



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
TELECOMUNICAÇÕES

Rodrigo Godim de Azevedo

Metodologia fasorial para simulação de transitórios eletromagnéticos de manobra

NITERÓI
Outubro de 2024

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
TELECOMUNICAÇÕES

Rodrigo Godim de Azevedo

**Metodologia fasorial para simulação de transitórios
eletromagnéticos de manobra**

Tese de doutorado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações. Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica

Orientador: Prof. Sergio Gomes Junior, D.Sc.

Coorientador: Prof. Thiago José Masseran Antunes Parreiras, D.Sc.

NITERÓI

Outubro de 2024

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE
Gerada com informações fornecidas pelo autor

D278m De Azevedo, Rodrigo Godim
Metodologia fasorial para simulação de transitórios
eletromagnéticos de manobra / Rodrigo Godim De Azevedo. -
2024.
340 f.: il.

Orientador: Sergio Gomes Junior.
Coorientador: Thiago José Masseran Antunes Parreiras.
Tese (doutorado)-Universidade Federal Fluminense, Escola de
Engenharia, Niterói, 2024.

1. Sistema elétrico de potência. 2. Transitório
elétrico. 3. Sistema de transmissão de energia. 4. Modelagem
computacional. 5. Produção intelectual. I. Gomes Junior,
Sergio, orientador. II. Masseran Antunes Parreiras, Thiago
José, coorientador. III. Universidade Federal Fluminense.
Escola de Engenharia. IV. Título.

CDD - XXX

RODRIGO GODIM DE AZEVEDO

METODOLOGIA FASORIAL PARA SIMULAÇÃO DE TRANSITÓRIOS
ELETROMAGNÉTICOS DE MANOBRA

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a Obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações.

Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente



SERGIO GOMES JUNIOR
Data: 07/10/2024 18:48:00-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

(Prof. Dr. Sergio Gomes Junior - Orientador - UFF)

Documento assinado digitalmente



THIAGO JOSE MASSERAN ANTUNES PARREIRAS
Data: 07/10/2024 20:40:46-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

(Prof. Dr. Thiago José Masseran Antunes Parreiras - Coorientador -UFRJ)

Documento assinado digitalmente



ANDRE ABEL AUGUSTO
Data: 10/10/2024 16:53:52-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

(Prof. Dr. André Abel Augusto – UFF)

Documento assinado digitalmente



MARIA CRISTINA DIAS TAVARES
Data: 10/10/2024 16:26:31-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

(Prof^a. Dr^a. Maria Cristina Dias Tavares - UNICAMP)

Documento assinado digitalmente



SERGIO LUIS VARRICCHIO
Data: 11/10/2024 09:17:05-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

(Prof. Dr. Sergio Luis Varricchio - CEPEL)

Niterói
(Outubro/2024)

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais Carmita Cornélio de Azevedo e Ademair Freres de Azevedo e ao meu tio Oracy Godim (*in memoriam*) por todo o suporte necessário ao longo da vida, mesmo nos momentos de dificuldades.

Agradeço à minha companheira de vida, Ana Clara Andrade da Silveira, pela enorme paciência, pelo amor e pelos preciosos momentos juntos.

Ao CEPEL pelo apoio financeiro e pela estrutura oferecidos. Ao meu orientador, Sergio Gomes Junior, pelo suporte técnico, incentivo e valiosos conhecimentos compartilhados. Ao meu coorientador, Thiago José Masseran, um profissional de elevada competência e dedicação, por toda a paciência e por todas as discussões técnicas. Aos demais pesquisadores do DSE que contribuíram de forma direta e indireta para a realização desse trabalho.

A todos meus amigos ao longo da vida, que tornaram qualquer dificuldade menos árdua e o caminho muito mais aprazível. Aos amigos de São Gonçalo, representados nominalmente por Igor Malamace, Diego Barboza e Amanda Chagas; e às amigas e exímias artistas Yasmin Maia (Carioca Pernetá), Fernanda Dalveira (*Fairy Adams*) e Cássia Teitel (*Lilly Cobeau*).

Aos amigos do CEPEL, remanescentes e egressos, Thiago Rocha, Thomas Campello e Nicholas Leite pelas conversas técnicas, compartilhamento de conhecimentos e companheirismo.

Aos meus queridos felinos, Pitágoras e Odete, pela companhia amistosa e constante. Vocês tornaram os momentos mais leves com suas brincadeiras e presença aconchegante.

“Eu vos digo: é preciso ter ainda caos dentro de si, para poder dar à luz
uma estrela dançante. Eu vos digo: tendes ainda caos dentro de vós.”

Friedrich Nietzsche, “Assim falou Zaratustra”

“As ruas encantam a vida na miudeza que ninguém suspeita.”

Luiz Antônio Simas, “O corpo encantado das ruas”

Resumo

O objetivo desta tese é o desenvolvimento de uma nova metodologia de simulação fasorial, baseada na formulação por fasores dinâmicos, destinada à aplicação em situações transitórios eletromagnéticos de manobra.

Desse modo, pretende-se quebrar o paradigma existente até então, que considera inviável a representação completa do sistema elétrico em estudos de transitórios eletromagnéticos. Com a implementação proposta, a ferramenta permitirá uma representação mais precisa da rede em análise e de forma menos laboriosa. Atualmente, o processo de elaboração de equivalentes requer a atuação de especialistas e um tempo considerável de preparação, o que eleva os custos envolvidos. Dessa forma, a representação completa da rede reduz as possibilidades de erros, permite as automatizações de geração de múltiplos cenários, de diversas condições operativas e de variações de despachos.

As implementações foram realizadas na plataforma computacional AnaHVDC, que integra os transitórios eletromecânicos e eletromagnéticos de uma rede elétrica de grande porte, sendo a tese uma extensão das funcionalidades no contexto de transitórios eletromagnéticos de manobra. Em uma acepção mais específica, destacam-se os principais modelos a serem desenvolvidos no domínio fasorial para que sejam considerados os referidos estudos de transitórios eletromagnéticos de manobra na ferramenta: para-raios, magnetização do transformador, chave estatística e linha de transmissão desbalanceada.

Depois da etapa da descrição da metodologia e desenvolvimento de modelos, a tese apresentará sistemas de pequeno e médio porte validados com o ATP. Como conclusão, são apresentadas as vantagens e características dessa nova abordagem.

Palavras-chaves: Sistemas Elétricos de Potência; Transitórios Eletromagnéticos de Manobra; Simulação computacional; Para-raios; Magnetização de Transformadores; Linhas de Transmissão.

Abstract

The objective of this thesis is to develop a new phasor simulation methodology, based on the dynamic phasor formulation, intended for application in electromagnetic transient switching situations.

In this way, the aim is to break the existing paradigm, which considers the complete representation of the electrical system in electromagnetic transient studies to be unfeasible. With the proposed implementation, the tool will allow a more accurate representation of the network under analysis and in a less laborious way. Currently, the process of preparing equivalents requires the participation of specialists and a considerable amount of preparation time, which increases the costs involved. In this way, the complete representation of the network reduces the possibility of errors, allows the automation of the generation of multiple scenarios, of different operating conditions and of dispatch variations.

The implementations were carried out on the AnaHVDC computational platform, which integrates the electromechanical and electromagnetic transients of a large electrical network, and the thesis is an extension of the functionalities in the context of electromagnetic transient switching. In a more specific sense, the main models to be developed in the phasor domain are highlighted so that the aforementioned studies of electromagnetic transients in the tool can be considered: lightning arresters, transformer magnetization, statistical switches and unbalanced transmission lines.

After the methodology description and model development stage, the thesis will present small and medium-sized systems validated with ATP. In conclusion, the advantages and characteristics of this new approach are presented.

Keywords: Electric Power Systems; Electromagnetic Switching Transients; Computational Simulation; Surge Arresters; Transformer Magnetization; Transmission Lines.

Lista de Figuras

FIGURA 1 – SISTEMA EQUIVALENTE GENÉRICO.....	5
FIGURA 2 – ESQUEMÁTICO DAS ETAPAS DE ELABORAÇÃO DE EQUIVALENTES A FREQUÊNCIA FUNDAMENTAL.....	6
FIGURA 3 – ATUAÇÃO DO PARA-RAIOS: ATP <i>VERSUS</i> ANAHVDC	16
FIGURA 4 – CIRCUITO RL	22
FIGURA 5 – MODELO DE ACOMPANHAMENTO PARA O CIRCUITO RL	29
FIGURA 6 – FORMA DE ONDA DA TENSÃO.....	30
FIGURA 7 – FORMA DE ONDA DA CORRENTE	30
FIGURA 8 – COMPARAÇÃO ANAHVDC <i>VERSUS</i> PSCAD	31
FIGURA 9 – COMPARAÇÃO ANAHVDC <i>VERSUS</i> ANATEM	31
FIGURA 10 – LINHA DE TRANSMISSÃO SEM PERDAS ENTRE DOIS NÓS GENÉRICOS k E m . [7]	33
FIGURA 11 – MODELO DE ACOMPANHAMENTO DA LT SEM PERDAS (PARTE REAL) [7]	35
FIGURA 12 – MODELO DE ACOMPANHAMENTO DA LT SEM PERDAS (PARTE IMAGINÁRIA) [7].....	36
FIGURA 13 – MODELO DE ACOMPANHAMENTO DA LT SEM PERDAS (DOMÍNIO FASORIAL)	37
FIGURA 14 – MODELO APROXIMADO PARA LT COM PERDAS [7].....	38
FIGURA 15 – MODELO DE ACOMPANHAMENTO LINEARIZADO GENERALIZADO	41
FIGURA 16 – FENÔMENOS FÍSICOS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA E RESPECTIVAS FAIXAS DE FREQUÊNCIA. ADAPTADO DE [3].....	42
FIGURA 17 – SOBRETENSÕES TRANSITÓRIAS E SUAS ORIGENS. ADAPTADO DE [3].....	43
FIGURA 19 – CURVA I <i>VERSUS</i> V GENÉRICA DO PARA-RAIO	48
FIGURA 20 – MODELO DE ACOMPANHAMENTO DO PARA-RAIOS.....	56
FIGURA 21 – FLUXOGRAMA DA ROTINA DE SOLUÇÃO DO MODELO DO PARA-RAIOS.....	57
FIGURA 22 – CURVA I <i>VERSUS</i> Φ GENÉRICA DO PARA-RAIO.....	60
FIGURA 23 – MODELO DE ACOMPANHAMENTO DA MAGNETIZAÇÃO.....	70
FIGURA 24 – FLUXOGRAMA DA ROTINA DE SOLUÇÃO DO MODELO DE MAGNETIZAÇÃO	71
FIGURA 25 – ENTRADA DE DADOS PARA O MODELO DE LINHA DE TRANSMISSÃO COM CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA.....	73
FIGURA 26 – ENTRADA DE DADOS DOS CABOS CONDUTORES PARA O MODELO DE LINHA DE TRANSMISSÃO COM CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA.....	74
FIGURA 27 – FLUXOGRAMA GERAL PARA O MODELO DE LINHA DE TRANSMISSÃO COM CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA.....	76
FIGURA 28 –PROCESSO DE REDUÇÃO MATRICIAL	77
FIGURA 29 – MODELO DE ACOMPANHAMENTO DA LT TRIFÁSICA (DOMÍNIO FASORIAL USANDO COMPONENTES SIMÉTRICAS)	78
FIGURA 30 – FLUXOGRAMA DO CÁLCULO CONSIDERANDO DESBALANÇO.....	85
FIGURA 31 – ETAPAS DE SOLUÇÃO DO MODELO PARA CADA UMA DAS COMPONENTES MODAIS.....	86
FIGURA 32 – MODELO DE ACOMPANHAMENTO DA LT TRIFÁSICA COM PERDAS (DOMÍNIO FASORIAL UTILIZANDO COMPONENTES MODAIS)	87
FIGURA 33 – TENSÃO EM V15- FASE A	94
FIGURA 34 – ERRO DE TENSÃO EM V15- FASE A	94
FIGURA 35 – TENSÃO EM V15- FASE A (AMPLIAÇÃO NO REGIME PERMANENTE)	95
FIGURA 36 – ERRO DE TENSÃO EM V15- FASE A (AMPLIAÇÃO NO REGIME PERMANENTE)	95
FIGURA 37 – TENSÃO EM V15- FASE A (AMPLIAÇÃO PARA VISUALIZAÇÃO DO DEFASAMENTO)	96
FIGURA 38 – TENSÃO EM V15- FASE A (AMPLIAÇÃO PARA DETECÇÃO DO CRUZAMENTO POR ZERO)	97
FIGURA 39 – TENSÃO EM V15- FASE A (AMPLIAÇÃO PARA DETECÇÃO DO ERRO ABSOLUTO DE TENSÃO)	97
FIGURA 40 – TENSÃO EM V15- FASE A (TRANSITÓRIO)	99
FIGURA 41 – ERRO DE TENSÃO EM V15- FASE A (TRANSITÓRIO)	99
FIGURA 42 – ERRO DE TENSÃO EM V15- FASE A (AMPLIAÇÃO DE VISUALIZAÇÃO NO TRANSITÓRIO)	100
FIGURA 43 – INTERSEÇÃO PARA DETECÇÃO DA TENSÃO.....	100
FIGURA 44 – ERRO CALCULADO COM DIFERENTES DESLOCAMENTOS DE CURVAS	101
FIGURA 45 – ERRO CALCULADO COM DIFERENTES DESLOCAMENTOS DE CURVAS (AMPLIAÇÃO DE VISUALIZAÇÃO NO INÍCIO DO TRANSITÓRIO)	102
FIGURA 46 – ERRO CALCULADO COM DIFERENTES DESLOCAMENTOS DE CURVAS (AMPLIAÇÃO DE VISUALIZAÇÃO NO FINAL DO TRANSITÓRIO)	102
FIGURA 47 – ERRO CALCULADO COM DIFERENTES DESLOCAMENTOS DE CURVAS (AMPLIAÇÃO DE VISUALIZAÇÃO NO REGIME PERMANENTE).....	103

FIGURA 48 – CASO TEÓRICO: CURVAS COM DEFASAMENTO ANGULAR	104
FIGURA 49 – CENÁRIO COM DEFASAMENTO < 5,72958°	104
FIGURA 50 – CENÁRIO COM DEFASAMENTO = 5,72958°	105
FIGURA 51 – CENÁRIO COM DEFASAMENTO > 5,72958°	106
FIGURA 52 – EXTREMOS LOCAIS NA BARRA 15, FASE A.....	107
FIGURA 53 – VISUALIZAÇÃO DE MÍNIMO LOCAL NÃO CORRESPONDENTE.....	108
FIGURA 54 – CASO ENERGLT.ACP.....	112
FIGURA 55 – ENERGIZAÇÃO DE LT: ESCALA COMPLETA	113
FIGURA 56 – ENERGIZAÇÃO DE LT: ESCALA AMPLIADA DE T=0,05 ATÉ T=0,1	114
FIGURA 57 – ENERGIZAÇÃO DE LT: ESCALA AMPLIADA DE T=0,0666 ATÉ T=0,067	114
FIGURA 58 – ILUSTRAÇÃO DE OPERAÇÃO DE UM DISJUNTOR EM SISTEMA TRIFÁSICO. ADAPTADO DE [2].....	117
FIGURA 59 - DISPERSÃO DOS POLOS DO DISJUNTOR NO CIRCUITO TRIFÁSICO. ADAPTADO DE [2]	117
FIGURA 60 - SORTEIO DA FASE A SEM E COM DISTRIBUIÇÃO UNIFORME.....	118
FIGURA 61 - SORTEIO DA FASE B SEM E COM DISTRIBUIÇÃO UNIFORME.....	118
FIGURA 62 - SORTEIO DA FASE C SEM E COM DISTRIBUIÇÃO UNIFORME.....	119
FIGURA 63 – DENSIDADE DE DISTRIBUIÇÕES PARA AS CHAVES ESTATÍSTICAS: UNIFORME E NORMAL	119
FIGURA 64 - FORMATAÇÃO DO ARQUIVO DE SAÍDA RESULT1.CSV.....	120
FIGURA 65 - FORMATAÇÃO DO ARQUIVO DE SAÍDA SIMULATION1.CSV.....	120
FIGURA 66 – DIAGRAMA UNILIFAR NO ATP: ENERGIZAÇÃO DE LINHA	124
FIGURA 67 – ENERGIZAÇÃO DE LT: TENSÃO EM LT2, FASE A.....	125
FIGURA 68 – ENERGIZAÇÃO DE LT: TENSÃO EM LT2, FASE A, COM AMPLIAÇÃO DA FAIXA DE VISUALIZAÇÃO	125
FIGURA 69 – ENERGIZAÇÃO DE LT: TENSÃO EM LT2, FASE B.....	126
FIGURA 70 – ENERGIZAÇÃO DE LT: TENSÃO EM LT2, FASE B, COM AMPLIAÇÃO DA FAIXA DE VISUALIZAÇÃO	126
FIGURA 71 – ENERGIZAÇÃO DE LT: TENSÃO EM LT2, FASE C.....	127
FIGURA 72 – ENERGIZAÇÃO DE LT: TENSÃO EM LT2, FASE C, COM AMPLIAÇÃO DA FAIXA DE VISUALIZAÇÃO	127
FIGURA 73 – ENERGIZAÇÃO DE LT ENERGIA EM LT2, FASE A.....	128
FIGURA 74 – ENERGIZAÇÃO DE LT ENERGIA EM LT2, FASE B.....	128
FIGURA 75 – ENERGIZAÇÃO DE LT ENERGIA EM LT2, FASE C.....	129
FIGURA 76 – DIAGRAMA UNILIFAR NO ATP: ENERGIZAÇÃO DE TRANSFORMADOR.....	130
FIGURA 77 – ENERGIZAÇÃO DE TRANSFORMADOR: TENSÃO EM TR2, FASE A.....	131
FIGURA 78 – ENERGIZAÇÃO DE TRANSFORMADOR: TENSÃO EM TR2, FASE A, COM AMPLIAÇÃO DA FAIXA DE VISUALIZAÇÃO ...	132
FIGURA 79 – ENERGIZAÇÃO DE TRANSFORMADOR: TENSÃO EM TR2, FASE B.....	132
FIGURA 80 – ENERGIZAÇÃO DE TRANSFORMADOR: TENSÃO EM TR2, FASE B, COM AMPLIAÇÃO DA FAIXA DE VISUALIZAÇÃO ...	133
FIGURA 81 – ENERGIZAÇÃO DE TRANSFORMADOR: TENSÃO EM TR2, FASE C.....	133
FIGURA 82 – ENERGIZAÇÃO DE TRANSFORMADOR: TENSÃO EM TR2, FASE C, COM AMPLIAÇÃO DA FAIXA DE VISUALIZAÇÃO ...	134
FIGURA 83 – ENERGIZAÇÃO DE TRANSFORMADOR: CORRENTE DE MAGNETIZAÇÃO, FASE A.....	134
FIGURA 84 – ENERGIZAÇÃO DE TRANSFORMADOR: CORRENTE DE MAGNETIZAÇÃO, FASE A, COM AMPLIAÇÃO DA FAIXA DE VISUALIZAÇÃO.....	135
FIGURA 85 – ENERGIZAÇÃO DE TRANSFORMADOR: CORRENTE DE MAGNETIZAÇÃO, FASE B.....	135
FIGURA 86 – ENERGIZAÇÃO DE TRANSFORMADOR: CORRENTE DE MAGNETIZAÇÃO, FASE B, COM AMPLIAÇÃO DA FAIXA DE VISUALIZAÇÃO.....	136
FIGURA 87 – ENERGIZAÇÃO DE TRANSFORMADOR: CORRENTE DE MAGNETIZAÇÃO, FASE C.....	136
FIGURA 88 – ENERGIZAÇÃO DE TRANSFORMADOR: CORRENTE DE MAGNETIZAÇÃO, FASE C, COM AMPLIAÇÃO DA FAIXA DE VISUALIZAÇÃO.....	137
FIGURA 89 – ENERGIZAÇÃO DE TRANSFORMADOR: CORRENTE DE MAGNETIZAÇÃO EM REGIME PERMANENTE.....	138
FIGURA 90 – CASO BASE INCOMPATÍVEL	140
FIGURA 91 – CASO BASE COMPATÍVEL E SAÍDA INCOMPATÍVEL	141
FIGURA 92 – CASO BASE E SAÍDA COMPATÍVEIS	141
FIGURA 93 – AJUSTE DO CASO BASE.....	142
FIGURA 94 – PONTO DE OPERAÇÃO DO CASO BASE NO PROGRAMA ANAREDE.....	143
FIGURA 95 – PONTO DE OPERAÇÃO DO CASO BASE NO PROGRAMA ATPDRAW	144
FIGURA 96 – CASO BASE: TENSÃO NA BARRA 09, FASE A.....	147
FIGURA 97 – CASO BASE: TENSÃO NA BARRA 09, FASE A, COM AMPLIAÇÃO DA FAIXA DE VISUALIZAÇÃO	147
FIGURA 98 – CASO BASE: TENSÃO NA BARRA 09, FASE B.....	148
FIGURA 99 – CASO BASE: TENSÃO NA BARRA 09, FASE B, COM AMPLIAÇÃO DA FAIXA DE VISUALIZAÇÃO.....	148
FIGURA 100 – CASO BASE: TENSÃO NA BARRA 09, FASE C.....	149

FIGURA 101 – CASO BASE: TENSÃO NA BARRA 09, FASE C, COM AMPLIAÇÃO DA FAIXA DE VISUALIZAÇÃO.....	149
FIGURA 102 – ENERGIZAÇÃO DE LINHA: CHAVE DETERMINÍSTICA COM DISPERSÃO DE POLOS	150
FIGURA 103 – DIAGRAMA UNILIFAR NO ATP: ENERGIZAÇÃO DE LINHA SEM PARA-RAIOS	151
FIGURA 104 – ENERGIZAÇÃO DE LT (SEM PARA-RAIOS): TENSÃO NA BARRA 15, FASE A	152
FIGURA 105 – ENERGIZAÇÃO DE LT (SEM PARA-RAIOS): TENSÃO NA BARRA 15, FASE A, COM AMPLIAÇÃO DA FAIXA DE VISUALIZAÇÃO	152
FIGURA 106 – ENERGIZAÇÃO DE LT (SEM PARA-RAIOS): TENSÃO NA BARRA 15, FASE B.....	153
FIGURA 107 – ENERGIZAÇÃO DE LT (SEM PARA-RAIOS): TENSÃO NA BARRA 15, FASE B, COM AMPLIAÇÃO DA FAIXA DE VISUALIZAÇÃO	153
FIGURA 108 – ENERGIZAÇÃO DE LT (SEM PARA-RAIOS): TENSÃO NA BARRA 15, FASE C.....	154
FIGURA 109 – ENERGIZAÇÃO DE LT (SEM PARA-RAIOS): TENSÃO NA BARRA 15, FASE C, COM AMPLIAÇÃO DA FAIXA DE VISUALIZAÇÃO	154
FIGURA 110 – DIAGRAMA UNILIFAR NO ATP: ENERGIZAÇÃO DE LINHA COM PARA-RAIOS	155
FIGURA 111 – DADOS: TENSÃO VERSUS CORRENTE DO PARA-RAIOS	155
FIGURA 112 – ENERGIZAÇÃO DE LT (COM PARA-RAIOS): TENSÃO NA BARRA 15, FASE A.....	156
FIGURA 113 – ENERGIZAÇÃO DE LT (COM PARA-RAIOS): TENSÃO NA BARRA 15, FASE A, COM AMPLIAÇÃO DA FAIXA DE VISUALIZAÇÃO	156
FIGURA 114 – ENERGIZAÇÃO DE LT (COM PARA-RAIOS): TENSÃO NA BARRA 15, FASE B.....	157
FIGURA 115 – ENERGIZAÇÃO DE LT (COM PARA-RAIOS): TENSÃO NA BARRA 15, FASE B, COM AMPLIAÇÃO DA FAIXA DE VISUALIZAÇÃO	157
FIGURA 116 – ENERGIZAÇÃO DE LT (COM PARA-RAIOS): TENSÃO NA BARRA 15, FASE C.....	158
FIGURA 117 – ENERGIZAÇÃO DE LT (COM PARA-RAIOS): TENSÃO NA BARRA 15, FASE C, COM AMPLIAÇÃO DA FAIXA DE VISUALIZAÇÃO	158
FIGURA 118 – ENERGIZAÇÃO DE LT (COM PARA-RAIOS): ENERGIA NA BARRA 15, FASE A.....	159
FIGURA 119 – ENERGIZAÇÃO DE LT (COM PARA-RAIOS): ENERGIA NA BARRA 15, FASE A, COM AMPLIAÇÃO DA FAIXA DE VISUALIZAÇÃO	159
FIGURA 120 – ENERGIZAÇÃO DE LT (COM PARA-RAIOS): ENERGIA NA BARRA 15, FASE B.....	160
FIGURA 121 – ENERGIZAÇÃO DE LT (COM PARA-RAIOS): ENERGIA NA BARRA 15, FASE B, COM AMPLIAÇÃO DA FAIXA DE VISUALIZAÇÃO	160
FIGURA 122 – ENERGIZAÇÃO DE LT (COM PARA-RAIOS): ENERGIA NA BARRA 15, FASE C.....	161
FIGURA 123 – ENERGIZAÇÃO DE LT (COM PARA-RAIOS): ENERGIA NA BARRA 15, FASE C, COM AMPLIAÇÃO DA FAIXA DE VISUALIZAÇÃO	161
FIGURA 124 – ENERGIZAÇÃO DE LT (COM PARA-RAIOS): POTÊNCIA NO PARA-RAIOS	162
FIGURA 125 – ENERGIZAÇÃO DE LT (SEM PR x COM PR): TENSÃO NA BARRA 15, FASE A.	163
FIGURA 126 – ENERGIZAÇÃO DE LT (SEM PR x COM PR): TENSÃO NA BARRA 15, FASE B.....	163
FIGURA 127 – ENERGIZAÇÃO DE LT (SEM PR x COM PR): TENSÃO NA BARRA 15, FASE C.....	164
FIGURA 128 – DIAGRAMA UNILIFAR NO ATP: ENERGIZAÇÃO DE TRANSFORMADORES	165
FIGURA 129 – DADOS: CORRENTE <i>VERSUS</i> FLUXO DO MAGNETIZAÇÃO	166
FIGURA 130 – ENERGIZAÇÃO DE TRANSFORMADOR: TENSÃO NA BARRA 16, FASE A.....	166
FIGURA 131 – ENERGIZAÇÃO DE TRANSFORMADOR: TENSÃO NA BARRA 16, FASE A, COM AMPLIAÇÃO DA FAIXA DE VISUALIZAÇÃO	167
FIGURA 132 – ENERGIZAÇÃO DE TRANSFORMADOR: TENSÃO NA BARRA 16, FASE B.....	167
FIGURA 133 – ENERGIZAÇÃO DE TRANSFORMADOR: TENSÃO NA BARRA 16, FASE B, COM AMPLIAÇÃO DA FAIXA DE VISUALIZAÇÃO	168
FIGURA 134 – ENERGIZAÇÃO DE TRANSFORMADOR: TENSÃO NA BARRA 16, FASE C.....	168
FIGURA 135 – ENERGIZAÇÃO DE TRANSFORMADOR: TENSÃO NA BARRA 16, FASE C, COM AMPLIAÇÃO DA FAIXA DE VISUALIZAÇÃO	169
FIGURA 136 – ENERGIZAÇÃO DE TRANSFORMADOR: TENSÃO NA BARRA 16 (FERRORRESSONÂNCIA)	170
FIGURA 137 – ENERGIZAÇÃO DE TRANSFORMADOR: CORRENTE DE MAGNETIZAÇÃO, FASE A.....	170
FIGURA 138 – ENERGIZAÇÃO DE TRANSFORMADOR: CORRENTE DE MAGNETIZAÇÃO, FASE A, COM AMPLIAÇÃO DA FAIXA DE VISUALIZAÇÃO	171
FIGURA 139 – ENERGIZAÇÃO DE TRANSFORMADOR: CORRENTE DE MAGNETIZAÇÃO, FASE B.....	171
FIGURA 140 – ENERGIZAÇÃO DE TRANSFORMADOR: CORRENTE DE MAGNETIZAÇÃO, FASE B, COM AMPLIAÇÃO DA FAIXA DE VISUALIZAÇÃO	172
FIGURA 141 – ENERGIZAÇÃO DE TRANSFORMADOR: CORRENTE DE MAGNETIZAÇÃO, FASE C.....	172

FIGURA 142 – ENERGIZAÇÃO DE TRANSFORMADOR: CORRENTE DE MAGNETIZAÇÃO, FASE C, COM AMPLIAÇÃO DA FAIXA DE VISUALIZAÇÃO	173
FIGURA 143 – DIAGRAMA UNILIFAR NO ATP: ENERGIZAÇÃO DE TRANSFORMADORES COM COMPENSAÇÃO REATIVA DE 80%..	174
FIGURA 144 – ENERGIZAÇÃO DE TRANSFORMADOR COM LT COMPENSADA EM 80%: TENSÃO NA BARRA 16, FASE A	175
FIGURA 145 – ENERGIZAÇÃO DE TRANSFORMADOR COM LT COMPENSADA EM 80%: TENSÃO NA BARRA 16, FASE A, COM AMPLIAÇÃO DA FAIXA DE VISUALIZAÇÃO.....	175
FIGURA 146 – ENERGIZAÇÃO DE TRANSFORMADOR COM LT COMPENSADA EM 80%: TENSÃO NA BARRA 16, FASE B	176
FIGURA 147 – ENERGIZAÇÃO DE TRANSFORMADOR COM LT COMPENSADA EM 80%: TENSÃO NA BARRA 16, FASE B, COM AMPLIAÇÃO DA FAIXA DE VISUALIZAÇÃO.....	176
FIGURA 148 – ENERGIZAÇÃO DE TRANSFORMADOR COM LT COMPENSADA EM 80%: TENSÃO NA BARRA 16, FASE C	177
FIGURA 149 – ENERGIZAÇÃO DE TRANSFORMADOR COM LT COMPENSADA EM 80%: TENSÃO NA BARRA 16, FASE C, COM AMPLIAÇÃO DA FAIXA DE VISUALIZAÇÃO.....	177
FIGURA 150 – ENERGIZAÇÃO DE TRANSFORMADOR COM LT COMPENSADA EM 80%: COMPONENTES REAL E IMAGINÁRIA DOS FASORES DE TENSÃO DA FASE A.....	178
FIGURA 151 – ENERGIZAÇÃO DE TRANSFORMADOR COM LT COMPENSADA EM 80%: COMPONENTES REAL E IMAGINÁRIA DOS FASORES DE TENSÃO DA FASE B.....	178
FIGURA 152 – ENERGIZAÇÃO DE TRANSFORMADOR COM LT COMPENSADA EM 80%: COMPONENTES REAL E IMAGINÁRIA DOS FASORES DE TENSÃO DA FASE C.....	179
FIGURA 153 – DIAGRAMA UNIFILAR NO ATP: RELIGAMENTO TRIPOLAR	180
FIGURA 154 – RELIGAMENTO TRIPOLAR: SEQUÊNCIA DE OPERAÇÕES	182
FIGURA 155 – RELIGAMENTO TRIPOLAR DE LT: TENSÃO NO TERMINAL 91 DA LT, FASE A	183
FIGURA 156 – RELIGAMENTO TRIPOLAR DE LT: TENSÃO NO TERMINAL 91 DA LT, FASE A, COM AMPLIAÇÃO DA FAIXA DE VISUALIZAÇÃO NA ABERTURA DA LINHA.....	183
FIGURA 157 – RELIGAMENTO TRIPOLAR DE LT: TENSÃO NO TERMINAL 91 DA LT, FASE A, COM AMPLIAÇÃO DA FAIXA DE VISUALIZAÇÃO NO FECHAMENTO DA LINHA	184
FIGURA 158 – RELIGAMENTO TRIPOLAR DE LT: TENSÃO NO TERMINAL 91 DA LT, FASE B	184
FIGURA 159 – RELIGAMENTO TRIPOLAR DE LT: TENSÃO NO TERMINAL 91 DA LT, FASE C.....	185
FIGURA 160 – RELIGAMENTO TRIPOLAR DE LT: TENSÃO NO TERMINAL 81 DA LT, FASE A	185
FIGURA 161 – RELIGAMENTO TRIPOLAR DE LT: TENSÃO NO TERMINAL 81 DA LT, FASE B	186
FIGURA 162 – RELIGAMENTO TRIPOLAR DE LT: TENSÃO NO TERMINAL 81 DA LT, FASE C.....	186
FIGURA 163 – DIAGRAMA UNILIFAR NO ATP: RELIGAMENTO MONOPOLAR	187
FIGURA 164 – RELIGAMENTO MONOPOLAR: SEQUÊNCIA DE OPERAÇÕES.....	188
FIGURA 165 – RELIGAMENTO MONOPOLAR DE LT: TENSÃO NO TERMINAL 91 DA LT, FASE A	189
FIGURA 166 – RELIGAMENTO MONOPOLAR DE LT: TENSÃO NO TERMINAL 91 DA LT, FASE A, COM AMPLIAÇÃO DA FAIXA DE VISUALIZAÇÃO NA ABERTURA DA LINHA.....	189
FIGURA 167 – RELIGAMENTO MONOPOLAR DE LT: TENSÃO NO TERMINAL 91 DA LT, FASE A, COM AMPLIAÇÃO DA FAIXA DE VISUALIZAÇÃO NO FECHAMENTO DA LINHA	190
FIGURA 168 – RELIGAMENTO MONOPOLAR DE LT: TENSÃO NO TERMINAL 81 DA LT, FASE A	190
FIGURA 169 – ESTUDO DO ARCO SECUNDÁRIO.....	191
FIGURA 170 – CURVA PROBABILÍSTICA DO ARCO SECUNDÁRIO. ADAPTADO DE [6]	192
FIGURA 171 –CORRENTE DE ARCO SECUNDÁRIO	192
FIGURA 172 – PRIMEIRO PICO DE TRT	193
FIGURA 173 – CURVA PROBABILÍSTICA DO ARCO SECUNDÁRIO APLICADO AO CASO EM ESTUDO.....	193
FIGURA 174 – DIAGRAMA UNILIFAR NO ATP: ENERGIZAÇÃO DE BANCO DE CAPACITORES	194
FIGURA 175 – ENERGIZAÇÃO DE BANCO DE CAPACITORES: TENSÃO NA BARRA 15, FASE A	195
FIGURA 176 – ENERGIZAÇÃO DE BANCO DE CAPACITORES: TENSÃO NA BARRA 15, FASE A, COM AMPLIAÇÃO DA FAIXA DE VISUALIZAÇÃO	195
FIGURA 177 – ENERGIZAÇÃO DE BANCO DE CAPACITORES: TENSÃO NA BARRA 15, FASE B	196
FIGURA 178 – ENERGIZAÇÃO DE BANCO DE CAPACITORES: TENSÃO NA BARRA 15, FASE B, COM AMPLIAÇÃO DA FAIXA DE VISUALIZAÇÃO	196
FIGURA 179 – ENERGIZAÇÃO DE BANCO DE CAPACITORES: TENSÃO NA BARRA 15, FASE C	197
FIGURA 180 – ENERGIZAÇÃO DE BANCO DE CAPACITORES: TENSÃO NA BARRA 15, FASE C, COM AMPLIAÇÃO DA FAIXA DE VISUALIZAÇÃO	197
FIGURA 181 – DIAGRAMA UNILIFAR NO ATP: TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIA	198
FIGURA 182 – DIAGRAMA UNILIFAR NO ATP: TRT (DETALHADO)	199
FIGURA 183 – TRT: CORRENTE NO DISJUNTOR NO LADO DO DEFEITO MONOFÁSICO.....	200

FIGURA 184 – TRT: CORRENTE SIMÉTRICA NO DISJUNTOR NO LADO DO DEFEITO MONOFÁSICO.....	200
FIGURA 185 – TRT: TENSÕES NO DISJUNTOR (DEFEITO MONOFÁSICO)	202
FIGURA 186 –INTERFACE DA PLANILHA CRIAENVTRT.XLSM PARA A OPERAÇÃO MONOPOLAR	203
FIGURA 187 – TRT E ENVOLTÓRIA T30: TENSÃO NA FASE A (DEFEITO MONOFÁSICO).....	204
FIGURA 188 – TRT E ENVOLTÓRIA T30: TENSÃO NA FASE A COM FAIXA AMPLIADA DE VISUALIZAÇÃO (DEFEITO MONOFÁSICO).....	204
FIGURA 189 – TRT E ENVOLTÓRIA T30: TENSÃO NA FASE B (DEFEITO MONOFÁSICO).....	205
FIGURA 190 – TRT E ENVOLTÓRIA T30: TENSÃO NA FASE B COM FAIXA AMPLIADA DE VISUALIZAÇÃO (DEFEITO MONOFÁSICO).....	205
FIGURA 191 – TRT E ENVOLTÓRIA T30: TENSÃO NA FASE C (DEFEITO MONOFÁSICO).....	206
FIGURA 192 – TRT E ENVOLTÓRIA T30: TENSÃO NA FASE C COM FAIXA AMPLIADA DE VISUALIZAÇÃO (DEFEITO MONOFÁSICO).....	206
FIGURA 193 – TRT: CORRENTE NO DISJUNTOR NO LADO DO DEFEITO TRIFÁSICO.....	207
FIGURA 194 – TRT: CORRENTE SIMÉTRICA NO DISJUNTOR NO LADO DO DEFEITO TRIFÁSICO.....	208
FIGURA 195 – TRT: TENSÕES NO DISJUNTOR (DEFEITO TRIFÁSICO)	209
FIGURA 196 – INTERFACE DA PLANILHA CRIAENVTRT.XLSM PARA A OPERAÇÃO TRIPOLAR	210
FIGURA 197 – TRT E ENVOLTÓRIA T30: TENSÃO NA FASE A (DEFEITO TRIFÁSICO).....	211
FIGURA 198 – TRT E ENVOLTÓRIA T30: TENSÃO NA FASE A COM FAIXA AMPLIADA DE VISUALIZAÇÃ (DEFEITO TRIFÁSICO)	211
FIGURA 199 – TRT E ENVOLTÓRIA T30: TENSÃO NA FASE B (DEFEITO TRIFÁSICO).....	212
FIGURA 200 – TRT E ENVOLTÓRIA T30: TENSÃO NA FASE B COM FAIXA AMPLIADA DE VISUALIZAÇÃ (DEFEITO TRIFÁSICO).....	212
FIGURA 201 – TRT E ENVOLTÓRIA T30: TENSÃO NA FASE C (DEFEITO TRIFÁSICO).....	213
FIGURA 202 – TRT E ENVOLTÓRIA T30: TENSÃO NA FASE B COM FAIXA AMPLIADA DE VISUALIZAÇÃ (DEFEITO TRIFÁSICO).....	213
FIGURA 203 – RESUMO DOS RESULTADOS ESTATÍSTICOS.....	218
FIGURA 204 – MEDIÇÕES PARA OS RESULTADOS ESTATÍSTICOS.....	218
FIGURA 205 – IDENTIFICAÇÃO DOS ELEMENTOS DAS CURVAS DE OCORRÊNCIA PERCENTUAL	220
FIGURA 206 – SIMULAÇÃO COM 200 CASOS SEM DISTRIBUIÇÃO UNIFORME: SORTEIO DA FASE A DA CHAVE	221
FIGURA 207 – SIMULAÇÃO COM 200 CASOS SEM DISTRIBUIÇÃO UNIFORME: SORTEIO DA FASE B DA CHAVE	222
FIGURA 208 – SIMULAÇÃO COM 200 CASOS SEM DISTRIBUIÇÃO UNIFORME: SORTEIO DA FASE C DA CHAVE	223
FIGURA 209 – SIMULAÇÃO COM 200 CASOS SEM DISTRIBUIÇÃO UNIFORME: SOBRETENSÕES MÁXIMAS NA BARRA 15	224
FIGURA 210 – SIMULAÇÃO COM 1000 CASOS SEM DISTRIBUIÇÃO UNIFORME: SORTEIO DA FASE A DA CHAVE	225
FIGURA 211 – SIMULAÇÃO COM 1000 CASOS SEM DISTRIBUIÇÃO UNIFORME: SORTEIO DA FASE B DA CHAVE	226
FIGURA 212 – SIMULAÇÃO COM 1000 CASOS SEM DISTRIBUIÇÃO UNIFORME: SORTEIO DA FASE C DA CHAVE	227
FIGURA 213 – SIMULAÇÃO COM 1000 CASOS SEM DISTRIBUIÇÃO UNIFORME: SOBRETENSÕES MÁXIMAS NA BARRA 15	228
FIGURA 214 – SIMULAÇÃO COM 200 CASOS COM DISTRIBUIÇÃO UNIFORME: SORTEIO DA FASE A DA CHAVE	229
FIGURA 215 – SIMULAÇÃO COM 200 CASOS COM DISTRIBUIÇÃO UNIFORME: SORTEIO DA FASE B DA CHAVE	230
FIGURA 216 – SIMULAÇÃO COM 200 CASOS COM DISTRIBUIÇÃO UNIFORME: SORTEIO DA FASE C DA CHAVE.....	231
FIGURA 217 – SIMULAÇÃO COM 200 CASOS COM DISTRIBUIÇÃO UNIFORME: SOBRETENSÕES MÁXIMAS NA BARRA 15	232
FIGURA 218 – SIMULAÇÃO COM 1000 CASOS COM DISTRIBUIÇÃO UNIFORME: SORTEIO DA FASE A DA CHAVE	233
FIGURA 219 – SIMULAÇÃO COM 1000 CASOS COM DISTRIBUIÇÃO UNIFORME: SORTEIO DA FASE B DA CHAVE	234
FIGURA 220 – SIMULAÇÃO COM 1000 CASOS COM DISTRIBUIÇÃO UNIFORME: SORTEIO DA FASE C DA CHAVE	235
FIGURA 221 – SIMULAÇÃO COM 1000 CASOS COM DISTRIBUIÇÃO UNIFORME: SOBRETENSÕES MÁXIMAS NA BARRA 15	236
FIGURA 222 –DIAGRAMA UNIFILAR DO SISTEMA DUAS BARRAS NO ANAREDE	244
FIGURA 223 – PARÂMETROS DE SEQUÊNCIA POSITIVA DA LINHA DE TRANSMISSÃO	244
FIGURA 224 – COORDENADAS x e y DOS CABOS CONDUTORES E PARA-RAIOS	245
FIGURA 225 – DIAGRAMA UNIFILAR DO SISTEMA DUAS BARRAS NO ATP.....	245
FIGURA 226 – PADRONIZAÇÃO DE CORES DA LEGENDA PARA OS CASOS LTBINF PARA OS CASOS COM TRANSPOSIÇÃO IDEAL	246
FIGURA 227 – TENSÕES NA BARRA 1 – CASO COM TRANSPOSIÇÃO IDEAL	247
FIGURA 228 – TENSÕES NA BARRA 2 – CASO COM TRANSPOSIÇÃO IDEAL	247
FIGURA 229 – CORRENTES NOS TERMINAIS DA LT – CASO COM TRANSPOSIÇÃO IDEAL.....	248
FIGURA 230 – PADRONIZAÇÃO DE CORES DA LEGENDA PARA OS CASOS LTBINF PARA OS CASOS DESBALANCEADOS	248
FIGURA 231 – TENSÕES NA BARRA1 – CASO DESBALANCEADO.....	249
FIGURA 232 – TENSÕES NA BARRA2 – CASO DESBALANCEADO	249
FIGURA 233 – CORRENTES NOS TERMINAIS DA LT – CASO DESBALANCEADO.....	249
FIGURA 234 –DIAGRAMA UNIFILAR DO CASO DE RELIGAMENTO NO ATP.....	251
FIGURA 235 – COMPARAÇÃO PRELIMINAR ANAHVDC (DLTCFG) VERSUS ANAHVDC (ANAREDE)	253
FIGURA 236 – CASO ANAHVDC COM CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA <i>VERSUS</i> ANAHVDC: TENSÃO NA BARRA 3, FASE A.....	254
FIGURA 237 – CASO ANAHVDC COM CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA <i>VERSUS</i> ANAHVDC: TENSÃO NA BARRA 3, FASE B.....	254
FIGURA 238 – CASO ANAHVDC COM CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA <i>VERSUS</i> ANAHVDC: TENSÃO NA BARRA 3, FASE C.....	255
FIGURA 239 – CASO ANAHVDC COM CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA <i>VERSUS</i> ANAHVDC: TENSÃO NA BARRA 4, FASE A.....	255

FIGURA 240 – CASO ANAHVDC COM CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA <i>VERSUS</i> ANAHVDC: TENSÃO NA BARRA 4, FASE B	256
FIGURA 241 – CASO ANAHVDC COM CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA <i>VERSUS</i> ANAHVDC: TENSÃO NA BARRA 4, FASE C	256
FIGURA 242 – CASO ANAHVDC COM CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA <i>VERSUS</i> ANAHVDC: CORRENTE DE DEFEITO, FASE A ...	257
FIGURA 243 – FLUXOGRAMA DECOMPOSIÇÃO MODAL	258
FIGURA 244 – EXECUÇÃO DO CASO DESBALANCEADO NO ATP	258
FIGURA 245 – CASO COM LINHA DESBALANCEADA: TENSÃO NA BARRA 3, FASE A	259
FIGURA 246 – CASO COM LINHA DESBALANCEADA: TENSÃO NA BARRA 3, FASE B	259
FIGURA 247 – CASO COM LINHA DESBALANCEADA: TENSÃO NA BARRA 3, FASE C	259
FIGURA 248 – CASO COM LINHA DESBALANCEADA: TENSÃO NA BARRA 4, FASE A	260
FIGURA 249 – CASO COM LINHA DESBALANCEADA: TENSÃO NA BARRA 4, FASE B	260
FIGURA 250 – CASO COM LINHA DESBALANCEADA: TENSÃO NA BARRA 4, FASE C	260
FIGURA 251 – CASO COM LINHA DESBALANCEADA: CORRENTE DE DEFEITO, FASE A.....	261
FIGURA 252 – CASO COM LINHA DESBALANCEADA: TENSÕES NA BARRA 3	261
FIGURA 253 –DIAGRAMA UNIFILAR DO CASO ENERGLT NO ATP: CASO BASE	262
FIGURA 254 –DIAGRAMA UNIFILAR DO CASO ENERGLT NO PSCAD: CASO BASE	262
FIGURA 255 –DIAGRAMA UNIFILAR DO CASO ENERGLT NO ATP: TOPOLOGIA COM UM TRECHO DE TRANSPOSIÇÃO NA ORDEM BCA.....	262
FIGURA 256 –DIAGRAMA UNIFILAR DO CASO ENERGLT NO PSCAD: TOPOLOGIA COM UM TRECHO DE TRANSPOSIÇÃO NA ORDEM BCA.....	263
FIGURA 257 –DIAGRAMA UNIFILAR DO CASO ENERGLT NO ATP: TOPOLOGIA COM TRANSPOSIÇÃO COMPLETA NA ORDEM BCA	263
FIGURA 258 –DIAGRAMA UNIFILAR DO CASO ENERGLT NO PSCAD: TOPOLOGIA COM TRANSPOSIÇÃO COMPLETA NA ORDEM BCA	263
FIGURA 259 – PADRONIZAÇÃO DE CORES DA LEGENDA PARA OS CASOS ENERGLT COM A LINHA DADA PELA CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA.....	265
FIGURA 260 – TENSÕES NO TERMINAL RECEPTOR DA LINHA PARA O CASO DESBALANCEADO SEM TRANSPOSIÇÃO	265
FIGURA 261 – TENSÕES NO TERMINAL RECEPTOR DA LINHA PARA O CASO DESBALANCEADO SEM TRANSPOSIÇÃO COM AMPLIAÇÃO DA VISUALIZAÇÃO.....	265
FIGURA 262 – TENSÕES NO TERMINAL RECEPTOR DA LINHA PARA O CASO EQUILIBRADO COM TRANSPOSIÇÃO IDEAL	266
FIGURA 263 – TENSÕES NO TERMINAL RECEPTOR DA LINHA PARA O CASO EQUILIBRADO COM TRANSPOSIÇÃO IDEAL COM AMPLIAÇÃO DA VISUALIZAÇÃO	266
FIGURA 264 – TENSÕES NO TERMINAL RECEPTOR DA LINHA PARA O CASO COM UM TRECHO DE TRANSPOSIÇÃO NO SENTIDO BCA	267
FIGURA 265 – TENSÕES NO TERMINAL RECEPTOR DA LINHA PARA O CASO COM UM TRECHO DE TRANSPOSIÇÃO NO SENTIDO BCA COM AMPLIAÇÃO DA VISUALIZAÇÃO	267
FIGURA 266 – TENSÕES NO TERMINAL RECEPTOR DA LINHA PARA O CASO COM UM TRECHO DE TRANSPOSIÇÃO NO SENTIDO CAB	268
FIGURA 267 – TENSÕES NO TERMINAL RECEPTOR DA LINHA PARA O CASO COM UM TRECHO DE TRANSPOSIÇÃO NO SENTIDO CAB COM AMPLIAÇÃO DA VISUALIZAÇÃO	268
FIGURA 268 – TENSÕES NO TERMINAL RECEPTOR DA LINHA PARA COM TRANSPOSIÇÃO FINITA COMPLETA NAS PROPORÇÕES DE 20%, 30%, 40% E 10% NO SENTIDO BCA	269
FIGURA 269 – TENSÕES NO TERMINAL RECEPTOR DA LINHA PARA COM TRANSPOSIÇÃO FINITA COMPLETA NAS PROPORÇÕES DE 20%, 30%, 40% E 10% NO SENTIDO BCA COM AMPLIAÇÃO DA VISUALIZAÇÃO	269
FIGURA 270 – TENSÕES NO TERMINAL RECEPTOR DA LINHA PARA COM TRANSPOSIÇÃO FINITA COMPLETA NAS PROPORÇÕES DE 20%, 30%, 40% E 10% NO SENTIDO CAB	270
FIGURA 271 – TENSÕES NO TERMINAL RECEPTOR DA LINHA PARA COM TRANSPOSIÇÃO FINITA COMPLETA NAS PROPORÇÕES DE 20%, 30%, 40% E 10% NO SENTIDO CAB COM AMPLIAÇÃO DA VISUALIZAÇÃO	270
FIGURA 272 – TENSÕES NO TERMINAL RECEPTOR DA LINHA PARA COM TRANSPOSIÇÃO FINITA COMPLETA NAS PROPORÇÕES DE 1/6, 1/3, 1/3 E 1/6 NO SENTIDO BCA	271
FIGURA 273 – TENSÕES NO TERMINAL RECEPTOR DA LINHA PARA COM TRANSPOSIÇÃO FINITA COMPLETA NAS PROPORÇÕES DE 1/6, 1/3, 1/3 E 1/6 NO SENTIDO BCA COM AMPLIAÇÃO DA VISUALIZAÇÃO	271
FIGURA 274 – TENSÕES NO TERMINAL RECEPTOR DA LINHA PARA COM TRANSPOSIÇÃO FINITA COMPLETA NAS PROPORÇÕES DE 1/6, 1/3, 1/3 E 1/6 NO SENTIDO CAB	272
FIGURA 275 – TENSÕES NO TERMINAL RECEPTOR DA LINHA PARA COM TRANSPOSIÇÃO FINITA COMPLETA NAS PROPORÇÕES DE 1/6, 1/3, 1/3 E 1/6 NO SENTIDO CAB COM AMPLIAÇÃO DA VISUALIZAÇÃO	272
FIGURA 276 – CÁLCULO DA TENSÃO INTERNA DE UMA DETERMINA BARRA	287

FIGURA 277 – ANÁLISE DA TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIA	301
FIGURA 278 – ENVOLTÓRIAS T10 E T30	302
FIGURA 279 – INTERFACE DA PLANILHA “CRIAENVTRT_PLT.XLSM”	303
FIGURA 280 – FORMULÁRIO PARA CRIAÇÃO DE ENVOLTÓRIAS.....	305
FIGURA 281 – ESCOLHA DO NÍVEL DE TENSÃO.....	306
FIGURA 282 – ESCOLHA DO TIPO DE DEFEITO.....	307
FIGURA 283 – ESCOLHA DO TIPO DE ENVOLTÓRIA.....	308
FIGURA 284 – DADOS DE SIMULAÇÃO.....	309
FIGURA 285 – FUNCIONALIDADES DA PLANILHA	310
FIGURA 286 – PLT GERADO A PARTIR DA PLANILHA	310
FIGURA 287 – CURVAS GERADAS PARA NÍVEL DE TENSÃO DE 500KV	311
FIGURA 288 – RESULTADOS DA REDUÇÃO MATRICIAL DE PARA-RAIOS.....	321

Lista de Tabelas

TABELA 1 – RESUMO DO VALOR MÁXIMO FASE-TERRA PARA DIFERENTES TIPOS DE MANOBRA. ADAPTADO DE [3]	44
TABELA 2 – EQUAÇÕES NO DOMÍNIO DE FASES <i>VERSUS</i> DOMÍNIO MODAL	83
TABELA 3 – EQUAÇÕES DO MODELO DE LT	91
TABELA 4 – PICO DE TENSÃO E ERRO PERCENTUAL ANAHVDC <i>VERSUS</i> ATP	97
TABELA 5 – CRUZAMENTO POR ZERO ANAHVDC <i>VERSUS</i> ATP	98
TABELA 6 – NÚMERO DE EXTREMOS LOCAIS NAS SIMULAÇÕES	108
TABELA 7 – MÍNIMOS E MÁXIMOS POR FAIXA DE VISUALIZAÇÃO	110
TABELA 8 – ERRO NO CASO ENERGLT.ACP E SUAS VARIAÇÕES	113
TABELA 9 - FORMATAÇÃO DO ARQUIVO DE SAÍDA REPORT.TXT	121
TABELA 10 - CURVA I <i>VERSUS</i> V DO PARA-RAIOS DO SISTEMA EXEMPLO ENERGLT	124
TABELA 11 - CURVA I <i>VERSUS</i> Φ DA MAGNETIZAÇÃO DO SISTEMA EXEMPLO ENERGRAFO	130
TABELA 12 – PONTO DE OPERAÇÃO DO CASO BASE BENCHCA	145
TABELA 13 – PARÂMETROS DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO DO CASO BASE BENCHCA	145
TABELA 14 – DADOS DE IMPEDÂNCIA DAS UNIDADES GERADORAS DO CASO BASE BENCHCA	146
TABELA 15 – DADOS DOS TRANSFORMADORES DO CASO BASE BENCHCA	146
TABELA 16 – DADOS DOS ELEMENTOS <i>SHUNT</i> DO CASO BASE BENCHCA	146
TABELA 17 – PARÂMETROS NOMINAIS DA LINHA DE TRANSMISSÃO DE 300KM NO ATP	151
TABELA 18 – PARÂMETROS CORRIGIDOS HIPERBOLICAMENTE DA LINHA DE TRANSMISSÃO DE 300KM NO FORMATO ANAREDE/ANAFAS.	151
TABELA 19 – ENERGIZAÇÃO DE LT: MITIGAÇÃO DAS SOBRETENSÕES COM USO DO PARA-RAIOS	164
TABELA 20 – PARÂMETROS CORRIGIDOS HIPERBOLICAMENTE DA LINHA DE TRANSMISSÃO DE 300KM NO FORMATO ANAREDE/ANAFAS.	174
TABELA 21 – TEMPOS INICIAIS DAS ENVOLTÓRIAS (DEFEITO MONOFÁSICO)	202
TABELA 22 – TEMPOS INICIAIS DAS ENVOLTÓRIAS (DEFEITO TRIFÁSICO)	209
TABELA 23 – CASO ESTATÍSTICO: VARIAÇÃO DO NÚMERO DE PROCESSOS	214
TABELA 24 – CASO ESTATÍSTICO: VARIAÇÃO DO NÚMERO DE CASOS SEM DISTRIBUIÇÃO UNIFORME	215
TABELA 25 – CASO ESTATÍSTICO: VARIAÇÃO DO NÚMERO DE CASOS COM DISTRIBUIÇÃO UNIFORME	216
TABELA 26 – CASO ESTATÍSTICO ATP (TENSÕES EM PU): RESULTADOS COM 5 CASOS	242
TABELA 27 – CASO ESTATÍSTICO ANAHVDC: RESULTADOS COM 5 CASOS	242
TABELA 28 – COMPARAÇÃO ATP <i>VERSUS</i> ANAHVDC: RESULTADOS COM 5 CASOS	242
TABELA 29 – OPÇÕES DE TRANSPOSIÇÃO PARA O CASO ENERGLT COM CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA	264
TABELA 30 – DADOS DA BARRA 6	292
TABELA 31 – DADOS DE CARGA DO ANAREDE CONVERTIDOS	293
TABELA 32 – DADOS DE IMPEDÂNCIA (EM PU E PERCENTUAL)	294
TABELA 33 – DADOS DE ENTRADA PARA A CONVERSÃO PARA PARÂMETROS DE SEQUÊNCIA POSITIVA E ZERO	296
TABELA 34 – DADOS DA ENVOLTÓRIA PARA NÍVEIS DE TENSÃO DE 100kV ATÉ 800kV	303
TABELA 35 – TABELA DE VARIÁVEIS PARA O CÁLCULO DA MATRIZ DE IMPEDÂNCIA	313
TABELA 36 – TABELA DE VARIÁVEIS PARA O CÁLCULO DA MATRIZ DE POTENCIAL	316

Sumário

Capítulo 1 - Introdução	3
1.1 Motivação	9
1.2 Objetivo	11
1.3 Contribuições pretendidas	12
1.4 Revisão bibliográfica	13
1.4.1 Modelo de acompanhamento e fasores dinâmicos	13
1.4.2 Modelagem de para-raios	15
1.4.3 Modelagem da magnetização de transformadores	17
1.4.4 Modelagem de linhas de transmissão.....	18
1.5 Publicações da Tese	19
1.6 Estrutura do trabalho	21
Capítulo 2 - Conceituação teórica	22
2.1 Circuito RL modelado por fasores dinâmicos	22
2.2 Simulação de transitórios eletromagnéticos usando fasores dinâmicos	32
2.2.1 Modelo de acompanhamento para linha de transmissão.....	32
2.2.2 Modelo de acompanhamento linearizado genérico para equipamentos não lineares	39
2.3 Transitórios eletromagnéticos de manobra	42
Capítulo 3 - Metodologia proposta	45
3.1 Metodologia fasorial para simulação de transitórios eletromagnéticos de manobra	45
3.2 Modelo fasorial do para-raios	47
3.2.1 Cálculo de potência e energia do para-raios.....	58
3.3 Modelo fasorial da magnetização de transformadores	60
3.4 Modelo da linha de transmissão com configuração geométrica	72
3.5 Caracterização do termo visualmente coincidente	93
3.5.1.1 Análise do erro: uma primeira abordagem.....	93
3.5.1.2 Proposta de ajuste do cálculo do erro: deslocamento temporal da medição	100
3.5.1.3 A questão do defasamento: uma análise em regime permanente.....	103
3.5.1.4 Proposta de métrica de análise de erro: comparação dos mínimos e máximos locais	107
3.5.1.5 Proposta de métrica de análise de erro: erro relativo na integral média quadrática da curva.....	111

3.5.1.6	Erro relativo na integral média quadrática: caso energLT	112
3.6	Análise estatística	116
Capítulo 4 - Resultados	122
4.1	Casos preliminares.....	123
4.1.1	Energização de linha de transmissão.....	123
4.1.2	Energização de transformador.....	129
4.2	Caso “BenchCA”.....	138
4.2.1	Caso base – ATP e AnaHVDC	138
4.2.2	Energização de linha de transmissão.....	150
4.2.2.1	Inclusão do modelo do para-raios	155
4.2.3	Energização de transformador.....	165
4.2.4	Religamento de linha de transmissão	180
4.2.4.1	Religamento tripolar.....	180
4.2.4.2	Religamento monopolar	187
4.2.4.3	Estudo do arco secundário.....	191
4.2.5	Energização de banco de capacitores	194
4.2.6	Estudo da tensão de restabelecimento transitória.....	198
4.2.6.1	Tensão de restabelecimento transitória com defeito monofásico.....	199
4.2.6.2	Tensão de restabelecimento transitória com defeito trifásico	207
4.3	Caso “BenchCA” estatístico: energização de linha de transmissão	214
4.3.1	Simulação com 200 sorteios sem distribuição uniforme.....	221
4.3.2	Simulação com 1000 sorteios sem distribuição uniforme.....	225
4.3.3	Simulação com 200 sorteios com distribuição uniforme	229
4.3.4	Simulação com 1000 sorteios com distribuição uniforme	233
4.3.1	Métrica de ajuste do modelo	237
4.3.2	Comparação da análise estatística	241
4.4	Resultados da linha de transmissão modelada com configuração geométrica	243
4.4.1	Sistema duas barras utilizado para validação preliminar	244
4.4.2	Simulação AnaHVDC (com configuração geométrica) versus AnaHVDC....	250
4.4.3	Simulação considerando a linha desequilibrada.....	257
4.4.4	Simulação AnaHVDC (com configuração geométrica) <i>versus</i> ATP.....	262
Capítulo 5 - Conclusão	273
5.1	Considerações	273
5.2	Conclusões	274
5.3	Trabalhos Futuros	275
Capítulo 6 - Bibliografia	276

Apêndice A – Entrada de dados: “BenchCA”	286
Apêndice B – Ajuste da tensão interna das fontes modeladas como barras infinitas	287
Apêndice C – Ajuste das cargas	291
Apêndice D – Conversão de dados no formato ANAREDE/ANAFAS para o ATP..	294
Apêndice E – Conversão de parâmetros nominais de linha de transmissão para parâmetros de sequência.....	296
Apêndice F – Planilha “criaEnvTRT_PLT.xlsm”	301
Apêndice G – Entrada de dados: “BenchCA” estatístico	312
Anexo A – Cálculo da matriz de impedância	313
Anexo B – Cálculo da matriz de potencial	316
Anexo C – Redução matricial	318

Siglas e Abreviações

ANAFAS	Programa de Análise de Falhas Simultâneas
AnaHVDC	Programa de simulação de sistemas de potência considerando simultaneamente os transitórios eletromecânicos e eletromagnéticos e a presença de elos de corrente contínua
ANAREDE	Programa de Análise de Redes Elétricas
ANATEM	Programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos
ATP	<i>Alternative Transient Program – programa gratuito de simulação de transitórios eletromagnéticos</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CCAT	Corrente Contínua em Alta Tensão
CCC	<i>Capacitor Commutated Converter</i>
CDU	Controlador Definido pelo Usuário
CER	Compensador Estático de Reativos
EMC	Eletromecânico
EMT	Eletromagnético
EMTP	<i>Eletromagnetic Transient Program</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FACTS	<i>Flexible AC Transmission System</i>
FDNE	<i>Frequency Dependent Network Equivalent</i>
GIDA	Gerador de Indução Duplamente Alimentado
LCC	<i>Line Commutated Converter</i>
LT	Linha de Transmissão
MLA	Modelo Linearizado de Acompanhamento
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PLL	<i>Phase-Locked Loop</i>

PSCAD	<i>Power System Computer Aided Design – programa comercial de simulação de transitórios eletromagnéticos</i>
RSS	Ressonância Subssíncrona
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional
TRT	Tensão de Restabelecimento Transitória
VSC	<i>Voltage Source Converter</i>

Capítulo 1 - Introdução

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) é constituído por centrais elétricas, subestações e diversos equipamentos, ligados eletricamente entre si e que englobam a geração, transmissão e distribuição. Na maior parte do tempo, o SEP opera em condições de regime permanente. No entanto, diversos eventos podem ocasionar os denominados transitórios no sistema.

De forma geral, os problemas de regime permanente - como sobrecarga de equipamentos, regulação de tensão e distorção harmônica devido a equipamentos que utilizam componentes não lineares, a exemplo de equipamentos de eletrônica de potência, fontes chaveadas, forno de arco elétrico e carregadores de bateria - são de mais fácil identificação não só em simulações, que envolvem programas computacionais, como no campo, pela monitoração dos operadores, que podem corrigir situações inesperadas.

Por outro lado, os problemas transitórios nem sempre são de fácil identificação, seja nos simuladores dinâmicos ou em campo, com o agravante de muitas vezes não permitirem a ação dos operadores, por ocorrerem em um curto espaço de tempo. Além disso, normalmente trazem um grau de severidade muito maior, mesmo ocorrendo por um curto período, podendo levar à queima de equipamentos ou desligamentos, que, em casos extremos, podem gerar blecautes. Os transitórios, por sua vez, podem ser divididos em duas categorias: eletromecânicos (EMC) e eletromagnéticos (EMT).

Os transitórios eletromecânicos estão relacionados com as variações de velocidade das máquinas síncronas em resposta a distúrbios no sistema elétrico, principalmente provocados por curto-circuito. Podem causar problemas de perda de estabilidade por perda de sincronismo ou por ampliação de oscilações [1].

Em contrapartida, os transitórios eletromagnéticos são causados pela troca de energia elétrica e magnética entre as capacitâncias e indutâncias da rede elétrica, a exemplo dos transformadores e das linhas de transmissão. No caso das linhas de transmissão, o comportamento é influenciado pelos parâmetros elétricos distribuídos, que são modelados ao longo de seu comprimento. Esses parâmetros longitudinais, por sua vez, podem ser modelados considerando a dependência com a frequência, o que torna o modelo matemático da linha mais complexo e propício para análises em altas frequências. [2]. Os transitórios eletromagnéticos podem provocar problemas de sobretensões elevadas; sobrecorrentes elevadas ou pouco amortecidas, principalmente durante energizações

(corrente de “*inrush*”); e nível de energia acima da capacidade de absorção dos para-raios, que são os principais elementos de redução de sobretensões para evitar queima de equipamentos. Outrossim, podem ser provocados por descargas atmosféricas ou por chaveamentos (manobras) na rede elétrica, sendo que são utilizados análises e modelos distintos de para-raios para cada caso [2] e [3].

Os transitórios eletromagnéticos de manobra, que são o foco deste trabalho, são aqueles que estão relacionados aos chaveamentos dos equipamentos de manobra ou a variações bruscas na rede, como, por exemplo, os curtos-circuitos. Os estudos de transitórios de manobra, no que lhe concernem, subsidiam as especificações de equipamentos, o dimensionamento do isolamento em linhas de transmissão e subestações, além de permitir verificar potenciais situações de risco aos equipamentos durante sua operação.

No contexto do Sistema Interligado Nacional (SIN), tais estudos situam-se no âmbito do planejamento – realizados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), com o Relatório R2 [4] – ou no âmbito da operação – realizados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) [5], nos estudos de acesso, de superação de equipamentos e no projeto básico de instalações de transmissão.

Os principais transitórios de manobra descritos pela literatura [2], [3] e [6] são: energização de linha de transmissão; religamento (monopolar e tripolar) de linhas de transmissão; rejeição de carga; energização de capacitores e reatores; curtos-circuitos; energização de transformadores, e tensão de restabelecimento transitória (TRT). Atualmente, as simulações desses fenômenos são realizadas em programas computacionais dedicados à análise de transitórios eletromagnéticos. Entre os programas consolidados, tanto em uso quanto em material disponível na literatura acadêmica, destacam-se o EMTP, o PSCAD e o ATP. A proposta desta tese consiste no desenvolvimento de modelos matemáticos para os principais componentes de um sistema de potência, relacionados à análise de transitórios de manobra, que possam ser implementados em programa de simulação de transitórios eletromecânicos e eletromagnéticos, baseado na utilização de fasores dinâmicos, como o *software* AnaHVDC [7] e [8].

Nesses estudos de transitórios de manobra é imperioso que a rede elétrica esteja bem representada. Tal representação, na atual prática, é realizada utilizando equivalentes, que representam regiões reduzidas do sistema elétrico, cuja preparação e ajustes geralmente são bastante dispendiosos. A Figura 1 ilustra um sistema equivalente genérico. Esse sistema é composto pela área de estudo e pelo equivalente da área externa que juntos

formam o sistema equivalente ou reduzido. A área de estudo consiste na área de interesse, a qual tem sua modelagem em detalhes. A área externa, por sua vez, consiste no restante da rede que é representada de forma simplificada por um equivalente.

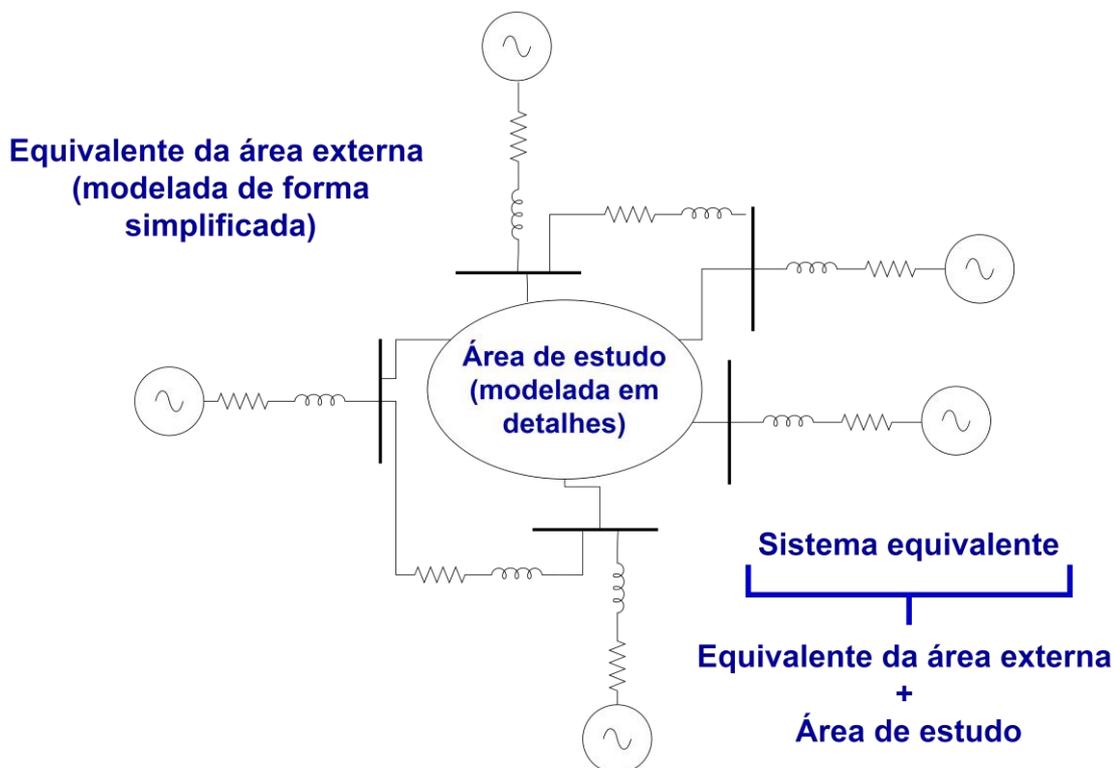


Figura 1 – Sistema equivalente genérico

A Figura 2 tem como finalidade ilustrar, esquematicamente, como ocorre esse processo de elaboração de equivalentes na frequência fundamental. Contudo, se por um lado a elaboração do equivalente é custosa, por outro, a representação completa da rede elétrica nos programas atualmente disponíveis, como é o caso do PSCAD ou do ATP, acaba sendo inviável, e isso se deve à quantidade de dados e detalhes necessários para a correta modelagem. Para o caso específico do PSCAD a obtenção de um regime permanente estacionário, através do *snapshot*, pode se mostrar desafiadora em sistemas de grandes portes. Isso se agrava em situações com presença de elementos não lineares e com elementos com variáveis internas de maior complexidade.

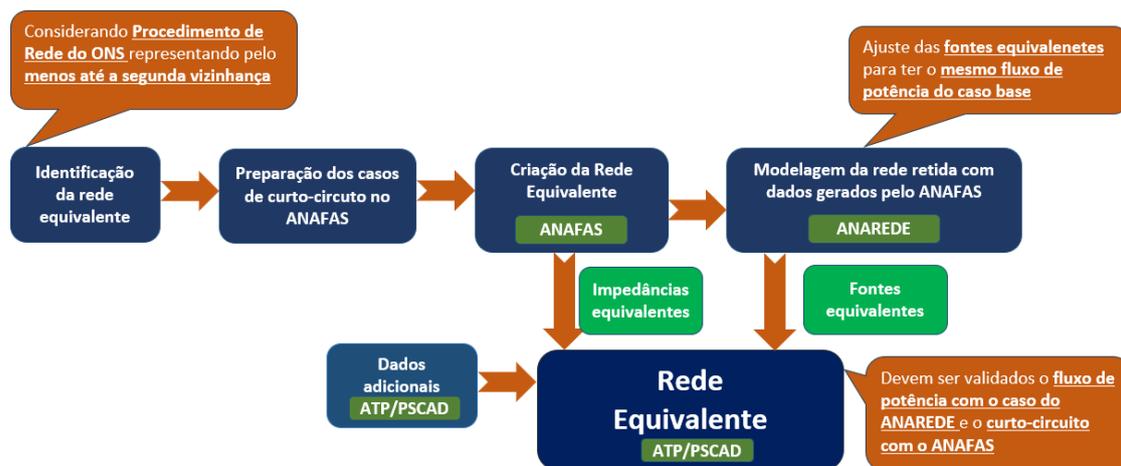


Figura 2 – Esquemático das etapas de elaboração de equivalentes a frequência fundamental

Outra questão importante está relacionada à precisão. Devido às dificuldades na preparação dos equivalentes, muitas vezes, não há uma preocupação do ajuste do ponto de operação, limitando-se a validar os níveis de curto-circuito do equivalente com os calculados pelo ANAFAS desprezando o carregamento do sistema. Ressalta-se que essa descrição corresponde à prática corrente na elaboração de equivalentes. No entanto, uma forma mais laboriosa, porém mais precisa, consiste na elaboração de um equivalente para cada perfil de carga com o respectivo ajuste das fontes equivalentes.

Além disso, os sistemas equivalentes são calculados para a frequência fundamental, não representando as características da área de estudo para outras frequências. Contudo, essa restrição pode ser resolvida utilizando-se os denominados *Frequency Dependent Network Equivalent* (FDNE) [9]-[11]. Portanto, os FDNE buscam representar uma rede elétrica usando um modelo equivalente cuja resposta varia com a frequência. Logo, trata-se de um modelo que a cada ponto de operação é capaz de simular o comportamento dinâmico da rede em uma faixa de frequência.

Desse modo, é bastante comum a simulação de transitórios não ser conduzida com ajustes precisos dos fluxos de potência em todas as linhas de transmissão do equivalente. Conseqüentemente, não há uma precisão das fontes equivalentes de barras de fronteira, e nem sempre os elementos de compensação reativa e as cargas elétricas são corretamente considerados. Além disso, o estudo muitas vezes se limita a uma ou poucas condições operativas da rede elétrica, afinal, cada condição corresponde a um respectivo equivalente. Logo, o que costuma ocorrer são variações da rede original degradada e, mesmo assim, sem reajuste do equivalente para o ponto de operação alterado.

No âmbito da ferramenta AnaHVDC, a modelagem consiste na construção de modelos de acompanhamento em fasores dinâmicos e o uso integrado dos dados de fluxo de potência do ANAREDE [12]. Essa integração permite a inicialização em regime permanente, mesmo com a presença de elementos não lineares e a representação completa do sistema de potência, diferentemente da prática utilizada atualmente nos estudos de transitórios eletromagnéticos. Podem, ainda, ser aproveitados os dados dos arquivos do ANATEM [13] com a dinâmica das máquinas; elos de Corrente Contínua em Alta Tensão (CCAT); *Flexible AC Transmission System* (FACTS); sistemas de controle definidos pelo usuário (CDU); entre outros. Adicionalmente os dados para modelagem trifásica são aproveitados do arquivo do ANAFAS [14], principalmente parâmetros de sequência zero e tipos de ligações dos componentes da rede, por exemplo Y ou Δ , entre outros. Por fim, os dados faltantes são fornecidos complementarmente, junto com parâmetros para simulação, em um arquivo próprio do AnaHVDC. Esses dados são aqueles necessários especificamente para simulação de transitórios eletromagnéticos, como, por exemplo, ganhos de um *phase-locked loop* (PLL) utilizado em conversores de elos CCAT e dados de configuração geométrica de linhas transmissão. A grande vantagem deste aproveitamento de dados é a redução significativa no esforço de preparação das simulações e a possibilidade de variações de pontos de operação com o recurso da inicialização automática oferecido pela metodologia seguida.

Cabe ressaltar que a modelagem no AnaHVDC é feita em componentes simétricas, contudo os modelos não lineares desenvolvidos no âmbito da tese foram implementados em componentes de fase. Ou seja, todos os cálculos de sensibilidades e injeções de corrente estão diretamente modelados no domínio de fases. Esse acoplamento é realizado dentro da ferramenta computacional por meio dos denominados adaptadores, os quais são responsáveis por converter as variáveis dos modelos matemáticos dos equipamentos do domínio de fase para componentes simétricas e vice-versa.

Deve-se observar que os arquivos do ANAREDE, ANAFAS e ANATEM já são preparados e mantidos pela EPE e ONS para os estudos de fluxo de potência, curto-circuito e estabilidade transitória para diversos cenários e horizontes, no âmbito do planejamento da operação e expansão do sistema.

Quanto às possíveis incompatibilidades entre a base de dados de fluxo de potência e de curto-circuito deve-se notar que há um esforço conjunto dos agentes envolvidos para complementar e consolidar essas informações. Na ausência dessa consolidação, recomenda-se o uso de parâmetros típicos. O AnaHVDC possui rotinas específicas que

auxiliam na conferência dos parâmetros lidos da base dos dados de sequência zero do ANAFAS, por exemplo.

Um dos problemas atuais consiste na ausência, em muitos casos, do preenchimento dos parâmetros de susceptância de sequência zero da linha. Nesse cenário, recomenda-se utilizar um valor típico entre 50% e 60% da susceptância de sequência positiva da linha. Além disso, podem ocorrer incompatibilidades nos valores dos parâmetros entre o ANAREDE e o ANAFAS. Nessa situação, o programa emite um alerta (*warning*) para sinalizar essas inconsistências, permitindo que os valores sejam corrigidos adequadamente.

Com a utilização da ferramenta computacional, pode-se então analisar múltiplos pontos de operação – analogamente ao que é feito nos estudos de estabilidade transitória – além de poder incluir o efeito de elementos de ações não tão lentas no transitório, como é o caso dos reguladores de tensão e dos enrolamentos elétricos das máquinas síncronas que compõem uma usina elétrica. Com isso, muda-se o paradigma dos estudos atuais, tornando possível adotar uma análise de múltiplas condições operativas, levando a uma maior confiabilidade nos resultados de simulação e maior facilidade na identificação de condições críticas.

1.1 Motivação

A complexidade dos sistemas elétricos de potência e suas condições operativas impõem desafios significativos para a análise e simulação de transitórios eletromagnéticos de manobra. A análise desses fenômenos é essencial para mitigar riscos operacionais, garantir a integridade dos equipamentos e promover a segurança da SEP. No entanto, as ferramentas disponíveis atualmente enfrentam limitações, especialmente quando se trata de considerar a rede elétrica em sua totalidade.

Embora os programas atualmente utilizados para esse tipo de estudo sejam eficazes para muitos cenários, eles podem falhar em fornecer um regime permanente estacionário ou exigir tempos de simulação e esforços computacionais impraticáveis. Essa limitação pode levar a resultados imprecisos ou a um aumento significativo no tempo de simulação e custo da análise.

Assim, a ferramenta AnaHVDC propõe uma abordagem alternativa para a simulação de transitórios eletromagnéticos de manobra. O objetivo é desenvolver uma ferramenta que não só represente a rede elétrica de forma mais completa, mas também ofereça uma solução prática e eficiente para a análise desses fenômenos complexos.

Ressalta-se que, em análises de transitórios eletromagnéticos, é possível obter resultados precisos utilizando equivalentes de menores dimensões, ainda que esses resultados nunca sejam completamente idênticos aos do modelo completo do sistema. No estágio atual de conclusão da tese, é viável simular a rede completa do SIN. Contudo, no futuro, pode-se explorar a geração automatizada de equivalentes pelo AnaHVDC, uma vez que os dados do sistema completo já estão integrados à estrutura de dados do programa. Dessa forma, podem ser desenvolvidos modelos equivalentes nas barras de fronteira com diferentes níveis de detalhamento, como de frequência fundamental ou FDNE [9]-[11]. Os resultados obtidos a partir da rede equivalente poderão ser comparados com os da rede completa, validando sua precisão dentro do grau de exatidão desejado.

Deste modo, o AnaHVDC é capaz suprir essa lacuna na representação completa de uma rede elétrica, com inicialização em regime estacionário em estudos de transitórios eletromagnéticos de manobra, dispensando o uso de redes equivalentes. São utilizadas as vantagens encontradas nos simuladores de transitórios eletromecânicos e eletromagnéticos de forma simultânea. Para a primeira categoria, tem-se a possibilidade da representação da dinâmica de baixa frequência (modelos das máquinas e reguladores) e para a segunda

categoria, tem-se a representação mais detalhada dos modelos, considerando a modelagem em alta frequência da rede trifásica.

A motivação da tese consiste na necessidade de desenvolver modelos de equipamentos relativos à análise de transitórios de chaveamento, baseados nos conceitos de fasores dinâmicos, utilizados no AnaHVDC, cuja faixa de frequência compreende o intervalo de alguns Hz (faixa eletromecânica) até dezenas de kHz (faixa eletromagnética).

Em relação à frequência, pode-se citar como exemplo o modelo *multi-infeed*, que é aplicável para frequências de até 1 ou 2 kHz, devido ao truncamento das séries de Fourier associadas aos harmônicos do modelo. Já para aplicações em simulações de transitórios eletromagnéticos de manobra (EMT), a faixa de frequência atinge até algumas dezenas de kHz [3]. No entanto, ao analisar os modelos equivalentes utilizados nos estudos com ATP em fasores dinâmicos, percebe-se uma perda de precisão. Essa imprecisão surge principalmente quando a dependência com a frequência é desconsiderada, resultando em diferenças já a partir de 1 kHz. No entanto, esse erro pode ser eliminado por meio de um modelo que incorpore a dependência dos parâmetros com a frequência. Cabe ressaltar que essa perda de precisão não é causada pela ferramenta em si, mas pelo uso de um modelo aproximado, escolhido por ser mais conservador e simplificado.

O desenvolvimento desses modelos de equipamentos envolvidos nas análises de transitórios de manobra traria consigo as vantagens do uso de fasores dinâmicos, como a inicialização dos componentes em regime estacionário, uso dos bancos de dados já existentes de fluxo de potência, curtos-circuitos e transitórios eletromecânicos e, conseqüentemente, a possibilidade de análise do sistema elétrico de interesse completo, sem a necessidade do uso de equivalentes de rede.

Dentro do uso de equivalentes, contemplados os equivalentes a 60Hz e os FDNE, há ainda a possibilidade de uso dos desenvolvimentos deste trabalho para um trabalho futuro de automatização da criação de equivalentes de rede pois, uma vez que a modelagem completa do sistema está presente, pode-se verificar a precisão do equivalente em relação ao sistema completo em função de sua dimensão, e também utilizar os dados elétricos do sistema externo para determinação dos modelos equivalentes nas barras de fronteira, sem necessidade de interferência do analista.

Essa abordagem visa proporcionar uma representação mais completa e eficaz dos transitórios eletromagnéticos, superando as limitações das ferramentas existentes e oferecendo uma solução prática e robusta para a análise do SEP.

1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é propor uma extensão da simulação fasorial aplicada em modelos de equipamentos e de componentes utilizados na análise de transitórios eletromagnéticos de manobra, utilizando como plataforma computacional o programa AnaHVDC. Para isso, são utilizados, na modelagem e implementações computacionais, os conceitos de fasores dinâmicos, que são generalizações dos fasores convencionais de regime permanente e que permitem a modelagem dos transitórios eletromagnéticos da rede elétrica, através de simulações diretamente realizadas por integração numérica, onde as formulações matemáticas dos modelos dos componentes da rede elétrica são obtidas diretamente no domínio fasorial.

Os fasores dinâmicos de frequência fundamental permitem uma representação exata dos transitórios eletromagnéticos em redes elétricas sem elementos com produção de harmônicos em regime permanente [7]. Para representar os elementos não lineares, que promovem injeção de componentes harmônicas em regime permanente, tais como elos de corrente contínua em alta tensão e equipamentos FACTS, tem-se três possibilidades.

A primeira possibilidade é a uma representação de forma simplificada, através de fontes ou impedâncias, como é feito normalmente nos estudos de transitórios eletromagnéticos. A segunda possibilidade é a consideração dos fasores dinâmicos harmônicos, que conseguem representar detalhadamente as dinâmicas relacionadas a esses equipamentos. Finalmente, a terceira possibilidade é uma adaptação nos modelos desenvolvidos através de fasores de frequência fundamental, de tal modo, que estes passem a representar as dinâmicas oriundas de componentes harmônicos, que é a alternativa adotada nesta tese.

Na tese foi desenvolvida a modelagem fasorial específica de diversos componentes, tais como: i) elementos não lineares, como para-raios [15] e magnetização de transformadores [15] e [16]; ii) chaves estatísticas [15] e; iii) linhas de transmissão desbalanceadas com parâmetros distribuídos e constantes com a frequência [2], [17]-[21].

Além da descrição dos modelos atualmente utilizados em programas de simulação de transitórios para os equipamentos mencionados e do desenvolvimento dos modelos equivalentes em fasores dinâmicos de frequência fundamental, o trabalho apresentará resultados de validação em sistemas de pequeno e médio porte completamente modelados no programa ATP.

Através do desenvolvimento dos modelos dos equipamentos mencionados em fasores dinâmicos e de sua implementação computacional no AnaHVDC, será possível a realização de simulações de transitórios eletromagnéticos de manobra através desta ferramenta computacional, utilizando a rede elétrica completa do sistema de interesse.

1.3 Contribuições pretendidas

A proposta consiste em desenvolver modelos relacionados à transitórios eletromagnéticos de manobra em uma ferramenta computacional integrada com a base de fluxo de potência, curto-circuito e estabilidade e que dispense a elaboração de equivalentes, fornecendo, então, resultados mais precisos e com preparação menos laboriosa dos casos de análise. Pretende-se, também, abordar a evolução em termos de tempo computacional e de complexidade dos casos. Assim, se evoluirá de casos mais didáticos, onde se espera desempenhos similares entre a ferramenta de referência (ATP) e a ferramenta proposta (AnaHVDC) e à medida que os casos se tornem maiores em tamanho e complexidade, as vantagens da abordagem proposta se evidenciam, em termos de custo computacional.

A originalidade da pesquisa e suas contribuições são:

- Desenvolvimento de modelos de equipamentos trifásicos e de alta frequência baseado no uso de fasores dinâmicos;
- Utilização de uma modelagem fasorial exata com fasores de frequência fundamental, mesmo com a presença de elementos não lineares (para-raios e magnetização de transformadores). A representação do transitório incluindo os efeitos das não linearidades é considerada na dinâmica dos fasores dinâmicos fundamentais sem perda de precisão.
- Possibilidade de automatização de simulação de múltiplos cenários, condições operativas, carregamento e despachos do sistema e horizontes de operação, considerando tanto a rede íntegra como degradada;
- Simulação computacional considerando a rede completa sem necessidade de equivalentes, que é um fator fundamental para que se consiga realizar análise de transitórios de manobra, considerando múltiplos cenários.

1.4 Revisão bibliográfica

Essa seção apresenta a revisão bibliográfica dos principais temas referentes à tese. A revisão se dividirá de forma temática: modelos de acompanhamento e fasores dinâmicos; modelagem de para-raios; modelagem de magnetização de transformadores e modelagem de linhas de transmissão.

1.4.1 Modelo de acompanhamento e fasores dinâmicos

Nessa subseção serão apresentados os trabalhos que abordam a formulação de modelos de acompanhamento e fasores dinâmicos. Ou seja, aqui será apresentada a base da metodologia aplicada nesta pesquisa. Nas seções subsequentes, aspectos mais específicos da modelagem serão expostos.

O trabalho proposto em [22] apresenta um método de solução geral para encontrar as respostas no tempo para transitórios eletromagnéticos em redes monofásicas ou multifásicas. Assim, é introduzida a metodologia que utiliza o denominado modelo de acompanhamento, que consegue representar cada elemento de rede como uma condutância, função do passo de integração e dos parâmetros do elemento, em paralelo com uma fonte de corrente que depende de tensões e correntes em tempo passado (termo histórico). Em [23] é apresentada a solução em elementos não lineares, como para-raios, disjuntores e saturação de transformadores em programas de simulação, usando o método de compensação ou equivalentes de rede. Em [24]-[28], corrobora-se que o cálculo dos transitórios eletromagnéticos pode ser feito de forma eficiente por análise modal e método de integração trapezoidal e são referências de destaque no que se refere aos transitórios eletromagnéticos no contexto de redes elétricas.

Circuitos tensoriais são introduzidos em [29]-[32] para simplificar a representação da variedade de fluxo de energia e em [33] é utilizado o conceito de tensores em grandezas no domínio da frequência. Tais circuitos correspondem a uma extensão conceitual dos circuitos elétricos convencionais. De forma geral, o tensor generaliza escalares e vetores para dimensões superiores, podendo representar relações entre elementos de natureza distintas e suas interações complexas.

Quanto aos trabalhos que tratam da modelagem por fasores dinâmicos, destacam-se [25] e [34], porém em aplicações com o uso de janela deslizante para o cálculo das

variáveis e funções do tempo. Com a janela deslizante, utiliza-se uma integração numérica para definição dos fasores dinâmicos, obtidos por uma operação denominada média generalizada que nada mais é do que a integral de obtenção dos coeficientes da série de Fourier de uma função periódica utilizando como período o intervalo de tempo entre o tempo atual e o passado até o inverso da frequência fundamental. Em regime permanente em que a função instantânea pode ser escrita como uma soma finita de senóides e cossenóides harmônicas, os fasores dinâmicos obtidos são constantes, enquanto no regime transitório, onde a janela deslizante “enxerga” uma função com forma de onda distorcida, esses fasores variam no tempo.

Outros trabalhos já consideram o uso de fasores dinâmicos aplicados no contexto FACTS. Em [27] a modelagem é aplicada para análise de um Compensador Estático de Reativo (CER), em [28] para um Capacitor Série Controlado por Chave Autocomutada (GCSC). Esses trabalhos ainda se propõem a comparar os resultados obtidos com os modelos convencionais.

Já no contexto específico de elos de corrente contínua, tem-se, em [35], a modelagem de um elo de tensão contínua com conversores VSC utilizando o conceito de fasores dinâmicos. Em [36] é proposto um modelo linearizado de conversor do tipo LCC utilizando funções de chaveamento equivalentes e fasores dinâmicos e em [37] é proposto um modelo de conversor do tipo CCC.

Outras aplicações de fasores dinâmicos ainda podem ser encontradas nos seguintes trabalhos: em [38] é apresentada a modelagem em um gerador de indução de dupla alimentação, em [39] mostra-se o uso no contexto de ressonância subsíncrona e em [40] em aplicações em máquinas de corrente alternada polifásicas e desbalanceadas.

Entre as contribuições mais recentes que são ainda diretamente relacionadas com o objeto da tese estão: o trabalho exposto em [7] que consiste no simulador de transitórios eletromagnéticos em formulação de fasores dinâmicos aplicado em contexto FACTS, e em [8] onde é apresentada o programa computacional AnaHVDC, desenvolvido em C++ consistindo em ferramenta fasorial que integra as modelagens eletromecânica e eletromagnética e que será utilizado como base para implementação dos desenvolvimentos realizadas nesta tese.

Em particular, serão utilizados preferencialmente modelagem do sistema de potência utilizando fasores dinâmicos de frequência fundamental, como na época de [8], embora o AnaHVDC tenha sido atualmente expandido para considerar fasores dinâmicos harmônicos.

Existem outros trabalhos na literatura que utilizam fasores de frequência fundamental. Em [41]-[43], a metodologia denomina-se análise em frequência deslocada (“*SFA – Shifted Frequency Analysis*”). Em [44]-[46] utiliza-se a os fasores com a denominação de formas de onda de envoltória (“*Envelope Waveforms*”) na simulação de sistemas de transitórios em múltiplas escalas de tempo (“*Multiscale Simulation of Transients*”). Nesses trabalhos, a despeito da diferença de nomenclatura e de algumas outras especificidades, a transformada de Hilbert é utilizada para demonstrar a validade matemática da representação pelo fasor dinâmico fundamental. Outra linha de trabalhos é o do desenvolvimento do programa DPSIM [47] que utiliza a modelagem por fasores de frequência fundamental para simulações em tempo real e integração com modelos convencionais de simulação de transitórios [48].

Desse modo, entende-se que foram apontados trabalhos de relevância, indicando suas principais contribuições, no que se refere ao tratamento matemático e computacional do principal tema desta pesquisa.

1.4.2 Modelagem de para-raios

Do ponto de vista de modelos de para-raios, estes podem ser categorizados segundo suas características principais e aplicações típicas. A tese se concentra no equivalente do modelo do ATP Tipo 92 [49], que tem por principal característica a reprodução do comportamento resistivo do para-raios, representado por segmentos lineares por partes. E isso é motivado pela aplicação típica que consiste em impulsos de manobra, escopo desse trabalho. Além disso, será realizada uma consideração no modelo implementado que o ATP não contempla. Observa-se que no ATP, sempre há corrente no elemento, independentemente de haver superado o primeiro valor do par ordenado ou não. Numericamente, o modelo está sempre integrando a potência e somando uma energia. No modelo em desenvolvimento, apenas quando ocorre superação desse valor de tensão (primeiro ponto da tabela no eixo das ordenadas) é que passa a fluir corrente pelo equipamento e, portanto, passar a ser ter potência e conseqüentemente energia. Esse fenômeno está descrito graficamente na Figura 3.

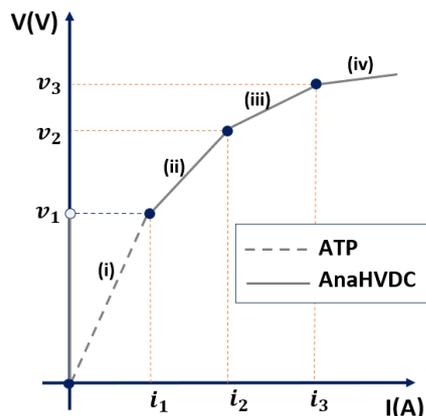


Figura 3 – Atuação do para-raios: ATP *versus* AnaHVDC

Existem diversos outros modelos de para-raios disponíveis na literatura que serão abordados a seguir, contudo como foi mencionado, este trabalho baseou-se no atual modelo do ATP [49] que é de forma geral bem aceito na comunidade acadêmica e na engenharia tanto nacional como internacional no contexto de estudos envolvendo simulações de transitórios eletromagnéticos de manobra. O modelo proposto em [50] modela a característica dinâmica, através de uma resistência não linear em série com uma indutância linear, dos para-raios aplicados em impulsos atmosféricos em subestações de Alta Tensão (AT) e Extra Alta Tensão (EAT). Em [51] é realizado o modelo da característica dinâmica do para-raios baseado em ensaios de laboratório e na análise da microestrutura do ZnO aplicados em subestações de Alta Tensão (AT) em impulsos de frente de onda íngreme. O modelo em [52] consiste na simplificação do modelo proposto em [51] desprezando os efeitos térmicos e capacitivo e combinando as resistências, tendo as mesmas aplicabilidades.

Em [53], modela-se a característica dinâmica do para-raios. No entanto, demanda um ajuste manual de alguns parâmetros $L1$, $A0$ e $A1$ e dados específicos e algumas premissas de validade. Se aplicam em impulsos com frente de onda íngreme, especialmente os atmosféricos, em AT e EAT. Em [54], o denominado modelo histerético consiste em uma resistência não linear em série também com uma indutância não linear. A grande vantagem desse modelo é a representação do comportamento dinâmico do para-raios, ou seja, o pico de tensão residual ocorre antes do pico de corrente de descarga. Esse modelo apresenta aplicabilidade para impulsos com frentes de onda íngremes e executa apenas um cálculo na simulação. O modelo proposto em [55] é uma simplificação do modelo [53]. Segundo seus autores, a capacitância poderia ser desprezada e as resistências poderiam ser agrupadas em uma única, de valor $1\text{ M}\Omega$. Em [56] se apresenta outra proposta de simplificação do modelo proposto em [53]. A desvantagem está na

superestimação do valor da tensão residual. Já em [57] trata-se de um modelo simplificado do modelo [51], desprezando a dependência da temperatura da resistência não linear e a histerese *V versus I*. Em [58] é proposta uma simplificação do modelo proposto em [53] para uso com o impulso de corrente padrão de $8/20\mu s$. O modelo apresentado em [59] é aplicável na representação de para-raios de média e alta tensão, onde os erros relativos são da ordem de 1% para tensões acima de 30 kV. Em [60] contempla a característica dinâmica do para-raios e é válido para tempos de frente de $5ns$ a $8\mu s$.

1.4.3 Modelagem da magnetização de transformadores

No que se refere à modelagem da magnetização de transformadores os trabalhos elencados são tratados de modo mais específico. Em outras palavras o objetivo é levantar a forma como a literatura aborda essa modelagem, porém buscando equacionar o modelo existente no ATP. Dessa forma, a primeira consideração diz respeito à entrada de dados que pode ser obtida diretamente pelos dados de ensaio (Tensão x Corrente) em valores médios quadráticos, ou ainda, dados já convertidos (Corrente x Fluxo). O modelo simplificado, por sua vez, desconsidera o fluxo residual e as perdas, e, portanto, o dado de entrada é a curva não-linear por partes (ensaio ou dados convertidos). Posteriormente, é então considerada a possibilidade de representação do ciclo de histerese.

As referências já consolidadas em livro texto estão apresentadas em [2] e [21] e alguns trabalhos analisam em maiores detalhes a modelagem da magnetização. Em [61] é apresentado o desenvolvimento de modelos de núcleos dinâmicos aplicados em estudos de transitórios, com as seguintes considerações: não-linearidades, perdas, histerese, dentre outras. Em [62] ocorre o desenvolvimento de estudo e modelagem de sistema elétrico, com ênfase nos transformadores, descrevendo as suas características de magnetização, considerando os efeitos da saturação e histerese, mediante a presença de perturbações provocadas por energização e por curtos-circuitos. Em [63] é apresentada a teoria da corrente de magnetização e fatores que a afetam. Alguns trabalhos contextualizam, aplicam e promovem alterações nos modelos do tipo *Jiles-Atherthon* [64] e [65].

Em [66] tem-se a modelagem considerando a curva linear por partes. Em [67] considera-se a curva de histerese aproximada por uma tangente hiperbólica. A consideração de perdas no modelo é encontrada em [68] e o modelo em ATP considerando o fluxo residual e histerese está representada em [16] e em [69].

1.4.4 Modelagem de linhas de transmissão

A simulação computacional no domínio do tempo em programas de transitórios eletromagnéticos permite, entre outras análises, avaliar o comportamento de linhas de transmissão frente a operações de manobras, sejam essas intempestivas ou programadas. Nesse contexto, pode-se dizer que os programas mais consagrados são os derivados do antigo EMTP [22] e o programa PSCAD desenvolvido a partir do EMTDC.

A metodologia de modelagem utilizada é aquela proposta em [22], baseada na primeira versão do programa computacional EMTP. Posteriormente, com a difusão dos microcomputadores e com a política de gratuidade de licença, a versão ATPDraw [70], que consiste na interface gráfica do ATP, é hoje um dos programas mais utilizados nas empresas e universidades. Dos programas comerciais, o PSCAD, por sua vez, [71] é um dos mais utilizados.

Assim, a metodologia utilizada em [22], que faz uso dos modelos de acompanhamento, já está bastante difundida no meio acadêmico, inclusive disponíveis em diversos livros texto relacionados a transitórios eletromagnéticos tais como [2], [17] e [21].

No início do desenvolvimento do EMTP [22] as linhas de transmissão eram então representadas por modelos de parâmetros concentrados utilizando cascata de circuitos RLC com acoplamento indutivo e capacitivo entre as fases, ou ainda por meio de modelo de ondas trafegantes em linhas sem perdas utilizando o método das características [72] (sendo que as perdas eram representadas por resistências concentradas nos terminais e no meio da linha). O desbalanço das matrizes de parâmetros era resolvido utilizando uma transformação modal para diagonalização das matrizes [73], [74] e [75]. Estes modelos desconsideravam a dependência dos parâmetros elétricos da linha com a frequência, principalmente ocasionada pelo efeito pelicular da corrente nos cabos e da resistividade não nula do solo.

Na época, a modelagem da dependência dos parâmetros com a frequência era bem conhecida para o domínio da frequência [76], no entanto, era de árdua incorporação na metodologia tradicional proposta em [22].

