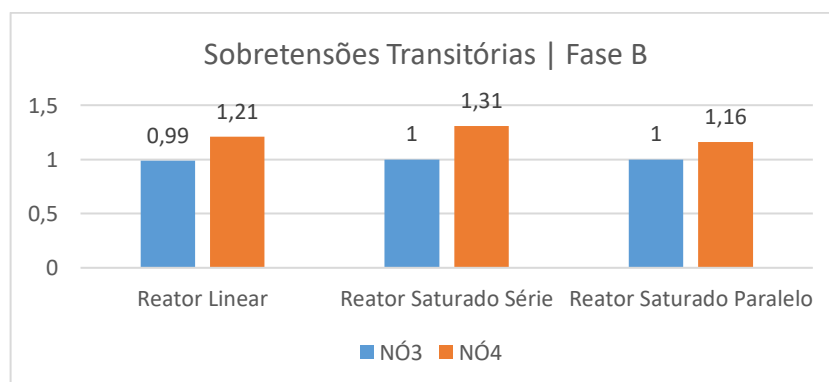
- Trecho 1

Gráfico 121 - Análise Comparativa das Sobretensões Transitórias Fase A | Trecho 1



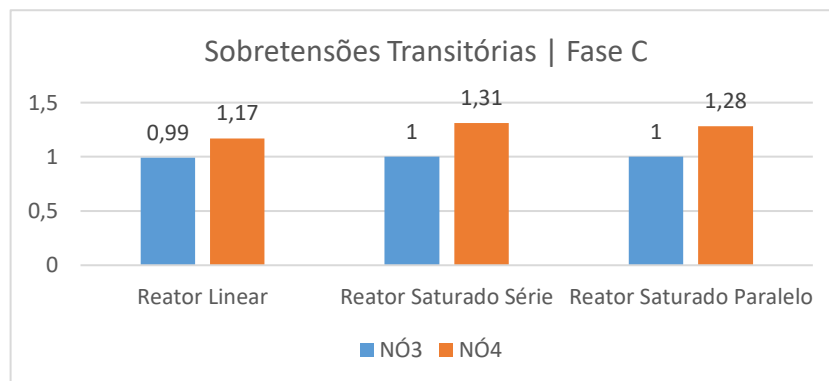
Fonte: Autora

Gráfico 122 - Análise Comparativa das Sobretensões Transitórias Fase B | Trecho 1



Fonte: Autora

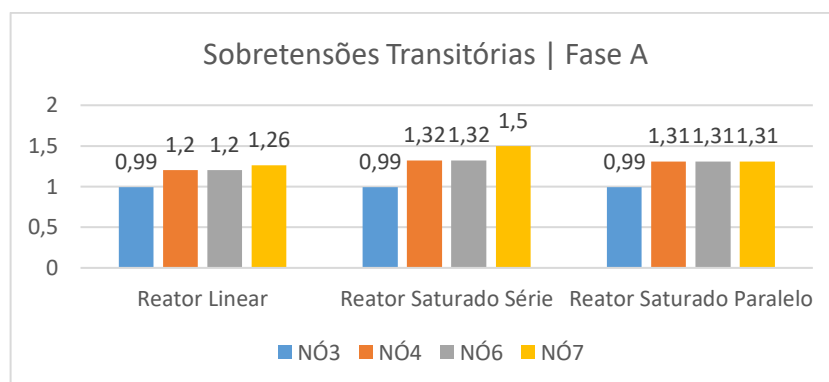
Gráfico 123 - Análise Comparativa das Sobretensões Transitórias Fase C | Trecho 1