A modelagem do efeito pelicular dos condutores no domínio da frequência já havia sido desenvolvida em 1918 [77] e a modelagem do solo em 1926 [78]. Posteriormente foram propostas simplificações para solução analítica aproximada [79]. Contudo, ainda não havia solução numérica robusta para incorporação destes efeitos no domínio do tempo. Diversos modelos foram propostos nesta época, porém, apenas em 1982 foi proposto um

modelo razoavelmente preciso e confiável para linhas de transmissão com dependência dos parâmetros com a frequência [80] que utiliza convolução recursiva [81]. Este modelo é um dos mais utilizados hoje em dia e está implementado nos programas ATP e PSCAD. Contudo, uma das imprecisões deste modelo é que a sua matriz de transformação modal não pode ser considerada variável com a frequência, e, portanto, é impreciso para linhas de transmissão muito desbalanceadas. Para contornar este problema foram propostos diversos outros modelos no domínio de fases em vez do domínio modal.

Atualmente tem-se no PSCAD o modelo desenvolvido em [82], detalhado em [82], que utiliza a técnica de ajuste vetorial [83]. No ATP foram implementados os modelos desenvolvidos em [84] e em [85], sendo este último uma melhoria do modelo preliminar. Em particular este modelo do ATP baseado em autorregressão exige uma maior interação do usuário na escolha dos parâmetros para ajuste. No que se refere ao esforço de inserir um modelo universal e de se apresentar os conceitos de ajuste vetorial, têm-se os trabalhos destacados em [86]-[89].

Mesmo tendo-se modelos de alta qualidade nos programas atuais de simulação de transitórios eletromagnéticos, pode-se dizer que a modelagem no domínio do tempo de linhas de transmissão com parâmetros dependentes com a frequência não é um assunto esgotado e ainda desperta o interesse acadêmico. Ainda são propostos novos modelos com o objetivo de melhoria de precisão ou da eficiência computacional, como, por exemplo, em [90]. Cabe destacar ainda que em [91] são comparados os diversos modelos implementados no âmbito do ATP e suas respectivas características e limitações.

Em relação a modelos com fasores dinâmicos, foram realizadas algumas publicações, apresentando modelos de parâmetros concentrados, distribuídos e com dependência da frequência [92]-[94][92].

1.5 Publicações da Tese

De forma preliminar à tese, houve, no XXV SNTPEE 2019, participação no trabalho [8] sobre os desenvolvimentos do programa AnaHVDC.

No âmbito do trabalho desenvolvido nesta tese, foram escritos dois artigos:

- **Azevedo, R. G.; GOMES Jr., S.; Almeida, L. P.; Parreiras, T. J. M. A.; "Aplicação da Nova Ferramenta Computacional AnaHVDC em Estudos de Transitórios Eletromagnéticos de Manobra". XXV**

SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Rio de Janeiro, 2022 - Apresentado no XXVI SNPTEE, realizado em maio de 2022, este artigo discute os modelos desenvolvidos e implementados no AnaHVDC para simulação de transitórios eletromagnéticos de manobra e os resultados da validação [95].

- **Azevedo, R. G.; Parreiras, T. J. M. A.; GOMES Jr., S.; Almeida, L. P.; Amaral, T. S.; "Análise Estatística de Transitórios Eletromagnéticos de Manobra Utilizando o AnaHVDC ". XXVII SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Brasília, 2023** - Apresentado no XXVII SNPTEE, ocorrido em novembro de 2023, este artigo apresenta os resultados da análise estatística realizada no AnaHVDC [96].

Pretende-se ainda preparar duas novas publicações a ser submetida em periódicos internacional apresentando o desenvolvimento matemático de todos os modelos provenientes desta pesquisa e resultados da implementação e simulação no programa AnaHVDC. Os títulos dessas publicações são:

- ***“Simulating Switching Electromagnetic Transients in Transformers with Dynamic Phasors.”***: será apresentada a proposta da tese de utilização de fasores dinâmicos em transitórios eletromagnéticos de manobra e os modelos desenvolvidos de para-raios e chave estatística, assim como os resultados do sistema BenchCA.
- ***“Simulating Switching Electromagnetic Transients in Transmission Lines with Dynamic Phasors.”***: será apresentada a proposta da tese de utilização de fasores dinâmicos em transitórios eletromagnéticos de manobra e os modelos desenvolvidos de magnetização de transformadores, assim como os resultados do sistema BenchCA.
- ***“Unbalanced Transmission Line Model Using Dynamic Phasors.”***: será apresentado o modelo fasorial de linha trifásica desbalanceada desenvolvido na tese.

1.6 Estrutura do trabalho

O desenvolvimento desse trabalho foi estabelecido da seguinte forma:

No Capítulo 1 foi feita uma contextualização do tema, incluindo a motivação, o objetivo, as contribuições pretendidas e a revisão bibliográfica, além das publicações relacionadas a tese.

O Capítulo 2 apresenta os conceitos básicos utilizados no trabalho, incluindo o conceito de fasores dinâmicos, simulação de transitórios eletromagnéticos utilizando fasores dinâmicos, modelo de acompanhamento da linha de transmissão e metodologia dos modelos de acompanhamento para modelagem de elementos não lineares.

No Capítulo 3 é apresentada a metodologia proposta nesse trabalho: a aplicação dos fasores dinâmicos na simulação de transitórios eletromagnéticos de manobra e o desenvolvimento analítico e as implementações realizadas na modelagem fasorial de para-raios, magnetização de transformadores, modelos de linhas desbalanceados, a caracterização do termo visualmente coincidente e análise estatística.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados das simulações com o programa AnaHVDC. Estes resultados são validados a partir de comparações com o programa ATP.

O Capítulo 5 apresenta as considerações finais, que englobam as considerações gerais, conclusões e propostas para trabalhos futuros deste trabalho.

Capítulo 2 - Conceituação teórica

Neste capítulo são apresentados os conceitos teóricos relativos à tese, tais como teoria geral de fasores dinâmicos, simulação de transitórios eletromagnéticos usando fasores dinâmicos e transitórios eletromagnéticos de manobra.

2.1 Circuito RL modelado por fasores dinâmicos

Para ilustrar, de forma didática, a solução de um sistema elétrico por fasores dinâmicos, considere o circuito RL apresentado na Figura 4.

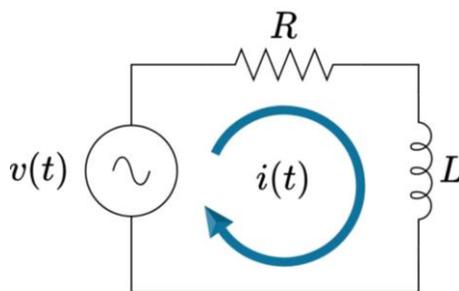


Figura 4 – Circuito RL

A equação diferencial no domínio do tempo que descreve o comportamento instantâneo do circuito é dada por:

$$v(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (1)$$

Supondo que a referência da corrente seja senoidal em regime permanente, tem-se que sua derivada na inicialização do sistema é diferente de zero. Essa condição introduz uma dificuldade nas simulações no domínio do tempo, especialmente ao iniciar em regime estacionário, tal como ocorre em casos do ANATEM [13], partindo da condição operativa oriunda do ANAREDE [12].

Pode-se descrever a equação diferencial na formulação em fasores dinâmicos, que são modelos matemáticos que permitem descrever funções não periódicas no tempo através de coeficientes, dependentes do tempo, de suas séries de Fourier. Em suma, fasores dinâmicos são fasores variantes no tempo tanto em amplitude como em fase, que se comportam como fasores convencionais em regime permanente e variam em situações

transitórias, tais como distúrbios no sistema, podendo ser utilizados para modelar redes elétricas para análise de transitórios eletromagnéticos [36].

No que diz respeito ao desenvolvimento analítico, uma dada função $x(t)$ variante no tempo, periódica, que representa o regime permanente de um sistema não linear com excitação senoidal, pode ser descrita através de uma série de Fourier, conforme indicado em (2). Os coeficientes X_{hre} e X_{him} são as componentes real e imaginária, respectivamente, do fasor convencional, usualmente apresentado em livros tradicionais de circuitos elétricos [97] e [98].

$$x(t) = \sum_{h \geq 0} X_{hre} \cos(h\omega t) - X_{him} \text{sen}(h\omega t) \quad (2)$$

Essa função pode ser reconstituída pela seguinte projeção:

$$x(t) = \Re \left\{ \sum_h \tilde{X}_h(t) e^{jh\omega t} \right\} \quad (3)$$

O termo $\tilde{X}_h(t) e^{jh\omega t}$ pode ser denominado fasor dinâmico girante [7], onde considerando uma dada harmônica h , tem-se:

$$\tilde{X}_h(t) = X_{hre}(t) + jX_{him}(t) \quad (4)$$

Aplicando a equação (4) em (3):

$$x(t) = \Re \left\{ \sum_h [X_{hre}(t) + jX_{him}(t)] e^{jh\omega t} \right\} \quad (5)$$

Utilizando a fórmula de Euler para expressar $e^{jh\omega t}$ em termos de funções trigonométricas:

$$e^{jh\omega t} = \cos(h\omega t) + j\text{sen}(h\omega t) \quad (6)$$

Substituindo (6) em (5):

$$x(t) = \Re \left\{ \sum_h [X_{hre}(t) + jX_{him}(t)] \cdot [\cos(h\omega t) + j\text{sen}(h\omega t)] \right\} \quad (7)$$

Expandindo e desenvolvendo, tem-se:

$$x(t) = \Re \left\{ \sum_h [X_{hre}(t) \cos(h\omega t) + jX_{him}(t) \cos(h\omega t) + jX_{hre}(t) \text{sen}(h\omega t) - X_{him}(t) \text{sen}(h\omega t)] \right\} \quad (8)$$

Reagrupando em componentes real e imaginária:

$$x(t) = \Re \left\{ \sum_h [X_{hre}(t) \cos(h\omega t) - X_{him}(t) \text{sen}(h\omega t)] + j[X_{him}(t) \cos(h\omega t) + X_{hre}(t) \text{sen}(h\omega t)] \right\} \quad (9)$$

Aplicando a projeção real, tem-se que:

$$x(t) = \sum_h X_{hre}(t) \cos(h\omega t) - X_{him}(t) \text{sen}(h\omega t) \quad (10)$$

Por fim, para a componente fundamental ($h = 1$), tem-se:

$$x(t) = X_{1re}(t) \cos(\omega t) - X_{1im}(t) \text{sen}(\omega t) \quad (11)$$

De um modo geral, para ordens superiores ($h > 1$), tem-se os fasores dinâmicos harmônicos. Ressalta-se que os modelos implementados no âmbito da tese foram modelados usando apenas a componente fundamental dos fasores dinâmicos.

Desse modo, os fasores dinâmicos de tensão e corrente podem ser descritos a partir da formulação instantânea descrita em (10), respectivamente, de acordo com as equações (12) e (13). Usando o fato da rede ser modelada de forma linear para cada ordem harmônica, o cálculo das tensões e correntes pode ser realizado usando o princípio da superposição. Dessa forma, obtemos n_h redes, cada uma correspondente à sua respectiva ordem harmônica ($h\omega$).

$$v(t) = \sum_h V_{hre}(t) \cos(h\omega t) - V_{him}(t) \text{sen}(h\omega t) \quad (12)$$

$$i(t) = \sum_h I_{hre}(t) \cos(h\omega t) - I_{him}(t) \text{sen}(h\omega t) \quad (13)$$

Os fasores dinâmicos da componente fundamental de tensão e corrente podem ser descritos a partir da formulação instantânea descrita em (11), respectivamente, de acordo com as equações (14) e (15). Nota-se que a grandeza instantânea é expressa em termos de seno e cosseno, com coeficientes que correspondem às partes real e imaginária do fasor, caracterizando assim sua representação fasorial.

$$v(t) = V_{re}(t)\cos(\omega t) - V_{im}(t)\sen(\omega t) \quad (14)$$

$$i(t) = I_{re}(t)\cos(\omega t) - I_{im}(t)\sen(\omega t) \quad (15)$$

Aplicando a transformação de variáveis no equacionamento instantâneo temos a modelagem por fasores dinâmicos, ou seja, substituindo (14) e (15) em (1).

$$\begin{aligned} &V_{re}(t)\cos(\omega t) - V_{im}(t)\sen(\omega t) \\ &= R(I_{re}(t)\cos(\omega t) - I_{im}(t)\sen(\omega t)) \\ &+ L \frac{d(I_{re}(t)\cos(\omega t) - I_{im}(t)\sen(\omega t))}{dt} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} &V_{re}(t)\cos(\omega t) - V_{im}(t)\sen(\omega t) \\ &= RI_{re}(t)\cos(\omega t) - RI_{im}(t)\sen(\omega t) + L \frac{dI_{re}(t)}{dt} \cos(\omega t) \\ &- \omega LI_{re}(t)\sen(\omega t) - L \frac{dI_{im}(t)}{dt} \sen(\omega t) - \omega LI_{im}(t)\cos(\omega t) \end{aligned} \quad (17)$$

Considerando que as funções trigonométricas seno e cosseno são linearmente independentes, pode-se separar a equação (17) e agrupar os termos em senos (18) e cossenos (19). Na sequência a solução é dada por sistema de equações via integração numérica.

$$V_{re}(t) = RI_{re}(t) + L \frac{dI_{re}(t)}{dt} - \omega LI_{im}(t) \quad (18)$$

$$V_{im}(t) = RI_{im}(t) + L \frac{dI_{im}(t)}{dt} + \omega LI_{re}(t) \quad (19)$$

Em regime permanente as componentes reais e imaginárias do fasor de corrente são constantes, logo, suas derivadas são iguais a zero. Assim, essa informação favorece o processo de inicialização, sendo resolvido por sistema linear para equipamentos lineares e pelo método de Newton quando há equipamentos não-lineares.

Reescrevendo (18) e (19) em forma matricial:

$$\begin{bmatrix} V_{re}(t) \\ V_{im}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + L \frac{d}{dt} & -\omega L \\ +\omega L & R + L \frac{d}{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{re}(t) \\ I_{im}(t) \end{bmatrix} \quad (20)$$

Cabe ressaltar que a matriz de dimensão 2x2 é o tensor que relaciona tensão e corrente do sistema. No caso trifásico essa matriz teria dimensão 6x6. Essa matriz pode ainda ser reescrita da seguinte forma, fazendo uma mudança de notação em relação ao termo dinâmico:

$$\begin{bmatrix} V_{re}(t) \\ V_{im}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & -\omega L \\ \omega L & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{re}(t) \\ I_{im}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{re}(t) \\ \dot{I}_{im}(t) \end{bmatrix} \quad (21)$$

Para a solução numérica desse sistema matricial, utiliza-se o método de integração trapezoidal. Para ilustrar essa abordagem prática, consideremos uma equação diferencial específica, conforme apresentada em(22):

$$y(t) = \frac{dx(t)}{dt} \quad (22)$$

Pode ser escrita em função de Δt pela regra trapezoidal da integral, resultando em:

$$x(t) - x(t - \Delta t) = \frac{\Delta t}{2} [y(t) + y(t - \Delta t)] \quad (23)$$

Essa equação ainda pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\frac{x(t) - x(t - \Delta t)}{\Delta t} = \frac{y(t) + y(t - \Delta t)}{2} \quad (24)$$

Esse rearranjo resulta na regra prática que consiste em calcular a média entre dois instantes para as variáveis algébricas $\left(\frac{y(t)+y(t-\Delta t)}{2}\right)$ e a diferença entre dois instantes consecutivos dividida pelo passo de integração $\left(\frac{x(t)-x(t-\Delta t)}{\Delta t}\right)$ para variáveis diferenciais, a exemplo do ilustrado a seguir:

Aplicando essa regra na equação (21), tem-se:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \left(\begin{bmatrix} V_{re}(t) \\ V_{im}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{re}(t - \Delta t) \\ V_{im}(t - \Delta t) \end{bmatrix} \right) \\ = \begin{bmatrix} R & -\omega L \\ \omega L & R \end{bmatrix} \frac{1}{2} \left(\begin{bmatrix} I_{re}(t) \\ I_{im}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_{re}(t - \Delta t) \\ I_{im}(t - \Delta t) \end{bmatrix} \right) \\ + \begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix} \frac{1}{\Delta t} \left(\begin{bmatrix} I_{re}(t) \\ I_{im}(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} I_{re}(t - \Delta t) \\ I_{im}(t - \Delta t) \end{bmatrix} \right) \end{aligned} \quad (25)$$

Chamando os tensores de \mathbf{K}_1 e \mathbf{K}_2 para ter uma formulação mais compacta e reescrever a equação (28):

$$\mathbf{K}_1 = \begin{bmatrix} R & -\omega L \\ \omega L & R \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$\mathbf{K}_2 = \begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \left(\begin{bmatrix} V_{re}(t) \\ V_{im}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{re}(t - \Delta t) \\ V_{im}(t - \Delta t) \end{bmatrix} \right) \\ = \mathbf{K}_1 \frac{1}{2} \left(\begin{bmatrix} I_{re}(t) \\ I_{im}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_{re}(t - \Delta t) \\ I_{im}(t - \Delta t) \end{bmatrix} \right) \\ + \mathbf{K}_2 \frac{1}{\Delta t} \left(\begin{bmatrix} I_{re}(t) \\ I_{im}(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} I_{re}(t - \Delta t) \\ I_{im}(t - \Delta t) \end{bmatrix} \right) \end{aligned} \quad (28)$$

Isolando-se o termo da corrente no instante atual:

$$\left(\frac{\mathbf{K}_1}{2} + \frac{\mathbf{K}_2}{\Delta t} \right) \begin{bmatrix} I_{re}(t) \\ I_{im}(t) \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \left(\begin{bmatrix} V_{re}(t) \\ V_{im}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{re}(t - \Delta t) \\ V_{im}(t - \Delta t) \end{bmatrix} \right) - \left(\frac{\mathbf{K}_1}{2} - \frac{\mathbf{K}_2}{\Delta t} \right) \begin{bmatrix} I_{re}(t - \Delta t) \\ I_{im}(t - \Delta t) \end{bmatrix} \quad (29)$$

Chamando os tensores \mathbf{K}_3 e \mathbf{K}_4 para ter uma formulação mais compacta e reescrever a equação (29) em (36):

$$\mathbf{K}_3 = \left(\frac{\mathbf{K}_1}{2} + \frac{\mathbf{K}_2}{\Delta t} \right) \quad (30)$$

$$\mathbf{K}_3 = \begin{bmatrix} \frac{R}{2} & -\frac{\omega L}{2} \\ \frac{\omega L}{2} & \frac{R}{2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{L}{\Delta t} & 0 \\ 0 & \frac{L}{\Delta t} \end{bmatrix} \quad (31)$$

$$\mathbf{K}_3 = \begin{bmatrix} \frac{R}{2} + \frac{L}{\Delta t} & -\frac{\omega L}{2} \\ \frac{\omega L}{2} & \frac{R}{2} + \frac{L}{\Delta t} \end{bmatrix} \quad (32)$$

$$\mathbf{K}_4 = \left(\frac{\mathbf{K}_1}{2} - \frac{\mathbf{K}_2}{\Delta t} \right) \quad (33)$$

$$\mathbf{K}_4 = \begin{bmatrix} \frac{R}{2} & -\frac{\omega L}{2} \\ \frac{\omega L}{2} & \frac{R}{2} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{L}{\Delta t} & 0 \\ 0 & \frac{L}{\Delta t} \end{bmatrix} \quad (34)$$

$$\mathbf{K}_4 = \begin{bmatrix} \frac{R}{2} - \frac{L}{\Delta t} & -\frac{\omega L}{2} \\ \frac{\omega L}{2} & \frac{R}{2} - \frac{L}{\Delta t} \end{bmatrix} \quad (35)$$

$$\mathbf{K}_3 \begin{bmatrix} I_{re}(t) \\ I_{im}(t) \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \left(\begin{bmatrix} V_{re}(t) \\ V_{im}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{re}(t - \Delta t) \\ V_{im}(t - \Delta t) \end{bmatrix} \right) - \mathbf{K}_4 \begin{bmatrix} I_{re}(t - \Delta t) \\ I_{im}(t - \Delta t) \end{bmatrix} \quad (36)$$

Pré-multiplicando pela inversa de \mathbf{K}_3 para isolar as correntes no instante atual, tem-se que:

$$\begin{bmatrix} I_{re}(t) \\ I_{im}(t) \end{bmatrix} = \mathbf{K}_3^{-1} \frac{1}{2} \left(\begin{bmatrix} V_{re}(t) \\ V_{im}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{re}(t - \Delta t) \\ V_{im}(t - \Delta t) \end{bmatrix} \right) - \mathbf{K}_3^{-1} \cdot \mathbf{K}_4 \begin{bmatrix} I_{re}(t - \Delta t) \\ I_{im}(t - \Delta t) \end{bmatrix} \quad (37)$$

Isolando-se o termo $(t - \Delta t)$ para obtenção do termo histórico:

$$\begin{bmatrix} I_{re}(t) \\ I_{im}(t) \end{bmatrix} = \frac{\mathbf{K}_3^{-1}}{2} \begin{bmatrix} V_{re}(t) \\ V_{im}(t) \end{bmatrix} + \frac{\mathbf{K}_3^{-1}}{2} \begin{bmatrix} V_{re}(t - \Delta t) \\ V_{im}(t - \Delta t) \end{bmatrix} - \mathbf{K}_3^{-1} \mathbf{K}_4 \begin{bmatrix} I_{re}(t - \Delta t) \\ I_{im}(t - \Delta t) \end{bmatrix} \quad (38)$$

Pode-se ainda renomear as relações tensoriais chamando \mathbf{K}_5 e \mathbf{K}_6 .

$$\mathbf{K}_5 = \frac{\mathbf{K}_3^{-1}}{2} \quad (39)$$

$$\mathbf{K}_6 = \mathbf{K}_3^{-1} \cdot \mathbf{K}_4 \quad (40)$$

Tem-se, por fim, a seguinte expressão para a corrente do modelo:

$$\begin{bmatrix} I_{re}(t) \\ I_{im}(t) \end{bmatrix} = \mathbf{K}_5 \begin{bmatrix} V_{re}(t) \\ V_{im}(t) \end{bmatrix} + \underbrace{\mathbf{K}_5 \begin{bmatrix} V_{re}(t - \Delta t) \\ V_{im}(t - \Delta t) \end{bmatrix} - \mathbf{K}_6 \begin{bmatrix} I_{re}(t - \Delta t) \\ I_{im}(t - \Delta t) \end{bmatrix}}_{\text{Termo histórico}} \quad (41)$$

Por fim, apresenta-se o modelo de acompanhamento do respectivo circuito RL

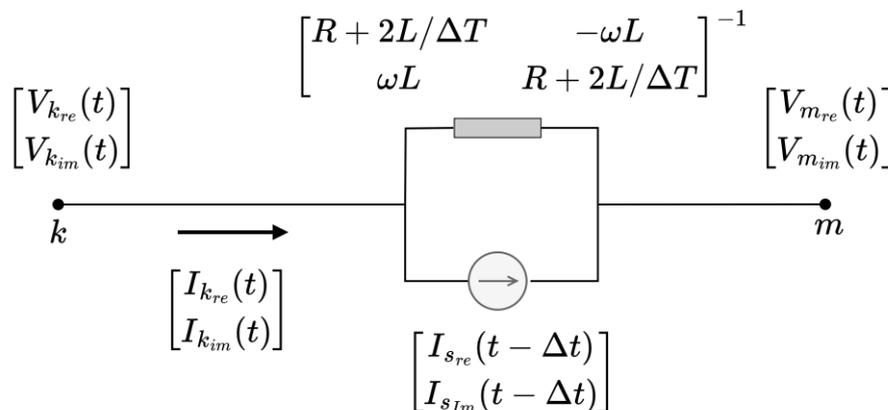


Figura 5 – Modelo de acompanhamento para o circuito RL

Para ilustrar o comportamento dinâmico dos fasores dinâmicos, faz-se $v(t) = \text{sen}(\omega t)$ na sua forma fasorial fundamental. Isso em fasores dinâmicos significa zerar a componente real do fasor e assumir como -1 a componente imaginária, de forma a ter a seguinte expressão:

$$v(t) = 0 \cdot \cos(\omega t) - (-1) \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (42)$$

Considerando a aplicação de um distúrbio de $1\cos(\omega t)$ na fonte de tensão, que equivale a dar um degrau na componente real do fasor, no tempo de 0,03s e aplicando a regra trapezoidal de modo que as equações diferenciais passem a ser algébricas, é possível realizar a simulação no tempo. A cada passo de tempo, resolve-se o modelo de acompanhamento de cada equipamento, a exemplo da equação (41) para o circuito RL que consiste em calcular as componentes dos fasores de corrente $I_{re}(t)$ e $I_{im}(t)$ ao longo do tempo, obtida a partir das tensões atuais e do termo histórico (que dependem de tensões e correntes passadas). Logo, a partir da solução fasorial, o valor instantâneo $i(t)$ pode ser obtido, sem perda de precisão, a partir da equação (15).

A Figura 6 apresenta a forma de onda da tensão. Na esquerda é mostrado o valor absoluto do fasor dinâmico da tensão e à direita a parte real e imaginária do respectivo fasor. De maneira análoga, o valor absoluto do fasor dinâmico da corrente e suas partes real e imaginária são apresentadas na Figura 7.

A Figura 8 apresenta uma comparação com o PSCAD, mostrando que as curvas são visualmente coincidentes, com exceção da medida RMS analógica da tensão, que possui

uma ondulação análoga a um *ripple* (inerente ao medidor analógico do PSCAD), por não ser equivalente à medida fasorial exata. A medição obtida com a raiz quadrada da soma quadrática das tensões instantâneas das fases, também representada na Figura 8, é coincidente com o AnaHVDC. A Figura 9 mostra uma comparação com o ANATEM. No gráfico da corrente pode-se observar a ausência da dinâmica eletromagnética do circuito.

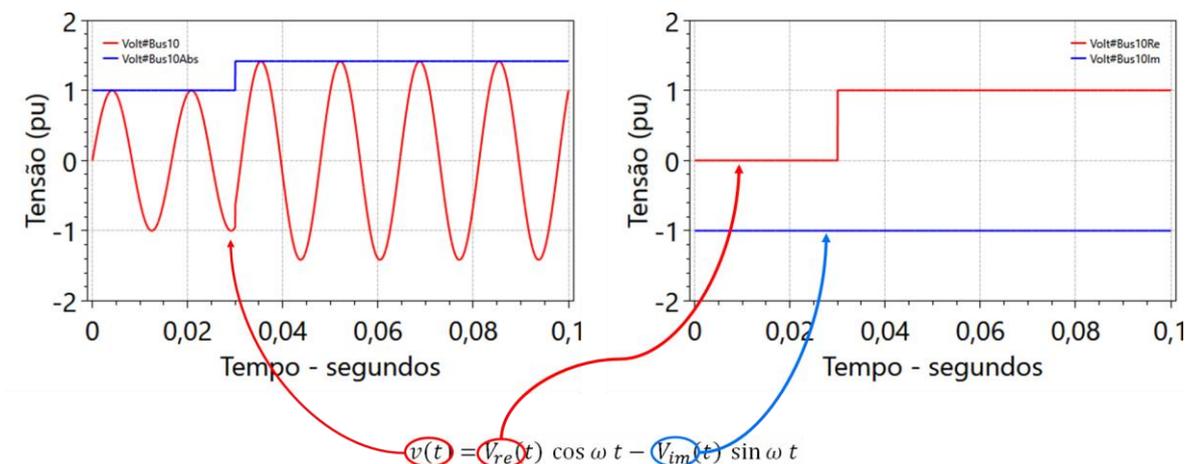


Figura 6 – Forma de onda da tensão

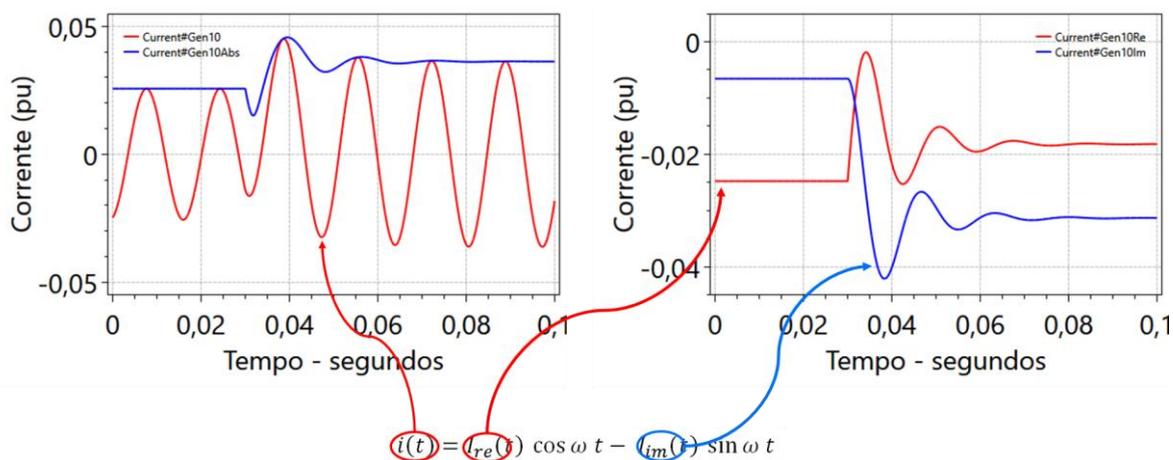


Figura 7 – Forma de onda da corrente

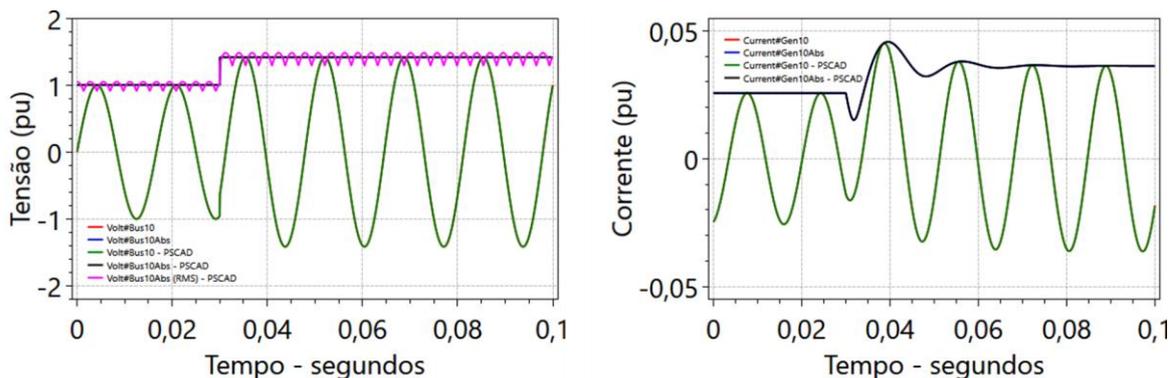


Figura 8 – Comparação AnaHVDC *versus* PSCAD

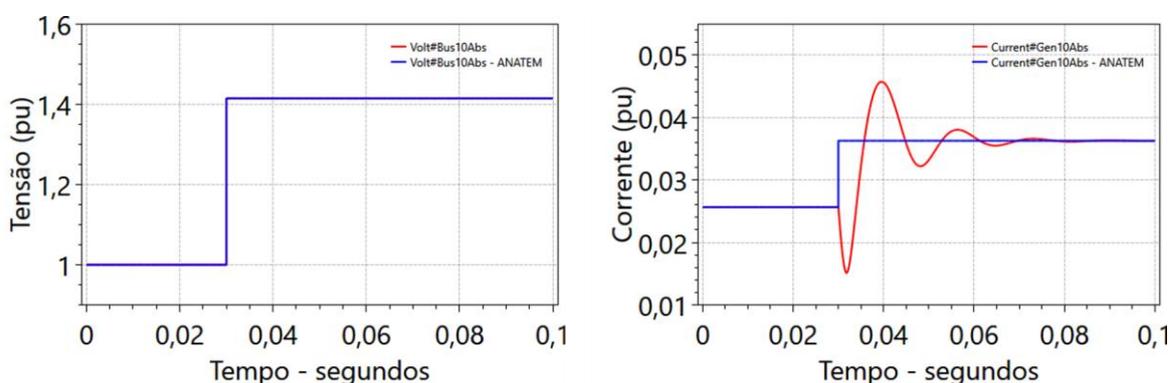


Figura 9 – Comparação AnaHVDC *versus* ANATEM

Uma observação a ser feita é que na metodologia apresentada a formulação matemática não possui perda de precisão utilizando apenas fasor dinâmico de frequência fundamental, sem a necessidade de fasores harmônicos. Por outro lado, se fosse utilizada a janela deslizante [34], para obtenção da corrente $i(t)$ seriam necessários infinitos fasores harmônicos para que a representação fosse exata, e haveria o fenômeno de Gibbs [36].

Concluindo, na metodologia apresentada a representação apenas com fasores fundamentais, sem a utilização de janelas deslizantes, é suficiente para a modelagem exata de circuitos com apenas elementos lineares na rede de corrente alternada, para que não haja harmônicos em regime permanente. Como será visto mais adiante, no caso de elementos não lineares com as não linearidades atuando apenas transitoriamente, não em regime permanente, como é o caso de para-raios e saturação de transformadores, ainda será possível a representação sem perda de precisão por fasores dinâmicos fundamentais.

2.2 Simulação de transitórios eletromagnéticos usando fasores dinâmicos

O trabalho realizado em [7] propõe uma nova metodologia de modelagem computacional para simulação de transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência de grande porte contendo equipamentos não-lineares, como o elo CCAT. A metodologia consiste na aplicação do método trapezoidal aos elementos da rede modelados como fasores dinâmicos resultando em modelos de acompanhamento. No trabalho foram apresentados os modelos de acompanhamento para os elementos básicos da rede CA (resistência, indutância, capacitância e linha de transmissão com parâmetros distribuídos) modelada por fasores dinâmicos.

Para exemplificar a aplicação do método trapezoidal aos elementos da rede modelados por fasores dinâmicos, será apresentado na próxima seção, de forma resumida, o modelo de acompanhamento desenvolvido em [7] para a linha de transmissão.

2.2.1 Modelo de acompanhamento para linha de transmissão

Para o modelo de parâmetros distribuídos da linha foi utilizado o modelo de *Bergeron* sem perdas [2] e [72]. As equações que relacionam tensão e corrente, apresentada na Figura 10, são equacionadas por:

$$v_k(t - \tau) + Zi_{km}(t - \tau) = v_m(t) - Zi_{mk}(t) \quad (43)$$

$$v_m(t - \tau) + Zi_{mk}(t - \tau) = v_k(t) - Zi_{km}(t) \quad (44)$$

Sendo: Z representando a impedância característica da linha de transmissão e τ representando o seu tempo de propagação.

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (45)$$

$$\tau = l\sqrt{LC} \quad (46)$$

Sendo: L a indutância série e C a capacitância paralela por unidade de comprimento da linha.

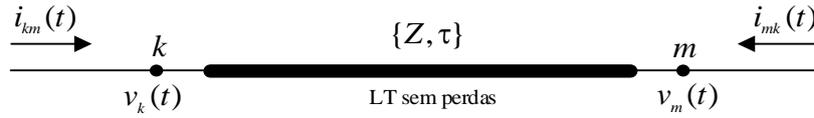


Figura 10 – Linha de transmissão sem perdas entre dois nós genéricos k e m . [7]

De modo geral, as tensões e correntes instantâneas podem ser expressas como um somatório que depende das componentes real e imaginária dos fasores dinâmicos de tensão e corrente e da velocidade angular. Cada termo do somatório corresponde a uma ordem harmônica ($h = 1$ para a componente fundamental, $h = 2$ para a segunda ordem harmônica, até n_h ordem harmônica). Os equacionamentos para tensão seguem nas equações (47) e (48), e para as correntes nas equações (49) e (50).

$$v_k(t) = \sum_{h=1}^{n_h} V_{h_{k_{re}}}(t)\cos(h\omega t) - V_{h_{k_{im}}}(t)\sen(h\omega t) \quad (47)$$

$$v_m(t) = \sum_{h=1}^{n_h} V_{h_{m_{re}}}(t)\cos(h\omega t) - V_{h_{m_{im}}}(t)\sen(h\omega t) \quad (48)$$

$$i_{km}(t) = \sum_{h=1}^{n_h} I_{h_{km_{re}}}(t)\cos(h\omega t) - I_{h_{km_{im}}}(t)\sen(h\omega t) \quad (49)$$

$$i_{mk}(t) = \sum_{h=1}^{n_h} I_{h_{mk_{re}}}(t)\cos(h\omega t) - I_{h_{mk_{im}}}(t)\sen(h\omega t) \quad (50)$$

Usando o fato da rede ser modelada de forma linear, o cálculo das tensões e correntes pode ser realizado usando o princípio da superposição. Dessa forma, obtemos n_h redes, cada uma correspondente à sua respectiva ordem harmônica ($h\omega$). Os fasores dinâmicos da componente fundamental ($h = 1$) da tensão e corrente, para ambos os terminais da linha, são dados por:

$$v_k(t) = V_{k_{re}}(t)\cos(\omega t) - V_{k_{im}}(t)\sen(\omega t) \quad (51)$$

$$v_m(t) = V_{m_{re}}(t)\cos(\omega t) - V_{m_{im}}(t)\sen(\omega t) \quad (52)$$

$$i_{km}(t) = I_{km_{re}}(t)\cos(\omega t) - I_{km_{im}}(t)\sen(\omega t) \quad (53)$$

$$i_{mk}(t) = I_{mk_{re}}(t)\cos(\omega t) - I_{mk_{im}}(t)\sen(\omega t) \quad (54)$$

Escrevendo (43) em termos dos fasores dinâmicos, separando-se os termos dos fasores que multiplicam os senos e cossenos e isolando o termo da corrente no tempo t encontram-se os fasores dinâmicos para a corrente I_{mk} :

$$I_{mk_{re}}(t) = \frac{V_{m_{re}}(t)}{Z} - V_{re}(t - \tau) \frac{\cos(\omega\tau)}{Z} - I_{km_{re}}(t - \tau) \cos(\omega\tau) \\ - V_{k_{im}}(t - \tau) \frac{\text{sen}(\omega\tau)}{Z} - I_{km_{im}}(t - \tau) \text{sen}(\omega\tau) \quad (55)$$

$$I_{mk_{im}}(t) = \frac{V_{m_{im}}(t)}{Z} - V_{k_{im}}(t - \tau) \frac{\cos(\omega\tau)}{Z} - I_{km_{im}}(t - \tau) \cos(\omega\tau) \\ - V_{k_{re}}(t - \tau) \frac{\text{sen}(\omega\tau)}{Z} - I_{km_{re}}(t - \tau) \text{sen}(\omega\tau) \quad (56)$$

Para obter os fasores para a corrente I_{km} , equação (44), basta trocar nas equações (55) e (56) os índices k por m e vice-versa.

$$I_{km_{re}}(t) = \frac{V_{k_{re}}(t)}{Z} - V_{m_{re}}(t - \tau) \frac{\cos(\omega\tau)}{Z} - I_{mk_{re}}(t - \tau) \cos(\omega\tau) \\ - V_{m_{im}}(t - \tau) \frac{\text{sen}(\omega\tau)}{Z} - I_{mk_{im}}(t - \tau) \text{sen}(\omega\tau) \quad (57)$$

$$I_{km_{im}}(t) = \frac{V_{k_{im}}(t)}{Z} - V_{m_{im}}(t - \tau) \frac{\cos(\omega\tau)}{Z} - I_{mk_{im}}(t - \tau) \cos(\omega\tau) \\ - V_{m_{re}}(t - \tau) \frac{\text{sen}(\omega\tau)}{Z} - I_{mk_{re}}(t - \tau) \text{sen}(\omega\tau) \quad (58)$$

Escrevendo o sistema de equações na forma matricial tem-se:

$$\begin{bmatrix} I_{mk_{re}}(t) \\ I_{mk_{im}}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{Z} & 0 \\ 0 & \frac{1}{Z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{m_{re}}(t) \\ V_{m_{im}}(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{\cos(\omega\tau)}{Z} & \frac{\text{sen}(\omega\tau)}{Z} \\ -\frac{\text{sen}(\omega\tau)}{Z} & \frac{\cos(\omega\tau)}{Z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{k_{re}}(t - \tau) \\ V_{k_{im}}(t - \tau) \end{bmatrix} \\ - \begin{bmatrix} \cos(\omega\tau) & \text{sen}(\omega\tau) \\ -\text{sen}(\omega\tau) & \cos(\omega\tau) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{km_{re}}(t - \tau) \\ I_{km_{im}}(t - \tau) \end{bmatrix} \quad (59)$$

$$\begin{bmatrix} I_{km_{re}}(t) \\ I_{km_{im}}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{Z} & 0 \\ 0 & \frac{1}{Z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{k_{re}}(t) \\ V_{k_{im}}(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{\cos(\omega\tau)}{Z} & \frac{\text{sen}(\omega\tau)}{Z} \\ -\frac{\text{sen}(\omega\tau)}{Z} & \frac{\cos(\omega\tau)}{Z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{m_{re}}(t - \tau) \\ V_{m_{im}}(t - \tau) \end{bmatrix} \\ - \begin{bmatrix} \cos(\omega\tau) & \text{sen}(\omega\tau) \\ -\text{sen}(\omega\tau) & \cos(\omega\tau) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{mk_{re}}(t - \tau) \\ I_{mk_{im}}(t - \tau) \end{bmatrix} \quad (60)$$

Chamando os termos com informação do passado, indicados pelas funções de atraso $(t - \tau)$, por B_k e B_m tem-se:

$$\begin{bmatrix} B_{m_{re}}(t) \\ B_{m_{im}}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\cos(\omega\tau)}{Z} & \frac{\text{sen}(\omega\tau)}{Z} \\ -\frac{\text{sen}(\omega\tau)}{Z} & \frac{\cos(\omega\tau)}{Z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{k_{re}}(t - \tau) \\ V_{k_{im}}(t - \tau) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(\omega\tau) & \text{sen}(\omega\tau) \\ -\text{sen}(\omega\tau) & \cos(\omega\tau) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{km_{re}}(t - \tau) \\ I_{km_{im}}(t - \tau) \end{bmatrix} \quad (61)$$

$$\begin{bmatrix} B_{k_{re}}(t) \\ B_{k_{im}}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\cos(\omega\tau)}{Z} & \frac{\text{sen}(\omega\tau)}{Z} \\ -\frac{\text{sen}(\omega\tau)}{Z} & \frac{\cos(\omega\tau)}{Z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{m_{re}}(t - \tau) \\ V_{m_{im}}(t - \tau) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(\omega\tau) & \text{sen}(\omega\tau) \\ -\text{sen}(\omega\tau) & \cos(\omega\tau) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{mk_{re}}(t - \tau) \\ I_{mk_{im}}(t - \tau) \end{bmatrix} \quad (62)$$

Reescrevendo as equações (59) e (60) em função de B_k e B_m tem-se:

$$\begin{bmatrix} I_{mk_{re}}(t) \\ I_{mk_{im}}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/Z & 0 \\ 0 & 1/Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{m_{re}}(t) \\ V_{m_{im}}(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} B_{m_{re}}(t) \\ B_{m_{im}}(t) \end{bmatrix} \quad (63)$$

$$\begin{bmatrix} I_{km_{re}}(t) \\ I_{km_{im}}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/Z & 0 \\ 0 & 1/Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{k_{re}}(t) \\ v_{k_{im}}(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} B_{k_{re}}(t) \\ B_{k_{im}}(t) \end{bmatrix} \quad (64)$$

A

Figura 11 e a Figura 12 mostram os circuitos equivalentes que são os respectivos modelos de acompanhamento de fasores dinâmicos para a parte real e imaginária da corrente, respectivamente.

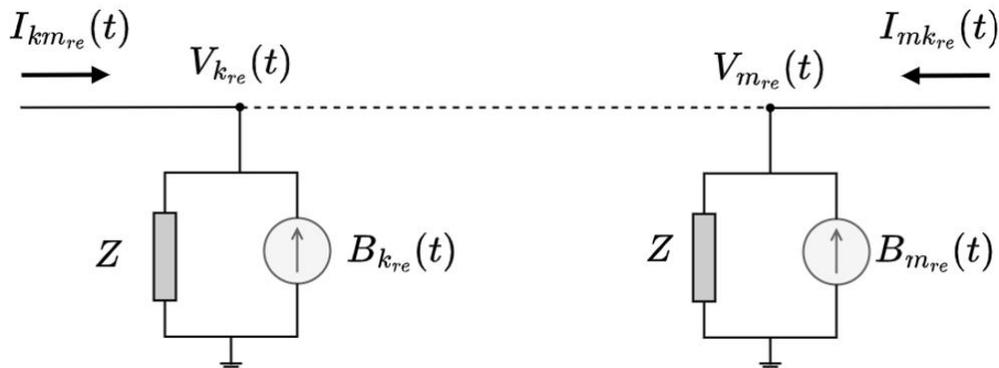


Figura 11 – Modelo de acompanhamento da LT sem perdas (parte real) [7]

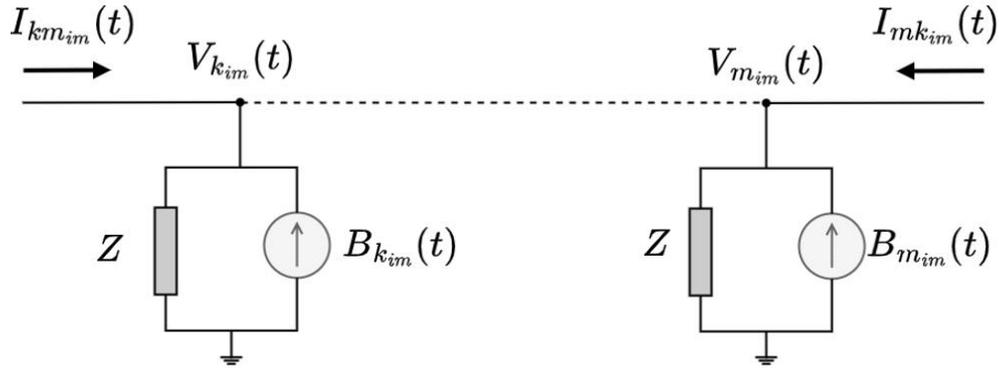


Figura 12 – Modelo de acompanhamento da LT sem perdas (parte imaginária) [7]

Esse mesmo modelo de acompanhamento pode ser descrito passando do domínio do tempo para o domínio fasorial. Para isso, soma-se a (57) à equação (58) multiplicada por j .

$$\begin{aligned}
 I_{km_{re}}(t) + jI_{km_{im}}(t) &= \frac{V_{kre}(t)}{Z} + j\frac{V_{kim}(t)}{Z} - V_{mre}(t - \tau)\frac{\cos(\omega\tau)}{Z} \\
 &\quad - jV_{mim}(t - \tau)\frac{\cos(\omega\tau)}{Z} \\
 &\quad - I_{mk_{re}}(t - \tau)\cos(\omega\tau) - jI_{mk_{im}}(t - \tau)\cos(\omega\tau) \\
 &\quad - V_{mim}(t - \tau)\frac{\sen(\omega\tau)}{Z} - jV_{mre}(t - \tau)\frac{\sen(\omega\tau)}{Z} \\
 &\quad - I_{mk_{im}}(t - \tau)\sen(\omega\tau) - jI_{mk_{re}}(t - \tau)\sen(\omega\tau)
 \end{aligned} \tag{65}$$

Para a relação fasorial, tem-se que:

$$\tilde{V}(t) = V_{re}(t) + jV_{im}(t) \tag{66}$$

$$\tilde{I}(t) = I_{re}(t) + jI_{im}(t) \tag{67}$$

Usando (66) e (67) em (65):

$$\begin{aligned}
 \tilde{I}_{km}(t) &= \frac{\tilde{V}_k(t)}{Z} - \tilde{V}_m(t - \tau)\frac{\cos(\omega\tau)}{Z} - \tilde{I}_{mk}(t - \tau)\cos(\omega\tau) - j\tilde{V}_m(t - \tau)\frac{\sen(\omega\tau)}{Z} \\
 &\quad - j\tilde{I}_{mk}(t - \tau)\sen(\omega\tau)
 \end{aligned} \tag{68}$$

$$\begin{aligned}
 \tilde{I}_{km}(t) &= \frac{\tilde{V}_k(t)}{Z} - \frac{\tilde{V}_m(t - \tau)}{Z} [\cos(\omega\tau) - j\sen(\omega\tau)] \\
 &\quad - \tilde{I}_{mk}(t - \tau) [\cos(\omega\tau) - j\sen(\omega\tau)]
 \end{aligned} \tag{69}$$

Usando a fórmula de *Euler*:

$$e^{-j\omega\tau} = \cos(\omega\tau) - j \operatorname{sen}(\omega\tau) \quad (70)$$

Assim, tem-se a seguinte relação fasorial:

$$\tilde{I}_{km}(t) = \frac{\tilde{V}_k(t)}{Z} - \frac{\tilde{V}_m(t - \tau)}{Z} e^{-j\omega\tau} - \tilde{I}_{mk}(t - \tau) e^{-j\omega\tau} \quad (71)$$

Analogamente pode-se determinar a corrente fasorial $\tilde{I}_{mk}(t)$:

$$\tilde{I}_{mk}(t) = \frac{\tilde{V}_m(t)}{Z} - \frac{\tilde{V}_k(t - \tau)}{Z} e^{-j\omega\tau} - \tilde{I}_{km}(t - \tau) e^{-j\omega\tau} \quad (72)$$

Chamando os termos com informação do passado, indicados pelas funções de atraso $(t - \tau)$, por \tilde{B}_k e \tilde{B}_m tem-se:

$$\tilde{B}_k(t) = \frac{\tilde{V}_m(t - \tau)}{Z} e^{-j\omega\tau} + \tilde{I}_{mk}(t - \tau) e^{-j\omega\tau} \quad (73)$$

$$\tilde{B}_m(t) = \frac{\tilde{V}_k(t - \tau)}{Z} e^{-j\omega\tau} + \tilde{I}_{km}(t - \tau) e^{-j\omega\tau} \quad (74)$$

De forma que as correntes passam a ser reescritas em função de \tilde{B}_k e \tilde{B}_m :

$$\tilde{I}_{km}(t) = \frac{\tilde{V}_k(t)}{Z} - \tilde{B}_k(t) \quad (75)$$

$$\tilde{I}_{mk}(t) = \frac{\tilde{V}_m(t)}{Z} - \tilde{B}_m(t) \quad (76)$$

Tendo-se, portanto, o equacionamento fasorial da linha de transmissão monofásica sem perdas. Seu respectivo modelo de acompanhamento segue ilustrado na Figura 13.

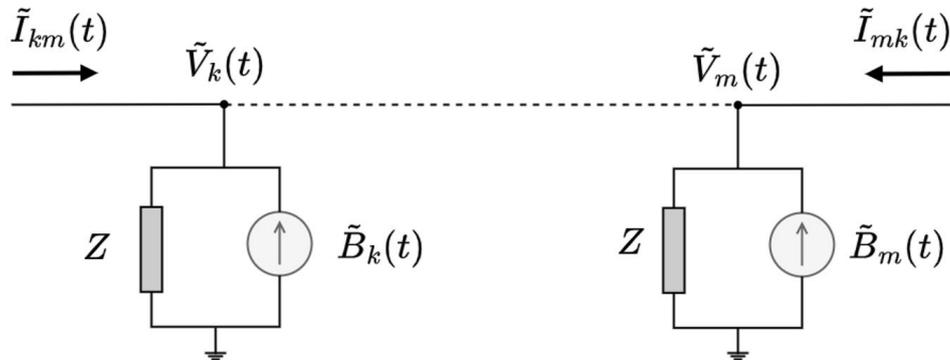


Figura 13 – Modelo de acompanhamento da LT sem perdas (domínio fasorial)

Para representação da linha de transmissão com perdas [7], assumiu-se a resistência constante e concentrada em determinados pontos de um trecho com modelos de linha sem perdas em série com resistências ideais, cuja soma corresponde à resistência total (R) da linha, conforme mostrado na Figura 14.

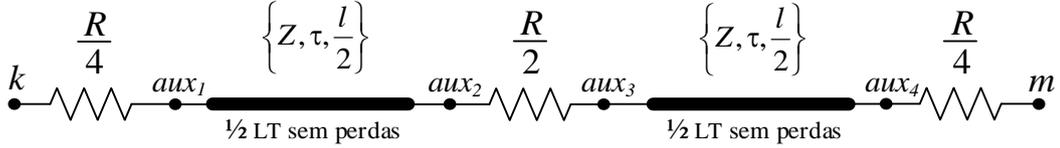


Figura 14 – Modelo aproximado para LT com perdas [7]

A LT com perdas pode ser escrita da seguinte forma na notação fasorial [21]:

$$\tilde{I}_{km}(t) = \frac{\tilde{V}_k(t)}{Z_{eq}} - \tilde{B}_k(t) \quad (77)$$

$$\tilde{I}_{mk}(t) = \frac{\tilde{V}_m(t)}{Z_{eq}} - \tilde{B}_m(t) \quad (78)$$

Em que a impedância equivalente assume:

$$Z_{eq} = Z + \frac{R}{4} \quad (79)$$

E os termos \tilde{B}_k e \tilde{B}_m :

$$\begin{aligned} \tilde{B}_k(t) = & \frac{1 + \alpha_{eq}}{2} \left[\frac{\tilde{V}_m(t - \tau)}{Z_{eq}} e^{-j\omega\tau} + \frac{1 + \alpha_{eq}}{2} \tilde{I}_{mk}(t - \tau) e^{-j\omega\tau} \right] \\ & + \frac{1 - \alpha_{eq}}{2} \left[\frac{\tilde{V}_m(t - \tau)}{Z_{eq}} e^{-j\omega\tau} + \frac{1 + \alpha_{eq}}{2} \tilde{I}_{mk}(t - \tau) e^{-j\omega\tau} \right] \end{aligned} \quad (80)$$

$$\begin{aligned} \tilde{B}_m(t) = & \frac{1 + h_{eq}}{2} \left[\frac{\tilde{V}_k(t - \tau)}{Z_{eq}} e^{-j\omega\tau} + \frac{1 + \alpha_{eq}}{2} \tilde{I}_{km}(t - \tau) e^{-j\omega\tau} \right] \\ & + \frac{1 - h_{eq}}{2} \left[\frac{\tilde{V}_k(t - \tau)}{Z_{eq}} e^{-j\omega\tau} + \frac{1 + \alpha_{eq}}{2} \tilde{I}_{km}(t - \tau) e^{-j\omega\tau} \right] \end{aligned} \quad (81)$$

Onde tem-se que α_{eq} que consiste no fator para ajustar as ondas de tensão e corrente em uma linha de transmissão com perdas:

$$\alpha_{eq} = \left(\frac{Z - \frac{R}{4}}{Z + \frac{R}{4}} \right) \quad (82)$$

Nos casos em que se desejar considerar a dinâmica dos fasores dinâmicos harmônicos, pode-se usar a superposição para modelar a parte linear da rede como um conjunto de redes desacopladas entre si, cada qual com a frequência correspondente à ordem harmônica. Note que esse mesmo modelo pode ser utilizado nas redes harmônicas caso elas sejam consideradas. Para tal, basta substituir ω por $h\omega$ nos equacionamentos.

O acoplamento harmônico, nesse contexto, ocorre devido às injeções de corrente pelos modelos não lineares. Cabe ressaltar que, na análise realizada nesta tese, tanto a rede quanto o modelo são representados utilizando o fasor dinâmico fundamental, considerando que na simulação de transitórios de manobra não haverá a utilização de modelos não lineares com fasores dinâmicos harmônicos, o que é razoável para esse tipo de simulação.

Além da questão dos fasores harmônicos, os elementos não-lineares introduzem uma complexidade adicional: o seu modelo de acompanhamento passa a ser iterativo [7]. O modelo é uma função da tensão terminal que depende da rede cuja solução depende do modelo de acompanhamento. Esta solução foi resolvida em [7] por um método de *Quasi-Newton* e possui taxa de convergência praticamente quadrática.

Para este trabalho, onde os elementos não lineares considerados, para-raios e magnetização de transformadores, não atuam em regime permanente, apenas transitoriamente, não haverá a necessidade de uso de fasores dinâmicos harmônicos, no entanto, o modelo de acompanhamento será iterativo.

2.2.2 Modelo de acompanhamento linearizado genérico para equipamentos não lineares

O trabalho proposto em [7] apresenta o tópico sobre modelagem de equipamentos não lineares. Os modelos lineares são resolvidos de forma direta, enquanto os modelos não lineares são resolvidos de forma iterativa. Os modelos não lineares são resolvidos separadamente considerando a primeira estimativa para a tensão terminal. Depois, os modelos de acompanhamento são linearizados e incluídos na solução da rede. A cada passo de integração numérica esse mesmo procedimento se repete [7].

A proposta de modelagem da tese consiste em método alternado e modular, mas que numericamente se equivale à solução simultânea obtida pelo método de *Newton-Raphson* devido ao modelo de acompanhamento linearizado [7].

As relações da tensão $\mathbf{v}(t)$ e corrente $\mathbf{i}(t)$ de um modelo em termos de fasores dinâmicos e com as equações diferenciais transformadas em algébricas depois de aplicada a regra trapezoidal assume a formulação descrita em (83) e (84).

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}(t)) + \mathbf{B}\mathbf{v}(t) = 0 \quad (83)$$

$$\mathbf{i}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \quad (84)$$

Sendo $\mathbf{x}(t)$ as variáveis de estado do modelo do equipamento. As matrizes \mathbf{B} e \mathbf{C} são matrizes compostas de “0” e “1” com o objetivo de correlacionar a tensão interna com a tensão de entrada e a corrente interna com a corrente de saída, respectivamente. As equações (83) e (84) linearizadas em termos diferenciais assumem:

$$\mathbf{J}\mathbf{d}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{d}\mathbf{v}(t) = 0 \quad (85)$$

$$\mathbf{d}\mathbf{i}(t) = \mathbf{C}\mathbf{d}\mathbf{x}(t) \quad (86)$$

O termo \mathbf{J} , denominado Jacobiano, é formado pelas derivadas parciais da função \mathbf{f} em relação a cada variável \mathbf{x} . A relação entre os diferenciais de corrente e tensão é chamada de matriz de Sensibilidade $\mathbf{S}(t)$ [7]. Assim, resolvendo (85) para $\mathbf{d}\mathbf{x}(t)$ e substituindo em (86), obtém-se:

$$\mathbf{d}\mathbf{i}(t) = -\mathbf{C}\mathbf{J}^{-1}\mathbf{B}\mathbf{d}\mathbf{v}(t) = \mathbf{S}(t)\mathbf{d}\mathbf{v}(t) \quad (87)$$

Aplicando o método de *Newton-Raphson* para a solução da rede em (87):

$$\mathbf{i}(t)^{(p+1)} - \mathbf{i}(t)^{(p)} = \mathbf{S}(t)^{(p)}[\mathbf{v}(t)^{(p+1)} - \mathbf{v}(t)^{(p)}] \quad (88)$$

Assim, obtém-se:

$$\mathbf{i}(t)^{(p+1)} = \mathbf{S}(t)^{(p)}\mathbf{v}(t)^{(p+1)} + \mathbf{i}_s(t)^{(p)} \quad (89)$$

Onde $\mathbf{i}_s(t)^{(p)}$ é uma corrente injetada que é a parcela de (88) que utiliza os valores de tensão e corrente da iteração anterior, sendo dada por:

$$\mathbf{i}_s(t)^{(p)} = \mathbf{i}(t)^{(p)} - \mathbf{S}(t)^{(p)}\mathbf{v}(t)^{(p)} \quad (90)$$

O Modelo Linearizado de Acompanhamento (MLA) é uma forma análoga daquelas obtidas para os elementos lineares da rede. No modelo de acompanhamento, a fonte considera apenas os termos dependentes do passo de tempo anterior. Em contraste, no MLA, a fonte depende dos termos da iteração anterior no passo de tempo atual. Quando equações diferenciais estão presentes, a corrente no modelo de acompanhamento também dependerá das grandezas do passo anterior. No entanto, para simplificar a notação, esses

termos não foram explicitamente apresentados, pois podem ser considerados constantes durante as iterações. Embora o MLA tenha uma forma que, aparentemente, se assemelha àquela proposta em [22], tal fonte de corrente é iterativa, ou seja, depende dos valores de $\mathbf{v}(t)^{(p)}$ e $\mathbf{i}(t)^{(p)}$ na iteração anterior de índice (p) . Os termos históricos, oriundos da solução das equações diferenciais através do método de integração trapezoidal, são atualizados a cada passo de integração, e estão implicitamente embutidos no MLA. Os termos $I_{s_{re}}(t)$ e $I_{s_{im}}(t)$ indicam matematicamente essa relação. Para cada passo os termos históricos são atualizados, mas são tratados como constantes dentro do laço de solução dos modelos. A Figura 15 apresenta esquematicamente o modelo linearizado de acompanhamento generalizado, na formulação de fasores dinâmicos, descrito nessa seção.

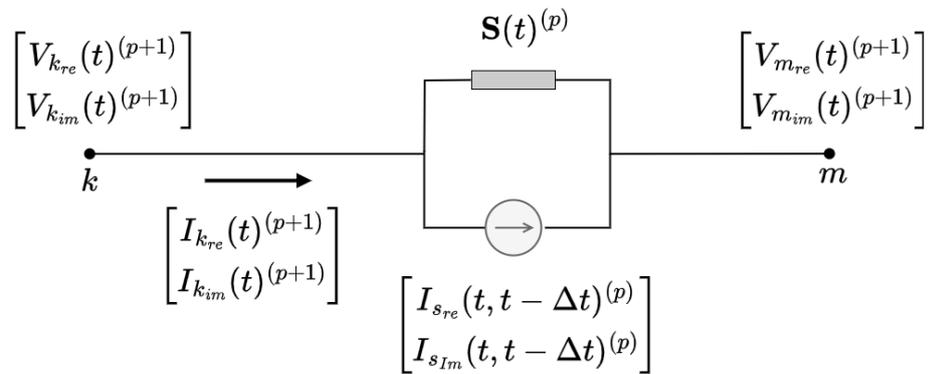


Figura 15 – Modelo de acompanhamento linearizado generalizado

Em que a matriz $\mathbf{S}(t)^{(p)}$ é dada pela equação (91).

$$\mathbf{S}(t)^{(p)} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial I_{km_{re}}}{\partial V_{km_{re}}} (t) \right)^{(p)} & \left(\frac{\partial I_{km_{re}}}{\partial V_{km_{im}}} (t) \right)^{(p)} \\ \left(\frac{\partial I_{km_{im}}}{\partial V_{km_{re}}} (t) \right)^{(p)} & \left(\frac{\partial I_{km_{im}}}{\partial V_{km_{im}}} (t) \right)^{(p)} \end{bmatrix} \quad (91)$$

Com este MLA, a cada iteração que o modelo é resolvido, atualiza-se a matriz de condutâncias com as sensibilidades calculadas e o vetor de correntes injetadas para solução da rede. Nesta solução de rede, observa-se a convenção de sinal adotada é que para o nó k injeta-se o negativo da fonte de corrente e para o nó m injeta-se a corrente da fonte sem mudança de sinal. Para maior eficiência computacional desta solução, os nós dos modelos não lineares são ordenados no final da matriz e é feita apenas a refatoração da tabela LU destes nós, a cada vez que os elementos são atualizados com as novas sensibilidades.

2.3 Transitórios eletromagnéticos de manobra

Em uma visão geral, os transitórios eletromagnéticos se situam na ampla faixa de frequência entre 10Hz a aproximadamente 100MHz [3], ilustrado na Figura 16. Notadamente a faixa que abrange os fenômenos de transitórios eletromagnéticos, de interesse particular desta tese, está destacada na figura. Mais especificamente ainda, os transitórios de manobra são aqueles relacionados a chaveamentos, sendo considerada nessa categoria também a aplicação de defeito.

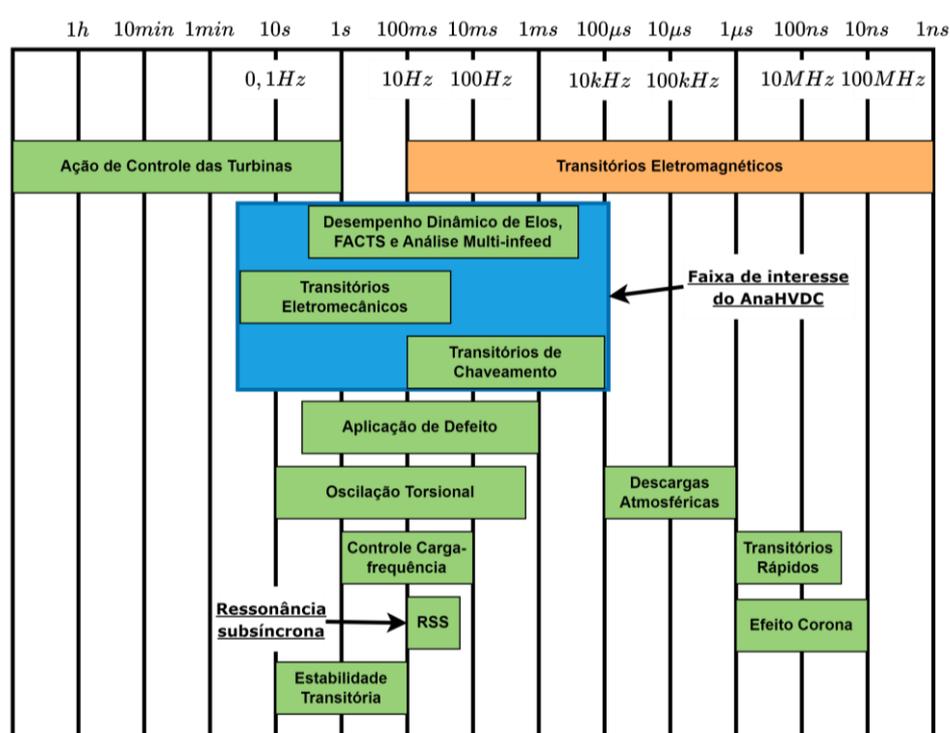


Figura 16 – Fenômenos físicos de sistemas de potência e respectivas faixas de frequência.

Adaptado de [3].

Considerando a existência de eventos transitórios, uma consequência para o sistema de transmissão são as sobretensões observáveis. Tais sobretensões são variáveis com o tempo e podem ser de dois tipos: externas ou internas [3]. As externas são derivadas de descargas atmosféricas e as internas podem ser derivadas de manobra de disjuntores ou de curtos-circuitos. A classificação das sobretensões pode considerar o grau de amortecimento, tempo de duração e a distinção entre as categorias de sobretensão, ficando divididos em [3]:

- Surtos atmosféricos, ou sobretensões de frente rápida, que são fenômenos de duração muito curta (dezenas de microssegundos);
- Surtos de manobra ou chaveamento, ou sobretensões de frente lenta, que são decorrentes de manobras tais como: energização, rejeição de carga, religamento tripolar e monopolar;
- Sobretensões temporárias que ocorrem após o amortecimento das sobretensões transitórias iniciais.

Esquemáticamente, a Figura 17 mostra os diferentes tipos de sobretensões em um sistema de extra alta tensões e suas sobretensões típicas.

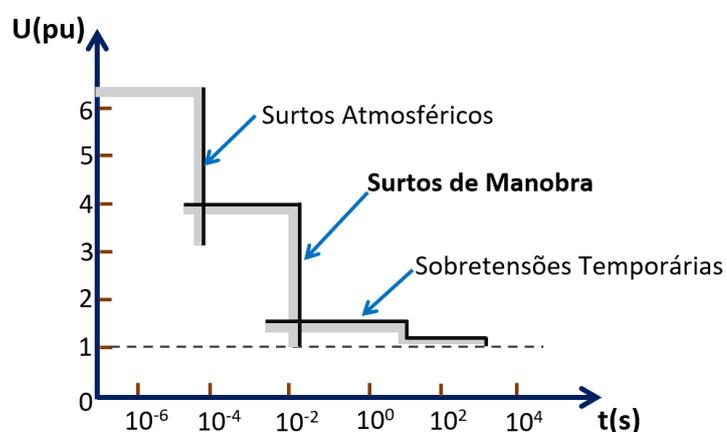


Figura 17 – Sobretensões transitórias e suas origens. Adaptado de [3].

Os modelos implementados no âmbito da tese estão contemplados na categoria do surto de manobra ou chaveamento (destacado em negrito na Figura 17), também denominados sobretensões de frente lenta. As frequências presentes se enquadram na faixa de centenas de Hz até algumas dezenas de kHz [2].

A Tabela 1 apresenta um resumo dos valores máximos fase-terra para cada um dos tipos de manobra que estão contemplados pelas sobretensões de frente lenta. Assim, trata-se de um guia-resumo de referência não apenas em relação aos valores, mas também em relação à classificação. Os valores para os resistores de pré-inserção na faixa de 300 a 600 Ω são frequentemente utilizados em linhas de transmissão longas e transformadores de potência. Esse intervalo, em geral, permite uma atenuação das correntes transitórias sem quedas excessivas de tensão durante a energização. No entanto, outros fatores devem ser considerados, tais como: a impedância característica da linha de transmissão, a energia transitória que será dissipada. Para auxílio na escolha dos valores, pode-se usar como referência normas, a exemplo da IEC 62271-100 para disjuntores.

Tabela 1 – Resumo do valor máximo fase-terra para diferentes tipos de manobra. Adaptado de [3]

Tipo de Manobra	Sem Equipamentos Especiais		Desvio padrão (%)	Com Resistor (300 a 600Ω)		Com Sincronização Sem Resistor
	Valor Máximo (pu)			Valor Máximo (pu)	Desvio padrão (%)	Valor Máximo (pu)
	Início da Linha	Fim da Linha				
Energização de Linhas	1,5 a 2,5	2,0 a 3,0 ⁽¹⁾	15 a 20	1,3 a 2,2	4 a 8	1,45 a 1,7
Religamento Tripolar	2,0 a 3,0	3,0 a 5,0 ⁽²⁾	10 a 25	1,2 a 1,7 ⁽³⁾ 1,5 a 2,5		1,3 a 1,6
Religamento Monopolar	< 2,0	1,8 a 2,5 ⁽⁴⁾		< 1,8 ⁽⁴⁾ < 2,3		
Eliminação de Curto	< 2,0	< 2,5		1,5 ⁽³⁾		
Rejeição de Carga	1,25 a 1,75	1,5 a 2,0		1,5 ⁽³⁾		
Ocorrência de Curtos	1,3 a 1,6	1,6 a 2,2				
Abertura de Cargas Indutivas	2,5			1,3 a 1,5 ⁽³⁾		
Abertura de Linhas em Vazio	1,3 a 1,5					
Energização de Linha e Transformador	1,2 a 1,8					
Energização de Banco de Capacitores	2,0					
Primeira Reignição do Banco de Capacitor	3,0					

(1) Se usar para-raios, esses valores ficam entre 2 e 2,2.

(2) Valores indicados são pessimistas.

(3) Com resistor em abertura.

(4) Presença de reatores na linha.

Capítulo 3 - Metodologia proposta

Esse capítulo apresentará a metodologia proposta na modelagem dos equipamentos de interesse desta tese. Inicialmente, aborda-se a metodologia fasorial para simulações de transitórios eletromagnéticos de manobra, que seria a metodologia em aspecto mais amplo e posteriormente serão abordados os aspectos mais específicos das modelagens desenvolvidas com fasores dinâmicos dos para-raios, magnetização de transformadores, linhas de transmissão desbalanceadas e análise estatística.

3.1 Metodologia fasorial para simulação de transitórios eletromagnéticos de manobra

A metodologia fasorial para simulação de transitórios eletromagnéticos de manobra consiste na abordagem através dos modelos de acompanhamento por meio de fasores dinâmicos. Tradicionalmente, esses modelos de acompanhamento são descritos nas variáveis instantâneas [22]. No entanto, tratar esses modelos no domínio fasorial, mais especificamente via fasores dinâmicos, permite vantagens não alcançadas na abordagem instantânea. Do ponto de vista geral, os fasores dinâmicos se comportam como os fasores convencionais em situações estacionárias e conseguem representar a dinâmica em situações transitórias. A equação (92) apresenta um sinal no tempo genérico $x(t)$, onde os coeficientes $X_{re}(t)$ e $X_{im}(t)$ são as componentes real e imaginária do fasor dinâmico $\tilde{X}(t)$.

$$x(t) = X_{re}(t) \cos(\omega t) - X_{im}(t) \sin(\omega t) \quad (92)$$

Pode-se dizer que fasores dinâmicos se comportam como fasores convencionais em regime permanente e variam em situações transitórias, tais como distúrbios no sistema, com comportamento definido por equações diferenciais, sendo utilizados para modelar redes elétricas para análise de transitórios eletromagnéticos, por exemplo. Em se tratando de fasores convencionais, esses coeficientes também podem variar no tempo, mas através de um equacionamento algébrico, a exemplo dos fasores usados em programas de transitórios eletromecânicos (EMC). Ambos os tipos de fasores, tendem a ficar constantes, quando em regime permanente.

Os fasores convencionais são, portanto, um subconjunto dos fasores dinâmicos. Além disso, com a frequência nominal de oscilação e os coeficientes real e imaginário, é possível reconstruir o sinal instantâneo em um instante de tempo t ($x(t) = X_{re}(t) \cos(\omega t) - X_{im}(t) \sin(\omega t)$). Em outras palavras, se o sinal instantâneo consegue capturar as dinâmicas de alta frequência, os fasores dinâmicos também serão capazes de fazê-lo.

Entre as características do programa AnaHVDC estão o compartilhamento da base de dados e a inicialização em regime permanente. As implementações estão realizadas no ambiente C++ no programa AnaHVDC, que está em desenvolvimento pelo CEPEL. O fluxo de potência é modelado no programa ANAREDE e uma vez convergido, no ANATEM utiliza essa rede elétrica em análises eletromecânica. O programa ANAFAS por sua vez, realiza estudos de curto-circuito, tendo informações de sequência zero que subsidiam a modelagem trifásica do sistema. Atualmente, é importante destacar que os arquivos de dados do SIN no ANAFAS apresentam algumas inconsistências, além de não fornecerem, de forma habitual, alguns dados, a exemplo da susceptância de sequência zero das linhas de transmissão. O AnaHVDC é capaz de identificar e emitir avisos (*warnings*) relativo a essas inconsistências, permitindo então a definição de valores típicos para parâmetros ausentes nos arquivos do ANAFAS. Com uma futura revisão e atualização da base de dados do ANAFAS para o SIN, esse problema poderá ser solucionado. Adicionalmente, os dados fornecidos pelo ANAFAS não são suficientes para a representação de fenômenos como desbalanços ou a dependência da frequência da linha. Nesses casos, é necessário fornecer dados complementares, baseados na configuração geométrica da linha, a fim de possibilitar a representação adequada dessas características. Nota-se que dessa forma, o programa AnaHVDC pode ter casos com todo o Sistema Interligado Nacional modelado em situação de regime permanente. A natureza fasorial facilita a inicialização em regime permanente, uma vez que a base de dados também é de natureza fasorial. O acoplamento entre espectros EMC e EMT deve ser observado com atenção, pois envolve a integração de uma ferramenta fasorial convencional de sequência positiva, utilizada no contexto eletromecânico (EMC), com uma ferramenta fasorial de fasores dinâmicos trifásicos, que pode abranger tanto o espectro EMC quanto o EMT.

Com a metodologia proposta os ganhos esperados são diversos, a exemplo da possibilidade de análise de múltiplos pontos de operação assim como é realizado em estudos de estabilidade transitória. Poder-se-á analisar diversas condições operativas em um sistema completo. Isso permitirá maior confiabilidade nos resultados, maior agilidade no desenvolvimento de estudos, permitirá a análise e identificação mais apurada de situações adversas.

Na aplicação da metodologia fasorial em simulações de transitórios eletromagnéticos de manobra, proposta neste trabalho, não teve como foco a análise de harmônicos em componentes não lineares, como elos de corrente contínua e dispositivos FACTS, logo as simulações foram realizadas utilizando fasores dinâmicos na frequência fundamental. Nessa situação, a presença de harmônicos pode ser representada por meio de variações no valor desse fasor fundamental, levando em consideração os efeitos não lineares dos para-raios e da magnetização dos transformadores, como será abordado nas próximas seções.

3.2 Modelo fasorial do para-raios

Essa seção apresenta o desenvolvimento da modelagem do para-raios através da metodologia proposta, conforme o MLA apresentado na seção 2.2.2. Inicialmente, deduz-se o modelo matemático, e, posteriormente, é indicado como o modelo foi implementado computacionalmente. A validação desse modelo e do próximo (modelo de magnetização do transformador) será realizado comparando com a ferramenta de referência, no caso o ATP, no Capítulo 4 com seus respectivos resultados.

A curva de ensaio de para-raios, representada de forma linear por partes, é genericamente ilustrada na Figura 18 com apenas quatro segmentos de reta, por uma questão de simplicidade, mas sem perda de generalidade.

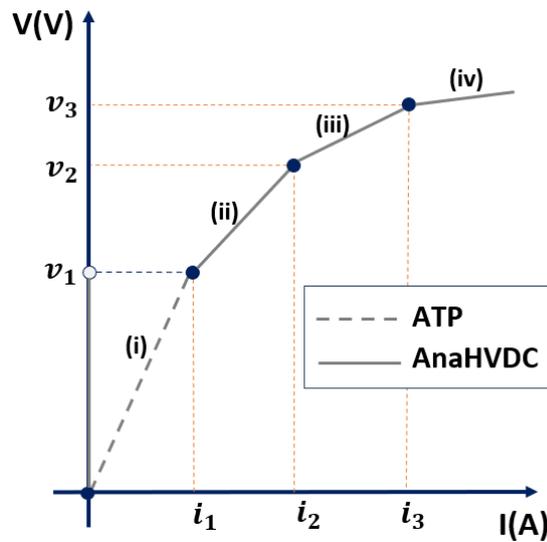


Figura 18 – Curva *I versus V* genérica do para-raio

Observe que a modelagem do primeiro ponto é tratada de forma distinta entre ATP e AnaHVDC. Para o ATP, ocorre interpolação do ponto (i_1, v_1) com a origem indicando que há atuação do para-raios em regime permanente. Para o AnaHVDC, só há atuação do equipamento se a tensão for superior a v_1 . Isso acarreta obter pontos de operação ligeiramente distintos. No entanto, considera-se que a operação a partir do ponto v_1 promove resultados mais realistas.

A corrente instantânea pode ser escrita em função da tensão e sua relação matemática é dada por:

$$i(t) = f(v(t)) \quad (93)$$

Diferenciando ambos os lados de (93) em relação à tensão, tem-se:

$$di(t) = \frac{\partial f(v(t))}{\partial v(t)} dv(t) \quad (94)$$

O termo $\frac{\partial f(v(t))}{\partial v(t)}$ representa a condutância incremental do modelo e os termos $di(t)$ e $dv(t)$ consistem nos termos diferenciais da corrente e tensão respectivamente. Nota-se que a condutância incremental é constante por segmentos. Isto é, como a relação é linear por partes, para cada uma das partes a condutância assumirá o valor do coeficiente angular (derivada de primeira ordem) do trecho da reta.

Para o desenvolvimento do modelo com fasores dinâmicos fundamentais, deve-se representar a tensão e corrente instantâneas por seus respectivos fasores em suas respectivas componentes reais e imaginárias. Assim, tem-se as seguintes equações a serem utilizadas na transformação:

$$v(t) = V_{re}(t) \cos(\omega t) - V_{im}(t) \sin(\omega t) \quad (95)$$

$$i(t) = I_{re}(t) \cos(\omega t) - I_{im}(t) \sin(\omega t) \quad (96)$$

Substituindo-se (95) e (96) em (94), pela aplicação da função não linear na tensão escrita através das componentes real e imaginária do fasor correspondente, verifica-se que não é possível separar a equação resultante em componentes senos e cossenos, utilizando a propriedade de independência linear e ortogonalidade destas funções. Como solução utilizou-se para esta separação a propriedade física que o fasor \tilde{I} está em fase com \tilde{V} , por se tratar de elemento resistivo. Neste caso as proporções entre as partes reais e imaginárias da corrente e tensão são iguais, conforme dado em (97).

$$\frac{I_{re}(t)}{I_{im}(t)} = \frac{V_{re}(t)}{V_{im}(t)} \quad (97)$$

Ressalta-se que a transformação de grandezas fasoriais para grandezas instantâneas é unívoca, sendo dadas pelas equações (95) e (96). Nessa abordagem existem infinitas formas de transformar as grandezas instantâneas em grandezas fasoriais. Portanto, a equação (97) poderia ser substituída por $\frac{I_{re}(t)}{I_{im}(t)} = k \frac{V_{re}(t)}{V_{im}(t)}$. Nessa situação, os fasores seriam diferentes, mas as grandezas instantâneas seriam iguais.

A partir desta premissa, pode então ser desenvolvido um trabalho analítico, apresentado a seguir, para obtenção das relações entre as partes real e imaginária da tensão e corrente do para-raios para obtenção do MLA do elemento. Pode-se então reescrever a componente real em função da componente imaginária e vice-versa, resultando em:

$$I_{re}(t) = I_{im}(t) \frac{V_{re}(t)}{V_{im}(t)} \quad (98)$$

$$I_{im}(t) = I_{re}(t) \frac{V_{im}(t)}{V_{re}(t)}$$

Por questão de compactação das fórmulas, as seguintes atribuições foram definidas:

$$\begin{aligned}
 a &= \cos(\omega t) \\
 b &= \sin(\omega t)
 \end{aligned}
 \tag{99}$$

Substituindo (99) em (96):

$$i(t) = I_{re}(t)a - I_{im}(t)b \tag{100}$$

Isolando-se a componente real e imaginária do fasor dinâmico de corrente, resulta-se no seguinte sistema de equações:

$$\begin{aligned}
 I_{re}(t) &= \frac{i(t) + I_{im}(t)b}{a} \\
 I_{im}(t) &= \frac{-i(t) + I_{re}(t)a}{b}
 \end{aligned}
 \tag{101}$$

Manipulando algebricamente as equações:

$$\begin{aligned}
 aI_{re}(t) &= i(t) + I_{re}(t)\frac{V_{im}(t)}{V_{re}(t)}b \\
 bI_{im}(t) &= -i(t) + I_{im}(t)\frac{V_{re}(t)}{V_{im}(t)}a
 \end{aligned}
 \tag{102}$$

Isolando-se a corrente instantânea:

$$\begin{aligned}
 aI_{re}(t) - I_{re}(t)\frac{V_{im}(t)}{V_{re}(t)}b &= i(t) \\
 bI_{im}(t) - I_{im}(t)\frac{V_{re}(t)}{V_{im}(t)}a &= -i(t)
 \end{aligned}
 \tag{103}$$

Multiplicando a primeira equação em (103) por $V_{re}(t)$ e a segunda equação em (103) por $V_{im}(t)$, respectivamente:

$$\begin{aligned}
 aI_{re}(t)V_{re}(t) - I_{re}(t)V_{im}(t)b &= i(t)V_{re}(t) \\
 bI_{im}(t)V_{im}(t) - I_{im}(t)V_{re}(t)a &= -i(t)V_{im}(t)
 \end{aligned}
 \tag{104}$$

Evidenciando as componentes real e imaginária da corrente:

$$\begin{aligned}
 I_{re}(t)[V_{re}(t)a - V_{im}(t)b] &= i(t)V_{re}(t) \\
 I_{im}(t)[V_{im}(t)b - V_{re}(t)a] &= -i(t)V_{im}(t)
 \end{aligned}
 \tag{105}$$

Tem-se, por fim, as seguintes relações:

$$I_{re}(t) = i(t) \frac{V_{re}(t)}{V_{re}(t)a - V_{im}(t)b}$$

$$I_{im}(t) = i(t) \frac{V_{im}(t)}{V_{re}(t)a - V_{im}(t)b}$$
(106)

Regressando à forma completa:

$$I_{re}(t) = i(t) \frac{V_{re}(t)}{V_{re}(t) \cos(\omega t) - V_{im}(t) \sen(\omega t)}$$

$$I_{im}(t) = i(t) \frac{V_{im}(t)}{V_{re}(t) \cos(\omega t) - V_{im}(t) \sen(\omega t)}$$
(107)

Ou ainda, de forma compacta, tem-se as componentes reais e imaginárias do fasor dinâmico da corrente em função das componentes reais e imaginárias do fasor dinâmico da tensão e das suas respectivas variáveis instantâneas, as quais podem ser escritas como composições das componentes reais e imaginárias. Essa informação é de utilidade para determinação das derivadas parciais dos seus respectivos fasores dinâmicos que descreve a matriz de sensibilidade do modelo.

$$I_{re}(t) = i(t) \frac{V_{re}(t)}{v(t)}$$

$$I_{im}(t) = i(t) \frac{V_{im}(t)}{v(t)}$$
(108)

Assim, o termo de interesse chamado de matriz sensibilidade $\mathbf{S}(t)$, é composto das derivadas parciais das componentes reais e imaginárias dos fasores dinâmicos de corrente pelas componentes real e imaginária dos fasores dinâmicos de tensão, conforme apresentado em (109):

$$\mathbf{S}(t) = \begin{bmatrix} \frac{\partial I_{re}}{\partial V_{re}}(t) & \frac{\partial I_{re}}{\partial V_{im}}(t) \\ \frac{\partial I_{im}}{\partial V_{re}}(t) & \frac{\partial I_{im}}{\partial V_{im}}(t) \end{bmatrix}$$
(109)

Para calcular os elementos dessa matriz são feitas as derivadas parciais em relação às componentes real e imaginária do fasor dinâmico de tensão das respectivas componentes real e imaginária do fasor dinâmico de corrente (108). Por simplificação

de notação, será omitido no desenvolvimento analítico, a relação de dependência com o tempo (t).

- **Elemento a_{11} da Matriz de Sensibilidade:** $\frac{\partial I_{re}}{\partial V_{re}}$

Aplicando a derivada parcial da componente real da corrente em relação à tensão real:

$$\frac{\partial I_{re}}{\partial V_{re}} = \frac{\partial \left[i \frac{V_{re}}{v} \right]}{\partial V_{re}} \quad (110)$$

Usando a regra do produto para derivadas:

$$\frac{\partial I_{re}}{\partial V_{re}} = \frac{\partial i}{\partial V_{re}} \frac{V_{re}}{v} + i \frac{\partial \left(\frac{V_{re}}{v} \right)}{\partial V_{re}} \quad (111)$$

E, na sequência, a regra da cadeia para o primeiro termo:

$$\frac{\partial I_{re}}{\partial V_{re}} = \frac{\partial i}{\partial v} \frac{\partial v}{\partial V_{re}} \frac{V_{re}}{v} + i \frac{\partial \left(\frac{V_{re}}{v} \right)}{\partial V_{re}} \quad (112)$$

Reagrupando o primeiro termo e aplicando a regra do quociente para o segundo termo, tem-se ainda que:

$$\frac{\partial I_{re}}{\partial V_{re}} = \left[\frac{\partial i}{\partial v} \frac{\partial v}{\partial V_{re}} \right] \frac{V_{re}}{v} + i \left(\frac{\frac{\partial V_{re}}{\partial V_{re}} v - \frac{\partial v}{\partial V_{re}} V_{re}}{v^2} \right) \quad (113)$$

- **Elemento a_{12} da Matriz de Sensibilidade:** $\frac{\partial I_{re}}{\partial V_{im}}$

Aplicando a derivada parcial da componente real da corrente em relação à tensão imaginária:

$$\frac{\partial I_{re}}{\partial V_{im}} = \frac{\partial \left[i \frac{V_{re}}{v} \right]}{\partial V_{im}} \quad (114)$$

Aplicando a regra do produto para derivadas:

$$\frac{\partial I_{re}}{\partial V_{im}} = \frac{\partial i}{\partial V_{im}} \frac{V_{re}}{v} + i \frac{\partial \left(\frac{V_{re}}{v} \right)}{\partial V_{im}} \quad (115)$$

E, na sequência, a regra da cadeia para o primeiro termo:

$$\frac{\partial I_{re}}{\partial V_{im}} = \frac{\partial i}{\partial v} \frac{\partial v}{\partial V_{im}} \frac{V_{re}}{v} + i \frac{\partial \left(\frac{V_{re}}{v} \right)}{\partial V_{im}} \quad (116)$$

Tem-se ainda que:

$$\frac{\partial I_{re}}{\partial V_{im}} = \left[\frac{\partial i}{\partial v} \frac{\partial v}{\partial V_{im}} \right] \frac{V_{re}}{v} + i \left(\frac{\frac{\partial V_{re}}{\partial V_{im}} v - \frac{\partial v}{\partial V_{im}} V_{re}}{v^2} \right) \quad (117)$$

- **Elemento a_{21} da Matriz de Sensibilidade:** $\frac{\partial I_{im}}{\partial V_{re}}$

Aplicando a derivada parcial da componente imaginária da corrente em relação à tensão real:

$$\frac{\partial I_{im}}{\partial V_{re}} = \frac{\partial \left[i \frac{V_{im}}{v} \right]}{\partial V_{re}} \quad (118)$$

Usando a regra do produto para derivadas:

$$\frac{\partial I_{im}}{\partial V_{re}} = \frac{\partial i}{\partial V_{re}} \frac{V_{im}}{v} + i \frac{\partial \left(\frac{V_{im}}{v} \right)}{\partial V_{re}} \quad (119)$$

E na sequência, a regra da cadeia:

$$\frac{\partial I_{im}}{\partial V_{re}} = \frac{\partial i}{\partial v} \frac{\partial v}{\partial V_{re}} \frac{V_{im}}{v} + i \frac{\partial \left(\frac{V_{im}}{v} \right)}{\partial V_{re}} \quad (120)$$

Tem-se ainda que:

$$\frac{\partial I_{im}}{\partial V_{re}} = \left[\frac{\partial i}{\partial v} \frac{\partial v}{\partial V_{re}} \right] \frac{V_{im}}{v} + i \left(\frac{\frac{\partial V_{im}}{\partial V_{re}} v - \frac{\partial v}{\partial V_{re}} V_{im}}{v^2} \right) \quad (121)$$

- **Elemento a_{22} da Matriz de Sensibilidade:** $\frac{\partial I_{im}}{\partial V_{im}}$

Aplicando a derivada parcial da componente imaginária da corrente em relação à tensão imaginária:

$$\frac{\partial I_{im}}{\partial V_{im}} = \frac{\partial \left[i \frac{V_{im}}{v} \right]}{\partial V_{im}} \quad (122)$$

Usando a regra do produto para derivadas:

$$\frac{\partial I_{im}}{\partial V_{im}} = \frac{\partial i}{\partial V_{im}} \frac{V_{im}}{v} + i \frac{\partial \left(\frac{V_{im}}{v} \right)}{\partial V_{im}} \quad (123)$$

E na sequência, a regra da cadeia:

$$\frac{\partial I_{im}}{\partial V_{im}} = \frac{\partial i}{\partial v} \frac{\partial v}{\partial V_{im}} \frac{V_{im}}{v} + i \frac{\partial \left(\frac{V_{im}}{v} \right)}{\partial V_{im}} \quad (124)$$

Tem-se ainda que:

$$\frac{\partial I_{im}}{\partial V_{im}} = \left[\frac{\partial i}{\partial v} \frac{\partial v}{\partial V_{im}} \right] \frac{V_{im}}{v} + i \left(\frac{\frac{\partial V_{im}}{\partial V_{im}} v - \frac{\partial v}{\partial V_{im}} V_{im}}{v^2} \right) \quad (125)$$

Em relação às expressões obtidas é possível ainda fazer algumas considerações. A primeira refere-se à condutância incremental g_{inc} definida como a seguinte diferencial dada em (126), que equivale à derivada parcial da função da corrente em relação à tensão, dada em (94).

$$\frac{\partial i}{\partial v} = g_{inc} \quad (126)$$

Além disso, de forma geral, para uma variável instantânea em termos de fasores dinâmicos, tem-se que:

$$x(t) = X_{re}(t) \cos(\omega t) - X_{im}(t) \sen(\omega t) \quad (127)$$

Diferenciando-se o sinal $x(t)$ em relação às componentes reais e imaginárias:

$$\frac{\partial x}{\partial X_{re}} = \frac{\partial [X_{re} \cos(\omega t) - X_{im} \sen(\omega t)]}{\partial X_{re}} = \cos(\omega t) \quad (128)$$

$$\frac{\partial x}{\partial X_{im}} = \frac{\partial [X_{re} \cos(\omega t) - X_{im} \sen(\omega t)]}{\partial X_{im}} = -\sen(\omega t) \quad (129)$$

Assim, o resultado acima pode ser utilizado para as tensões, de modo que:

$$\frac{\partial v}{\partial V_{re}} = \cos(\omega t) \quad (130)$$

$$\frac{\partial v}{\partial V_{im}} = -\sen(\omega t)$$

Então, simplificando as expressões em (113), (117), (121) e (125) e usando os resultados em (126) e (130), têm-se as seguintes expressões para a matriz de sensibilidade:

$$\frac{\partial I_{re}}{\partial V_{re}}(t) = [g_{inc} \cos(\omega t)] \frac{V_{re}(t)}{v(t)} + i(t) \left[\frac{v(t) - \cos(\omega t)V_{re}(t)}{v(t)^2} \right] \quad (131)$$

$$\frac{\partial I_{re}}{\partial V_{im}}(t) = [-g_{inc} \sen(\omega t)] \frac{V_{re}(t)}{v(t)} + i(t) \left[\frac{0 + \sen(\omega t)V_{re}(t)}{v(t)^2} \right] \quad (132)$$

$$\frac{\partial I_{im}}{\partial V_{re}}(t) = [g_{inc} \cos(\omega t)] \frac{V_{im}(t)}{v(t)} + i(t) \left[\frac{0 - \cos(\omega t)V_{im}(t)}{v(t)^2} \right] \quad (133)$$

$$\frac{\partial I_{im}}{\partial V_{im}}(t) = [-g_{inc} \sen(\omega t)] \frac{V_{im}(t)}{v(t)} + i(t) \left[\frac{v(t) + \sen(\omega t)V_{im}(t)}{v(t)^2} \right] \quad (134)$$

Reagrupando e reorganizando os termos, tem-se cada elemento da matriz de sensibilidade $\mathbf{S}(t)$:

$$\begin{aligned} \frac{\partial I_{re}}{\partial V_{re}}(t) &= g_{inc} \cos(\omega t) \frac{V_{re}(t)}{v(t)} + i(t) \left(\frac{1}{v(t)} - \frac{V_{re}(t) \cos(\omega t)}{v(t)^2} \right) \\ \frac{\partial I_{re}}{\partial V_{im}}(t) &= -g_{inc} \sen(\omega t) \frac{V_{re}(t)}{v(t)} + i(t) \left(\frac{V_{re}(t) \sen(\omega t)}{v(t)^2} \right) \\ \frac{\partial I_{im}}{\partial V_{re}}(t) &= g_{inc} \cos(\omega t) \frac{V_{im}(t)}{v(t)} - i(t) \left(-\frac{V_{im}(t) \cos(\omega t)}{v(t)^2} \right) \\ \frac{\partial I_{im}}{\partial V_{im}}(t) &= -g_{inc} \sen(\omega t) \frac{V_{im}(t)}{v(t)} + i(t) \left(\frac{1}{v(t)} + \frac{V_{im}(t) \sen(\omega t)}{v(t)^2} \right) \end{aligned} \quad (135)$$

A

Figura 19 ilustra o modelo de acompanhamento genérico do para-raios, aplicável tanto no equipamento em série como em derivação. No modelo proposto o equipamento está em derivação, sendo o nó m de referência. Assim, para o modelo tratado, tem-se $v_{m_{re}}(t) = v_{m_{im}}(t) = 0$.

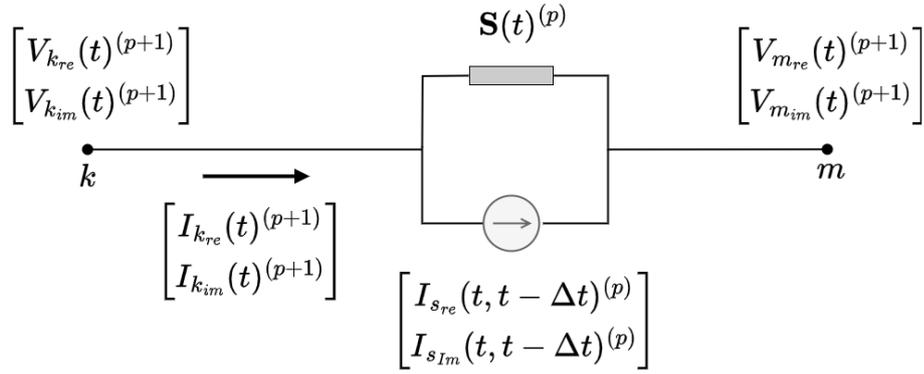


Figura 19 – Modelo de acompanhamento do para-raios

O equacionamento das componentes da matriz de sensibilidade do modelo de acompanhamento é o detalhado em (135). Note que os fasores de corrente e tensão podem ser decompostos em termos real e imaginário e a sensibilidade é matricial. A corrente da fonte do MLA segue na equação (136), conforme (90), com as partes real e imaginária da corrente dada em (108). As partes real e imaginária da tensão são variáveis de entrada do modelo e são obtidas da solução de rede da iteração anterior. Com as partes real e imaginária da tensão e corrente, os valores instantâneos correspondentes podem ser obtidos a cada instante t utilizando (95) e (96). A corrente injetada no nó k no sistema de equações de matriz de condutâncias nodais para cálculo da solução de rede para a iteração $(p+1)$ é o negativo desta corrente da fonte pela convenção de sinais adotada.

$$\begin{bmatrix} I_{s_{re}}^{(p)}(t) \\ I_{s_{im}}^{(p)}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{re}^{(p)}(t) \\ I_{im}^{(p)}(t) \end{bmatrix} - \overbrace{\begin{bmatrix} \left(\frac{\partial I_{re}}{\partial V_{re}}(t) \right)^{(p)} & \left(\frac{\partial I_{re}}{\partial V_{im}}(t) \right)^{(p)} \\ \left(\frac{\partial I_{im}}{\partial V_{re}}(t) \right)^{(p)} & \left(\frac{\partial I_{im}}{\partial V_{im}}(t) \right)^{(p)} \end{bmatrix}}^{\text{Sensibilidade}} \begin{bmatrix} V_{re}^{(p)}(t) \\ V_{im}^{(p)}(t) \end{bmatrix} \quad (136)$$

Do ponto de vista de implementação computacional, a Figura 20 apresenta o fluxograma de solução do modelo do para-raios.