Fonte: Autora

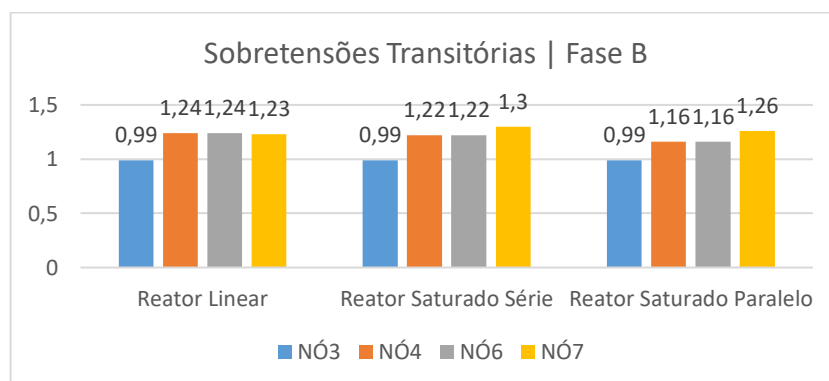
- Trecho 2

Gráfico 124 - Análise Comparativa das Sobretensões Transitórias Fase A | Trecho 2



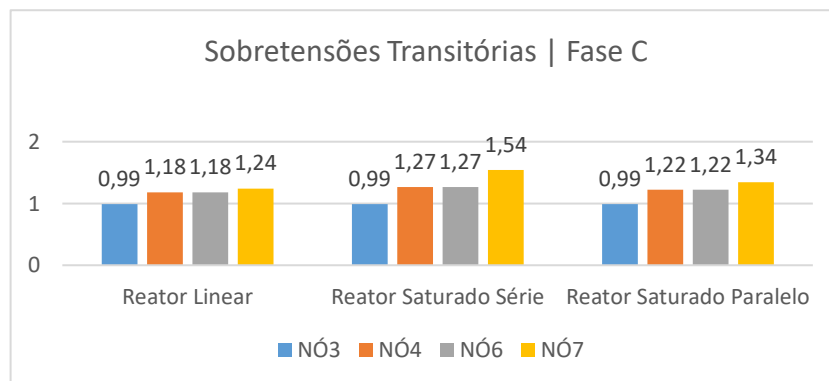
Fonte: Autora

Gráfico 125 - Análise Comparativa das Sobretensões Transitórias Fase B | Trecho 2



Fonte: Autora

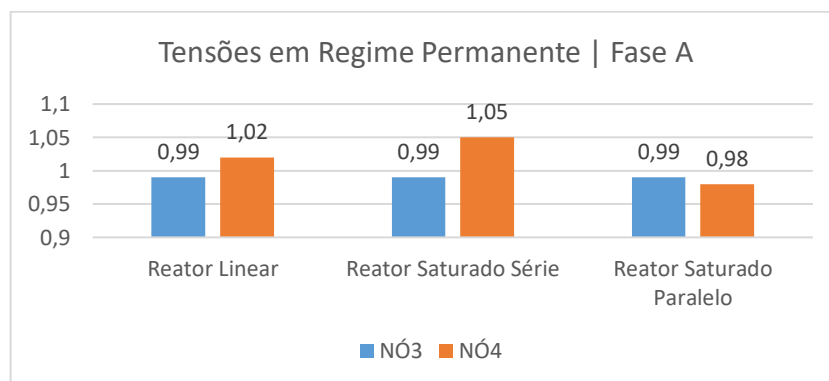
Gráfico 126 - Análise Comparativa das Sobretensões Transitórias Fase C | Trecho 2



Fonte: Autora

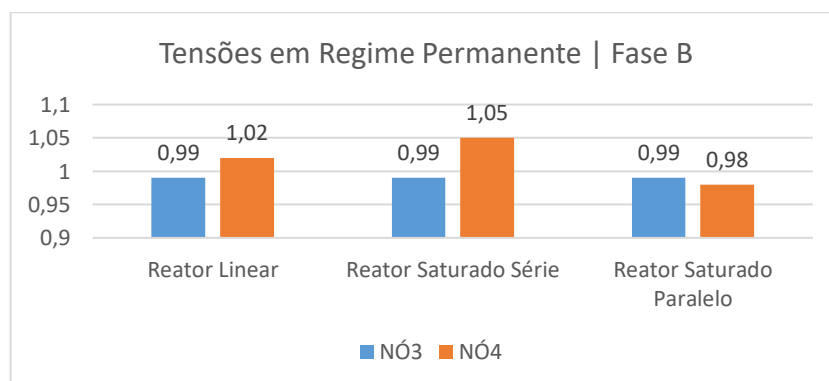
- Trecho 1

Gráfico 127 - Análise Comparativa das Tensões em Regime Permanente Fase A | Trecho 1