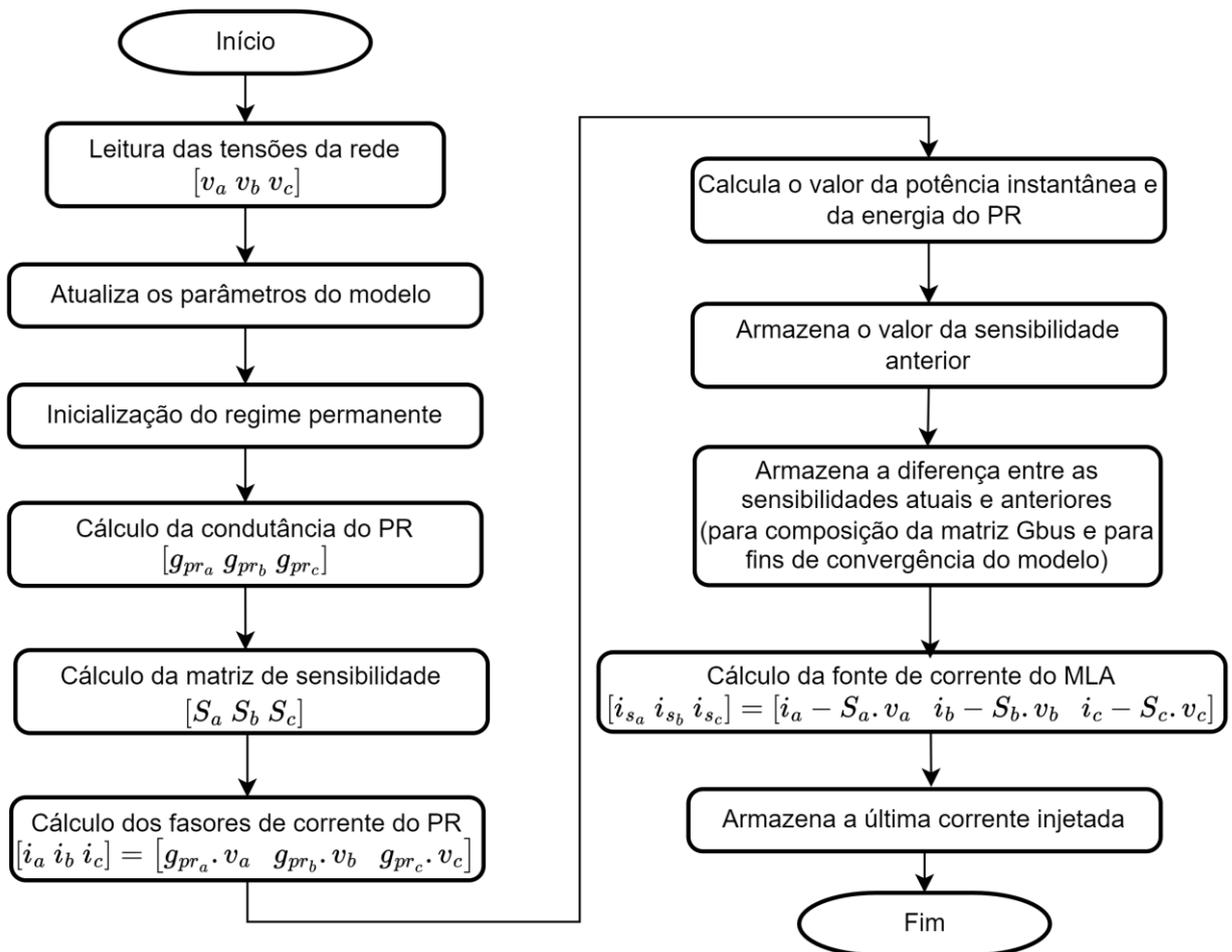


Figura 20 – Fluxograma da rotina de solução do modelo do para-raios

3.2.1 Cálculo de potência e energia do para-raios

O modelo do para-raios também disponibiliza o cálculo de potência e energia no para-raios, que será apresentado nessa seção. Assim, para a componente instantânea da potência por fase tem-se:

$$p(t) = v(t)i(t) \quad (137)$$

A energia é a integral da potência instantânea, logo:

$$e(t) = \int_0^t v(\tau)i(\tau)d\tau \quad (138)$$

Ou reescrito de forma equivalente:

$$e(t) = \int_0^t p(\tau)d\tau \quad (139)$$

Reescrevendo a equação (139) na sua forma diferencial:

$$\frac{de(t)}{dt} = p(t) \quad (140)$$

Para o método de integração trapezoidal faz-se o termo diferencial assumir a diferença entre passos de integração dividido pelo passo de integração e as variáveis algébricas consistem na média entre dois passos sucessivos de integração. A equação (140), portanto, torna-se:

$$\frac{e(t) - e(t - \Delta t)}{\Delta t} = \frac{p(t) + p(t - \Delta t)}{2} \quad (141)$$

Isolando-se o termo de interesse $e(t)$, tem-se:

$$e(t) - e(t - \Delta t) = \frac{\Delta t}{2}[p(t) + p(t - \Delta t)] \quad (142)$$

$$e(t) = \frac{\Delta t}{2}p(t) + e(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2}p(t - \Delta t)$$

Assim, pode-se escrever o cálculo da energia de forma compacta em dois termos: o primeiro que considera o passo atual e o restante consiste no termo histórico. A equação compacta segue em (143) e o respectivo termo histórico em (144).

$$e(t) = \frac{\Delta t}{2} p(t) + Hist_e(t) \quad (143)$$

$$Hist_e(t) = e(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2} p(t - \Delta t) \quad (144)$$

Como o cálculo é feito por fase tem-se no final da formulação a situação geral:

$$e_a(t) = \frac{\Delta t}{2} p_a(t) + Hist_{a_e}(t) \quad (145)$$

$$Hist_{a_e}(t) = e_a(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2} p_a(t - \Delta t) \quad (146)$$

$$e_b(t) = \frac{\Delta t}{2} p_b(t) + Hist_{b_e}(t) \quad (147)$$

$$Hist_{b_e}(t) = e_b(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2} p_b(t - \Delta t) \quad (148)$$

$$e_c(t) = \frac{\Delta t}{2} p_c(t) + Hist_{c_e}(t) \quad (149)$$

$$Hist_{c_e}(t) = e_c(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2} p_c(t - \Delta t) \quad (150)$$

3.3 Modelo fasorial da magnetização de transformadores

Esta seção apresenta o desenvolvimento da modelagem da magnetização através da metodologia proposta utilizando o modelo de acompanhamento linearizado, descrito na seção 2.2.2, da mesma forma que feito com a modelagem dos para-raios. Assim, como feito no modelo do para-raios, inicialmente deduz-se o modelo matemático. Posteriormente indica-se como o modelo foi implementado computacionalmente.

A curva de ensaio da magnetização de transformadores, descrita de forma linear por partes, está genericamente ilustrada na Figura 23.

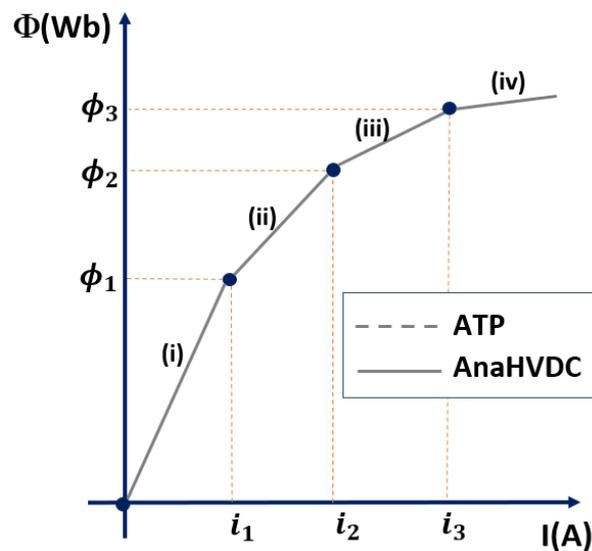


Figura 21 – Curva I versus Φ genérica do para-raio

Seja a relação da tensão instantânea com o fluxo magnético, dada pela seguinte equação diferencial:

$$v(t) = \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (151)$$

Pode-se escrever a tensão e fluxo instantâneos na formulação de fasores dinâmicos, ficando:

$$\begin{aligned} v(t) &= V_{re}(t)\cos(\omega t) - V_{im}(t)\sen(\omega t) \\ \phi(t) &= \Phi_{re}(t)\cos(\omega t) - \Phi_{im}(t)\sen(\omega t) \end{aligned} \quad (152)$$

Logo, aplicando a formulação em fasores dinâmicos na equação instantânea apresentada em (151), tem-se:

$$V_{re}(t)\cos(\omega t) - V_{im}(t)\sin(\omega t) = \frac{d[\Phi_{re}(t)\cos(\omega t) - \Phi_{im}(t)\sin(\omega t)]}{dt} \quad (153)$$

Diferenciando-se os termos no lado do fluxo e reagrupando tem-se:

$$\begin{aligned} & V_{re}(t)\cos(\omega t) - V_{im}(t)\sin(\omega t) \\ &= \frac{d\Phi_{re}(t)}{dt}\cos(\omega t) - \omega\Phi_{re}(t)\sin(\omega t) - \frac{d\Phi_{im}(t)}{dt}\sin(\omega t) \\ & \quad - \omega\Phi_{im}(t)\cos(\omega t) \end{aligned} \quad (154)$$

A equação pode ser separada em dois termos, sendo os termos em cossenos relacionados às componentes reais e os termos em senos relacionados às componentes imaginárias. Assim, a equação instantânea no tempo se transforma em um sistema 2x2 de equações, sendo o primeiro termo relacionado à componente real, e o segundo, à componente imaginária.

$$V_{re}(t) = \frac{d\Phi_{re}(t)}{dt} - \omega\Phi_{im}(t) \quad (155)$$

$$V_{im}(t) = \frac{d\Phi_{im}(t)}{dt} + \omega\Phi_{re}(t)$$

Reorganizando as equações explicitando-se o diferencial de fluxo, tem-se:

$$\frac{d\Phi_{re}(t)}{dt} = V_{re}(t) + \omega\Phi_{im}(t) \quad (156)$$

$$\frac{d\Phi_{im}(t)}{dt} = V_{im}(t) - \omega\Phi_{re}(t)$$

Aplicando a regra de integração trapezoidal, os termos diferenciais assumem a diferença no delta de passo de integração dividido pelo passo de integração $\left(\frac{dx}{dt} = \frac{x(t) - x(t - \Delta t)}{\Delta t}\right)$ e os termos algébricos assumem a média algébrica entre o passo de integração atual e o anterior $\left(y = \frac{y(t) + y(t - \Delta t)}{2}\right)$. Dessa forma, o sistema assume o seguinte equacionamento:

$$\begin{aligned} & \frac{\Phi_{re}(t) - \Phi_{re}(t - \Delta t)}{\Delta t} \\ &= \frac{1}{2} \{ [V_{re}(t) + V_{re}(t - \Delta t)] + \omega [\Phi_{im}(t) + \Phi_{im}(t - \Delta t)] \} \end{aligned} \quad (157)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\Phi_{im}(t) - \Phi_{im}(t - \Delta t)}{\Delta t} \\ &= \frac{1}{2} \{ [V_{im}(t) + V_{im}(t - \Delta t)] - \omega [\Phi_{re}(t) + \Phi_{re}(t - \Delta t)] \} \end{aligned}$$

Isolando os termos de interesse, que são as componentes real e imaginária do fasor dinâmico do fluxo, $\Phi_{re}(t)$ e $\Phi_{im}(t)$:

$$\begin{aligned} \Phi_{re}(t) &= \Phi_{re}(t - \Delta t) \\ &+ \frac{\Delta t}{2} \{ [V_{re}(t) + V_{re}(t - \Delta t)] + \omega [\Phi_{im}(t) + \Phi_{im}(t - \Delta t)] \} \end{aligned} \quad (158)$$

$$\begin{aligned} \Phi_{im}(t) &= \Phi_{im}(t - \Delta t) \\ &+ \frac{\Delta t}{2} \{ [V_{im}(t) + V_{im}(t - \Delta t)] - \omega [\Phi_{re}(t) + \Phi_{re}(t - \Delta t)] \} \end{aligned}$$

Reagrupando as equações de forma a evidenciar os termos atuais e os históricos, tem-se:

$$\begin{aligned} \Phi_{re}(t) &= \frac{\Delta t}{2} [V_{re}(t) + \omega \Phi_{im}(t)] + \frac{\Delta t}{2} [V_{re}(t - \Delta t) + \omega \Phi_{im}(t - \Delta t)] \\ &+ \Phi_{re}(t - \Delta t) \end{aligned} \quad (159)$$

$$\begin{aligned} \Phi_{im}(t) &= \frac{\Delta t}{2} [V_{im}(t) - \omega \Phi_{re}(t)] + \frac{\Delta t}{2} [V_{im}(t - \Delta t) - \omega \Phi_{re}(t - \Delta t)] \\ &+ \Phi_{im}(t - \Delta t) \end{aligned}$$

Ou ainda, de forma compacta:

$$\Phi_{re}(t) = \frac{\Delta t}{2} [V_{re}(t) + \omega \Phi_{im}(t)] + hist_{re}(t) \quad (160)$$

$$\Phi_{im}(t) = \frac{\Delta t}{2} [V_{im}(t) - \omega \Phi_{re}(t)] + hist_{im}(t)$$

Onde, os termos históricos são chamados:

$$hist_{re}(t) = \frac{\Delta t}{2} [V_{re}(t - \Delta t) + \omega \Phi_{im}(t - \Delta t)] + \Phi_{re}(t - \Delta t) \quad (161)$$

$$hist_{im}(t) = \frac{\Delta t}{2} [V_{im}(t - \Delta t) - \omega \Phi_{re}(t - \Delta t)] + \Phi_{im}(t - \Delta t)$$

Uma forma possível de reescrever esse sistema de equações de forma compacta e generalizada é passar para a forma matricial, onde as matrizes que multiplicam as variáveis de estados são formas tensoriais. Assim, por inspeção visual o sistema de

equações se transforma no sistema matricial. Note que esse equacionamento tem sido realizado considerando um sistema monofásico geral. Para um sistema trifásico o equacionamento é uma extrapolação desse equacionamento para as outras fases.

$$\begin{bmatrix} \Phi_{re}(t) \\ \Phi_{im}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta t}{2} & 0 \\ 0 & \frac{\Delta t}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{re}(t) \\ V_{im}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \omega \frac{\Delta t}{2} \\ -\omega \frac{\Delta t}{2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{re}(t) \\ \Phi_{im}(t) \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta t}{2} & 0 \\ 0 & \frac{\Delta t}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{re}(t - \Delta t) \\ V_{im}(t - \Delta t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & \omega \frac{\Delta t}{2} \\ -\omega \frac{\Delta t}{2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{re}(t - \Delta t) \\ \Phi_{im}(t - \Delta t) \end{bmatrix}$$
(162)

Para poder isolar os fluxos, é preciso fazer manipulações matriciais. Multiplica-se inicialmente o lado esquerdo pela identidade e depois são realizadas outras operações matriciais com a finalidade de isolar os termos real e imaginário de fluxo.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{re}(t) \\ \Phi_{im}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta t}{2} & 0 \\ 0 & \frac{\Delta t}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{re}(t) \\ V_{im}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \omega \frac{\Delta t}{2} \\ -\omega \frac{\Delta t}{2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{re}(t) \\ \Phi_{im}(t) \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta t}{2} & 0 \\ 0 & \frac{\Delta t}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{re}(t - \Delta t) \\ V_{im}(t - \Delta t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & \omega \frac{\Delta t}{2} \\ -\omega \frac{\Delta t}{2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{re}(t - \Delta t) \\ \Phi_{im}(t - \Delta t) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{re}(t) \\ \Phi_{im}(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & \omega \frac{\Delta t}{2} \\ -\omega \frac{\Delta t}{2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{re}(t) \\ \Phi_{im}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta t}{2} & 0 \\ 0 & \frac{\Delta t}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{re}(t) \\ V_{im}(t) \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta t}{2} & 0 \\ 0 & \frac{\Delta t}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{re}(t - \Delta t) \\ V_{im}(t - \Delta t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & \omega \frac{\Delta t}{2} \\ -\omega \frac{\Delta t}{2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{re}(t - \Delta t) \\ \Phi_{im}(t - \Delta t) \end{bmatrix}$$
(164)

Restando, então, a seguinte expressão:

$$\begin{bmatrix} 1 & -\omega \frac{\Delta t}{2} \\ \omega \frac{\Delta t}{2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{re}(t) \\ \Phi_{im}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta t}{2} & 0 \\ 0 & \frac{\Delta t}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{re}(t) \\ V_{im}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\Delta t}{2} & 0 \\ 0 & \frac{\Delta t}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{re}(t - \Delta t) \\ V_{im}(t - \Delta t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & \omega \frac{\Delta t}{2} \\ -\omega \frac{\Delta t}{2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{re}(t - \Delta t) \\ \Phi_{im}(t - \Delta t) \end{bmatrix} \quad (165)$$

Isolando as componentes real e imaginária do fluxo:

$$\begin{bmatrix} \Phi_{re}(t) \\ \Phi_{im}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\omega \frac{\Delta t}{2} \\ \omega \frac{\Delta t}{2} & 1 \end{bmatrix}^{-1} \left\{ \begin{bmatrix} \frac{\Delta t}{2} & 0 \\ 0 & \frac{\Delta t}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{re}(t) \\ V_{im}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\Delta t}{2} & 0 \\ 0 & \frac{\Delta t}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{re}(t - \Delta t) \\ V_{im}(t - \Delta t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & \omega \frac{\Delta t}{2} \\ -\omega \frac{\Delta t}{2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{re}(t - \Delta t) \\ \Phi_{im}(t - \Delta t) \end{bmatrix} \right\} \quad (166)$$

Onde, podem-se destacar explicitamente os termos corrente e histórico no sistema matricial:

$$\begin{bmatrix} \Phi_{re}(t) \\ \Phi_{im}(t) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & -\omega \frac{\Delta t}{2} \\ \omega \frac{\Delta t}{2} & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\Delta t}{2} & 0 \\ 0 & \frac{\Delta t}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{re}(t) \\ V_{im}(t) \end{bmatrix}}_{\text{Termo Atual}} + \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & -\omega \frac{\Delta t}{2} \\ \omega \frac{\Delta t}{2} & 1 \end{bmatrix}^{-1} \left\{ \begin{bmatrix} \frac{\Delta t}{2} & 0 \\ 0 & \frac{\Delta t}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{re}(t - \Delta t) \\ V_{im}(t - \Delta t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & \omega \frac{\Delta t}{2} \\ -\omega \frac{\Delta t}{2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{re}(t - \Delta t) \\ \Phi_{im}(t - \Delta t) \end{bmatrix} \right\}}_{\text{Termo Histórico}} \quad (167)$$

Por simplicidade de notação, chamam-se as matrizes que multiplicam os vetores de estado atuais e históricos de:

$$\mathbf{K}_1 = \begin{bmatrix} 1 & -\omega \frac{\Delta t}{2} \\ \omega \frac{\Delta t}{2} & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\Delta t}{2} & 0 \\ 0 & \frac{\Delta t}{2} \end{bmatrix} \quad (168)$$

$$\mathbf{K}_2 = \begin{bmatrix} 1 & -\omega \frac{\Delta t}{2} \\ \omega \frac{\Delta t}{2} & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1 & \omega \frac{\Delta t}{2} \\ -\omega \frac{\Delta t}{2} & 1 \end{bmatrix}$$

Essa notação, mais compacta, permite implementar esses equacionamentos de forma tensorial facilitando a visualização do equacionamento. Assim, o sistema matricial reescrito nessa nova forma assume a seguinte formulação:

$$\begin{bmatrix} \Phi_{re}(t) \\ \Phi_{im}(t) \end{bmatrix} = \underbrace{\mathbf{K}_1 \cdot \begin{bmatrix} V_{re}(t) \\ V_{im}(t) \end{bmatrix}}_{\text{Termo Atual}} + \underbrace{\left\{ \mathbf{K}_1 \cdot \begin{bmatrix} V_{re}(t - \Delta t) \\ V_{im}(t - \Delta t) \end{bmatrix} + \mathbf{K}_2 \cdot \begin{bmatrix} \Phi_{re}(t - \Delta t) \\ \Phi_{im}(t - \Delta t) \end{bmatrix} \right\}}_{\text{Termo Histórico}} \quad (169)$$

A partir da equação instantânea que relaciona tensão e fluxo, desenvolvendo em formulação de fasores dinâmicos, chegou-se à formulação matricial equivalente. Desse sistema matricial generalizado linearizado, tem-se:

$$\begin{bmatrix} d\Phi_{re}(t) \\ d\Phi_{im}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\omega \frac{\Delta t}{2} \\ \omega \frac{\Delta t}{2} & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\Delta t}{2} & 0 \\ 0 & \frac{\Delta t}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dV_{re}(t) \\ dV_{im}(t) \end{bmatrix} \quad (170)$$

Cabe ressaltar que a variação é entre iterações consecutivas e não entre instantes consecutivos. Entretanto, a sensibilidade para o indutor não linear será uma função da relação entre correntes e tensões. A relação matricial que correlaciona correntes real e imaginária e fluxos é conhecida e dada por:

$$\begin{bmatrix} dI_{re}(t) \\ dI_{im}(t) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\partial I_{re}}{\partial \Phi_{re}}(t) & \frac{\partial I_{re}}{\partial \Phi_{im}}(t) \\ \frac{\partial I_{im}}{\partial \Phi_{re}}(t) & \frac{\partial I_{im}}{\partial \Phi_{im}}(t) \end{bmatrix}}_{\bar{\mathbf{S}}(t)} \begin{bmatrix} d\Phi_{re}(t) \\ d\Phi_{im}(t) \end{bmatrix} \quad (171)$$

Chamando a matriz de sensibilidade auxiliar $\bar{\mathbf{S}}(t)$, composta das derivadas parciais das componentes real e imaginária dos fasores dinâmicos da corrente em relação às componentes real e imaginária dos fasores dinâmicos do fluxo.:

$$\bar{\mathbf{S}}(t) = \begin{bmatrix} \frac{\partial I_{re}}{\partial \Phi_{re}}(t) & \frac{\partial I_{re}}{\partial \Phi_{im}}(t) \\ \frac{\partial I_{im}}{\partial \Phi_{re}}(t) & \frac{\partial I_{im}}{\partial \Phi_{im}}(t) \end{bmatrix} \quad (172)$$

Logo, pode-se compor a relação de correntes com tensões de forma matricial, aplicando (170) em (171), e ficando, então:

$$\begin{bmatrix} \frac{dI_{re}(t)}{dt} \\ \frac{dI_{im}(t)}{dt} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\partial I_{re}}{\partial \Phi_{re}}(t) & \frac{\partial I_{re}}{\partial \Phi_{im}}(t) \\ \frac{\partial I_{im}}{\partial \Phi_{re}}(t) & \frac{\partial I_{im}}{\partial \Phi_{im}}(t) \end{bmatrix}}_{\bar{\mathbf{S}}(t)} \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & -\omega \frac{\Delta t}{2} \\ \omega \frac{\Delta t}{2} & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\Delta t}{2} & 0 \\ 0 & \frac{\Delta t}{2} \end{bmatrix}}_{\mathbf{K}_1} \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{dV_{re}(t)}{dt} \\ \frac{dV_{im}(t)}{dt} \end{bmatrix}}_{\begin{bmatrix} \frac{d\Phi_{re}(t)}{dt} \\ \frac{d\Phi_{im}(t)}{dt} \end{bmatrix}} \quad (173)$$

A matriz de sensibilidades $\mathbf{S}(t)$ pode ser definida a partir de (173):

$$\mathbf{S}(t) = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\partial I_{re}}{\partial \Phi_{re}}(t) & \frac{\partial I_{re}}{\partial \Phi_{im}}(t) \\ \frac{\partial I_{im}}{\partial \Phi_{re}}(t) & \frac{\partial I_{im}}{\partial \Phi_{im}}(t) \end{bmatrix}}_{\bar{\mathbf{S}}(t)} \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & -\omega \frac{\Delta t}{2} \\ \omega \frac{\Delta t}{2} & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\Delta t}{2} & 0 \\ 0 & \frac{\Delta t}{2} \end{bmatrix}}_{\mathbf{K}_1} \quad (174)$$

O tensor \mathbf{K}_1 é obtido a partir dos parâmetros de simulação. Resta, portanto, definir e calcular os termos da matriz de sensibilidade auxiliar $\bar{\mathbf{S}}(t)$ que está multiplicando o tensor. Tem-se a formulação compacta para o cálculo da matriz de sensibilidades:

$$\mathbf{S}(t) = \bar{\mathbf{S}}(t) \cdot \mathbf{K}_1 \quad (175)$$

Para calcular os termos da matriz de sensibilidade auxiliar, adota-se como premissa que o fasor \tilde{I} está em fase com $\tilde{\Phi}$. Essa consideração implica em desprezar as perdas no núcleo. Essas perdas causam um atraso de fase entre o fluxo magnético e a corrente, mas são ignoradas pois se trata do modelo da magnetização ainda sem considerar histerese e fluxo residual. Assim, conclui-se que as proporções reais e imaginárias para corrente e fluxo são iguais, conforme:

$$\frac{I_{re}(t)}{I_{im}(t)} = \frac{\Phi_{re}(t)}{\Phi_{im}(t)} \quad (176)$$

Conforme demonstrado para o modelo do para-raios (ver em (108)), tem-se:

$$\begin{aligned} I_{re}(t) &= i(t) \frac{\Phi_{re}(t)}{\phi(t)} \\ I_{im}(t) &= i(t) \frac{\Phi_{im}(t)}{\phi(t)} \end{aligned} \quad (177)$$

- **Elemento a_{11} da Matriz de Sensibilidade Auxiliar:** $\frac{\partial I_{re}}{\partial \Phi_{re}}$

Aplicando a derivada parcial da componente real à componente real do fasor dinâmico do fluxo. em relação à fasor dinâmico do fluxo em sua componente real.

$$\frac{\partial I_{re}}{\partial \Phi_{re}} = \frac{\partial \left[i \frac{\Phi_{re}}{\phi} \right]}{\partial \Phi_{re}} \quad (178)$$

Aplicando a regra do produto para derivadas:

$$\frac{\partial I_{re}}{\partial \Phi_{re}} = \frac{\partial i}{\partial \Phi_{re}} \frac{\Phi_{re}}{\phi} + i \frac{\partial \left(\frac{\Phi_{re}}{\phi} \right)}{\partial \Phi_{re}} \quad (179)$$

E na sequência, a regra da cadeia para o primeiro termo e regra do quociente para o segundo termo:

$$\frac{\partial I_{re}}{\partial \Phi_{re}} = \frac{\partial i}{\partial \phi} \frac{\partial \phi}{\partial \Phi_{re}} \frac{\Phi_{re}}{\phi} + i \frac{\partial \left(\frac{\Phi_{re}}{\phi} \right)}{\partial \Phi_{re}} \quad (180)$$

Tem-se ainda que:

$$\frac{\partial I_{re}}{\partial \Phi_{re}} = \left[\frac{\partial i}{\partial \phi} \frac{\partial \phi}{\partial \Phi_{re}} \right] \frac{\Phi_{re}}{\phi} + i \left(\frac{\frac{\partial \Phi_{re}}{\partial \Phi_{re}} \phi - \frac{\partial \phi}{\partial \Phi_{re}} \Phi_{re}}{\phi^2} \right) \quad (181)$$

- **Elemento a_{12} da Matriz de Sensibilidade Auxiliar:** $\frac{\partial I_{re}}{\partial \Phi_{im}}$

Aplicando a derivada parcial em relação à componente real do fasor dinâmico do fluxo. da corrente em relação à fasor dinâmico do fluxo em sua componente imaginário.

$$\frac{\partial I_{re}}{\partial \Phi_{im}} = \frac{\partial \left[i \frac{\Phi_{re}}{\phi} \right]}{\partial \Phi_{im}} \quad (182)$$

Aplicando a regra do produto para derivadas:

$$\frac{\partial I_{re}}{\partial \Phi_{im}} = \frac{\partial i}{\partial \Phi_{im}} \frac{\Phi_{re}}{\phi} + i \frac{\partial \left(\frac{\Phi_{re}}{\phi} \right)}{\partial \Phi_{im}} \quad (183)$$

E na sequência, a regra da cadeia para o primeiro termo e do quociente para o segundo termo:

$$\frac{\partial I_{re}}{\partial \Phi_{im}} = \frac{\partial i}{\partial \phi} \frac{\partial \phi}{\partial \Phi_{im}} \frac{\Phi_{re}}{\phi} + i \frac{\partial \left(\frac{\Phi_{re}}{\phi} \right)}{\partial \Phi_{im}} \quad (184)$$

Tem-se ainda que:

$$\frac{\partial I_{re}}{\partial \Phi_{im}} = \left[\frac{\partial i}{\partial \phi} \frac{\partial \phi}{\partial \Phi_{im}} \right] \frac{\Phi_{re}}{\phi} + i \left(\frac{\frac{\partial \Phi_{re}}{\partial \Phi_{im}} \phi - \frac{\partial \phi}{\partial \Phi_{im}} \Phi_{re}}{\phi^2} \right) \quad (185)$$

- **Elemento a_{21} da Matriz de Sensibilidade Auxiliar:** $\frac{\partial I_{im}}{\partial \Phi_{re}}$

Analogamente, a mesma operação é feita considerando a componente imaginária da corrente. Logo, aplicando a derivada parcial da componente imaginária da corrente em relação ao fluxo real.

$$\frac{\partial I_{im}}{\partial \Phi_{re}} = \frac{\partial \left[i \frac{\Phi_{im}}{\phi} \right]}{\partial \Phi_{re}} \quad (186)$$

Aplicando a regra do produto para derivadas:

$$\frac{\partial I_{im}}{\partial \Phi_{re}} = \frac{\partial i}{\partial \Phi_{re}} \frac{\Phi_{im}}{\phi} + i \frac{\partial \left(\frac{\Phi_{im}}{\phi} \right)}{\partial \Phi_{re}} \quad (187)$$

E na sequência, a regra da cadeia e do quociente:

$$\frac{\partial I_{im}}{\partial \Phi_{re}} = \frac{\partial i}{\partial \phi} \frac{\partial \phi}{\partial \Phi_{re}} \frac{\Phi_{im}}{\phi} + i \frac{\partial \left(\frac{\Phi_{im}}{\phi} \right)}{\partial \Phi_{re}} \quad (188)$$

Tem-se ainda que:

$$\frac{\partial I_{im}}{\partial \Phi_{re}} = \left[\frac{\partial i}{\partial \phi} \frac{\partial \phi}{\partial \Phi_{re}} \right] \frac{\Phi_{im}}{\phi} + i \left(\frac{\frac{\partial \Phi_{im}}{\partial \Phi_{re}} \phi - \frac{\partial \phi}{\partial \Phi_{re}} \Phi_{im}}{\phi^2} \right) \quad (189)$$

- **Elemento a_{22} da Matriz de Sensibilidade Auxiliar:** $\frac{\partial I_{im}}{\partial \Phi_{im}}$

Por fim, para o último elemento da matriz de sensibilidade, aplicando a derivada parcial da componente imaginária da corrente em relação ao fluxo imaginário.

$$\frac{\partial I_{im}}{\partial \Phi_{im}} = \frac{\partial \left[i \frac{\Phi_{im}}{\phi} \right]}{\partial \Phi_{im}} \quad (190)$$

Aplicando a regra do produto para derivadas:

$$\frac{\partial I_{im}}{\partial \Phi_{im}} = \frac{\partial i}{\partial \Phi_{im}} \frac{\Phi_{im}}{\phi} + i \frac{\partial \left(\frac{\Phi_{im}}{\phi} \right)}{\partial \Phi_{im}} \quad (191)$$

E na sequência, a regra da cadeia e do quociente:

$$\frac{\partial I_{im}}{\partial \Phi_{im}} = \frac{\partial i}{\partial \phi} \frac{\partial \phi}{\partial \Phi_{im}} \frac{\Phi_{im}}{\phi} + i \frac{\partial \left(\frac{\Phi_{im}}{\phi} \right)}{\partial \Phi_{im}} \quad (192)$$

Tem-se ainda que:

$$\frac{\partial I_{im}}{\partial \Phi_{im}} = \left[\frac{\partial i}{\partial \phi} \frac{\partial \phi}{\partial \Phi_{im}} \right] \frac{\Phi_{im}}{\phi} + i \left(\frac{\frac{\partial \Phi_{im}}{\partial \Phi_{im}} \phi - \frac{\partial \phi}{\partial \Phi_{im}} \Phi_{im}}{\phi^2} \right) \quad (193)$$

Em relação às expressões obtidas é possível ainda fazer algumas considerações.

Pode-se adotar como o inverso da indutância incremental $\frac{1}{L_{inc}}$ a seguinte derivada:

$$\frac{di}{d\phi} = \frac{1}{L_{inc}} \quad (194)$$

As derivadas parciais dos fluxos em relações às suas componentes real e imaginária são obtidas conforme apresentado em (128) e (129):

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \Phi_{re}(t)} = \cos(\omega t) \quad (195)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \Phi_{im}} = -\text{sen}(\omega t)$$

Então, retomando as expressões obtidas para os termos da matriz de sensibilidade (181), (185), (189) e (193) e simplificando as expressões:

$$\frac{\partial I_{re}}{\partial \Phi_{re}}(t) = \left[\frac{1}{L_{inc}} \cos(\omega t) \right] \frac{\Phi_{re}(t)}{\phi(t)} + i(t) \left[\frac{\phi(t) - \cos(\omega t) \Phi_{re}(t)}{\phi(t)^2} \right] \quad (196)$$

$$\frac{\partial I_{re}}{\partial \Phi_{im}}(t) = \left[-\frac{1}{L_{inc}} \text{sen}(\omega t) \right] \frac{\Phi_{re}(t)}{\phi(t)} + i(t) \left[\frac{0 + \text{sen}(\omega t) \Phi_{re}(t)}{\phi(t)^2} \right] \quad (197)$$

$$\frac{\partial I_{im}}{\partial \Phi_{re}}(t) = \left[\frac{1}{L_{inc}} \cos(\omega t) \right] \frac{\Phi_{im}(t)}{\phi(t)} + i(t) \left[\frac{0 - \cos(\omega t) \Phi_{im}(t)}{\phi(t)^2} \right] \quad (198)$$

$$\frac{\partial I_{im}}{\partial \Phi_{im}}(t) = \left[-\frac{1}{L_{inc}} \text{sen}(\omega t) \right] \frac{\Phi_{im}(t)}{\phi(t)} + i(t) \left[\frac{\phi(t) + \text{sen}(\omega t) \Phi_{im}(t)}{\phi(t)^2} \right] \quad (199)$$

Reagrupando e reorganizando os termos, tem-se cada elemento da matriz de sensibilidade auxiliar $\bar{\mathbf{S}}(t)$:

$$\begin{aligned}\frac{\partial I_{re}}{\partial \Phi_{re}}(t) &= \frac{1}{L_{inc}} \cos(\omega t) \frac{\Phi_{re}(t)}{\phi(t)} + i(t) \left(\frac{1}{\phi(t)} - \frac{\Phi_{re}(t) \cos(\omega t)}{\phi(t)^2} \right) \\ \frac{\partial I_{re}}{\partial \Phi_{im}}(t) &= -\frac{1}{L_{inc}} \text{sen}(\omega t) \frac{\Phi_{re}(t)}{\phi(t)} + i(t) \left(\frac{\Phi_{re}(t) \text{sen}(\omega t)}{\phi(t)^2} \right) \\ \frac{\partial I_{im}}{\partial \Phi_{re}}(t) &= \frac{1}{L_{inc}} \cos(\omega t) \frac{\Phi_{im}(t)}{\phi(t)} - i(t) \left(\frac{\Phi_{im}(t) \cos(\omega t)}{\phi(t)^2} \right) \\ \frac{\partial I_{im}}{\partial \Phi_{im}}(t) &= \frac{1}{L_{inc}} \text{sen}(\omega t) \frac{\Phi_{im}(t)}{\phi(t)} + i(t) \left(\frac{1}{\phi(t)} + \frac{\Phi_{im}(t) \text{sen}(\omega t)}{\phi(t)^2} \right)\end{aligned}\tag{200}$$

A Figura 22 ilustra o modelo de acompanhamento da magnetização. Uma das vantagens da abordagem por modelo de acompanhamento na formulação fasorial é a possibilidade de generalização do modelo, assim como o equacionamento que trata da corrente injetada (201).

No modelo proposto o equipamento está em derivação, sendo o nó m de referência. Assim, para o modelo, tem-se $v_{m_{re}}(t) = v_{m_{im}}(t) = 0$.

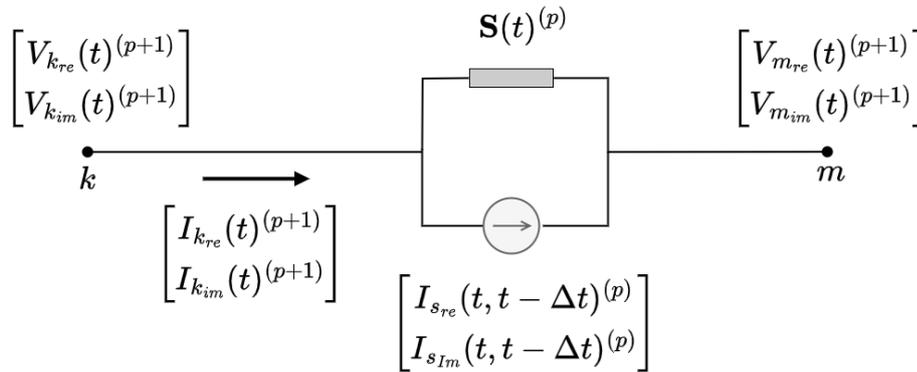


Figura 22 – Modelo de acompanhamento da magnetização

O equacionamento das componentes da matriz de sensibilidade do modelo de acompanhamento é o detalhado em (200). Note que os fasores de corrente e tensão podem ser decompostos em termos real e imaginário e a sensibilidade é matricial. A corrente da fonte do MLA segue na equação (201), conforme (90), com as partes real e imaginária da corrente dada em (177). As partes real e imaginária da tensão são variáveis de entrada do modelo e são obtidas da solução de rede da iteração anterior. Com as partes real e imaginária da tensão e corrente, os valores instantâneos

correspondentes podem ser obtidos a cada instante t utilizando (95) e (96). A corrente injetada no nó k no sistema de equações de matriz de condutâncias nodais para cálculo da solução de rede para a iteração $(p+1)$ é o negativo desta corrente da fonte pela convenção de sinais adotada.

$$\begin{bmatrix} I_{s_{re}}^{(p)}(t) \\ I_{s_{im}}^{(p)}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{re}^{(p)}(t) \\ I_{im}^{(p)}(t) \end{bmatrix} - \overbrace{\begin{bmatrix} \left(\frac{\partial I_{re}}{\partial V_{re}}(t)\right)^{(p)} & \left(\frac{\partial I_{re}}{\partial V_{im}}(t)\right)^{(p)} \\ \left(\frac{\partial I_{im}}{\partial V_{re}}(t)\right)^{(p)} & \left(\frac{\partial I_{im}}{\partial V_{im}}(t)\right)^{(p)} \end{bmatrix}}^{\text{Sensibilidade}} \begin{bmatrix} V_{re}^{(p)}(t) \\ V_{im}^{(p)}(t) \end{bmatrix} \quad (201)$$

Do ponto de vista de implementação computacional, a Figura 23 apresenta o fluxograma de solução do modelo de magnetização.

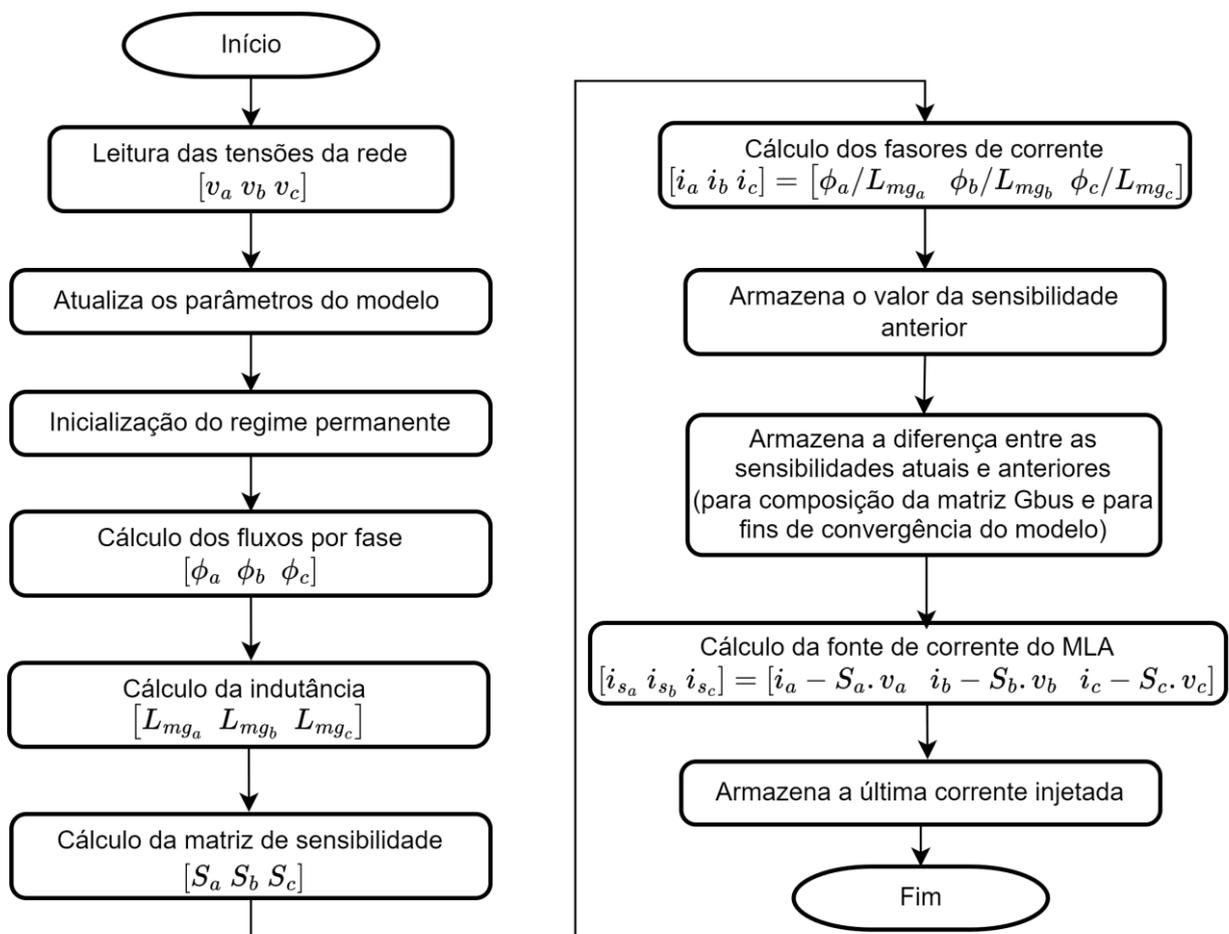


Figura 23 – Fluxograma da rotina de solução do modelo de magnetização

3.4 Modelo da linha de transmissão com configuração geométrica

A modelagem exata de linhas de transmissão é fundamentada nas equações eletromagnéticas de *Maxwell*. No entanto, devido à sua alta complexidade, são utilizadas aproximações simplificadoras na modelagem com o compromisso de manter os resultados próximos ao caso real. Nesse contexto, a linha de transmissão (LT) é representada de forma bidimensional, com seus cabos representados por cilindros infinitos e paralelos ao um plano infinito [18]. Essa aproximação é válida para linhas de alta tensão, onde a relação entre a altura dos cabos e a largura do vão entre as torres das LTs suficientemente pequena.

A partir dessas hipóteses simplificadoras, esta seção tem como objetivo apresentar o modelo de linha de transmissão obtido a partir da sua configuração geométrica, permitindo a representação da linha de transmissão com transposição ideal ou desbalanceada sendo utilizado o modelo *Bergeron* como base. Ressalta-se que o modelo implementado será modelado com os parâmetros constantes com a frequência.

No entanto, deve-se observar que, para simulações envolvendo o SIN, a maioria das LTs é modelada utilizando os parâmetros totais (parâmetros por unidade de comprimento multiplicados pelo comprimento da LT) de sequência positiva e zero, provenientes dos arquivos de entrada do ANAREDE e ANAFAS. Como esses parâmetros estão, em geral, corrigidos hiperbolicamente para 60 Hz, utiliza-se um método de *Newton-Raphson* [99] para retornar aos seus valores nominais. Na referência [99], é mostrado que, ao dispor dos parâmetros totais de uma LT, não é necessário conhecer explicitamente seu comprimento, que não é fornecido nos arquivos de entrada do ANAREDE e ANAFAS.

A configuração geométrica consiste nos parâmetros de entrada, sendo informadas as coordenadas do centro do feixe, dos cabos condutores e dos cabos para-raios. Também deve-se informar as coordenadas verticais do ponto médio e do vão. Para demais informações deve-se consultar os catálogos dos fabricantes. Os parâmetros de entrada estão esquematicamente apresentados na Figura 24. Nota-se que os dados de entrada estão subdivididos em parâmetros e *flags*.

Em relação à entrada de dados dos parâmetros, o primeiro parâmetro informado consiste na localização da linha transmissão, ou seja, as barras do terminal emissor (*from*) e receptor (*to*) e número do circuito (*cir*). Na sequência são dadas as informações

de resistividade do solo (ρ) e comprimento ($length$). Também são informados os parâmetros dos cabos condutores: raio médio geométrico (rmg), resistência a corrente alternada (rac) e; dos cabos para-raios: raio médio geométrico ($rmgpr$) e resistência a corrente alternada ($racpr$). Os parâmetros de raio médio geométrico (RMG) para 60 Hz, que são fornecidos pelo fabricante, serão utilizados apenas quando o modelo de Semlyen para impedância interna não for adotado. Por outro lado, caso o modelo de Semlyen seja utilizado, os dados empregados para cálculo de parâmetros serão os raios externo e interno do condutor.

Quanto às *flags*, inicialmente é informado a modelo de linha de transmissão (*modeltype*). Cabe ressaltar que a implementação realizada na tese consiste apenas no modelo de *Bergeron* de linhas de transmissão. Depois, entra-se com a opção de transposição (*transposed*) que assume as seguintes possibilidades: não há transposição e a linha é desbalanceada em todo seu comprimento (*NO*); a linha é calculada considerando transposição ideal (*IDEAL*); a linha tem um trecho de transposição finita no sentido (*BCA*) ou (*CAB*); a linha conta com transposição finita completa no sentido (*BCA-CAB*) ou (*CAB-BCA*).

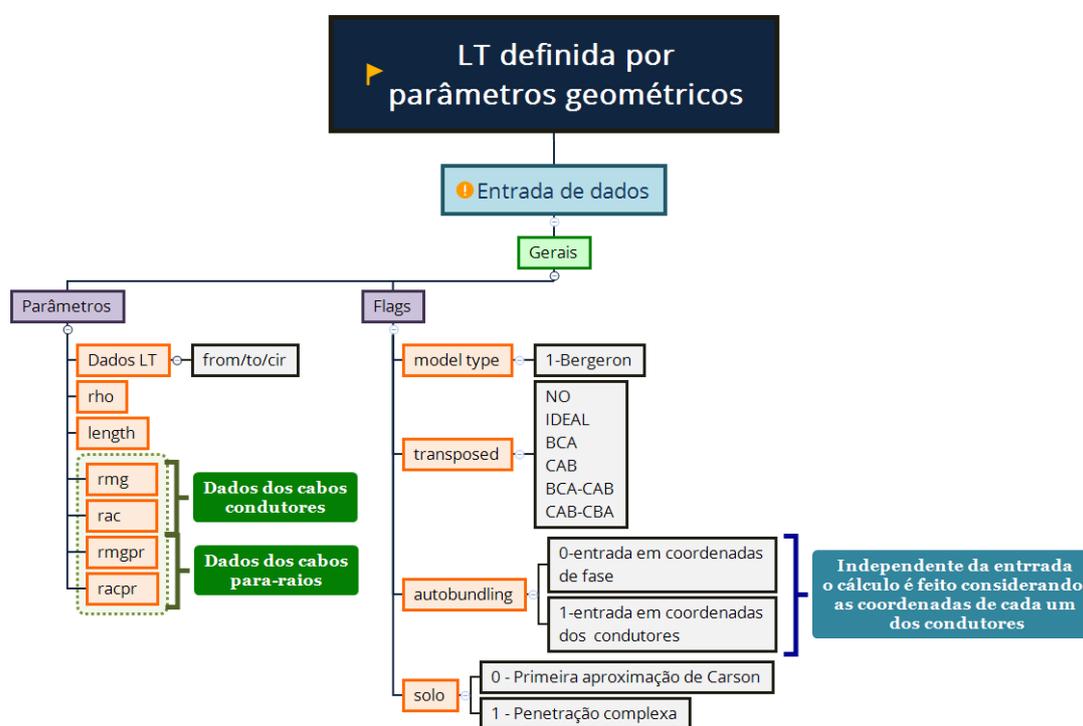


Figura 24 – Entrada de dados para o modelo de linha de transmissão com configuração geométrica

A Figura 25 apresenta os dados de entrada para os cabos condutores. Inicialmente, informa-se o identificador de fase (ph), o qual assume valor 0 para indicar que é um campo relativo aos dados do para-raios; e assume os valores 1 para fase A, 2 para fase B e 3 para fase C em um sistema trifásico. Depois são informados o raio interno (rin), o raio externo ($rout$) e a resistência a corrente contínua ($resisDC$). As coordenadas verticais são dadas pela altura da torre ($vtower$) e pela altura do meio do vão ($vmid$). As demais informações de cada condutor podem ser fornecidas diretamente ou agrupadas dentro do *bundle*. Caso estejam agrupadas, essas informações são desagrupadas por meio dos parâmetros ($separ$) que informa a distância entre elementos do *bundle*; ($angle$) que representa o ângulo entre esses elementos e; ($nbundle$) que informa o número de elementos do *bundle*.

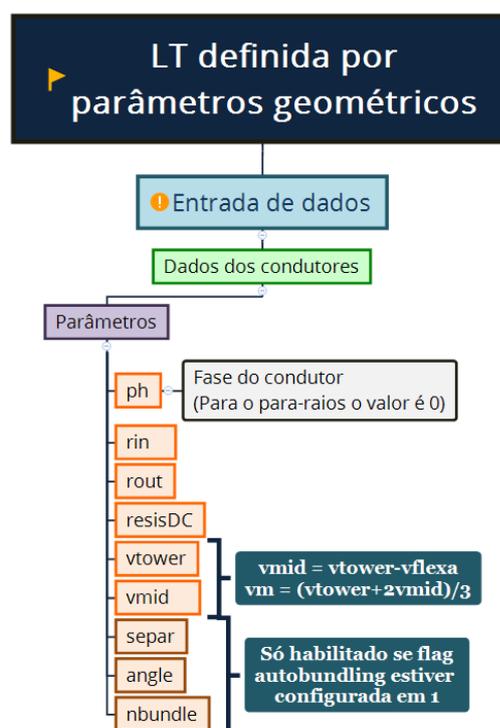


Figura 25 – Entrada de dados dos cabos condutores para o modelo de linha de transmissão com configuração geométrica

A Figura 26 apresenta o fluxograma geral para o modelo implementado, detalhando as etapas dos cálculos das matrizes de impedância longitudinal e admitância transversal. O fluxograma é geral até o ponto de considerar a transposição. Os anexos A

e **B** são dedicados aos cálculos de impedância e de potencial, respectivamente, com o cálculo da admitância decorrendo do cálculo da matriz de potencial. Os procedimentos de redução matricial são descritos com mais detalhes no Anexo C, e estão representados graficamente na Figura 26.

Estruturalmente as matrizes de impedância e de potencial assumem as formas descritas nas equações (202) e (203).

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{12} & z_{22} \end{bmatrix} \quad (202)$$

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{12} & p_{22} \end{bmatrix} \quad (203)$$

As matrizes **Z** e **P** são matrizes compostas (ou bloco matriz), onde cada elemento é, por sua vez, uma matriz que descreve um aspecto específico das interações no sistema. Onde:

- z_{11} e p_{11} corresponde à relação entre condutores;
- z_{12} e p_{12} corresponde à relação entre condutores e para-raios;
- z_{21} e p_{21} corresponde à relação entre para-raios e condutores;
- z_{22} e p_{22} corresponde à relação entre para-raios.

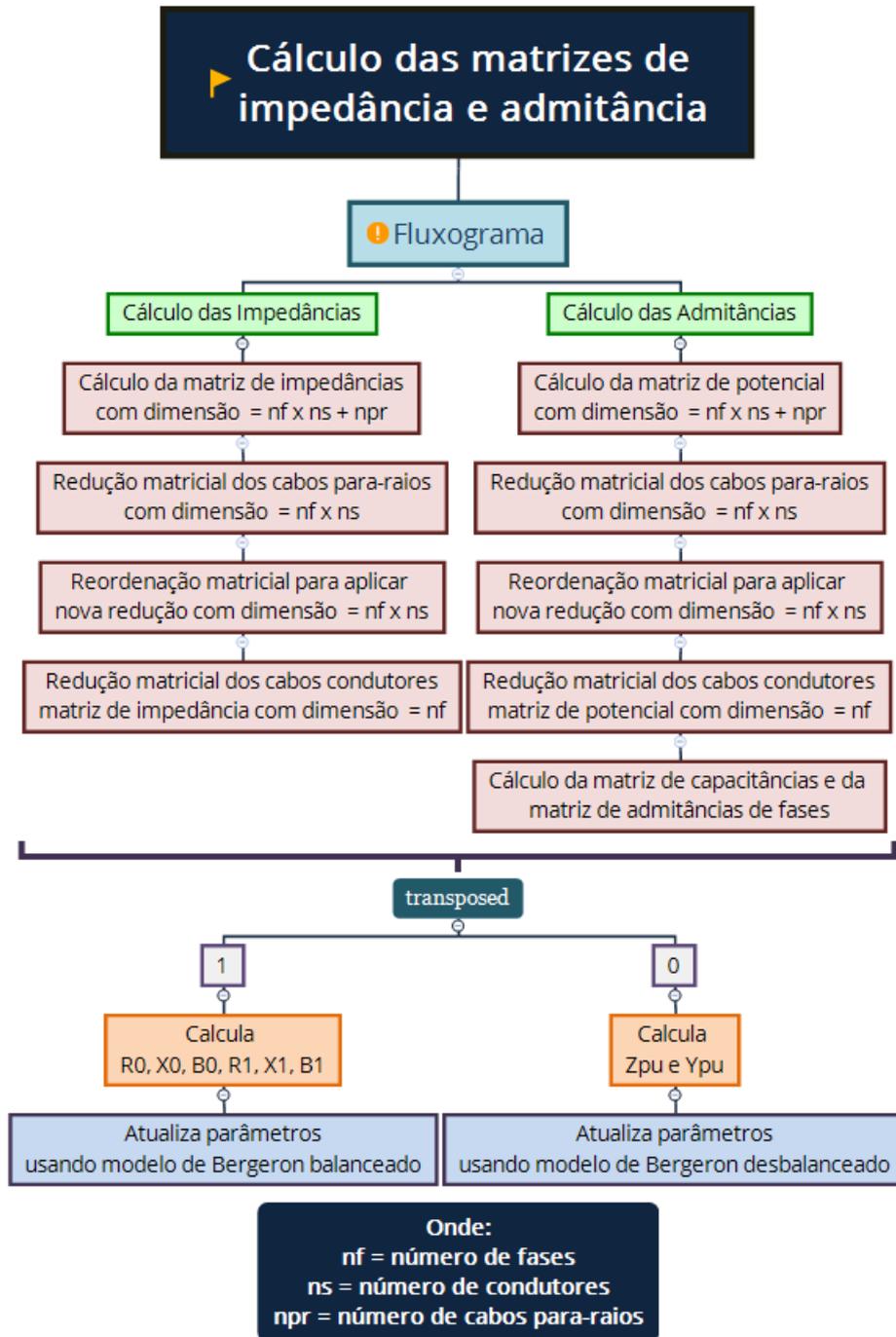


Figura 26 – Fluxograma geral para o modelo de linha de transmissão com configuração geométrica

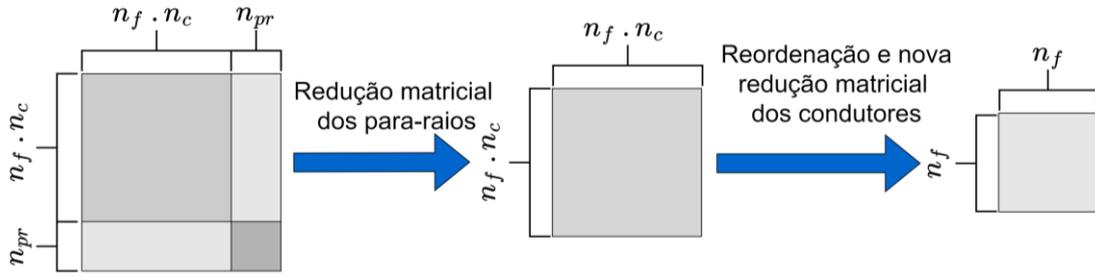


Figura 27 – Processo de redução matricial

O procedimento ilustrado na Figura 26 fornece previamente as matrizes de fase de impedância longitudinal Z_f e de admitância transversal Y_f . Para a transposição ideal são calculadas as impedâncias e reatâncias de sequencias positiva e zero. Uma etapa preliminar a esse cálculo consiste na obtenção das impedâncias e admitâncias da diagonal e fora de diagonal conforme ilustrado nas equações (204), (205), (206) e (207), respectivamente.

$$Z_{diag} = \sum_{i=1}^N \frac{Z_{f_{ii}}}{n_f} \quad (204)$$

$$Z_{foradiag} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{N, j \neq i} \frac{Z_{f_{ij}}}{(n_f - 1) \cdot n_f} \quad (205)$$

$$Y_{diag} = \sum_{i=1}^N \frac{Y_{f_{ii}}}{n_f} \quad (206)$$

$$Y_{foradiag} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{N, j \neq i} \frac{Y_{f_{ij}}}{(n_f - 1) \cdot n_f} \quad (207)$$

Para obtenção das impedâncias e admitâncias de sequencias positiva e zero, tem-se as equações (208), (209), (210) e (211):

$$z_1 = (Z_{diag} - Z_{foradiag}) \quad (208)$$

$$z_0 = (Z_{diag} - (n_f - 1) \cdot Z_{foradiag}) \quad (209)$$

$$y_1 = (Y_{diag} - Y_{foradiag}) \quad (210)$$

$$y_0 = (Y_{diag} - (n_f - 1) \cdot Y_{foradiag}) \quad (211)$$

Por fim, o modelo de linha de transmissão balanceada utiliza os valores de resistência, reatância e susceptância de sequências positiva e zero em pu, conforme equações (212), (213), (214), (215), (216) e (217):

$$R_1 = \frac{\text{real}\{z_1\}}{Z_{base}} \quad (212)$$

$$X_1 = \frac{\text{imag}\{z_1\}}{Z_{base}} \quad (213)$$

$$B_1 = \text{imag}\{y_1\} \cdot Z_{base} \quad (214)$$

$$R_0 = \frac{\text{real}\{z_0\}}{Z_{base}} \quad (215)$$

$$X_0 = \frac{\text{imag}\{z_0\}}{Z_{base}} \quad (216)$$

$$B_0 = \text{imag}\{y_0\} \cdot Z_{base} \quad (217)$$

Ressalta-se que a seção 2.2.1 apresentou o modelo de acompanhamento fasorial para a linha de transmissão monofásica. Para linhas de transmissão trifásicas idealmente transpostas, as correntes e tensões podem ser desacopladas em componentes simétricas, onde cada componente está associada a uma impedância \mathbf{Z}^{012} correspondente a sua respectiva componente simétrica. Dessa forma, cada componente pode ser analisada de forma independente, utilizando o modelo monofásico equivalente. Note que a matriz \mathbf{Z}^{012} consiste em uma matriz diagonal, estando as redes de sequência desacopladas. O modelo de acompanhamento com essas considerações segue na Figura 30.

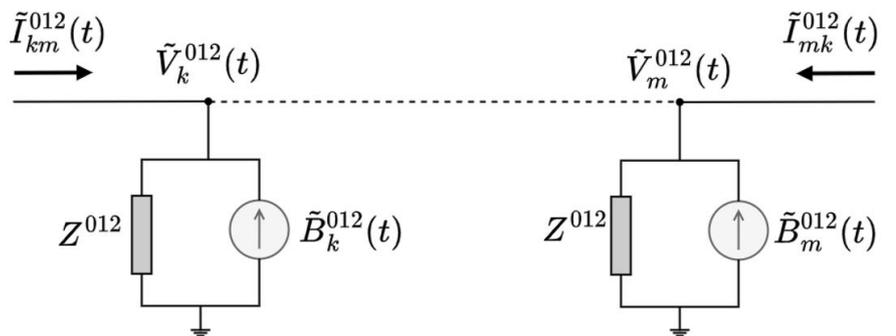


Figura 28 – Modelo de acompanhamento da LT trifásica (domínio fasorial usando componentes simétricas)

O modelo de acompanhamento leva em consideração a linha de transmissão sem perdas ou com perdas. No caso da linha de transmissão com perdas o cálculo dos parâmetros utiliza os valores de resistência nos termos, com as seguintes equações para Z^{012} , \tilde{B}_k^{012} , \tilde{B}_m^{012} , \tilde{I}_{km}^{012} e \tilde{I}_{mk}^{012} .

$$Z_{eq}^{012} = \sqrt{\frac{L^{012}}{C^{012}} + \frac{R^{012}}{4}} \quad (218)$$

Onde os valores de R^{012} , L^{012} e C^{012} são:

$$R^{012} = \left[\frac{\text{real}\{z_0\}}{Z_{base}}, \frac{\text{real}\{z_1\}}{Z_{base}}, \frac{\text{real}\{z_1\}}{Z_{base}} \right] \quad (219)$$

$$L^{012} = \left[\frac{\text{imag}\{z_0\}}{\omega Z_{base}}, \frac{\text{imag}\{z_1\}}{\omega Z_{base}}, \frac{\text{imag}\{z_1\}}{\omega Z_{base}} \right] \quad (220)$$

$$C^{012} = \left[\frac{1}{\omega Z_{base} \text{imag}\{y_0\}}, \frac{1}{\omega Z_{base} \text{imag}\{y_1\}}, \frac{1}{\omega Z_{base} \text{imag}\{y_1\}} \right] \quad (221)$$

E os termos \tilde{B}_k e \tilde{B}_m :

$$\begin{aligned} \tilde{B}_k^{012}(t) = & \frac{1 + \alpha_{eq}^{012}}{2} \left[\frac{\tilde{V}_m^{012}(t - \tau)}{Z_{eq}^{012}} e^{-j\omega\tau} + \frac{1 + \alpha_{eq}^{012}}{2} \tilde{I}_{mk}^{012}(t - \tau) e^{-j\omega\tau} \right] \\ & + \frac{1 - \alpha_{eq}^{012}}{2} \left[\frac{\tilde{V}_m^{012}(t - \tau)}{Z_{eq}^{012}} e^{-j\omega\tau} + \frac{1 + \alpha_{eq}^{012}}{2} \tilde{I}_{mk}^{012}(t - \tau) e^{-j\omega\tau} \right] \end{aligned} \quad (222)$$

$$\begin{aligned} \tilde{B}_m^{012}(t) = & \frac{1 + \alpha_{eq}^{012}}{2} \left[\frac{\tilde{V}_k^{012}(t - \tau)}{Z_{eq}^{012}} e^{-j\omega\tau} + \frac{1 + \alpha_{eq}^{012}}{2} \tilde{I}_{km}^{012}(t - \tau) e^{-j\omega\tau} \right] \\ & + \frac{1 - \alpha_{eq}^{012}}{2} \left[\frac{\tilde{V}_k^{012}(t - \tau)}{Z_{eq}^{012}} e^{-j\omega\tau} + \frac{1 + \alpha_{eq}^{012}}{2} \tilde{I}_{km}^{012}(t - \tau) e^{-j\omega\tau} \right] \end{aligned} \quad (223)$$

Em que $\alpha_{h_{eq}^{012} eq}$:

$$\alpha_{eq}^{012} = \left(\frac{Z_{eq}^{012} - \frac{R^{012}}{4}}{Z_{eq}^{012} + \frac{R^{012}}{4}} \right) \quad (224)$$

E as correntes, são calculadas:

$$\tilde{I}_{km}^{012}(t) = \frac{\tilde{V}_k^{012}(t)}{Z_{eq}^{012}} - \tilde{B}_k^{012}(t) \quad (225)$$

$$\tilde{I}_{mk}^{012}(t) = \frac{\tilde{V}_m^{012}(t)}{Z_{eq}^{012}} - \tilde{B}_m^{012}(t) \quad (226)$$

Caso não seja considerada a transposição ideal, a representação de linhas de transmissão será tratada no domínio modal. Para um dado sistema polifásico, as matrizes de impedância longitudinal \mathbf{Z} e admitância transversal \mathbf{Y} são matrizes cheias com acoplamento entre as fases e o produto $\mathbf{Z} \cdot \mathbf{Y}$ e $\mathbf{Y} \cdot \mathbf{Z}$ são distintos. Tais produtos podem ser diagonalizados através de uma transformação de similaridade [99], na qual os produtos matriciais são matrizes diagonais, com os elementos sendo os autovalores dos produtos. Assim, a matriz de autovetores do produto matricial $\mathbf{Z} \cdot \mathbf{Y}$ gera um modelo desacoplado para a linha de transmissão. Existem, no entanto, diversas soluções de autovetores que desacoplam o modelo da linha. Para um conjunto específico faz-se necessário a inclusão de uma restrição adicional, de modo que cada um dos autovetores do conjunto possua módulo unitário [100]. Nota-se que a matriz \mathbf{Z} possui as resistências das perdas na LT, tanto dos cabos como da indução do solo e dos para-raios.

Para ilustrar o processo de decomposição modal, inicialmente serão apresentadas as equações diferenciais de primeira ordem para tensão (227) e corrente (228), e de segunda ordem para tensões (229) e correntes (230) das linhas de transmissão polifásicas:

$$-\frac{d}{dz}\mathbf{U} = \mathbf{Z} \cdot \mathbf{I} \quad (227)$$

$$-\frac{d}{dz}\mathbf{I} = \mathbf{Y} \cdot \mathbf{U} \quad (228)$$

$$\frac{d^2}{dz^2}\mathbf{U} = \mathbf{Z} \cdot \mathbf{Y} \cdot \mathbf{U} \quad (229)$$

$$\frac{d^2}{dz^2}\mathbf{I} = \mathbf{Y} \cdot \mathbf{Z} \cdot \mathbf{I} \quad (230)$$

Sendo: z a coordenada longitudinal da LT que varia de 0 (terminal emissor) ao comprimento da LT (terminal receptor).

Os vetores \mathbf{U} e \mathbf{I} são os vetores de tensões e correntes de fase, respectivamente. Para a diagonalização, definem-se a matriz \mathbf{A} e \mathbf{B} como os seguintes produtos matriciais:

$$\mathbf{A} = \mathbf{Z} \cdot \mathbf{Y} \quad (231)$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{Y} \cdot \mathbf{Z} \quad (232)$$

Desse modo, tem-se as seguintes matrizes diagonais de autovalores para ambos os produtos matriciais:

$$\lambda_v = \mathbf{T}_v^{-1} \cdot \mathbf{Z} \cdot \mathbf{Y} \cdot \mathbf{T}_v \quad (233)$$

$$\lambda_i = \mathbf{T}_i^{-1} \cdot \mathbf{Y} \cdot \mathbf{Z} \cdot \mathbf{T}_i \quad (234)$$

Nas equações (233) e (234), as matrizes \mathbf{T}_v e \mathbf{T}_i são as matrizes cujas colunas são os autovetores de \mathbf{A} e de \mathbf{B} , respectivamente. Os produtos matriciais resultantes em \mathbf{A} e \mathbf{B} são distintos, as matrizes de autovetores \mathbf{T}_v e \mathbf{T}_i também são distintas. No entanto, os determinantes das matrizes \mathbf{A} e \mathbf{B} são iguais e seus autovalores também são iguais. Desse modo, tem-se que:

$$\lambda_v = \lambda_i \quad (235)$$

Chamando λ_v e λ_i de λ_m , as equações (233) e (234), passam a ser reescritas da seguinte forma:

$$\lambda_m = \mathbf{T}_v^{-1} \cdot \mathbf{Z} \cdot \mathbf{Y} \cdot \mathbf{T}_v \quad (236)$$

$$\lambda_m = \mathbf{T}_i^{-1} \cdot \mathbf{Y} \cdot \mathbf{Z} \cdot \mathbf{T}_i \quad (237)$$

Para isolar os produtos matriciais $\mathbf{Z} \cdot \mathbf{Y}$ e $\mathbf{Y} \cdot \mathbf{Z}$ se pré-multiplica os termos pelas matrizes \mathbf{T}_v e \mathbf{T}_i e se pós-multiplica pelas matrizes \mathbf{T}_v^{-1} e \mathbf{T}_i^{-1} , resultando em:

$$\mathbf{Z} \cdot \mathbf{Y} = \mathbf{T}_v \cdot \lambda_m \cdot \mathbf{T}_v^{-1} \quad (238)$$

$$\mathbf{Y} \cdot \mathbf{Z} = \mathbf{T}_i \cdot \lambda_m \cdot \mathbf{T}_i^{-1} \quad (239)$$

O próximo passo consiste em substituir as equações (238) e (239) nas equações diferenciais de segunda ordem (229) e (230).

$$\frac{d^2}{dz^2} \mathbf{U} = \mathbf{T}_v \cdot \lambda_m \cdot \mathbf{T}_v^{-1} \cdot \mathbf{U} \quad (240)$$

$$\frac{d^2}{dz^2} \mathbf{I} = \mathbf{T}_i \cdot \lambda_m \cdot \mathbf{T}_i^{-1} \cdot \mathbf{I} \quad (241)$$

Na sequência, se pré-multiplica as equações (240) e (241) por \mathbf{T}_v^{-1} e \mathbf{T}_i^{-1} , respectivamente:

$$\frac{d^2}{dz^2} \mathbf{T}_v^{-1} \cdot \mathbf{U} = \boldsymbol{\lambda}_m \cdot \mathbf{T}_v^{-1} \cdot \mathbf{U} \quad (242)$$

$$\frac{d^2}{dz^2} \mathbf{T}_i^{-1} \cdot \mathbf{I} = \boldsymbol{\lambda}_m \cdot \mathbf{T}_i^{-1} \cdot \mathbf{I} \quad (243)$$

O resultado permite que sejam definidas as tensões e correntes modais:

$$\mathbf{U}_m = \mathbf{T}_v^{-1} \cdot \mathbf{U} \quad (244)$$

$$\mathbf{I}_m = \mathbf{T}_i^{-1} \cdot \mathbf{I} \quad (245)$$

Então, as equações diferenciais de segunda ordem assumem a seguinte formulação em relação às componentes modais.

$$\frac{d^2}{dz^2} \mathbf{U}_m = \boldsymbol{\lambda}_m \cdot \mathbf{U}_m \quad (246)$$

$$\frac{d^2}{dz^2} \mathbf{I}_m = \boldsymbol{\lambda}_m \cdot \mathbf{I}_m \quad (247)$$

As tensões e correntes de fase podem ser obtidas a partir das tensões e correntes modais. Ou seja, as matrizes de autovetores \mathbf{T}_v e \mathbf{T}_i são matrizes de transformação do domínio de fases para o domínio modal e vice-versa. Com isso, tem-se que:

$$\mathbf{U} = \mathbf{T}_v \cdot \mathbf{U}_m \quad (248)$$

$$\mathbf{I} = \mathbf{T}_i \cdot \mathbf{I}_m \quad (249)$$

Para a obtenção das matrizes de impedância longitudinal e admitância transversal modais, inicialmente substitui-se as equações (248) e (249) em (227) e (228), resultando em:

$$-\frac{d}{dz} \mathbf{T}_v \cdot \mathbf{U}_m = \mathbf{Z} \cdot \mathbf{T}_i \cdot \mathbf{I}_m \quad (250)$$

$$-\frac{d}{dz} \mathbf{T}_i \cdot \mathbf{I}_m = \mathbf{Y} \cdot \mathbf{T}_v \cdot \mathbf{U}_m \quad (251)$$

Para eliminar as matrizes de transformação nos elementos diferenciais, se pré-multiplica as equações (250) e (251) por \mathbf{T}_v^{-1} e \mathbf{T}_i^{-1} , respectivamente:

$$-\frac{d}{dz} \mathbf{U}_m = \mathbf{T}_v^{-1} \cdot \mathbf{Z} \cdot \mathbf{T}_i \cdot \mathbf{I}_m \quad (252)$$

$$-\frac{d}{dz} \mathbf{I}_m = \mathbf{T}_i^{-1} \cdot \mathbf{Y} \cdot \mathbf{T}_v \cdot \mathbf{U}_m \quad (253)$$

Podendo, ser ainda reescrito de forma mais compacta:

$$-\frac{d}{dz} \mathbf{U}_m = \mathbf{Z}_m \cdot \mathbf{I}_m \quad (254)$$

$$-\frac{d}{dz} \mathbf{I}_m = \mathbf{Y}_m \cdot \mathbf{U}_m \quad (255)$$

São definidas a impedância longitudinal e admitância transversal modais:

$$\mathbf{Z}_m = \mathbf{T}_v^{-1} \cdot \mathbf{Z} \cdot \mathbf{T}_i \quad (256)$$

$$\mathbf{Y}_m = \mathbf{T}_i^{-1} \cdot \mathbf{Y} \cdot \mathbf{T}_v \quad (257)$$

A impedância longitudinal e admitância transversal de fase podem ser obtidas a partir da impedância longitudinal e admitância transversal modal. Para isso, se pré-multiplica as equações (256) e (257) pelas matrizes \mathbf{T}_v e \mathbf{T}_i e se pós-multiplica pelas matrizes \mathbf{T}_v^{-1} e \mathbf{T}_i^{-1} , resultando em:

$$\mathbf{Z} = \mathbf{T}_v \cdot \mathbf{Z}_m \cdot \mathbf{T}_i^{-1} \quad (258)$$

$$\mathbf{Y} = \mathbf{T}_i \cdot \mathbf{Y}_m \cdot \mathbf{T}_v^{-1} \quad (259)$$

A Tabela 2 resume as principais equações do domínio de fases e do domínio modal, respectivamente.

Tabela 2 – Equações no domínio de fases *versus* domínio modal

Domínio de fases	Domínio modal
$\frac{d^2}{dz^2} \mathbf{U} = \mathbf{Z} \cdot \mathbf{Y} \cdot \mathbf{U}$	$\frac{d^2}{dz^2} \mathbf{U}_m = \lambda_m \cdot \mathbf{U}_m$
$\frac{d^2}{dz^2} \mathbf{I} = \mathbf{Y} \cdot \mathbf{Z} \cdot \mathbf{I}$	$\frac{d^2}{dz^2} \mathbf{I}_m = \lambda_m \cdot \mathbf{I}_m$
$-\frac{d}{dz} \mathbf{U} = \mathbf{Z} \cdot \mathbf{I}$	$-\frac{d}{dz} \mathbf{U}_m = \mathbf{Z}_m \cdot \mathbf{I}_m$
$-\frac{d}{dz} \mathbf{I} = \mathbf{Y} \cdot \mathbf{U}$	$-\frac{d}{dz} \mathbf{I}_m = \mathbf{Y}_m \cdot \mathbf{U}_m$
$\mathbf{U} = \mathbf{T}_v \cdot \mathbf{U}_m$	$\mathbf{U}_m = \mathbf{T}_v^{-1} \cdot \mathbf{U}$
$\mathbf{I} = \mathbf{T}_i \cdot \mathbf{I}_m$	$\mathbf{I}_m = \mathbf{T}_i^{-1} \cdot \mathbf{I}$
$\mathbf{Z} = \mathbf{T}_v \cdot \mathbf{Z}_m \cdot \mathbf{T}_i^{-1}$	$\mathbf{Z}_m = \mathbf{T}_v^{-1} \cdot \mathbf{Z} \cdot \mathbf{T}_i$
$\mathbf{Y} = \mathbf{T}_i \cdot \mathbf{Y}_m \cdot \mathbf{T}_v^{-1}$	$\mathbf{Y}_m = \mathbf{T}_i^{-1} \cdot \mathbf{Y} \cdot \mathbf{T}_v$

É possível, ainda, obter a relação entre as matrizes de transformação \mathbf{T}_v e \mathbf{T}_i . Assumindo que a impedância e admitância mútua entre fases é idêntica para os termos ij e ji , que é o caso da linha de transmissão, tem-se que:

$$\mathbf{Z} = \mathbf{Z}^T \quad (260)$$

$$\mathbf{Y} = \mathbf{Y}^T \quad (261)$$

Assim, usando a definição de λ_m :

$$\lambda_m = \mathbf{T}_v^{-1} \cdot \mathbf{Z} \cdot \mathbf{Y} \cdot \mathbf{T}_v \quad (262)$$

Aplicando a transposta nos dois lados

$$\lambda_m^T = (\mathbf{T}_v^{-1} \cdot \mathbf{Z} \cdot \mathbf{Y} \cdot \mathbf{T}_v)^T \quad (263)$$

Usando a propriedade de transposta de um produto de três matrizes $(\mathbf{ABC})^T = \mathbf{C}^T \mathbf{B}^T \mathbf{A}^T$:

$$\lambda_m^T = \mathbf{T}_v^T \cdot (\mathbf{Z} \cdot \mathbf{Y})^T \cdot (\mathbf{T}_v^{-1})^T \quad (264)$$

Usando a simetria de \mathbf{Z} e \mathbf{Y} :

$$\lambda_m^T = \mathbf{T}_v^T \cdot \mathbf{Y} \cdot \mathbf{Z} \cdot (\mathbf{T}_v^{-1})^T \quad (265)$$

Tem-se a outra expressão de λ_m (237):

$$\lambda_m = \mathbf{T}_i^{-1} \cdot \mathbf{Y} \cdot \mathbf{Z} \cdot \mathbf{T}_i \quad (266)$$

Sendo a matriz λ_m diagonal, a sua transposta é ela própria, ou seja:

$$\lambda_m^T = \lambda_m \quad (267)$$

Desse modo, pode-se igualar a equação (265) e a equação (266):

$$\mathbf{T}_v^T \cdot \mathbf{Y} \cdot \mathbf{Z} \cdot (\mathbf{T}_v^{-1})^T = \mathbf{T}_i^{-1} \cdot \mathbf{Y} \cdot \mathbf{Z} \cdot \mathbf{T}_i \quad (268)$$

Assim, tem-se que:

$$\mathbf{T}_v^T = \mathbf{T}_i^{-1} \quad (269)$$

$$\mathbf{T}_v^{-1} = \mathbf{T}_i^T \quad (270)$$

Ou ainda:

$$\mathbf{T}_v = \mathbf{T}_i^{-T} \quad (271)$$

$$\mathbf{T}_i = \mathbf{T}_v^{-T} \quad (272)$$

Conclui-se que a obtenção de uma das matrizes de transformação é suficiente para a obtenção da outra.

A Figura 29 resume as etapas de cálculo considerando a linha desbalanceada, tanto para a linha sem perdas como com perdas. A entrada de dados consiste nas matrizes \mathbf{Z} e \mathbf{Y} em pu. A matriz de impedância longitudinal \mathbf{Z} pode ser considerada com perdas ou sem perdas (no último caso, apresenta-se apenas a componente imaginária). Dessa forma, a diagonalização para obtenção das matrizes modais \mathbf{Z}_m e \mathbf{Y}_m levarão em consideração a composição da matriz \mathbf{Z} . Ressalta-se, que o procedimento é geral para o cálculo das matrizes \mathbf{A} ; para as matrizes de autovetores \mathbf{T}_u , \mathbf{T}_v ; e para as matrizes transpostas \mathbf{T}_u^T e \mathbf{T}_v^T (representadas por \mathbf{T}'_u e \mathbf{T}'_v na Figura 29).

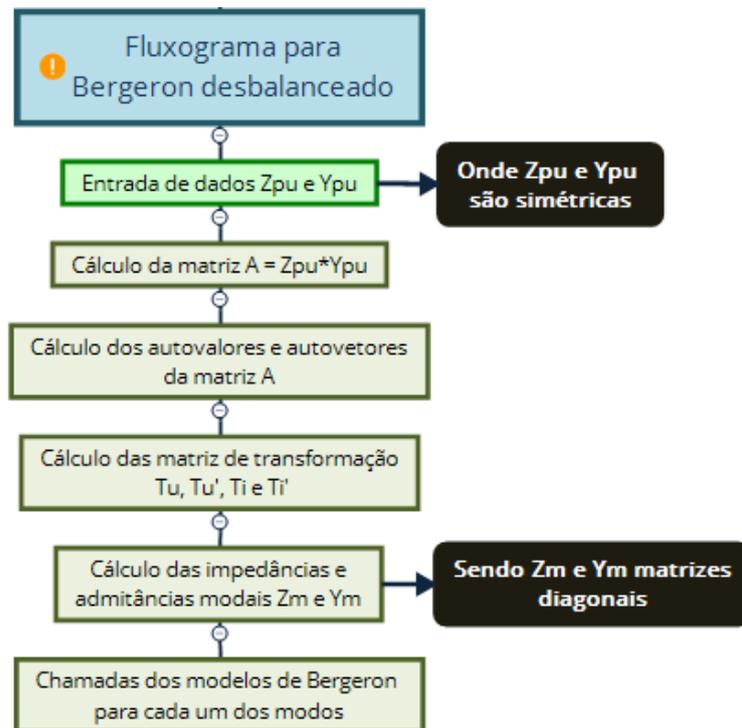


Figura 29 – Fluxograma do cálculo considerando desbalanço

Sendo \mathbf{Z}_m e \mathbf{Y}_m , matrizes diagonais, tem-se estruturalmente que:

$$\mathbf{Z}_m = \begin{bmatrix} z_{m_{11}} & 0 & 0 \\ 0 & z_{m_{22}} & 0 \\ 0 & 0 & z_{m_{33}} \end{bmatrix} \quad (273)$$

$$\mathbf{Y}_m = \begin{bmatrix} y_{m_{11}} & 0 & 0 \\ 0 & y_{m_{22}} & 0 \\ 0 & 0 & y_{m_{33}} \end{bmatrix} \quad (274)$$

A Figura 30 mostra a chamada do modelo para cada uma das componentes modais. A interface está em componentes simétricas 012, e o modelo inicialmente realiza a transformação para o domínio das fases ABC. Na sequência é realizada a decomposição modal para diagonalizar as matrizes \mathbf{Z} e \mathbf{Y} e poder fazer uso do modelo de acompanhamento da LT. Dessa forma, cada modo é calculado separadamente de forma desacoplada de forma análoga à LT idealmente transposta com as componentes simétricas. Depois, é calculada a corrente injetada ainda em componentes modais. Essa corrente é atualizada na rede através da conversão para componentes de fase ABC e, por fim, para componentes simétricas para a solução geral.

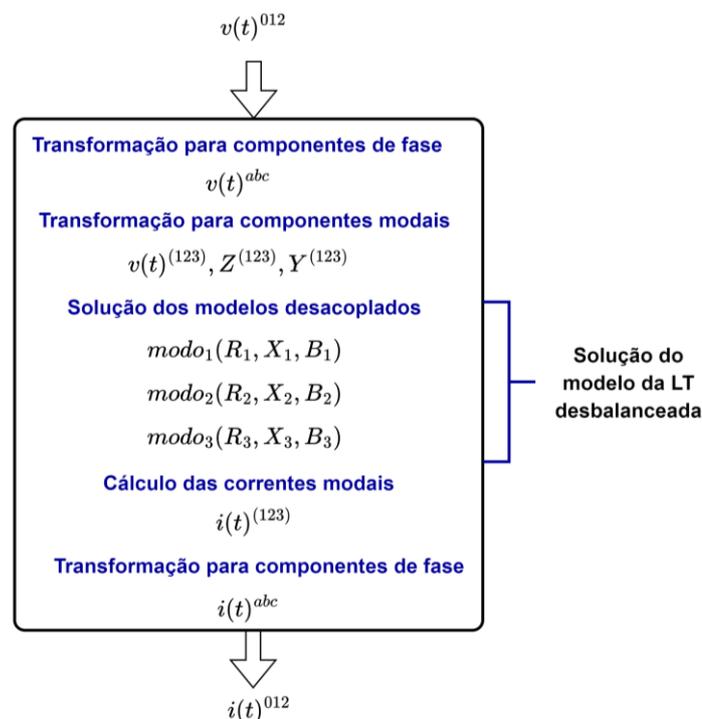


Figura 30 – Etapas de solução do modelo para cada uma das componentes modais

A transformação das componentes de fase para as tensões modais e a transformação inversa das componentes modais para as componentes de fase das correntes são apresentadas nas equações (275) e (276):

$$\mathbf{U}_m = \mathbf{T}_v^{-1} \cdot \mathbf{U} \quad (275)$$

$$\mathbf{I} = \mathbf{T}_i \cdot \mathbf{I}_m \quad (276)$$

O modelo de LT proposto consiste em utilizar o mesmo modelo apresentado na seção 2.2.1, sem perdas e com perdas, usando as componentes modais em vez de utilizar as componentes simétricas. Na situação de linhas desbalanceadas as componentes simétricas não diagonalizam a matriz de impedância, portanto, faz-se uso da decomposição modal para que cada modo esteja associado com um valor de impedância desacoplado dos demais. O modelo de acompanhamento segue na Figura 31.

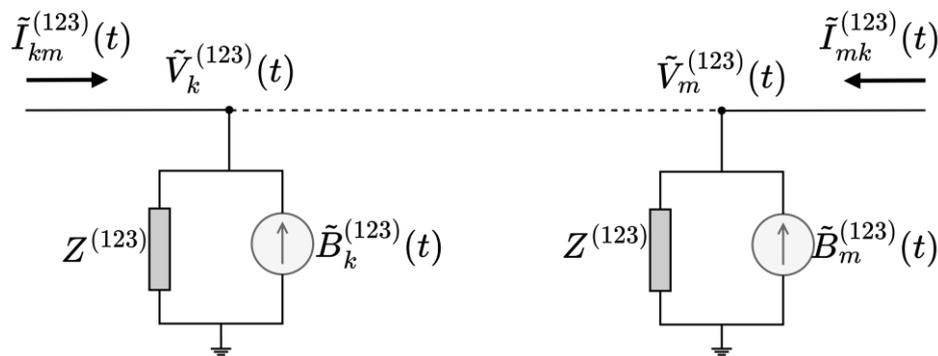


Figura 31 – Modelo de acompanhamento da LT trifásica com perdas (domínio fasorial utilizando componentes modais)

Considerando que as matrizes modais estão em pu, os elementos destacados na Figura 30 R , X e B , podem ser obtidos diretamente dessas matrizes, da seguinte forma:

$$R_1 = \text{real}\{z_{m_{11}}\} \quad (277)$$

$$X_1 = \text{imag}\{z_{m_{11}}\} \quad (278)$$

$$B_1 = \text{imag}\{y_{m_{11}}\} \quad (279)$$

$$R_2 = \text{real}\{z_{m_{22}}\} \quad (280)$$

$$X_2 = \text{imag}\{z_{m_{22}}\} \quad (281)$$

$$B_2 = \text{imag}\{y_{m_{22}}\} \quad (282)$$

$$R_3 = \text{real}\{z_{m_{33}}\} \quad (283)$$

$$X_3 = \text{imag}\{z_{m_{33}}\} \quad (284)$$

$$B_3 = \text{imag}\{y_{m_{33}}\} \quad (285)$$

O modelo de acompanhamento pode ser aplicado em linha de transmissão sem perdas ou com perdas. No caso da linha de transmissão com perdas o cálculo dos parâmetros utiliza os valores de resistência nos termos, com as seguintes equações para $Z^{(123)}$, $\tilde{B}_k^{(123)}$, $\tilde{B}_m^{(123)}$, $\tilde{I}_{km}^{(123)}$ e $\tilde{I}_{mk}^{(123)}$.

$$Z_{eq}^{(123)} = \sqrt{\frac{L^{(123)}}{C^{(123)}}} + \frac{R^{(123)}}{4} \quad (286)$$

Onde os valores de $R^{(123)}$, $L^{(123)}$ e $C^{(123)}$ são:

$$R^{(123)} = [\text{real}\{z_{m_{11}}\}, \text{real}\{z_{m_{22}}\}, \text{real}\{z_{m_{33}}\}] \quad (287)$$

$$L^{(123)} = \left[\frac{\text{imag}\{z_{m_{11}}\}}{\omega}, \frac{\text{imag}\{z_{m_{22}}\}}{\omega}, \frac{\text{imag}\{z_{m_{33}}\}}{\omega} \right] \quad (288)$$

$$C^{(123)} = \left[\frac{1}{\omega \text{imag}\{y_{m_{11}}\}}, \frac{1}{\omega \text{imag}\{y_{m_{22}}\}}, \frac{1}{\omega \text{imag}\{y_{m_{33}}\}} \right] \quad (289)$$

E os termos \tilde{B}_k e \tilde{B}_m :

$$\begin{aligned} \tilde{B}_k^{(123)}(t) = & \frac{1 + \alpha_{eq}^{(123)}}{2} \left[\frac{\tilde{V}_m^{(123)}(t - \tau)}{Z_{eq}^{(123)}} e^{-j\omega\tau} + \frac{1 + \alpha_{eq}^{(123)}}{2} \tilde{I}_{mk}^{(123)}(t - \tau) e^{-j\omega\tau} \right] \\ & + \frac{1 - \alpha_{eq}^{(123)}}{2} \left[\frac{\tilde{V}_m^{(123)}(t - \tau)}{Z_{eq}^{(123)}} e^{-j\omega\tau} \right. \\ & \left. + \frac{1 + \alpha_{eq}^{(123)}}{2} \tilde{I}_{mk}^{(123)}(t - \tau) e^{-j\omega\tau} \right] \end{aligned} \quad (290)$$

$$\begin{aligned} \tilde{B}_m^{(123)}(t) = & \frac{1 + \alpha_{eq}^{(123)}}{2} \left[\frac{\tilde{V}_k^{(123)}(t - \tau)}{Z_{eq}^{(123)}} e^{-j\omega\tau} + \frac{1 + \alpha_{eq}^{(123)}}{2} \tilde{I}_{km}^{(123)}(t - \tau) e^{-j\omega\tau} \right] \\ & + \frac{1 - \alpha_{eq}^{(123)}}{2} \left[\frac{\tilde{V}_k^{(123)}(t - \tau)}{Z_{eq}^{(123)}} e^{-j\omega\tau} \right. \\ & \left. + \frac{1 + \alpha_{eq}^{(123)}}{2} \tilde{I}_{km}^{(123)}(t - \tau) e^{-j\omega\tau} \right] \end{aligned} \quad (291)$$

Em que $\alpha_{eq}^{(123)}$:

$$\alpha_{eq}^{(123)} = \left(\frac{Z_{eq}^{(123)} - \frac{R^{(123)}}{4}}{Z_{eq}^{(123)} + \frac{R^{(123)}}{4}} \right) \quad (292)$$

E as correntes, são calculadas:

$$\tilde{I}_{km}^{(123)}(t) = \frac{\tilde{V}_k^{(123)}(t)}{Z_{eq}^{(123)}} - \tilde{B}_k^{(123)}(t) \quad (293)$$

$$\tilde{I}_{mk}^{(123)}(t) = \frac{\tilde{V}_m^{(123)}(t)}{Z_{eq}^{(123)}} - \tilde{B}_m^{(123)}(t) \quad (294)$$

Ressalta-se que o tempo de tráfego em linhas de transmissão está diretamente relacionado aos modos de propagação. Cada modo de propagação apresenta uma velocidade de propagação característica, influenciando assim o tempo que um sinal ou distúrbio leva para se propagar ao longo da LT. A interação entre esses modos determina como a energia é distribuída e como os sinais transitam pela rede, afetando o comportamento temporal do sistema, especialmente durante eventos transitórios ou de manobra.

Observe ainda que as fórmulas obtidas para a linha desbalanceada são idênticas, com exceção dos índices, aquelas obtidas para uma linha com transposição ideal (balanceada), que, por sua vez, coincidem com aquelas usadas no modelo de linha de transmissão monofásica na formulação fasorial. Ao aplicar as fórmulas da linha de transmissão com perdas, fazendo $R = 0$, chegam-se às expressões correspondentes à linha sem perdas ($Z = \sqrt{L/C}$ e $\alpha_{eq} = 1$).

Ou seja, o modelo de acompanhamento, com a devida atualização de seus termos, possui a flexibilidade de ser capaz de modelar diversos tipos de linhas de

transmissão. Isso inclui tanto linhas monofásicas quanto trifásicas, sejam elas balanceadas ou desbalanceadas, sem perdas ou com perdas. O mesmo modelo pode ser utilizado pois os parâmetros estão desacoplados. Para a linha balanceada o desacoplamento é imediato e dado pelas componentes simétricas de sequência 012. Para a linha desbalanceada a decomposição modal diagonaliza as matrizes, desacoplando nos modos (123). A Tabela 3 resume os equacionamentos obtidos para a LT monofásica sem perdas e com perdas e para a LT trifásica com perdas com transposição ideal e com desbalanço.

Tabela 3 – Equações do modelo de LT

LT monofásica sem perdas	LT monofásica com perdas	LT trifásica com transposição ideal com perdas	LT trifásica desbalanceada com perdas
$Z = \sqrt{\frac{L}{C}}$	$Z_{eq} = \sqrt{\frac{L}{C}} + \frac{R}{4}$	$Z_{eq}^{012} = \sqrt{\frac{L^{012}}{C^{012}}} + \frac{R^{012}}{4}$	$Z_{eq}^{(123)} = \sqrt{\frac{L^{(123)}}{C^{(123)}}} + \frac{R^{(123)}}{4}$
$\tau = l\sqrt{LC}$	$\tau = l\sqrt{LC}$	$\tau^{012} = l\sqrt{L^{012}C^{012}}$	$\tau^{(123)} = l\sqrt{L^{(123)}C^{(123)}}$
–	$h_{eq} = \begin{pmatrix} \sqrt{\frac{L}{C}} - \frac{R}{4} \\ \sqrt{\frac{L}{C}} + \frac{R}{4} \end{pmatrix}$	$h_{eq}^{012} = \begin{pmatrix} \sqrt{\frac{L^{012}}{C^{012}}} - \frac{R^{012}}{4} \\ \sqrt{\frac{L^{012}}{C^{012}}} + \frac{R^{012}}{4} \end{pmatrix}$	$h_{eq}^{(123)} = \begin{pmatrix} \sqrt{\frac{L^{(123)}}{C^{(123)}}} - \frac{R^{(123)}}{4} \\ \sqrt{\frac{L^{(123)}}{C^{(123)}}} + \frac{R^{(123)}}{4} \end{pmatrix}$
$\tilde{I}_{km}(t) = \frac{\tilde{V}_k(t)}{Z} - \tilde{B}_k(t)$	$\tilde{I}_{km}(t) = \frac{\tilde{V}_k(t)}{Z_{eq}} - \tilde{B}_k(t)$	$\tilde{I}_{km}^{012}(t) = \frac{\tilde{V}_k^{012}(t)}{Z_{eq}^{012}} - \tilde{B}_k^{012}(t)$	$\tilde{I}_{km}^{(123)}(t) = \frac{\tilde{V}_k^{(123)}(t)}{Z_{eq}^{(123)}} - \tilde{B}_k^{(123)}(t)$
$\tilde{I}_{mk}(t) = \frac{\tilde{V}_m(t)}{Z} - \tilde{B}_m(t)$	$\tilde{I}_{mk}(t) = \frac{\tilde{V}_m(t)}{Z_{eq}} - \tilde{B}_m(t)$	$\tilde{I}_{mk}^{012}(t) = \frac{\tilde{V}_m^{012}(t)}{Z_{eq}^{012}} - \tilde{B}_m^{012}(t)$	$\tilde{I}_{mk}^{(123)}(t) = \frac{\tilde{V}_m^{(123)}(t)}{Z_{eq}^{(123)}} - \tilde{B}_m^{(123)}(t)$

LT monofásica sem perdas	LT monofásica com perdas	LT trifásica com transposição ideal com perdas	LT trifásica desbalanceada com perdas
$\tilde{B}_k(t) = \frac{\tilde{V}_m(t-\tau)}{Z} e^{-j\omega\tau} + \tilde{I}_{mk}(t-\tau) e^{-j\omega\tau}$	$\begin{aligned} \tilde{B}_k(t) &= \frac{1 + \alpha_{eq}}{2} \left[\frac{\tilde{V}_m(t-\tau)}{Z_{eq}} e^{-j\omega\tau} + \frac{1 + \alpha_{eq}}{2} \tilde{I}_{mk}(t-\tau) e^{-j\omega\tau} \right] \\ &+ \frac{1 - \alpha_{eq}}{2} \left[\frac{\tilde{V}_m(t-\tau)}{Z_{eq}} e^{-j\omega\tau} + \frac{1 + \alpha_{eq}}{2} \tilde{I}_{mk}(t-\tau) e^{-j\omega\tau} \right] \end{aligned}$	$\begin{aligned} \tilde{B}_k^{012}(t) &= \frac{1 + \alpha_{eq}^{012}}{2} \left[\frac{\tilde{V}_m^{012}(t-\tau)}{Z_{eq}^{012}} e^{-j\omega\tau} + \frac{1 + \alpha_{eq}^{012}}{2} \tilde{I}_{mk}^{012}(t-\tau) e^{-j\omega\tau} \right] \\ &+ \frac{1 - \alpha_{eq}^{012}}{2} \left[\frac{\tilde{V}_m^{012}(t-\tau)}{Z_{eq}^{012}} e^{-j\omega\tau} + \frac{1 + \alpha_{eq}^{012}}{2} \tilde{I}_{mk}^{012}(t-\tau) e^{-j\omega\tau} \right] \end{aligned}$	$\begin{aligned} \tilde{B}_k^{(123)}(t) &= \frac{1 + \alpha_{eq}^{(123)}}{2} \left[\frac{\tilde{V}_m^{(123)}(t-\tau)}{Z_{eq}^{(123)}} e^{-j\omega\tau} + \frac{1 + \alpha_{eq}^{(123)}}{2} \tilde{I}_{mk}^{(123)}(t-\tau) e^{-j\omega\tau} \right] \\ &+ \frac{1 - \alpha_{eq}^{(123)}}{2} \left[\frac{\tilde{V}_m^{(123)}(t-\tau)}{Z_{eq}^{(123)}} e^{-j\omega\tau} + \frac{1 + \alpha_{eq}^{(123)}}{2} \tilde{I}_{mk}^{(123)}(t-\tau) e^{-j\omega\tau} \right] \end{aligned}$
$\tilde{B}_m(t) = \frac{\tilde{V}_k(t-\tau)}{Z} e^{-j\omega\tau} + \tilde{I}_{km}(t-\tau) e^{-j\omega\tau}$	$\begin{aligned} \tilde{B}_m(t) &= \frac{1 + \alpha_{eq}}{2} \left[\frac{\tilde{V}_k(t-\tau)}{Z_{eq}} e^{-j\omega\tau} + \frac{1 + \alpha_{eq}}{2} \tilde{I}_{km}(t-\tau) e^{-j\omega\tau} \right] \\ &+ \frac{1 - \alpha_{eq}}{2} \left[\frac{\tilde{V}_k(t-\tau)}{Z_{eq}} e^{-j\omega\tau} + \frac{1 + \alpha_{eq}}{2} \tilde{I}_{km}(t-\tau) e^{-j\omega\tau} \right] \end{aligned}$	$\begin{aligned} \tilde{B}_m^{012}(t) &= \frac{1 + \alpha_{eq}^{012}}{2} \left[\frac{\tilde{V}_k^{012}(t-\tau)}{Z_{eq}^{012}} e^{-j\omega\tau} + \frac{1 + \alpha_{eq}^{012}}{2} \tilde{I}_{km}^{012}(t-\tau) e^{-j\omega\tau} \right] \\ &+ \frac{1 - \alpha_{eq}^{012}}{2} \left[\frac{\tilde{V}_k^{012}(t-\tau)}{Z_{eq}^{012}} e^{-j\omega\tau} + \frac{1 + \alpha_{eq}^{012}}{2} \tilde{I}_{km}^{012}(t-\tau) e^{-j\omega\tau} \right] \end{aligned}$	$\begin{aligned} \tilde{B}_m^{(123)}(t) &= \frac{1 + \alpha_{eq}^{(123)}}{2} \left[\frac{\tilde{V}_k^{(123)}(t-\tau)}{Z_{eq}^{(123)}} e^{-j\omega\tau} + \frac{1 + \alpha_{eq}^{(123)}}{2} \tilde{I}_{km}^{(123)}(t-\tau) e^{-j\omega\tau} \right] \\ &+ \frac{1 - \alpha_{eq}^{(123)}}{2} \left[\frac{\tilde{V}_k^{(123)}(t-\tau)}{Z_{eq}^{(123)}} e^{-j\omega\tau} + \frac{1 + \alpha_{eq}^{(123)}}{2} \tilde{I}_{km}^{(123)}(t-\tau) e^{-j\omega\tau} \right] \end{aligned}$

3.5 Caracterização do termo visualmente coincidente

No capítulo de resultados, as simulações decorrentes da implementação dos modelos serão validadas com o ATP. Idealmente, nessa etapa as curvas em ambas as ferramentas se apresentariam integralmente sobrepostas. Na prática as curvas apresentam diferenças. Qualitativamente em uma validação adequada essas diferenças somente são perceptíveis em ampliação da visualização, estando visualmente coincidentes no intervalo de simulação completo. Em geral, essa avaliação qualitativa costuma ser suficiente para validar o modelo. No entanto, essa seção se propõe a formalizar a etapa validação dentro de parâmetros quantitativos. Assim, buscou-se sistematizar uma metodologia de análise do erro. Algumas métricas foram propostas, assim como suas respectivas vantagens e limitações.

3.5.1.1 Análise do erro: uma primeira abordagem

Os resultados obtidos nas simulações foram qualitativamente descritos como visualmente coincidentes. Isso significa que dentro de uma determinada faixa de visualização as curvas são vistas praticamente como sobrepostas. Assim, para ter a dimensão de uma possível aderência dessas variáveis é necessário ampliar a faixa de visualização, tanto no eixo horizontal (do tempo) como no eixo vertical (da variável em análise).

Tendo isso em vista, foram buscadas formas de quantificar essa análise, proporcionando assim um parâmetro de qualidade da validação. Ou seja, definir algum indicador que consiga exprimir a informação dos resultados visualmente coincidentes. Nesse sentido, uma primeira tentativa consistiu em calcular o desvio dessas variáveis para cada intervalo de tempo. Como critério foi utilizado o resultado obtido do ATP como referência.

O desvio é calculado então como apresentado em (295).

$$\varepsilon(t) = v_1(t) - v_2(t) \quad (295)$$

Ilustrando esse processo de forma gráfica utilizando a medição de tensão na fase A da barra 15, tem-se o resultado apresentado na Figura 32.

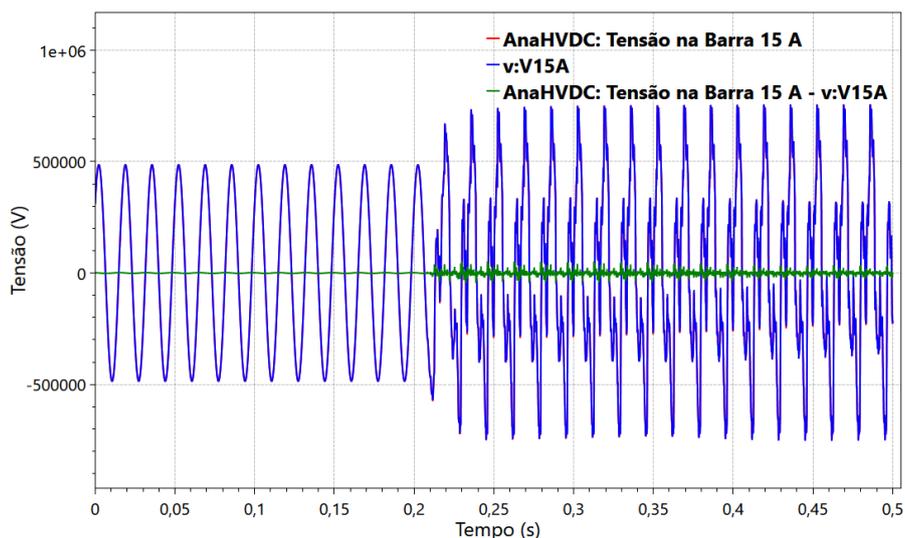


Figura 32 – Tensão em V15- fase A

O erro calculado está destacado na Figura 33. Pode-se inferir desse resultado que o desvio no regime permanente é constante, uma senoide de baixa amplitude, e no transitório varia ao longo do tempo de simulação, uma vez que há decaimento dos picos dos erros, mesmo com as curvas mantendo a característica de serem visualmente coincidentes.

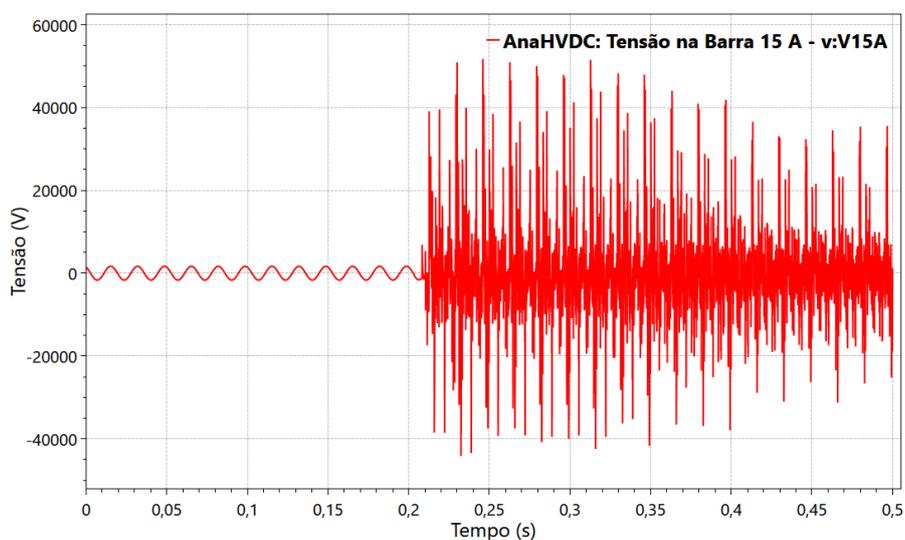


Figura 33 – Erro de tensão em V15- fase A

Apesar dessa primeira abordagem se mostrar simples e direta, existe limitações e considerações que merecem ser exploradas. E isso se deve ao fato que em uma análise mais apurada os picos dos erros apresentados estarem modificando sensivelmente sua amplitude. A análise do erro será feita considerando dois momentos distintos: análise em regime permanente e análise no transitório.

- Análise do erro em regime permanente:

Para o regime permanente inicialmente foi considerado uma ampliação de visualização no eixo horizontal no intervalo $t = [0,05; 0,076]$. Na Figura 34 estão as medições e o erro calculado, o qual não é visualizado devido à escala adotada.

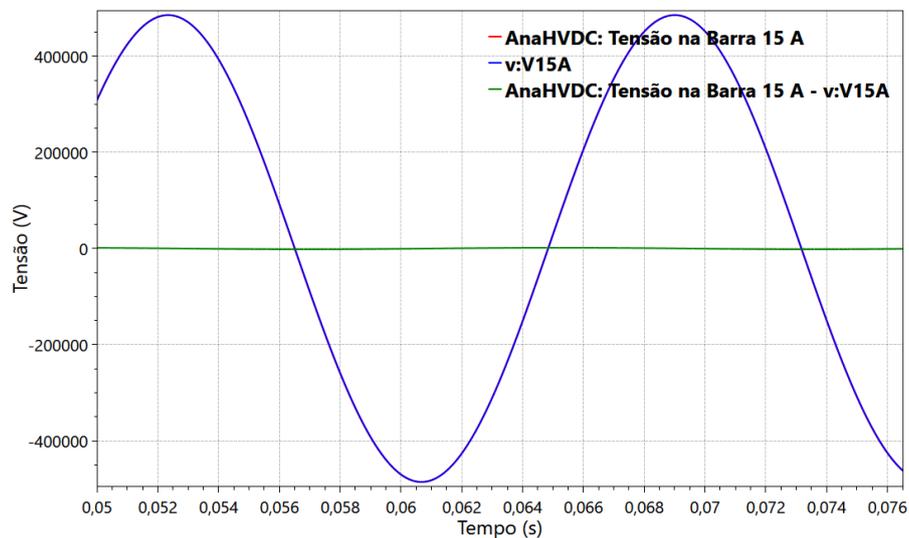


Figura 34 – Tensão em V15- fase A (ampliação no regime permanente)

Quando se insere apenas o erro no gráfico, constata-se que em regime permanente o erro é diferente de zero. Isso significa que há um descolamento ou de amplitude, ou de fase ou de ambos na medição. Idealmente, caso as variáveis fossem coincidentes apresentariam erro zero. Em termos práticos, qualquer diferença, mesmo que mínima entre as medições se apresenta como erro distinto de zero.

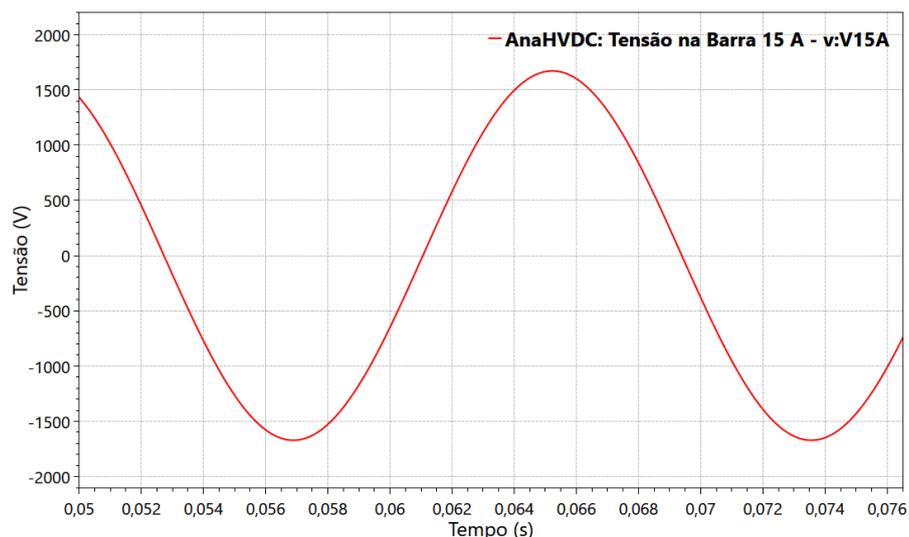


Figura 35 – Erro de tensão em V15- fase A (ampliação no regime permanente)

Para a variável escolhida, e lembrando que foi adotado o ATP como referência, calculando o quanto o pico do erro calculado representa em termos percentuais o pico da tensão, tem-se o valor de 0,345%.

$$err(\%) = 100 \times \frac{1671}{485030} = 0,345\% \quad (296)$$

Ampliando-se mais ainda a faixa de visualização torna-se possível ver o deslocamento em fase e em amplitude em regime permanente. Essa diferença visual, no entanto, explica-se pela dificuldade de obtenção de um caso base que seja integralmente exato, seja por necessidade de aproximações ou truncamentos na entrada de dados ou precisão adotada internamente pelas ferramentas, por exemplo.

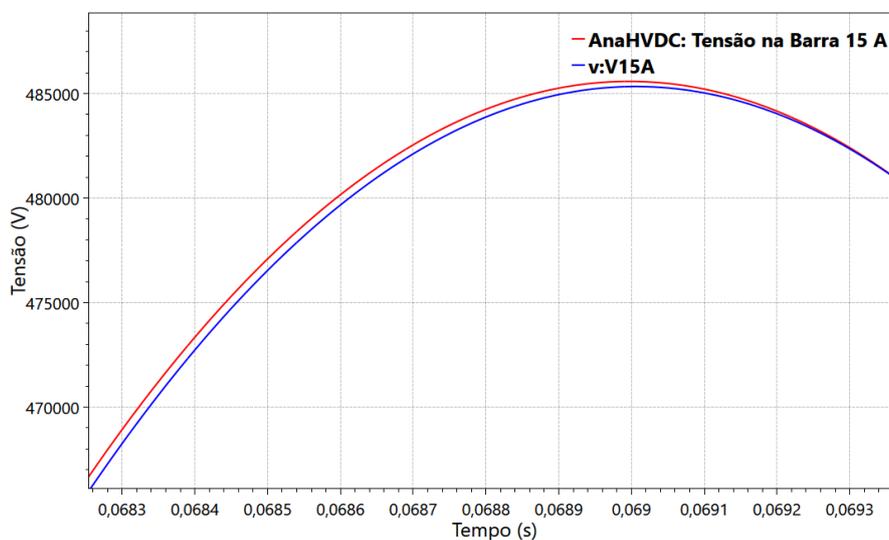


Figura 36 – Tensão em V15- fase A (ampliação para visualização do defasamento)

As curvas podem ser avaliadas em termos de valor de defasamento no tempo (Figura 37) e de valor de pico (Figura 38).

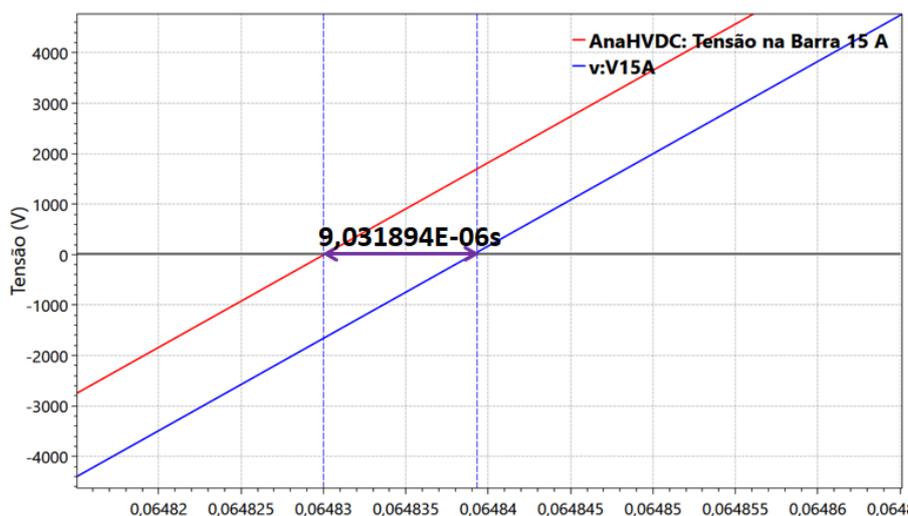


Figura 37 – Tensão em V15- fase A (ampliação para detecção do cruzamento por zero)

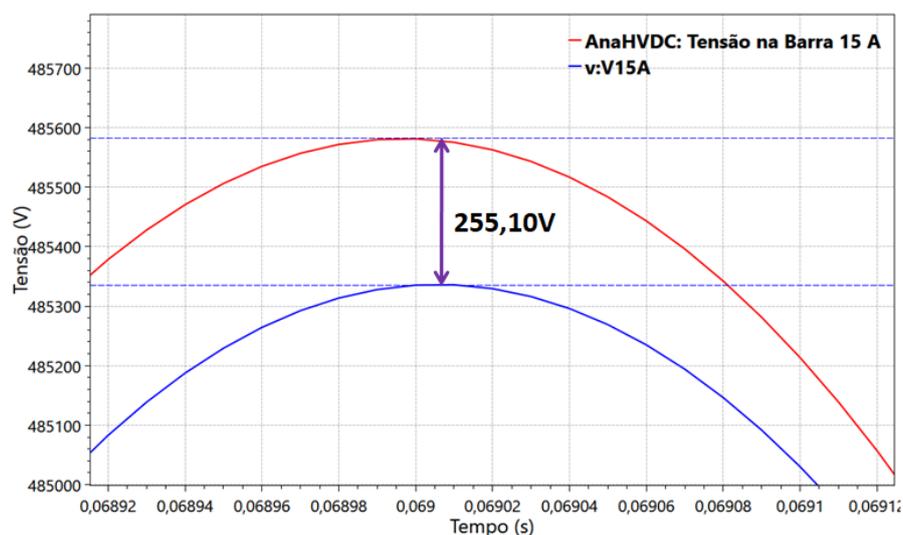


Figura 38 – Tensão em V15- fase A (ampliação para detecção do erro absoluto de tensão)

Nota-se pelos valores da Tabela 4 que no regime permanente o pico de tensão ocorre com diferença de um passo de integração.

Tabela 4 – Pico de tensão e erro percentual AnaHVDC *versus* ATP

AnaHVDC		ATP		Erro		
t(s)	Tensão (V)	t(s)	Tensão (V)	Absoluto	Percentual	dt
0,06900	485591	0,06901	485335,9	255,10	0,0526%	1E-05

Para se calcular a diferença angular, verifica-se a diferença no tempo tomando por base o cruzamento pelo zero. Esse cruzamento por zero, por sua vez, é calculado por interpolação linear entre dois passos subsequentes, com valores indicados na Tabela 5. A diferença de tempo no cruzamento por zero é de 9,031894 μ s, que corresponde a um ângulo de 0,19508892 graus (na frequência de 60Hz) e um fator de 0,9031894 em relação ao passo de integração adotado (10 μ s).

Isso ratifica que o valor ideal para compensação de erro, nesse caso, não é múltiplo do passo de integração. Ou seja, mesmo em regime permanente há uma dificuldade, ainda que reduzida quando comparada com o transitório, em zerar o erro.

Tabela 5 – Cruzamento por zero AnaHVDC *versus* ATP

AnaHVDC		ATP	
t(s)	Tensão (V)	t(s)	Tensão (V)
0,06483	-6,3504	0,06483	-1658,8900
0,06483	0	0,06484	0
0,06484	1824,2470	0,06484	170,7844
delta (s)	$9,032 \times 10^{-6}$		
ângulo (°)	0,1951		

Logo, para o regime permanente esse erro observado é constante e poderia ser estabelecido um critério quantitativo para que tal erro seja considerado aceitável. Isso significa que para variáveis visualmente coincidentes apresentam uma amplitude de erro percentualmente baixa, que nem chegam a serem visualizados quando inseridos na escala da variável medida.

Contudo, não basta a análise do erro em regime permanente. A seguir se observa a análise do erro no período transitório.

- Análise do erro no período transitório

Inicialmente para apresentar o erro calculado no período transitório optou-se por ampliar na faixa de visualização no intervalo $t = [0,24; 0,27]$ com as variáveis medidas (Figura 39) e somente com o erro (Figura 40).

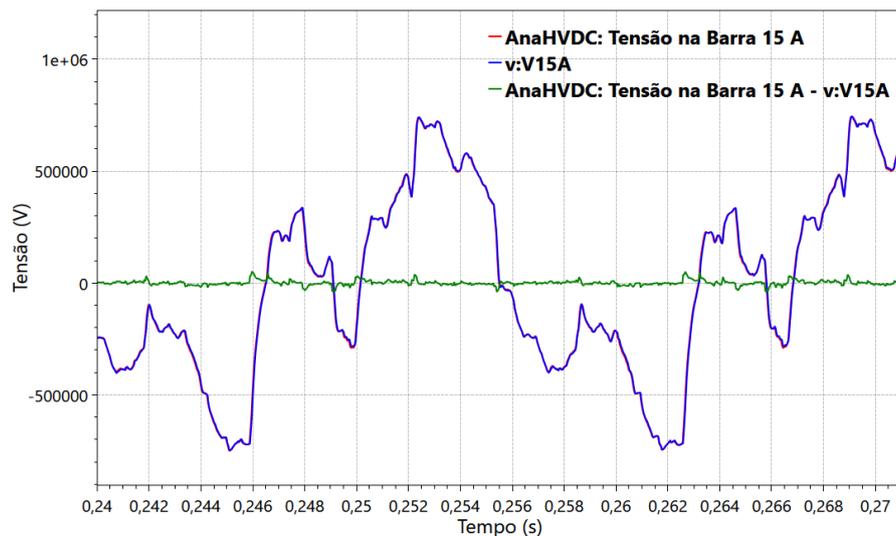


Figura 39 – Tensão em V15- fase A (transitório)

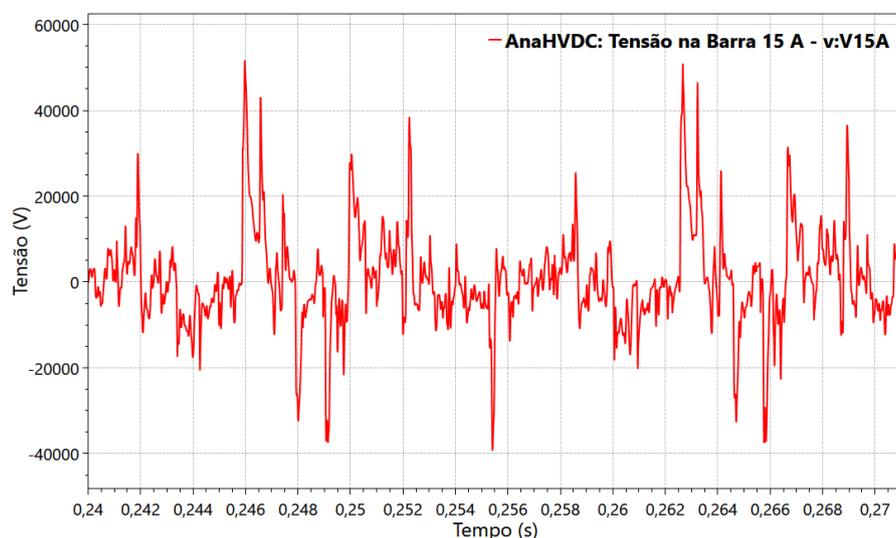


Figura 40 – Erro de tensão em V15- fase A (transitório)

À primeira vista o erro calculado não parece ter maiores problemas, mas verificando os picos desses valores percebe-se que o erro representa uma proporção relativamente considerável em relação aos picos da variável medida. Esse fato vai de encontro à percepção de que uma curva visualmente coincidente implica em percentuais reduzidos de erros relativos.

Assim, buscou-se compreender melhor a natureza dessa discrepância. Para isso, ampliou-se mais ainda a visualização reduzindo o intervalo de tempo, conforme destacado na Figura 41. Então, observa-se o eixo vertical destacado apresenta um erro de mais de 50kV (Figura 42). Pelas curvas, nota-se claramente que há um defasamento entre ATP e AnaHVDC e que devido ao trecho em consideração ser bem íngreme acaba resultando nesse cálculo de erro distorcido.

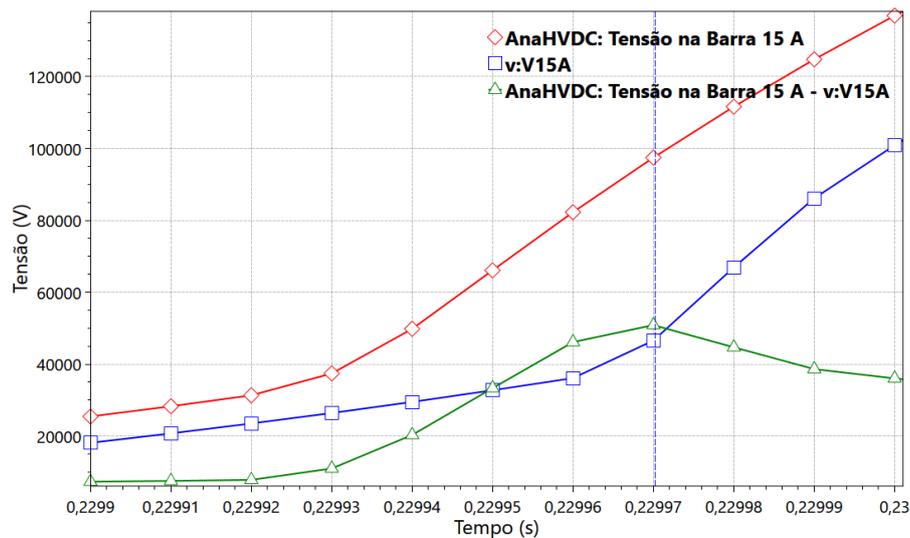


Figura 41 – Erro de tensão em V15- fase A (ampliação de visualização no transitório)

Interseções	
AnaHVDC: Tensão na Barra 15 A ::	97467,991026
v:V15A ::	46581,207031
AnaHVDC: Tensão na Barra 15 A - v:V15A ::	50886,783995

Figura 42 – Interseção para detecção da tensão

Buscando mitigar ou solucionar esse impacto explorou-se um deslocamento da medição de uma das variáveis. Esse item será discutido de forma mais detalhada na próxima subseção.

3.5.1.2 Proposta de ajuste do cálculo do erro: deslocamento temporal da medição

Entendendo que o erro calculado se apresenta de forma amplificada devido a um defasamento no tempo, propôs-se corrigir artificialmente esse defasamento a fim de verificar que impacto isso traria aos novos cálculos de erros. Do ponto de vista analítico o subscrito representa o número de atrasos em função do número de passos de integração. O subscrito r representa, teoricamente, o erro real que seria obtido em relação da curva de referência e, que não necessariamente é múltiplo do passo de integração, podendo estar atrasado ou adiantado em relação à curva de referência. Essa constatação leva a conclusão de que o erro tal como é calculado é, em geral, uma aproximação do erro teórico.

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_0(t) &= v_1(t) - v_2(t) \\
 \varepsilon_1(t) &= v_1(t) - v_2(t - 1 \times dt) \\
 \varepsilon_2(t) &= v_1(t) - v_2(t - 2 \times dt) \\
 \varepsilon_r(t) &= v_1(t) - v_2(t \pm k \times dt)
 \end{aligned}
 \tag{297}$$

Uma possível solução seria o cálculo do gradiente a cada intervalo de tempo. Contudo, essa implementação se mostra de árdua incorporação (a cada passo deveria ser identificado esse erro excursionando eventualmente em vários passos e precisando interpolar quando o defasamento calculado não for múltiplo do passo de integração), podendo levar a uma elevação significativa do tempo de processamento, e benefício limitado.

Outra conclusão acerca dessa proposta é que no transitório esse defasamento não é constante. Tomando como exemplo os casos extremos, o erro sem defasamento (err0) começa com maior amplitude e vai decaindo e o erro com maior defasamento (err3) começa com menor amplitude e vai se amplificando, conforme pode ser visualizado na Figura 43. A Figura 44 mostra essa visualização no início do transitório e a Figura 45 no final do transitório.

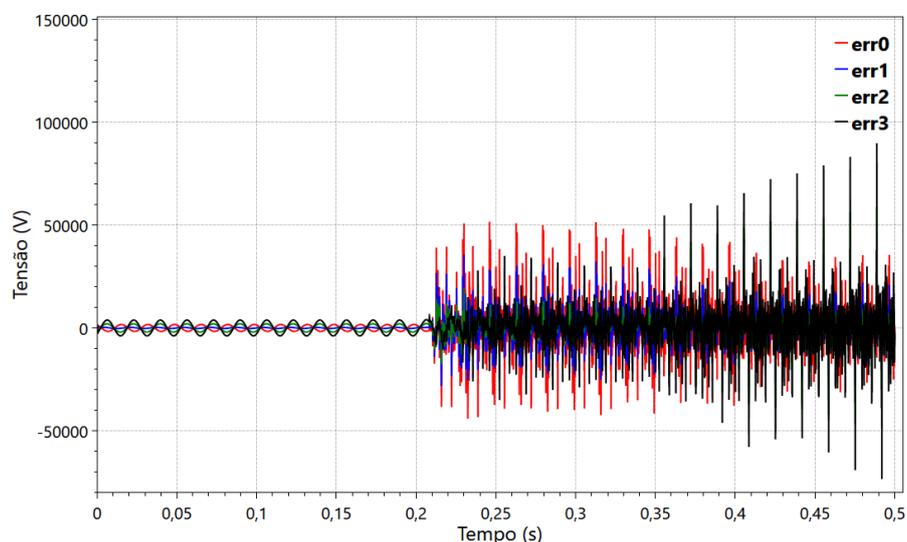


Figura 43 – Erro calculado com diferentes deslocamentos de curvas

Para corroborar esse entendimento são destacados trechos no início do transitório (Figura 44) e no final (Figura 45). Verifica-se graficamente que no início do transitório a variável sem atraso apresenta maior amplitude de erro e no final a maior amplitude de erro ocorre na variável defasada em três passos de integração.

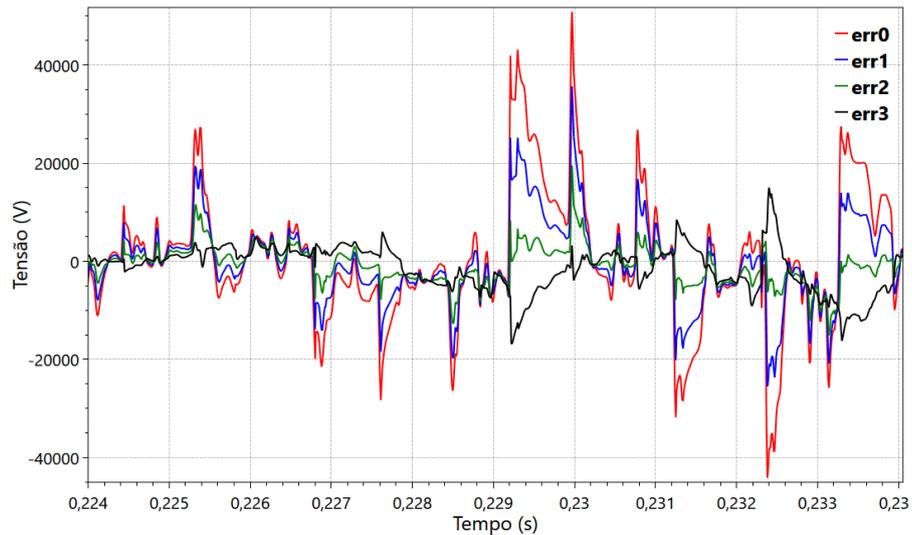


Figura 44 – Erro calculado com diferentes deslocamentos de curvas (ampliação de visualização no início do transitório)

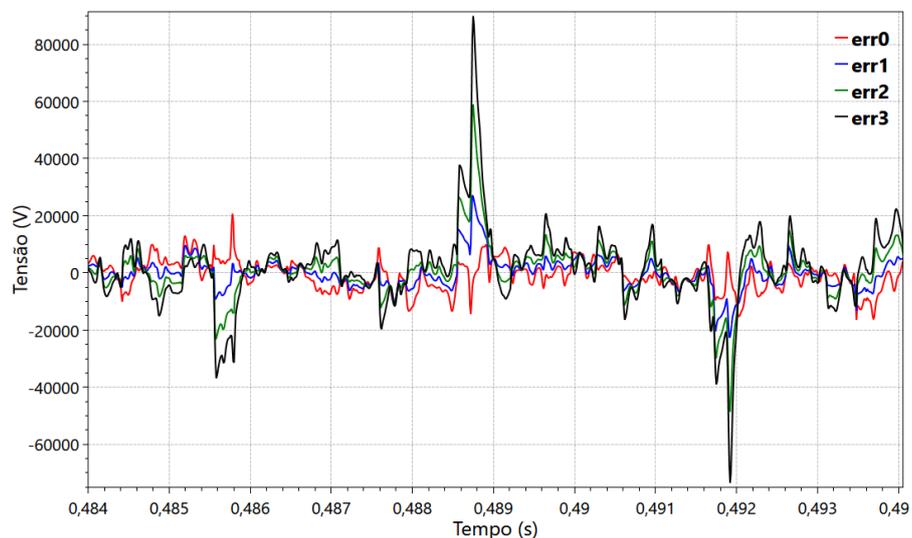


Figura 45 – Erro calculado com diferentes deslocamentos de curvas (ampliação de visualização no final do transitório)

No regime permanente, como era esperado, o erro é periódico (Figura 46) para cada deslocamento considerado. Note que o erro devido ao atraso de um passo é bem menor em amplitude e em contrafase que o erro sem considerar atraso. Isso indica que o erro real está situado nesse intervalo. E de fato está, uma vez que o deslocamento tem um fator de 0,9031894 em relação ao passo de integração adotado (10 μ s).

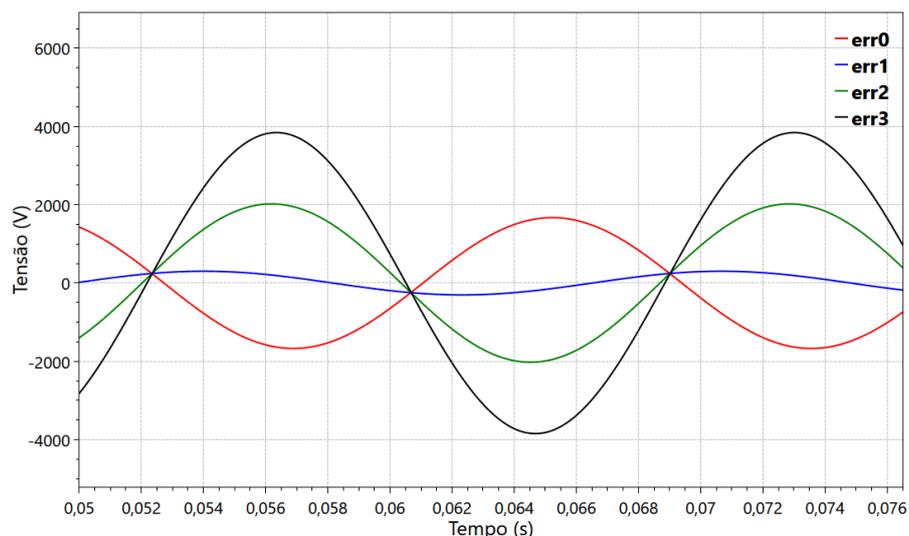


Figura 46 – Erro calculado com diferentes deslocamentos de curvas (ampliação de visualização no regime permanente)

3.5.1.3 A questão do defasamento: uma análise em regime permanente

Retornando ao dilema do defasamento em regime permanente, são apresentadas conclusões adicionais a partir da exploração de um caso teórico de curvas com defasamento angular (Figura 47). Dessa forma foram inseridas duas cossenoides de amplitude 1 e velocidade angular 1rad/s, conforme Figura 47. O passo de integração adotado foi de 0,1s. Então, inicialmente se calcula quantos graus corresponde a um passo de integração.

Sendo a velocidade angular dada por $\omega = 2\pi f$ e o período dado por $T = 1/f$, tem-se que:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{1} \quad (298)$$

$$T = 2\pi \quad (299)$$

Assim, um passo de integração (discretização adotada) corresponde em graus.

$$ang = 360 \frac{\Delta t}{T} = 360 \frac{0,1}{2\pi} \quad (300)$$

$$ang = 5,72958^\circ \quad (301)$$

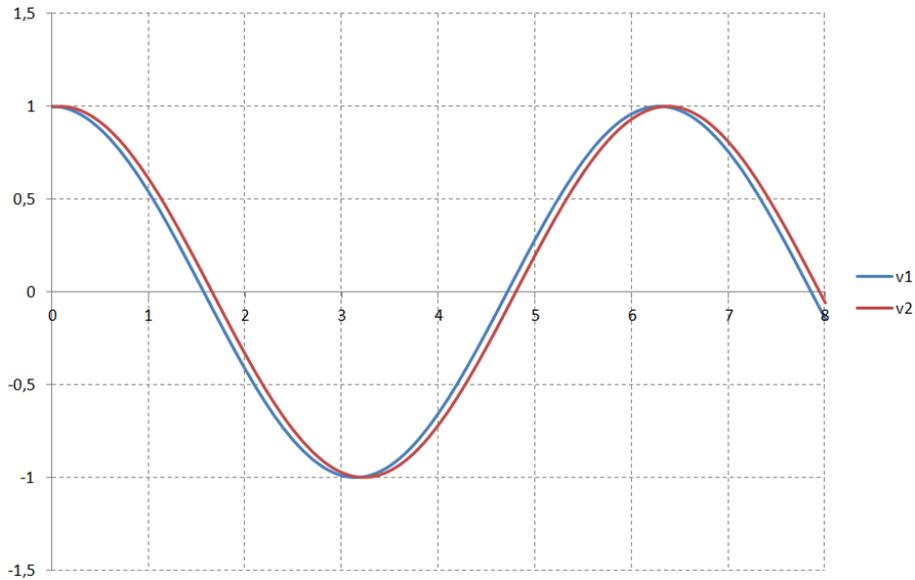


Figura 47 – Caso teórico: Curvas com defasagem angular

Isso significa que cada passo de integração corresponde a um avanço de $5,72958^\circ$ da onda. Para entendimento das consequências, são avaliados três cenários:

- Cenário 1: com defasagem da onda menor que a discretização, ou seja: defasagem $< 5,72958^\circ$ (Figura 48)

Note que para esse cenário, o erro zero se situa em uma distância inferior a um passo de integração. Esse erro é calculado mantendo-se a referência vertical na curva v_1 e excursionando no tempo até que o delta entre v_1 e v_2 seja zero ou o mais próximo disso. Assim, na prática é como se calculasse o desvio em instantes de tempos distintos.

$$desv(t) = v_1(t) - v_2(t - k\Delta t), k \in \mathfrak{R} \tag{302}$$

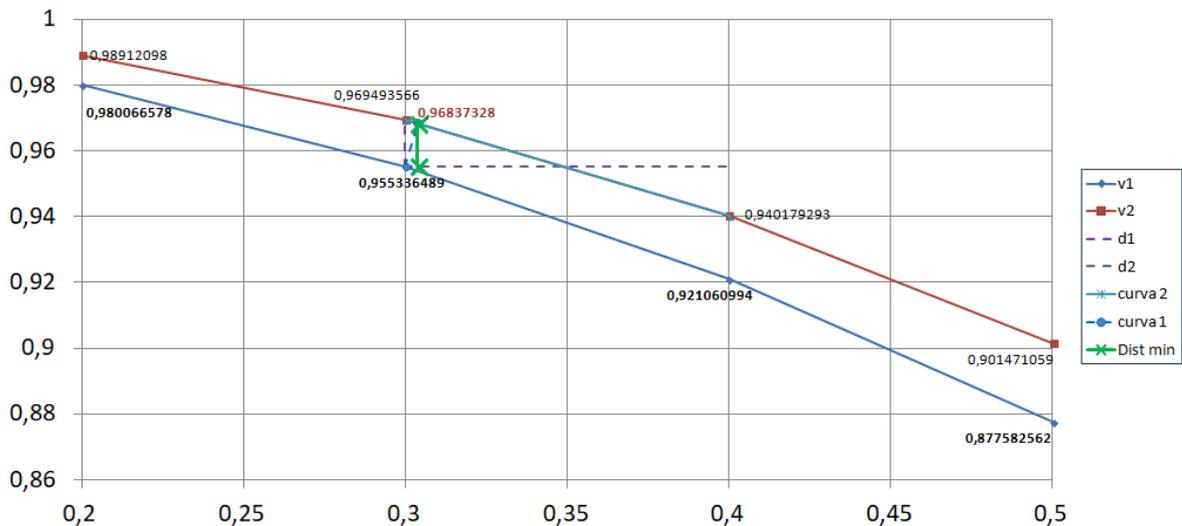


Figura 48 – Cenário com defasagem $< 5,72958^\circ$

- Cenário 2: com defasamento da onda igual ao da discretização:
defasamento = 5,72958 (Figura 49)

Para esse cenário, o erro zero se situa exatamente a um passo de integração. Esse erro é calculado mantendo-se a referência vertical na curva v_1 e excursionando no tempo até que a delta entre v_1 e v_2 sejam zero ou o mais próximo disso. Nessa situação, tem-se:

$$desv(t) = v_1(t) - v_2(t - \Delta t) \quad (303)$$

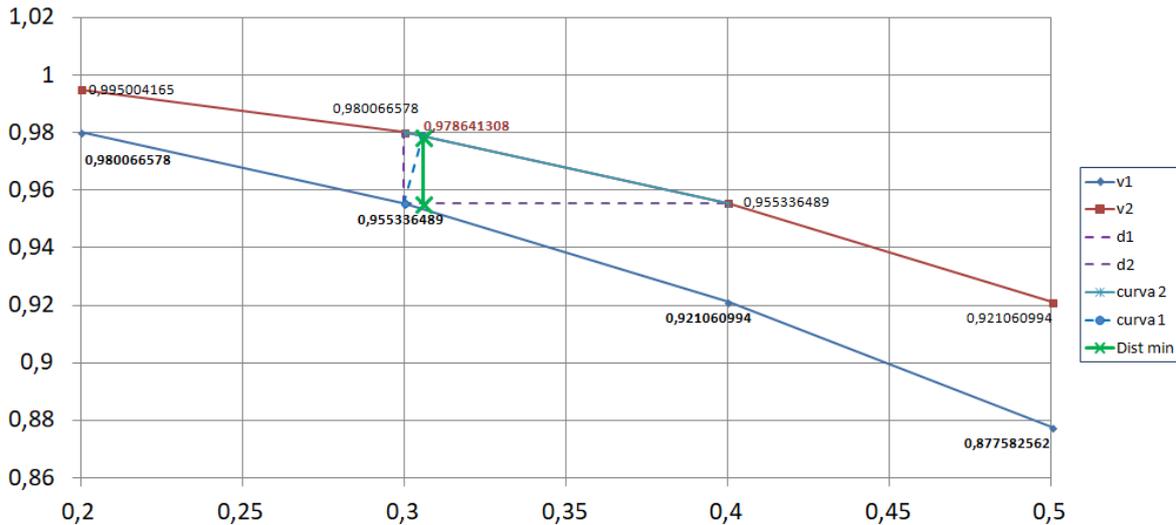


Figura 49 – Cenário com defasamento = 5,72958°

- Cenário 3: com defasamento da onda maior que a discretização, ou seja:
defasamento > 5,72958° (Figura 50)

Para esse cenário, o erro zero se situa em uma distância superior a um passo de integração. Esse erro é calculado mantendo-se a referência vertical na curva v_1 e excursionando no tempo até que a delta entre v_1 e v_2 sejam zero ou o mais próximo disso. Nessa situação, tem-se:

$$desv(t) = v_1(t) - v_2(t - k\Delta t), k \in \mathfrak{R} \quad (304)$$

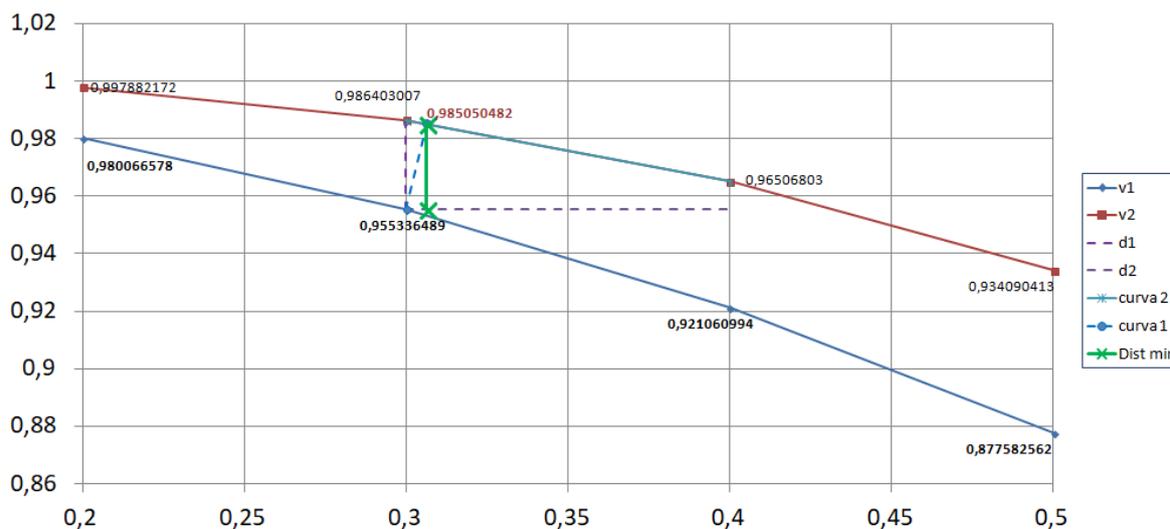


Figura 50 – Cenário com defasamento $> 5,72958^\circ$

Portanto, se conclui que considerando que a única diferença seja o defasamento entre as curvas para se zerar o erro é necessário identificar numericamente o valor do defasamento, manter uma curva de referência e corrigir na curva remanescente. No entanto, nas análises práticas geralmente além da defasagem ainda haveria distorção em relação aos picos. E de forma mais geral, no transitório essa defasagem pode não ser constante. Além disso, exigiria um novo conjunto de variáveis interpoladas sempre que o defasamento não fosse múltiplo inteiro do passo de integração.

Toda essa análise tem a premissa de que há um desfasamento que deve ser compensado. Há, no entanto, desfasamentos que podem ser oriundos de erro de modelagem ou erro de inserção de dados. Um exemplo disso seria erro na entrada de dados da linha de transmissão, no qual as ondas propagadas em diferentes ferramentas passariam a ter um defasamento amplificado. Assim, uma compensação automática pode resolver um defasamento artificial, porém, por outro lado pode mascarar um defasamento real.

Contudo, poder-se-ia então propor uma generalização do método, conforme algoritmo simplificado abaixo:

- Manter uma curva como referência.
- A cada cruzamento por zero, identificar o deslocamento no tempo;
- Explicitar o deslocamento em função do passo de integração atual;
- Fazer o cálculo do desvio no tempo atual $desv(t) = v_1(t) - v_2(t \pm k\Delta t)$, $k \in \mathfrak{R}$;
- Avançar $t = t + \Delta t$.

No entanto, em situações limítrofes, por exemplo, em um caso que a defasagem varie dentro de um semiciclo de onda, poderia gerar o efeito colateral de acoplar as variáveis de um lado e desacoplar do outro.

3.5.1.4 Proposta de métrica de análise de erro: comparação dos mínimos e máximos locais

Outra proposta para estabelecimento de uma métrica de avaliação consiste em comparar os extremos locais (mínimos e máximos). O que se pretende com essa abordagem é não precisar da identificação, cálculo e correção da defasagem. Assim, bastaria compor um vetor com os valores mínimos e máximos locais e compará-los em ambos os resultados, estando a variável do tempo implícita e se preocupando com a diferença mais significativa que é a deslocamento vertical. A Figura 51 identifica, de forma ilustrativa, um ponto de máximo e de mínimo.

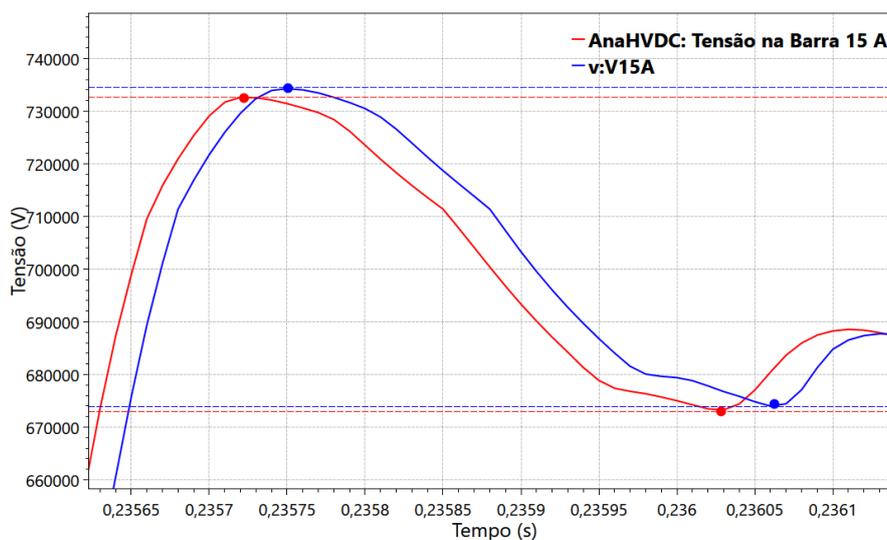


Figura 51 – Extremos locais na barra 15, fase A

No entanto, os números de extremos locais nos dois arquivos não foram coincidentes. Entendeu-se e verificou-se, posteriormente, que foram criados extremos locais “artificiais”, novamente trazendo um elemento agravante para as análises. A Tabela 6 apresenta o número de extremos locais identificados em ambos os programas em toda a janela de simulação.

Tabela 6 – Número de extremos locais nas simulações

Programa	V15A		V15B		V15C	
	min	max	min	max	min	max
AnaHVDC	731	731	791	791	718	718
ATP	809	809	904	905	775	775

A Figura 52 ilustra o caso de existência de extremos locais adicionais. Note que em $t = 0,47997$ há um mínimo local na medição do ATP que não existe no AnaHVDC. Novamente aqui, essa característica insere um agravante na análise. Em termos teóricos, uma possível solução ou mitigação seria a exclusão desses mínimos artificiais no ATP ou, de forma inversa, a inclusão no AnaHVDC. No entanto, seria preciso modelar um mecanismo que evitasse a sobreposição de pontos ou a sua inclusão de maneira incorreta. Solução mais simples, poderia se concentrar em não mais assumir todos os extremos locais, mas um subconjunto desses extremos.

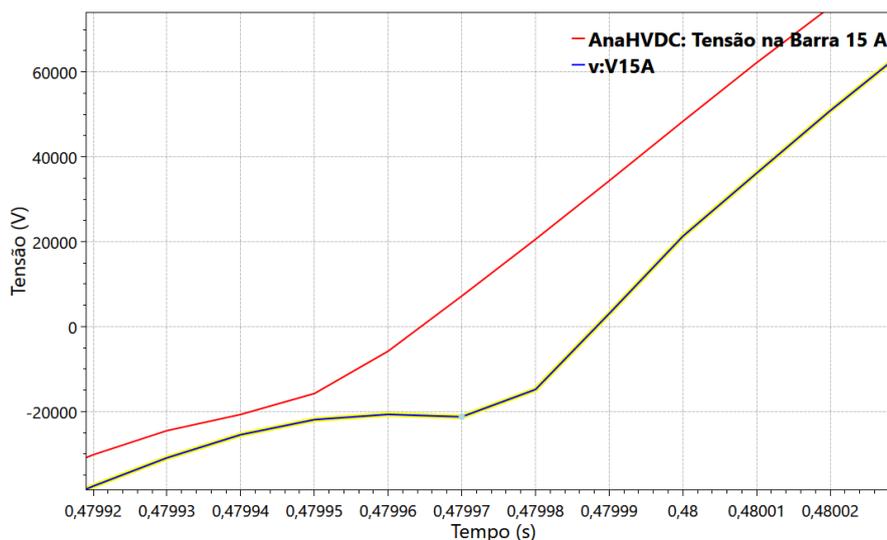


Figura 52 – Visualização de mínimo local não correspondente

Uma forma de procurar atenuar esse efeito consiste em subdividir em intervalos menores e calcular o maior e menor dos extremos locais para aquele intervalo específico. No entanto, em termos práticos nem sempre são encontrados esses extremos de forma correspondente. Logo, há necessidade de se avaliar posteriormente a consistência dos resultados.

A proposta então consiste em uma discretização adequada do intervalo que pode ser determinada de forma empírica, assumindo um determinado valor inicial e testando fatias maiores ou menores a partir dessa escolha. Pode ser que a melhor discretização

não consiga eliminar todos os desacoplamentos. Nessa situação as variáveis desacopladas poderão ser, por exemplo, descartadas da análise.

A Tabela 7 resume os resultados dos mínimos e máximos por determinada faixa de visualização. Na cor destacada em vermelho estão os resultados que não são compatíveis em relação ao tempo no qual os extremos ocorreram. Foram considerados incompatíveis os tempos que estavam afastados mais de cinco passos de integração.

Tabela 7 – Mínimos e máximos por faixa de visualização

Caso	Tempo		ATP		AnaHVDC		Erro relativo		ATP		AnaHVDC		Diferença		
	t _{ini}	t _{fim}	vmin	vmax	vmin	vmax	vmin	vmax	tmin	tmax	tmin	tmax	Δtmin	Δtmax	
-	0	0	0,5	-781606	761702,2	-780798	760511,8	0,1034%	0,1563%	0,24947	0,26495	0,2495	0,49714	-3E-05	-0,23219
Regime Permanente	1	0	0,2	-486285	485581,6	-486054	485336,5	0,0475%	0,0505%	0,19957	0,05233	0,19957	0,06345	0	-0,01112
	2	0	0,1	-485582	485581,6	-485337	485336,5	0,0505%	0,0505%	0,02733	0,05233	0,03845	0,06345	-0,01112	-0,01112
	3	0	0,05	-485582	485581,6	-485337	485336,5	0,0505%	0,0505%	0,02733	0,00233	0,03845	0,02456	-0,01112	-0,02223
	4	0,1	0,2	-486285	485581,6	-486054	485336,5	0,0475%	0,0505%	0,19957	0,10233	0,19957	0,11345	0	-0,01112
	5	0,1	0,15	-485582	485581,6	-485337	485336,5	0,0505%	0,0505%	0,12733	0,10233	0,13845	0,11345	-0,01112	-0,01112
Transitório	6	0,2	0,5	-781606	761702,2	-780798	760511,8	0,1034%	0,1563%	0,24947	0,26495	0,2495	0,49714	-3E-05	-0,23219
	7	0,2	0,3	-781606	761702,2	-780798	760092,6	0,1034%	0,2113%	0,24947	0,26495	0,2495	0,26497	-3E-05	-2E-05
	8	0,2	0,25	-781606	761346,6	-780798	759933,1	0,1034%	0,1857%	0,24947	0,24827	0,2495	0,24829	-3E-05	-2E-05
	9	0,3	0,4	-777370	760649,4	-776205	758997,6	0,1498%	0,2172%	0,31614	0,31502	0,31617	0,31504	-3E-05	-2E-05
	10	0,3	0,35	-777370	760649,4	-776205	758997,6	0,1498%	0,2172%	0,31614	0,31502	0,31617	0,31504	-3E-05	-2E-05
	11	0,4	0,5	-771001	761281,2	-769712	760511,8	0,1672%	0,1011%	0,4162	0,49714	0,41622	0,49714	-2E-05	0
	12	0,4	0,45	-771001	757987	-769712	757697,1	0,1672%	0,0382%	0,4162	0,44715	0,41622	0,44715	-2E-05	0

3.5.1.5 Proposta de métrica de análise de erro: erro relativo na integral média quadrática da curva

Buscando ainda determinar uma métrica de análise de erro, foi proposto calcular o erro obtido a partir da integral média quadrática da diferença de tensão das curvas dividido pela base de tensão. Cabe ressaltar que apesar do cálculo ter sido realizado na variável de tensão, poderia ser aplicado em quaisquer outras grandezas (corrente, energia, potência etc.). Assim, tem-se para o caso da tensão:

$$\Delta v_{rms} = \sqrt{\frac{1}{(T_2 - T_1)} \left(\int_{T_1}^{T_2} [v_2(t) - v_1(t)]^2 dt \right)} \quad (305)$$

O erro relativo assume então a seguinte relação:

$$err_{rel}(\%) = \frac{\Delta v_{rms}}{V_{base}} \quad (306)$$

Sendo V_{base} assumindo o seguinte valor:

$$V_{base} = \sqrt{\frac{2}{3}} \times 500kV = 408,24kV \quad (307)$$

Assumir a métrica apresentada evita-se dificuldades que ocorreriam caso fossem apenas integradas as curvas, ou ainda, realizada a média quadrática de cada uma das curvas isoladamente. Entre as limitações práticas do cálculo da integral se destacam: possível compensação do erro calculado entre duas curvas; valor zero da integral; amplificação do erro nas curvas que apresentam defasamento.

Com o objetivo de apresentar os resultados dessa abordagem será utilizado o caso prático energLT, que consiste na energização de LT em um sistema radial, composto de gerador, impedância, transformador e linha de transmissão (sem considerar o para-raios e considerando o para-raios).

3.5.1.6 Erro relativo na integral média quadrática: caso energLT

O cálculo do erro relativo na integral média quadrática foi aplicado nos casos energLT (a Figura 53 mostra o digrama unifilar desse caso no ATPDraw) e suas variações. O objetivo foi averiguar o impacto dessas variações no erro calculado. Assim, foram avaliadas quatro situações detalhadas na sequência e modelado em três programas: AnaHVDC, ATP e PSCAD.

- **Caso com LT (original)** – Caso com LT sem a inclusão do elemento para-raios;
- **Caso sem LT** – Caso simplificado em que a LT foi substituída por um elemento RL;
- **Caso com LT e para-raios** – Caso com LT e elemento para-raios modelado;
- **Caso com LT e para-raios com ajuste do primeiro ponto da curva** – Caso com LT e elemento para-raios modelado com compatibilização do primeiro ponto nos programas ATP e PSCAD para ficarem compatíveis com o AnaHVDC.

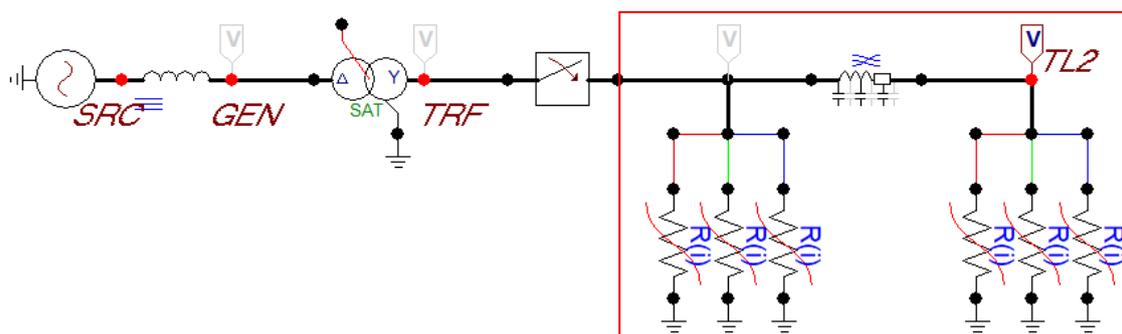


Figura 53 – Caso energLT.acp

A Tabela 8 resume os resultados obtidos a partir dos casos descritos. O caso em que a linha foi substituída por um ramo RL apresentou o menor erro. A inclusão do modelo de LT teve como consequência o aumento do erro calculado. Na sequência, considera-se a inclusão do elemento para-raios. E por fim, faz-se uma adaptação do primeiro ponto da curva do para-raios para ficar compatível com o AnaHVDC. Essa compatibilização faz aumentar o erro calculado na fase A, porém apresenta erros menores nas fases remanescentes B e C.

Apesar da diferença numérica do erro observada nos casos apresentados e suas variações, todos são visualmente coincidentes. Isto é, para que a diferença entre as curvas consiga ser visualizada faz-se necessário ampliar sobremaneira a faixa de visualização.

Tabela 8 – Erro no caso energLT.acp e suas variações

Descrição do caso: energLT	FASE	Erro percentual (%)		
		AnaHVDC x ATP	AnaHVDC x PSCAD	ATP x PSCAD
<i>Substituindo a LT por RL</i>	A	$2,73 \times 10^{-4}$	$2,72 \times 10^{-4}$	$2,00 \times 10^{-5}$
	B	$2,71 \times 10^{-4}$	$2,71 \times 10^{-4}$	$1,80 \times 10^{-5}$
	C	$2,74 \times 10^{-4}$	$2,72 \times 10^{-4}$	$2,00 \times 10^{-5}$
<i>Com LT e sem para-raios</i>	A	$2,20 \times 10^{-2}$	$5,52 \times 10^{-2}$	$4,77 \times 10^{-2}$
	B	$2,67 \times 10^{-2}$	$5,47 \times 10^{-2}$	$4,68 \times 10^{-2}$
	C	$2,26 \times 10^{-2}$	$5,37 \times 10^{-2}$	$4,79 \times 10^{-2}$
<i>Com LT e com para-raios</i>	A	$4,71 \times 10^{-2}$	$6,17 \times 10^{-2}$	$4,49 \times 10^{-2}$
	B	$5,04 \times 10^{-2}$	$6,55 \times 10^{-2}$	$4,61 \times 10^{-2}$
	C	$5,08 \times 10^{-2}$	$6,65 \times 10^{-2}$	$4,55 \times 10^{-2}$
<i>Com LT, com para-raios e interpolação do ponto (0, 0)</i>	A	$4,74 \times 10^{-2}$	$6,18 \times 10^{-2}$	$4,49 \times 10^{-2}$
	B	$5,02 \times 10^{-2}$	$6,52 \times 10^{-2}$	$4,61 \times 10^{-2}$
	C	$5,06 \times 10^{-2}$	$6,63 \times 10^{-2}$	$4,55 \times 10^{-2}$

As figuras abaixo são relativas ao caso energLT original, sem qualquer adaptação ou variação. Para uma análise mais completa foram inseridos gráficos das três ferramentas: AnaHVDC, ATP e PSCAD. Além disso, são apresentadas ampliação da faixa de visualização.

Na Figura 54 com a visualização completa as curvas aparecem sobrepostas, dentro do que pode ser classificado como visualmente coincidente. Na Figura 55 com uma ampliação dessa faixa no início do transitório ainda se observam curvas visualmente coincidentes. Só na Figura 56 com uma ampliação muito detalhada que se verifica que as curvas não são exatamente coincidentes.

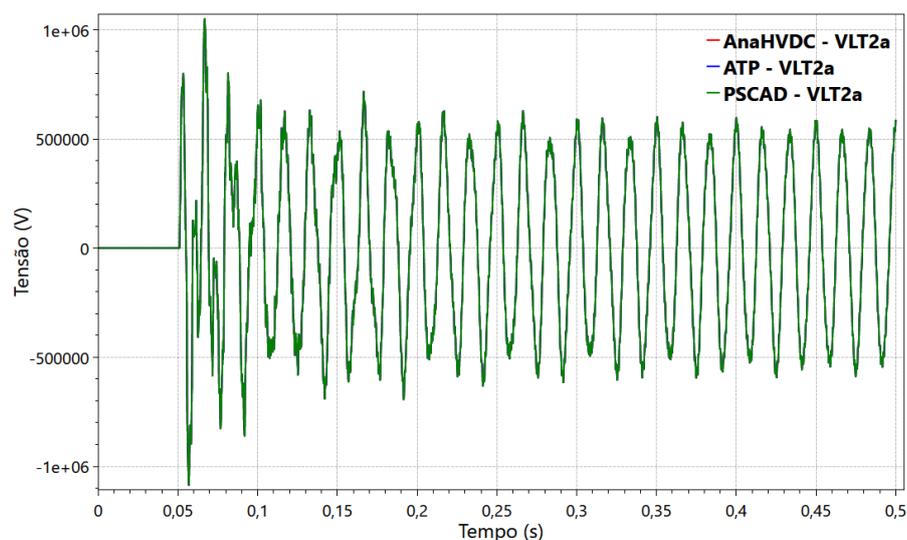


Figura 54 – Energização de LT: escala completa

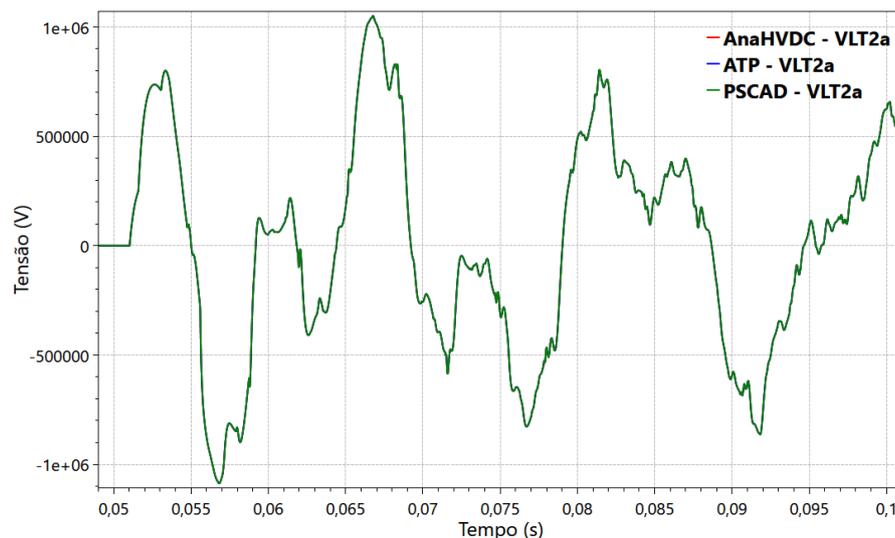


Figura 55 – Energização de LT: escala ampliada de $t=0,05$ até $t=0,1$

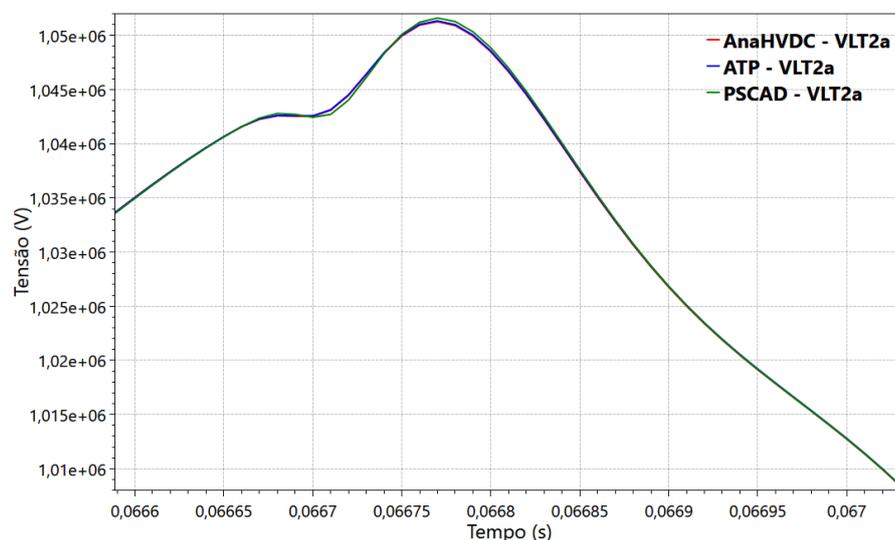


Figura 56 – Energização de LT: escala ampliada de $t=0,0666$ até $t=0,067$

Essa seção teve como objetivo explorar métricas de análise de erro com base nos resultados das simulações realizadas. Para cada métrica, foram apresentadas as suas características e limitações. Em algumas situações, os valores de erro observados eram relativamente altos, mas não eram evidentes ao se analisar apenas a sobreposição das curvas. Em outras situações, a necessidade de ajustes nas curvas ou compensações no algoritmo inviabilizavam a análise adequada.

Por fim, a métrica com resultados mais consistentes foi a de erro relativo na integral média quadrática da curva. Essa métrica se mostrou capaz de lidar com a questão do defasamento e das compensações, as quais poderiam descaracterizar o erro. Essa métrica considera o erro ao longo de toda a simulação, sendo sensível à diferença de amplitude entre as curvas. Além disso, há tendência a suavizar flutuações relacionadas a ruídos

locais. Pequenas diferenças no defasamento também são tratadas. Assim, curvas que apresentariam erros visíveis na sobreposição são vistas de forma acumulada e não apenas de forma pontual ou instantânea.

Além disso, ressalta-se que as implementações propostas para os modelos de para-raios e de magnetização são transformações do domínio do tempo para o domínio fasorial. Portanto, não há inserção de aproximações nos equacionamentos, uma vez que esses modelos são considerados equivalentes.

O caso energLT e suas variações permitiram obter, de forma empírica, uma estimativa numérica do erro. A simplificação do caso apresentou menor erro associado, e a inserção de elementos resultou em aumento do erro relativo. No entanto, o maior valor obtido para o erro relativo foi de 0,066497% para a medição de tensão, na fase C, quando foi considerando o modelo de LT e para-raios.

Assim, espera-se os modelos equivalentes produzirão curvas visualmente coincidentes, com erros de magnitude inferior a 0,5% usando a métrica de erro relativo na integral média quadrática da curva.

3.6 Análise estatística

Esta seção apresenta os principais aspectos relacionados ao modelo das chaves estatísticas. As sobretensões de manobra, uma categoria específica de sobretensões, são causadas por mudanças abruptas na configuração do sistema, sendo, portanto, classificadas como de origem interna. O estudo dessas sobretensões é crucial para a determinação de suas amplitudes e frequências, além de ter um impacto econômico significativo na especificação dos equipamentos, devido aos seus elevados valores. A amplitude e a duração desses eventos dependem de vários parâmetros do sistema, incluindo sua configuração e as condições operacionais no momento do evento. Assim, a mesma operação pode gerar diferentes níveis de sobretensão em momentos distintos, o que justifica o uso de uma abordagem probabilística no estudo das sobretensões de manobra.

A Figura 57 representa um sistema elétrico trifásico simplificado, no qual o denominado Sistema A é conectado ao Sistema B por um disjuntor trifásico, responsável pelas manobras no sistema como um todo. Assim, a representação do instante de operação do disjuntor pode ser feita de duas maneiras. A primeira opção é o modelo determinístico, que não leva em conta as incertezas. A segunda opção considera as incertezas, que podem se manifestar de duas formas: a primeira refere-se à dispersão dos polos do disjuntor, sendo modelada por uma distribuição normal; a segunda diz respeito à incerteza da fase, que é modelada por uma distribuição uniforme.

A distribuição normal modela a operação em que os três polos do disjuntor não são fechados simultaneamente, resultando na dispersão dos contatos. A dispersão, por sua vez, implica na necessidade de incluir a aleatoriedade no evento de manobra na operação do disjuntor. Os fatores envolvidos no fenômeno da dispersão são as diferenças mecânicas dos polos, o momento do ciclo do comando de operação e o arco elétrico estabelecido entre os contatos [101]. Ressalta-se que o modelo proposto não utiliza modelagem de arco elétrico, utilizando a modelagem de chaves por resistências presente nos programas EMT.

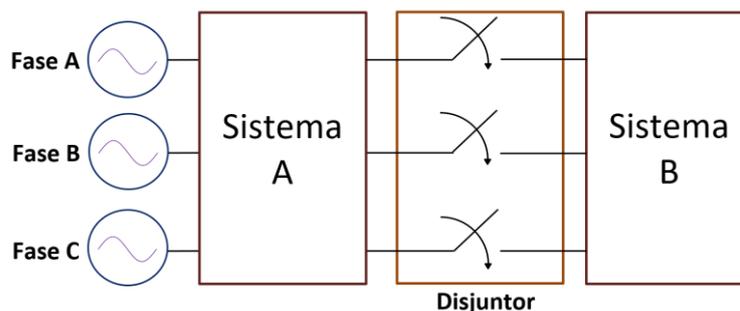


Figura 57 – Ilustração de operação de um disjuntor em sistema trifásico. Adaptado de [2]

A Figura 58 mostra um exemplo de manobra, considerando um sistema trifásico. Se não houvesse o fenômeno da dispersão dos polos, todas as chaves teriam os mesmos instantes de operação configurados em $t_a = t_b = t_c = t_m$, sendo (t_a , t_b e t_c os tempos de operação da chave nas fases A, B e C, respectivamente e t_m o instante de operação sem considerar nenhuma dispersão). No entanto, a dispersão indica que cada operação poderá ocorrer em instantes distintos. Em [2] é sugerido ainda que a dispersão máxima esteja dentro de um limite, entre o maior e menor tempo, de $5ms$ ($t_c - t_a < 5ms$).

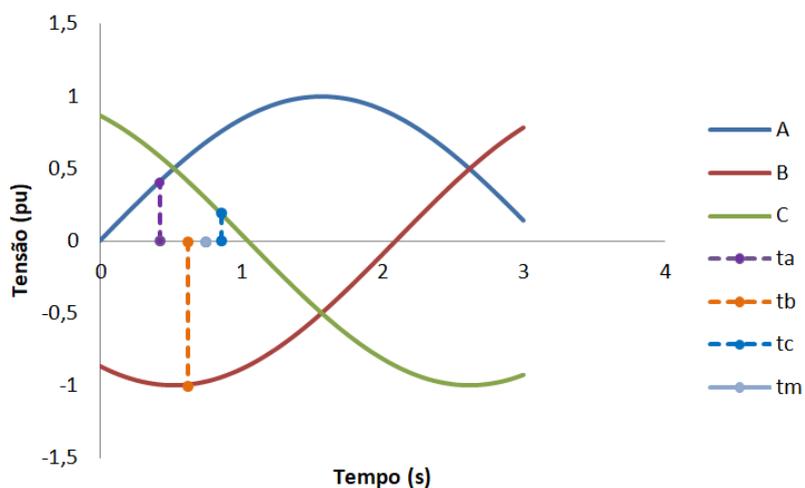


Figura 58 - Dispersão dos polos do disjuntor no circuito trifásico. Adaptado de [2]

O efeito da dispersão dos polos de um disjuntor é modelado usando uma distribuição normal. O efeito da variação do ângulo de fase, por sua vez, é modelado por uma distribuição uniforme. Havendo sorteio uniforme esse representa um deslocamento de mesmo valor Δt para todas as chaves simultaneamente. A Figura 59, Figura 60 e Figura 61

indicam ilustrativamente como ficariam esse deslocamento, com a distribuição normal acrescida da distribuição uniforme, para cada uma das fases A, B e C, respectivamente.

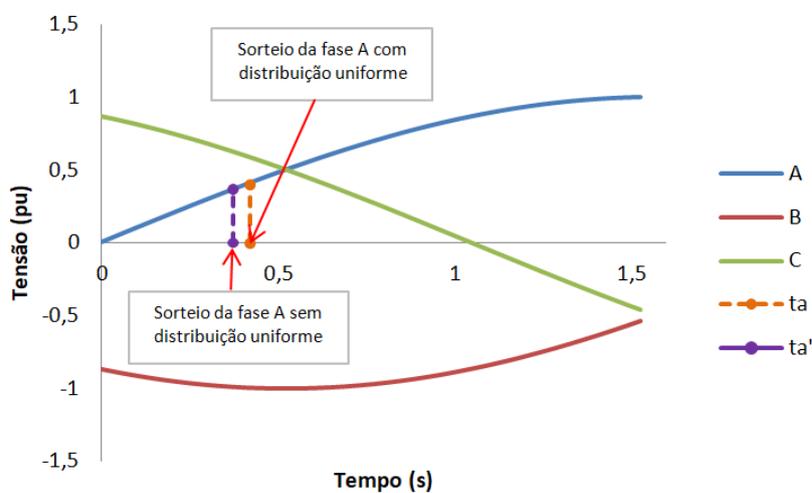


Figura 59 - Sorteio da fase A sem e com distribuição uniforme

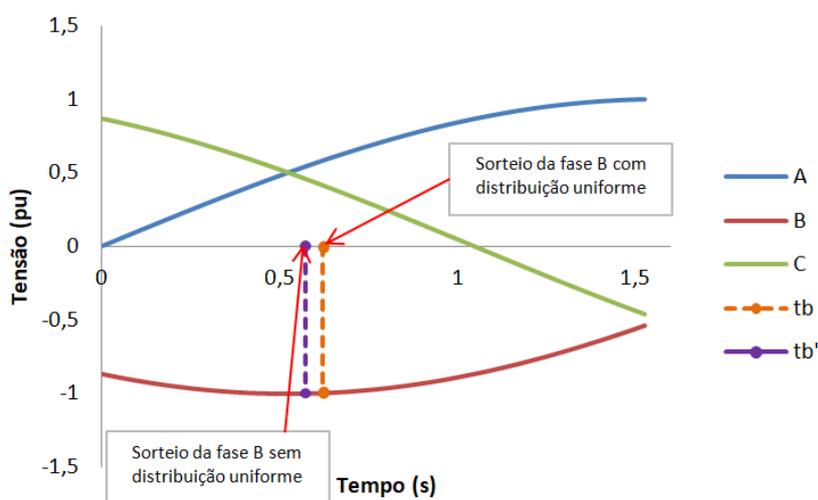


Figura 60 - Sorteio da fase B sem e com distribuição uniforme

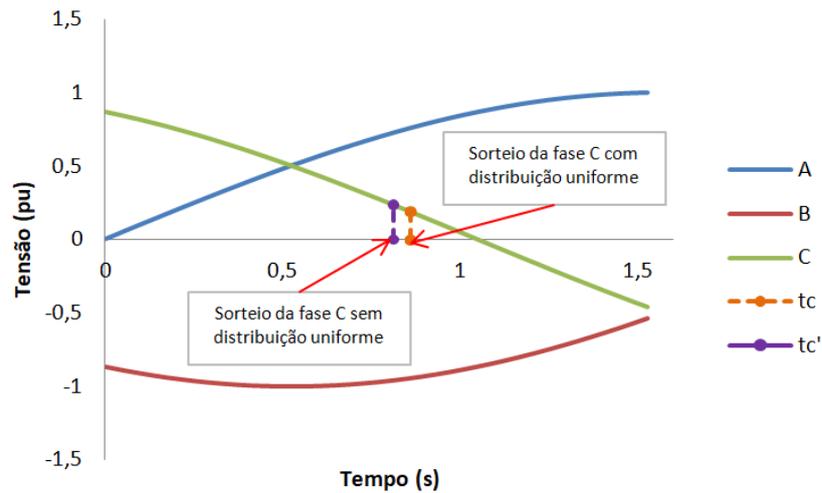


Figura 61 - Sorteio da fase C sem e com distribuição uniforme

Então, para cada simulação, tem-se que a cada disjuntor trifásico podem ser realizados quatro sorteios: um sorteio igual com distribuição de probabilidade uniforme para todas as fases; três sorteios, um para cada fase, com distribuição de probabilidade normal, conforme ilustrado na Figura 62.

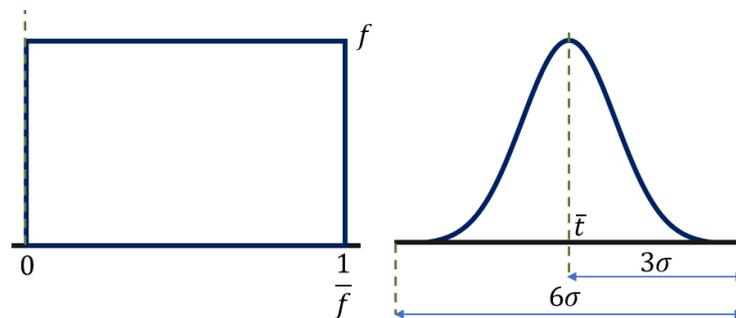


Figura 62 – Densidade de distribuições para as chaves estatísticas: uniforme e normal

Analicamente, os tempos de cada uma das chaves, para a situação geral, são dados por (308):

$$t_a = t_m + \Delta t_{uniforme} + \Delta t_{normal_a}$$

$$t_b = t_m + \Delta t_{uniforme} + \Delta t_{normal_b} \quad (308)$$

$$t_c = t_m + \Delta t_{uniforme} + \Delta t_{normal_c}$$

Onde: t_m é o valor médio da distribuição; $\Delta t_{uniforme}$ é o sorteio de distribuição uniforme, entre o valor mínimo do ângulo de fase (DEGMIN) e o valor máximo do ângulo de fase (DEGMAX) e; Δt_{normal} é o sorteio de distribuição normal, para uma dada média (t_m) e um dado desvio-padrão (σ). O gerador de números aleatórios utilizado tanto para a distribuição de probabilidades normal como uniforme são da biblioteca padrão do C++ [102] e [103].

Uma vez indicados os códigos de execução, a simulação pode ser executada. Assim, são três os tipos de arquivos de saída da análise estatística no AnaHVDC:

- Result.csv: arquivo que contém por cada simulação quais foram o valor máximo, qual o tempo em que esse máximo ocorreu e em qual variável. Exemplificado na Figura 63.
- Simulation.csv: arquivo que contém por cada simulação o tempo do sorteio por cada chave, o tipo de evento, e ainda separados os tempos da distribuição gaussiana e da distribuição uniforme. Exemplificado na Figura 64.
- Report.txt: arquivo que para cada variável de interesse sintetiza as informações dos histogramas e os parâmetros estatísticos de média e desvio padrão agrupados. Exemplificado na Tabela 9.

	A	B	C
1	MAXTIME	MAXVALUE	VARIABLE
2	0.068750	1.220.447	Voltage#BUS9-A
3	0.074440	1.186.114	Voltage#BUS9-B
4	0.071740	1.150.848	Voltage#BUS9-C
5	0.067010	2.409.175	Voltage#BUS15-A
6	0.067730	2.804.691	Voltage#BUS15-B
7	0.064970	2.565.373	Voltage#BUS15-C

Figura 63 - Formatação do arquivo de saída result1.csv

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	TIME-A	TIME-B	TIME-C	EVENT	NORM-A	NORM-B	NORM-C	UNIF
2	0.063938	0.065681	0.062950	CLOSE_ST/0.050157	0.051900	0.049170	0.013780	
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								

Figura 64 - Formatação do arquivo de saída simulation1.csv

Tabela 9 - Formatação do arquivo de saída report.txt

```

=====
Report for variable: Voltage#BUS9-phase-A
Mean:                1.168837
Standard deviation:   0.038037

Statistical distribution:
Interval      Value      Frequency  Cumulative
1             1.10         0          0
2             1.15         74         74
3             1.20         87         161
4             1.25         35         196
=====
Report for variable: Voltage#BUS9-phase-B
Mean:                1.172489
Standard deviation:   0.039744

```

Cada simulação corresponde a um *thread*, gerando eventos com base em distribuições normal e uniforme para representar variações no tempo de operação dos disjuntores. Para as distribuições são utilizadas um gerador de número aleatórios com o objetivo de assegurar que cada processo use uma semente única, mas que seja reproduzível. A combinação processo-semente garante que sejam produzidos uma sequência diferente de números aleatórios.

O evento associado a operação dos disjuntores pode ser de natureza tripolar ou monopolar. A dispersão dos polos é modelada usando uma distribuição de probabilidade normal, onde os parâmetros são: média que corresponde ao tempo esperado de fechamento do disjuntor e ; desvio padrão, calculado a partir da dispersão máxima $\sigma = \frac{max_{Td}}{6}$, para distribuir a variação em torno da média. A distribuição normal padrão tem limites em $[-\infty; +\infty]$ matematicamente, porém nesse contexto é limitada no valor informado pelo usuário em sig_{max} .

A distribuição uniforme é incluída para considerar o efeito da variação do ângulo de fase, sendo obtida pela fórmula (309):

$$U(deg_{min}, deg_{max}) = deg_{min} + (deg_{max} - deg_{min}) \cdot aleatorio() \quad (309)$$

Assim, cada disjuntor vai operar considerando os tempos da distribuição normal acrescida da distribuição uniforme. Cabe ressaltar que é possível “desligar” a distribuição uniforme fazendo $deg_{max} = deg_{min}$.

Os relatórios de saída estão no formato *csv, sendo divididos em Result.csv e Simulation.csv. O arquivo report.txt, por sua vez, apresenta os valores da média, desvio padrão, frequência e frequência acumulativa dos valores obtidos em cada simulação, além de apresentar no final do arquivo o valor máximo e sua respectiva localização.

Capítulo 4 - Resultados

Esse capítulo apresentará os resultados que foram obtidos no decorrer do desenvolvimento dos modelos que são escopo deste trabalho. Além disso, em alguns resultados obtidos serão feitas considerações específicas relativas ao tipo do estudo em questão.

Considerando o ordenamento das análises realizadas, inicialmente serão apresentados os denominados casos preliminares, que são casos com a rede elétrica bem reduzida, cujo principal objetivo é avaliar as respostas do modelo e obter casos didáticos. Na sequência, será apresentado o caso denominado BenchCA, que consiste no caso duas áreas do Kundur [1] modificado [104], com nível de tensão aumentado de 230 kV para 500 kV, com linhas mais longas e composto de 14 barras. Para o BenchCA, inicialmente será realizado um esforço no intuito de obter um ponto de operação para um caso base e apresentado considerações sobre esse aspecto. Posteriormente serão analisados diversos estudos de transitórios eletromagnéticos de manobra derivados desse caso base.

Cabe ressaltar que no ponto de desenvolvimento desses primeiros resultados, ainda não se dispunha das denominadas chaves estatísticas no modelo computacional proposto. Logo, não há o sorteio prévio na busca dos piores casos, e, portanto, os resultados seguem direto com casos determinísticos.

A análise estatística será apresentada em seção própria, utilizando o sistema BenchCA, com evento de energização de linha de transmissão tanto na plataforma de referência, o ATP, como na plataforma de desenvolvimento, o AnaHVDC.

Em relação à apresentação gráfica dos resultados são consideradas as seguintes diretrizes: i) os gráficos são apresentados na ferramenta PlotCepel; ii) quando se tratar de validações primeiro serão incluídos os gráficos da ferramenta de análise (AnaHVDC) e posteriormente os gráficos da ferramenta de referência (ATP); iii) quando se tratar de evidenciar algum fenômeno poder-se-á optar por apresentar os gráficos oriundos de uma única plataforma, uma vez que a validação não estaria em evidência nesse momento.

4.1 Casos preliminares

Os primeiros casos, denominados preliminares, consistem em sistemas simplificados, em termos de rede elétrica, compostos por poucos elementos e que o principal objetivo é validar o desenvolvimento dos modelos. Ressalta-se que os casos subsequentes, dotados de maior complexidade, também se destinam a validar o modelo. Essa ordenação, portanto, busca facilitar dois aspectos principais: o aspecto didático, ao apresentar os casos de maneira progressiva, partindo dos mais simples para os mais complexos, e o aspecto metodológico, ao organizar os passos para uma validação estruturada. Em relação ao segundo aspecto, pode-se imaginar o cenário em que não houvesse casos simplificados ou reduzidos e os modelos fossem validados diretamente em sistemas de maior porte. Na ocorrência de inconsistências nos resultados, poderia ser laborioso determinar se tais inconsistências seriam oriundas de erros de modelagens, de parametrização ou de outras naturezas. Assim sendo, ter casos menores permite, em um primeiro momento, isolar as possíveis fontes de problemas ou dificuldades de análise.

Para essa primeira etapa foram simuladas a energização de linha de transmissão e energização de transformador, respectivamente.

4.1.1 Energização de linha de transmissão

A Figura 65 apresenta o diagrama unifilar do sistema exemplo denominado energLT, no programa ATP. O sistema é radial e composto de:

- Fontes trifásicas de 21kV de amplitude, 30° de ângulo de fase e frequência de 60Hz;
- Impedância indutiva no valor de $0,1\Omega$;
- Transformador de potência de 1000MVA, relação 20/500kV com ligação Δ -Y e impedância percentual de 10% repartida metade para o primário e metade para o secundário;
- Disjuntor com tempos de fechamento em $t_a = 0,050s$, $t_b = 0,052s$ e $t_c = 0,054s$;
- Linha de transmissão de parâmetros distribuídos em 500kV de 300km de distância com os seguintes parâmetros de sequência positiva e zero: $R_+ =$

$$0,0227578 \frac{\Omega}{km}, \quad R_0 = 0,198049 \frac{\Omega}{km}, \quad L_+ = 0,883978 \frac{mH}{km}, \quad L_0 = 4,22267 \frac{mH}{km},$$

$$C_+ = 0,0130245 \frac{\mu F}{km}, \quad C_0 = 0,00661356 \frac{\mu F}{km};$$

- Modelo de para-raios inserido, com curva corrente versus tensão informada na Tabela 10, em ambos os terminais da linha de transmissão.

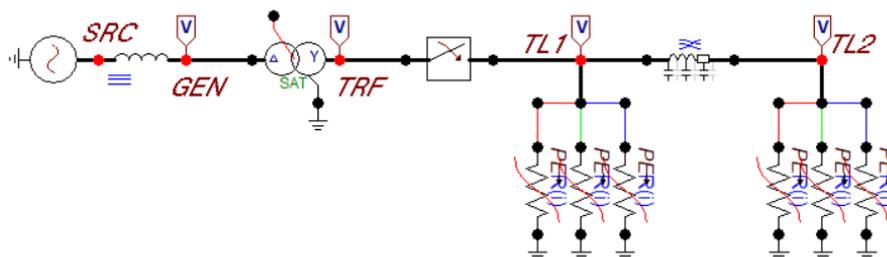


Figura 65 – Diagrama unilinar no ATP: energização de linha

Tabela 10 - Curva I versus V do para-raios do sistema exemplo energLT

I (A)	U (V)
0,001	633647,8
0,01	661182,6
0,1	671800
1	684073,9
10	711204,3
100	751900
300	779030,4
1000	817789,1
3000	864297,8

Observa-se que o objetivo desse sistema exemplo consiste em uma apresentação didática inicial da energização de uma linha de transmissão utilizando os modelos fasoriais propostos. Por este motivo, representou-se de forma bastante simplificada a geração por uma fonte em série com uma indutância pura. Além disso, o transformador foi representado por um modelo de indutância em série com transformador ideal. Mais adiante serão apresentados exemplos com redes de maior porte e modelos mais detalhados.

Ressalta-se que, assumir a existência de dispersão dos polos resulta em casos com sobretensões maiores. O mesmo evento foi modelado na plataforma de desenvolvimento, o AnaHVDC, e foram preparadas as variáveis de medições correspondentes.

Os resultados considerando o lado receptor da linha (TL2), os quais comumente apresentam maiores solicitações de sobretensões, são apresentados com o objetivo de validar o caso apresentado. Para melhor visualização, divide-se a apresentação dos resultados por fase e dando um enfoque nos primeiros ciclos depois da energização. Tais resultados seguem da Figura 66 até a Figura 70.

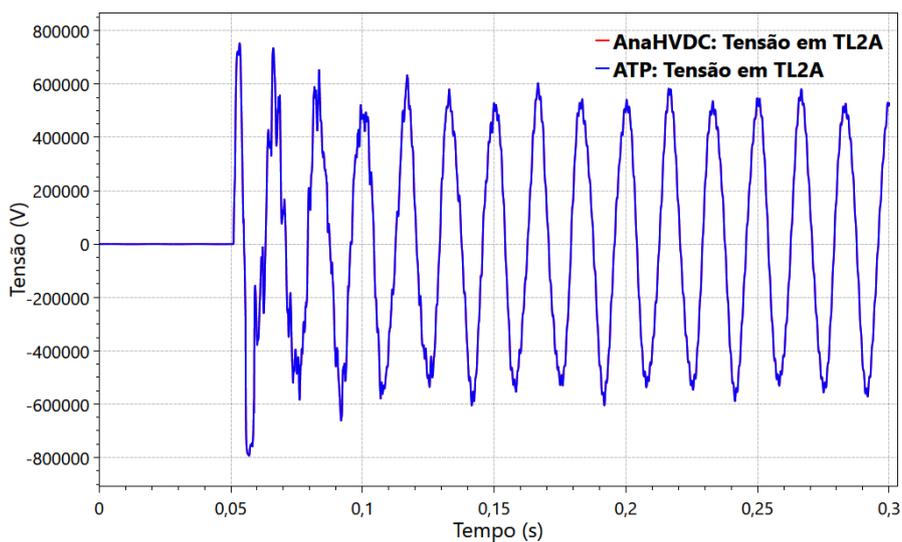


Figura 66 – Energização de LT: Tensão em LT2, fase A

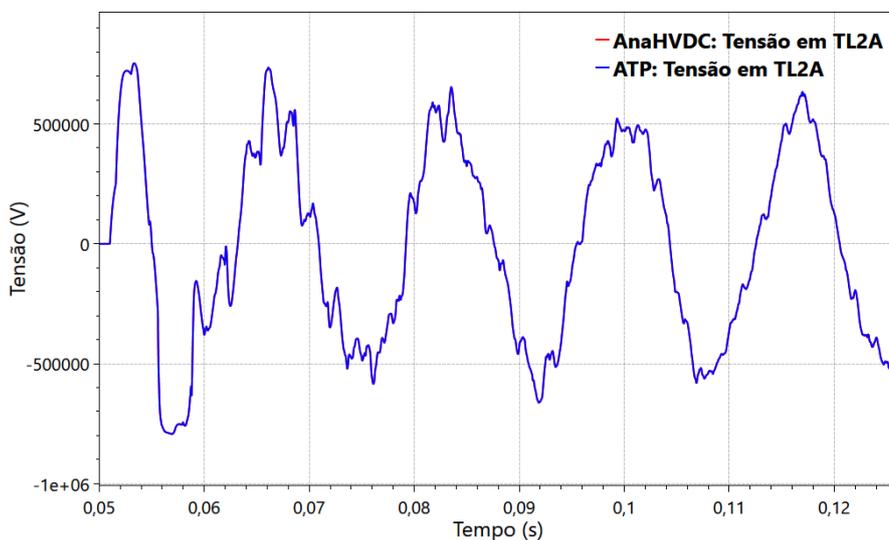


Figura 67 – Energização de LT: Tensão em LT2, fase A, com ampliação da faixa de visualização

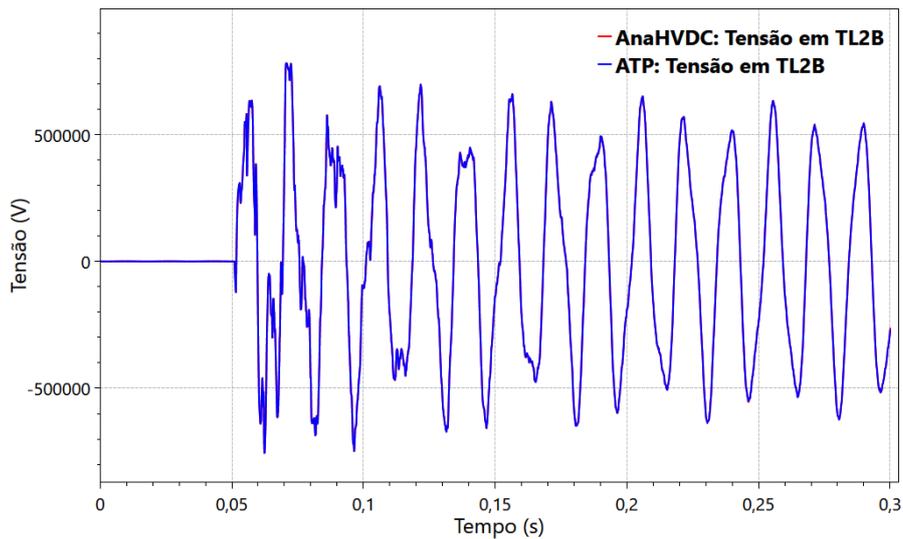


Figura 68 – Energização de LT: Tensão em LT2, fase B

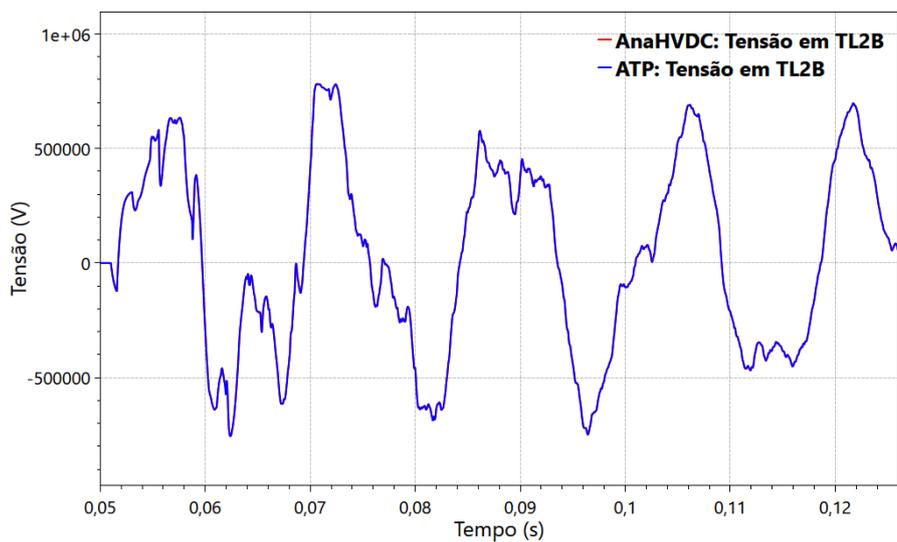


Figura 69 – Energização de LT: Tensão em LT2, fase B, com ampliação da faixa de visualização

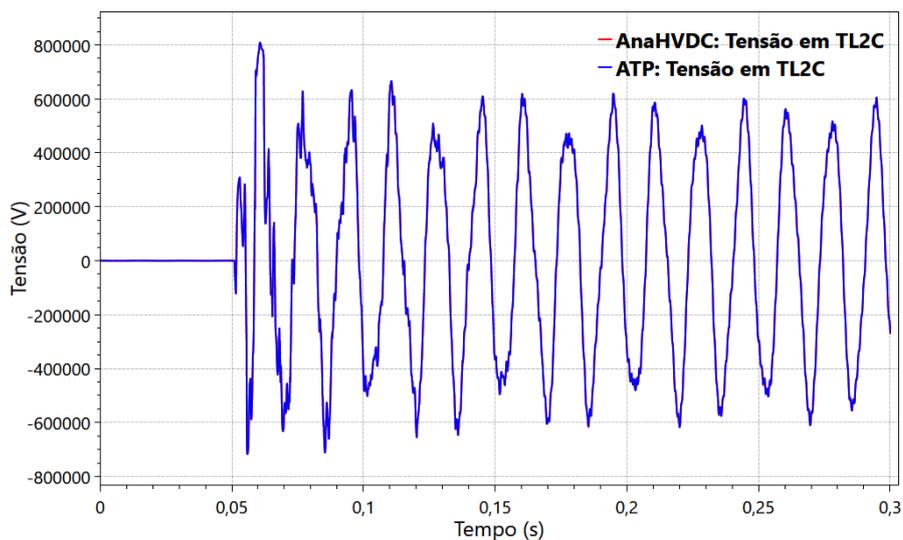


Figura 70 – Energização de LT: Tensão em LT2, fase C

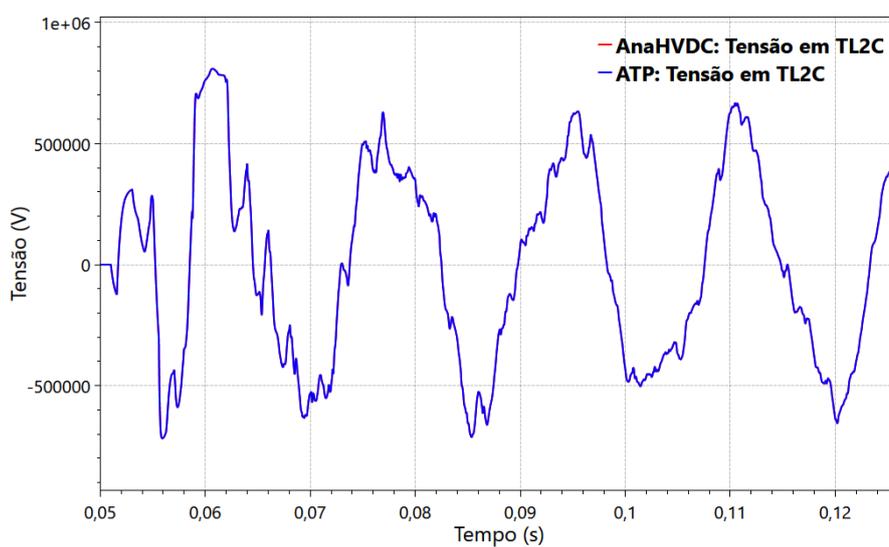


Figura 71 – Energização de LT: Tensão em LT2, fase C, com ampliação da faixa de visualização

Os resultados da energia dos para-raios, considerando a lado receptor da linha (TL2) são também apresentados com o objetivo de validar o caso apresentado. Tais resultados, seguem na Figura 72, Figura 73 e Figura 74.

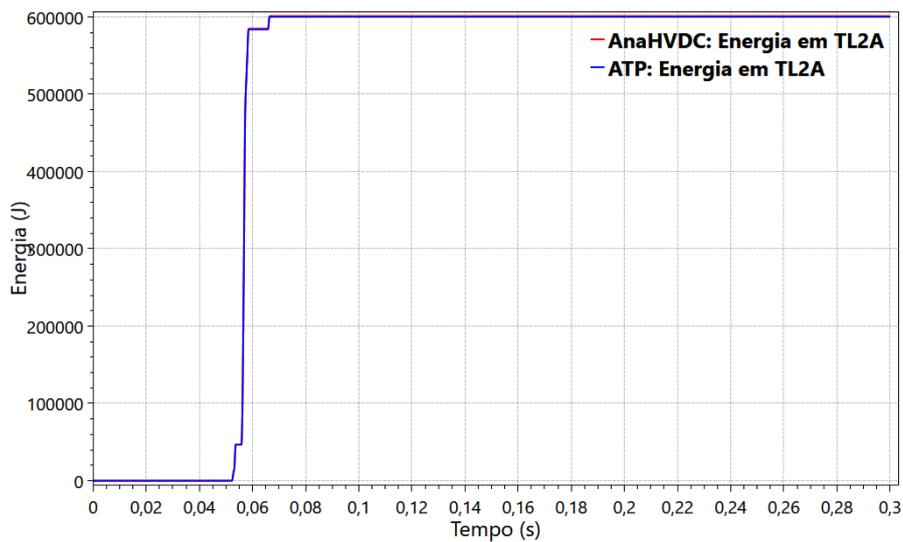


Figura 72 – Energização de LT Energia em LT2, fase A

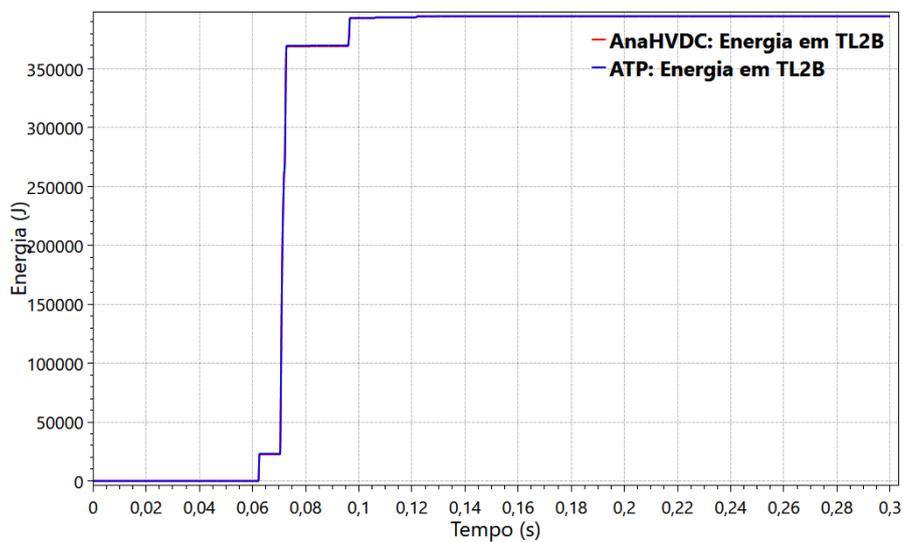


Figura 73 – Energização de LT Energia em LT2, fase B

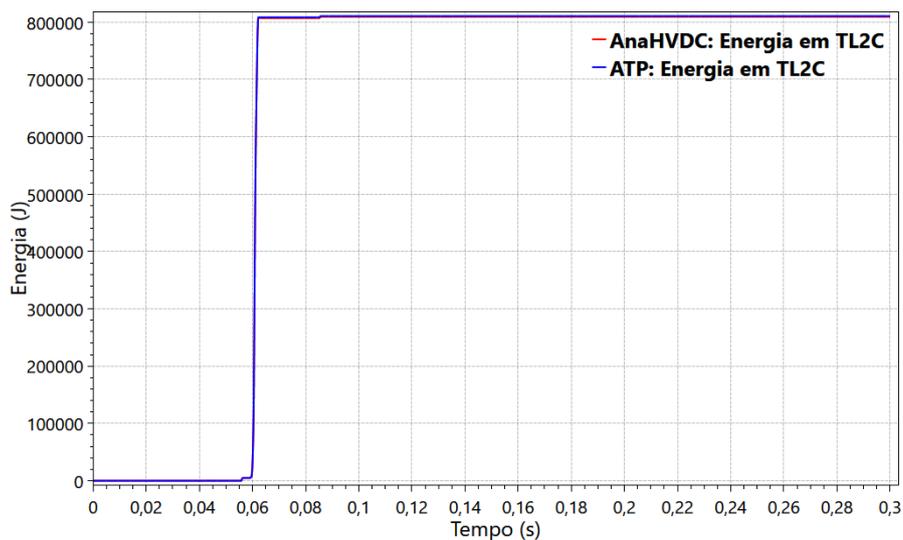


Figura 74 – Energização de LT Energia em LT2, fase C

Nota-se uma diferença visual mínima, entretanto as curvas são praticamente coincidentes, em ambos os modelos. Essa diferença é proveniente de uma interpolação existente no modelo do ATP, entre o primeiro ponto fornecido na curva *versus* *i* dos para-raios e a origem do plano cartesiano. Essa interpolação não é feita no modelo desenvolvido para o AnaHVDC, para compatibilização com o programa de fluxo de potência ANAREDE, que não considera a existência de para-raios na sua solução. Logo, conclui-se que a representação do modelo do para-raios na plataforma do AnaHVDC foi desenvolvida e implementada com sucesso.