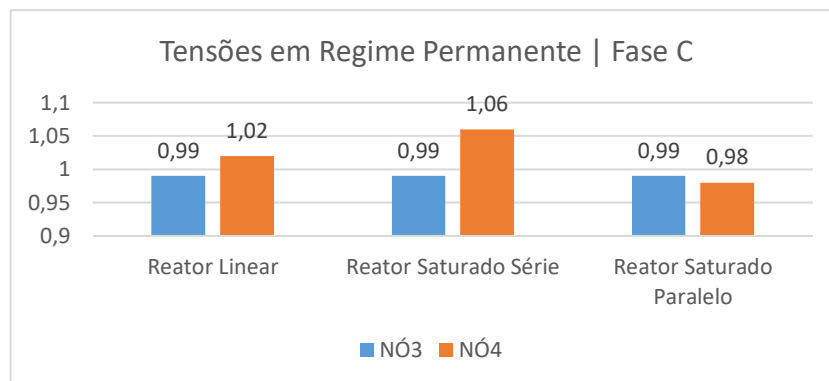
Fonte: Autora

Gráfico 128 - Análise Comparativa das Tensões em Regime Permanente Fase B | Trecho 1



Fonte: Autora

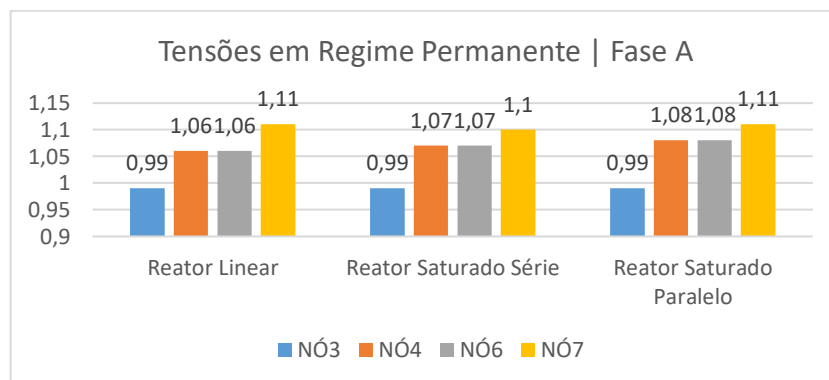
Gráfico 129 - Análise Comparativa das Tensões em Regime Permanente Fase C | Trecho 1



Fonte: Autora

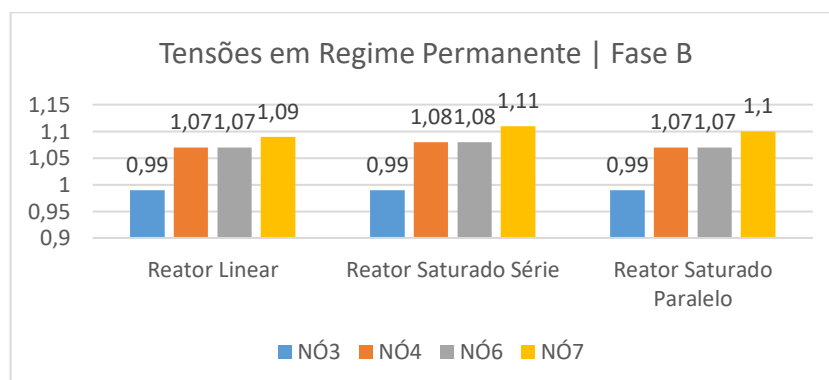
- Trecho 2

Gráfico 130 - Análise Comparativa das Tensões em Regime Permanente Fase A | Trecho 2