4.1.2 Energização de transformador

A Figura 75 apresenta o diagrama unifilar do sistema exemplo denominado energTRAFO, no programa ATP. O sistema é radial e composto de:

- Fontes trifásicas de 20kV de amplitude, 30° de ângulo de fase e frequência de 60Hz. A defasagem de 30° foi adotada para que no secundário fique com ângulo de fase próximo de zero;
- Transformador de potência de 1000MVA, relação 20/500kV com ligação Δ -Y e impedância percentual de 10% referida para o lado secundário;
- Linha de transmissão de parâmetros distribuídos em 500kV de 300km de distância com os seguintes parâmetros de sequência positiva e zero: $R_+ =$

$$0,0227578 \frac{\Omega}{km}, \quad R_0 = 0,198049 \frac{\Omega}{km}, \quad L_+ = 0,883978 \frac{mH}{km}, \quad L_0 = 4,22267 \frac{mH}{km},$$

$$C_+ = 0,0130245 \frac{\mu F}{km}, \quad C_0 = 0,00661356 \frac{\mu F}{km}, .$$

- Disjuntor com tempos de fechamento em $t_a = 0,014s$, $t_b = 0,014s$ e $t_c = 0,014s$;
- Transformador de potência de 1000MVA, relação 500/230kV com ligação Y-Y e impedância percentual de 10% referida para o lado secundário. Observa-se que colocar a impedância concentrada no lado primário, secundário ou dividida é irrelevante, uma vez que o efeito da saturação é modelado na Hevia, desprezando-se a saturação interna do modelo;
- Modelo de magnetização (desprezando histerese e fluxo residual), com curva corrente versus fluxo, informada na Tabela 11, no lado primário do transformador.

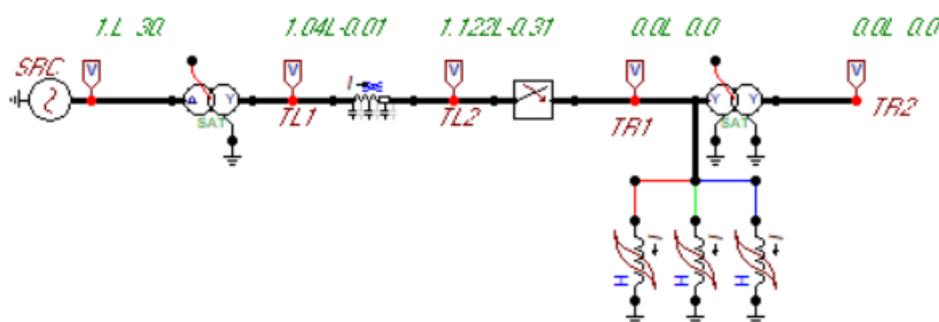


Figura 75 – Diagrama unilifar no ATP: energização de transformador

Tabela 11 - Curva I versus Φ da magnetização do sistema exemplo energTRAFO

I (A)	Φ (WbT)
0,105083159	866,329375
0,500111128	1082,91172
0,687440267	1137,0573
0,990403064	1191,20289
1,37024932	1245,34848
1,8797932	1299,49406
34,7003827	1353,63965
77,1727584	1407,78523

Tanto o ATP quanto o AnaHVDC permitem duas formas de entrada de dados: i) ensaio V_{rms} versus I_{rms} ; ii) curva I versus Φ . O elemento SATTRAFO do ATP permite

ambas as entradas, porém para inclusão de fluxo residual e histerese faz-se necessário o uso do elemento HEVIA98 [16]. Contudo, nessa etapa os casos foram simulados ainda sem considerar esses dois efeitos.

A energização de transformadores foi simulada considerando a inclusão do modelo de magnetização. Assim, essa seção de resultados apresenta as sobretensões observadas no terminal de baixa do transformador (TR2) e suas respectivas correntes de magnetização. Visando um maior valor de sobretensão o transformador foi energizado depois de um trecho da linha de transmissão de 300km e chave de energização não contou com dispersão dos polos, sendo os tempos de fechamento $t_a = t_b = t_c = 0,014s$. Não foram utilizados os para-raios no caso com o objetivo de validar em separado o modelo de magnetização desenvolvido e implementado. Note que a linha de transmissão já está energizada e ocorre energização do transformador entre as barras TR1 e TR2.

Os resultados considerando o lado de 230kV do transformador (barra TR2), com o objetivo de validar o modelo, podem ser observados a seguir. Para melhor visualização divide-se a apresentação dos resultados por fase e dando um enfoque nos primeiros ciclos depois da energização. Tais resultados seguem da Figura 76 até a Figura 81.

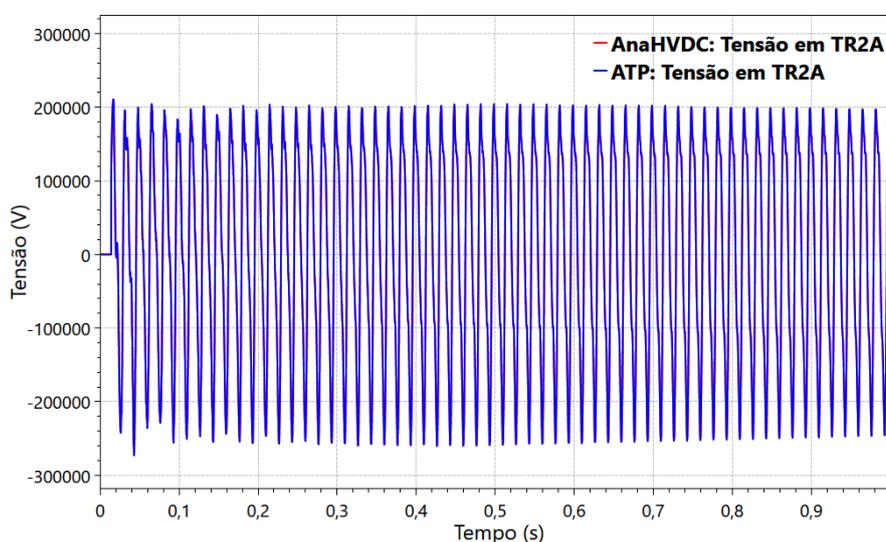


Figura 76 – Energização de transformador: Tensão em TR2, fase A

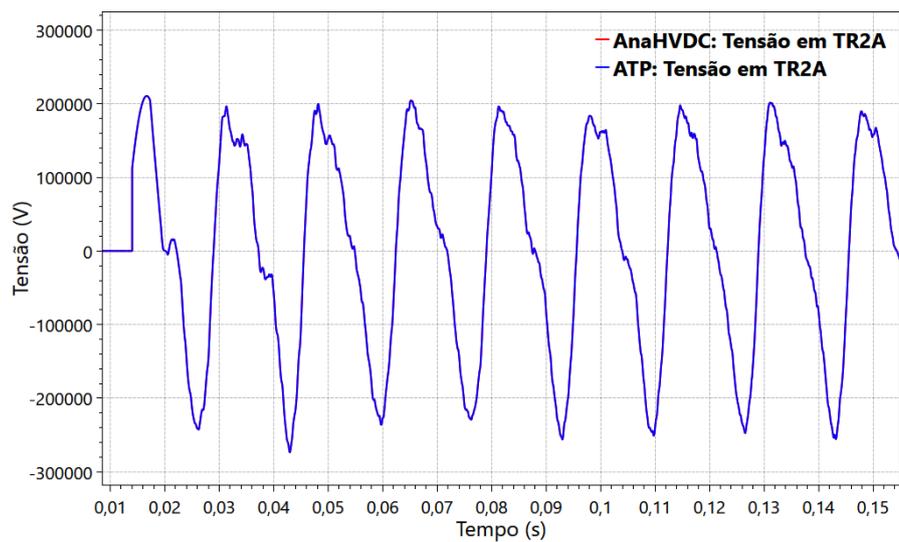


Figura 77 – Energização de transformador: Tensão em TR2, fase A, com ampliação da faixa de visualização

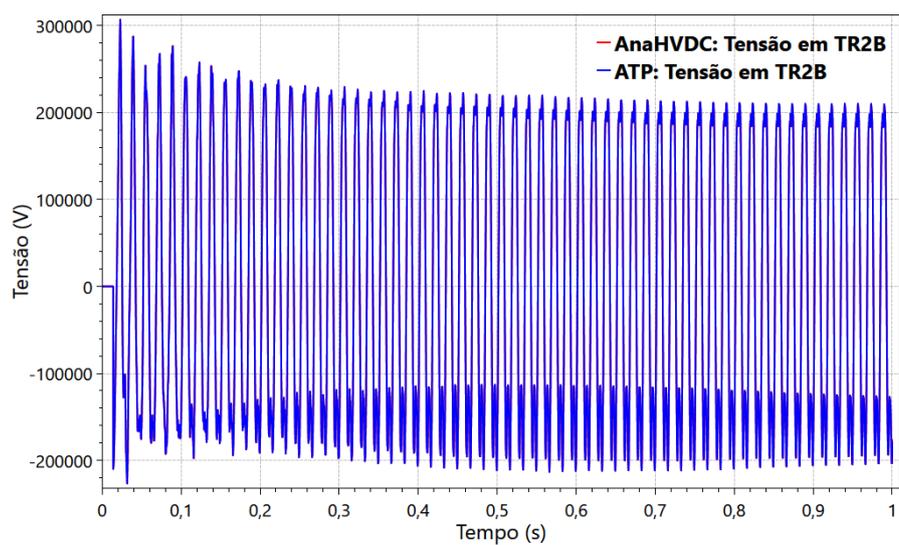


Figura 78 – Energização de transformador: Tensão em TR2, fase B

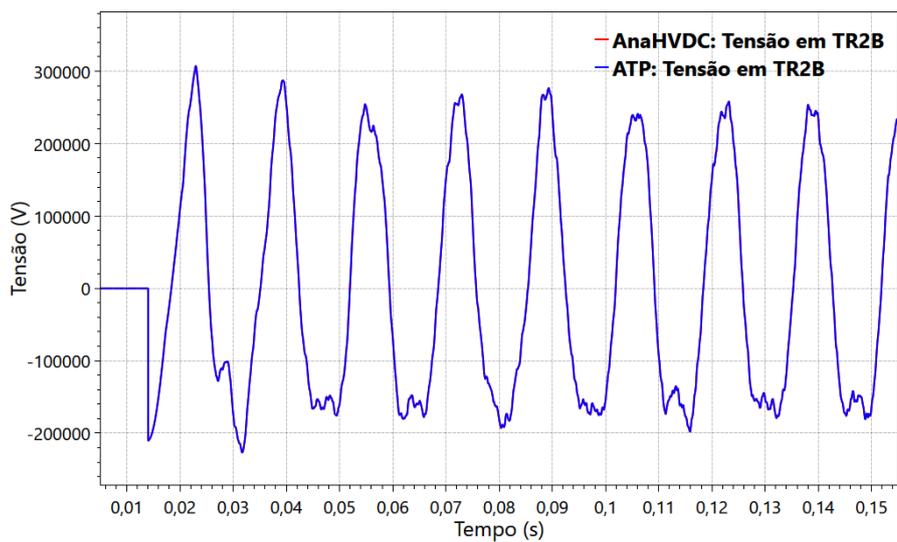


Figura 79 – Energização de transformador: Tensão em TR2, fase B, com ampliação da faixa de visualização

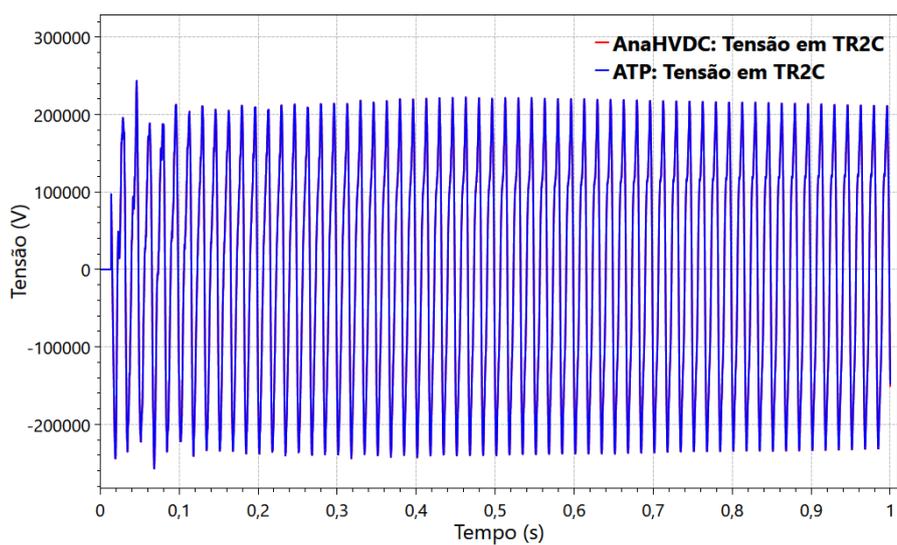


Figura 80 – Energização de transformador: Tensão em TR2, fase C

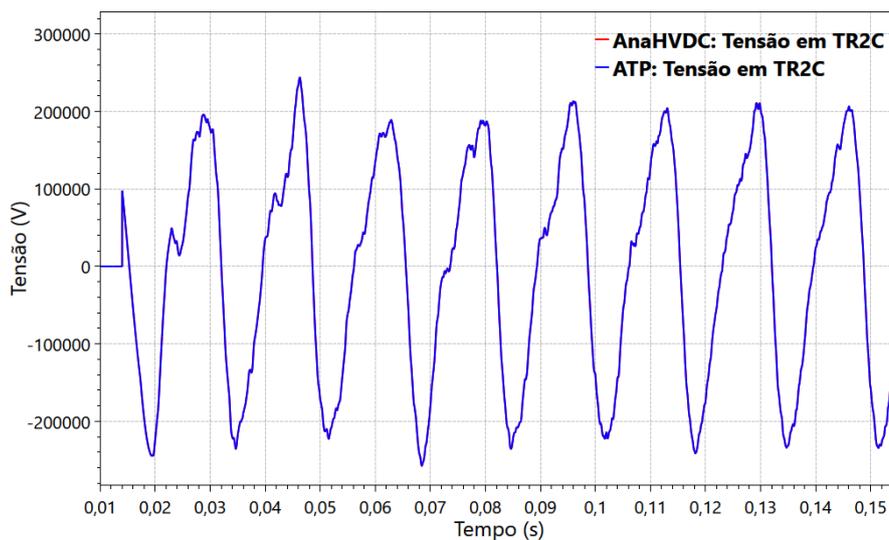


Figura 81 – Energização de transformador: Tensão em TR2, fase C, com ampliação da faixa de visualização

A corrente de magnetização em ambos os programas para cada uma das fases também é apresentada. Novamente é mostrado o tempo de simulação total e ampliação da faixa de visualização no transitório. Os resultados seguem da Figura 82 até a Figura 87.

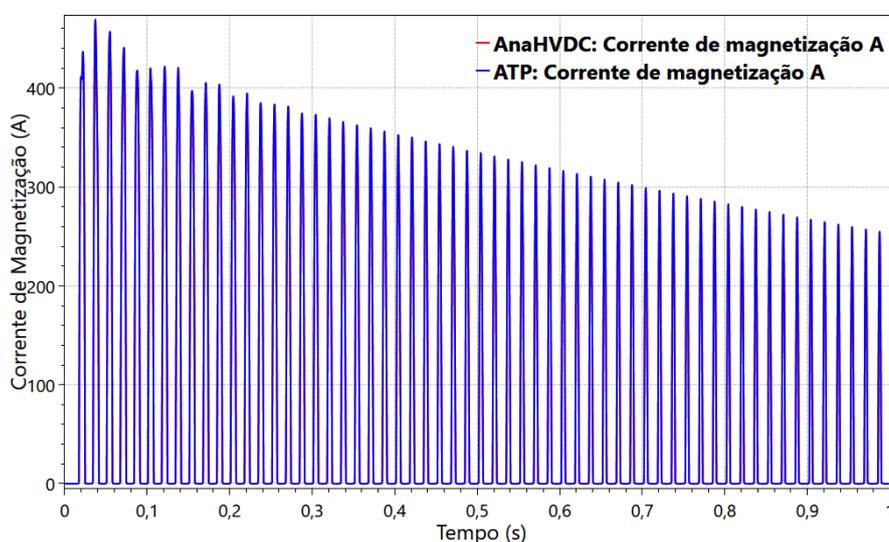


Figura 82 – Energização de transformador: Corrente de magnetização, fase A

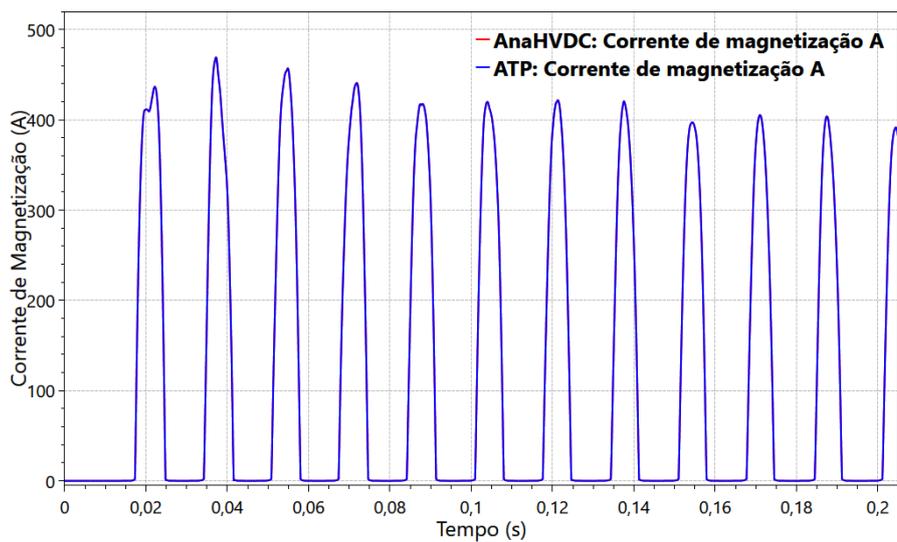


Figura 83 – Energização de transformador: Corrente de magnetização, fase A, com ampliação da faixa de visualização.

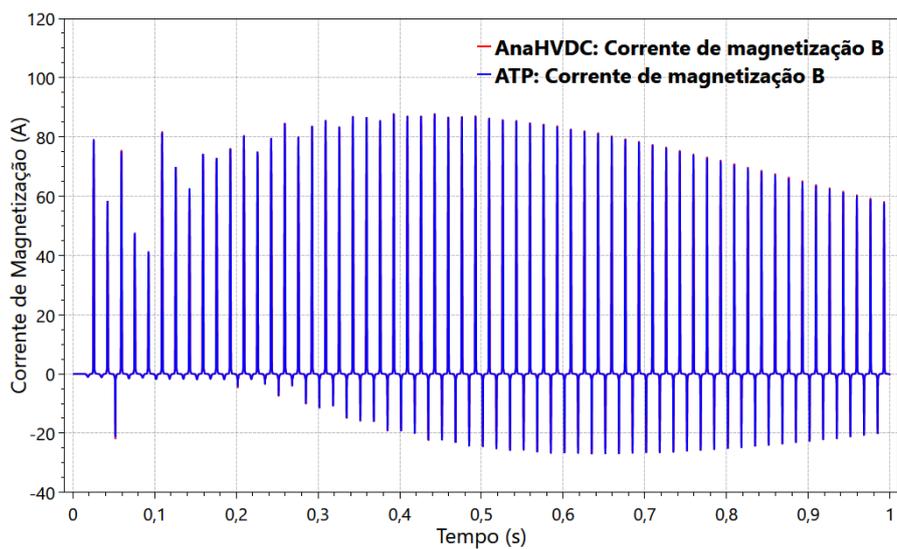


Figura 84 – Energização de transformador: Corrente de magnetização, fase B

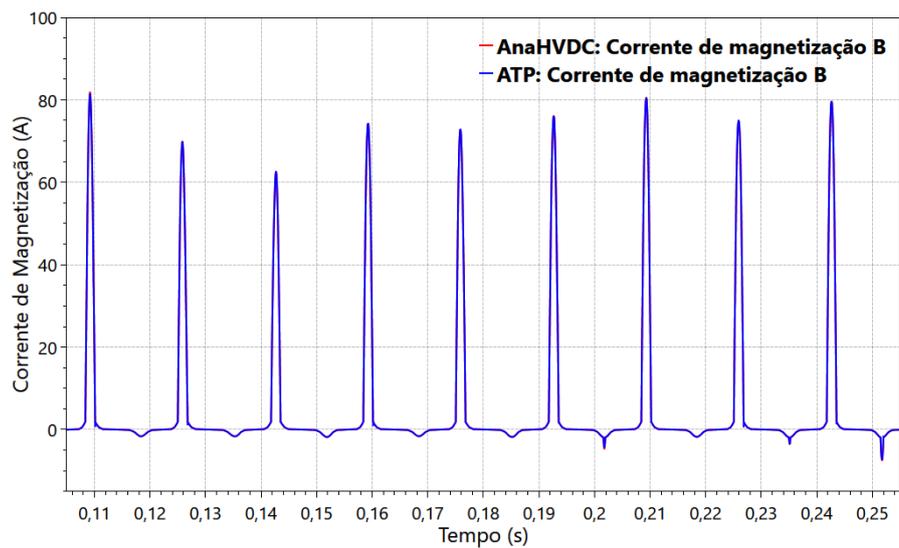


Figura 85 – Energização de transformador: Corrente de magnetização, fase B, com ampliação da faixa de visualização.

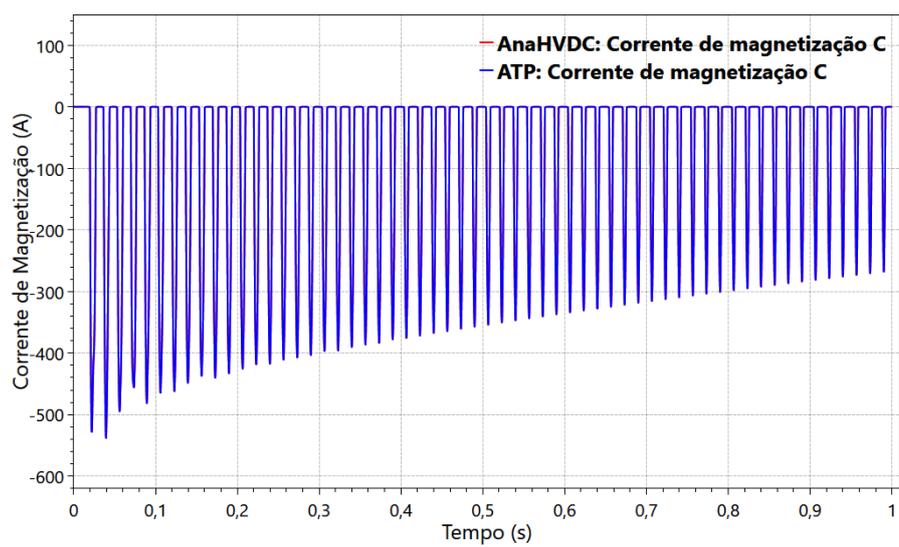


Figura 86 – Energização de transformador: Corrente de magnetização, fase C

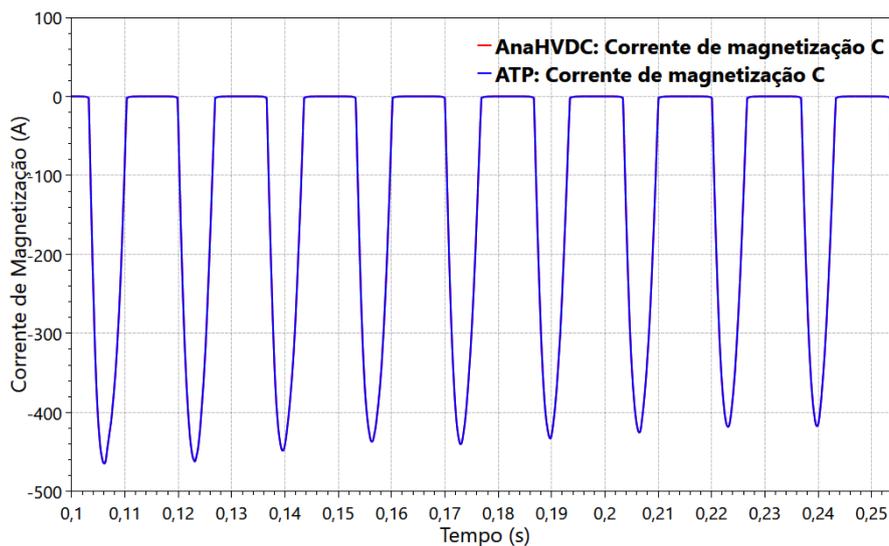


Figura 87 – Energização de transformador: Corrente de magnetização, fase C, com ampliação da faixa de visualização.

Todos os casos foram visualmente coincidentes corroborando a validação do modelo proposto. Isso é válido tanto para as tensões medidas no lado secundário do transformador quanto para a corrente de magnetização do modelo.

Cabe ressaltar que no tempo final de simulação, o sistema ainda não entrou em regime permanente, logo as correntes não têm o formato característico. Nessa situação as resistências do sistema contribuem para o amortecimento dessas componentes transitórias. Então, se por um lado as resistências apresentam desvantagem do ponto de vista de perdas, por outro, contribuem para amortecimento dos termos transitórios.

No caso exemplo, só tem resistências na linha de transmissão, logo o caso tem um amortecimento muito lento. Ressalta-se que em casos reais o amortecimento pode ser ainda mais lento podendo chegar a mais de 5s. Para ilustrar, as correntes de magnetização em regime permanente, assumiu-se um valor aumentado de resistência (para o valor de 1Ω) no primário do primeiro transformador e simulado o mesmo caso. A Figura 88 mostra o regime permanente nessa situação.

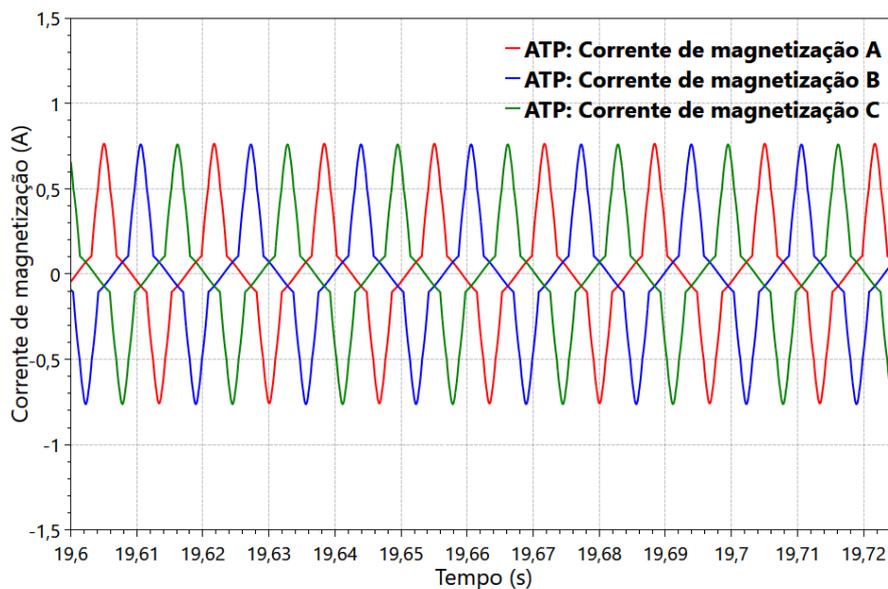


Figura 88 – Energização de transformador: Corrente de magnetização em regime permanente

4.2 Caso “BenchCA”

Esta seção apresenta os resultados obtidos do sistema teste “BenchCA”, distribuído na versão Beta do programa AnaHVDC, com seus dados de entrada no Apêndice A. Assumiu-se que as análises serão feitas considerando a inclusão dos equipamentos e modelos a partir da barra 09, no caso de energização de linha de transmissão e de transformadores, e; entre as barras 08 e 09 para estudos de religamento, tanto tripolar quanto monopolar, e de tensão de restabelecimento transitória. Entretanto, para se proceder aos estudos é necessário realizar previamente o ajuste do ponto de operação em ambas as ferramentas, ATP e AnaHVDC. Como são programas de natureza distinta, as soluções não são idênticas, em especial os ângulos de fase das tensões [6]. Na próxima subseção serão abordados aspectos mais específicos em relação a obtenção do caso base.

4.2.1 Caso base – ATP e AnaHVDC

Inicialmente foi obtido um caso base tanto para o ATP quanto para o AnaHVDC. Nessa etapa devem ser destacadas algumas considerações, tais como: i) a precisão de cada um dos programas (número de casas decimais, arredondamento ou truncamento interno);

ii) a entrada de dados do usuário; iii) os modelos utilizados (por exemplo, se a linha de transmissão é modelada como PI ou *Bergeron*); iv) as configurações de simulação (passo de integração, plotagem, dentre outras.); v) as possíveis conversões de entrada de dados (grandeza real ou pu); dentre outras.

Alguns dos itens elencados anteriormente podem ser resolvidos de forma direta, outros, entretanto, podem apenas ser mitigados. Idealmente, os casos bases em ambos os programas poderiam ser rigorosamente idênticos. Contudo, na prática, obtém-se casos visualmente coincidentes, com diferenças numéricas dentro de um limite tolerável. Em outras palavras, tais diferenças são praticamente imperceptíveis, sendo observáveis com uma ampliação da escala de visualização em intervalos de tempo bem reduzidos, da ordem de alguns passos de integração.

Assim sendo, justifica-se o esforço pela obtenção de um caso base o melhor possível, tendo em conta eventuais limitações inerentes que obstam o caso idealmente sobreposto. Nesse sentido, conhecendo os limites, toma-se os mesmos como norteadores para obtenção do caso base. Esse esforço na obtenção do ponto de operação resulta em uma validação mais adequada. Isso é, sendo o mesmo ponto de operação, ou algo muito próximo, que seja aceitável, e sendo os equipamentos e modelos os mesmos em ambas as ferramentas, se as saídas forem suficientemente próximas (numericamente e visualmente) o modelo é considerado validado, caso contrário há uma indicação de erro na entrada de dados, na representação da rede ou na modelagem.

Ilustrando essas possibilidades, na Figura 89 tem-se o caso base incompatível. Nessa situação, pode ter ocorrido uma representação distinta da rede elétrica e dos equipamentos, ou ainda entrada de dados inconsistente, podendo esta última ser derivada de valores errados ou escalas trocadas ou mais especificamente com casas decimais ou algarismos significativos distintos. Assim, uma ordem proposta de investigação, de natureza empírica, tem as seguintes diretrizes: i) adequar topologicamente a rede elétrica com os mesmos elementos; ii) verificar as bases do sistema, seus valores numéricos e conversões. Por exemplo, observar que o ATP tem o padrão em grandeza real e o AnaHVDC, com base de dados do fluxo de potência do ANAREDE, em pu.; iii) verificar as características dos modelos e dos programas. O ponto de operação no ATP no que se refere ao valor das cargas, depende de como a carga está modelada no fluxo de potência, ou seja, da sua parcela ZIP (impedância, corrente ou potência constante; ou ainda, composições desses termos). Além disso, a entrada de dados no ATP em alguns elementos é truncada. Alguns elementos no ATP permitem, no entanto, aumentar essa precisão com o

uso do comando \$VINTAGE. Uma boa prática consiste em se visualizar o arquivo *.ATP gerado pelo seu equivalente *.ACP e conferir consistência com os dados de fluxo de potência, curto-circuito e estabilidade. iv) simular no tempo em ambos os programas e comparar em ferramenta de visualização gráfica. Se houver discordância numérica e visual regressar em alguma das etapas prévias até que o caso esteja balizado dentro dos limites que foram considerados aceitáveis. Uma vez dentro desse limite estabelecido, pode-se então evoluir para a etapa de validação.

Analicamente, compreende-se que para cada ponto pertencente ao domínio, que no caso é o ponto de operação, se a distância entra esses valores no intervalo de tempo for maior que uma determinada tolerância considera-se o caso base incompatível. Para o exemplo citado, x_1 e x_2 representem a excitação em ambas as ferramentas e y_1 e y_2 a resposta, respectivamente.

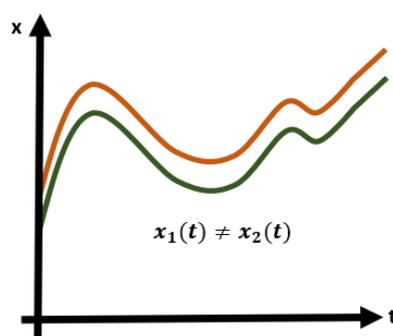


Figura 89 – Caso base incompatível

$$\forall x_1, x_2 \in \Omega$$

$$d(x_1, x_2) \geq \zeta$$

Com posse do caso base, temos duas possibilidades: a exposta na Figura 90 e na Figura 91, respectivamente. Para a Figura 90, as saídas se mostram incompatíveis. Para depurar o que pode estar gerando essas diferenças são sugeridos os seguintes passos: i) verificar se é alguma configuração de plotagem; ii) avaliar se as configurações são as mesmas: passo de integração, intervalo de plotagem. Verificado esses itens, duas passam a ser as possibilidades: a diferença na saída ainda persiste, mesmo que distinta da original, o que indica que ainda há algum erro ou ajuste necessário, ou ter o caso enfim ajustado e apto a avançar para a etapa de validação.

Nessa situação, para a saída tem-se que essa distância é maior que uma determinada tolerância.

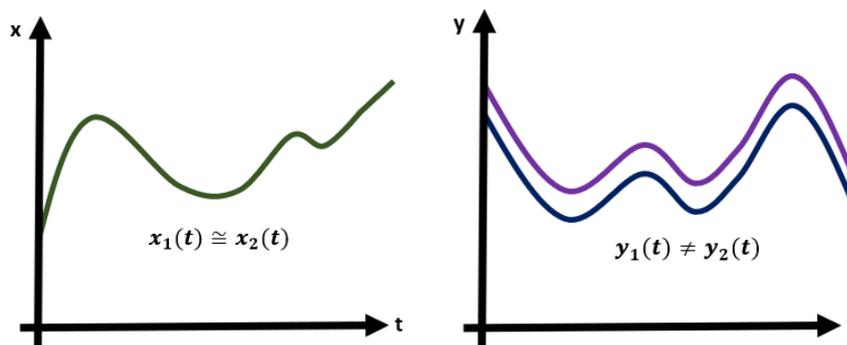


Figura 90 – Caso base compatível e saída incompatível

$$\forall x_1, x_2 \in \Omega$$

$$d(x_1, x_2) \leq \zeta \text{ e } d(y_1, y_2) \geq \zeta$$

A Figura 91 representa a situação desejada, na qual os programas possuem entradas e saídas compatíveis entre si. No caso do sistema BenchCA são dois programas considerados: ATP e AnaHVDC, contudo idealmente poderiam ser quantos programas fossem necessários.

Observa-se que para cada ponto pertencente ao domínio, que no caso é o ponto de operação, sendo a distância entre esses valores no intervalo de tempo é menor que uma determinada tolerância. Para a saída tem-se que essa distância é também menor que uma determinada tolerância. Essa é a situação ideal que caracteriza a validade de um caso base.

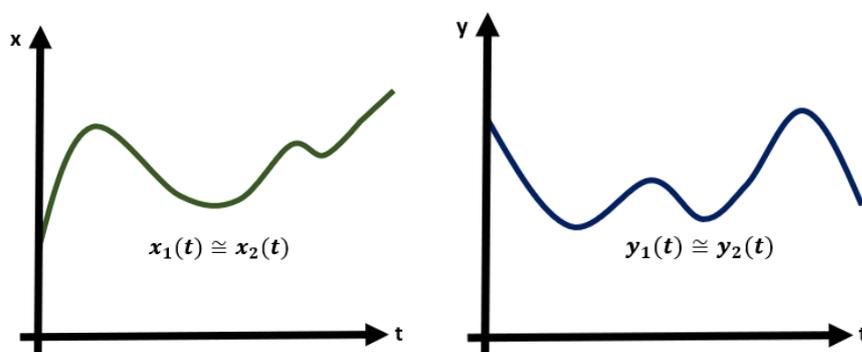


Figura 91 – Caso base e saída compatíveis

$$\forall x_1, x_2 \in \Omega$$

$$d(x_1, x_2) \leq \zeta \text{ e } d(y_1, y_2) \leq \zeta$$

A Figura 92 resume o processo de ajuste do caso base. Primeiro modela-se nos diversos programas computacionais (representados genericamente por X_1, X_1, \dots, X_n), tomando um como referência. A referência, na verdade, não necessariamente é oriunda de um programa, podendo ser medições de campo. A etapa preliminar consiste em verificar se a entrada de dados é a mesma, ou se está dentro da tolerância considerada adequada. Não sendo, ajusta-se o caso base até chegar a essa condição e, sendo satisfeita, verifica-se então

as saídas. Uma vez que ambas estejam simultaneamente adequadas, entradas e saídas, tem-se o caso base de interesse.

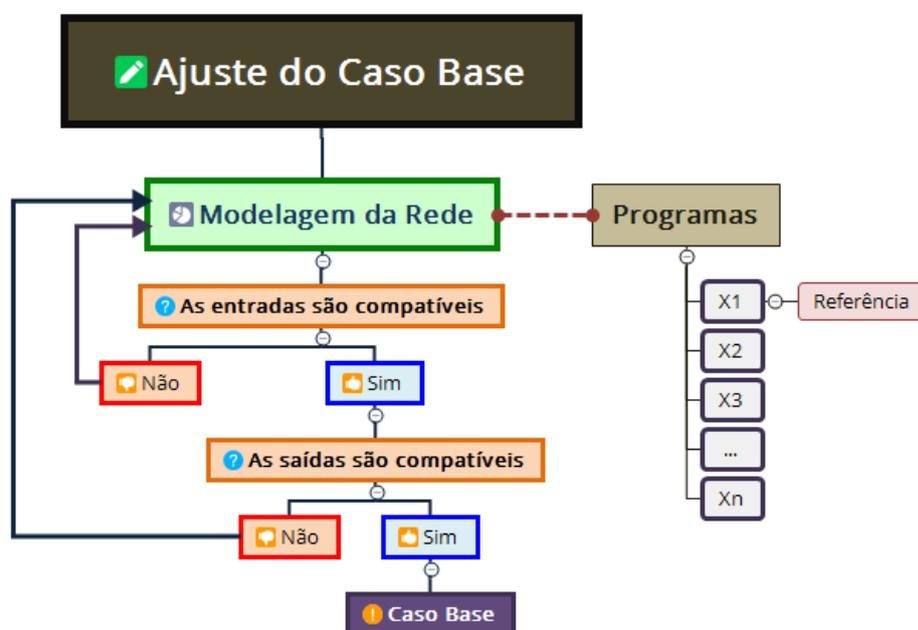


Figura 92 – Ajuste do caso base

Tendo esse preâmbulo acerca da obtenção genérica de um caso base, a próxima etapa compreende aplicar no caso BenchCA. Assim sendo, partindo-se do caso de fluxo de potência, foram elevadas as tensões nos barramentos terminais dos geradores até que um dos barramentos do sistema atingisse a tensão pré-operacional de $1,1 pu$, conforme recomendação em [6], e posteriormente foram medidas a tensão e ângulo da barra de interesse, no caso a barra 09. A Figura 93 mostra o diagrama unifilar no ANAREDE com seu respectivo ponto de operação obtido.

O AnaHVDC utiliza a base de dados de fluxo de potência do ANAREDE, de curto-circuito do ANAFAS e de estabilidade do ANATEM. Para o caso BenchCA são utilizados os dados do ANAREDE (sequência positiva) e ANAFAS (sequência zero). Isso permite que a representação no AnaHVDC seja mais precisa. Modelando esse sistema no ATPDraw, e fazendo os ajustes das tensões internas conforme apresentado no Apêndice B e das cargas conforme Apêndice C, tem-se o respectivo diagrama unifilar apresentado na Figura 94.

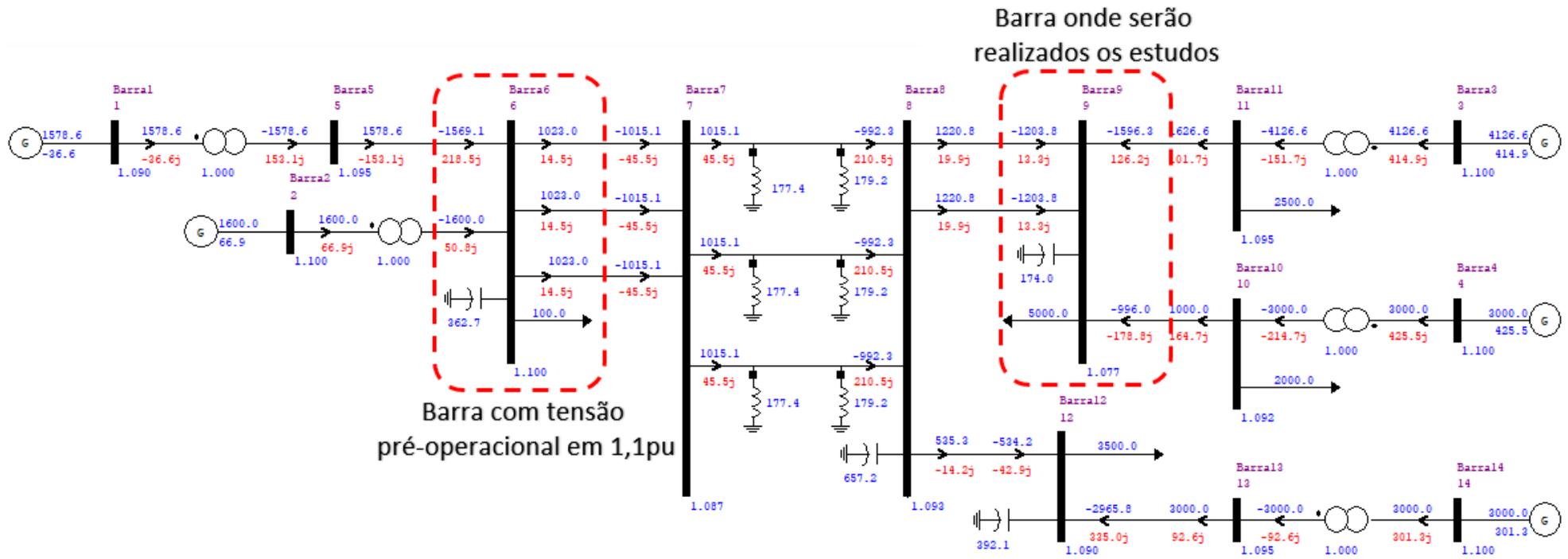


Figura 93 – Ponto de operação do caso base no programa ANAREDE

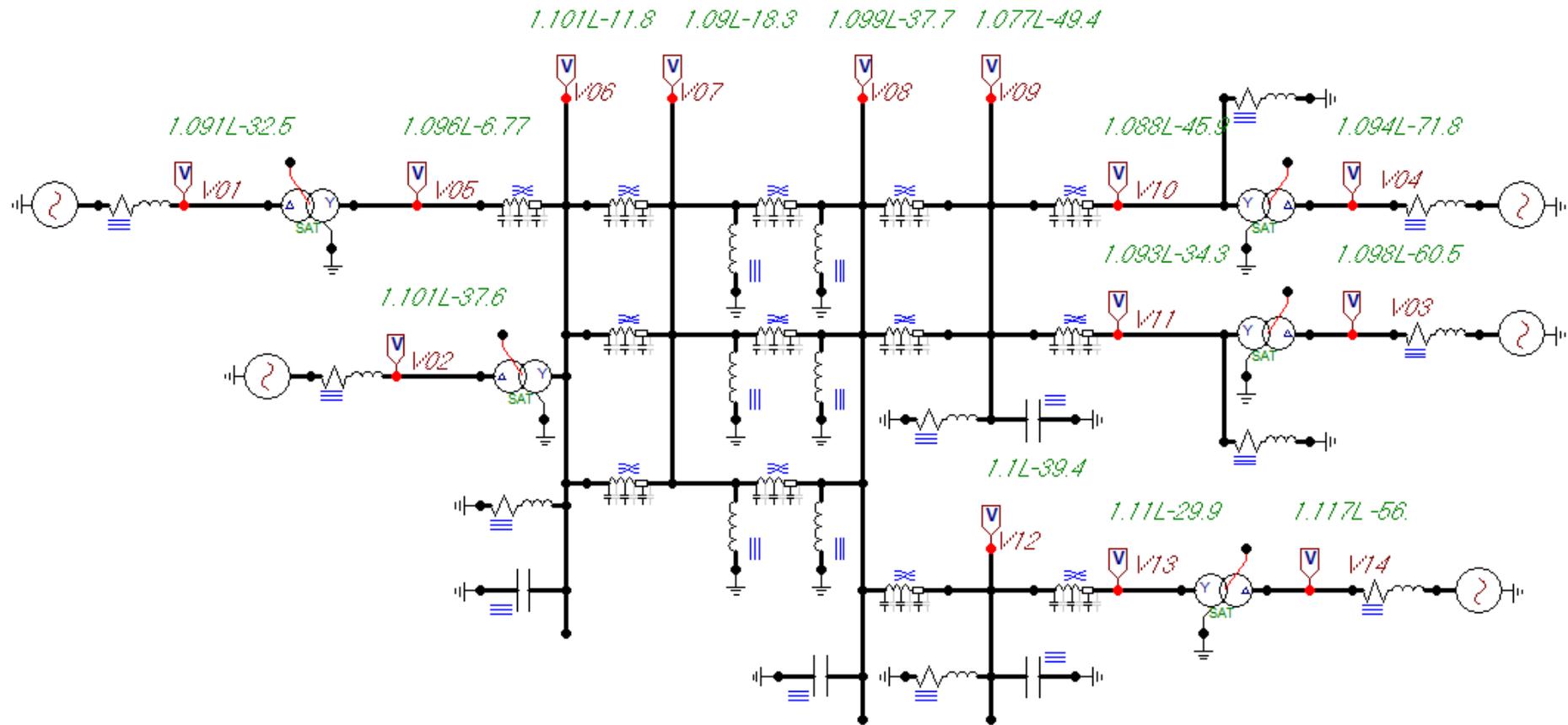


Figura 94 – Ponto de operação do caso base no programa ATPDraw

A Tabela 12 apresenta a informação do ponto de operação no programa ANAREDE para as barras do sistema. As barras 1, 2, 3, 4 e 14 são barras de geração, modeladas como fontes ideais com suas respectivas impedâncias, e estão na base de tensão de 20kV, estando as demais barras na base de tensão de 500kV e 100MVA de base de potência.

Tabela 12 – Ponto de operação do caso base BenchCA

Barra	Geração		Potência		Transformador					Carga		Filtro
	V [pu]	Fase [°]	P [MW]	Q [Mvar]	S _{3φ} [MVA]	V ₁ [kV]	V ₂ [kV]	X [%]	X [pu]	P [MW]	Q [Mvar]	Q [Mvar]
1	1,090	-2,5	1579,0	-36,6	1800	20	500	10	0,55556	-	-	-
2	1,100	-7,5	1600,0	66,9	1800	20	500	10	0,55556	-	-	-
3	1,100	-30,0	4127,0	414,9	5400	20	500	10	0,18519	-	-	-
4	1,100	-42,0	3000,0	425,5	3600	20	500	10	0,27778	-	-	-
5	1,095	-6,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	1,100	-12,0	-	-	-	-	-	-	-	100	50	362,7
7	1,087	-18,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	1,093	-38,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	657,2
9	1,077	-49,0	-	-	-	-	-	-	-	5000	200	174
10	1,092	-46,0	-	-	-	-	-	-	-	2000	50	-
11	1,038	-34,0	-	-	-	-	-	-	-	2500	50	-
12	1,090	-39,0	-	-	-	-	-	-	-	3500	100	392,1
13	1,095	-30,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	1,100	-26,0	3000,0	636,7	3600	20	500	0,1	0,27778	-	-	-

Os parâmetros das linhas de transmissão estão informados na Tabela 13. Nota-se que as linhas foram modeladas por seus respectivos parâmetros de sequência positiva e zero em pu. Também se verifica a informação de compensação reativa, quando existentes. Os reatores de linha quando presentes foram considerados solidamente aterrados.

Tabela 13 – Parâmetros das linhas de transmissão do caso base BenchCA

De	Para	nc	Linha de Transmissão							Compensação Shunt	
			R1 [pu]	X1 [pu]	B1 [Mvar]	R0 [pu]	X0 [pu]	B0 [Mvar]	Comprimento [km]	P (De) [MW]	P (Para) [MW]
5	6	1	0,04545	0,6660	61,40	0,39567	3,1786	31,19	50	-	-
6	7	1	0,09054	1,3290	122,92	0,78349	6,3263	62,54	100	-	-
6	7	2	0,09054	1,3294	122,92	0,78349	6,3263	62,54	100	-	-
6	7	3	0,09054	1,3294	122,92	0,78349	6,3263	62,54	100	-	-
7	8	1	0,25984	3,9020	372,85	2,10570	18,0030	192,76	300	177,4	179,2
7	8	2	0,25984	3,9020	372,85	2,10570	18,0030	192,76	300	177,4	179,2
7	8	3	0,25984	3,9020	372,85	2,10570	18,0030	192,76	300	177,4	179,2
8	9	1	0,13488	1,9873	184,70	1,15570	9,4121	94,2	150	-	-
8	9	2	0,13488	1,9873	184,70	1,15570	9,4121	94,2	150	-	-
8	12	1	0,04545	0,6660	61,40	0,39567	3,1786	31,19	50	-	-
9	10	1	0,04545	0,6660	61,40	0,39567	3,1786	31,19	50	-	-
9	11	1	0,13488	1,9873	184,70	1,15570	9,4121	94,2	150	-	-
12	13	1	0,04545	0,6660	61,40	0,39567	3,1786	31,19	50	-	-

As impedâncias das unidades geradoras, que foram consideradas iguais para as sequências positiva e zero, estão apresentadas na Tabela 14.

Tabela 14 – Dados de impedância das unidades geradoras do caso base BenchCA

Usina	R0 e R1 (%)	X0 e X1 (%)	R0 e R1 (Ω)	L0 e L1 (Ω)
V01	0,013890	1,3889	0,0005556	0,147366867
V02	0,013890	1,3889	0,0005556	0,147366867
V03	0,04630	0,46296	0,0001852	0,049121582
V04	0,006940	0,694440	0,0002776	0,073682372
V14	0,00694	0,694440	0,0002776	0,073682372

Os parâmetros no formato ANAREDE/ANAFAS estão em pu e em percentual e, para o ATP é necessário informar na unidade de mH (com opções: $XOPT = 0$ e $COPT = 0$). A conversão de unidades é apresentada no Apêndice D.

Os dados dos transformadores são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Dados dos transformadores do caso base BenchCA

Subestação	Potência [MVA]	Relação de Tensões [kV]	Ligação	Impedância (% Base Potência Nominal)
V01	1800	20:500	Δ -Y	5,56
V02	1800	20:500	Δ -Y	5,56
V03	5400	20:500	Δ -Y	1,85
V04	3600	20:500	Δ -Y	2,78
V14	3600	20:500	Δ -Y	2,78

Os dados dos elementos *shunt* estão apresentadas na Tabela 16, com a sequência positiva igual a sequência zero, e considerando de que estão solidamente aterrados.

Tabela 16 – Dados dos elementos *shunt* do caso base BenchCA

Local	R0 e R1 (Ω)	X0 e X1 (Ω)
Barra V06	2400,00	1210,00
Barra V09	57,09	2,32
Barra V12	84,90	2,42
Nó V10	148,97	3,72
Nó V11	107,70	2,15

Uma vez ajustado o caso, simula-se e são comparados os resultados da simulação no tempo. Observam-se principalmente os resultados na barra 09, onde serão realizados os estudos de energização de linhas e transformadores. Para o caso base foi utilizado um passo de integração de $10\mu s$ e tempo de simulação de 2,0s. As tensões na barra 09 em suas

três fases com correspondente ampliação da faixa de visualização seguem da Figura 95 até a Figura 100.

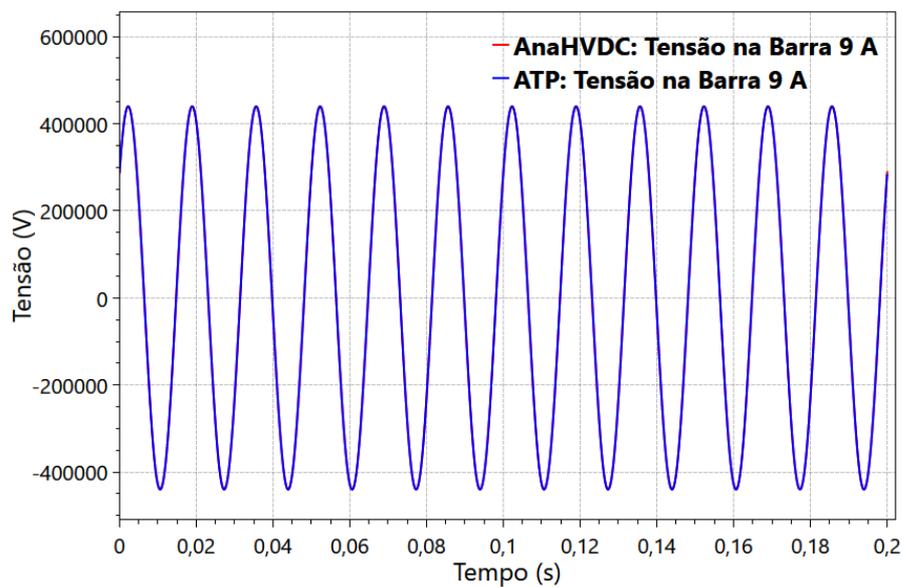


Figura 95 – Caso base: Tensão na barra 09, fase A

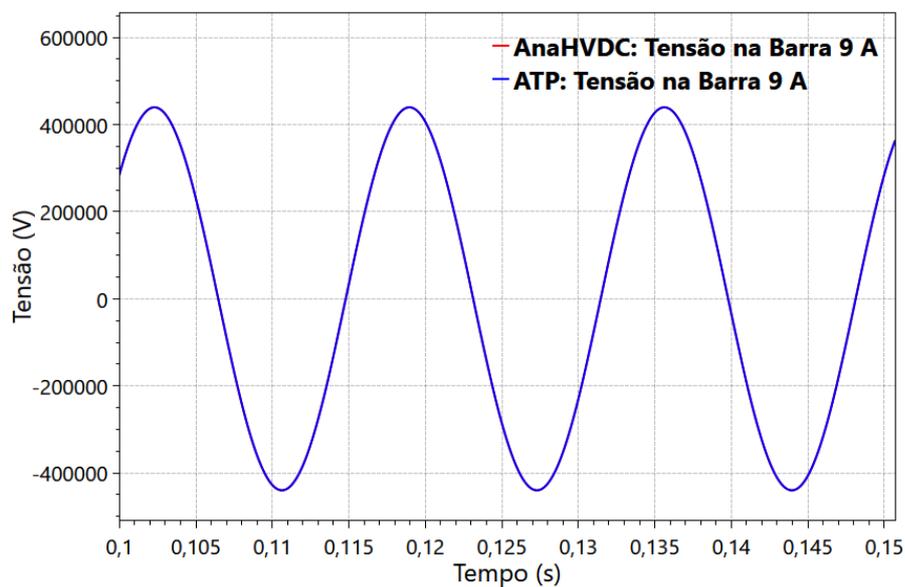


Figura 96 – Caso base: Tensão na barra 09, fase A, com ampliação da faixa de visualização

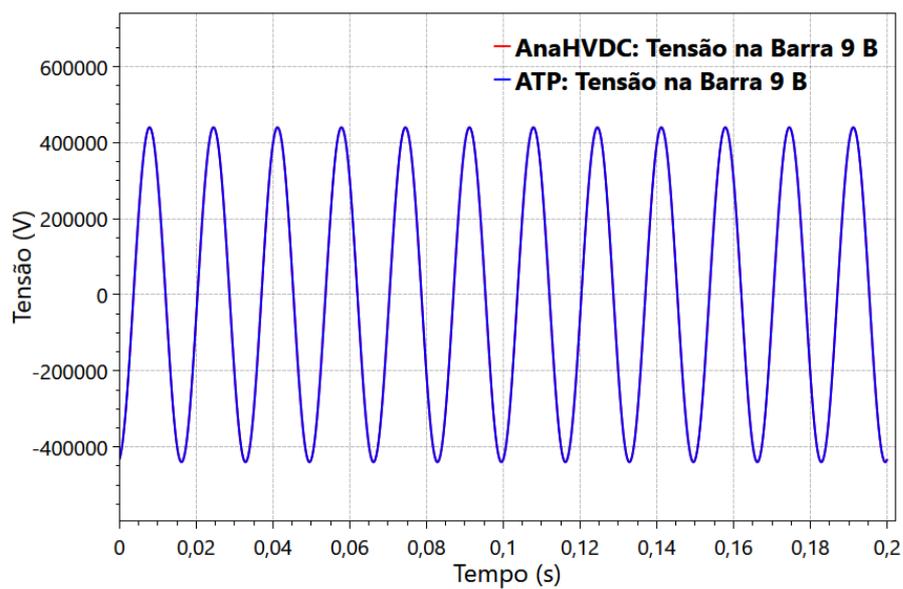


Figura 97 – Caso base: Tensão na barra 09, fase B

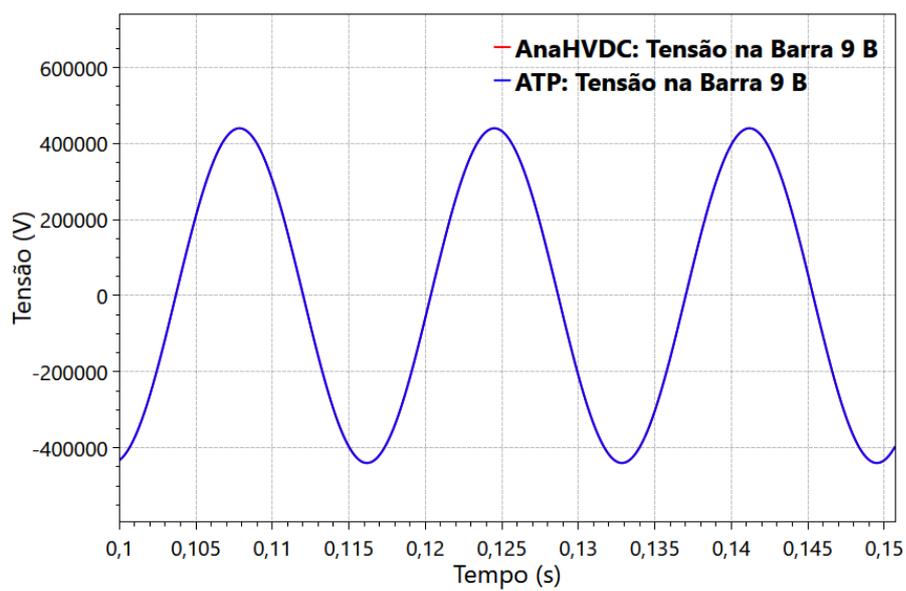


Figura 98 – Caso base: Tensão na barra 09, fase B, com ampliação da faixa de visualização

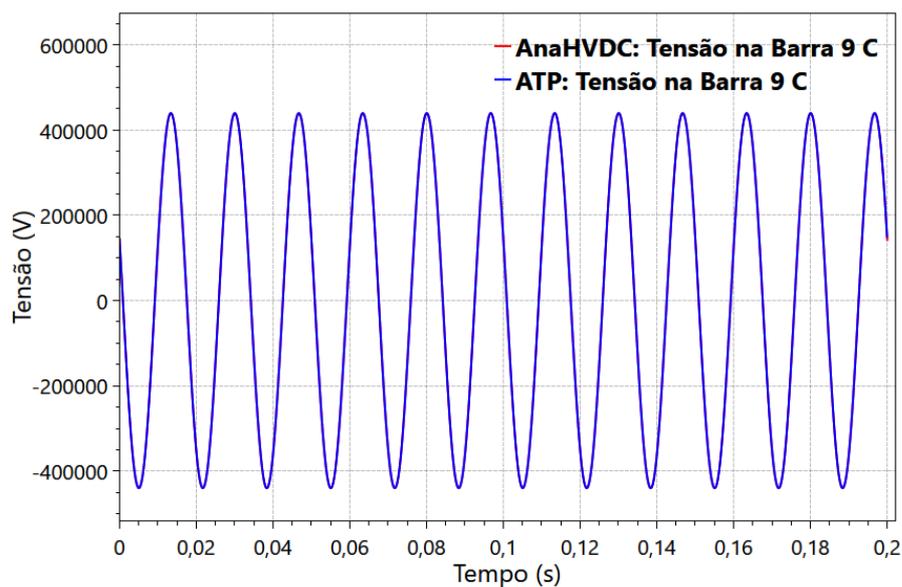


Figura 99 – Caso base: Tensão na barra 09, fase C

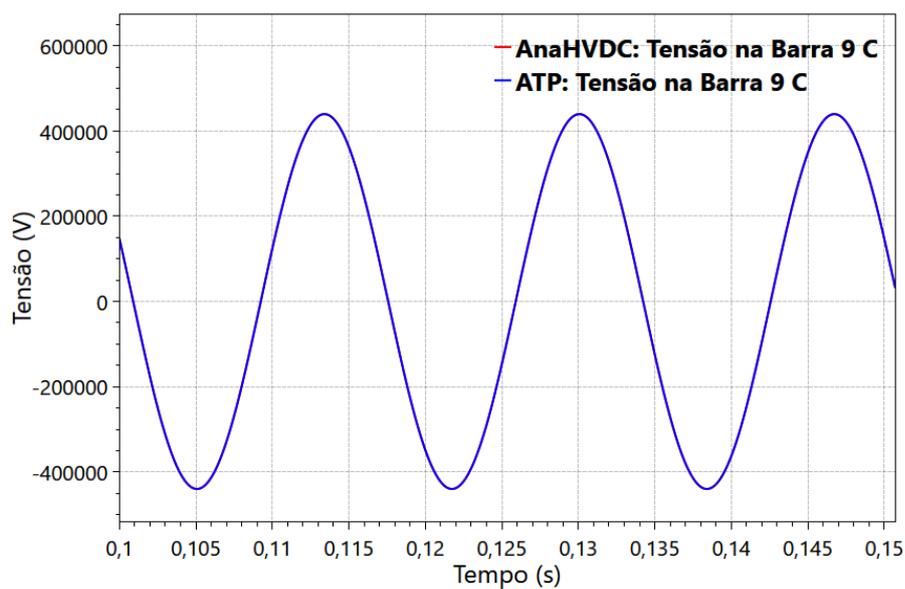


Figura 100 – Caso base: Tensão na barra 09, fase C, com ampliação da faixa de visualização

Nota-se que os resultados são visualmente coincidentes tanto no tempo total de simulação, quanto na ampliação da faixa de visualização. Isso indica que o caso pode ser considerado adequadamente ajustado e apto para se evoluir nas validações. Assim, tem-se o caso de referência ou doravante denominado caso base.

4.2.2 Energização de linha de transmissão

A energização de linha de transmissão foi simulada inicialmente sem o para-raios e posteriormente com inclusão desse equipamento. Assim, essa seção de resultados demonstra a mitigação das sobretensões com o para-raios em conjunto com a respectiva validação do modelo. O trecho da linha de transmissão considerada foi de 300km e chave de energização contou com dispersão dos polos, sendo os tempos de fechamento $t_a = 0,202s$, $t_b = 0,200s$ e $t_c = 0,198s$, conforme mostrado na Figura 101. Assumir a existência de dispersão dos polos resulta em casos com sobretensões maiores.

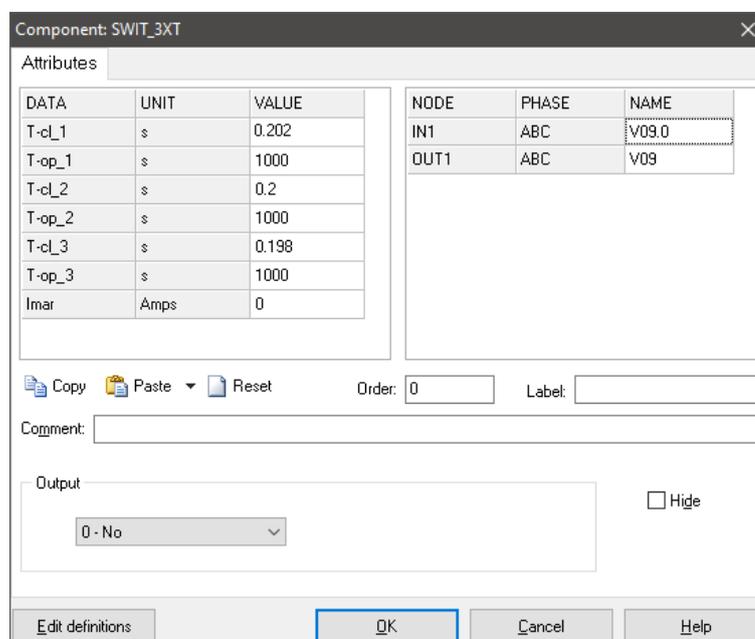


Figura 101 – Energização de linha: chave determinística com dispersão de polos

A Figura 102 apresenta parte do diagrama unifilar no ATP onde ocorrerá a energização de linha de transmissão no caso sem para-raios. O nó 09 do caso base foi renomeado para 09.0 e os terminais das linhas estão entre os nós 09, para o terminal emissor, e 15, para o terminal receptor.

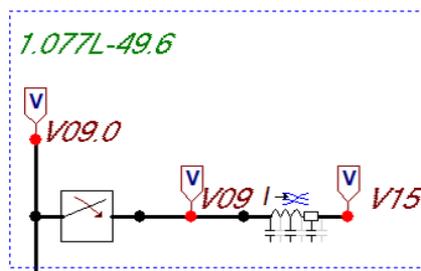


Figura 102 – Diagrama unifilar no ATP: energização de linha sem para-raios

O mesmo evento foi modelado na plataforma de desenvolvimento, o AnaHVDC, e foram preparadas as variáveis de medições correspondentes. A Tabela 17 apresenta os valores nominais da linha de transmissão para a sequência positiva e zero e a Tabela 18 apresenta os valores corrigidos hiperbolicamente para 60Hz. A rotina de conversão está escrita em *script* no Octave no Apêndice E. Ressalta-se que a correção hiperbólica é necessária para os dados oriundos do ANAREDE e ANAFAS. No caso do AnaHVDC, os valores são convertidos internamente para parâmetros nominais.

Tabela 17 – Parâmetros nominais da linha de transmissão de 300km no ATP

Parâmetro	Valor	Unidade
r_1	0,0227578	Ω/km
l_1	0,883978	mH/km
c_1	0,0130245	$\mu F/km$
r_0	0,198049	Ω/km
l_0	4,22267	mH/km
c_0	0,00661356	$\mu F/km$

Tabela 18 – Parâmetros corrigidos hiperbolicamente da linha de transmissão de 300km no formato ANAREDE/ANAFAS.

Parâmetro	Valor	Unidade
$r_{1\%}$	0,2598	%
$x_{1\%}$	3,9020	%
Q_1	372,85	Mvar
$r_{0\%}$	2,1011	%
x_0	18,0024	%
Q_0	192,76	Mvar

Os resultados considerando o lado receptor da linha (barra 15), os quais comumente apresentam maiores solicitações de sobretensões, são apresentados com o objetivo de

validar o caso apresentado. Para melhor visualização divide-se a apresentação dos resultados por fase e dando um enfoque nos primeiros ciclos depois da energização. Tais resultados seguem da Figura 103 até a Figura 108.

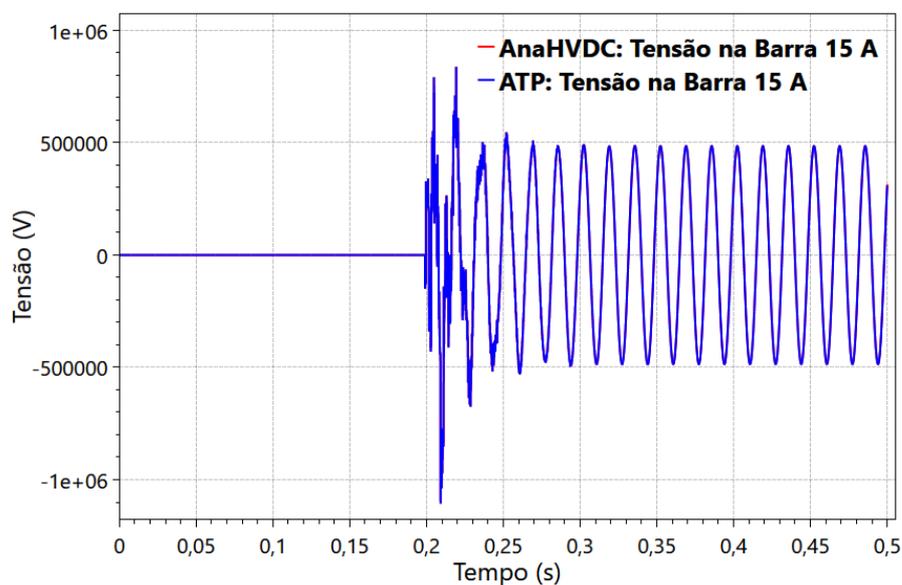


Figura 103 – Energização de LT (sem para-raios): Tensão na barra 15, fase A

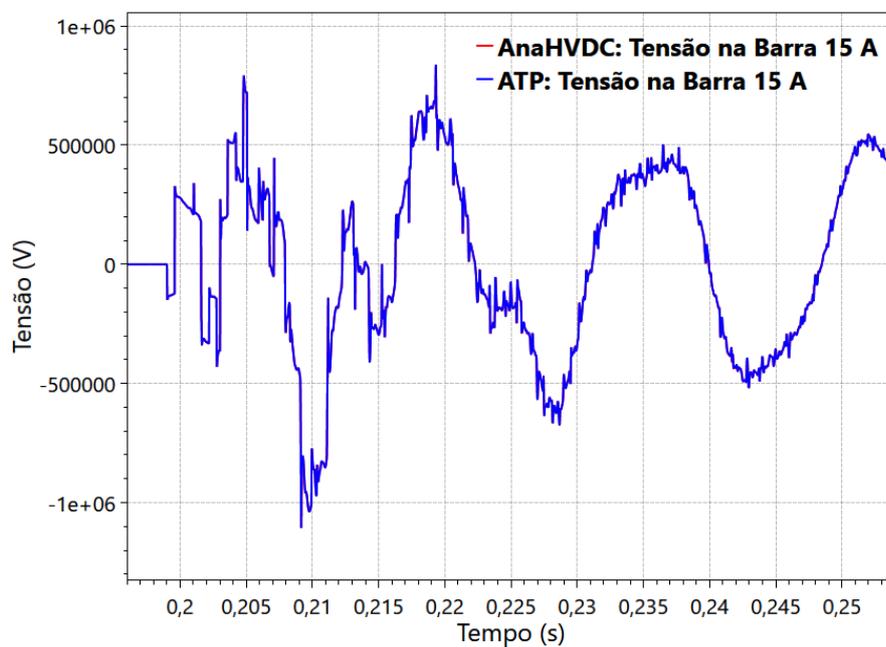


Figura 104 – Energização de LT (sem para-raios): Tensão na barra 15, fase A, com ampliação da faixa de visualização

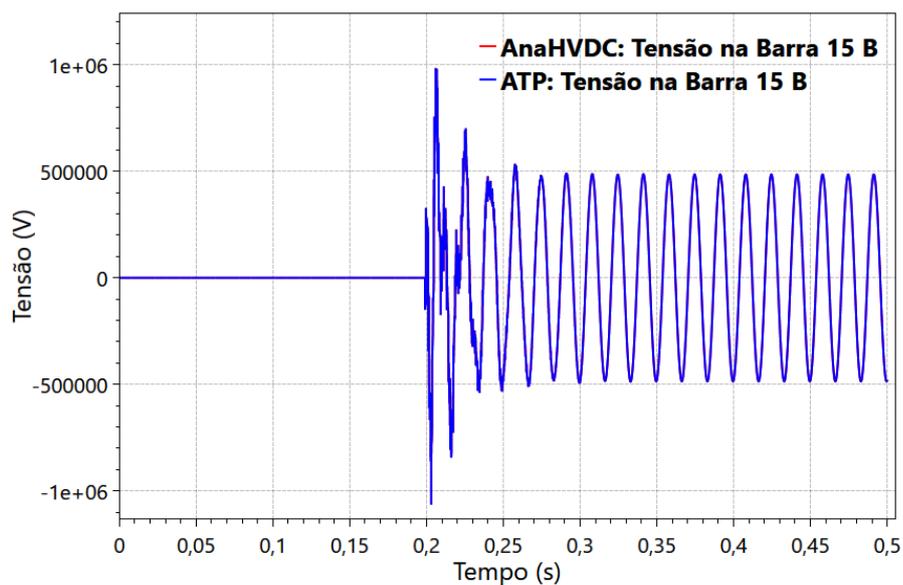


Figura 105 – Energização de LT (sem para-raios): Tensão na barra 15, fase B

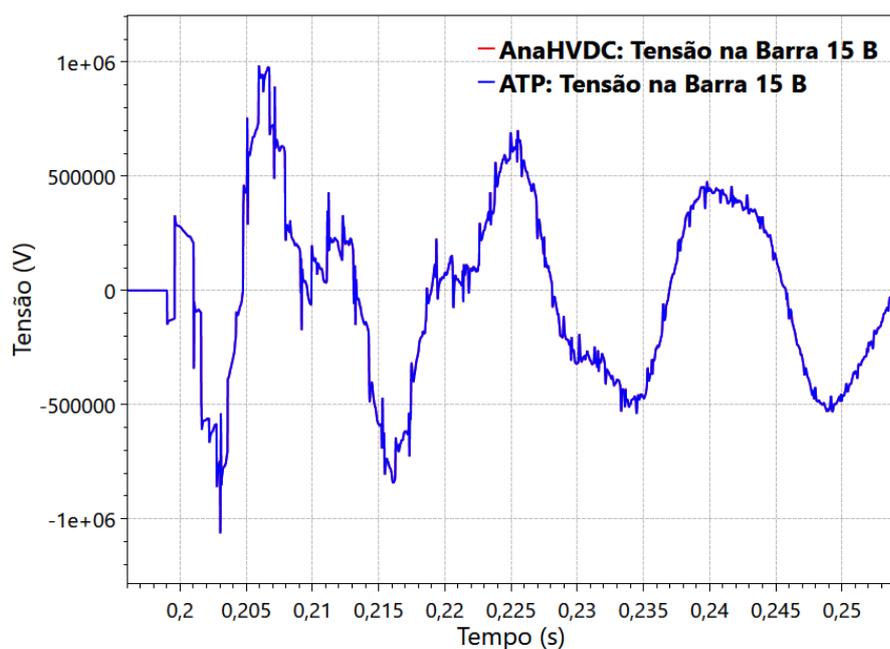


Figura 106 – Energização de LT (sem para-raios): Tensão na barra 15, fase B, com ampliação da faixa de visualização

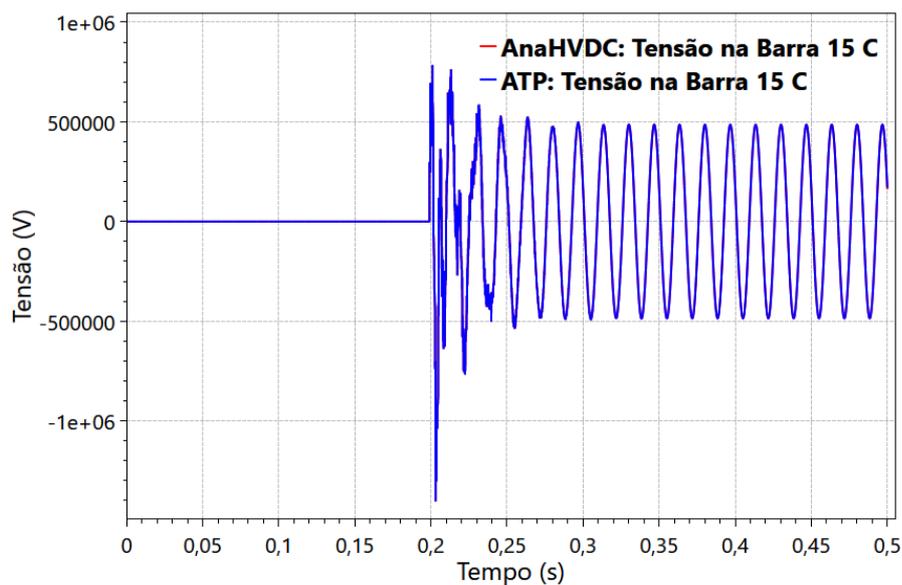


Figura 107 – Energização de LT (sem para-raios): Tensão na barra 15, fase C

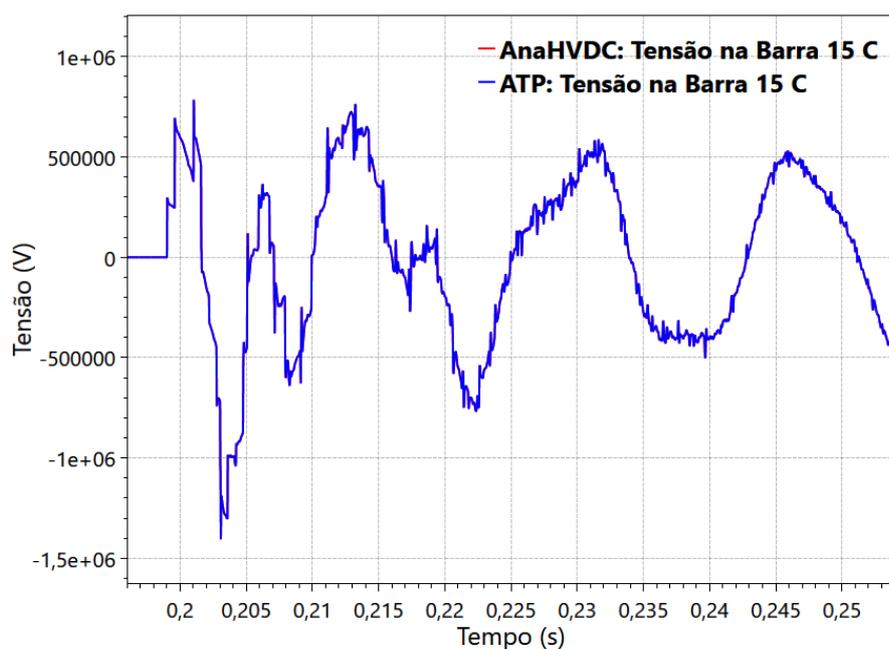


Figura 108 – Energização de LT (sem para-raios): Tensão na barra 15, fase C, com ampliação da faixa de visualização

Todos os casos foram visualmente coincidentes. Apesar de já ser um resultado esperado é uma boa prática ter essa validação, a priori, antes da incorporação do elemento modelado no caso simulado. Assim, a próxima etapa é incluir o modelo do para-raios e validar o novo caso. Também se aproveita os resultados obtidos da simulação para se explorar a análise da funcionalidade do para-raios que consiste na mitigação das sobretensões observadas.

4.2.2.1 Inclusão do modelo do para-raios

A energização de linha de transmissão com o para-raios é realizada considerando o equipamento inserido em ambos os terminais da linha de transmissão. Como as maiores solicitações ocorrem no fim da linha, ou seja, no terminal receptor, a medição de tensão e energia se localiza nesse ponto. A inserção do equipamento no ATP está na Figura 109.

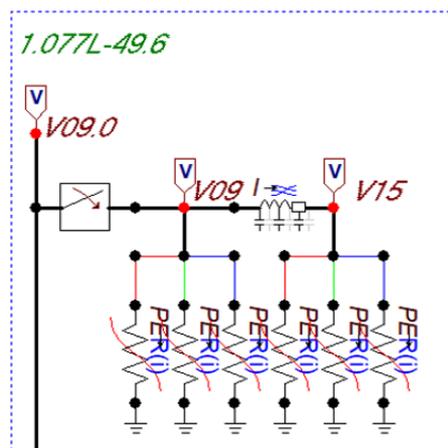


Figura 109 – Diagrama unilinar no ATP: energização de linha com para-raios

A Figura 109 mostra a tabela dos dados de ensaio, tensão *versus* corrente do para-raios provenientes da janela de diálogo do ATPDraw.

I [A]	U [V]
0.001	633647.8261
0.01	661182.6087
0.1	671800
1	684073.913
10	711204.3478
100	751900
300	779030.4348
1000	817789.1304
3000	864297.8261

Figura 110 – Dados: Tensão versus Corrente do para-raios

Os resultados considerando o lado receptor da linha (barra 15), os quais comumente apresentam maiores solicitações de sobretensões, são apresentados com o objetivo de validar o modelo. Para melhor visualização divide-se a apresentação dos resultados por fase e dando um enfoque nos primeiros ciclos depois da energização. Tais resultados seguem da Figura 111 até a Figura 116.

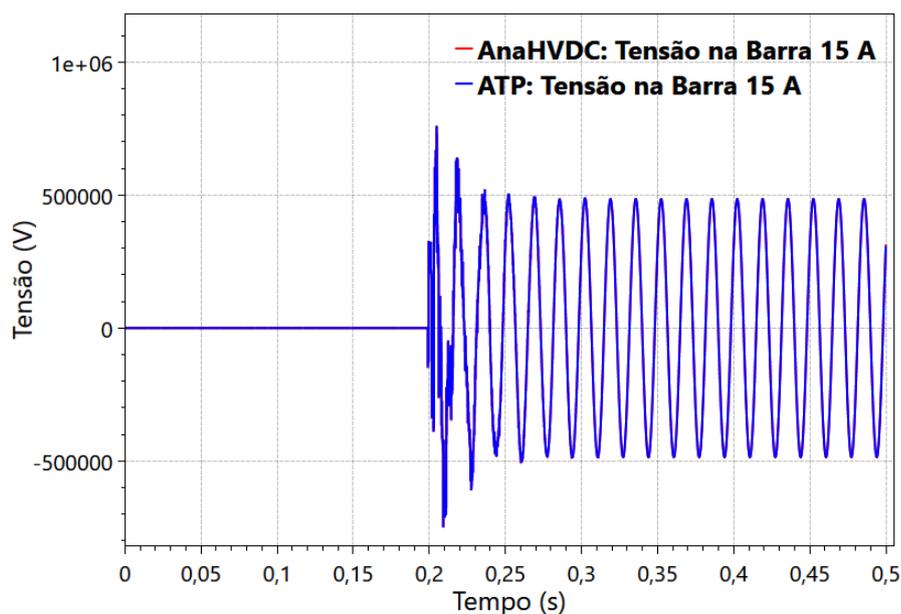


Figura 111 – Energização de LT (com para-raios): Tensão na barra 15, fase A

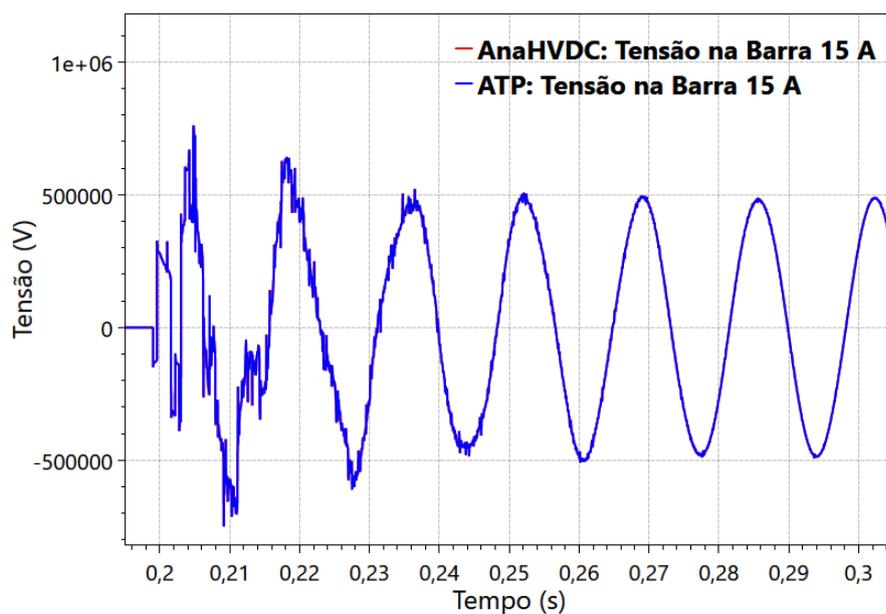


Figura 112 – Energização de LT (com para-raios): Tensão na barra 15, fase A, com ampliação da faixa de visualização

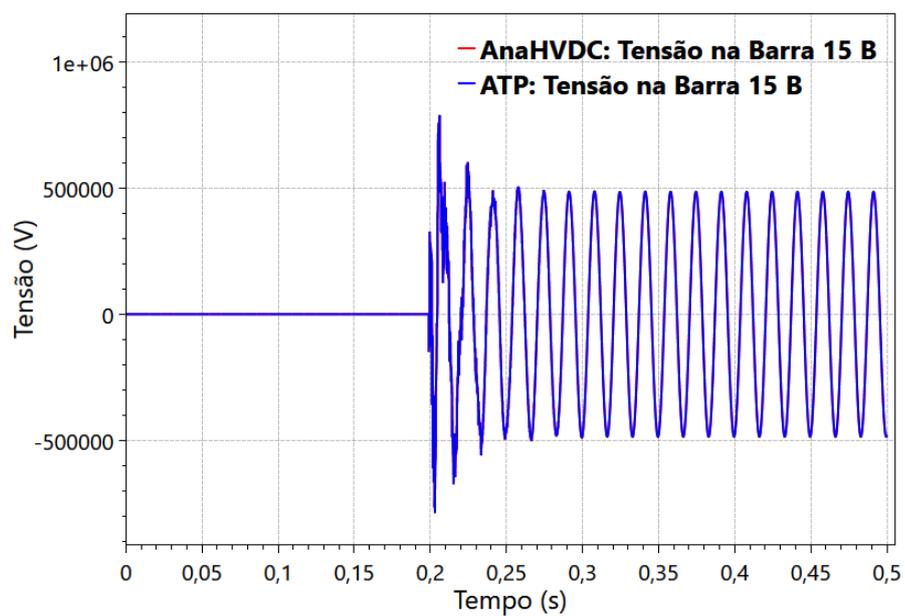


Figura 113 – Energização de LT (com para-raios): Tensão na barra 15, fase B

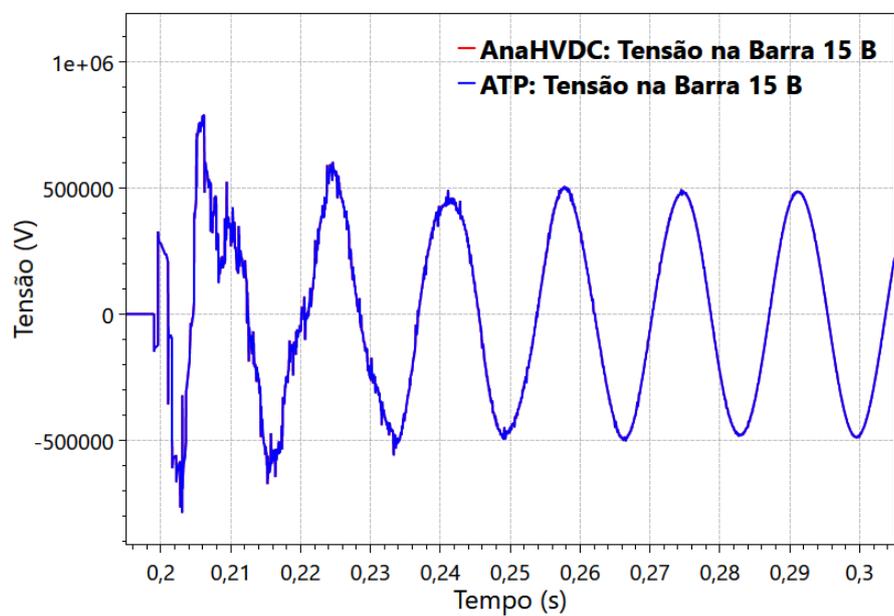


Figura 114 – Energização de LT (com para-raios): Tensão na barra 15, fase B, com ampliação da faixa de visualização

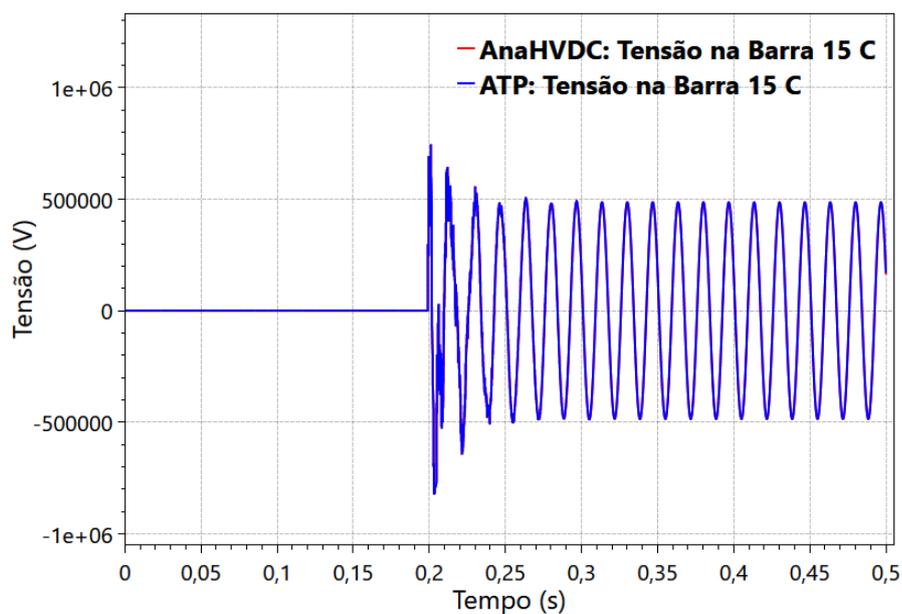


Figura 115 – Energização de LT (com para-raios): Tensão na barra 15, fase C

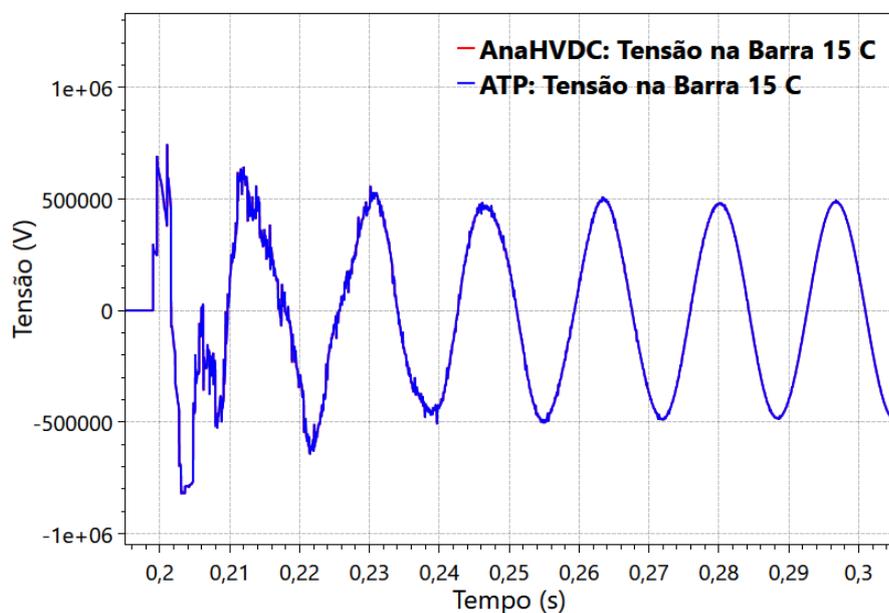


Figura 116 – Energização de LT (com para-raios): Tensão na barra 15, fase C, com ampliação da faixa de visualização

Todos os casos foram visualmente coincidentes corroborando a validação do modelo proposto. A próxima etapa consiste na verificação da energia calculada no

equipamento. Desse modo, são comparadas as três fases. Os resultados seguem da Figura 117 até a Figura 122.

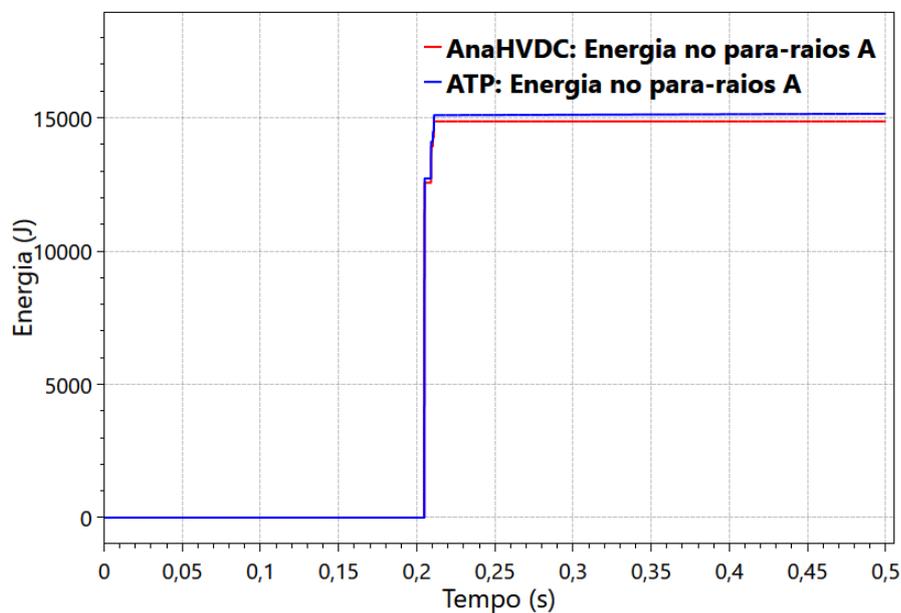


Figura 117 – Energização de LT (com para-raios): Energia na barra 15, fase A

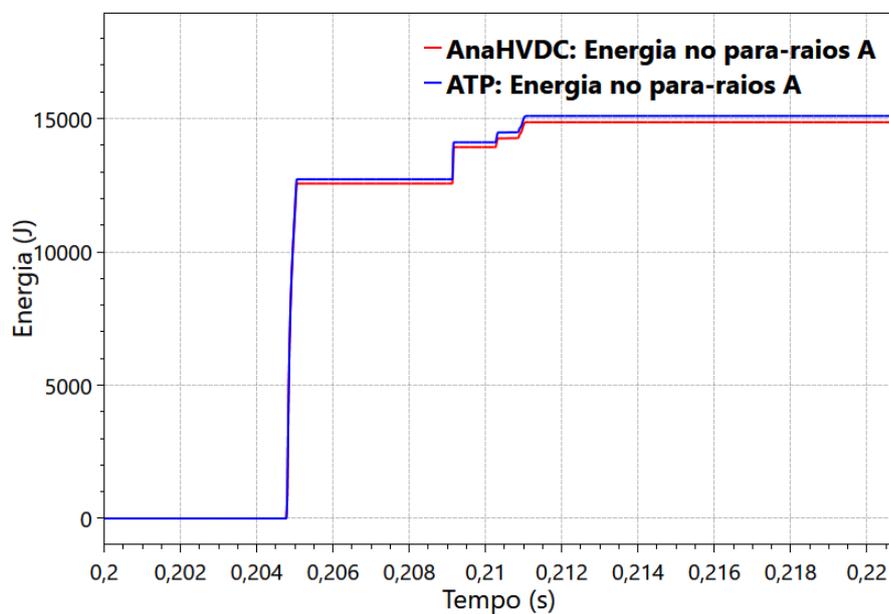


Figura 118 – Energização de LT (com para-raios): Energia na barra 15, fase A, com ampliação da faixa de visualização

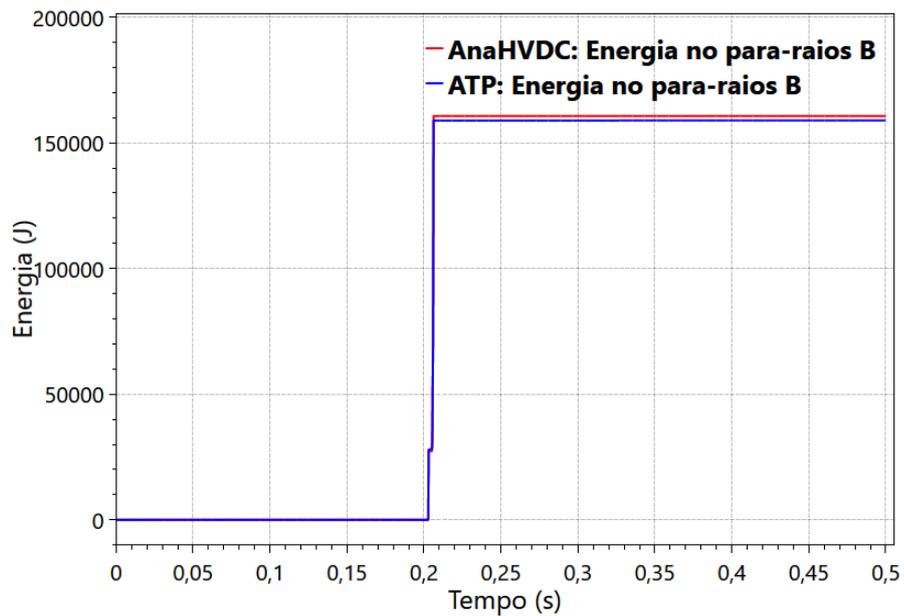


Figura 119 – Energização de LT (com para-raios): Energia na barra 15, fase B

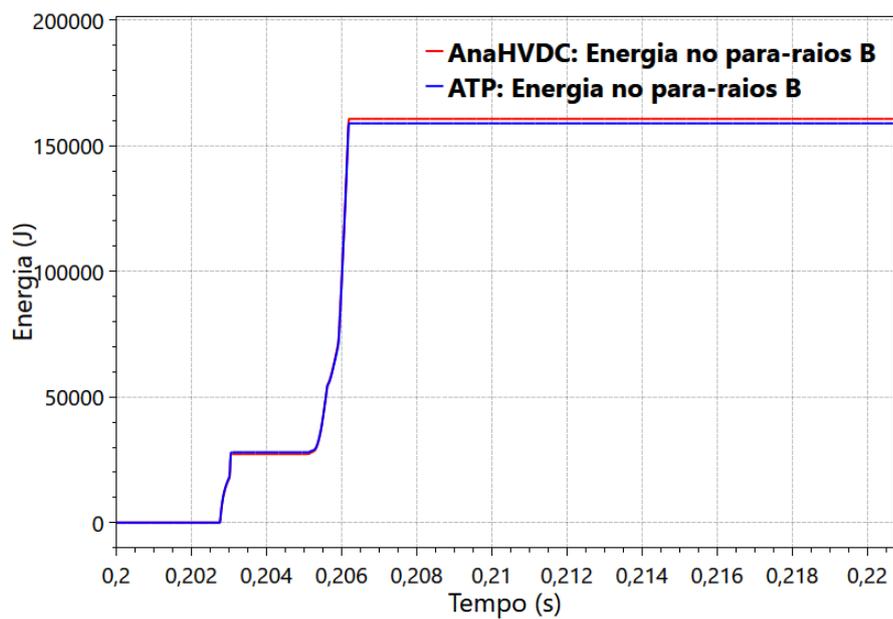


Figura 120 – Energização de LT (com para-raios): Energia na barra 15, fase B, com ampliação da faixa de visualização

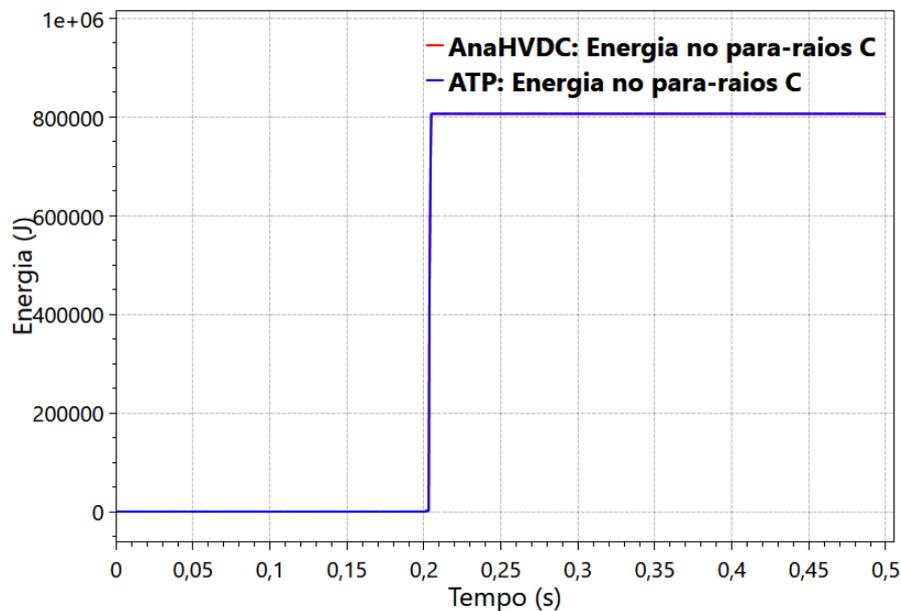


Figura 121 – Energização de LT (com para-raios): Energia na barra 15, fase C

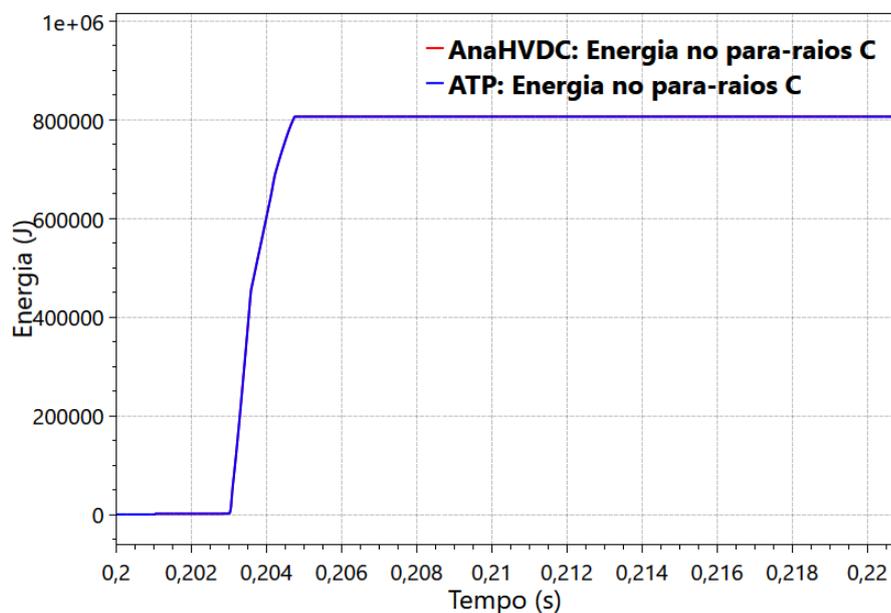


Figura 122 – Energização de LT (com para-raios): Energia na barra 15, fase C, com ampliação da faixa de visualização

Nota-se uma diferença visual perceptível em alguns dos resultados. Isso se justifica por dois motivos: i) o ponto de operação não é rigorosamente o mesmo e; ii) há interpolação do primeiro trecho no ATP e isso não ocorre no AnaHVDC. Assim, uma vez

que ocorre atuação do para-raios no ATP, mesmo que os valores de tensões se situem no nominal há uma corrente que sempre está fluindo no equipamento, portanto, potência e conseqüentemente energia. A Figura 123 mostra a potência no para-raios no ATP quando o sistema já está em regime permanente no valor nominal de tensão. Ou seja, no ATP a energia está continuamente sendo integrada. Nesse mesmo período no AnaHVDC, as potências das três fases do para-raios são nulas.

Contudo, a diferença numérica observada não resultaria em análise distinta. Se para um caso a energia do para-raios fosse superior ao limite, para o outro caso também seria. Mesmo que fosse uma situação limítrofe, ainda assim, as recomendações seriam da mesma natureza qualitativa.

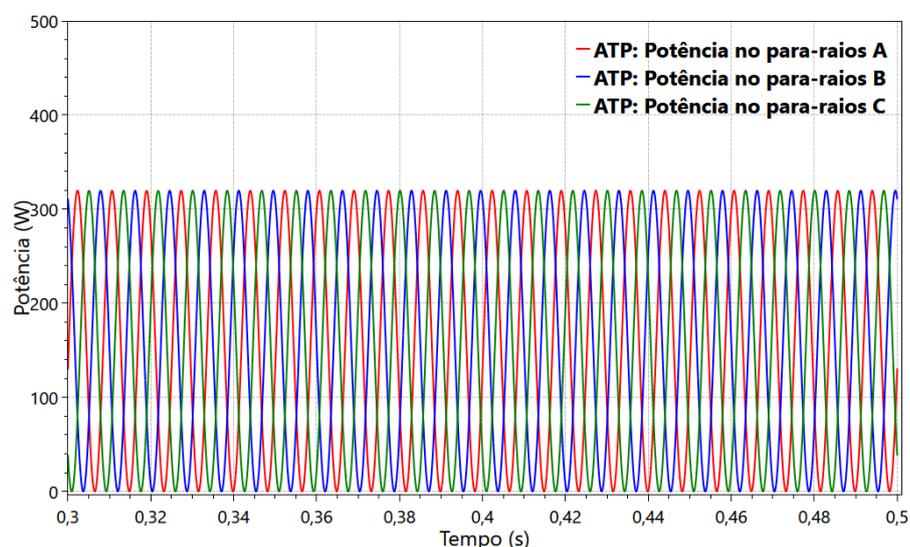


Figura 123 – Energização de LT (com para-raios): Potência no para-raios

Por fim, ilustra-se nessa seção a mitigação das sobretensões em cada fase. Esses resultados estão na Figura 124, Figura 125 e Figura 126.

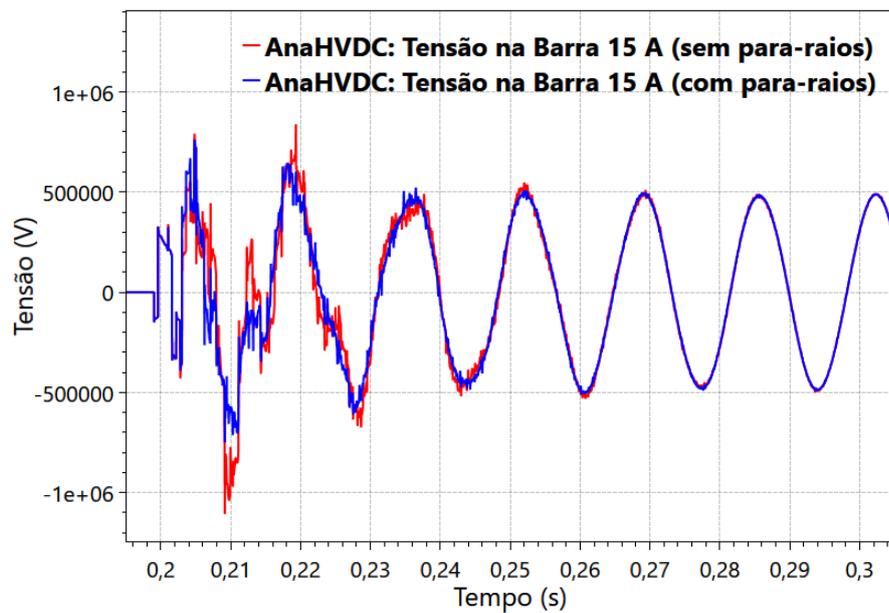


Figura 124 – Energização de LT (sem PR x com PR): Tensão na Barra 15, fase A.

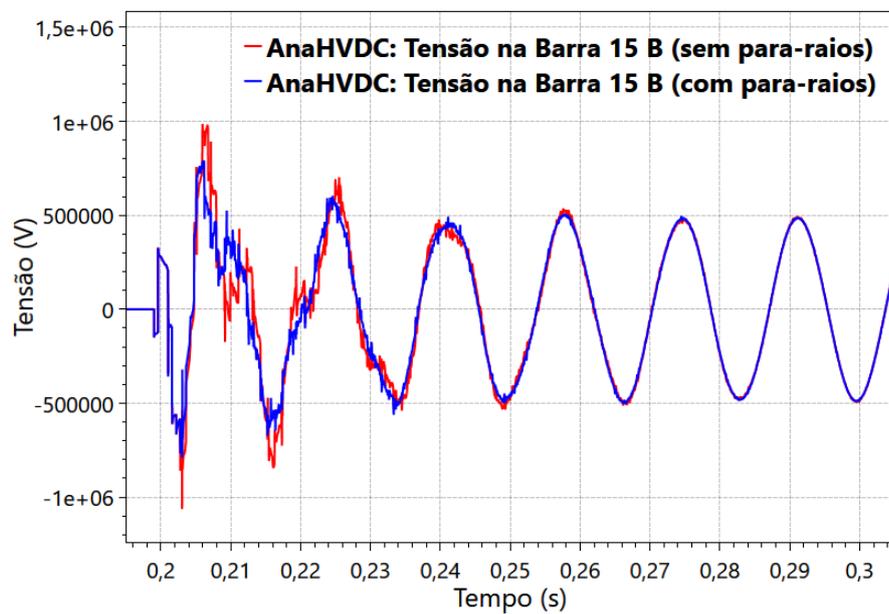


Figura 125 – Energização de LT (sem PR x com PR): Tensão na Barra 15, fase B.

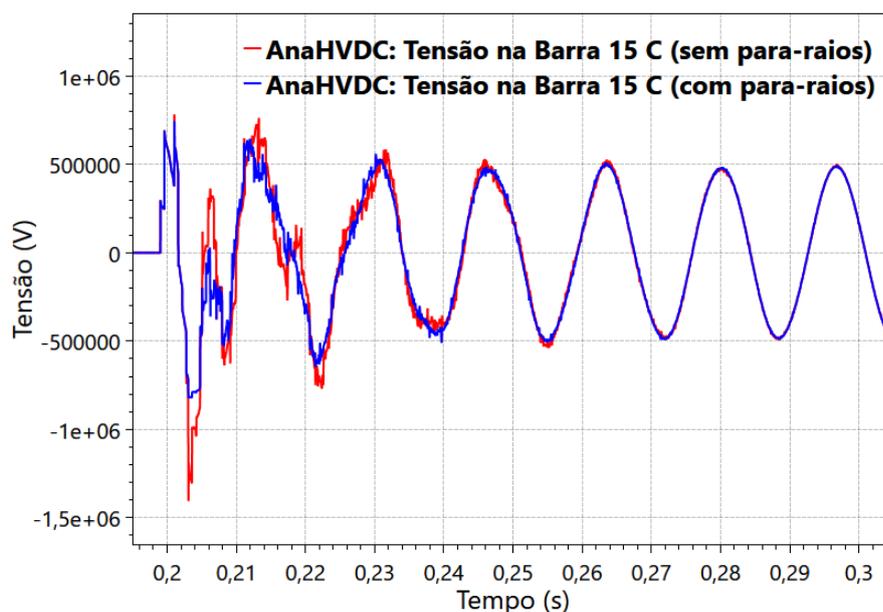


Figura 126 – Energização de LT (sem PR x com PR): Tensão na Barra 15, fase C

Numericamente as sobretensões observadas estão descritas na Tabela 19. Ressalta-se que a base utilizada para o cálculo da sobretensão em pu foi de $V_{base} = 500\sqrt{2/3} = 408,24kV$.

Tabela 19 – Energização de LT: Mitigação das sobretensões com uso do para-raios

Fase	Energização de LT sem para-raios		Energização de LT com para-raios		Mitigação %
	[kV]	[pu]	[kV]	[pu]	
Fase A	-1106,1	2,7094	759,85	1,8612	31,30
Fase B	-1064,4	2,6072	789,2	1,9331	25,85
Fase C	-1404,2	3,4396	-823,45	2,017	41,36

Conclui-se que a validação mostrou os resultados adequados, visualmente coincidentes. Ou seja, a ferramenta proposta está apta a realizar estudos de energização de linhas de transmissão. Além disso, entende-se que retirar a interpolação inicial fornece um resultado mais coerente. No ATP a energia é continuamente integrada, mesmo que com uma taxa baixa. Desse modo, a próxima etapa consiste na energização de transformadores, agora não apenas contando com o modelo de para-raios, mas também com o modelo de magnetização.

4.2.3 Energização de transformador

A energização de transformadores foi simulada considerando a inclusão do modelo de magnetização. Essa seção de resultados apresenta as sobretensões observadas no terminal de baixa do transformador e suas respectivas correntes de magnetização. Visando um maior valor de sobretensão, o transformador foi energizado depois de um trecho da linha de transmissão de 200km e a chave de energização contou com dispersão dos polos, sendo os tempos de fechamento $t_a = 0,203s$, $t_b = 0,200s$ e $t_c = 0,197s$.

A Figura 127 apresenta o diagrama unifilar no ATP para a energização de transformador. Note que a linha de transmissão já está energizada e ocorre energização do transformador entre as barras 15 e 16. Além disso, há inclusão dos para-raios em ambos os terminais da linha quanto em ambos os terminais do transformador. O transformador tem os seguintes parâmetros: 1000MVA, 500/230kV e impedância de dispersão de 10% (ou 66,315mH).

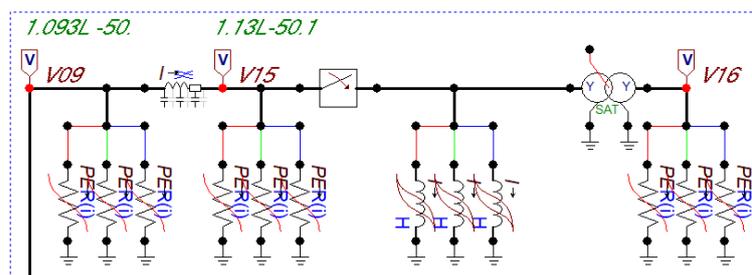


Figura 127 – Diagrama unifilar no ATP: energização de transformadores

A Figura 128 mostra a curva de magnetização no formato I(A) versus Fluxo (Wb) proveniente da janela de diálogo do ATPDraw.

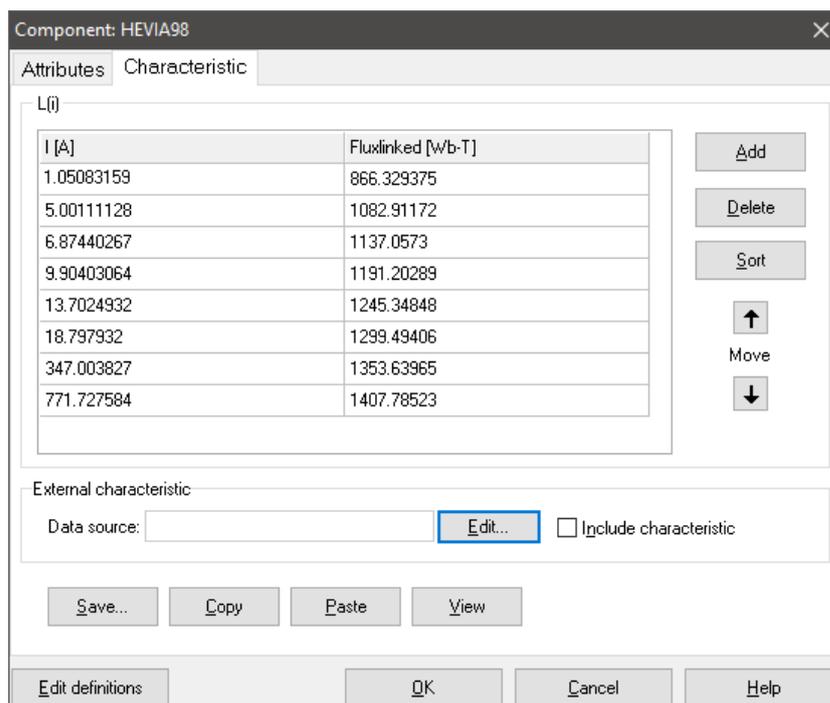


Figura 128 – Dados: Corrente *versus* Fluxo do magnetização

Os resultados considerando o lado de 230kV do transformador (barra 16), com o objetivo de validar o modelo. Para melhor visualização, divide-se a apresentação dos resultados por fase e dando um enfoque nos primeiros ciclos depois da energização. Tais resultados seguem da Figura 129 até a Figura 134.

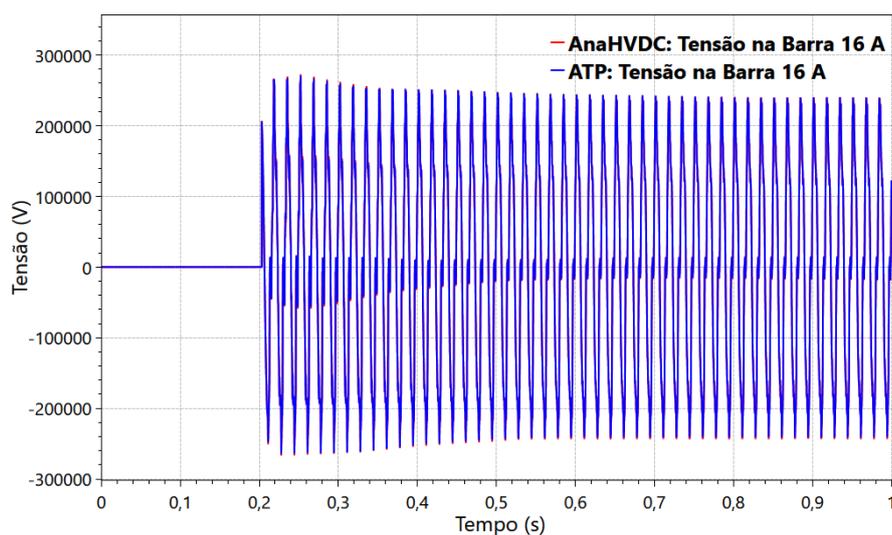


Figura 129 – Energização de transformador: Tensão na barra 16, fase A

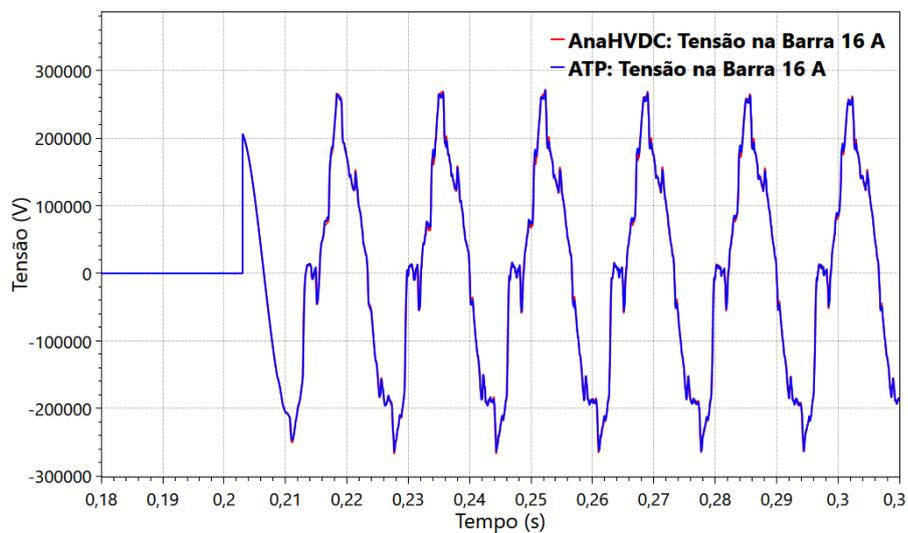


Figura 130 – Energização de transformador: Tensão na barra 16, fase A, com ampliação da faixa de visualização

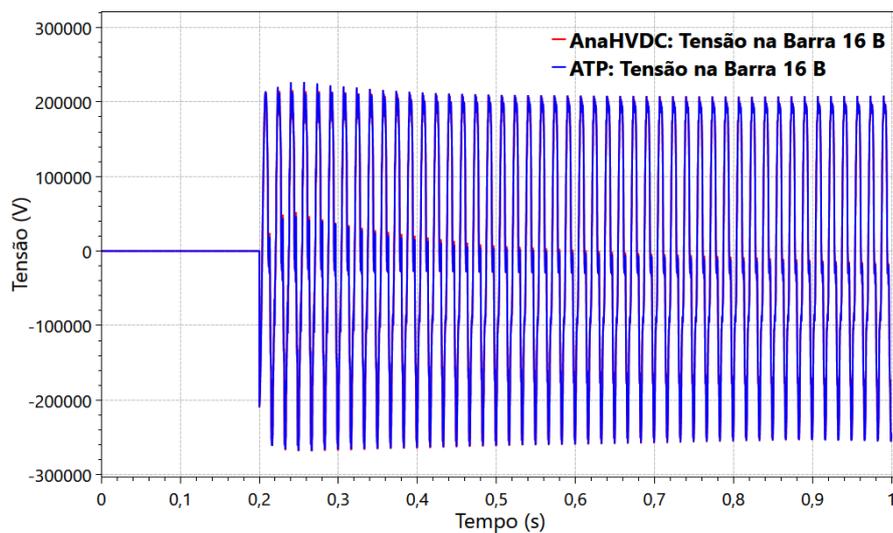


Figura 131 – Energização de transformador: Tensão na barra 16, fase B

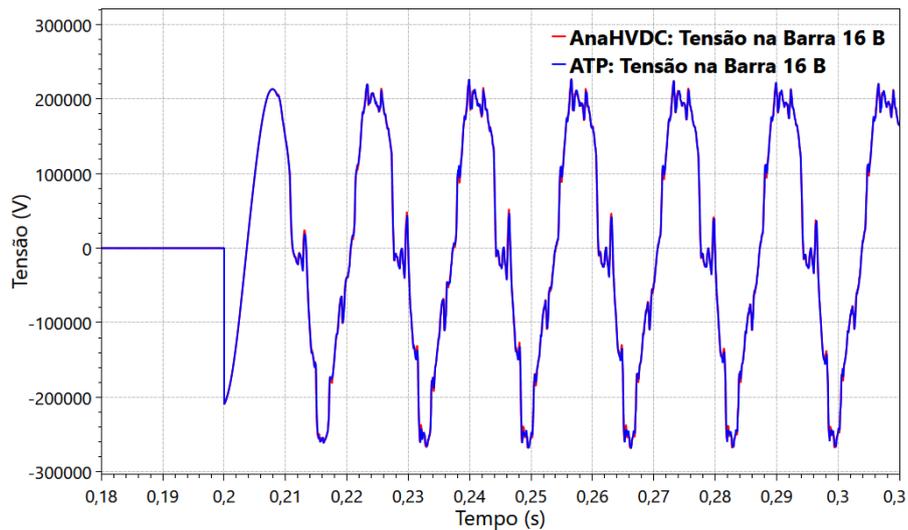


Figura 132 – Energização de transformador: Tensão na barra 16, fase B, com ampliação da faixa de visualização

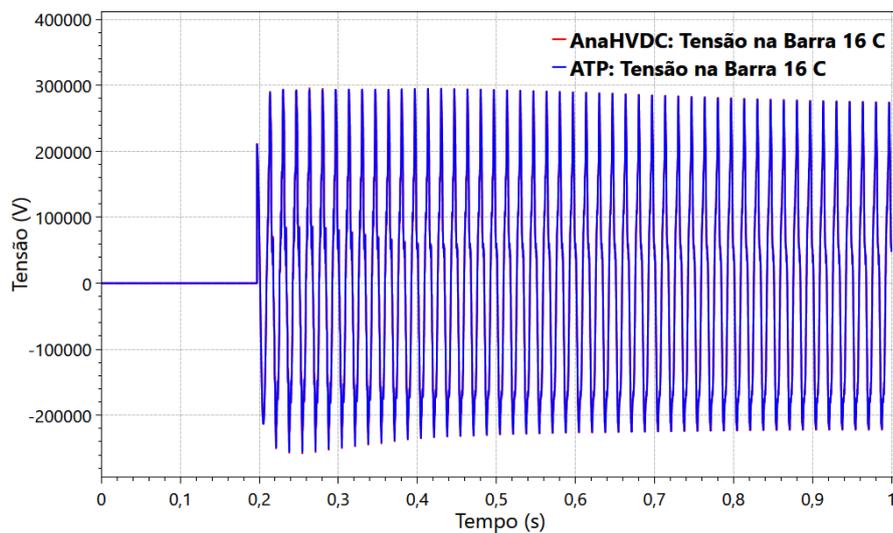


Figura 133 – Energização de transformador: Tensão na barra 16, fase C

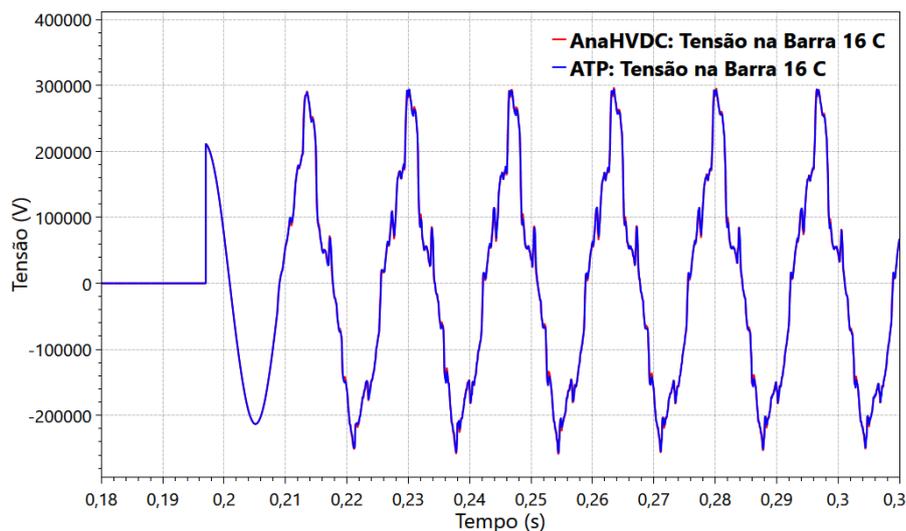


Figura 134 – Energização de transformador: Tensão na barra 16, fase C, com ampliação da faixa de visualização

Cabe, nessa etapa, fazer uma consideração acerca dos resultados obtidos. As simulações indicam uma sobretensão com conteúdo harmônico sustentada em regime permanente, caracterizando assim o fenômeno denominado ferrorressonância. Uma forma de comparar é traçar uma curva de referência que seria a tensão de 230kV nominal e puramente senoidal. Na Figura 135, as características de ferrorressonância se mostram presentes, mas ainda não há regime permanente. Pela definição em [105] diz-se que é uma condição de ressonância elétrica que está associada com a saturação de um dispositivo eletromagnético, a exemplo de um transformador, através de capacitâncias existentes no sistema, a exemplo da linha de transmissão.

Os eventos que podem desencadear o fenômeno da ferrorressonância são diversos, relacionados com transitórios no sistema elétrico, ocorrência ou remoção de defeitos e situações de manobra como energização ou desenergização de transformadores ou cargas indutivas.

As sobretensões e em alguns casos sobrecorrentes sustentadas que se mantêm em regime permanente distorcido promovem sobreaquecimento dos transformadores, ruídos excessivos e atuação indevida dos dispositivos de proteção.

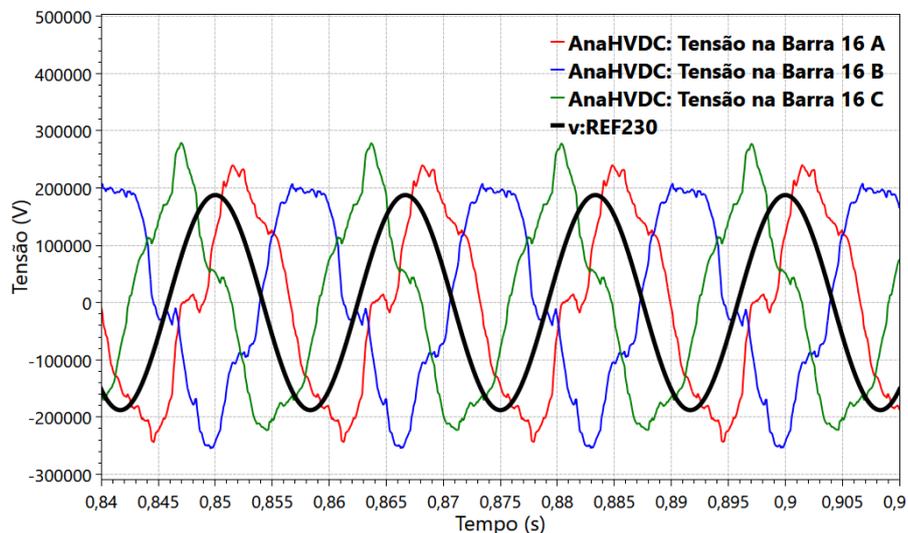


Figura 135 – Energização de transformador: Tensão na barra 16 (Ferroressonância)

A corrente de magnetização em ambos os programas para cada uma das fases também é apresentada. Novamente é mostrado o tempo de simulação total e ampliação da faixa de visualização no transitório. Os resultados seguem da Figura 136 até a Figura 141.

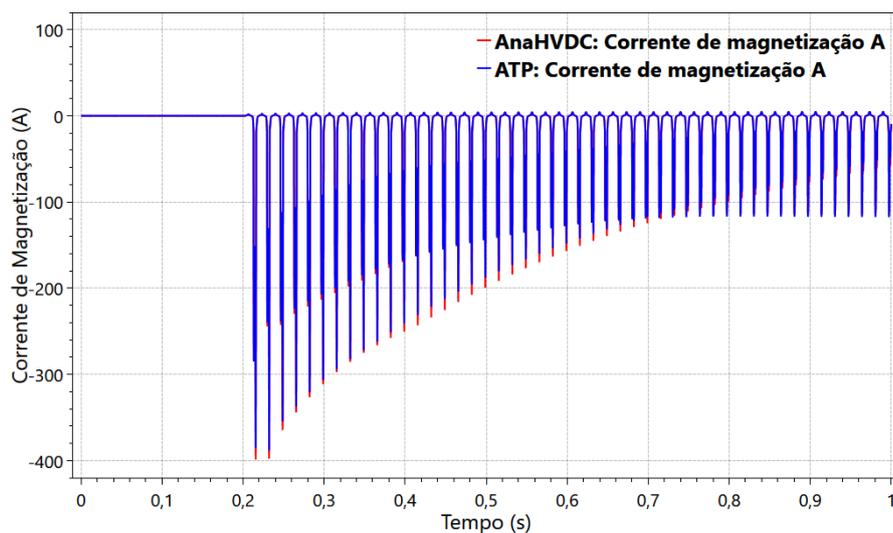


Figura 136 – Energização de transformador: Corrente de magnetização, fase A

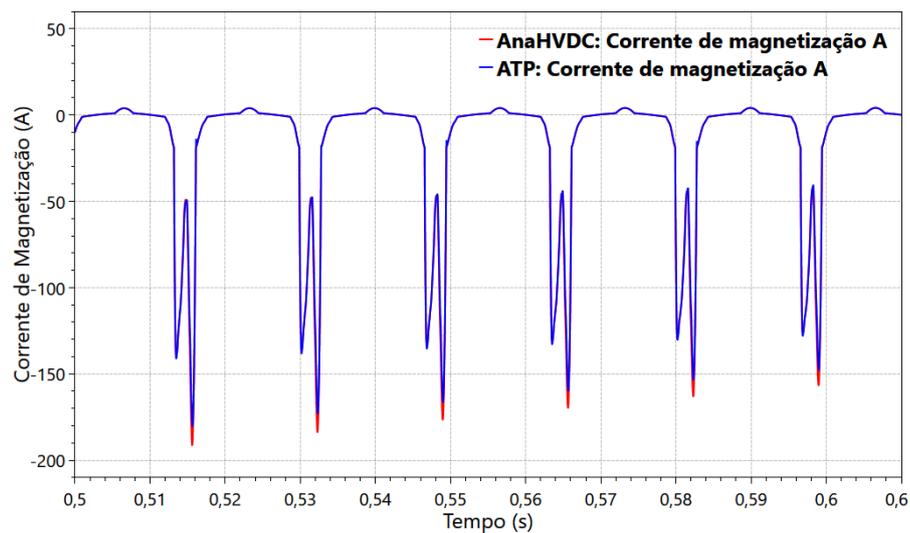


Figura 137 – Energização de transformador: Corrente de magnetização, fase A, com ampliação da faixa de visualização

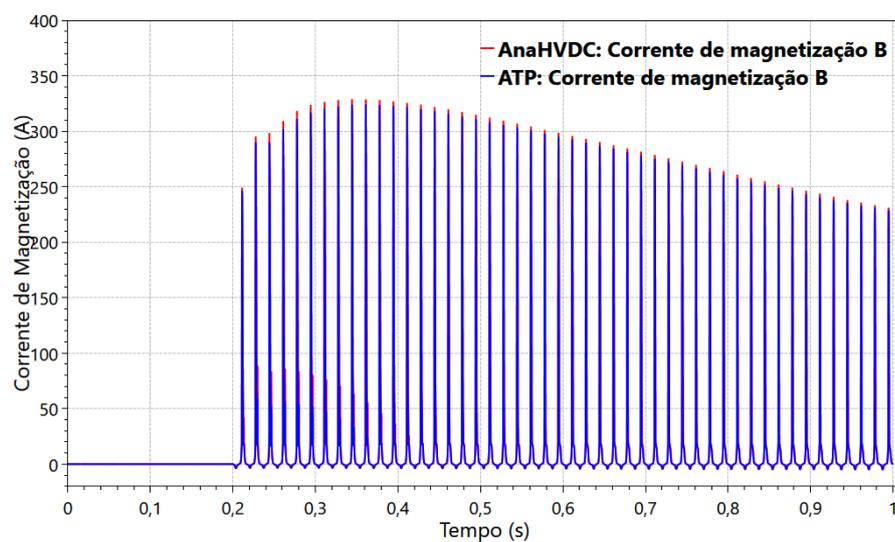


Figura 138 – Energização de transformador: Corrente de magnetização, fase B

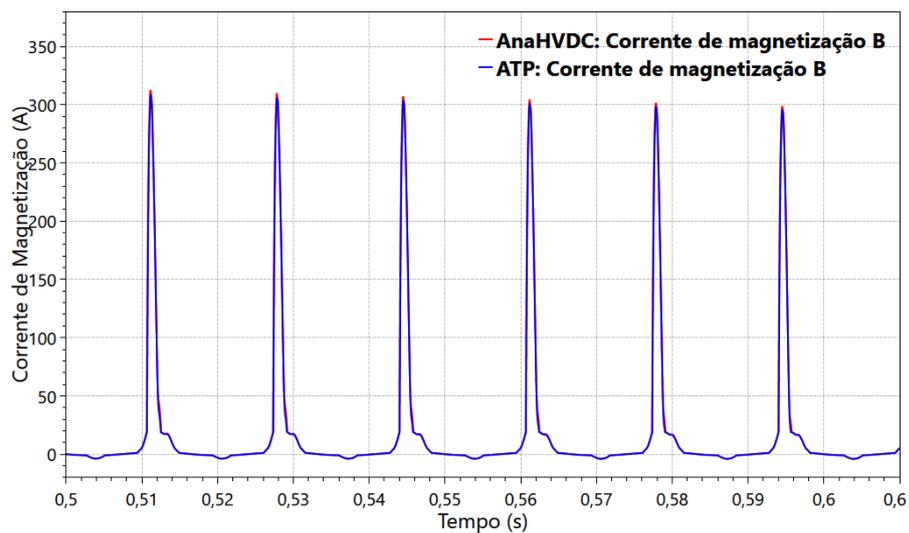


Figura 139 – Energização de transformador: Corrente de magnetização, fase B, com ampliação da faixa de visualização

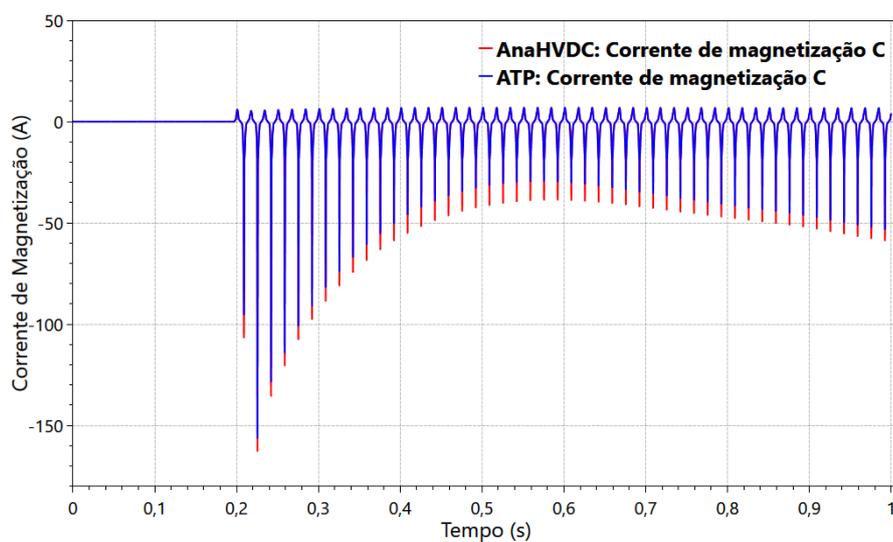


Figura 140 – Energização de transformador: Corrente de magnetização, fase C

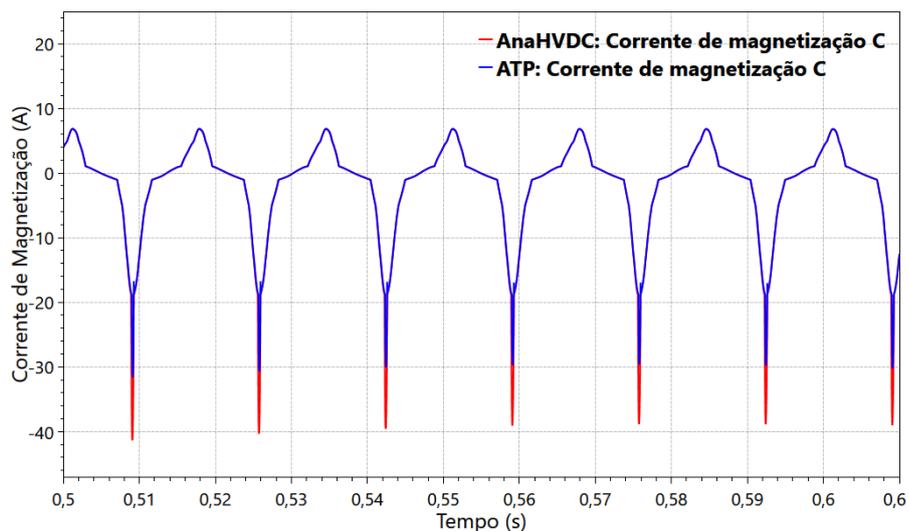


Figura 141 – Energização de transformador: Corrente de magnetização, fase C, com ampliação da faixa de visualização

Todos os casos comparando AnaHVDC com ATP foram coincidentes em teoria corroborando a validação do modelo proposto. No entanto, apesar do fenômeno de ferrorressonância estar aparente, esse caso apresenta uma energização de transformador logo após uma linha de transmissão longa. Esse efeito amplifica a ferrorressonância em uma situação não comum na prática. Uma das alternativas atenuadoras consiste na compensação reativa da linha de transmissão, diminuindo seu efeito capacitivo e em consequência disso, os efeitos da ferrorressonância. Optou-se, em um primeiro momento manter a linha de transmissão não compensada para efeitos de visualização do fenômeno de ferrorressonância. Como etapa posterior, sugere-se a compensação de 80% do reativo da linha de transmissão de 300km de comprimento. Nessa nova situação serão apresentadas as tensões no terminal secundário do transformador e as componentes real e imaginária dos fasores dinâmicos.

Para a compensação da linha de transmissão, parte-se dos valores corrigidos hiperbolicamente de sequência positiva (conforme apresentado na Tabela 20) e aplica-se o fator percentual de reativo a ser compensado, convertendo-se para valores de indutância.

Tabela 20 – Parâmetros corrigidos hiperbolicamente da linha de transmissão de 300km no formato ANAREDE/ANAFAS.

Parâmetro	Valor	Unidade
$r_{1\%}$	0,2598	%
$x_{1\%}$	3,9020	%
Q_1	372,85	Mvar

A compensação é calculada usando fator percentual de compensação (p_{comp}) conforme ilustrado na equação (310). A indutância, por sua vez, segue calculada conforme a equação (311).

$$Q_{comp} = p_{comp} \frac{Q_1}{2} \quad (310)$$

$$L_{comp} = \frac{V_{base}^2}{Q_{comp}\omega} \quad (311)$$

A Figura 142 apresenta o diagrama unifilar no ATP para a energização de transformador com a compensação da linha de transmissão. Os resultados considerando o lado de 230kV do transformador (barra 16) são apresentados e seguem da Figura 143 até a Figura 148.

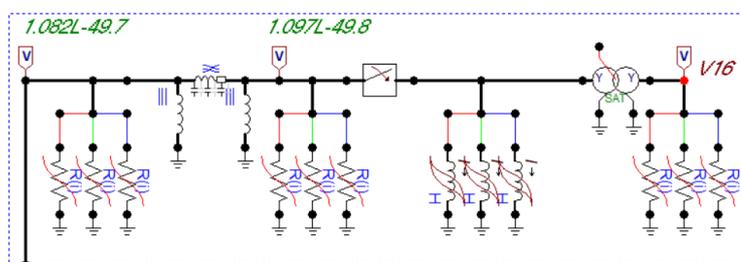


Figura 142 – Diagrama unifilar no ATP: energização de transformadores com compensação reativa de 80%

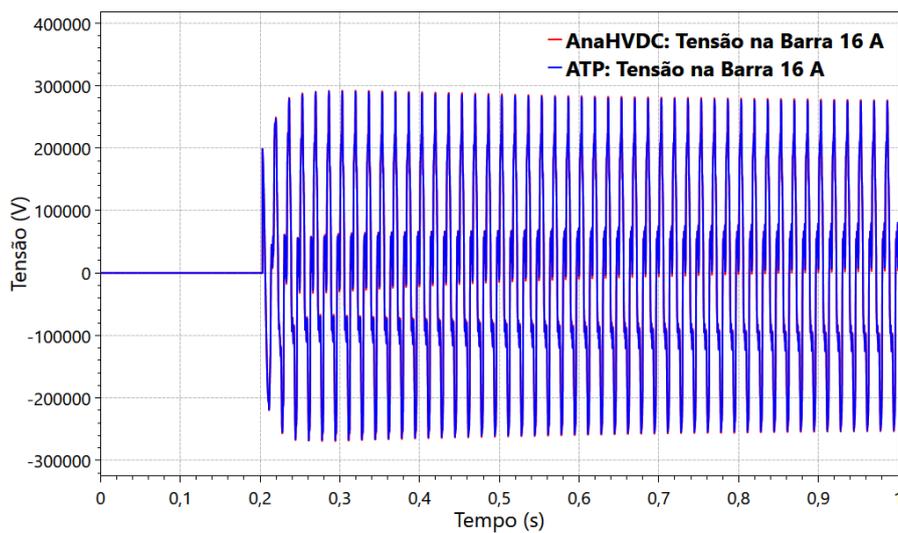


Figura 143 – Energização de transformador com LT compensada em 80%: Tensão na barra 16, fase A

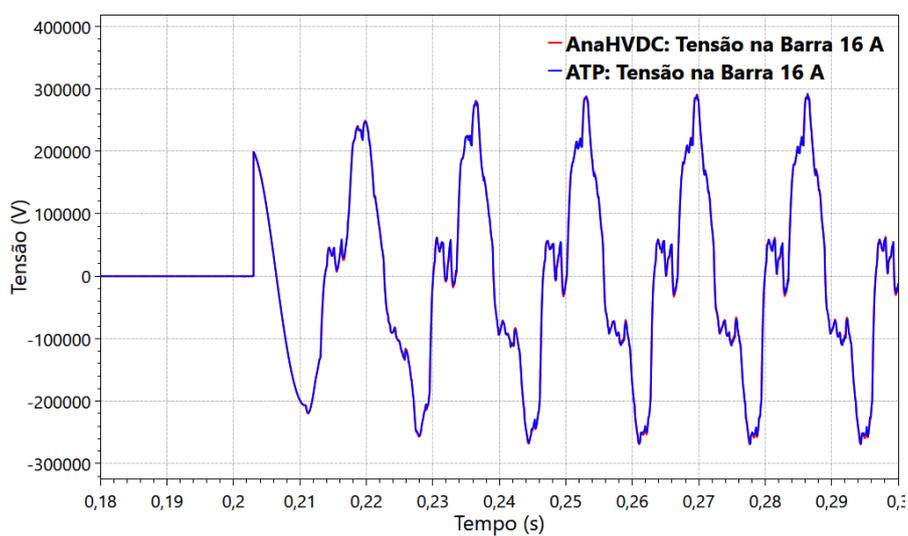


Figura 144 – Energização de transformador com LT compensada em 80%: Tensão na barra 16, fase A, com ampliação da faixa de visualização

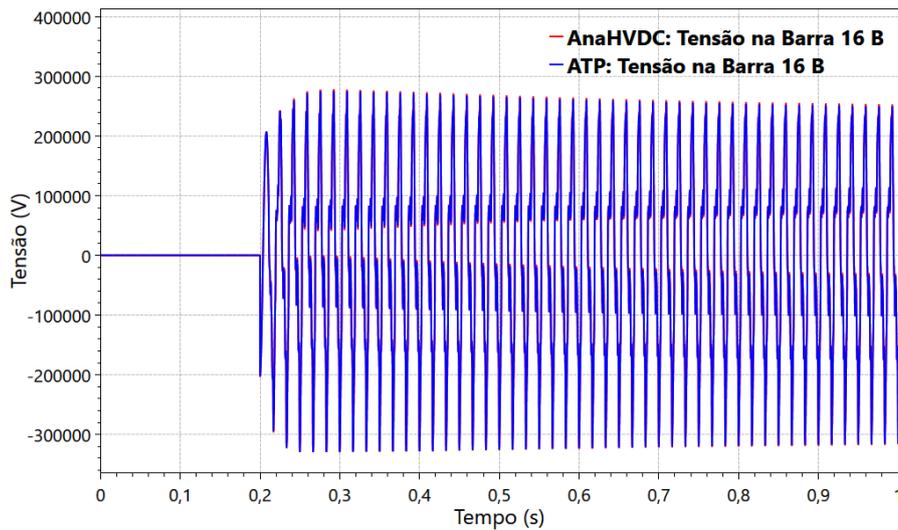


Figura 145 – Energização de transformador com LT compensada em 80%: Tensão na barra 16, fase B

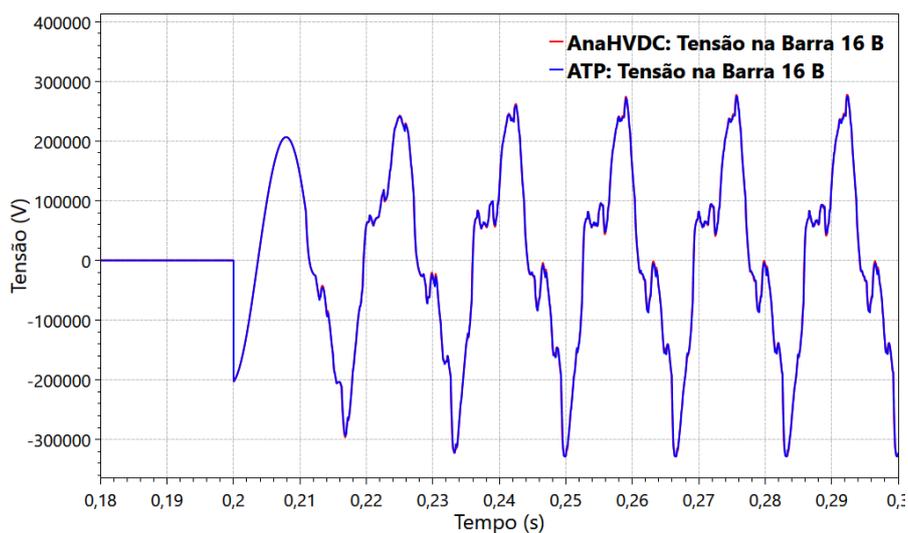


Figura 146 – Energização de transformador com LT compensada em 80%: Tensão na barra 16, fase B, com ampliação da faixa de visualização

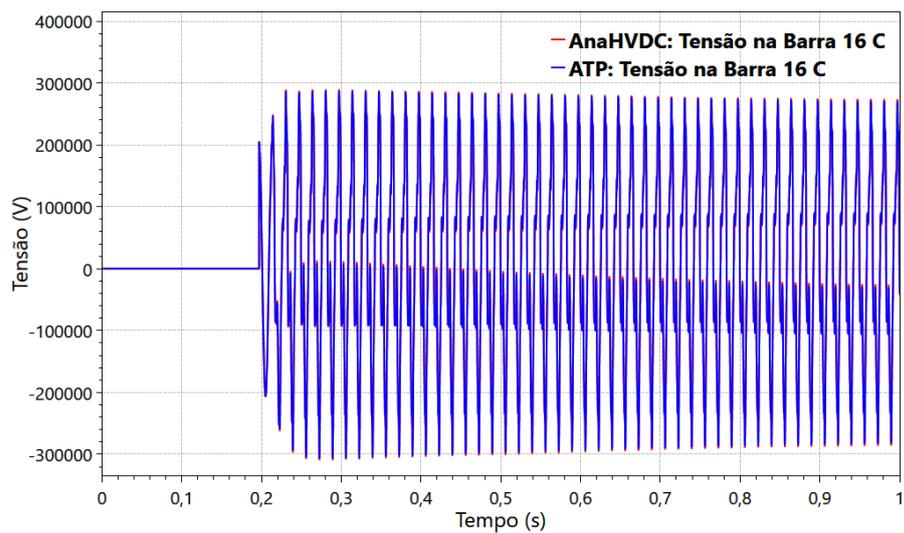


Figura 147 – Energização de transformador com LT compensada em 80%: Tensão na barra 16, fase C

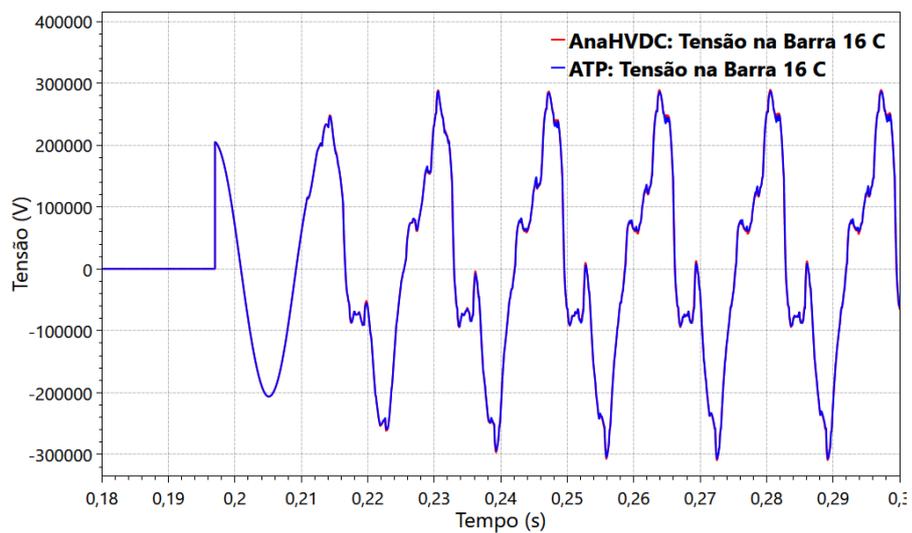


Figura 148 – Energização de transformador com LT compensada em 80%: Tensão na barra 16, fase C, com ampliação da faixa de visualização

A Figura 149, Figura 150 e Figura 151 apresentam as componentes real e imaginária dos fasores de tensão da barra 16 para as três fases. Nessas figuras, nota-se que os fasores variam no tempo. Isso exemplifica o caso da ferorrressonância no qual há sobretensões harmônicas sustentadas em regime permanente. Isso é, os fasores dinâmicos são capazes de representar esse fenômeno através da variação de suas componentes.

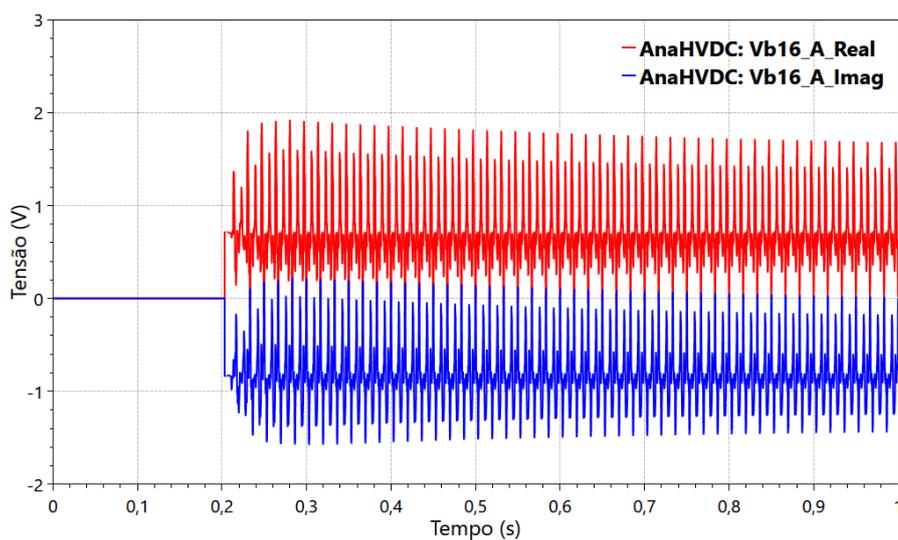


Figura 149 – Energização de transformador com LT compensada em 80%: Componentes real e imaginária dos fasores de tensão da fase A

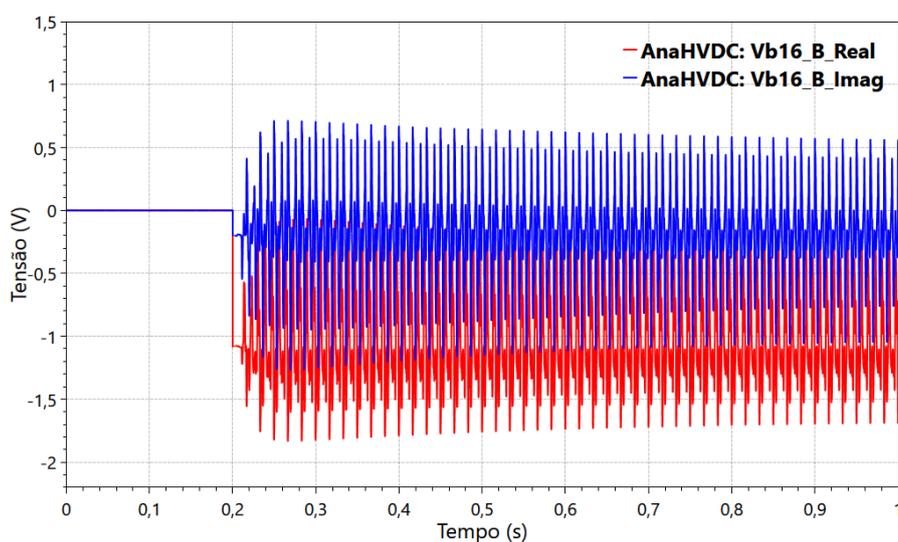


Figura 150 – Energização de transformador com LT compensada em 80%: Componentes real e imaginária dos fasores de tensão da fase B

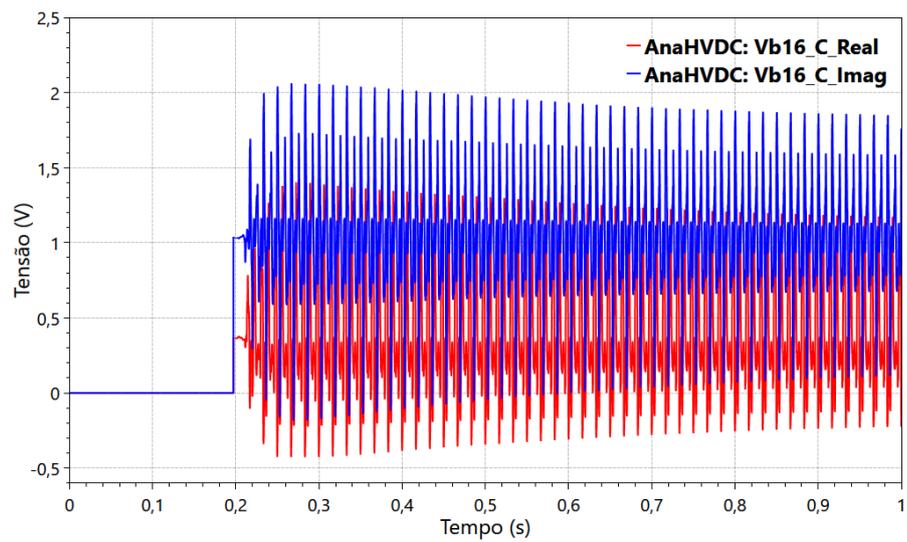


Figura 151 – Energização de transformador com LT compensada em 80%: Componentes real e imaginária dos fasores de tensão da fase C

4.2.4 Religamento de linha de transmissão

O religamento de linha proposto está localizado entre as barras 08 e 09. O defeito considerado foi monofásico com impedância de defeito resistiva de 10Ω (dentro da faixa de valores típicos) tanto para o religamento tripolar como para o religamento monopolar. Foram considerados apenas religamentos com sucesso nessa etapa. Para o caso particular do religamento monopolar faz-se necessário realizar o estudo da extinção do arco secundário, que será visto logo após apresentação do caso monopolar.

4.2.4.1 Religamento tripolar

A Figura 152 apresenta o diagrama unifilar no ATP para a análise do religamento. Somente pelo gráfico da topologia não há como saber se o religamento é tripolar ou monopolar, essa informação é obtida através dos tempos informados nas chaves. Além disso inserem-se os para-raios em ambos os terminais da linha proporcionando assim a mitigação das sobretensões observadas. O religamento ocorre entre as barras 08 e 09, sendo que os terminais da linha (depois do disjuntor que conecta a barra) receberam os nomes de 81 e 91 (no AnaHVDC) e V81 e V91 (no ATP).

Os disjuntores identificados pelas numerações (1) e (3) se referem à operação de abertura e fechamento do lado 08, respectivamente. E analogamente, os disjuntores (2) e (4) se referem à operação de abertura e fechamento do lado 09.

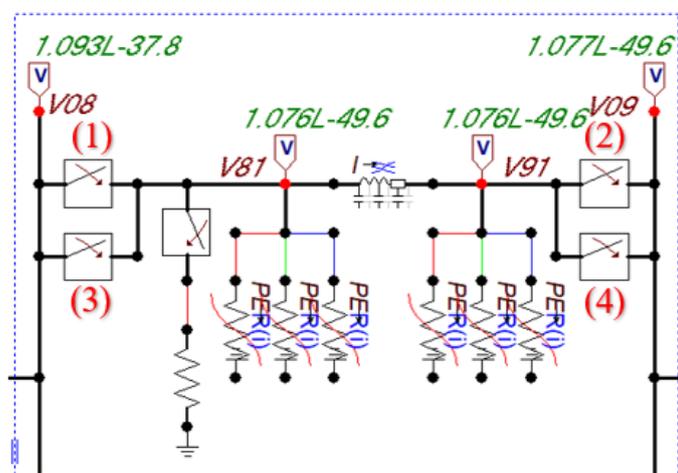


Figura 152 – Diagrama unifilar no ATP: religamento tripolar

A Figura 153 ilustra a sequência de operações para o religamento tripolar em um sistema de 500kV. Supondo que ocorre um defeito monofásico, na fase A, em $t = 0,02s$ no lado da barra 08. Note que um defeito monofásico poderia resultar em uma abertura monopolar, mantendo assim parte da potência transmitida. Contudo, supondo que não seja identificada a fase em defeito, uma situação mais conservadora consiste na abertura tripolar. Na sequência, a proteção para esse nível de tensão atua $100ms$ depois da identificação do defeito, no exemplo em $t = 0,12s$. O disjuntor do outro lado da linha tem um atraso de $20ms$ em relação ao primeiro disjuntor. Assim, sua operação ocorre em $t = 0,14s$. Observa-se que os critérios do ONS recomendam que em linhas de transmissão de 500kV o terminal líder abra em $80ms$ e o remoto em $100ms$ para poder respeitar a remoção do componente no tempo total de $100ms$. As simulações aqui apresentadas são então um pouco mais conservadoras que o exigido pelo ONS.

Nesse momento, a linha de transmissão encontra-se aberta em ambas as extremidades. Os valores adotados para o tempo morto no religamento de linhas de transmissão variam a depender de vários fatores, como o tipo de linha, a natureza do defeito, a topologia do sistema e as políticas operacionais da concessionária de energia.

Adotou-se o valor de tempo morto de $500ms$ para o nível de tensão de 500kV. Na prática algumas linhas do SIN podem adotar um tempo morto maior, na faixa de alguns segundos, para garantia do sucesso na manobra. A escolha do tempo morto no valor de $500ms$ é recomendada pelas diretrizes do ONS [6]. Após esse tempo decorrido, ocorrerá tentativa de religamento. Durante esse intervalo o defeito pode não ser extinto por ser de causa permanente, o que na tentativa de religamento vai resultar em nova abertura dos terminais e, portanto, religamento sem sucesso. Por outro lado, quando o defeito é extinto dentro do tempo morto, a tentativa de religamento se dará com sucesso.

Considerando o religamento com sucesso, ocorrerá fechamento dos disjuntores em $500ms$ depois da abertura do mesmo terminal. Isso é, haverá religamento no lado 08 (terminal local) depois de $500ms$ da abertura desse terminal e haverá religamento no lado 09 (terminal remoto) depois de $500ms$ da abertura desse terminal.

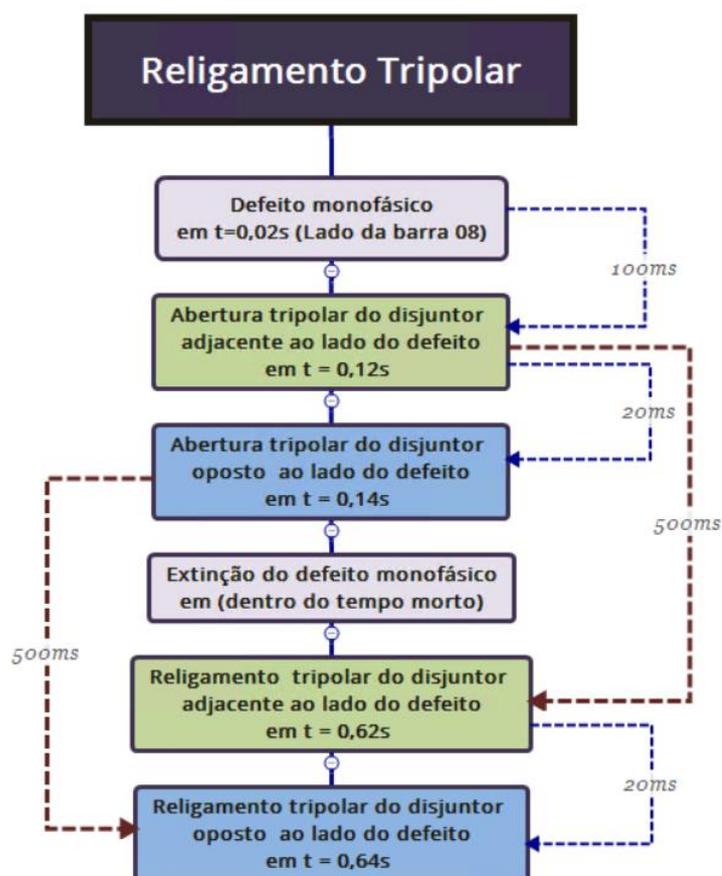


Figura 153 – Religamento tripolar: Sequência de operações

Os resultados no terminal oposto ao defeito seguem nas Figura 154, Figura 155 (ampliação da faixa de visualização na abertura) e Figura 156 (ampliação da faixa de visualização no religamento), Figura 157 e Figura 158; e no terminal do defeito seguem nas Figura 159, Figura 160 e Figura 161.

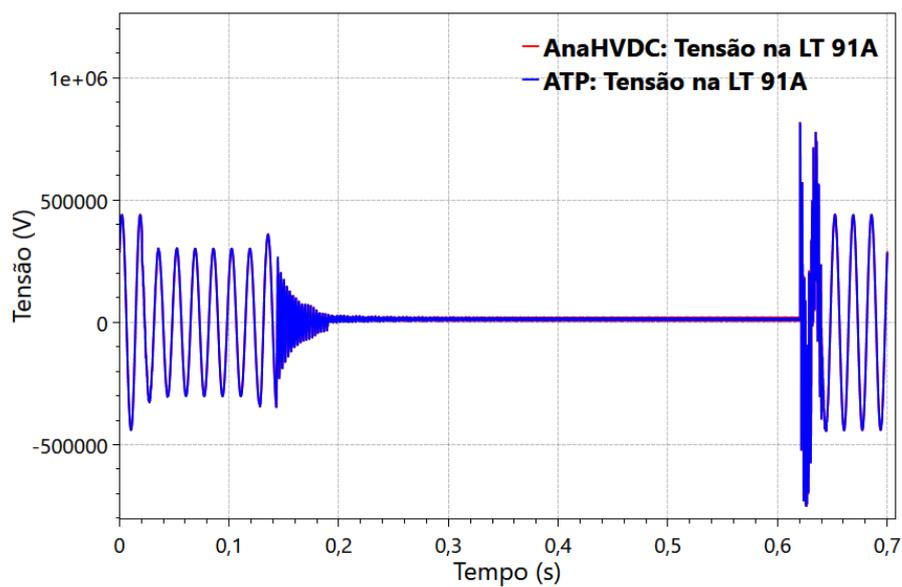


Figura 154 – Religamento tripolar de LT: Tensão no terminal 91 da LT, fase A

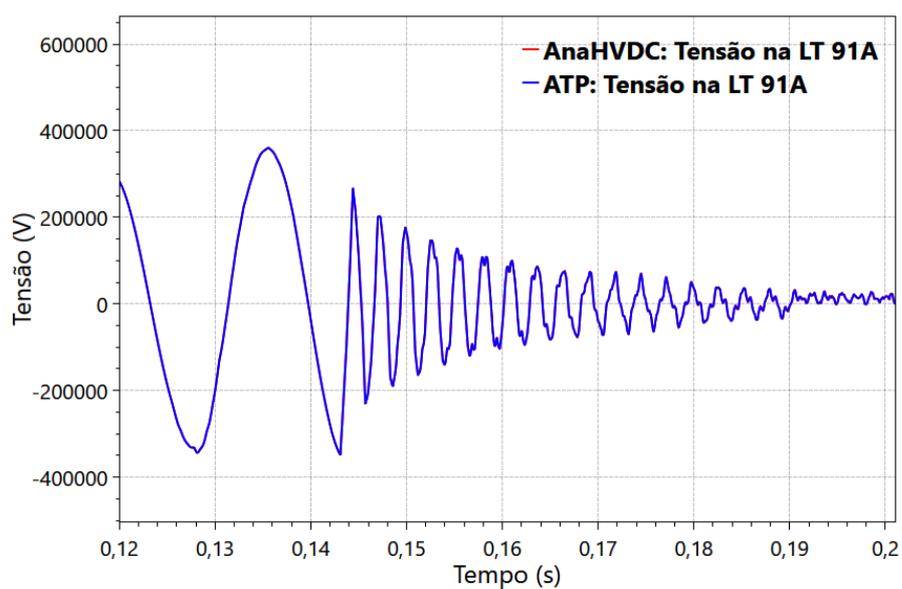


Figura 155 – Religamento tripolar de LT: Tensão no terminal 91 da LT, fase A, com ampliação da faixa de visualização na abertura da linha

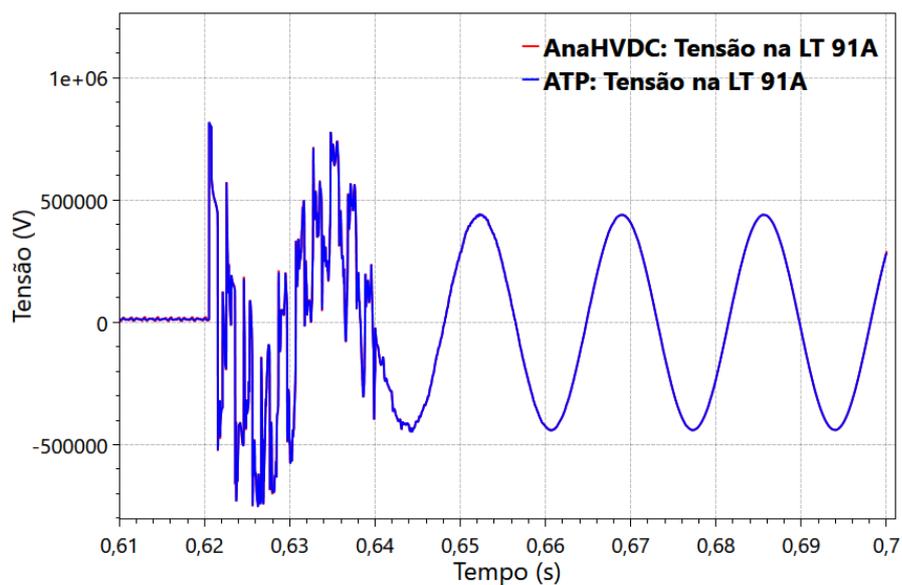


Figura 156 – Religamento tripolar de LT: Tensão no terminal 91 da LT, fase A, com ampliação da faixa de visualização no fechamento da linha

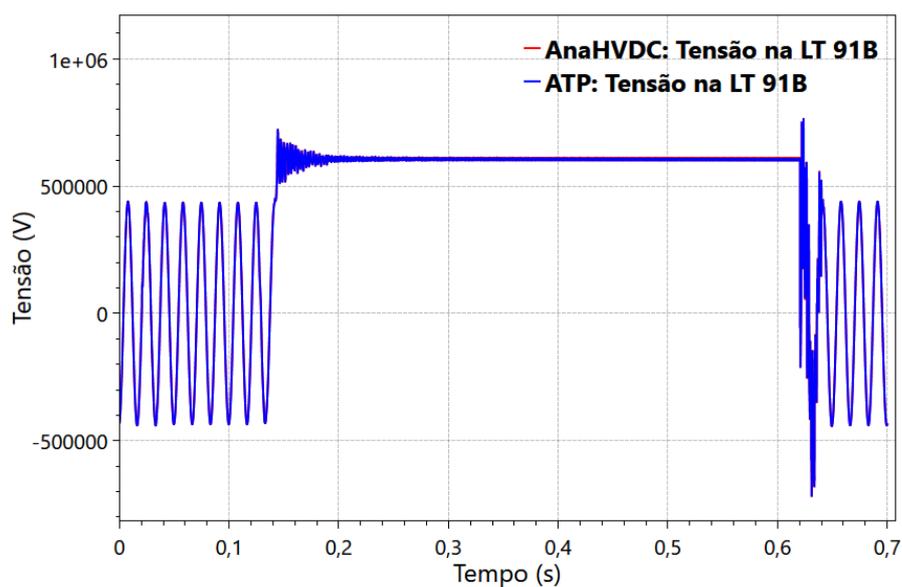


Figura 157 – Religamento tripolar de LT: Tensão no terminal 91 da LT, fase B

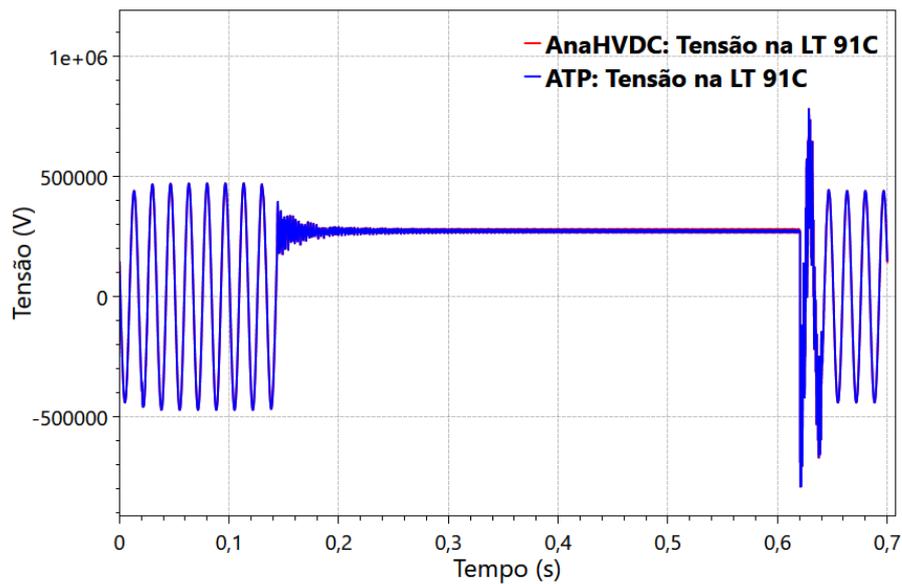


Figura 158 – Religamento tripolar de LT: Tensão no terminal 91 da LT, fase C

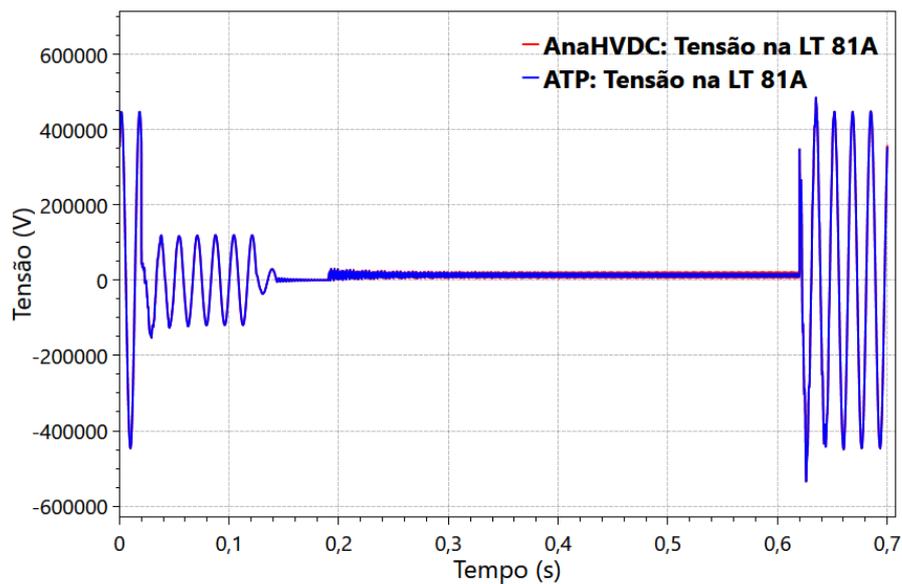


Figura 159 – Religamento tripolar de LT: Tensão no terminal 81 da LT, fase A

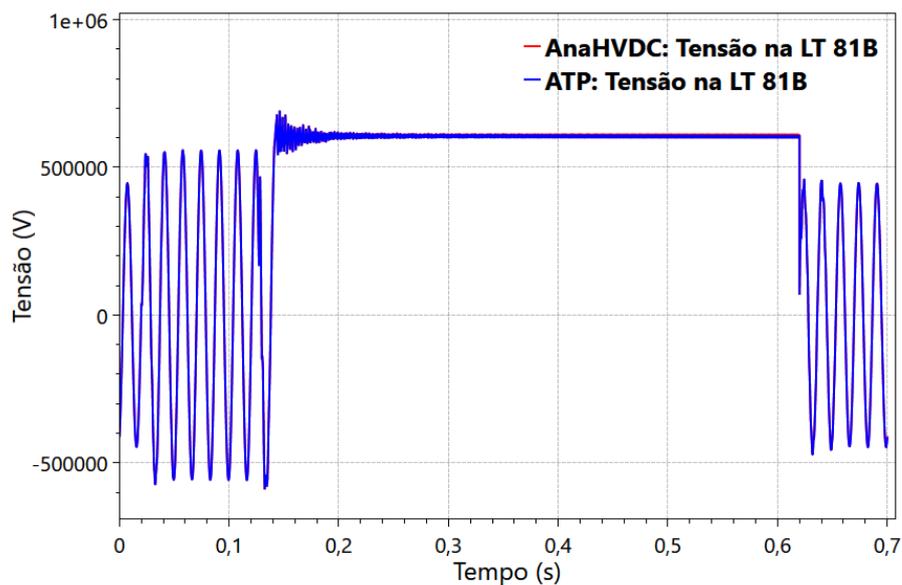


Figura 160 – Religamento tripolar de LT: Tensão no terminal 81 da LT, fase B

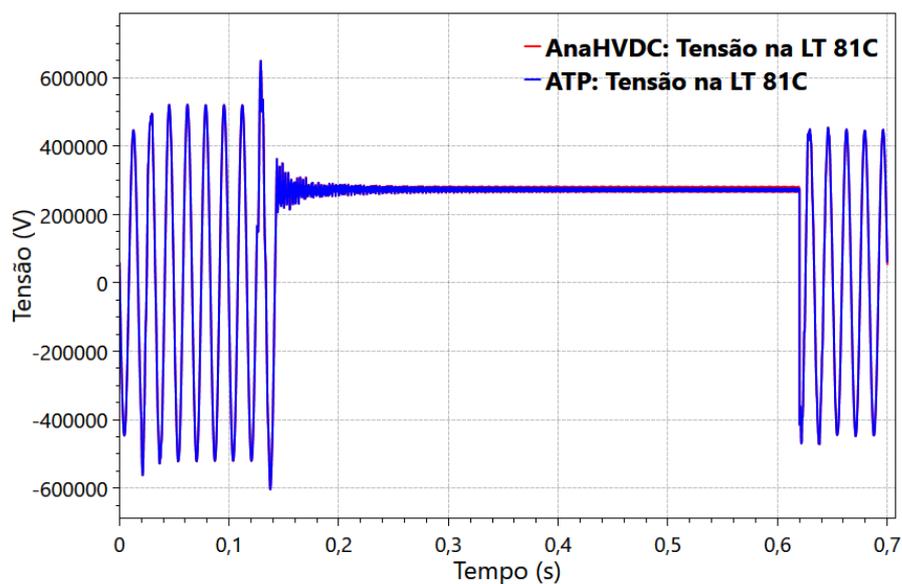


Figura 161 – Religamento tripolar de LT: Tensão no terminal 81 da LT, fase C

Todos os casos foram visualmente coincidentes corroborando a validação do modelo do para-raios e do estudo de religamento tripolar no programa AnaHVDC.

4.2.4.2 Religamento monopolar

A Figura 162 apresenta o diagrama unifilar no ATP para religamento monopolar. Topologicamente é a mesma Figura 152 já apresentada. Somente pela topologia não há como saber se o religamento é tripolar ou monopolar, essa informação é obtida através dos tempos informados nas chaves. Assim, como no caso do religamento tripolar, foram inseridos os para-raios em ambos os terminais da linha proporcionando a mitigação das sobretensões observadas. O religamento ocorre entre as barras 08 e 09, sendo que os terminais da linha (depois do disjuntor que conecta a barra) receberam os nomes de 81 e 91 (no AnaHVDC) e V81 e V91 (no ATP).

Os disjuntores identificados pelas numerações (1) e (3) se referem a operação de abertura e fechamento do lado 08, respectivamente. E analogamente, os disjuntores (2) e (4) se referem a operação de abertura e fechamento do lado 09.

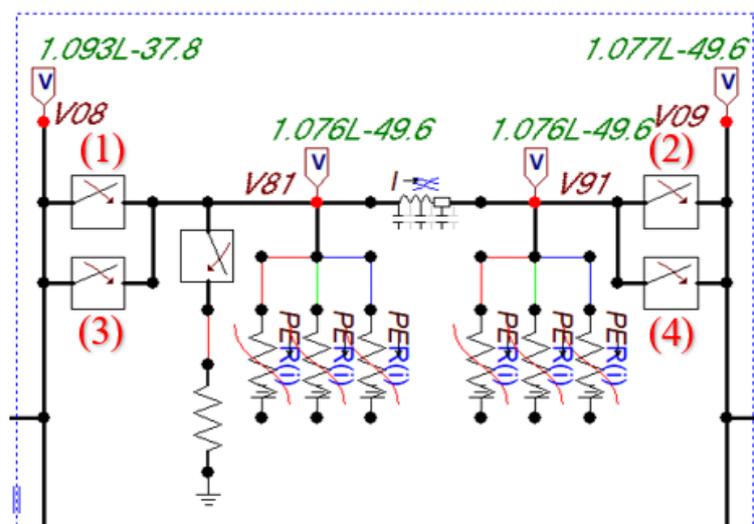


Figura 162 – Diagrama unifilar no ATP: religamento monopolar

A Figura 163 ilustra a sequência de operações para o religamento monopolar em um sistema de 500kV. Supondo que ocorra um defeito monofásico, na fase A, em $t = 0,02s$ no lado da barra 08. Na sequência, a proteção para esse nível de tensão atua 100ms depois da identificação do defeito, no exemplo em $t = 0,066667s$, abrindo a fase defeituosa. O disjuntor do outro lado da linha tem um atraso de 20ms em relação ao primeiro disjuntor. Assim, sua operação ocorre em $t = 0,086667s$. Ressalta-se que os tempos de abertura foram determinados de maneira a garantir que a fase defeituosa fosse a última a ser aberta.

Nesse momento estamos com a linha de transmissão aberta em ambas as extremidades, apenas na fase defeituosa. Depois de um determinado intervalo de tempo, denominado tempo morto, de $500ms$ ocorrerá tentativa de religamento. Durante esse intervalo o defeito pode não ser extinto, o que na tentativa de religamento vai resultar em nova abertura dos terminais e, portanto, religamento sem sucesso. Por outro lado, quando o defeito é extinto dentro do tempo morto, a tentativa de religamento se dará com sucesso.

Considerando o religamento com sucesso, ocorrerá fechamento dos disjuntores em $500ms$ depois da abertura do mesmo terminal. Isso é, haverá religamento no lado 08 depois de $500ms$ da abertura desse terminal e haverá religamento no lado 09 depois de $500ms$ da abertura desse terminal.

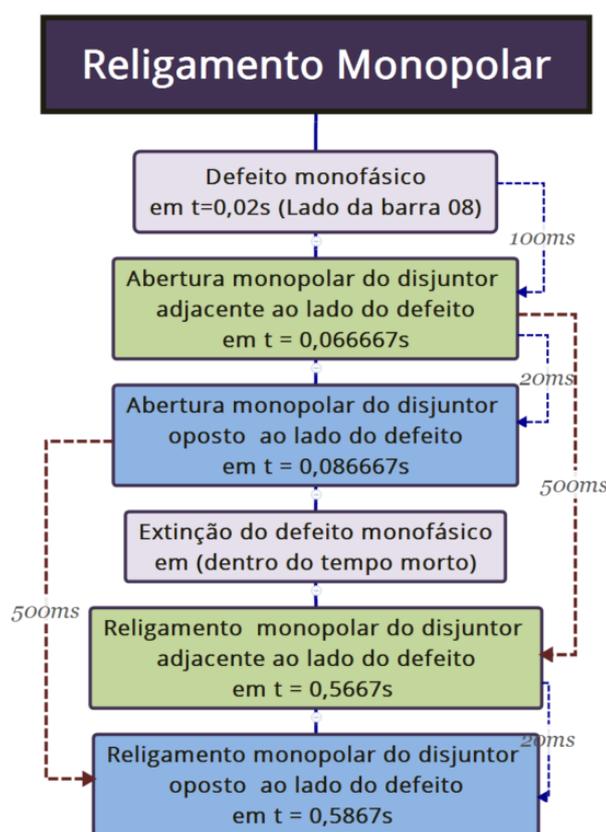


Figura 163 – Religamento monopolar: Sequência de operações

Os resultados no terminal oposto ao defeito seguem nas Figura 164, Figura 165 (ampliação da faixa de visualização na abertura), Figura 166 (ampliação da faixa de visualização no religamento) e no terminal do defeito segue na Figura 167.

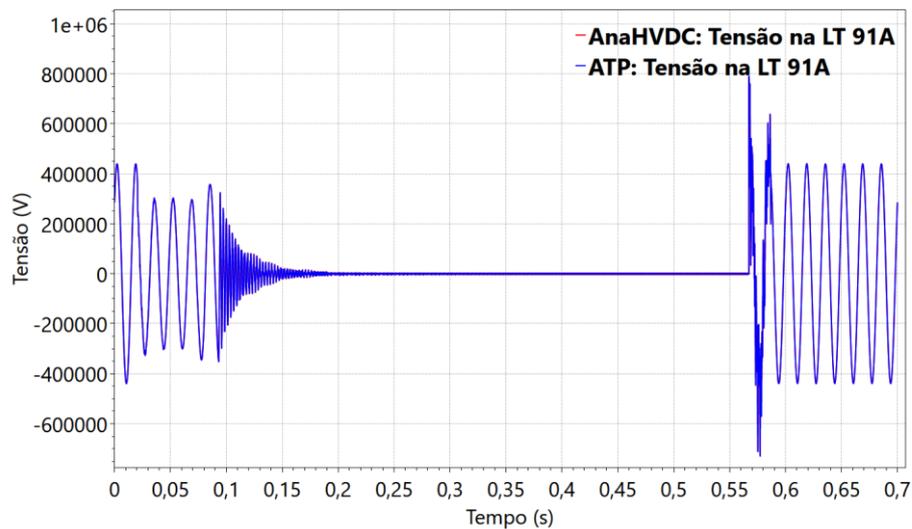


Figura 164 – Religamento monopolar de LT: Tensão no terminal 91 da LT, fase A

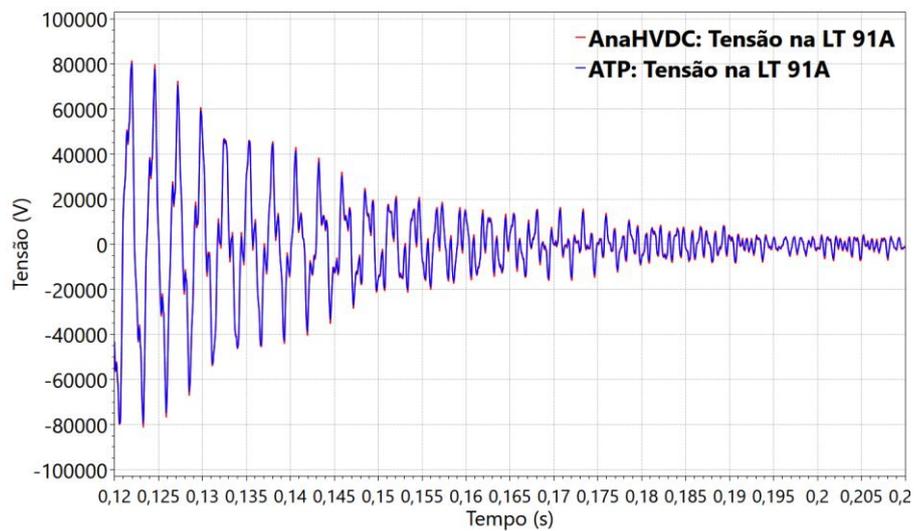


Figura 165 – Religamento monopolar de LT: Tensão no terminal 91 da LT, fase A, com ampliação da faixa de visualização na abertura da linha

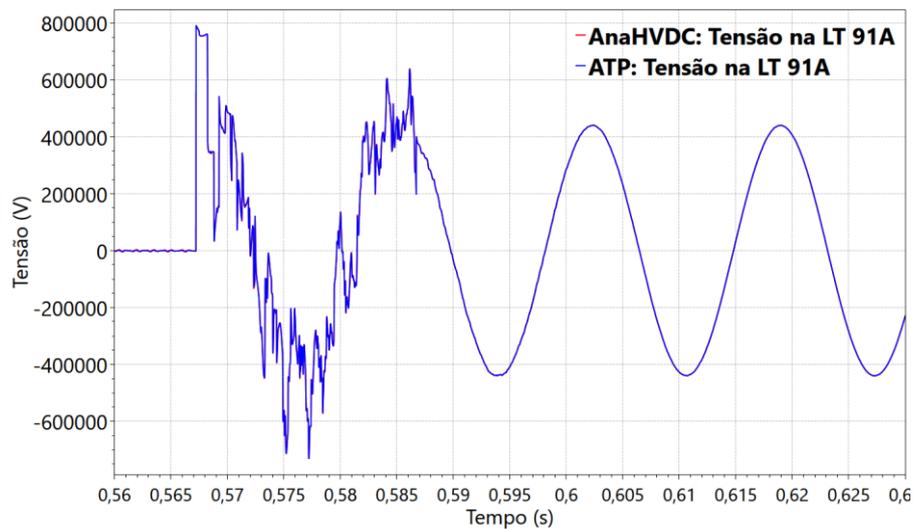


Figura 166 – Religamento monopolar de LT: Tensão no terminal 91 da LT, fase A, com ampliação da faixa de visualização no fechamento da linha

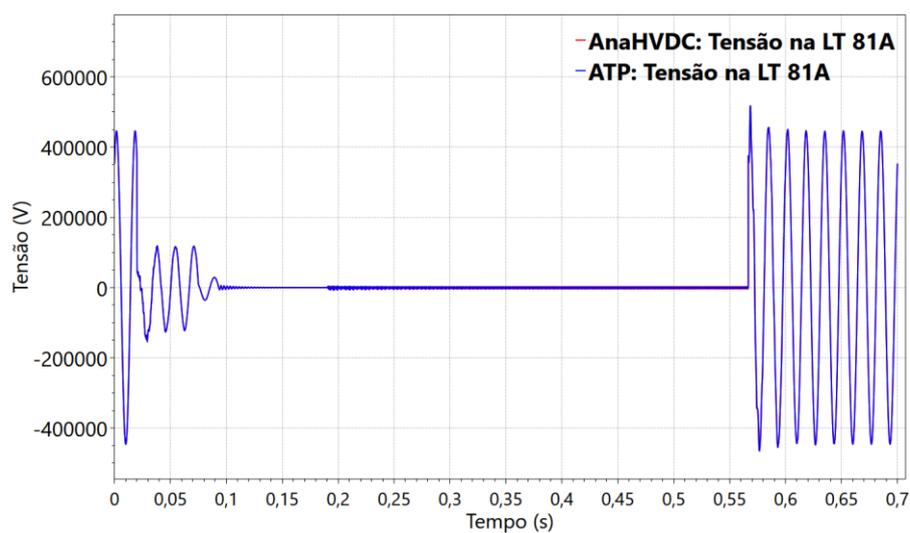


Figura 167 – Religamento monopolar de LT: Tensão no terminal 81 da LT, fase A

Todos os casos foram visualmente coincidentes corroborando a validação do modelo do para-raios e do estudo de religamento monopolar no programa AnaHVDC.

4.2.4.3 Estudo do arco secundário

O estudo da extinção do arco secundário é decorrente do caso de religamento monopolar com sucesso. A Figura 168 resume a sequência de eventos considerando o estudo de arco secundário em um sistema de 500kV. Inicialmente ocorre o defeito monofásico. A proteção atua em 100ms. Nesse intervalo a corrente de curto-circuito é a própria corrente de arco primário. Em $t = 100ms$ ocorre abertura do polo referente à fase defeituosa. Depois dessa abertura, a corrente de curto-circuito é denominada então de arco secundário que é de menor amplitude por não estar sendo diretamente alimentada pela fase, mas pela indução eletromagnética de tensão e corrente das demais fases. O defeito é extinto dentro do intervalo do tempo morto, isso em termos de simulação. Pelos critérios estabelecidos em [6] o par ordenado utilizado será o último valor médio quadrático da corrente de arco secundário e o primeiro valor de TRT depois da extinção. Esse par ordenado é confrontado então com uma região probabilística. Estando interno a região significa que tem maiores chances de extinção, e quando fora da região há maiores probabilidades de não extinção.

Cabe ressaltar que a modelagem do arco secundário, de natureza não linear e dispondo de diversos modelos [106], não é objeto desse trabalho. Logo, são considerados critérios estabelecidos em engenharia de projetos quanto à análise de extinção ou não do arco secundário.

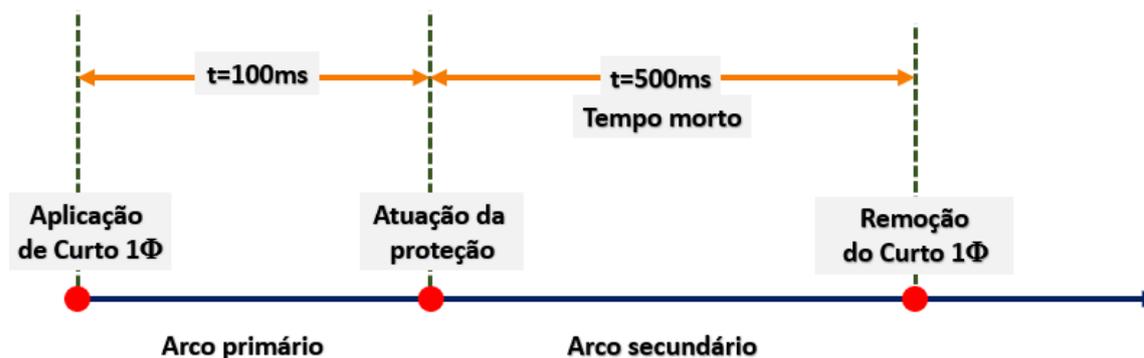


Figura 168 – Estudo do arco secundário

No arco secundário, as correntes circulantes das outras duas fases alimentam o curto-circuito da fase removida, devido às indutâncias e capacitâncias mútuas presentes entre elas. As diretrizes de projetos estabelecidas pelo ONS estabelece que deve ser estudado: sobretensões transitórias e extinção do arco secundário.

Para o estudo de remoção do arco secundário, o critério estabelecido para o sucesso da remoção do arco secundário em vigor é o da determinação dos valores de I_a (valor eficaz do último pico da corrente do arco secundário) e V_p (valor do primeiro pico da tensão de restabelecimento transitória), estabelecida através do canal do arco extinto. Para o sucesso do religamento monopolar, o par de valores (I_a versus V_p) deve estar localizado dentro da zona de alta probabilidade de curvas indicativas para a extinção do arco secundário. Essa curva segue representada na Figura 169.

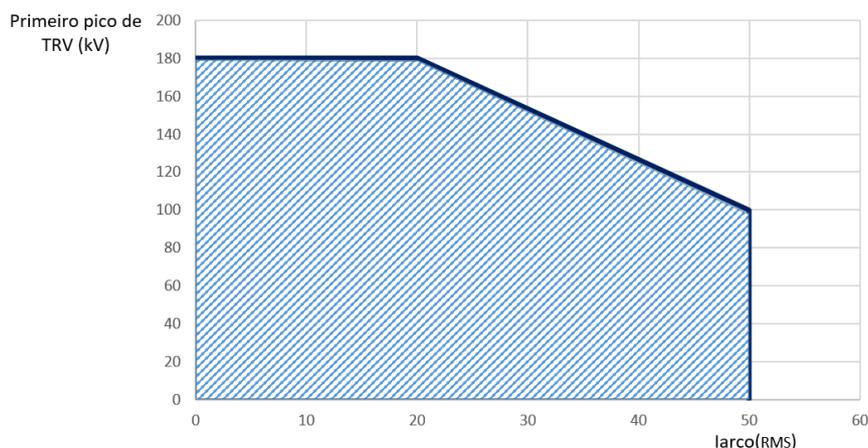


Figura 169 – Curva probabilística do arco secundário. Adaptado de [6]

Os pares ordenados (I_a, V_p) seguem, respectivamente na Figura 170 e Figura 171.

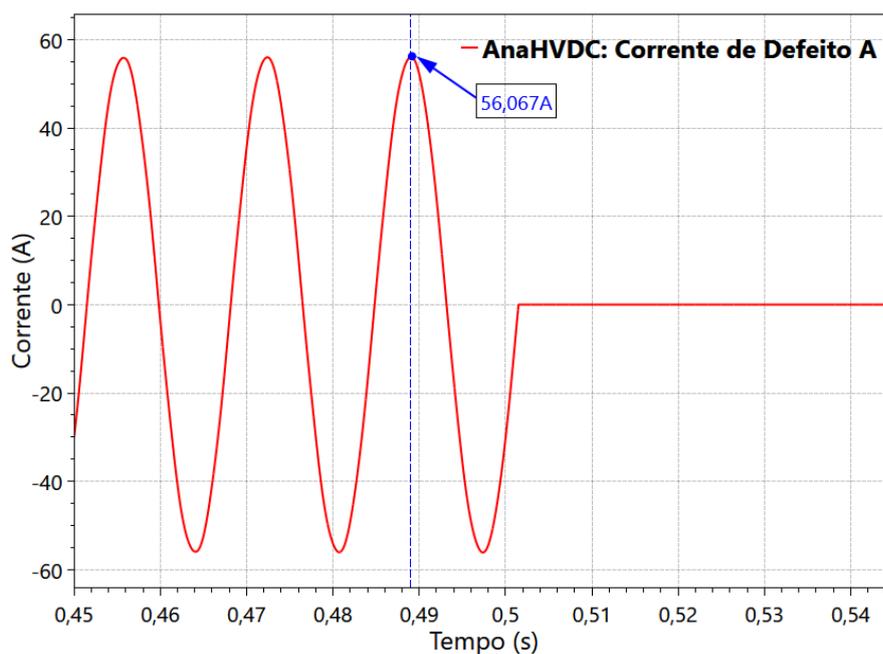


Figura 170 – Corrente de arco secundário

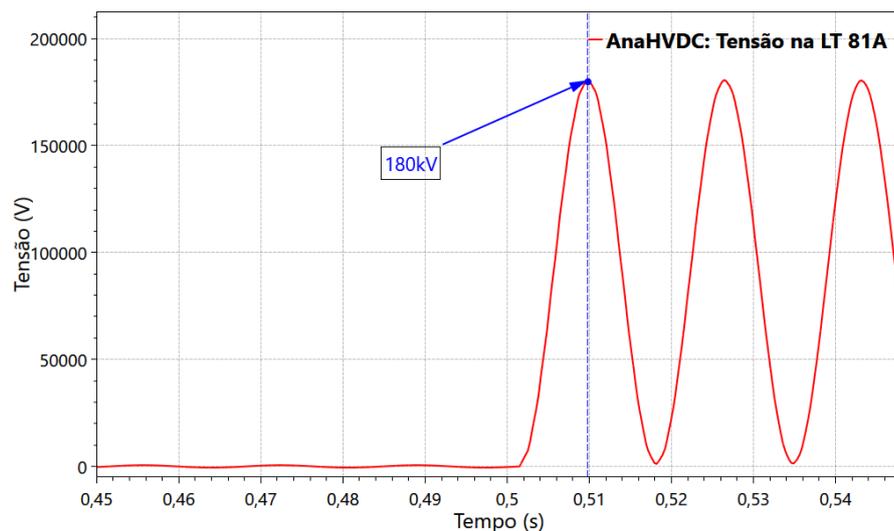


Figura 171 – Primeiro pico de TRT

Calculando o valor médio quadrático da corrente e inserindo o par ordenado dentro da curva de referência conclui-se que nesse caso não ocorre extinção do arco secundário (conforme ilustrado na Figura 172), sendo necessários métodos mitigadores, sendo o mais conhecido uso de reator de neutro.

Como essa especificação extrapola a análise proposta, que consiste na validação dos modelos desenvolvidos, não são realizadas simulações nem sugeridos valores de reatores de neutro nesse caso proposto. Ressalta-se ainda que os reatores de linha foram considerados solidamente aterrados, ou seja, sem impedância de neutro.