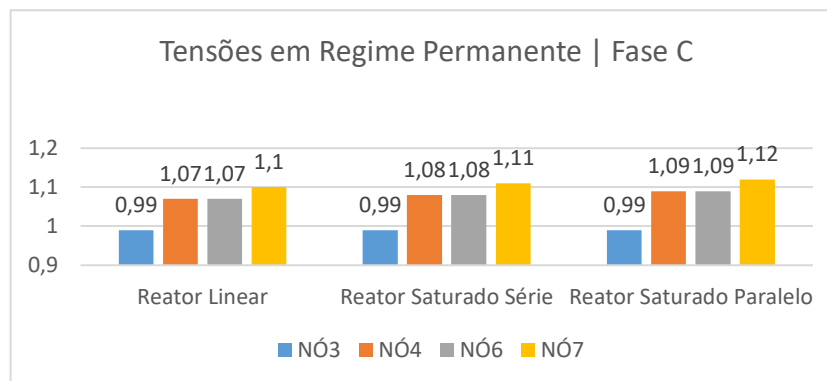
Fonte: Autora

Gráfico 131 - Análise Comparativa das Tensões em Regime Permanente Fase B | Trecho 2



Fonte: Autora

Gráfico 132 - Análise Comparativa das Tensões em Regime Permanente Fase C | Trecho 2



Fonte: Autora

9.3 Conclusão

As análises comparativas entre as três configurações da linha de transmissão experimental, na ausência e presença de resistores de pré-inserção, mostraram cenários bem interessantes. Realizando um breve confronto entre estas duas situações, é notória a discrepância dos níveis de tensão obtidos ao simular as LTs sem e com os resistores de pré-inserção. Ficou claro, portanto, que a técnica para mitigação de sobretensões que utiliza resistores de pré-inserção é extremamente eficaz.

Na energização do primeiro trecho das LTs, a não utilização dos resistores de pré-inserção promoveu níveis de sobretensão transitória, nos pontos de conexão dos reatores, mais elevados do que os permissíveis pelo Tópico 10.4 – Critérios Relativos a Reatores em Derivação do Submódulo 23.3 dos Procedimentos de Rede da ONS. No entanto, a medida que o segundo trecho é energizado, uma nova situação é observada. Nesta perspectiva, os níveis de sobretensão transitória apresentam-se menos severos pois, os reatores que, na energização anterior não se faziam presentes, passam a entrar em operação. Estes, portanto, contribuem, de certa forma, na mitigação de sobretensões transitórias em processos de chaveamento para energização de linhas de transmissão.

Diante do exposto, conclui-se que nenhuma das configurações da LT experimental, na ausência de resistores de pré-inserção, apresentam confiabilidade

no que diz respeito aos níveis de tensão admissíveis em situações transitórias oriundas de manobras de energização. Por outro lado, todas estas configurações encontram-se dentro dos níveis aceitáveis de tensão quando se inclui os equipamentos para mitigação das sobretensões. Em regime permanente, todas as configurações da linha de transmissão experimental, sem e com resistores de pré-inserção, promoveram níveis de tensão confiáveis.

10. CONCLUSÃO GERAL

Como visto até então, o projeto e a operação de Sistemas Elétricos de Potência, mais especificamente das linhas de transmissão a longas distâncias, enfrentam grandes desafios, dentre eles, a conservação da tensão dentro dos limites aceitáveis pelos órgãos regulamentadores, fazendo-se necessária a utilização de equipamentos ao longo da LT que mantenham a tensão em um patamar constante. Em processos de energização de linhas de transmissão longas em extra-alta tensão, é comum que níveis de tensão exorbitantes sejam verificados, provocando danos nos equipamentos e um possível corte no fornecimento da energia elétrica às cargas.

O presente trabalho baseou-se nesta problemática para promover um estudo de três configurações de uma linha de transmissão experimental de longa extensão: LT compensada por reator linear, LT compensada por reator naturalmente saturado série e LT compensada por reator naturalmente saturado paralelo. Todas as três configurações foram submetidas ao processo de energização tanto na ausência como presença de resistores de pré-inserção (equipamentos utilizados para mitigar sobretensões de manobra).