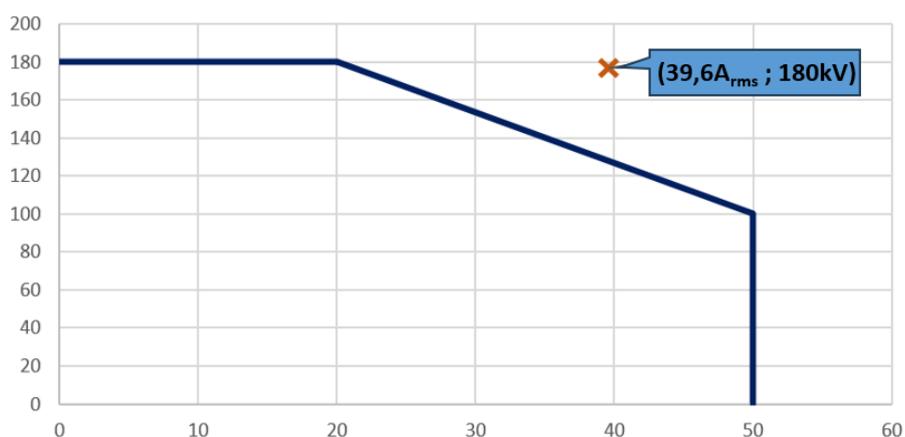


Figura 172 – Curva probabilística do arco secundário aplicado ao caso em estudo.

4.2.5 Energização de banco de capacitores

A energização de banco de capacitores foi simulada incluindo um elemento do tipo RLC interligado por linha de transmissão e disjuntor na barra 09, com sua representação unifilar na Figura 173. A chave de energização contou com dispersão dos polos, sendo os tempos de fechamento $t_a = 0,052$, $t_b = 0,048s$ e $t_c = 0,054s$, respectivamente. Trata-se de um dos mais comuns estudos de transitórios de manobra e inserirem-se nesta seção não validando especificamente um modelo desenvolvido, mas o próprio caso de energização.

Os parâmetros utilizados para o banco de capacitor foram típicos, assumindo que para uma potência base de $100MVA$ e uma tensão base de $500kV$, com frequência nominal de $60Hz$ e $Q = 300Mvar$, calcula-se o parâmetro C para ser informado em ambas as plataformas. Inicialmente calcula-se a impedância base:

$$Z_{base} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} = \frac{500^2}{100} = 2500\Omega \quad (312)$$

Calculam-se a impedância capacitiva em Ω e em pu, respectivamente:

$$X_C = \frac{V_{base}^2}{Q} = \frac{500^2}{300} = 833,33\Omega \quad (313)$$

$$X_{C_{pu}} = \frac{X_C}{Z_{base}} = \frac{833,33}{2500} = 0,3333pu \quad (314)$$

Por fim, calculam-se o capacitor em μF e em pu, respectivamente:

$$C_{ATP} = \frac{1}{\omega X_C} = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot 60) \cdot 833,33} = 3,18131\mu F \quad (315)$$

$$C_{AnaHVDC} = \frac{1}{\omega X_{C_{pu}}} = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot 60) \cdot 0,3333} = 0,007958pu \quad (316)$$

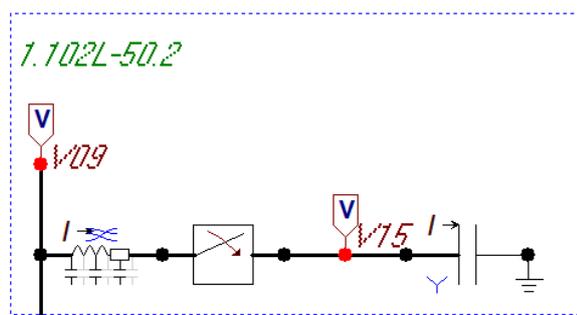


Figura 173 – Diagrama unifilar no ATP: energização de banco de capacitores

Os resultados são apresentados considerando a medição na barra 15. Para melhor visualização divide-se a apresentação dos resultados por fase e dando um enfoque nos primeiros ciclos depois da energização. Tais resultados seguem da Figura 174 até a Figura 179.

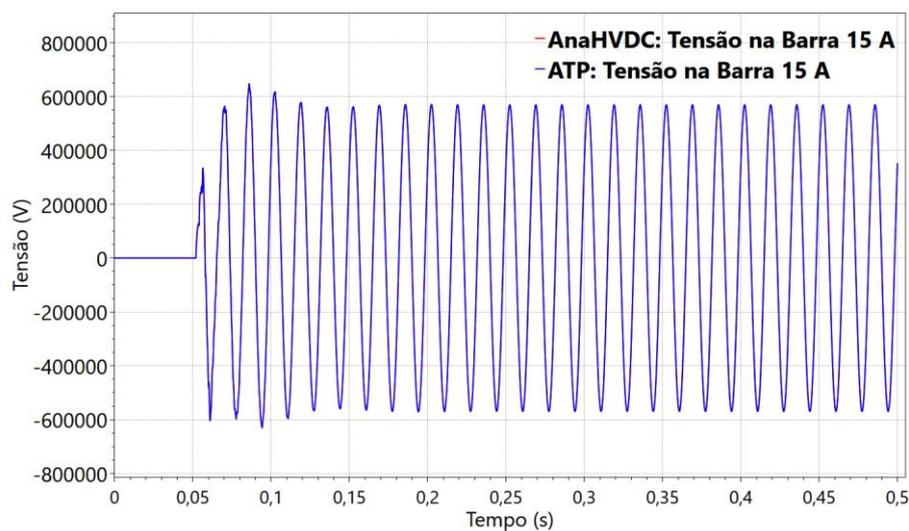


Figura 174 – Energização de Banco de Capacitores: Tensão na barra 15, fase A

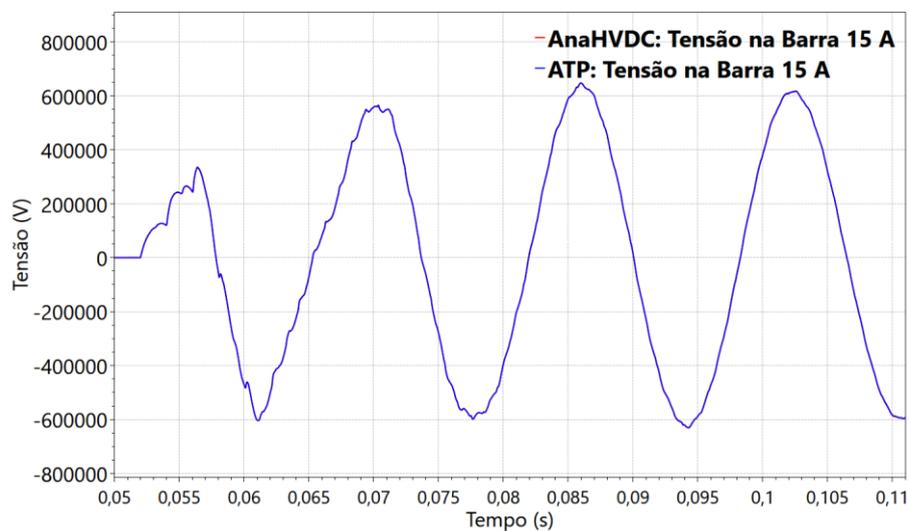


Figura 175 – Energização de Banco de Capacitores: Tensão na barra 15, fase A, com ampliação da faixa de visualização

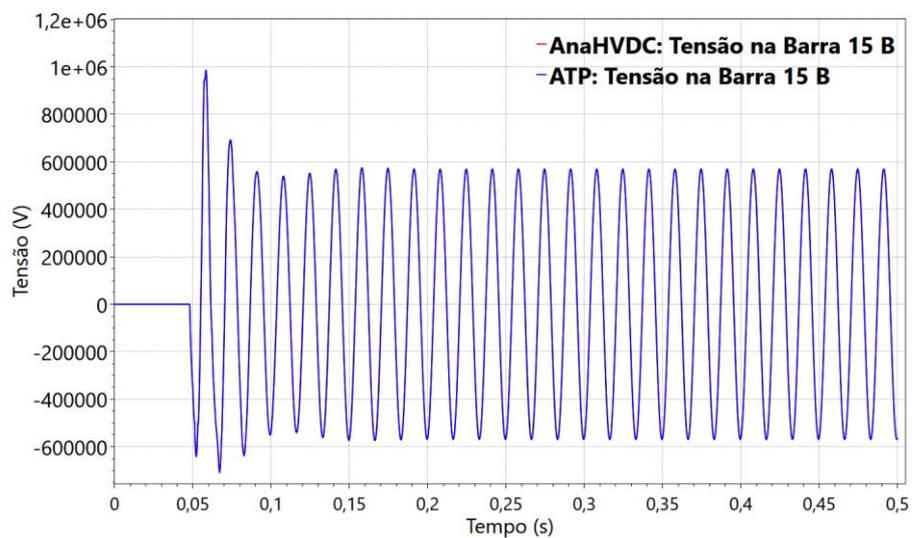


Figura 176 – Energização de Banco de Capacitores: Tensão na barra 15, fase B

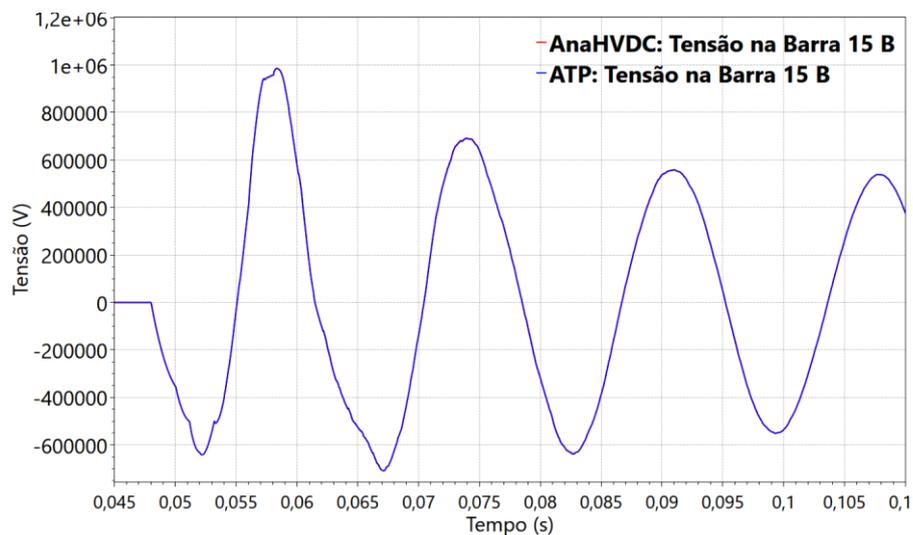


Figura 177 – Energização de Banco de Capacitores: Tensão na barra 15, fase B, com ampliação da faixa de visualização

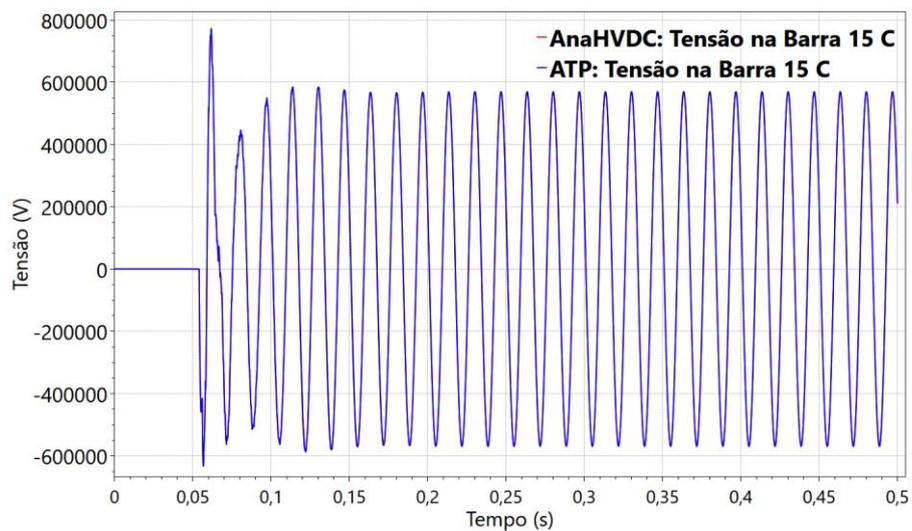


Figura 178 – Energização de Banco de Capacitores: Tensão na barra 15, fase C

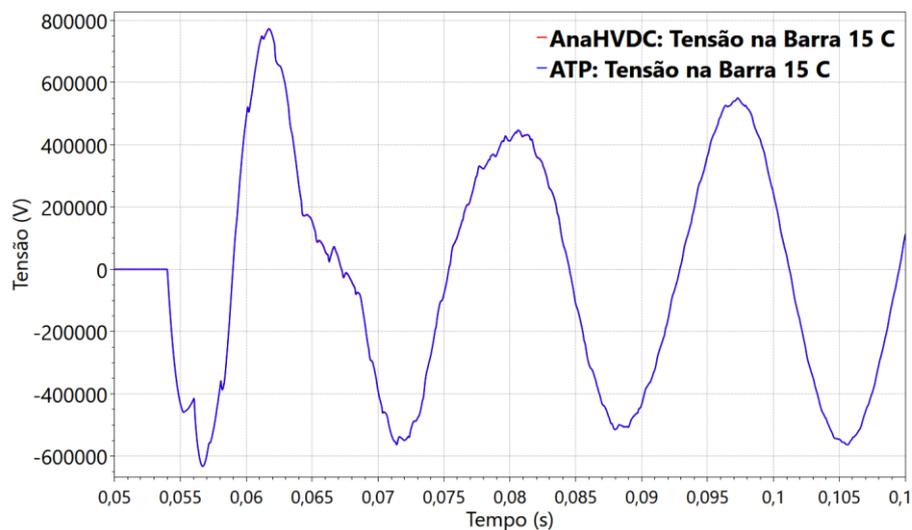


Figura 179 – Energização de Banco de Capacitores: Tensão na barra 15, fase C, com ampliação da faixa de visualização

Todas as curvas foram visualmente coincidentes corroborando para a validação da energização de banco de capacitores.

4.2.6 Estudo da tensão de restabelecimento transitória

O estudo de tensão de restabelecimento transitória (TRT) foi simulado considerando a inclusão do modelo de para-raios. Foram considerados dois tipos de defeitos: monofásico e trifásico, ambos terminais e adjacente à barra 08.

A modelagem completa do sistema para o estudo da Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT) requer a consideração das capacitâncias parasitas dos equipamentos. Esses valores podem ser fornecidos pelos fabricantes ou encontrados em normas técnicas que especificam valores típicos. Tais elementos impactam os resultados, influenciando a forma de onda da TRT. Contudo, no sistema modelado no BenchCA, a inclusão de valores típicos de capacitância parasita não demonstrou um impacto significativo nos resultados do caso estudado. Isso pode ser justificado pela localização dos disjuntores utilizados na análise da TRT, os quais apresentam um elevado efeito capacitivo, devido à presença de uma linha de transmissão de 300 km e aos capacitores localizados nas barras 8 e 9. No entanto, caso fossem realizados o estudo da TRT com curto quilométrico deveria ocorrer a modelagem das capacitâncias parasitas, uma vez que essas impactam na formação dos transitórios, por exemplo, na formação de ondas oscilatórias de altas frequências de ressonância.

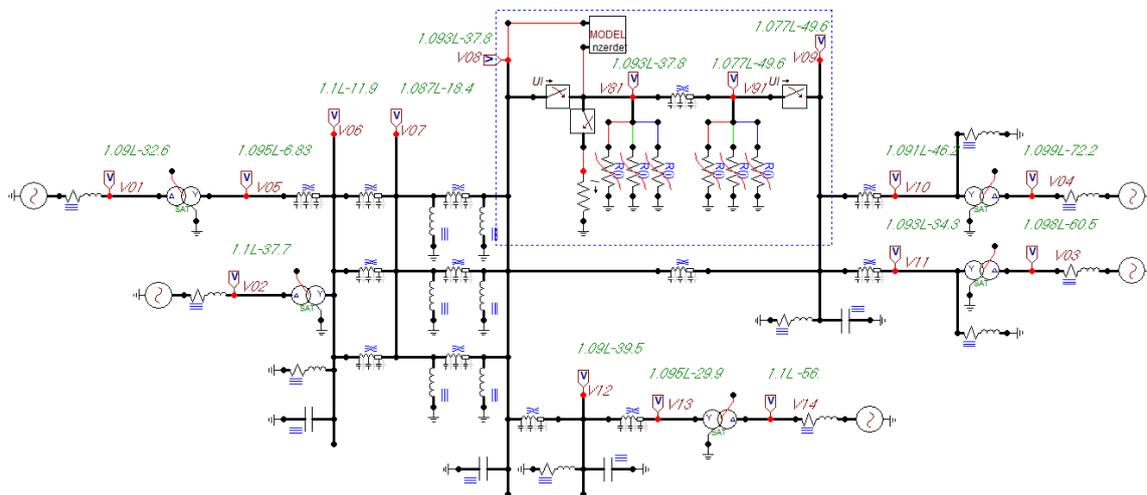


Figura 180 – Diagrama unilifar no ATP: Tensão de Restabelecimento Transitória

O estudo de TRT visa averiguar a capacidade de interrupção de corrente nos polos do disjuntor. A interrupção de corrente é a condição de manobra mais severa para o disjuntor e quanto maior a corrente de defeito, maior também é a solicitação do

equipamento [2] e [3]. Dois momentos são cruciais nessa análise: o primeiro diz respeito à taxa de crescimento da tensão em $\frac{kV}{\mu s}$, chamada de TCTRT e o segundo momento em relação ao valor máximo de tensão, de tal modo que não seja superior a capacidade dielétrica do meio isolante [2].

Assim, a capacidade de interrupção depende de dois fatores: a magnitude da corrente de defeito e a TRT através dos contatos do disjuntor [3]. Do ponto de vista de engenharia de projeto compara-se a TRT com envoltórias com seus parâmetros definidos em normas. Tais envoltórias são divididas em quatro categorias: dois parâmetros (T10 e T30) e quatro parâmetros (T60 e T100). A seleção do tipo de envoltória depende do valor da corrente medida nos disjuntores, em decorrência de um defeito, em relação à capacidade do disjuntor.

A Figura 181 mostra em detalhes o trecho considerado. Os disjuntores numerados (1) e (3) representam disjuntores físicos ideias que abrem em determinado instante de tempo. Inicialmente o disjuntor (1) abre e 20ms depois abre o disjuntor (3). O disjuntor (2), por sua vez, consiste no disjuntor fictício utilizado para simular o defeito.

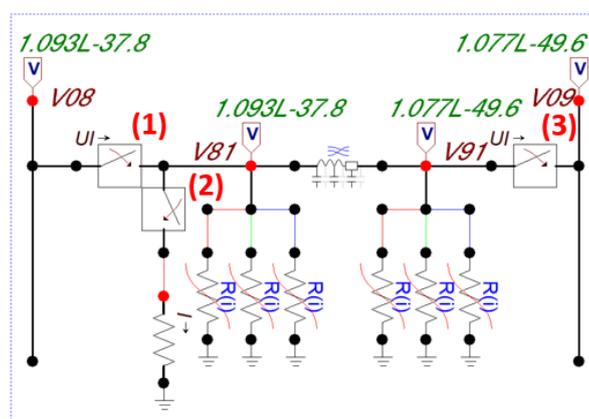


Figura 181 – Diagrama unilifar no ATP: TRT (Detalhado)

4.2.6.1 Tensão de restabelecimento transitória com defeito monofásico

O sistema inicializa em regime permanente e o defeito é aplicado no instante de $t = 0,01s$. Em $t = 0,066667s$ o terminal mais próximo ao defeito (disjuntor localizado entre os nós V08 e V81) é aberto e 20ms depois é aberto o disjuntor do terminal oposto (disjuntor localizado entre os nós V09 e V91). O tempo de simulação utilizado foi de 0,15s

e o passo de integração de $1\mu s$. A Figura 182 mostra a medição de corrente na fase A do disjuntor 1 em decorrência do curto-circuito monofásico. Na figura são destacados os instantes referentes à aplicação de defeito e abertura do disjuntor e o intervalo em que a corrente de defeito passa a ser simétrica. Para cálculo da envoltória utiliza-se o valor eficaz da corrente de defeito simétrica.

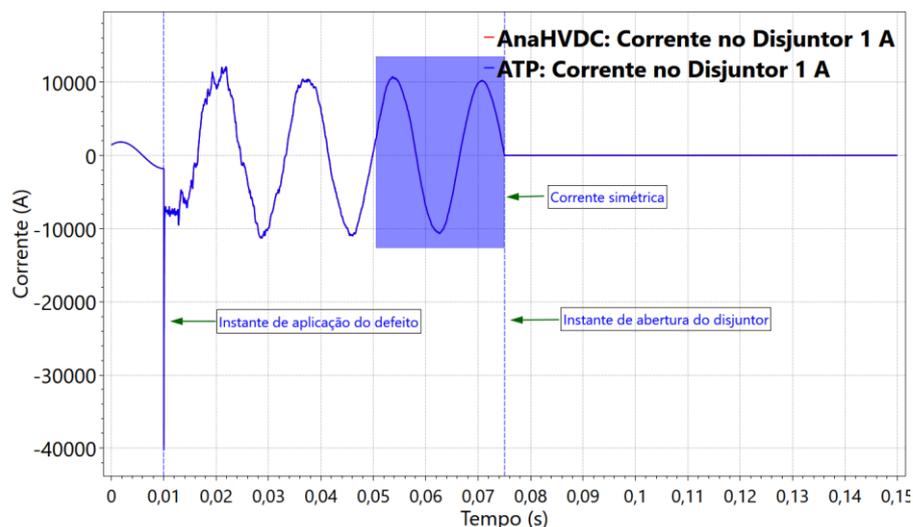


Figura 182 – TRT: Corrente no disjuntor no lado do defeito monofásico

A Figura 183 destaca a corrente de pico medida no disjuntor de interesse. Esse valor será utilizado para determinação da envoltória.

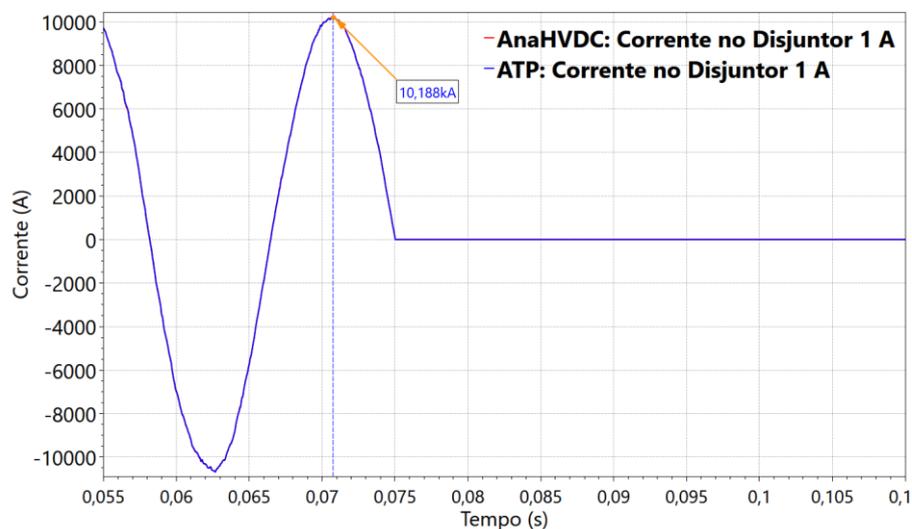


Figura 183 – TRT: Corrente simétrica no disjuntor no lado do defeito monofásico

Tendo medido o pico da corrente simétrica de defeito, calcula-se então a corrente percentual. Para isso divide-se pela capacidade de interrupção dos disjuntores. Para níveis de tensão de 500kV os disjuntores antigos possuem capacidade de 40kA, e disjuntores de tecnologia mais recente, possuem capacidade de 63kA [107].

$$I(\%) = \frac{\left(\frac{I_{CC}}{\sqrt{2}}\right)}{I_{CAP_{DISJ}}} \times 100 \quad (317)$$

Para valores percentuais inferiores a 10% da capacidade do disjuntor, usa-se a curva de referência T10. Para valores iguais ou superiores a 10% e inferiores a 30%, usa-se a T30. Do mesmo modo, para valores iguais ou superiores a 30% e inferiores a 60%, usa-se a T60. E, por fim, para valores superiores a 60% da capacidade do disjuntor, usa-se a T100. Para o caso exposto, tem-se numericamente, pela equação (318) que a referência utilizada consiste na T30.

$$I(\%) = \frac{\left(\frac{10,188}{\sqrt{2}}\right)}{40kA} \times 100 = 18,10\% \quad (318)$$

As envoltórias devem iniciar simultaneamente com as TRTs de cada uma das fases, respectivamente. Haverá, então, uma envoltória para cada uma das fases, que inicia após passagem pelo zero de corrente e quando começa a surgir tensão nos polos do disjuntor. Essa tensão que surge nos polos é denominada de tensão de restabelecimento transitória. Tomando como referência a nomenclatura do ATP, o disjuntor está entre os nós V08 e V81 (adjacente à barra V08). Assim, interessa a medição da corrente no ramo V08-V81 (com a finalidade de sabermos as envoltórias) e a tensão no ramo V08-V81, onde serão comparadas com as envoltórias previamente identificadas.

A comparação TRT x Envoltória resulta em duas possíveis análises. Se a TRT estiver abaixo da envoltória significa que o disjuntor estará apto a interromper a corrente para aquele nível de curto-circuito. Por outro lado, se a TRT ultrapassar a envoltória, seja na inclinação ou no pico, o disjuntor será superado e não terá condições de interromper aquele nível de corrente.

A Figura 184 mostra as tensões nos disjuntores. A tensão em cima dos polos do disjuntor é a denominada tensão de restabelecimento transitória (TRT). Essas tensões serão confrontadas com as respectivas envoltórias. Para tal, faz-se necessário obter o instante em

que ocorre a abertura do respectivo polo para que a envoltória inicie no mesmo instante em que surgem tensões nos polos do disjuntor.

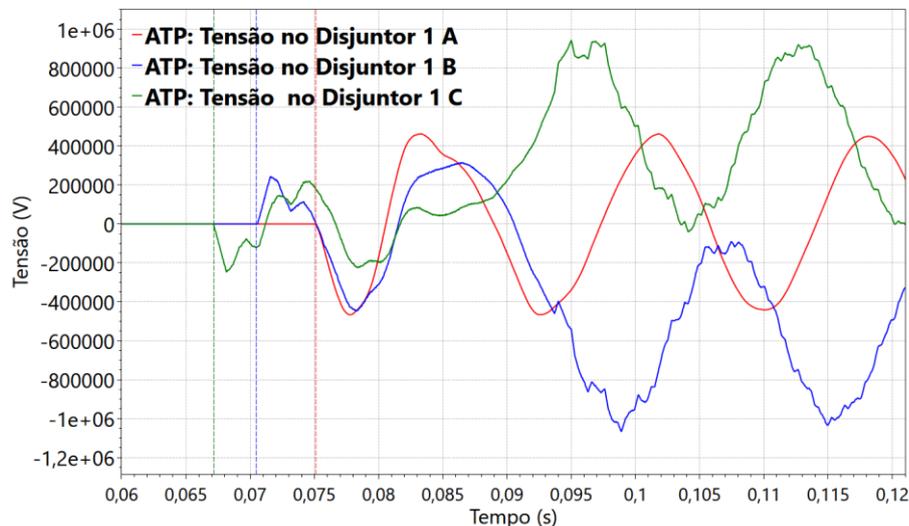


Figura 184 – TRT: Tensões no disjuntor (defeito monofásico)

O tempo em que as envoltórias iniciam pode ser determinado via inspeção visual ou por alguma lógica de monitoração da tensão entre os terminais do disjuntor. Os resultados dessa análise seguem resumidos na Tabela 21.

Tabela 21 – Tempos iniciais das envoltórias (defeito monofásico)

Fases	Tempos (s)
A	0,07502
B	0,07057
C	0,06712

Tendo os tempos iniciais das envoltórias utiliza-se a planilha auxiliar denominada criaEnvTRT.xlsm, cuja interface segue exemplificada na Figura 185, que foi criada neste trabalho, para gerar as respectivas envoltórias utilizando os parâmetros da norma IEC-62271-100 [108]. O Apêndice F fornece um breve tutorial que detalha o uso da planilha. Assim, informa-se inicialmente o nível de tensão na caixa de seleção “Nível de tensão”. As fases são habilitadas de acordo com a seleção da caixa de seleção “Tipo de operação”. Por padrão, são incluídas as partes negativas, isso é a envoltória multiplicada por menos um. Contudo é permitido ao usuário desabilitar essa informação gráfica. Por fim, entram os dados de simulação. Os tempos iniciais correspondem aqueles que as envoltórias passam a

atuar. O passo de integração é o mesmo da simulação externa (ATP, AnaHVDC ou outros) e por fim o “Tsim” que corresponde o tempo de simulação ou o tempo total das envoltórias.

Figura 185 –Interface da planilha criaEnvTRT.xlsm para a operação monopolar

Após inserir corretamente as informações necessárias, o usuário deve acessar a funcionalidade “Adicionar curva” e na sequência “Gerar PLT”. Assim, a planilha cria no mesmo diretório que está localizada um arquivo denominado “envTRT.plt” no formato PlotCepel. Os resultados gerados pelo AnaHVDC e ATP serão apresentados em conjunto com o arquivo envTRT.plt gerado pela planilha auxiliar. Serão apresentadas duas curvas por fase: a primeira em uma faixa de visualização maior e a segunda com ampliação da faixa de visualização para averiguação da rampa com a taxa de crescimento. Os resultados das TRTs em cada fase considerando a sua respectiva envoltória seguem da Figura 186 até a Figura 191.

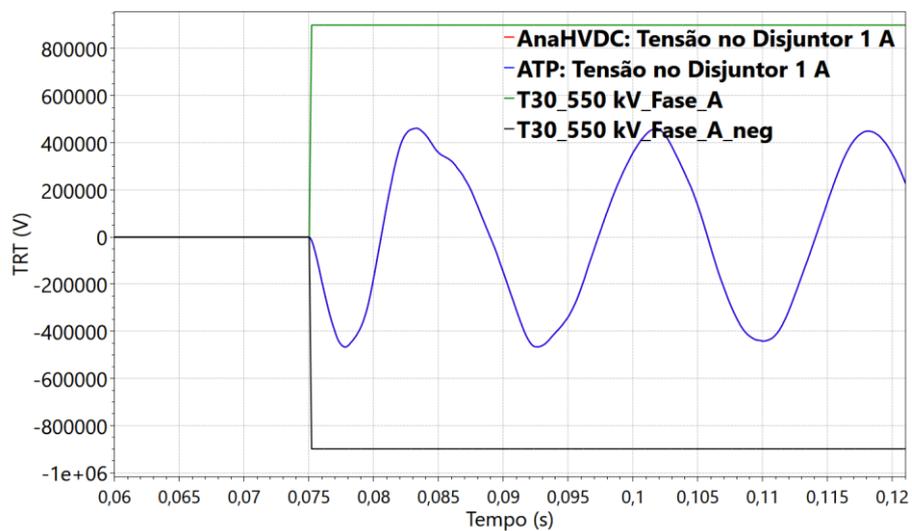


Figura 186 – TRT e Envoltória T30: Tensão na Fase A (defeito monofásico)

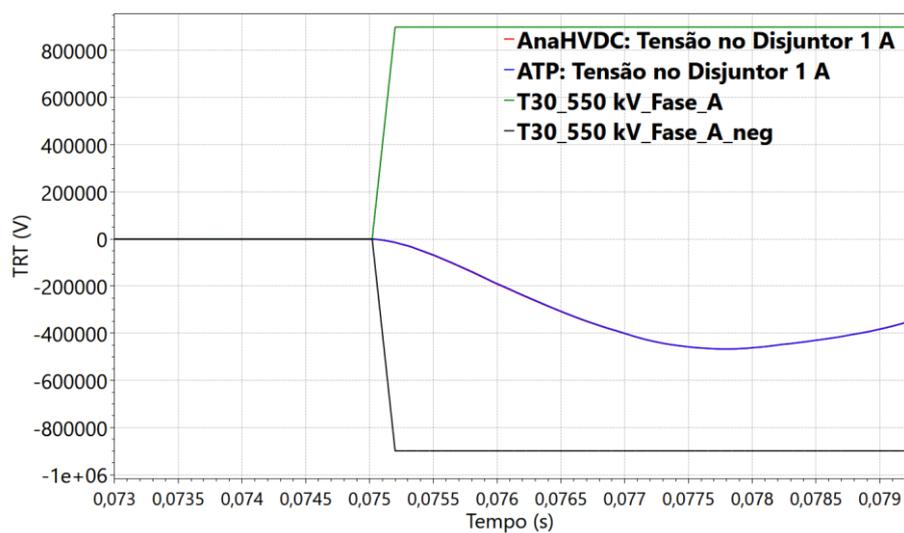


Figura 187 – TRT e Envoltória T30: Tensão na Fase A com faixa ampliada de visualização (defeito monofásico)

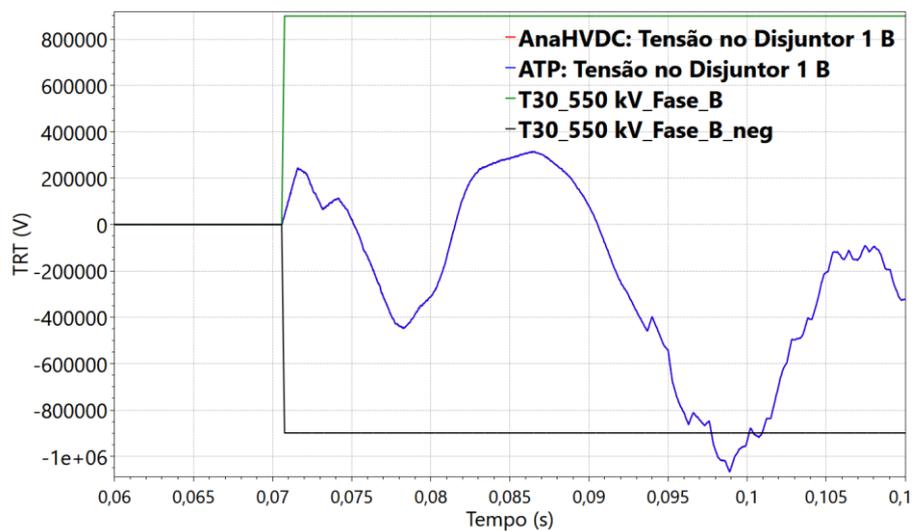


Figura 188 – TRT e Envoltória T30: Tensão na Fase B (defeito monofásico)

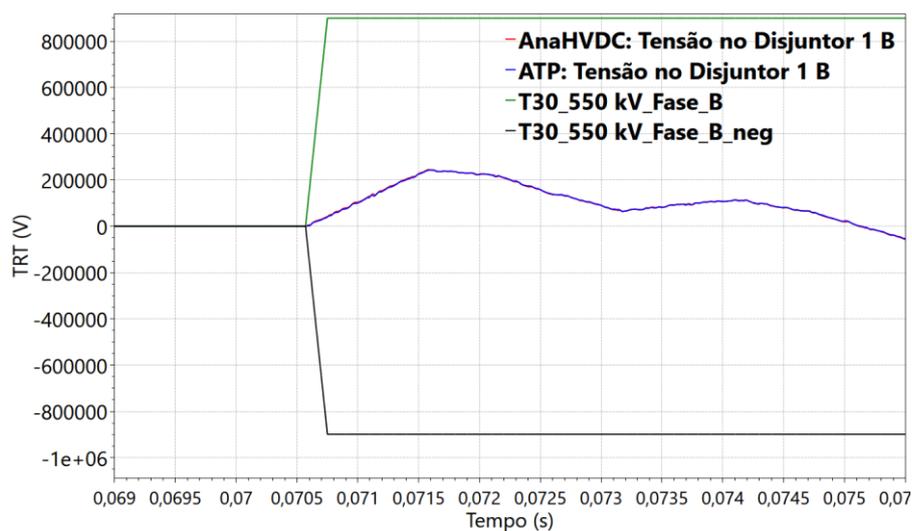


Figura 189 – TRT e Envoltória T30: Tensão na Fase B com faixa ampliada de visualização (defeito monofásico)

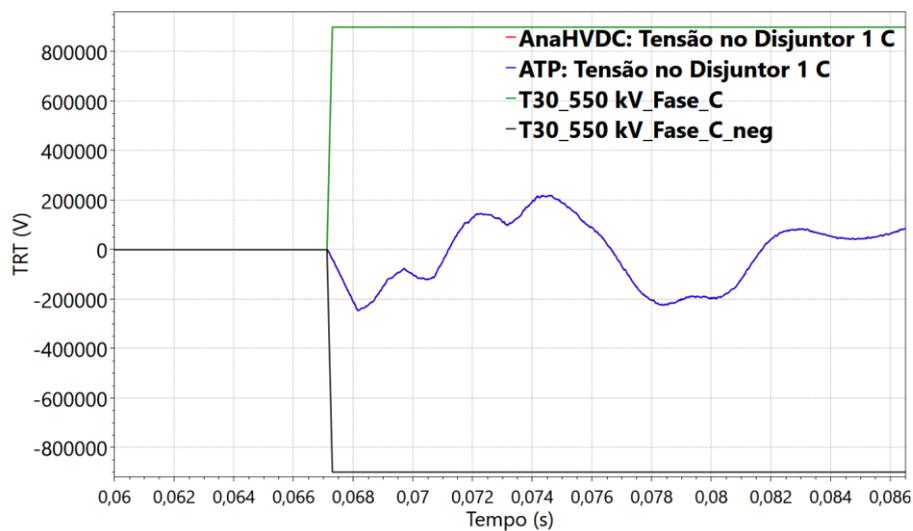


Figura 190 – TRT e Envoltória T30: Tensão na Fase C (defeito monofásico)

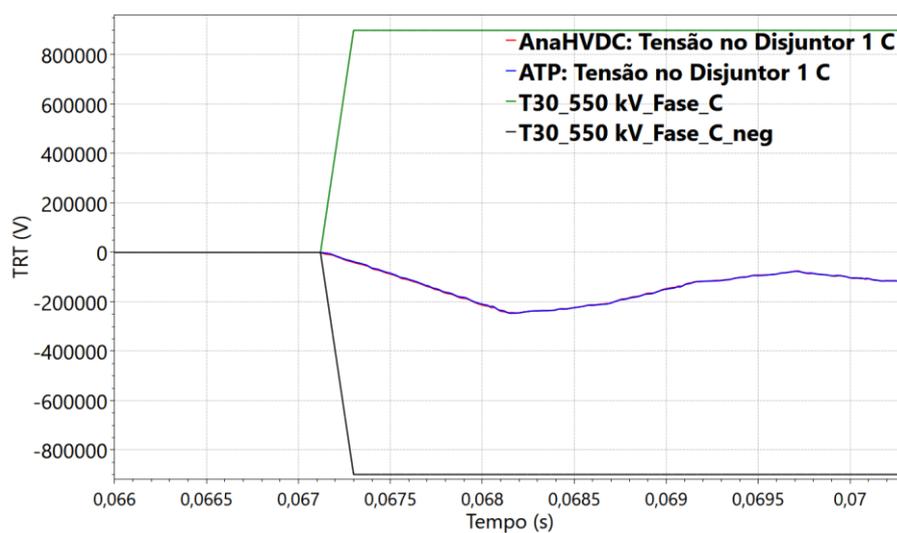


Figura 191 – TRT e Envoltória T30: Tensão na Fase C com faixa ampliada de visualização (defeito monofásico)

4.2.6.2 Tensão de restabelecimento transitória com defeito trifásico

O sistema inicializa em regime permanente e o defeito é aplicado no instante de $t = 0,01s$. Em $t = 0,08s$ o terminal mais próximo ao defeito (disjuntor localizado entre os nós V08 e V81) é aberto e 20ms depois é aberto o disjuntor do terminal oposto (disjuntor localizado entre os nós V09 e V91). O tempo de simulação utilizado foi de 0,15s e o passo de integração de $1\mu s$. A Figura 192 mostra a medição de corrente nas fases do disjuntor 1 em decorrência do curto-circuito trifásico. Na figura são destacados os instantes referentes à aplicação de defeito e abertura do disjuntor e o intervalo em que a corrente de defeito passa a ser simétrica. Para cálculo da envoltória utiliza-se o valor eficaz da corrente de defeito simétrica.

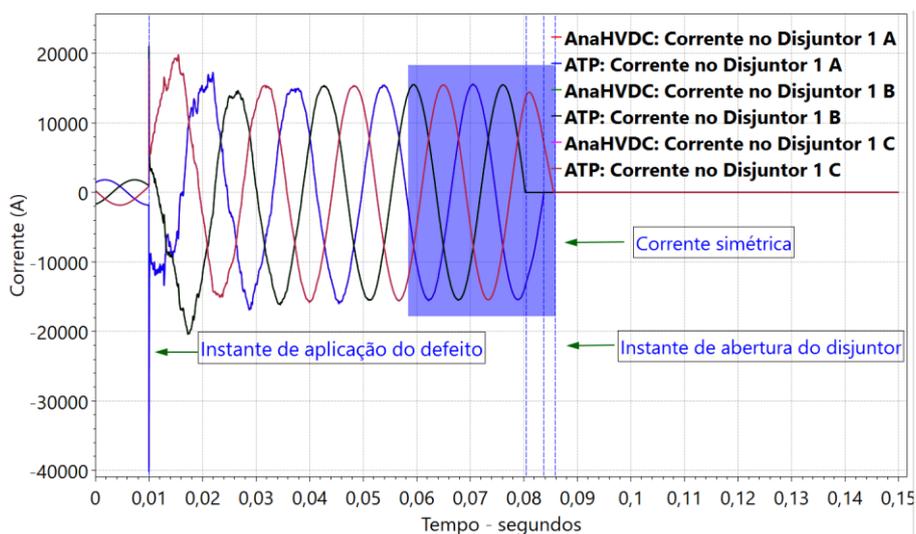


Figura 192 – TRT: Corrente no disjuntor no lado do defeito trifásico

A Figura 193 destaca a corrente de pico medida no disjuntor de interesse. Esse valor será utilizado para determinação da envoltória.

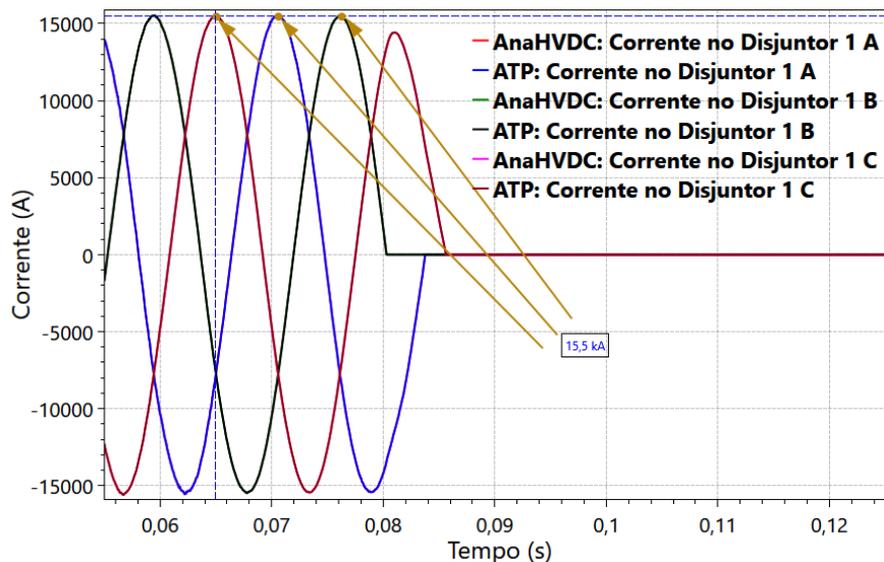


Figura 193 – TRT: Corrente simétrica no disjuntor no lado do defeito trifásico

Tendo medido o pico da corrente simétrica de defeito, calcula-se então a corrente percentual. Para isso divide-se pela capacidade de interrupção dos disjuntores.

$$I(\%) = \frac{\left(\frac{I_{CC}}{\sqrt{2}}\right)}{I_{CAPDISJ}} \times 100 \quad (319)$$

Logo, para o caso com defeito trifásico, temos que:

$$I(\%) = \frac{\left(\frac{15,5}{\sqrt{2}}\right)}{40kA} \times 100 = 27,40\% \quad (320)$$

As envoltórias devem iniciar simultaneamente com as TRTs de cada uma das fases, respectivamente. Haverá, então, uma envoltória para cada uma das fases, que inicia após passagem pelo zero de corrente e quando começa a surgir tensão nos polos do disjuntor. Essa tensão que surge nos polos é denominada de tensão de restabelecimento transitória. Tomando como referência a nomenclatura do ATP, o disjuntor está entre os nós V08 e V81 (adjacente à barra V08). Assim, interessa a medição da corrente no ramo V08-V81 (com a finalidade de sabermos as envoltórias) e a tensão no ramo V08-V81, onde serão comparadas com as envoltórias previamente identificadas.

A comparação TRT x Envoltória resulta em duas possíveis análises. Se a TRT estiver abaixo da envoltória significa que o disjuntor estará apto a interromper a corrente para aquele nível de curto-circuito. Por outro lado, se a TRT ultrapassar a envoltória, seja

na inclinação ou no pico, o disjuntor será superado e não terá condições de interromper aquele nível de corrente.

A Figura 194 mostra as tensões nos disjuntores. A tensão em cima dos polos do disjuntor é a denominada tensão de restabelecimento transitória (TRT). Essas tensões serão confrontadas com as respectivas envoltórias. Para tal, faz-se necessário obter o instante em que ocorre a abertura do respectivo polo para que a envoltória inicie no mesmo instante em que surgem tensões nos polos do disjuntor.

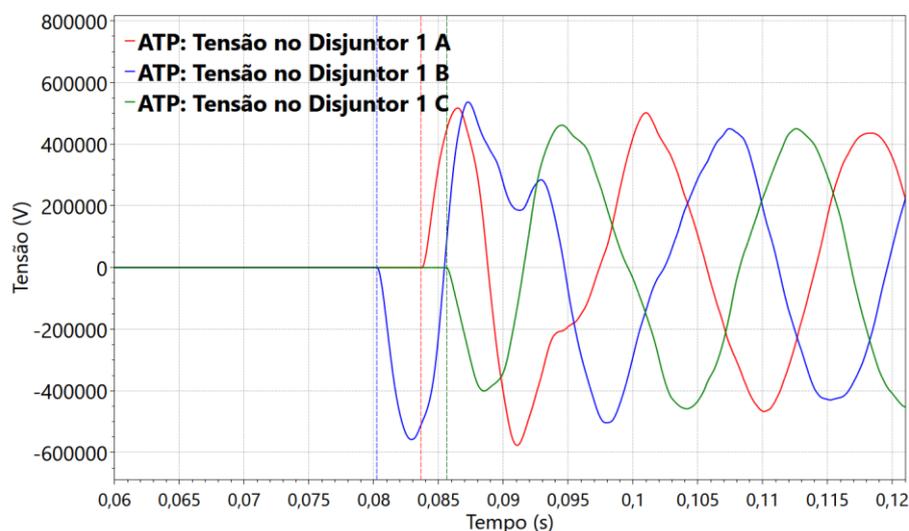


Figura 194 – TRT: Tensões no disjuntor (defeito trifásico)

O tempo em que as envoltórias iniciam pode ser determinado por inspeção visual ou por alguma lógica de monitoração da tensão entre os terminais do disjuntor. Os resultados dessa análise seguem resumidos na Tabela 22.

Tabela 22 – Tempos iniciais das envoltórias (defeito trifásico)

Fases	Tempos (s)
A	0,083755
B	0,080295
C	0,085636

Tendo os tempos iniciais das envoltórias utiliza-se a planilha auxiliar denominada criaEnvTRT.xlsm, apresentada na Figura 195, para gerar as respectivas envoltórias e repete-se o processo ilustrado na seção anterior.

Cria envoltórias TRT (*.plt) [Padrão IEC-62271-100] X

Versão 2.0 - Agosto 2024

Dados da envoltória

Nível de tensão 550 kV

Tipo de operação Tripolar

Tipo de Envoltória (ref. na fase A)

Fase A T30 Incluir parte negativa?

Fase B T30 Incluir parte negativa?

Fase C T30 Incluir parte negativa?

Dados de simulação

Tempos iniciais (s)

Fase A 0,083755 dt 1E-6

Fase B 0,080295 Tsim 0,15

Fase C 0,0855636

Adicionar curva Limpar dados Gerar PLT

Figura 195 – Interface da planilha criaEnvTRT.xlsm para a operação tripolar

Assim, a planilha cria no mesmo diretório que está localizada um arquivo denominado “envTRT.plt” no formato PlotCepel. Serão apresentadas duas curvas por fase: a primeira em uma faixa de visualização maior e a segunda com ampliação da faixa de visualização para averiguação da rampa com a taxa de crescimento. Os resultados das TRTs em cada fase considerando a sua respectiva envoltória seguem da Figura 196 até a Figura 201.

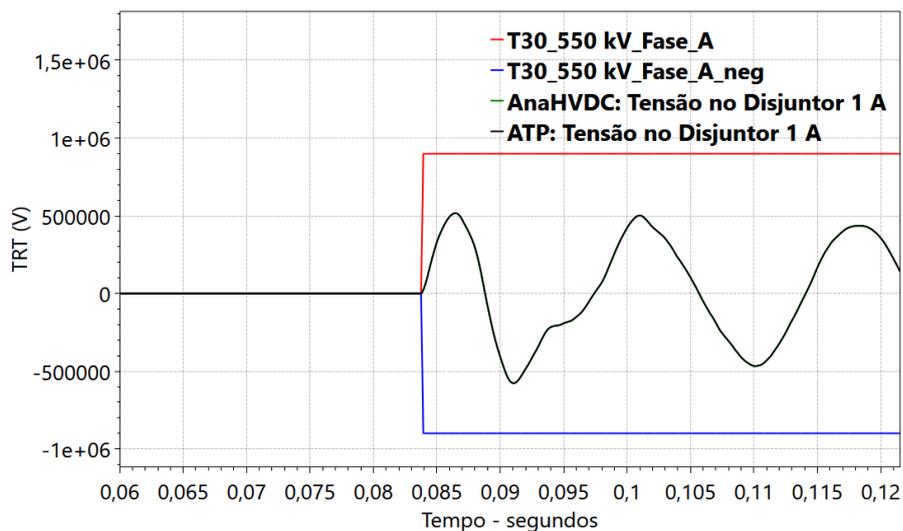


Figura 196 – TRT e Envoltória T30: Tensão na Fase A (defeito trifásico)

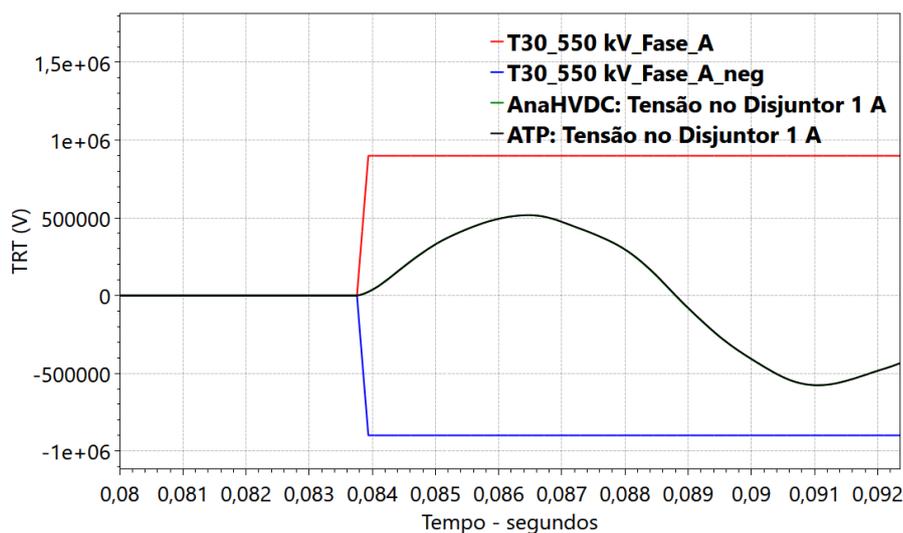


Figura 197 – TRT e Envoltória T30: Tensão na Fase A com faixa ampliada de visualização (defeito trifásico)

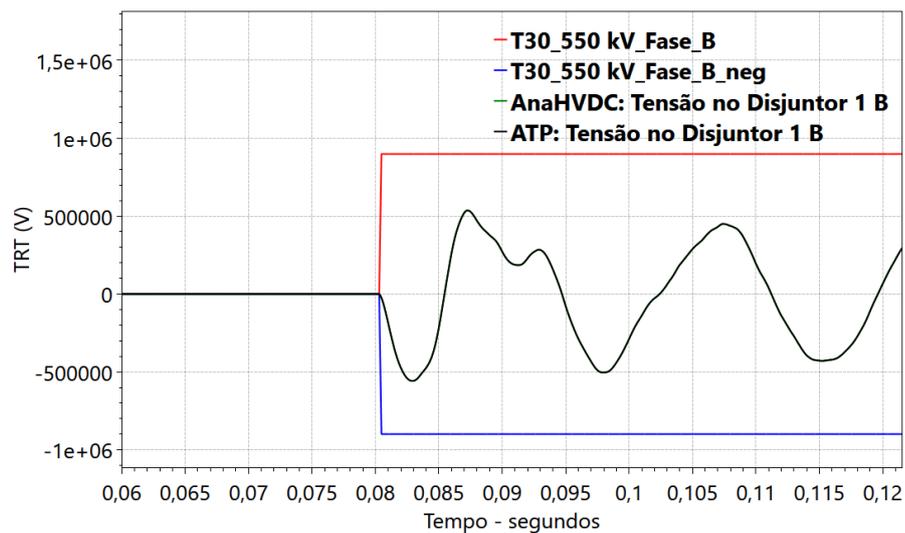


Figura 198 – TRT e Envoltória T30: Tensão na Fase B (defeito trifásico)

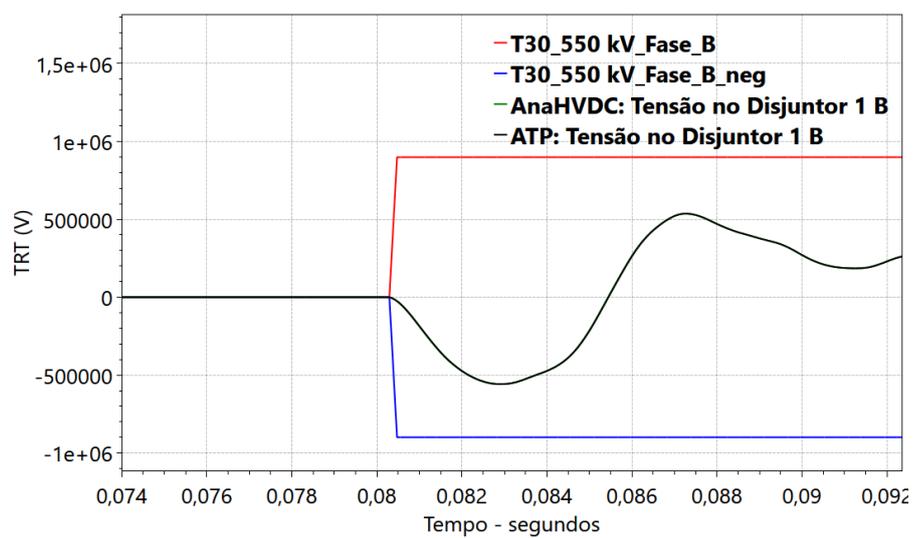


Figura 199 – TRT e Envoltória T30: Tensão na Fase B com faixa ampliada de visualização (defeito trifásico)

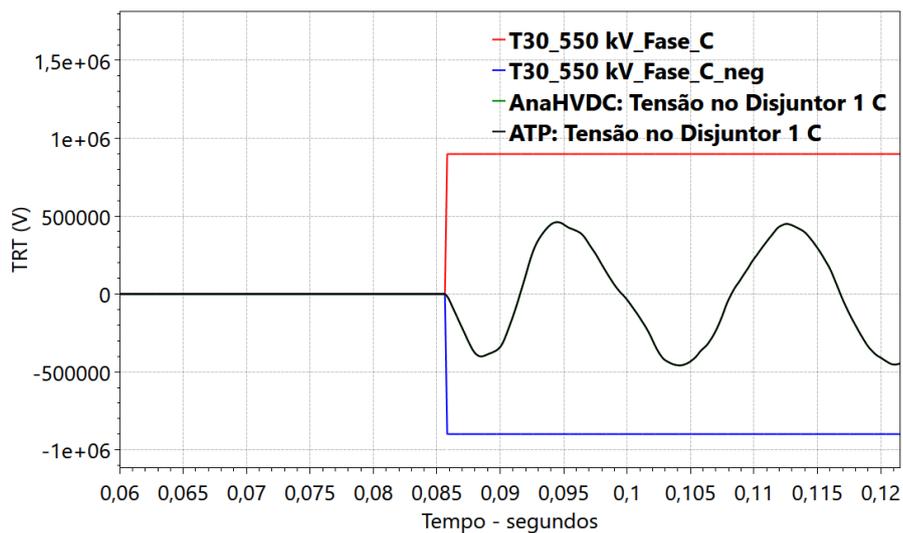


Figura 200 – TRT e Envoltória T30: Tensão na Fase C (defeito trifásico)

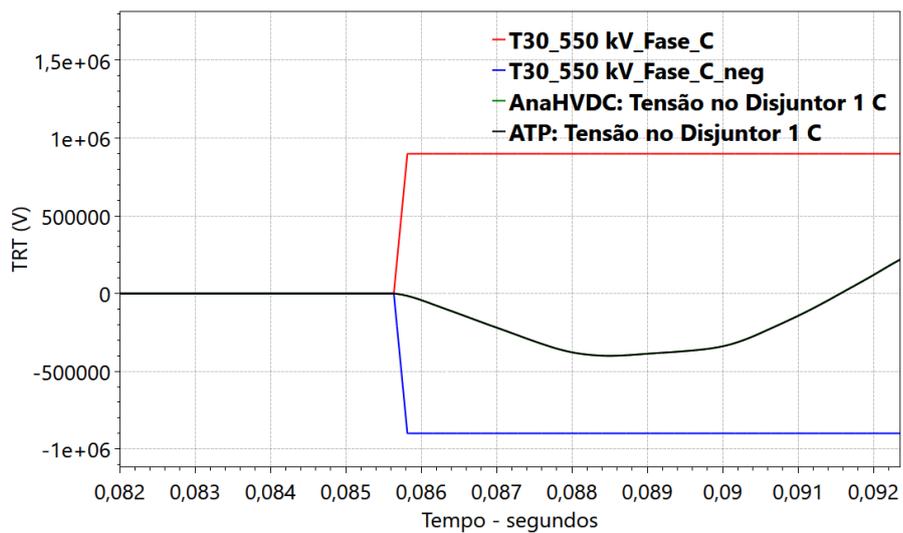


Figura 201 – TRT e Envoltória T30: Tensão na Fase B com faixa ampliada de visualização (defeito trifásico)

4.3 Caso “BenchCA” estatístico: energização de linha de transmissão

Em relação ao caso de energização de linha estatístico no BenchCA serão realizadas duas análises. A primeira relacionada ao desempenho computacional, comparando a ferramenta de desenvolvimento, AnaHVDC, com a plataforma de referência, ATP. A segunda em relação aos resultados numéricos do caso em questão, variando-se o também número de simulações. Nessa segunda análise considera-se ainda a influência da distribuição uniforme nos resultados.

Assim, do ponto de vista de desempenho computacional, casos estatísticos pequenos como o BenchCA, com entrada de dados no Anexo G, com 200 simulações são de execução relativamente rápidas, na ordem de 240,5 s no AnaHVDC e 49,58s no ATP com 0,5s de tempo de simulação e passo de 10 μ s em um computador Intel(R) Core (TM) i7-10750H CPU @ 2.60GHz e 16,0 GB RAM, contando o tempo de processamento da escrita em arquivo das informações estatísticas e as chamadas das múltiplas execuções dos programas. Além disso, o AnaHVDC permite que possa ser definido um número de processos paralelos para a simulação supracitada. Por exemplo, para a opção de 16 processos, se tratando do mesmo caso, tem-se o tempo computacional do AnaHVDC reduzido para o valor de 19,1 s. A Tabela 23 mostra os resultados completos dessas simulações. Foram realizadas três simulações variando-se o número de núcleos e feita a média entre essas simulações.

Tabela 23 – Caso estatístico: variação do número de processos

Saídas	Número de Processos					
	AnaHVDC					ATP (1 processo)
	1	4	6	8	16	
<i>Simulação 1</i>	240,664	61,5008	42,8423	32,6106	19,1423	49,328
<i>Simulação 2</i>	240,523	61,4765	42,5068	32,6239	19,1145	49,984
<i>Simulação 3</i>	240,365	61,7027	42,1617	32,557	19,0842	49,438
média	240,5173	61,5600	42,5036	32,5972	19,1137	49,5833

Para avaliar os resultados numéricos das sobretensões estatísticas, média e desvio-padrão, fez-se uma variação do número de simulações para os valores de 200, 400, 600 e 1000 simulações, mantendo-se a semente, e, inicialmente, retirando a distribuição uniforme e, posteriormente, incluindo a distribuição uniforme da fase do ciclo da senoide nas simulações. Para cada uma das medições é calculada a sobretensão estatística máxima de

projeto ($V_{MAXPROJETO} = \mu + 3\sigma$), sendo μ a média das sobretensões e σ o desvio padrão das sobretensões. Esses resultados estão resumidos, respectivamente, na Tabela 14 e Tabela 15, nas páginas 215 e 216.

Pode ser observado que as médias e desvio-padrão estão coerentes quando se considera os resultados obtidos pelas ferramentas computacionais separadamente, mas verifica-se uma discrepância de valores quando se compara as ferramentas entre si. Em outras palavras, há um indicativo de que os resultados no ATP são coerentes entre si, e os do AnaHVDC também são coerentes entre si. No entanto, há certa diferença de valores de média e desvio padrão na análise ATP *versus* AnaHVDC.

Tabela 24 – Caso estatístico: variação do número de casos sem distribuição uniforme

Barra	Med.	Número casos							
		200		400		600		1000	
		ATP	AnaHVDC	ATP	AnaHVDC	ATP	AnaHVDC	ATP	AnaHVDC
09A	μ	1,200662	1,186876	1,201240	1,190277	1,201324	1,191350	1,201613	1,193051
	σ	0,039569	0,048388	0,038542	0,046745	0,038875	0,045615	0,038062	0,045158
	$\mu+3\sigma$	1,319369	1,332040	1,316865	1,330513	1,317950	1,328196	1,315800	1,328526
09B	μ	1,161670	1,148354	1,161779	1,149813	1,161339	1,149093	1,160397	1,149655
	σ	0,026984	0,031740	0,026742	0,032795	0,026521	0,032521	0,027305	0,032620
	$\mu+3\sigma$	1,242624	1,243575	1,242004	1,248198	1,240901	1,246656	1,242312	1,247515
09C	μ	1,160246	1,112289	1,159406	1,111768	1,159922	1,111523	1,160867	1,111798
	σ	0,032820	0,011682	0,032301	0,011366	0,032592	0,011300	0,032238	0,011004
	$\mu+3\sigma$	1,258705	1,147335	1,256309	1,145867	1,257697	1,145424	1,257582	1,144810
09 MAX	μ	1,207498	1,193184	1,207698	1,196228	1,207965	1,196409	1,208077	1,197841
	σ	0,036954	0,043294	0,036448	0,041552	0,036052	0,041073	0,035518	0,040617
	$\mu+3\sigma$	1,318358	1,323064	1,317041	1,320883	1,316121	1,319627	1,314632	1,319692
15A	μ	2,326384	2,312568	2,336097	2,310799	2,336119	2,310532	2,337649	2,316438
	σ	0,310263	0,328798	0,322633	0,332870	0,325617	0,331533	0,318696	0,328543
	$\mu+3\sigma$	3,257173	3,298961	3,303995	3,309409	3,312969	3,305132	3,293738	3,302069
15B	μ	2,409163	2,059264	2,403399	2,060088	2,410809	2,055739	2,403486	2,050457
	σ	0,348903	0,234636	0,358566	0,232729	0,356597	0,230648	0,344958	0,237769
	$\mu+3\sigma$	3,455873	2,763172	3,479096	2,758276	3,480600	2,747684	3,438360	2,763765
15C	μ	2,110151	1,681041	2,118547	1,670306	2,121367	1,658581	2,117004	1,659629
	σ	0,240773	0,218263	0,256080	0,210653	0,256975	0,201913	0,251154	0,201848
	$\mu+3\sigma$	2,832470	2,335830	2,886786	2,302265	2,892291	2,264320	2,870466	2,265174
15 MAX	μ	2,619735	2,380486	2,631460	2,375621	2,638981	2,372727	2,625857	2,373290
	σ	0,265991	0,282424	0,265449	0,290116	0,260917	0,287320	0,255697	0,288857
	$\mu+3\sigma$	3,417709	3,227757	3,427806	3,245968	3,421733	3,234688	3,392949	3,239862

Tabela 25 – Caso estatístico: variação do número de casos com distribuição uniforme

Barra	Med.	Número casos							
		200		400		600		1000	
		ATP	AnaHVDC	ATP	AnaHVDC	ATP	AnaHVDC	ATP	AnaHVDC
09A	μ	1,176951	1,151938	1,175962	1,150887	1,174995	1,150835	1,175953	1,149653
	σ	0,039128	0,042370	0,037481	0,041794	0,038962	0,042335	0,040793	0,041336
	$\mu+3\sigma$	1,294335	1,279046	1,288405	1,276268	1,291881	1,277839	1,298332	1,273659
09B	μ	1,177360	1,147849	1,177514	1,148144	1,175811	1,150801	1,175997	1,150002
	σ	0,041678	0,039344	0,041421	0,039924	0,040918	0,040961	0,040762	0,040661
	$\mu+3\sigma$	1,302393	1,265879	1,301777	1,267916	1,298565	1,273684	1,298284	1,271986
09C	μ	1,175331	1,152078	1,176956	1,149514	1,177098	1,148427	1,175015	1,148603
	σ	0,043566	0,040272	0,043826	0,040812	0,043997	0,039543	0,041610	0,039220
	$\mu+3\sigma$	1,306029	1,272893	1,308433	1,271949	1,309090	1,267055	1,299845	1,266265
09 MAX	μ	1,212166	1,181172	1,212158	1,179659	1,211347	1,181200	1,210224	1,180580
	σ	0,038667	0,041798	0,038374	0,043292	0,039483	0,042770	0,039209	0,041784
	$\mu+3\sigma$	1,328168	1,306565	1,327279	1,309535	1,329795	1,309511	1,327850	1,305932
15A	μ	2,281270	2,009745	2,286751	2,003347	2,294991	2,008761	2,291842	2,007281
	σ	0,336304	0,391397	0,345934	0,392597	0,333436	0,405660	0,337623	0,406783
	$\mu+3\sigma$	3,290180	3,183936	3,324554	3,181137	3,295299	3,225739	3,304710	3,227630
15B	μ	2,298293	1,976555	2,305341	2,000375	2,307667	2,016488	2,295213	2,004627
	σ	0,377548	0,375459	0,361632	0,391722	0,352032	0,404376	0,346704	0,394418
	$\mu+3\sigma$	3,430935	3,102932	3,390236	3,175541	3,363764	3,229616	3,335326	3,187882
15C	μ	2,254032	2,040387	2,264116	2,039471	2,280831	2,029819	2,279641	2,017770
	σ	0,309974	0,399239	0,305808	0,411977	0,316709	0,399699	0,317515	0,406750
	$\mu+3\sigma$	3,183955	3,238103	3,181539	3,275402	3,230956	3,228916	3,232186	3,238021
15 MAX	μ	2,639309	2,377550	2,632763	2,401038	2,634028	2,405997	2,624356	2,396017
	σ	0,248412	0,321735	0,257134	0,325542	0,253270	0,334075	0,257960	0,333727
	$\mu+3\sigma$	3,384546	3,342756	3,404164	3,377663	3,393839	3,408222	3,398235	3,397198

O ATP, no arquivo *.LIS, escreve a frequência de ocorrência de cada um dos sorteios da distribuição *gaussiana* para cada uma das fases. Deve ser observado que supondo uma chave trifásica, a cada simulação podem ocorrer três ou quatro sorteios em uma chave trifásica. Para modelar somente a dispersão dos polos do disjuntor, utiliza-se a distribuição normal para cada uma das fases. Para incluir efeito da variação da fase, considera-se a distribuição uniforme com o mesmo valor para cada uma das fases. Havendo configuração do sorteio uniforme através dos parâmetros DEGMIN e DEGMAX, serão quatro sorteios, os três gaussianos outrora relatados, mais o sorteio de natureza uniforme. O AnaHVDC escreve os resultados dos valores máximos (tempo de ocorrência do máximo, valor máximo e variável associada) nos arquivos result.csv e dos tempos de operação das chaves (para as distribuições normal e uniforme) no arquivo simulation.csv.

Assim, foram utilizados os cenários extremos, com 200 e 1000 simulações, sem considerar a distribuição uniforme e considerando a distribuição uniforme. A premissa de usar 200 simulações e 1000 simulações, está no fato que 200 simulações é a prática atual em estudos de transitórios e 1000 seria um número de simulações que tenderia a apresentar resultados estatisticamente mais aderentes. Esses resultados serão apresentados em subseções específicas com objetivo de facilitar a visualização.

A Figura 202 mostra o resumo dos resultados gráficos que serão apresentados sobre a forma de histograma e a Figura 203 as medições que serão feitas em cada uma das plataformas. Os tempos das chaves obedecem à distribuição de probabilidade gaussiana, e, portanto, quanto mais aderente a curva normal de referência mais consistentes são considerados os sorteios. A distribuição de probabilidade das sobretensões não necessariamente segue uma distribuição de probabilidades de distribuição normal, mas optou-se por manter a referência nessa distribuição de forma padronizada.

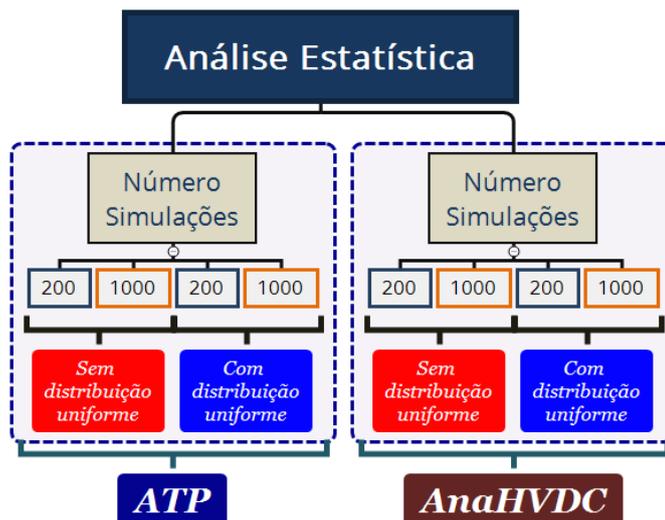


Figura 202 – Resumo dos resultados estatísticos

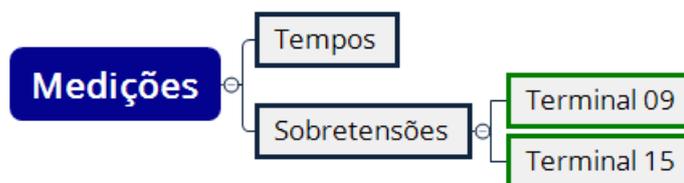


Figura 203 – Medições para os resultados estatísticos

Graficamente, as ocorrências foram normalizadas em valores percentuais, dividindo-se estas ocorrências contabilizadas pelo total de simulações consideradas ($n_{sim} = 200$ e $n_{sim} = 1000$) e multiplicando por 100 para valores percentuais. Essa compatibilização facilita a comparação entre variáveis e resultados distintos. No entanto, foi necessário também ajustar a amplitude da curva normal com um fator multiplicativo. O fator utilizado foi $fator = Step \times 100$, onde $Step$ é a largura da faixa de valores onde são contabilizadas as ocorrências. Com este fator, a integral de cada faixa na distribuição normal passa a ser o percentual de ocorrências em cada faixa e em tese, deveria ser aderente ao valor de ocorrências normalizado quando a variável aleatória possui distribuição probabilística normal.

Para o tempo, utilizou-se $Step = \frac{\sigma}{3} \times 100$, onde o desvio padrão do tempo é dado por um sexto da dispersão máxima: $\sigma = \frac{disp_{max}}{6}$. Este passo é o mesmo utilizado no gráfico textual do arquivo de saída LIS do ATP. Para cada tempo sorteado de chave em cada fase,

é calculado, de forma discreta, a distância desse ponto em relação do ponto central. Assim, para uma distância zero significa que está sobre o ponto central, e para uma distância 10 significa que está a 10 passos do ponto central. Para o passo tem-se que:

$$dt = \frac{\sigma}{3} \quad (321)$$

$$\sigma = \frac{disp_{max}}{6} \quad (322)$$

As distâncias serão calculadas para cada uma das fases em relação ao tempo e às sobretensões. Esse procedimento considera as diferenças entre os valores observados e um ponto central de referência, permitindo acumular as distâncias inteiras que caem dentro de um intervalo previamente definido. Para o tempo, essas distâncias são obtidas por meio da fórmula:

$$nh_{t_{a_i}} = arred\left(\frac{t_{a_i} - t_m}{dt}\right) \quad (323)$$

$$nh_{t_{b_i}} = arred\left(\frac{t_{b_i} - t_m}{dt}\right) \quad (324)$$

$$nh_{t_{c_i}} = arred\left(\frac{t_{c_i} - t_m}{dt}\right) \quad (325)$$

Onde t_{a_i} , t_{b_i} e t_{c_i} são os tempos observados no sorteio, t_m é o ponto central de referência e $nh_{t_{a_i}}$, $nh_{t_{b_i}}$ e $nh_{t_{c_i}}$ são as distâncias calculadas para o tempo, dentro da faixa dt . Essas distâncias acumuladas ajudam a analisar a concentração e dispersão das ocorrências em torno do ponto central para identificar padrões temporais e de sobretensão relevantes.

Para as sobretensões utilizou-se um passo de 0,05 pu, também da mesma forma que é apresentado no arquivo de saída LIS do ATP.

$$nh_{V_{a_i}} = arred\left(\frac{V_{a_i} - V_m}{0,05}\right) \quad (326)$$

$$nh_{V_{b_i}} = arred\left(\frac{V_{b_i} - V_m}{0,05}\right) \quad (327)$$

$$nh_{V_{c_i}} = arred\left(\frac{V_{c_i} - V_m}{0,05}\right) \quad (328)$$

Onde V_{a_i} , V_{b_i} e V_{c_i} são as tensões medidas no sorteio, V_{t_m} é o ponto central de referência e $nh_{V_{a_i}}$, $nh_{V_{b_i}}$ e $nh_{V_{c_i}}$ são as distâncias calculadas para a tensão, dentro da faixa $0,05pu$.

A Figura 204 ilustra os principais elementos das curvas de ocorrências obtidas a partir dos dados simulados.

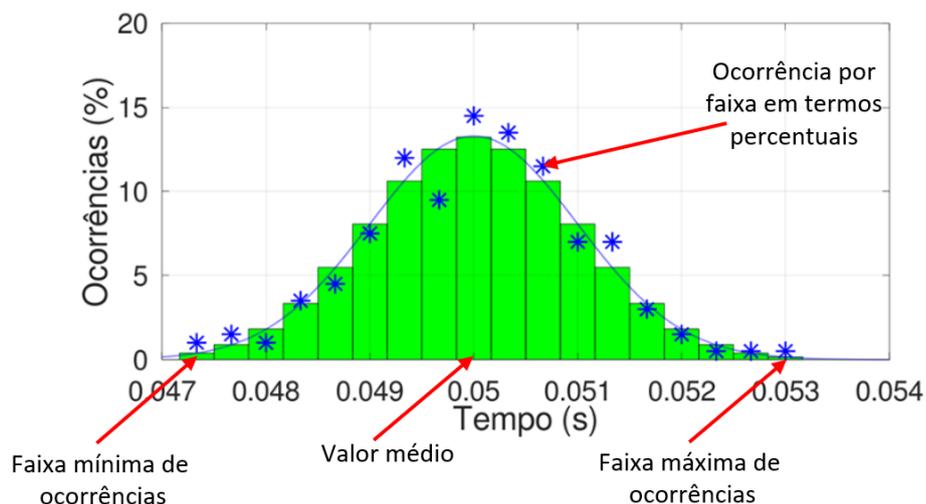


Figura 204 – Identificação dos elementos das curvas de ocorrência percentual

As ocorrências são apresentadas em termos percentuais para cada uma das fases. Serão apresentados quatro conjuntos de gráficos. Os três primeiros são os sorteios das chaves em cada uma das fases (A, B e C, respectivamente), permitindo observar a dispersão dos tempos dos sorteios em cada fase de forma individual. O último gráfico, identificado como *SUMMARY*, representa em qual fase ocorreu o valor máximo das sobretensões no terminal receptor da linha de transmissão. Assim, a cada sorteio verifica em qual fase ocorreu o maior valor de sobretensão e o *SUMMARY* no final representa graficamente esse conjunto de casos. Optou-se por apresentar o *SUMMARY* do terminal receptor por estar associado aos casos mais críticos de sobretensão.

4.3.1 Simulação com 200 sorteios sem distribuição uniforme

Esse primeiro caso desconsidera a distribuição uniforme nos sorteios das chaves e realiza 200 sorteios no ATP e no AnaHVDC. As ocorrências são apresentadas em termos percentuais.

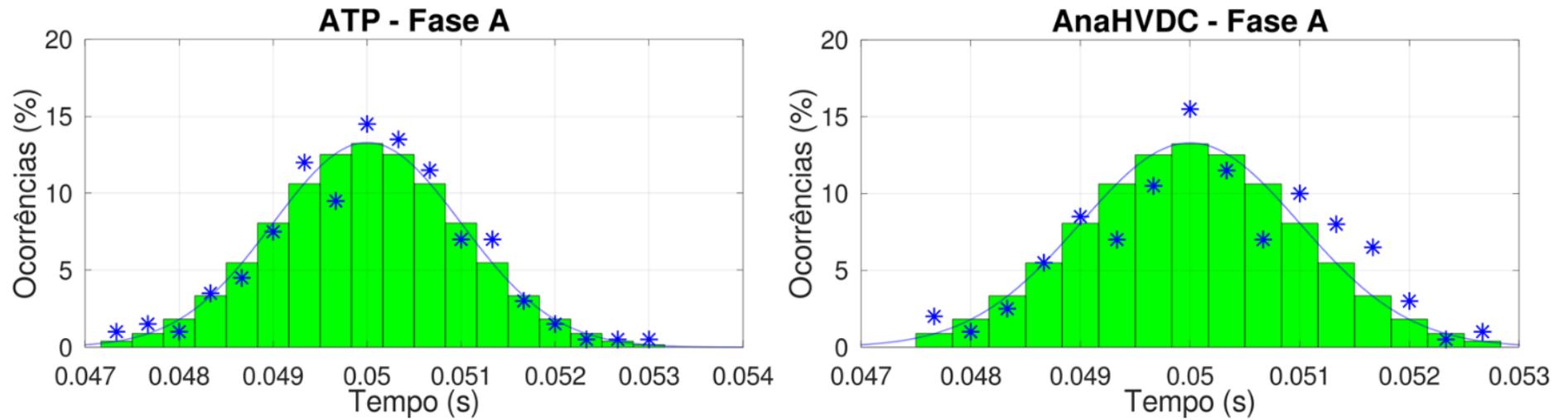


Figura 205 – Simulação com 200 casos sem distribuição uniforme: Sorteio da fase A da chave

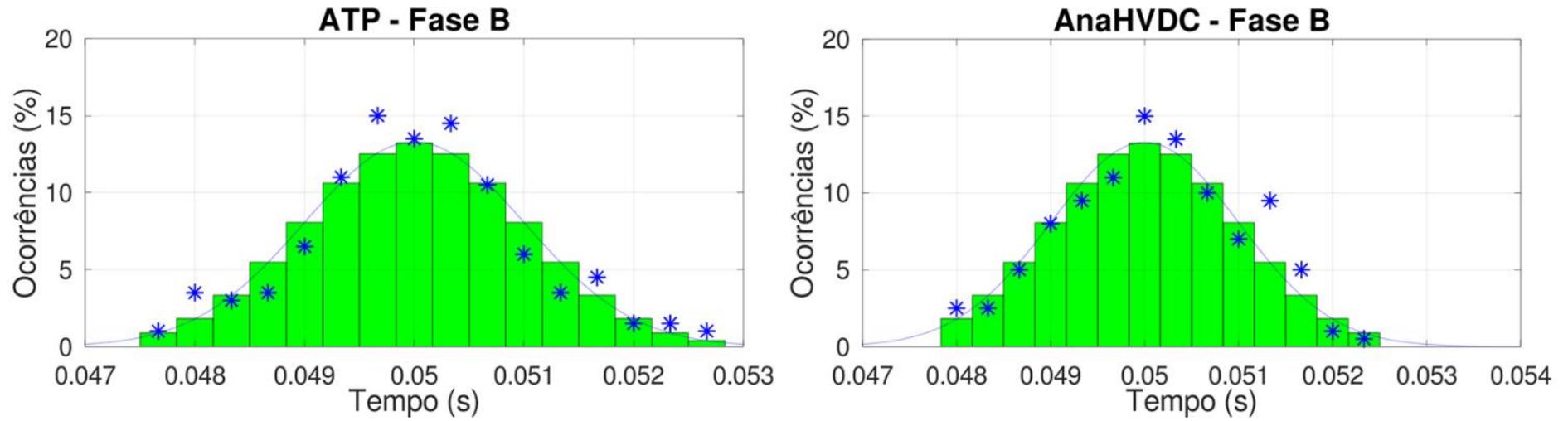


Figura 206 – Simulação com 200 casos sem distribuição uniforme: Sorteio da fase B da chave

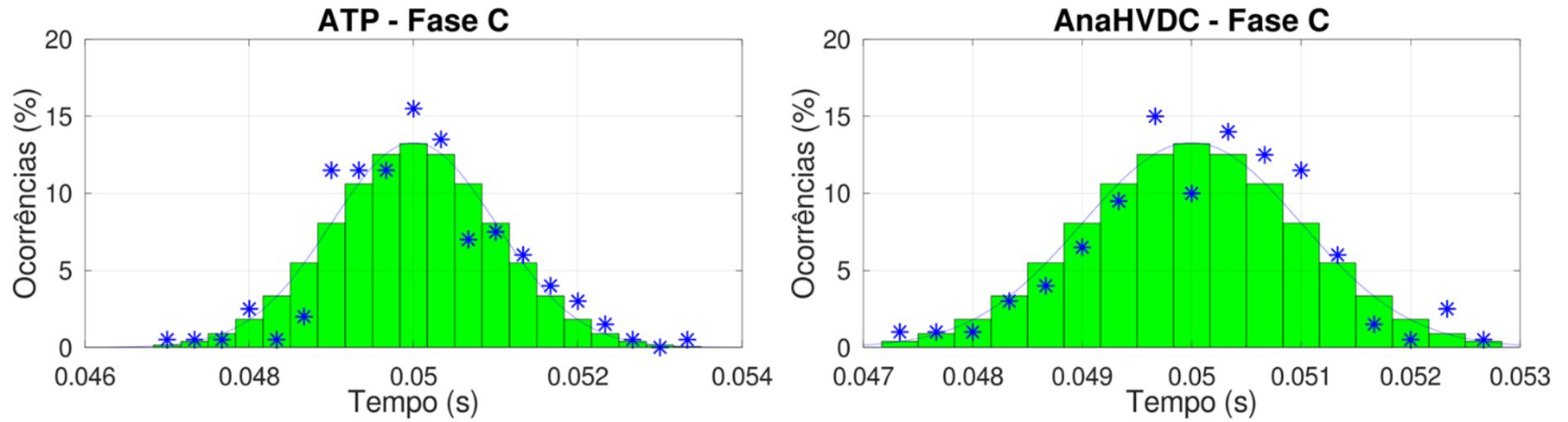


Figura 207 – Simulação com 200 casos sem distribuição uniforme: Sorteio da fase C da chave

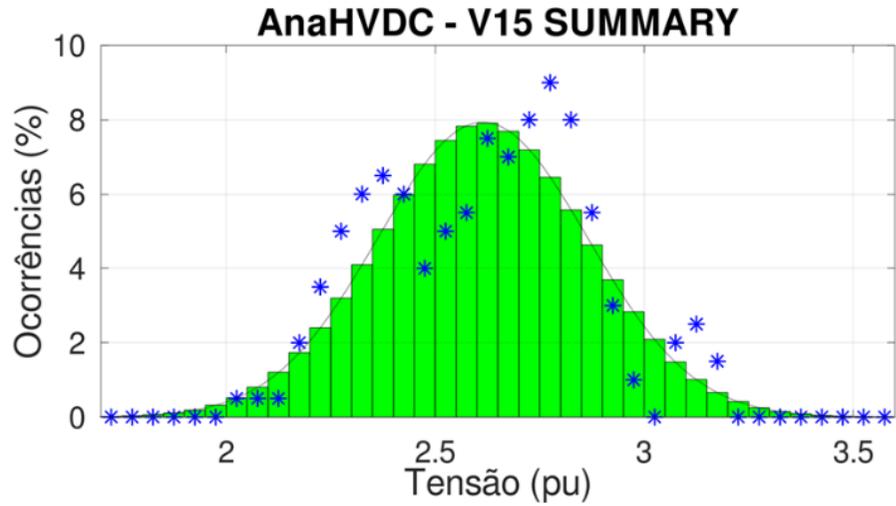
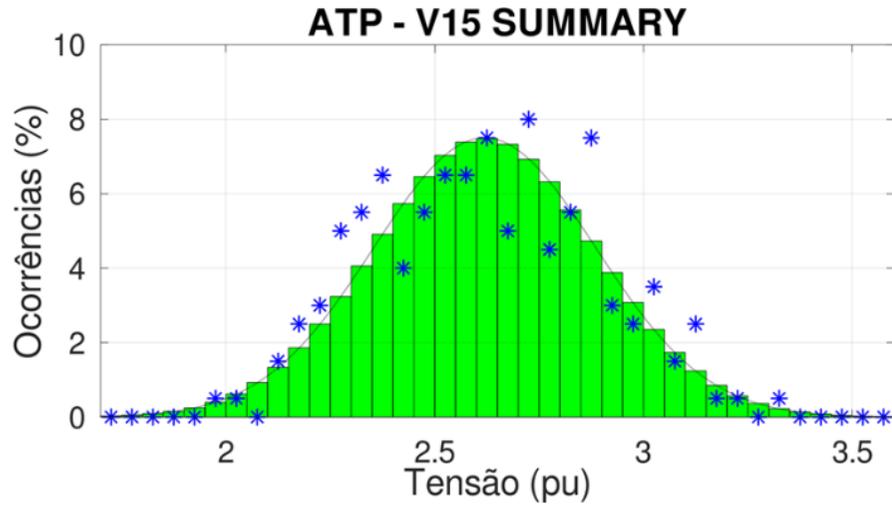


Figura 208 – Simulação com 200 casos sem distribuição uniforme: Sobretensões máximas na barra 15

4.3.2 Simulação com 1000 sorteios sem distribuição uniforme

Esse segundo caso desconsidera a distribuição uniforme nos sorteios e faz 1000 sorteios no ATP e no AnaHVDC. As ocorrências são apresentadas em termos percentuais. Nota-se que há maior aderência em relação a curva normal com 1000 sorteios em relação aos resultados apresentados com 200 sorteios. Destaca-se que para a fase A, os resultados do ATP estão mais coerentes com a distribuição normal e que para a fase C, os resultados do AnaHVDC estão mais aderentes à curva normal.

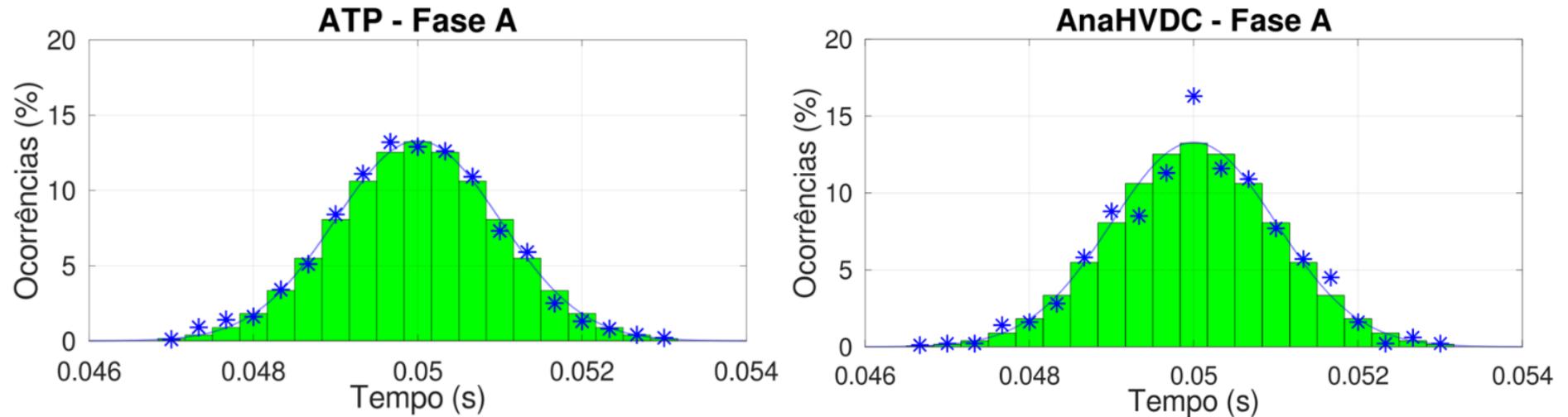


Figura 209 – Simulação com 1000 casos sem distribuição uniforme: Sorteio da fase A da chave

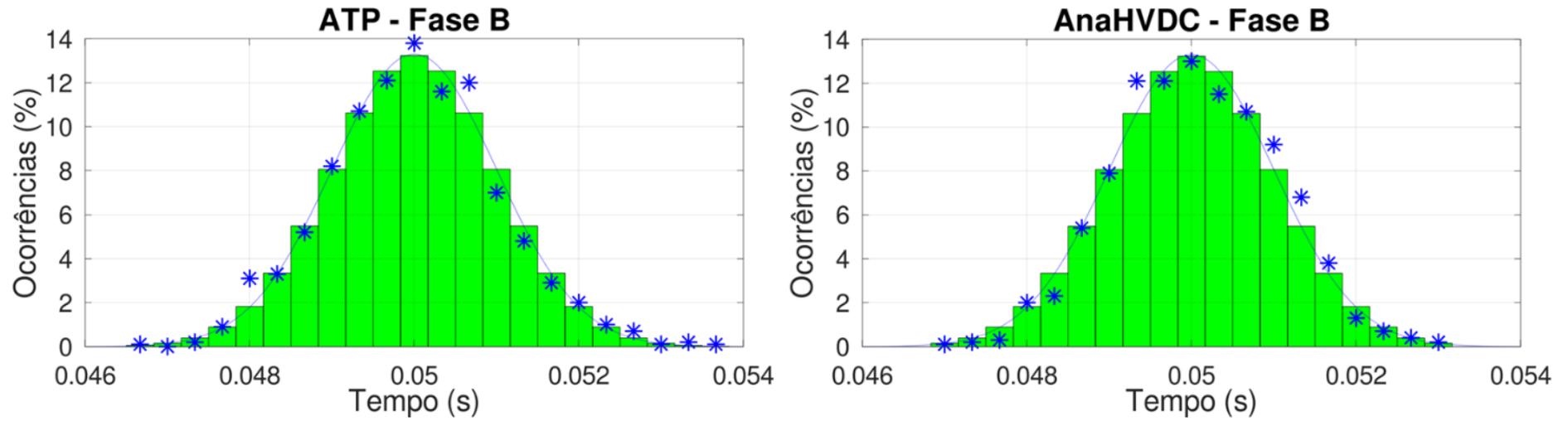


Figura 210 – Simulação com 1000 casos sem distribuição uniforme: Sorteio da fase B da chave

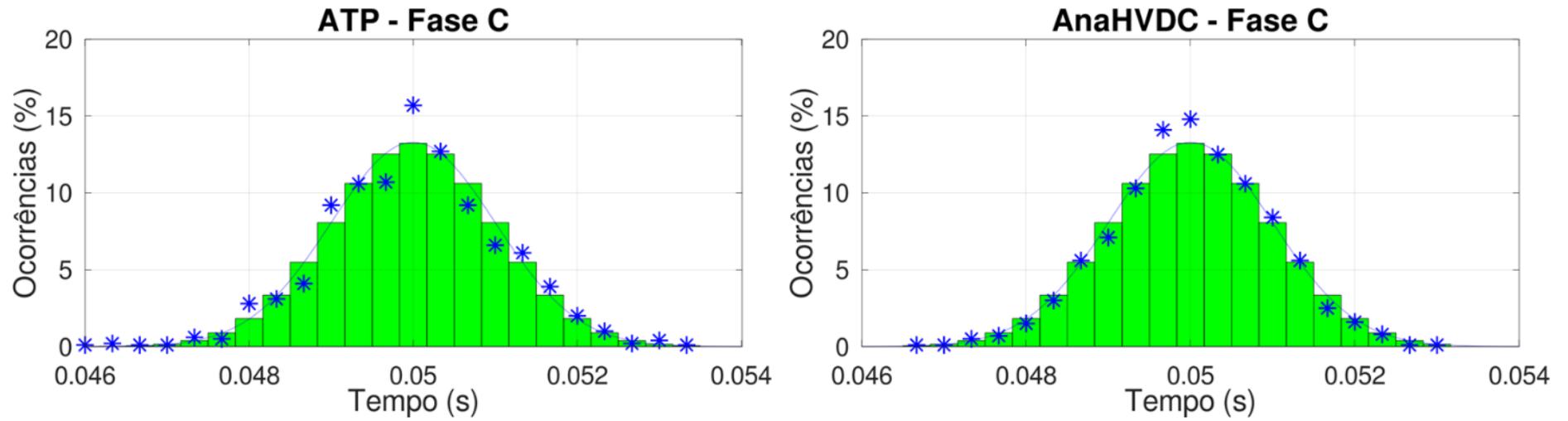


Figura 211 – Simulação com 1000 casos sem distribuição uniforme: Sorteio da fase C da chave

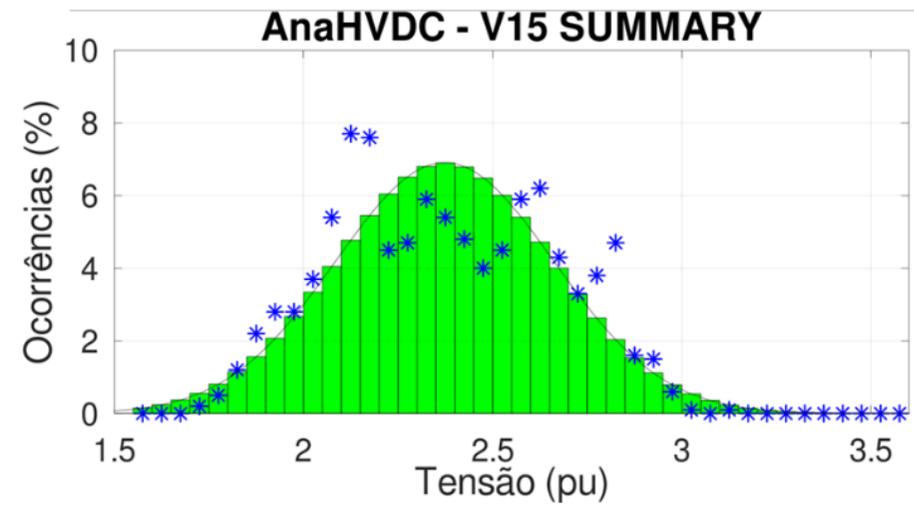
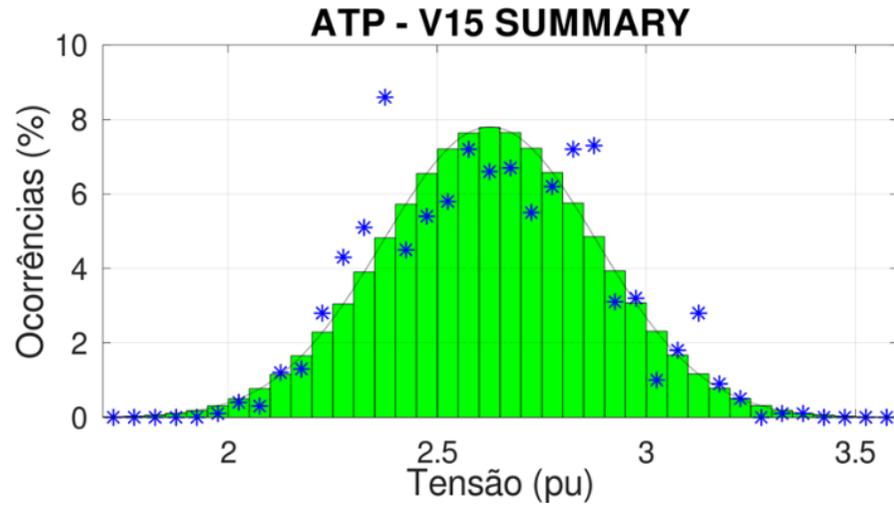


Figura 212 – Simulação com 1000 casos sem distribuição uniforme: Sobretensões máximas na barra 15

4.3.3 Simulação com 200 sorteios com distribuição uniforme

Nota-se que para os tempos das chaves a inclusão da distribuição de probabilidade uniforme promove um espalhamento das medições quando se compara essa com uma curva normal padronizada. Isso, ocorre tanto para o ATP como o AnaHVDC, em todas as fases. Essa dispersão também se reflete na distribuição das sobretensões.