Conclui-se, portanto, com este Trabalho de Conclusão de Curso, os seguintes pontos:

- As linhas de transmissão de longas dimensões possuem características peculiares, as quais podem comprometer a conservação da tensão ao longo de sua extensão. Por isso, necessitam de equipamentos que mantenham o nível de tensão ao longo da LT dentro dos limites previamente estabelecidos;
- Os reatores são equipamentos bastante utilizados na compensação de reativos em linhas de transmissão longas (em operações a vazio ou a baixas cargas), evitando elevações de tensão indesejáveis ao longo da LT;
- Os reatores naturalmente saturados, diferentemente dos reatores lineares, são equipamentos bem particulares, uma vez que conseguem atuar tanto na região linear (sistemas operando a plena carga) quanto na região de saturação (sistema operando a vazio ou a baixas cargas);

- As manobras para energização de linhas de transmissão longas podem ser extremamente prejudiciais, acarretando rupturas no isolamento dos equipamentos desta LT;
- Equipamentos como os resistores de pré-inserção mostram-se bastante eficientes quanto a mitigação de surtos de tensão em processos de manobra para energização de linhas de transmissão;
- Os reatores, além de manterem os níveis de tensão praticamente constantes ao longa das linhas de transmissão, são equipamentos que, ao entrarem em operação, conseguem minimizar as sobretensões de manobra oriundas da energização de LTs.
- As distorções harmônicas observadas na forma de onda da tensão, provocadas pela presença dos reatores naturalmente saturados, não são suficientemente danosas ao sistema;
- Os três reatores conectados à LT experimental promoveram perfis de tensão planos ao longo dos trechos da linha de transmissão na ausência e presença de resistores de pré-inserção;
- Os reatores naturalmente saturados paralelo, ao entrarem em operação, na situação em que a LT experimental não possuía resistores de pré-inserção, foram os responsáveis por promover os menores níveis de sobretensão de manobra;
- Muito provavelmente, se os reatores naturalmente saturados série fossem projetados para possuírem tensão de saturação e inclinação do reator iguais aos dos reatores naturalmente saturados paralelo, a configuração da LT compensada por estes reatores talvez apresentasse um cenário mais satisfatório quanto a diminuição das sobretensões de manobra;
- Nas simulações das configurações da LT experimental que possuíam os resistores de pré-inserção, pouco pode-se afirmar sobre a eficácia dos reatores na mitigação das sobretensões de manobra, uma vez que os resistores de pré-inserção já atuam para esta finalidade.

REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Energia Elétrica. **A ANEEL**. Brasil, 2019. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/a-aneel>>. Acesso em: 20 maio 2019.

Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa ANEEL Nº 622**. 2014. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2014622.pdf>>. Acesso em: 2018.

CARVALHO, P. F. S. D. D. **Análise de Transitórios Eletromagnéticos de Manobra em Linhas de Transmissão**. 2018. Tese (Graduação em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2018.

DANTAS, K. M. C. **Chaveamento Controlado de Linhas de Transmissão**. 2007. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2007.

FONTE, L. A. M. D. **Desenvolvimento de Reatores com Saturação Natural para Aplicação em Sistemas de Potência**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2004.

JR, M. A. D. C.; FONTE, L. A. M. D. Controle de Tensão em Transitórios e em Estado Permanente de Linhas Longas de Transmissão em EAT. **Seminário Nacional de Produção e Transmissão da Energia**, Campinas, 2001, ed. 16, p. 1-2, 2001.

MILLER, T. J. E. **Reactive Power Control**. [S.l.]: [s.n.], 1982.

Operador Nacional do Sistema Elétrico. **O que é o ONS?**. Brasil, 2019. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/o-que-e-ons>>. Acesso em: 20 maio 2019.

Operador Nacional do Sistema Elétrico. **O que é o SIN?**. Brasil, 2019. Disponível em: <<http://ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>>. Acesso em: 20 Maio 2019.

Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Procedimentos de Rede**. Brasil, 2019. Disponível em: <<http://ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/procedimentos-de-rede/o-que-sao>>. Acesso em: 7 Junho 2019.

REDE, P. D. Submódulo 23.3 Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos, 2017.

STEVENSON, W. D. **Elementos de Análise de Sistemas de Potência**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

VASCONCELLOS, D. A. B. et al. Análise Técnica Comparativa do Emprego de Reatores Saturados em Relação aos Lineares para a Melhoria do Desempenho de Sistemas de Transmissão Radiais. **XVIII Seminário de Iniciação Científica - UFMT**, Cuiabá - MT, 2010, ed. 18, p. 1-2, 2010.