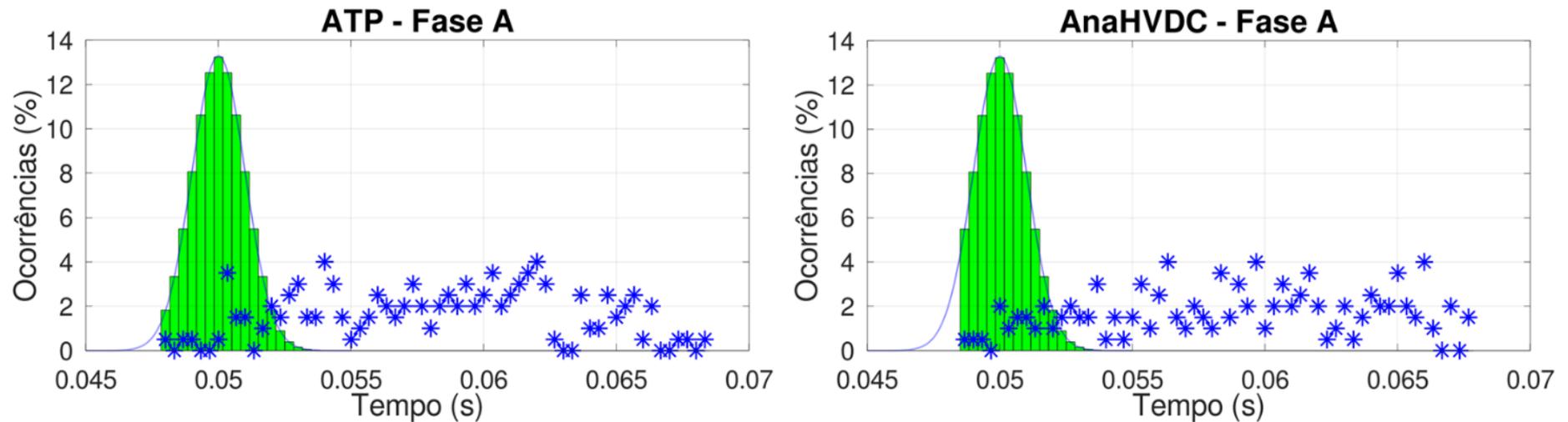


Figura 213 – Simulação com 200 casos com distribuição uniforme: Sorteio da fase A da chave

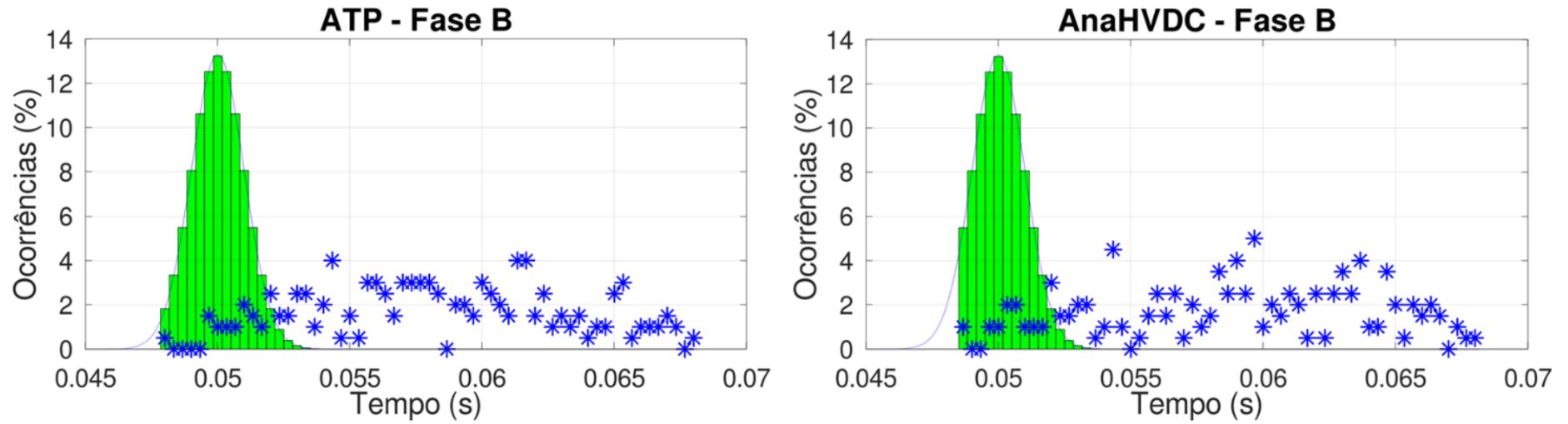


Figura 214 – Simulação com 200 casos com distribuição uniforme: Sorteio da fase B da chave

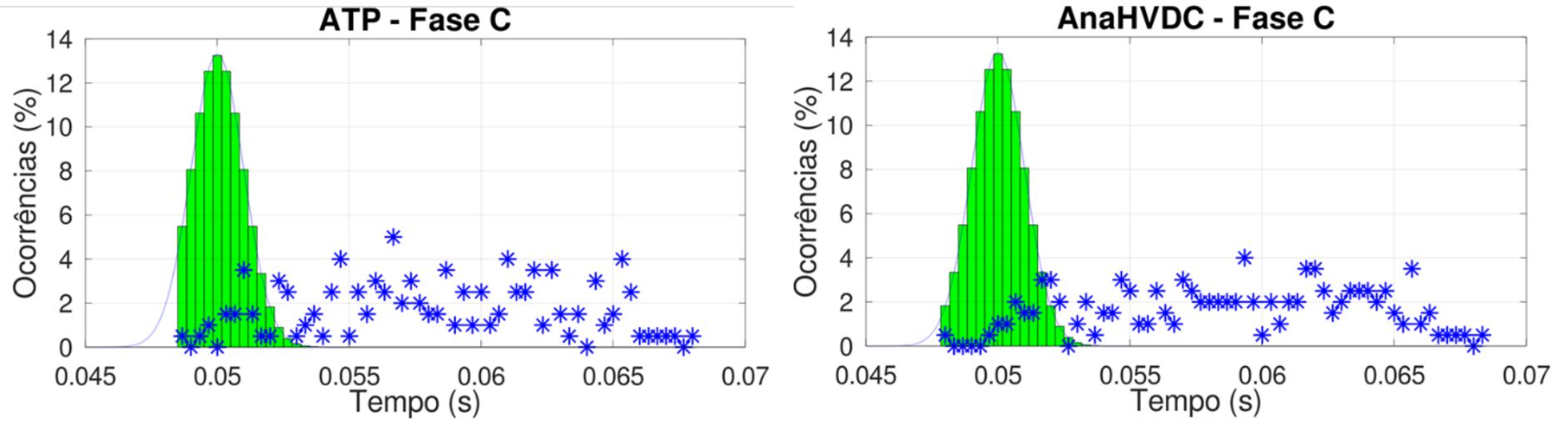


Figura 215 – Simulação com 200 casos com distribuição uniforme: Sorteio da fase C da chave

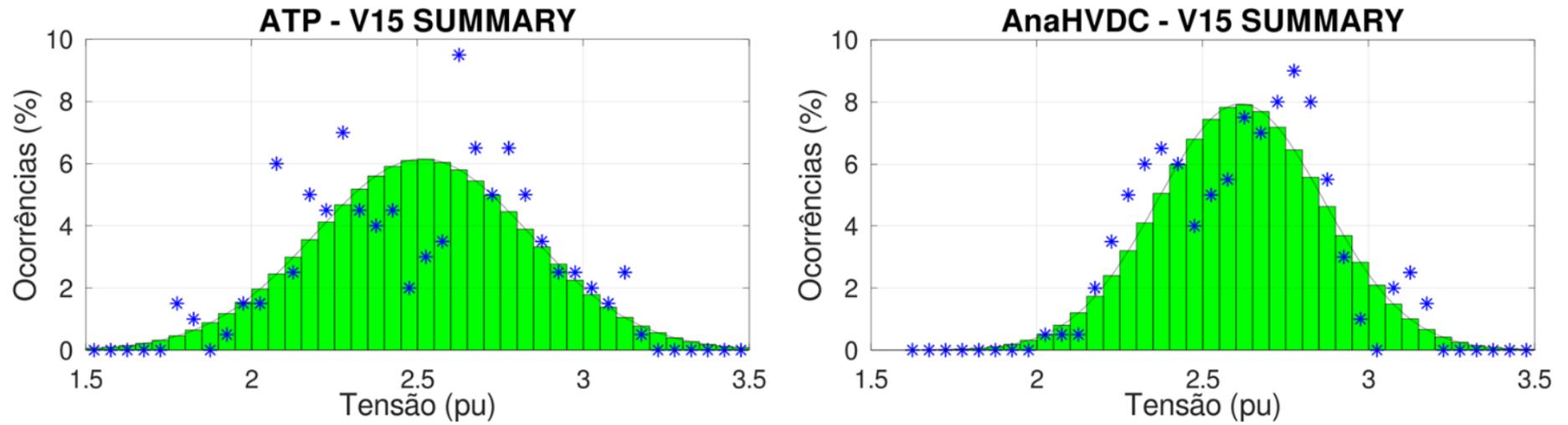


Figura 216 – Simulação com 200 casos com distribuição uniforme: Sobretensões máximas na barra 15

4.3.4 Simulação com 1000 sorteios com distribuição uniforme

Assim, como no caso com 200 simulações, nota-se que para os tempos das chaves a inclusão da distribuição de probabilidade uniforme promove um espalhamento das medições quando comparado com uma curva gaussiana padronizada. Isso, ocorre no ATP e no AnaHVDC.

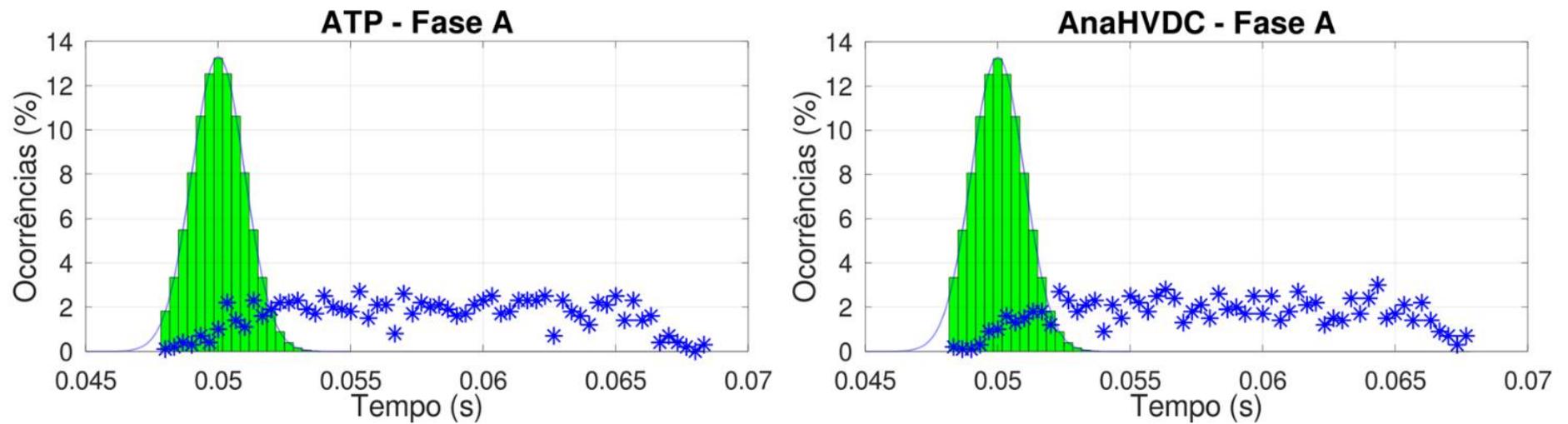


Figura 217 – Simulação com 1000 casos com distribuição uniforme: Sorteio da fase A da chave

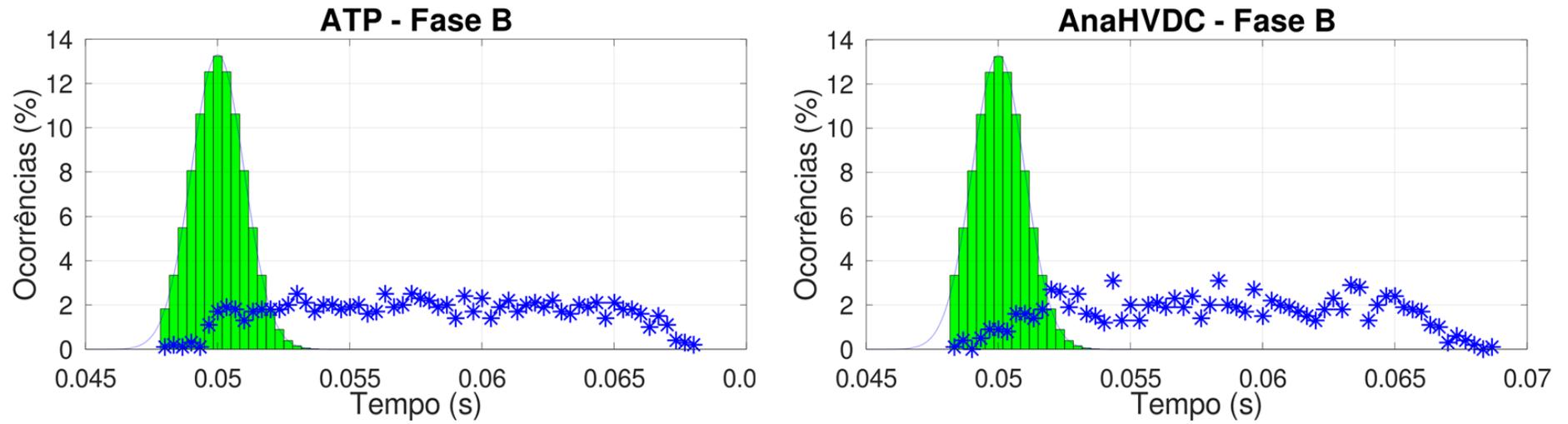


Figura 218 – Simulação com 1000 casos com distribuição uniforme: Sorteio da fase B da chave

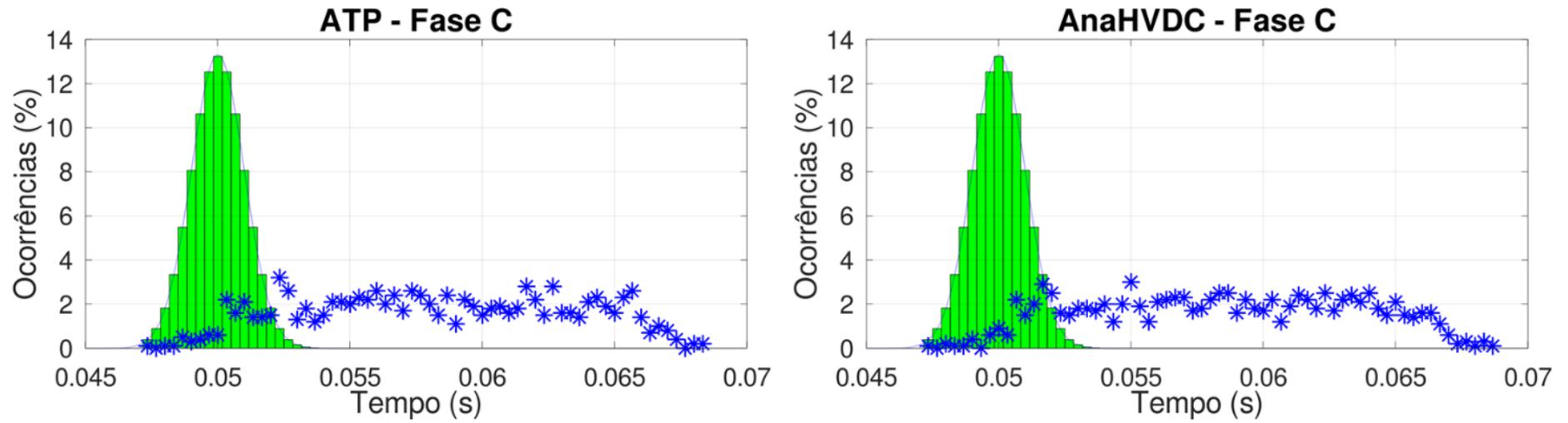


Figura 219 – Simulação com 1000 casos com distribuição uniforme: Sorteio da fase C da chave

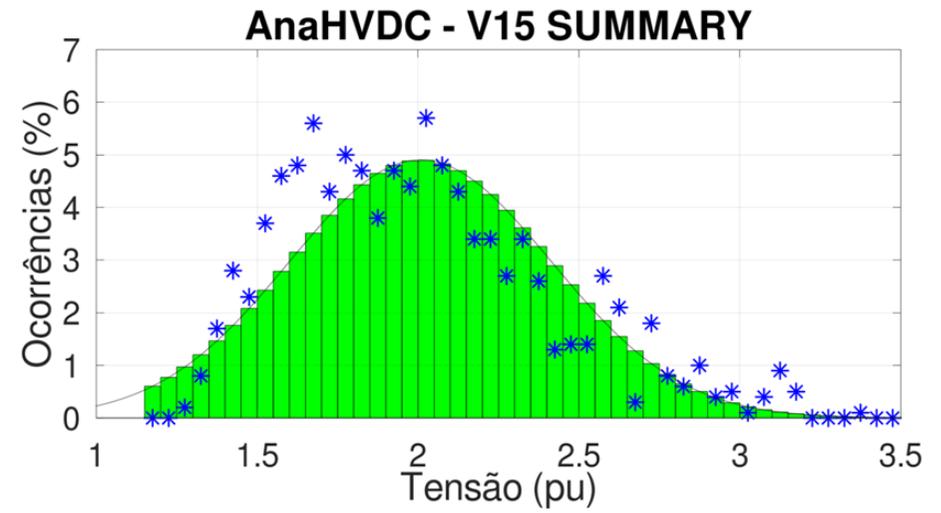
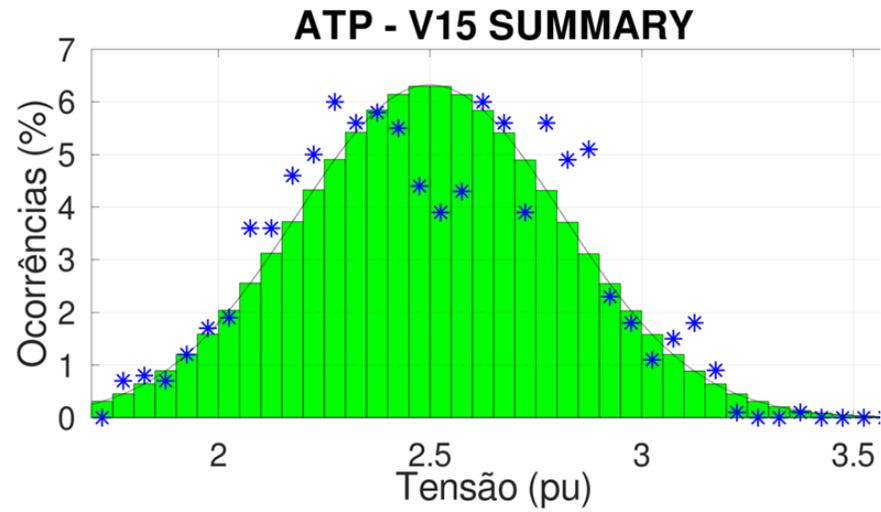


Figura 220 – Simulação com 1000 casos com distribuição uniforme: Sobretensões máximas na barra 15

4.3.1 Métrica de ajuste do modelo

Objetivando ter uma validação mais consolidada dos sorteios, fez-se uso das ferramentas de *goodness of fit*, ou qualidade do ajuste, do programa MATLAB [109]. De forma geral consiste em um método estatístico utilizado para avaliar quanto um conjunto de amostras se ajusta a uma distribuição teórica esperada.

O objetivo foi verificar se os sorteios seguem a distribuição normal. Foi utilizado o teste de *Kolmogorov-Smirnov* para comparar os sorteios com a distribuição teórica. A função *kstest* [110] foi utilizada para testar a hipótese de que os dados seguem a distribuição normal. A estatística *Ks* indica a diferença máxima entre a função de distribuição acumulada dos sorteios *versus* a curva teórica. O p-valor indica a probabilidade de que os sorteios ocorram de acordo com o modelo teórico. Um valor baixo de p-valor indica não aderência dos dados ao modelo teórico, rejeitando a hipótese de que os dados seguem determinada distribuição. Ou seja, há sugestão de que foi obtido um ajuste não adequado.

Abaixo segue a listagem de resultados obtidos. A formação do nome do arquivo indica a origem dos sorteios, por exemplo: o arquivo ATP200_s.txt indica que são resultados obtidos do ATP com 200 sorteios sem a inclusão do sorteio uniforme.

```
-----
Arquivo ATP200_s.txt

Fase A
Estatística KS: 0.03948
Valor-p: 0.90179
Não rejeitamos a hipótese nula. A amostra segue a distribuição normal.

Fase B
Estatística KS: 0.03906
Valor-p: 0.90850
Não rejeitamos a hipótese nula. A amostra segue a distribuição normal.

Fase C
Estatística KS: 0.06242
Valor-p: 0.40057
Não rejeitamos a hipótese nula. A amostra segue a distribuição normal.

-----
Arquivo ANA200_s.txt

Fase A
Estatística KS: 0.10279
Valor-p: 0.02712
Rejeitamos a hipótese nula. A amostra não segue a distribuição normal.

Fase B
Estatística KS: 0.05681
Valor-p: 0.52011
Não rejeitamos a hipótese nula. A amostra segue a distribuição normal.

Fase C
```

Estatística KS: 0.06434
Valor-p: 0.36368
Não rejeitamos a hipótese nula. A amostra segue a distribuição normal.

Arquivo ATP200_c.txt

Fase A
Estatística KS: 0.88323
Valor-p: 0.00000
Rejeitamos a hipótese nula. A amostra não segue a distribuição normal.

Fase B
Estatística KS: 0.87728
Valor-p: 0.00000
Rejeitamos a hipótese nula. A amostra não segue a distribuição normal.

Fase C
Estatística KS: 0.87493
Valor-p: 0.00000
Rejeitamos a hipótese nula. A amostra não segue a distribuição normal.

Arquivo ANA200_c.txt

Fase A
Estatística KS: 0.10279
Valor-p: 0.02712
Rejeitamos a hipótese nula. A amostra não segue a distribuição normal.

Fase B
Estatística KS: 0.05681
Valor-p: 0.52011
Não rejeitamos a hipótese nula. A amostra segue a distribuição normal.

Fase C
Estatística KS: 0.06434
Valor-p: 0.36368
Não rejeitamos a hipótese nula. A amostra segue a distribuição normal.
Estatística KS: 1.00000
Valor-p: 0.00000
Rejeitamos a hipótese nula. A amostra não segue a distribuição normal.

Arquivo ATP1000_s.txt

Fase A
Estatística KS: 0.02985
Valor-p: 0.32840
Não rejeitamos a hipótese nula. A amostra segue a distribuição normal.

Fase B
Estatística KS: 0.02112
Valor-p: 0.75568
Não rejeitamos a hipótese nula. A amostra segue a distribuição normal.

Fase C
Estatística KS: 0.01691
Valor-p: 0.93260
Não rejeitamos a hipótese nula. A amostra segue a distribuição normal.

Arquivo ANA1000_s.txt

Fase A
Estatística KS: 0.02970
Valor-p: 0.33450
Não rejeitamos a hipótese nula. A amostra segue a distribuição normal.

Fase B
Estatística KS: 0.02781
Valor-p: 0.41423
Não rejeitamos a hipótese nula. A amostra segue a distribuição normal.

Fase C
Estatística KS: 0.02406
Valor-p: 0.60003

Não rejeitamos a hipótese nula. A amostra segue a distribuição normal.

Arquivo ATP1000_c.txt

Fase A

Estatística KS: 0.85671

Valor-p: 0.00000

Rejeitamos a hipótese nula. A amostra não segue a distribuição normal.

Fase B

Estatística KS: 0.84928

Valor-p: 0.00000

Rejeitamos a hipótese nula. A amostra não segue a distribuição normal.

Fase C

Estatística KS: 0.85834

Valor-p: 0.00000

Rejeitamos a hipótese nula. A amostra não segue a distribuição normal.

Arquivo ATP1000_c.txt

Fase A

Estatística KS: 0.85671

Valor-p: 0.00000

Rejeitamos a hipótese nula. A amostra não segue a distribuição normal.

Fase B

Estatística KS: 0.84928

Valor-p: 0.00000

Rejeitamos a hipótese nula. A amostra não segue a distribuição normal.

Fase C

Estatística KS: 0.85834

Valor-p: 0.00000

Rejeitamos a hipótese nula. A amostra não segue a distribuição normal.

Na sequência, foi verificado se os sorteios obtidos no ATP e no AnaHVDC correspondem a mesma distribuição utilizando a função kstest2 [111]. Note que a primeira análise consistia na comparação com uma distribuição teórica de referência e, nessa análise, os sorteios do ATP e do AnaHVDC são comparados entre si.

Arquivo ATP200_s.txt

Arquivo ANA200_s.txt

Fase A

Estatística KS: 0.09500

Valor-p: 0.31245

Conclusão: Não há evidência suficiente para rejeitar a hipótese de que as duas amostras vêm da mesma distribuição (p-valor = 0.3124).

Fase B

Estatística KS: 0.06000

Valor-p: 0.85371

Conclusão: Não há evidência suficiente para rejeitar a hipótese de que as duas amostras vêm da mesma distribuição (p-valor = 0.8537).

Fase C

Estatística KS: 0.07500

Valor-p: 0.61065

Conclusão: Não há evidência suficiente para rejeitar a hipótese de que as duas amostras vêm da mesma distribuição (p-valor = 0.6107).

Arquivo ATP200_c.txt

Arquivo ANA200_c.txt

```

Fase A
Estatística KS: 0.89000
Valor-p: 0.00000
Conclusão: Rejeitamos a hipótese de que as duas amostras vêm da mesma distribuição (p-valor = 0.0000).

Fase B
Estatística KS: 0.89500
Valor-p: 0.00000
Conclusão: Rejeitamos a hipótese de que as duas amostras vêm da mesma distribuição (p-valor = 0.0000).

Fase C
Estatística KS: 0.87500
Valor-p: 0.00000
Conclusão: Rejeitamos a hipótese de que as duas amostras vêm da mesma distribuição (p-valor = 0.0000).

-----
Arquivo ATP1000_s.txt
Arquivo ANA1000_s.txt

Fase A
Estatística KS: 0.04900
Valor-p: 0.17632
Conclusão: Não há evidência suficiente para rejeitar a hipótese de que as duas amostras vêm da mesma distribuição (p-valor = 0.1763).

Fase B
Estatística KS: 0.04000
Valor-p: 0.39353
Conclusão: Não há evidência suficiente para rejeitar a hipótese de que as duas amostras vêm da mesma distribuição (p-valor = 0.3935).

Fase C
Estatística KS: 0.03300
Valor-p: 0.64061
Conclusão: Não há evidência suficiente para rejeitar a hipótese de que as duas amostras vêm da mesma distribuição (p-valor = 0.6406).

-----
Arquivo ATP1000_c.txt
Arquivo ANA1000_c.txt

Fase A
Estatística KS: 0.86500
Valor-p: 0.00000
Conclusão: Rejeitamos a hipótese de que as duas amostras vêm da mesma distribuição (p-valor = 0.0000).

Fase B
Estatística KS: 0.85600
Valor-p: 0.00000
Conclusão: Rejeitamos a hipótese de que as duas amostras vêm da mesma distribuição (p-valor = 0.0000).

Fase C
Estatística KS: 0.86500
Valor-p: 0.00000
Conclusão: Rejeitamos a hipótese de que as duas amostras vêm da mesma distribuição (p-valor = 0.0000).

```

Como sugestão para análises futuras, recomenda-se a adoção do método de verossimilhança máxima. Esse procedimento consiste em maximizar a função de verossimilhança, que representa a probabilidade de observar os dados disponíveis em função de um determinado conjunto de parâmetros. A principal vantagem da verossimilhança máxima reside em sua capacidade de gerar estimadores consistentes e eficientes, ou seja, os estimadores convergem para os valores verdadeiros dos parâmetros à

medida que o tamanho da amostra aumenta, além de apresentarem a menor variância possível entre estimadores não tendenciosos. Esse método se destaca, ainda, por sua adequação na modelagem de distribuições complexas, assimétricas ou com características não convencionais, o que o torna particularmente útil em contextos de sistemas reais.

4.3.2 Comparação da análise estatística

Para as ocorrências dos tempos das chaves estatísticas, o sorteio é conhecido, de distribuição de probabilidade normal ou distribuição de probabilidade normal mais uniforme. Para as ocorrências das sobretensões não é possível determinar a priori a distribuição de probabilidade. Adotou-se a referência da normal como ponto de partida em uma primeira análise.

Nota-se que, os resultados, já apresentados na Tabela 24 e Tabela 25, estão apresentando características similares. Em certa medida, a validação não é exata, uma vez que os sorteios são distintos em ambas as ferramentas. Assim, foi realizada uma validação considerando um caso reduzido com intuito de verificar numericamente os equacionamentos estatísticos. O procedimento adotado será descrito sucintamente a seguir: i) executa-se uma simulação estatística no ATP com 5 casos; ii) no arquivo *.LIS obtém-se a informação dos tempos dos sorteios para cada uma das chaves; iii) criam-se se 5 casos determinísticos no AnaHVDC que são o análogo ao caso estatístico gerado pela ferramenta; iv) executa-se as simulações dos casos determinísticos no AnaHVDC gerados com os tempos obtidos do arquivo *.LIS; v) com os resultados gráficos do arquivo *.PLT processam-se os cálculos necessários (valor máximo, média, desvio-padrão).

Esses resultados seguem resumidos na Tabela 26 e Tabela 27, adotando a convenção utilizada no ATP (valor absoluto e em pu). Há uma diferença percentual, destacada na Tabela 28, nos resultados comparativos que pode ser justificada por uma pequena diferença no ponto de operação, devido aos motivos elencados na seção 4.2 que tratou do ajuste do caso base e suas limitações.

Tabela 26 – Caso estatístico ATP (Tensões em pu): Resultados com 5 casos

ATP								
#	V09A	V09B	V09C	V09S	V15A	V15B	V15C	V15S
1	1,1725	1,1776	1,2258	1,2258	2,7609	1,8546	2,3341	2,7609
2	1,2180	1,3077	1,1564	1,3077	2,5349	2,3499	2,3113	2,5349
3	1,1357	1,1603	1,2092	1,2092	2,0861	2,1828	2,8310	2,8310
4	1,1485	1,1816	1,1305	1,1816	1,8456	2,7242	2,1074	2,7242
5	1,1581	1,1720	1,1295	1,1720	2,0766	3,0280	2,1060	3,0280
μ	1,1666	1,1998	1,1703	1,2192	2,2608	2,4279	2,3380	2,7758
σ	0,0318	0,0608	0,0448	0,0539	0,3749	0,4590	0,2961	0,1786

Tabela 27 – Caso estatístico AnaHVDC: Resultados com 5 casos

ANAHVDC								
#	V09A	V09B	V09C	V09S	V15A	V15B	V15C	V15S
1	1,1721	1,1787	1,2251	1,2251	2,7595	1,8485	2,3377	2,7595
2	1,2189	1,3082	1,1571	1,3082	2,5357	2,3511	2,3110	2,5357
3	1,1364	1,1606	1,2090	1,2090	2,0866	2,1840	2,8365	2,8365
4	1,1492	1,1822	1,1311	1,1822	1,8457	2,7252	2,1166	2,7252
5	1,1586	1,1728	1,1296	1,1728	2,0786	3,0282	2,1067	3,0282
μ	1,1670	1,2005	1,1704	1,2195	2,2612	2,4274	2,3417	2,7770
σ	0,0318	0,0608	0,0443	0,0538	0,3742	0,4609	0,2965	0,1788

Tabela 28 – Comparação ATP *versus* AnaHVDC: Resultados com 5 casos

Erro Relativo (Referência ATP)								
#	V09A	V09B	V09C	V09S	V15A	V15B	V15C	V15S
1	-0,03%	0,10%	-0,05%	-0,05%	-0,05%	-0,33%	0,16%	-0,05%
2	0,07%	0,04%	0,06%	0,04%	0,03%	0,05%	-0,01%	0,03%
3	0,06%	0,03%	-0,02%	-0,02%	0,03%	0,06%	0,19%	0,19%
4	0,06%	0,05%	0,05%	0,05%	0,01%	0,04%	0,44%	0,04%
5	0,04%	0,07%	0,01%	0,07%	0,10%	0,01%	0,03%	0,01%
μ	0,04%	0,06%	0,01%	0,02%	0,02%	-0,02%	0,16%	0,04%
σ	0,07%	-0,11%	-1,00%	-0,14%	-0,18%	0,42%	0,13%	0,09%

Dessa forma, foi possível verificar que se o AnaHVDC tivesse os mesmos sorteios que o ATP, forneceria os mesmos resultados estatísticos. Essa avaliação serve para validar os processos desenvolvidos no AnaHVDC para a realização da análise estatística, mostrando que possíveis diferenças nos resultados dessa funcionalidade podem estar diretamente relacionadas aos sorteios de sua etapa estocástica.

A avaliação descrita reforça a validação do estudo de energização de linhas de transmissão. Contudo, não se destina a validar diretamente a análise estatística propriamente dita, especialmente quando combina diferentes distribuições de tempos de

chaveamento. Isso sugere que, embora os modelos utilizados sejam sólidos, podem ocorrer erros de implementação, particularmente nas configurações complexas que envolvem distribuições combinadas. Um aspecto a ser destacado é que todos os testes realizados foram limitados a um número máximo de 1000 sorteios. Além disso, a análise estatística de tamanho amostral 200 casos simulados no ATP e considerando meio ciclo da onda para a distribuição uniforme tem se mostrado suficiente e uma prática adotada nos estudos conduzidos pelo setor elétrico [6].

4.4 Resultados da linha de transmissão modelada com configuração geométrica

Esta seção tem como objetivo apresentar os resultados e as considerações gerais sobre o desenvolvimento do modelo da linha de transmissão modelada a partir dos dados de sua configuração geométrica. Será realizada uma simulação comparativa entre o AnaHVDC e o ATP em um sistema duas barras para validação preliminar, permitindo verificar a consistência e a precisão das funções implementadas no modelo, comparando os resultados obtidos por ambas as simulações.

Em seguida, será apresentado um caso de religamento onde serão comparados os resultados obtidos com a modelagem no AnaHVDC com os parâmetros de sequência informados no ANAREDE (sequência positiva) e no AnaHVDC (sequência zero).

Em outra seção, mas ainda se tratando do sistema com o religamento, será realizada a análise considerando o caso desbalanceado e validado usando o ATP como ferramenta.

Ao final desta seção, serão apresentados os casos de estudo considerando todas as possibilidades de transposição da linha e a presença de desbalanço. Esses casos de estudo são de grande importância, pois permitem analisar o desempenho do modelo em situações reais, levando em consideração os efeitos da transposição e do desequilíbrio das fases.

4.4.1 Sistema duas barras utilizado para validação preliminar

O diagrama unifilar correspondente ao sistema duas barras, denominado “LTBinF” está indicado na Figura 221 e com os parâmetros de sequência positiva da linha de transmissão na Figura 222. A barra 1 tem seu ponto de operação em 1.05pu e ângulo de 20,2graus. A barra 2 tem seu ponto de operação em 1,02pu e ângulo de 0,0graus. O caso foi simulado sem aplicação de evento, com passo de integração de $10\mu s$ e tempo de simulação de 0,1s. Para exibição dos resultados, foi adotada a escala de tempo até 0,05s para melhor visualização das curvas.

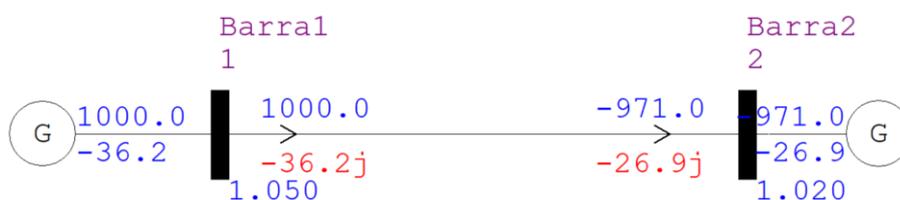


Figura 221 –Diagrama unifilar do sistema duas barras no ANAREDE

Figura 222 – Parâmetros de sequência positiva da linha de transmissão

Deve-se observar que a linha de transmissão informada pelo programa de fluxo de potência, ANAREDE, tem seus parâmetros informados a partir dos dados de uma dada configuração geométrica obtidas diretamente da modelagem do AnaHVDC. As coordenadas de cada um dos cabos condutores e cabos para-raios é ilustrada na Figura 223.

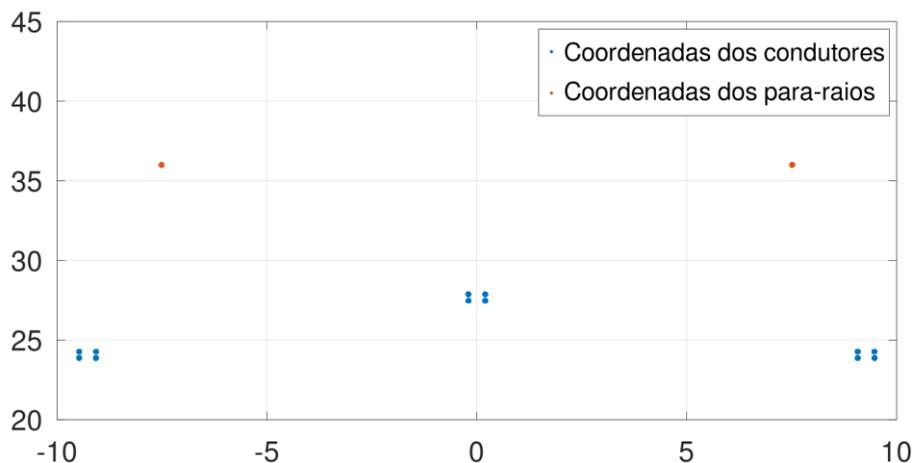


Figura 223 – Cooredenadas x e y dos cabos condutores e para-raios

Por fim, é criado o caso ATP, conforme ilustrado na Figura 224, considerando esse mesmo sistema duas barras e com os mesmos parâmetros geométricos informados no AnaHVDC. Foi adotada a tensão base de $500kV$ e LT com $300km$ de comprimento, sendo as medições externalizadas em pu.

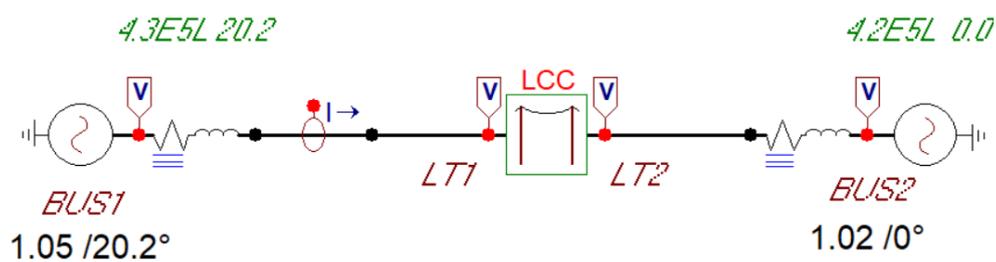


Figura 224 – Diagrama unifilar do sistema duas barras no ATP

Os resultados obtidos estão nas figuras (Figura 226, Figura 227 e Figura 228) a seguir. A identificação final da variável tem a seguinte padronização:

- DLTCFG – resultados obtidos, no AnaHVDC, a partir dos dados informados da configuração geométrica;

- ANA – resultados obtidos, no AnaHVDC, a partir dos dados informados da configuração geométrica. Os parâmetros obtidos da configuração geométrica são informados na sequência positiva no ANAREDE e o programa AnaHVDC completará com os parâmetros de sequência zero. O procedimento de conversão de parâmetros de sequência positiva e zero por unidade de comprimento para os formatos utilizados no ANAREDE e AnaHVDC estão ilustrados matematicamente e através de um script em Octave no Anexo E;
- ATP – resultados obtidos, no ATP, a partir do caso com a configuração geométrica.

Os resultados serão apresentados considerando as três fases simultaneamente e o transitório observado no terminal receptor da linha de transmissão e vai seguir a padronização de cores para legenda apresentada na Figura 225.

—	AnaHVDC (DLTCG): Fase A
—	AnaHVDC (ANA): Fase A
—	ATP: Fase A
—	AnaHVDC (DLTCG): Fase B
—	AnaHVDC (ANA): Fase B
—	ATP: Fase B
—	AnaHVDC (DLTCG): Fase C
—	AnaHVDC (ANA): Fase C
—	ATP: Fase C

Figura 225 – Padronização de cores da legenda para os casos LTBinf para os casos com transposição ideal

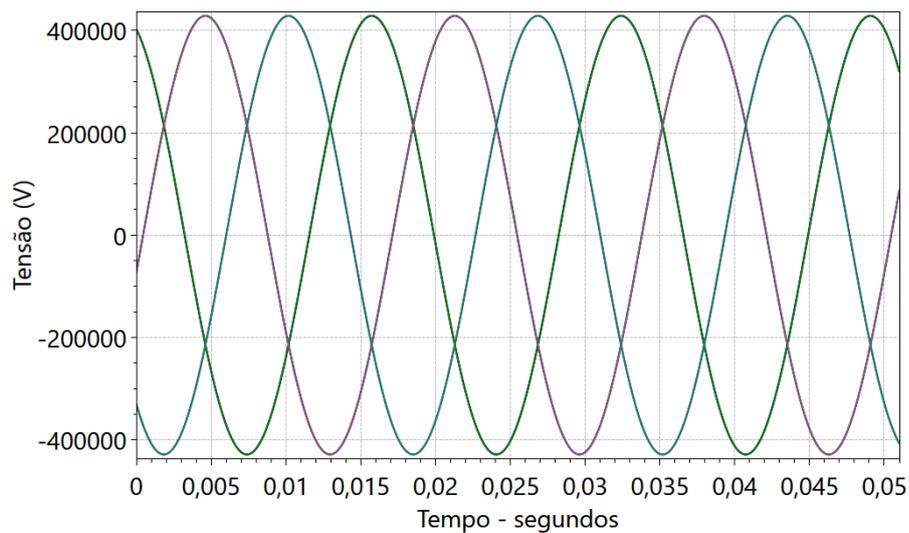


Figura 226 – Tensões na barra 1 – Caso com transposição ideal

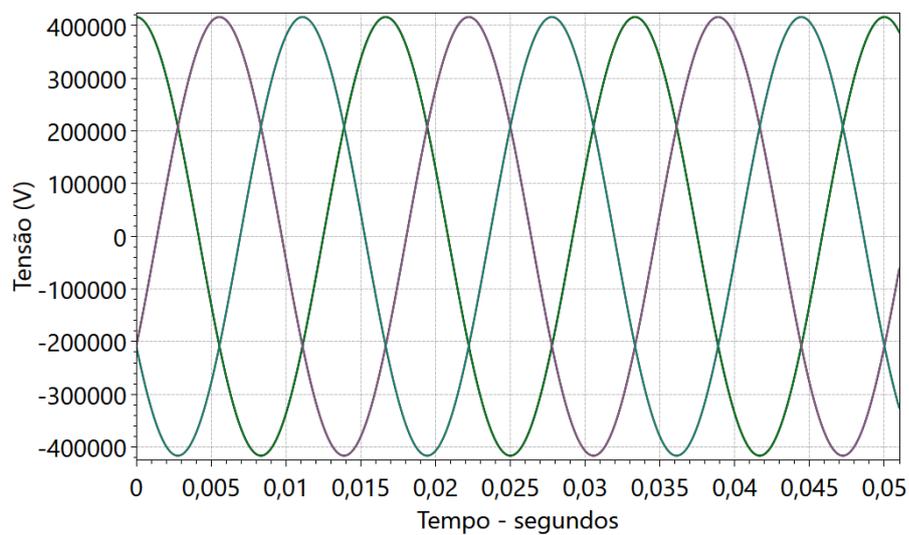


Figura 227 – Tensões na barra 2 – Caso com transposição ideal

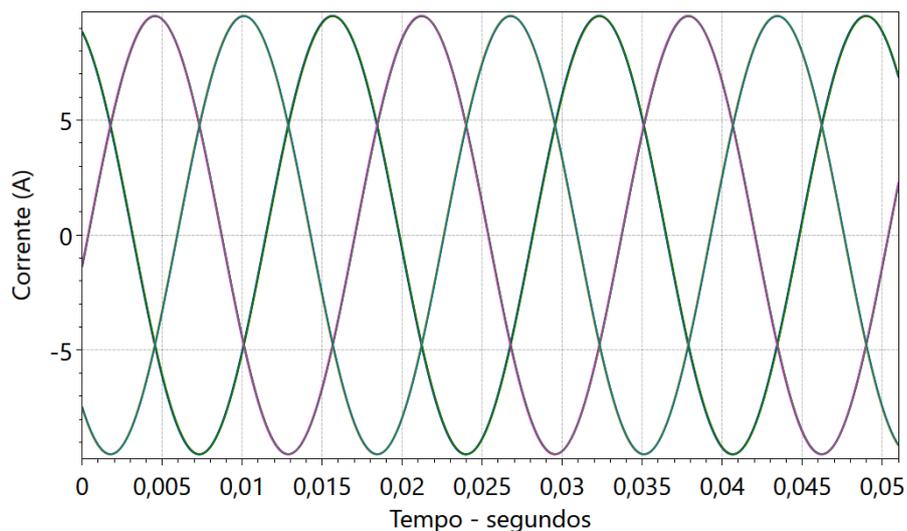


Figura 228 – Correntes nos terminais da LT – Caso com transposição ideal

É possível notar que os resultados obtidos são visualmente coincidentes, o que corrobora por indicar uma etapa de validação do modelo, considerando o caso com transposição ideal, onde o sistema encontra-se balanceado, ou seja, com suas fases equilibradas e em regime permanente.

A próxima etapa consiste em validar o caso desbalanceado. Observa-se que é possível haver diferenças nos resultados em função das premissas adotadas nos cálculos dos parâmetros elétricos da linha por cada um dos programas para a configuração geométrica fornecida. Nessa etapa será avaliada, de forma visual, a forma como ocorre o desbalanço sem considerar a transposição de linhas. Os resultados obtidos estão nas figuras (Figura 230 a Figura 232). Os resultados serão apresentados considerando as três fases simultaneamente e o transitório observado no terminal receptor da linha de transmissão e vai seguir a padronização de cores para legenda apresentada na Figura 229.

—	AnaHVDC: Fase A
—	ATP: Fase A
—	AnaHVDC: Fase B
—	ATP: Fase B
—	AnaHVDC: Fase C
—	ATP: Fase C

Figura 229 – Padronização de cores da legenda para os casos LTBinf para os casos desbalanceados

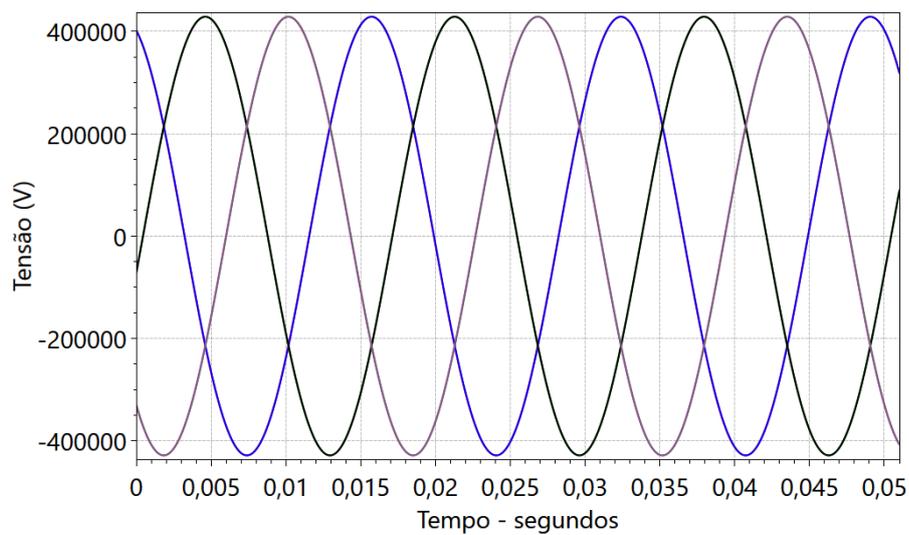


Figura 230 – Tensões na barra1 – Caso desbalanceado

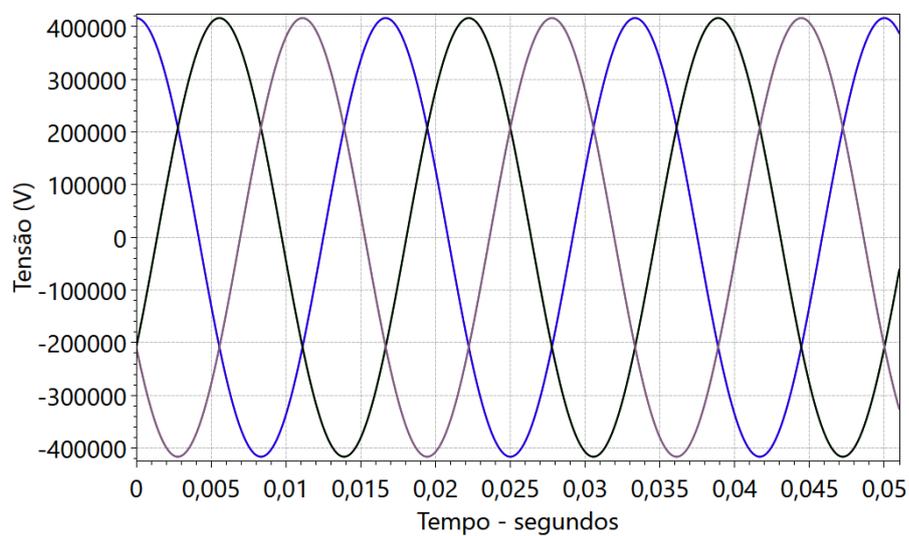


Figura 231 – Tensões na barra2 – Caso desbalanceado

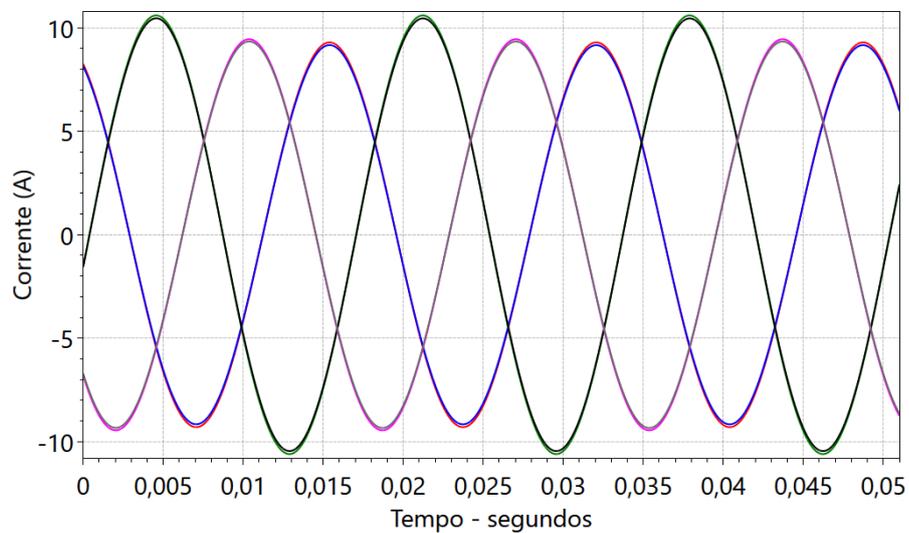


Figura 232 – Correntes nos terminais da LT – Caso desbalanceado

Observando a Figura 232, verifica-se que apesar das diferenças entre o modelo desenvolvido no AnaHVDC e o do ATP, os desbalanços observados são muito próximos, sendo visíveis nas correntes, mas não são tão aparentes nas tensões. Conclui-se que ambos os programas apresentam a mesma tendência de desbalanço, podendo, então, ser considerados equivalentes.

4.4.2 Simulação AnaHVDC (com configuração geométrica) versus AnaHVDC

O diagrama unifilar correspondente ao denominado “reliqLT”, está indicado na Figura 233. O sistema consiste em uma linha de transmissão de 900 km dividida em três seções de 300 km, com compensação série e derivação. Esta linha está conectada entre dois sistemas representados ambos por uma fonte de tensão em série com uma indutância. A segunda seção da linha sofre um curto-circuito franco na sua fase A em seu terminal emissor (No3d no ATPDraw e Barra 3 no ANAREDE/AnaHVDC) em 0,100 s e é realizada a sequência completa de religamento monopolar com sucesso, ou seja, em 0,200s é realizada a abertura monopolar do terminal da seção de linha próximo do defeito, em 0,220s é feita a abertura monopolar do terminal oposto, 0,300s o curto-circuito se extingue e em 0,700s é realizado o religamento, ou seja, o fechamento dos dois terminais da seção de linha.

Os parâmetros das seções de linha são os seguintes para cada uma das três seções: 300 km de comprimento, resistência de sequência positiva de $0,0227578 \Omega/km$, sequência zero de $0,198049 \Omega/km$, indutância de $0,883978 mH/km$ (sequência positiva) e $4,22267 mH/km$ (sequência zero), capacitância de $0,0130245 mF/km$ (sequência positiva) e $0,00661356 mF/km$ (sequência zero). A linha é modelada com modelo de Bergeron de parâmetros distribuídos nos três programas.

Os parâmetros de cada seção de 300 km da linha corrigidos hiperbolicamente podem ser calculados utilizando um *script* no programa *Octave*:

```

w=2*pi*60;
Z=0.0227578+1j*w*0.883978e-3;
Y=1j*w*0.0130245e-6;
length=300;
Vbase=500;
Sbase=100;
Zbase=Vbase^2/Sbase;
Zc=sqrt(Z/Y);
gama_l=sqrt(Z*Y)*length;
Z_ana=Zc*sinh(gama_l)/Zbase*100;
Mvar_ana=imag( 2*tanh(gama_l/2)/Zc)*Vbase^2;
fprintf('Parametros de linha para o Anarede: r=%6.5f%%, x=%7.4f%%, Mvar=%6.2f Mvar\n',
real(Z_ana), imag(Z_ana), Mvar_ana);

```

Executando o *script*, se obtém os valores da resistência, reatância e susceptância a serem incluídos no ANAREDE, conforme resultado a seguir:

```

Parametros de linha para o Anarede: r=0.25983%, x= 3.9020%, Mvar=372.85 Mvar

```

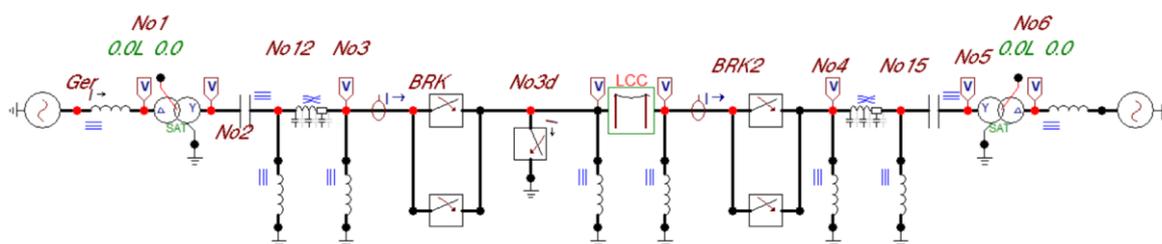


Figura 233 –Diagrama unifilar do caso de religamento no ATP

Para cada seção de linha utilizou-se uma compensação shunt de 70%, ou seja, utilizou-se um reator de linha de 130,5 *Mvar* em cada terminal

$$Q_{reat_{LT}} = 0,7 \frac{372,85}{2} = 130,4975 Mvar \quad (329)$$

O que corresponde em *H*:

$$L_{reat_{LT}} = \frac{V_{base}^2}{Q_{reat_{LT}} \omega} = \frac{500^2}{130,4975 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 60} = 5,0816 H \quad (330)$$

O que corresponde a 5,0816 *H*, ou seja, a soma da potência reativa dos dois reatores (2 x 130,5 *Mvar*) é igual a 70% do *MVAR* total de cada seção de linha (372,84 *Mvar*) já com a correção hiperbólica considerada.

Adotou-se 60% de compensação série concentrada apenas nos terminais inicial e final das três seções de linha, ou seja, cada uma das duas reatâncias do capacitor igual a - que corresponde a 30,2115 *mF*.

$$X_{ser} = 0,6 \cdot \frac{3,9020}{100} \cdot \frac{3}{2} = 0,035118 pu \quad (331)$$

O que corresponde em F :

$$X_{ser} = \frac{1}{X_{ser} Z_{base} \omega} = \frac{1}{0,035118 \cdot 2500 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 60} = 30,2133 \mu F \quad (332)$$

Os parâmetros do transformador são 20 kV: 500 kV, Δ :Y solidamente aterrado, 1000 MVA e reatância de 10%. As impedâncias das fontes são de 25% na base de tensão de 20 kV e base de potência de 1000 MVA, que convertidas para a base 100 MVA resulta em uma impedância de 2,5%.

Para as tensões internas, considerou-se no terminal da primeira fonte (barra 1) uma tensão de 21 kV (1,05 pu) e ângulo de 30° e para o terminal da segunda fonte (barra 6) a tensão de 20 kV (1pu) e ângulo 0. Para a entrada de dados nos formatos AHV puro (formato em que todo o sistema é modelado no contexto AnaHVDC sem base de dados de fluxo de potência, estabilidade ou curto-circuito) e ATP, somou-se 30° em cada uma das fontes para considerar a defasagem produzida pelo transformador Y-D que usualmente não é considerada no fluxo de potência.

O objetivo desta simulação é emular os resultados que normalmente seriam obtidos pelo ATP, mas dentro do próprio âmbito do AnaHVDC. Para isso, os dados inseridos no ANAREDE correspondem aos parâmetros de sequência positiva corrigidos hiperbolicamente.

Ao modelar uma determinada linha de transmissão com sua configuração geométrica no ATP, obtém-se um arquivo com os dados de sequência específicos. Assim, esses dados são posteriormente utilizados no ANAREDE, sendo aplicada a correção hiperbólica para incorporar essas informações ao sistema. No caso do AnaHVDC, busca-se eliminar essa dependência do ATP, permitindo que o próprio AnaHVDC seja capaz de emular os resultados que seriam obtidos pelo ATP. Dessa forma, é possível obter as informações de sequência diretamente no AnaHVDC, sem a necessidade de recorrer ao ATP como intermediário. Esse processo tem como propósito simplificar e agilizar o desenvolvimento dos estudos de sistemas elétricos de potência, uma vez que todas as etapas de modelagem e análise podem ser realizadas dentro do próprio AnaHVDC, evitando a dependência de outros softwares ou procedimentos adicionais.

No AnaHVDC, os dados informados podem ser considerados nominais ou corrigidos hiperbolicamente, a depender do valor da flag *fparnom*. Essa flag determina se os dados serão convertidos para parâmetros nominais (*fparnom* = 1) ou se já estão informados como parâmetros nominais (*fparnom* = 0). É importante ter cautela ao

configurar a *flag fparnom*, pois uma configuração incorreta pode resultar em conversões equivocadas. É necessário verificar cuidadosamente se os dados informados são nominais ou se já foram corrigidos hiperbolicamente.

As etapas para gerar os arquivos necessários à simulação estão apresentadas de forma esquemática na Figura 234.

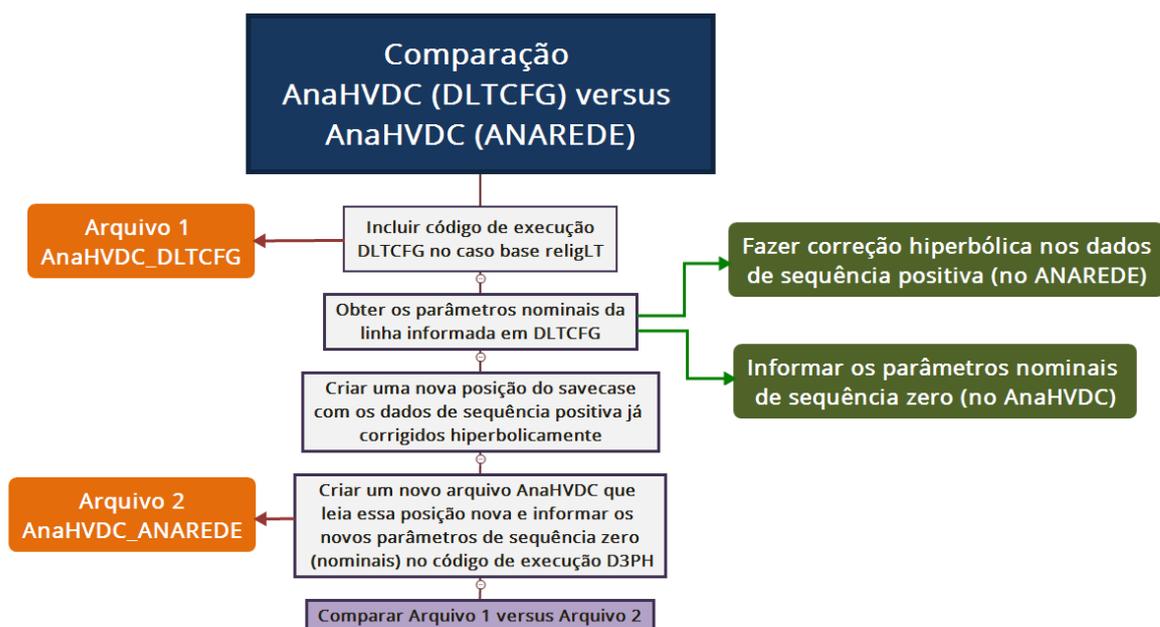


Figura 234 – Comparação preliminar AnaHVDC (DLTCFG) versus AnaHVDC (ANAREDE)

Nesta seção, são apresentados os resultados gráficos da comparação entre as simulações AnaHVDC com a modelagem geométrica e considerando a entrada de dados vinda do ANAREDE e informação adicional da sequência zero no AnaHVDC considerando transposição ideal (Figura 235 até Figura 241). Para essa análise, foram selecionadas as variáveis de interesse, que são as tensões nos terminais da linha em questão. Os gráficos demonstram a evolução temporal das tensões nos terminais da linha ao longo do período de simulação. O eixo horizontal representa o tempo, enquanto o eixo vertical representa os valores das tensões.

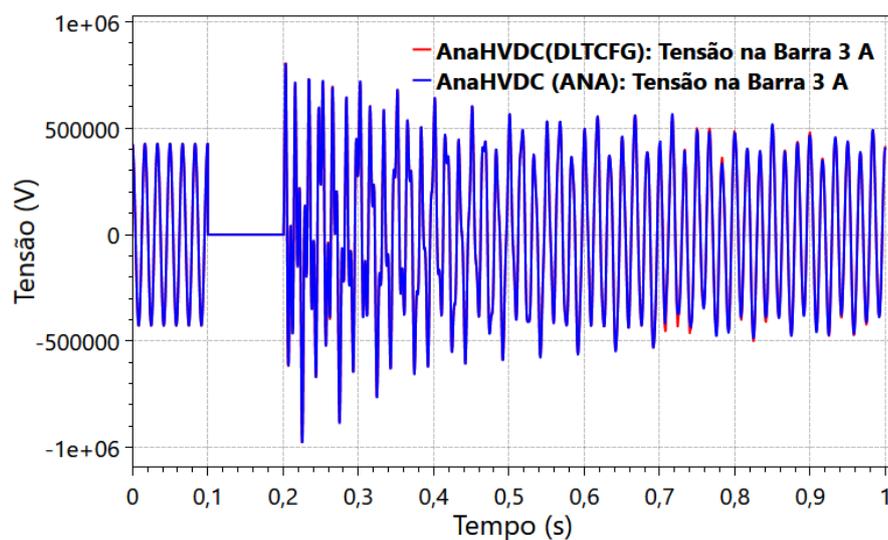


Figura 235 – Caso AnaHVDC com configuração geométrica *versus* AnaHVDC: Tensão na barra 3, fase A

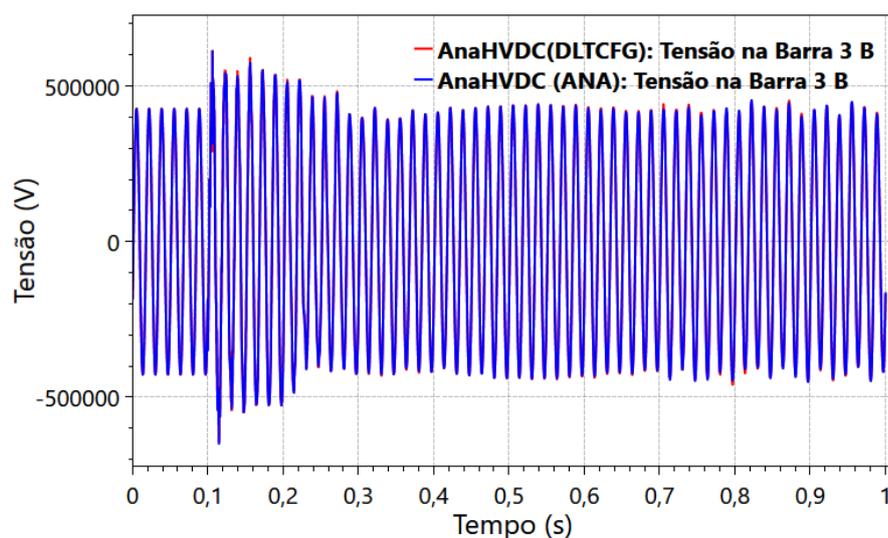


Figura 236 – Caso AnaHVDC com configuração geométrica *versus* AnaHVDC: Tensão na barra 3, fase B

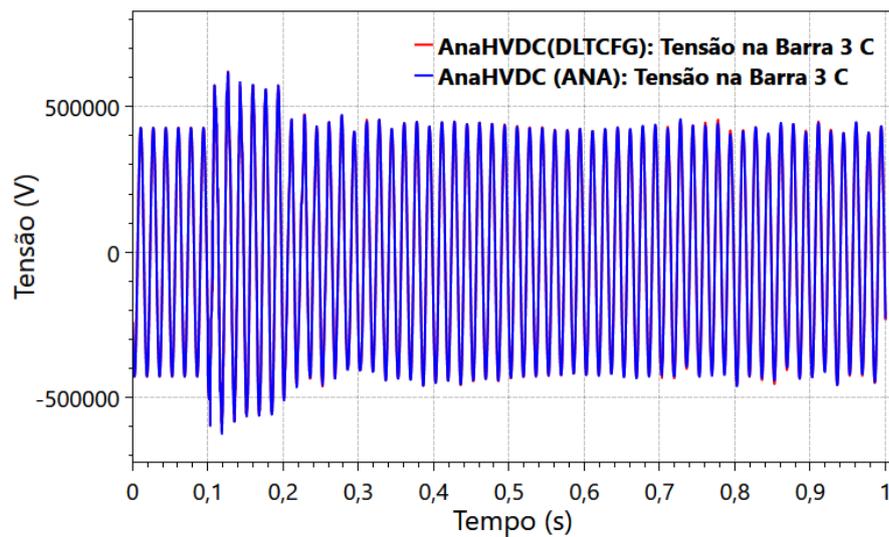


Figura 237 – Caso AnaHVDC com configuração geométrica *versus* AnaHVDC: Tensão na barra 3, fase C

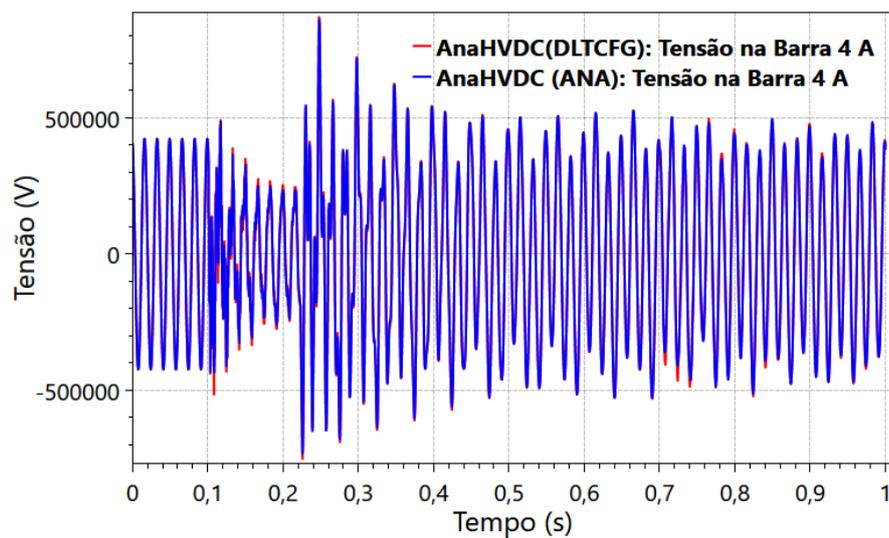


Figura 238 – Caso AnaHVDC com configuração geométrica *versus* AnaHVDC: Tensão na barra 4, fase A

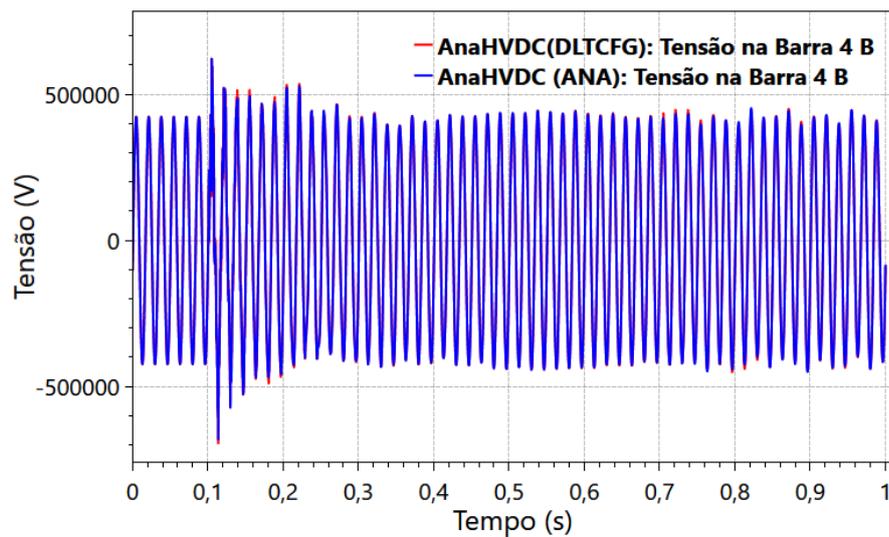


Figura 239 – Caso AnaHVDC com configuração geométrica *versus* AnaHVDC: Tensão na barra 4, fase B

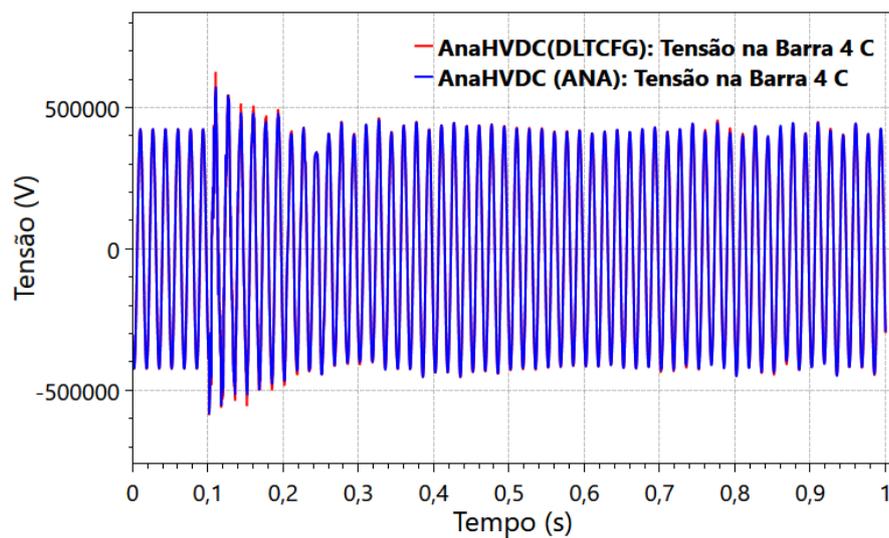


Figura 240 – Caso AnaHVDC com configuração geométrica *versus* AnaHVDC: Tensão na barra 4, fase C

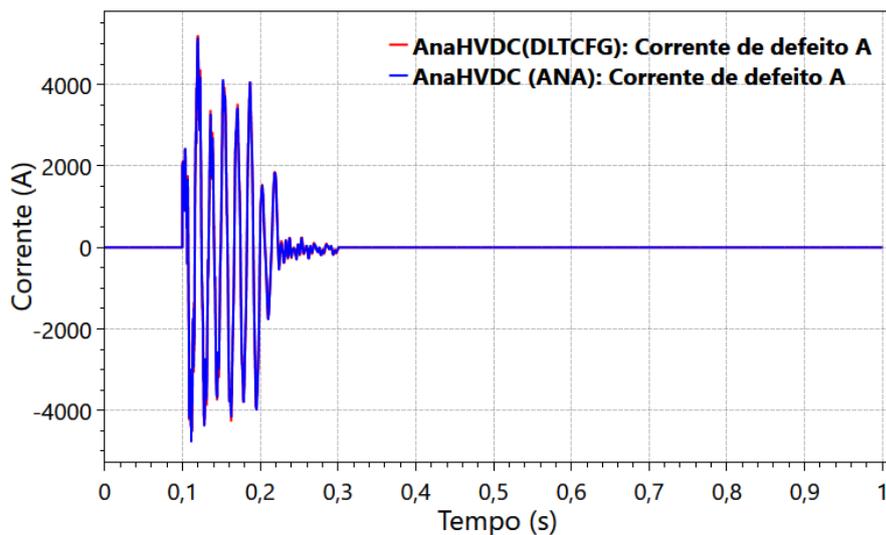


Figura 241 – Caso AnaHVDC com configuração geométrica *versus* AnaHVDC: Corrente de defeito, fase A

Conclui-se que os resultados do AnaHVDC utilizando a conversão de dados vindos do ANAREDE equivale ao novo modelo com transposição ideal que utiliza os dados da configuração geométrica.

4.4.3 Simulação considerando a linha desequilibrada

O diagrama unifilar correspondente ao mesmo sistema da seção anterior, o “religLT”, ilustrado na Figura 233. Nesta seção, será realizada a comparação entre o AnaHVDC e o ATP, levando em consideração a simulação de um sistema elétrico desbalanceado. Para essa implementação, foi utilizada a técnica de decomposição modal descrita na seção 3.4.

A decomposição modal é realizada por meio da transformação modal, que envolve o cálculo dos autovetores do produto entre a impedância longitudinal e a admitância transversal. Em suma, essa técnica tem como objetivo transformar uma linha trifásica desequilibrada, no domínio das fases, em três linhas desacopladas, no domínio modal. A Figura 242 apresenta um fluxograma simplificado da decomposição modal.

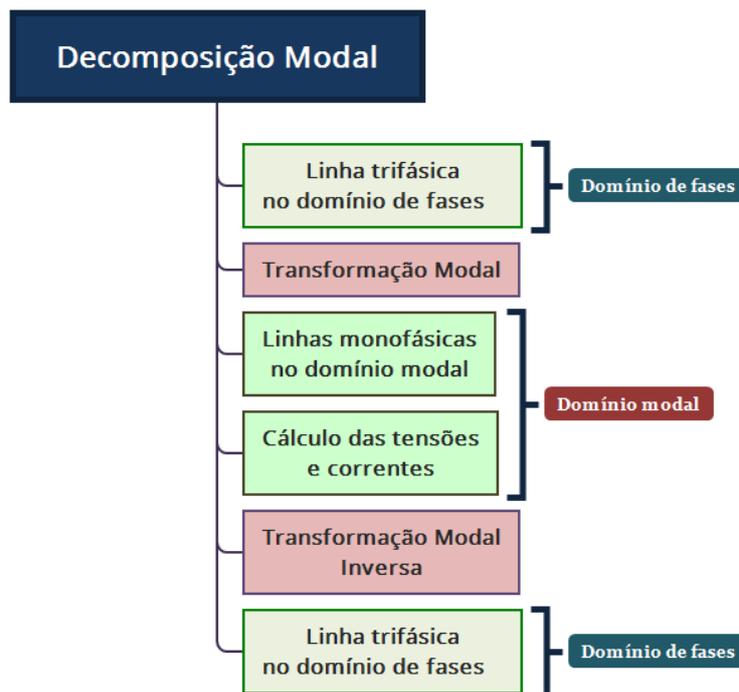


Figura 242 – Fluxograma decomposição modal

No ATP, para executar o caso desbalanceado, basta desabilitar a opção *transposed* na guia “Model”, conforme destacado na Figura 243.

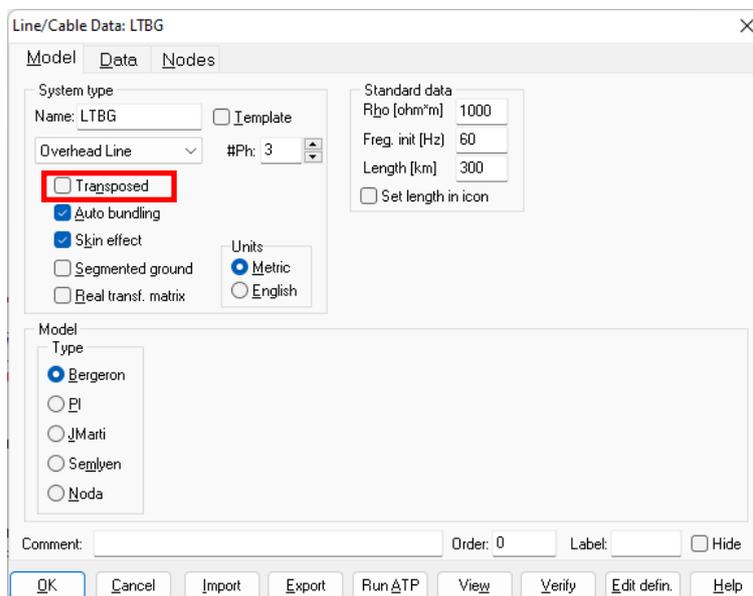


Figura 243 – Execução do caso desbalanceado no ATP

Os resultados obtidos considerando o caso de religamento com a linha entre os trechos 3 e 4 desbalanceada estão apresentados nas figuras a seguir:

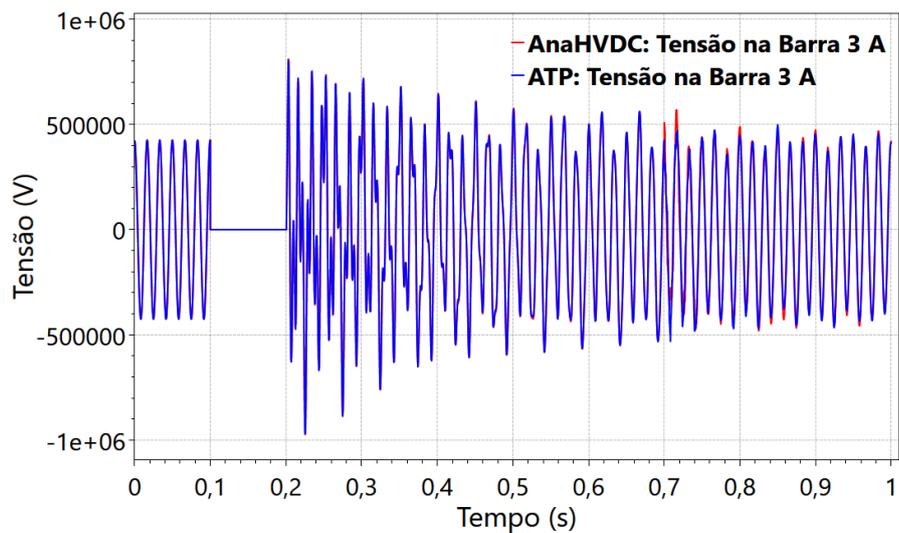


Figura 244 – Caso com linha desbalanceada: Tensão na barra 3, fase A

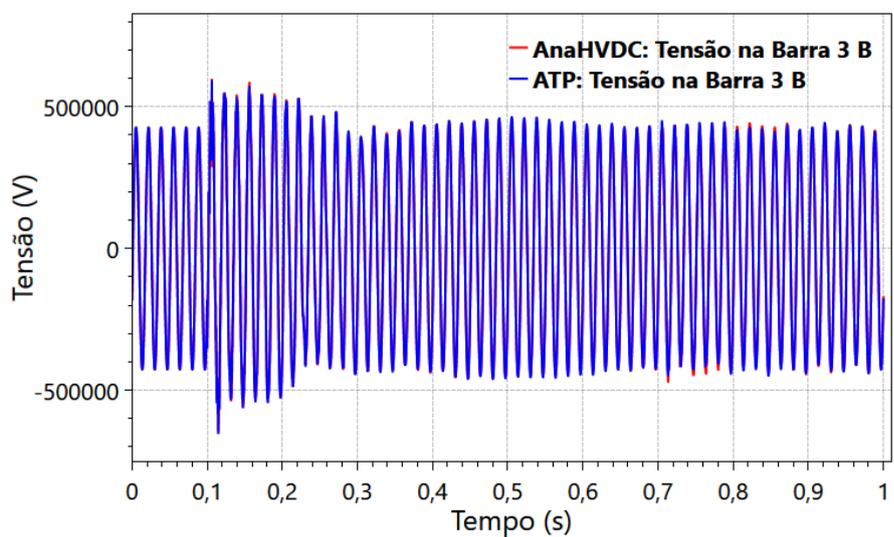


Figura 245 – Caso com linha desbalanceada: Tensão na barra 3, fase B

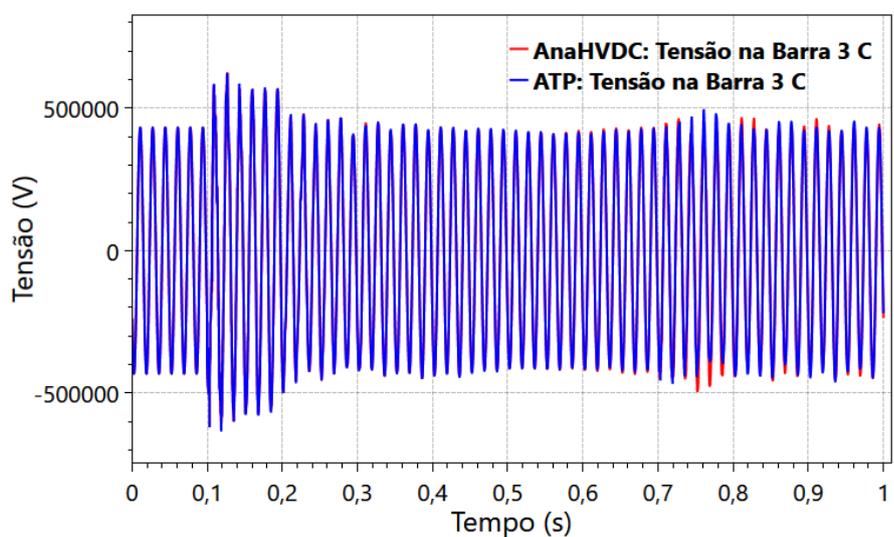


Figura 246 – Caso com linha desbalanceada: Tensão na barra 3, fase C

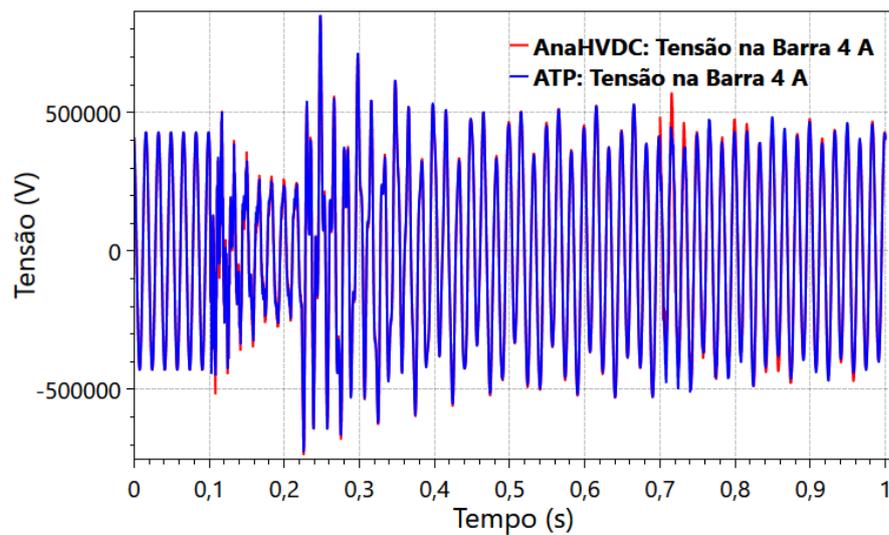


Figura 247 – Caso com linha desbalanceada: Tensão na barra 4, fase A

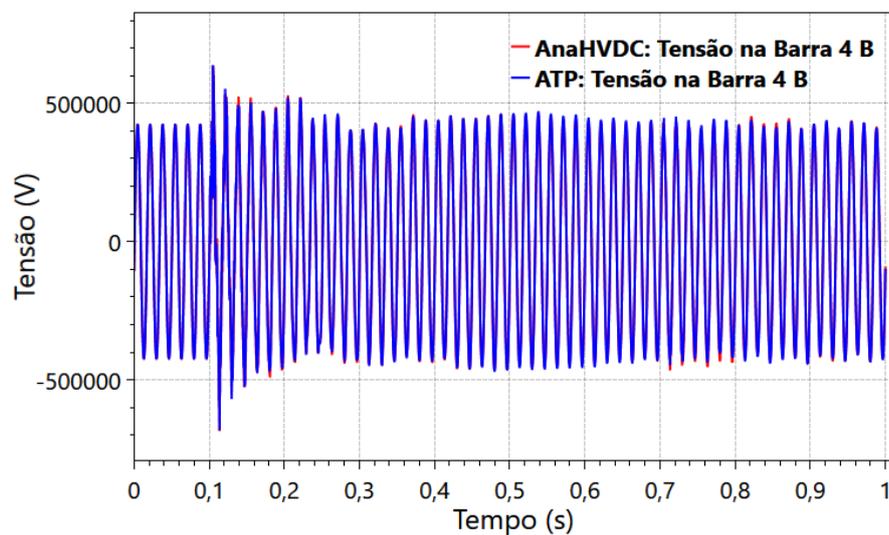


Figura 248 – Caso com linha desbalanceada: Tensão na barra 4, fase B

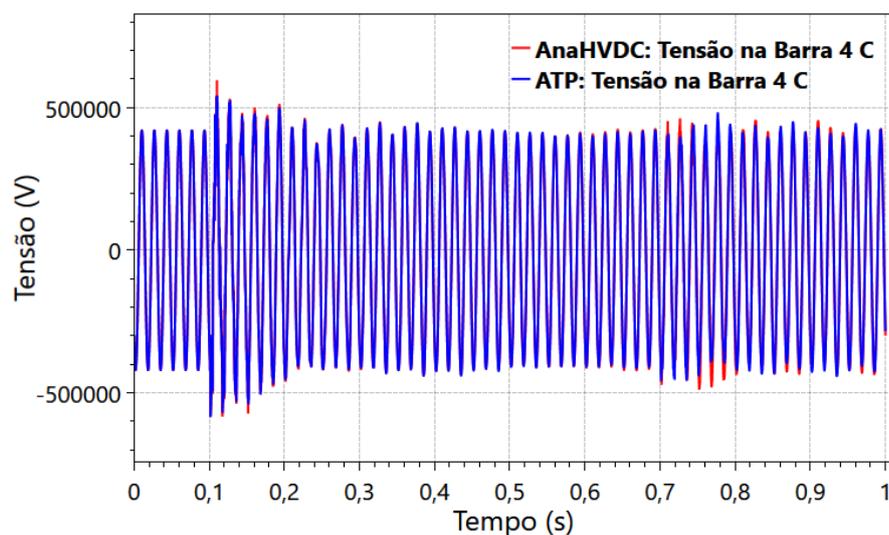


Figura 249 – Caso com linha desbalanceada: Tensão na barra 4, fase C

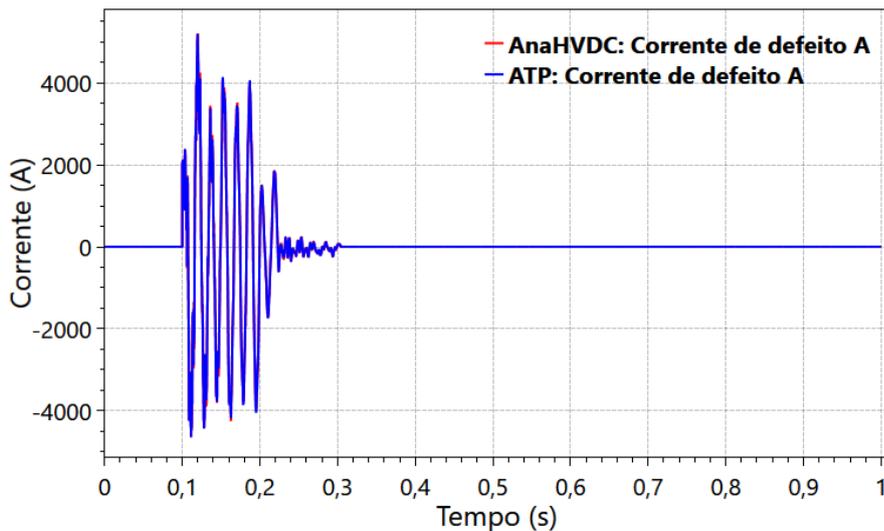


Figura 250 – Caso com linha desbalanceada: Corrente de defeito, fase A

Nota-se que os resultados têm comportamento semelhante, mas não coincidente. Isso pode ser explicado pelo fato de possíveis diferenças no procedimento de cálculo dos parâmetros a partir da configuração geométrica. Conforme pode ser visualizado na Figura 251 (apresentando a ampliação de escala de visualização e as três fases), em regime permanente as curvas estão bem próximas e com desbalanço nas fases.

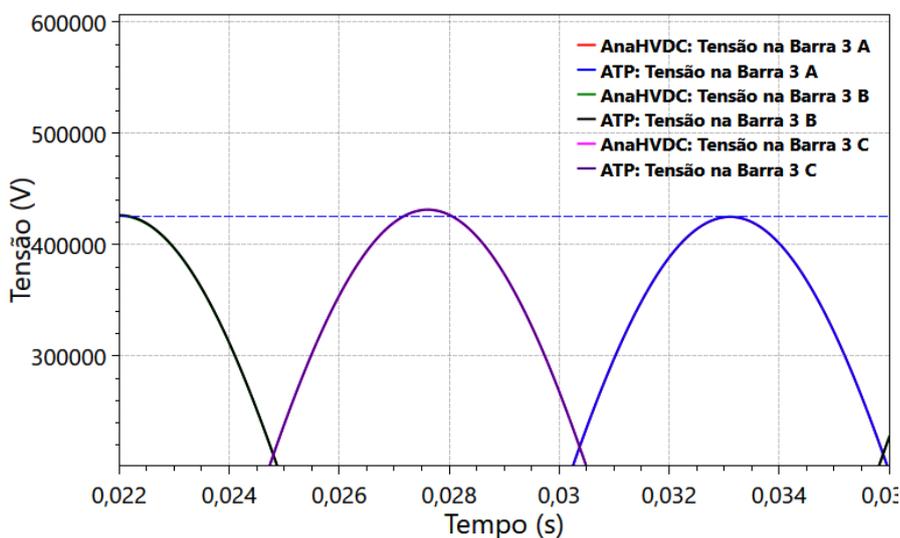


Figura 251 – Caso com linha desbalanceada: Tensões na barra 3

4.4.4 Simulação AnaHVDC (com configuração geométrica) *versus* ATP.

Nessa seção será apresentada o caso energLT em três ferramentas de análise: AnaHVDC, ATP e PSCAD, com os mesmos parâmetros já apresentados na seção 4.1.1 e com o objetivo de ilustrar as opções de simulação a partir dos dados de uma dada configuração geométrica. As topologias gerais para os casos estão apresentadas da Figura 252 até a Figura 257.

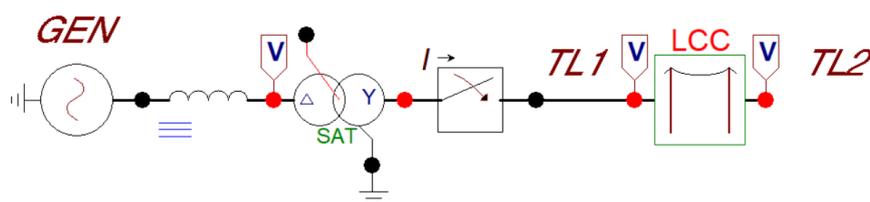


Figura 252 –Diagrama unifilar do caso energLT no ATP: Caso base

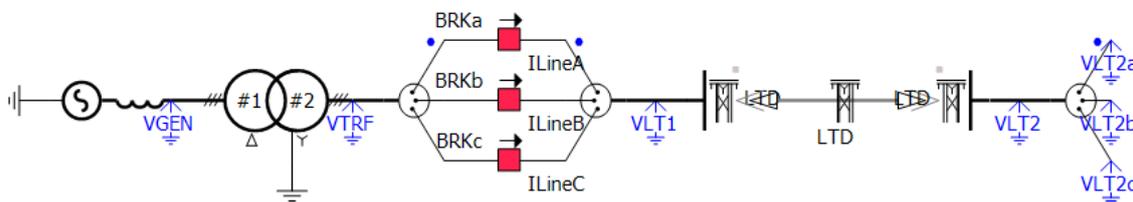


Figura 253 –Diagrama unifilar do caso energLT no PSCAD: Caso base

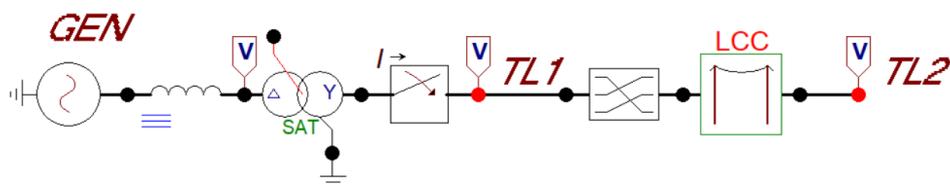


Figura 254 –Diagrama unifilar do caso energLT no ATP: Topologia com um trecho de transposição na ordem BCA

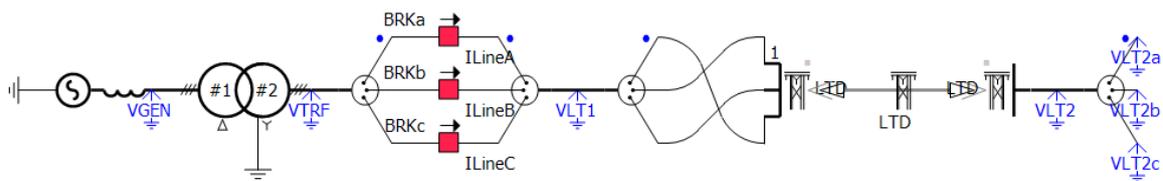


Figura 255 –Diagrama unifilar do caso energLT no PSCAD: Topologia com um trecho de transposição na ordem BCA

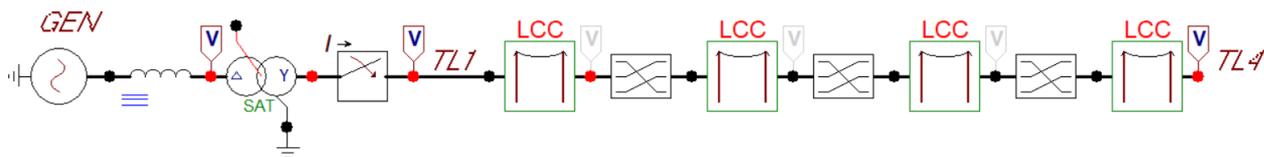


Figura 256 –Diagrama unifilar do caso energLT no ATP: Topologia com transposição completa na ordem BCA

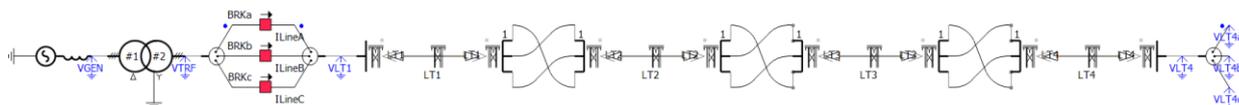


Figura 257 –Diagrama unifilar do caso energLT no PSCAD: Topologia com transposição completa na ordem BCA

A Tabela 29 resume as possibilidades de utilização do modelo de linha dado por sua configuração geométrica. A última coluna da tabela indica a figura correspondente ao respectivo resultado.

Tabela 29 – Opções de transposição para o caso energLT com configuração geométrica

Identificador do caso	Descrição	Figura
energLT01_NO	Caso desbalanceado sem transposição	Figura 259 e Figura 260
energLT02_T_IDEAL	Caso equilibrado com transposição ideal	Figura 261 e Figura 262
energLT03_1T_BCA	Caso com um trecho de transposição na ordem BCA	Figura 263 e Figura 264
energLT04_1T_CAB	Caso com um trecho de transposição na ordem CAB (60km, 90km, 120km e 30km)	Figura 265 e Figura 266
energLT05_3T_BCA_CAB	Caso com transposição finita completa nas proporções de 20%, 30%, 40% e 10% na ordem BCA	Figura 267 e Figura 268
energLT06_3T_CAB_BCA	Caso com transposição finita completa nas proporções de 20%, 30%, 40% e 10% na ordem CAB (60km, 90km, 120km e 30km)	Figura 269 e Figura 270
energLT07_3T_BCA_CAB_IDEAL	Caso com transposição finita completa nas proporções de 1/6, 1/3, 1/3 e 1/6 na ordem BCA (50km, 100km, 100km e 50km)	Figura 271 e Figura 272
energLT08_3T_CAB_BCA_IDEAL	Caso com transposição finita completa nas proporções de 1/6, 1/3, 1/3 e 1/6 na ordem CAB	Figura 273 e Figura 274

Os resultados serão apresentados considerando as três fases simultaneamente e o transiente observado no terminal receptor da linha de transmissão e vai seguir a padronização de cores para legenda apresentada na Figura 258.

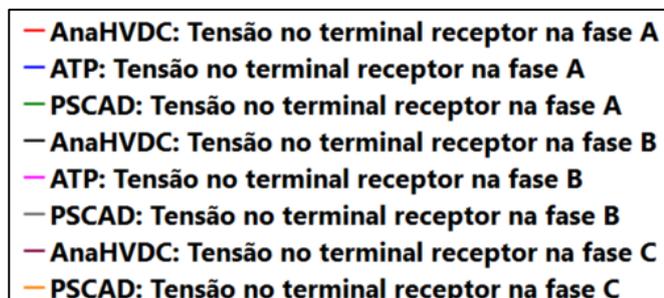


Figura 258 – Padronização de cores da legenda para os casos energLT com a linha dada pela configuração geométrica

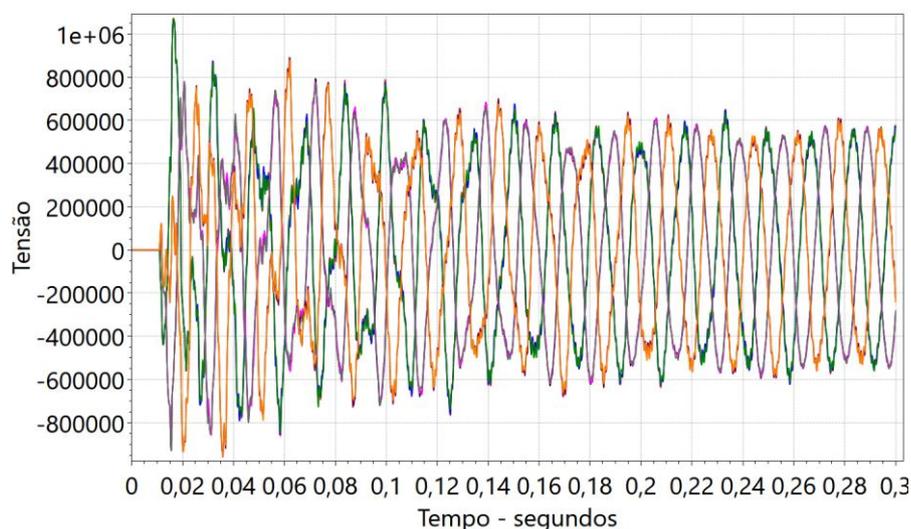


Figura 259 – Tensões no terminal receptor da linha para o caso desbalanceado sem transposição

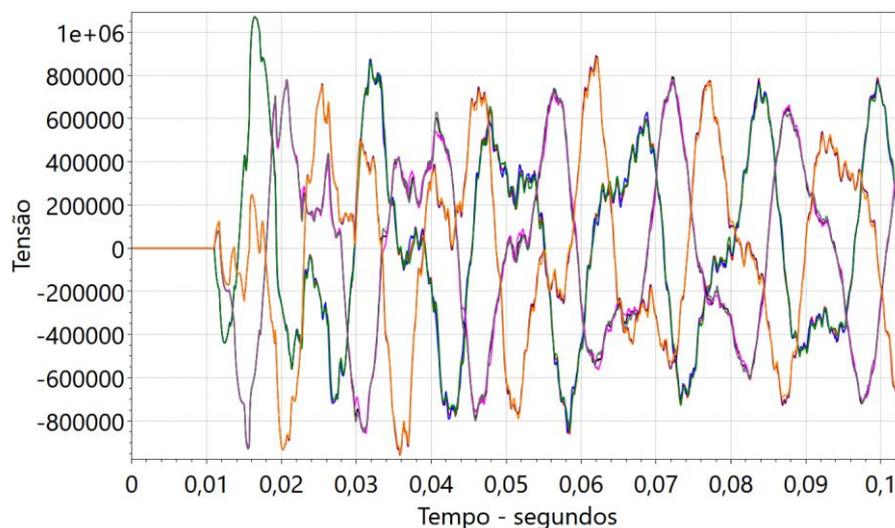


Figura 260 – Tensões no terminal receptor da linha para o caso desbalanceado sem transposição com ampliação da visualização

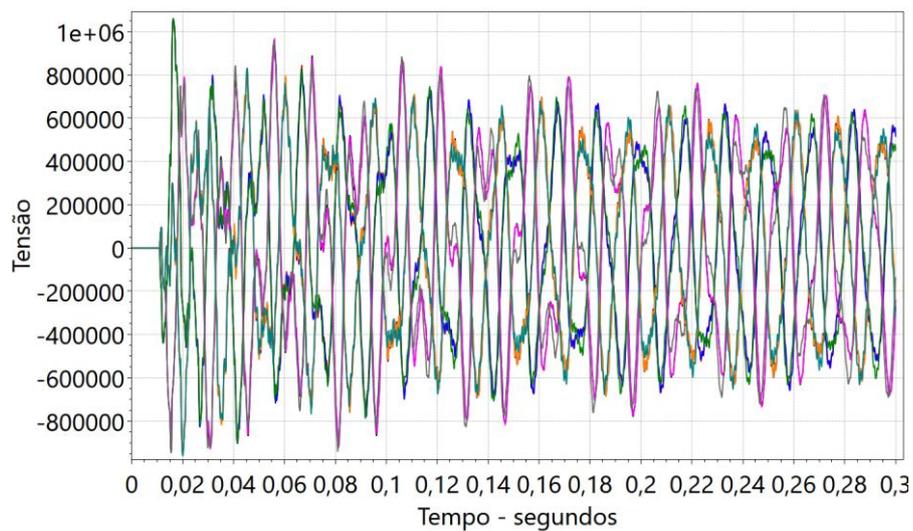


Figura 261 – Tensões no terminal receptor da linha para o caso equilibrado com transposição ideal

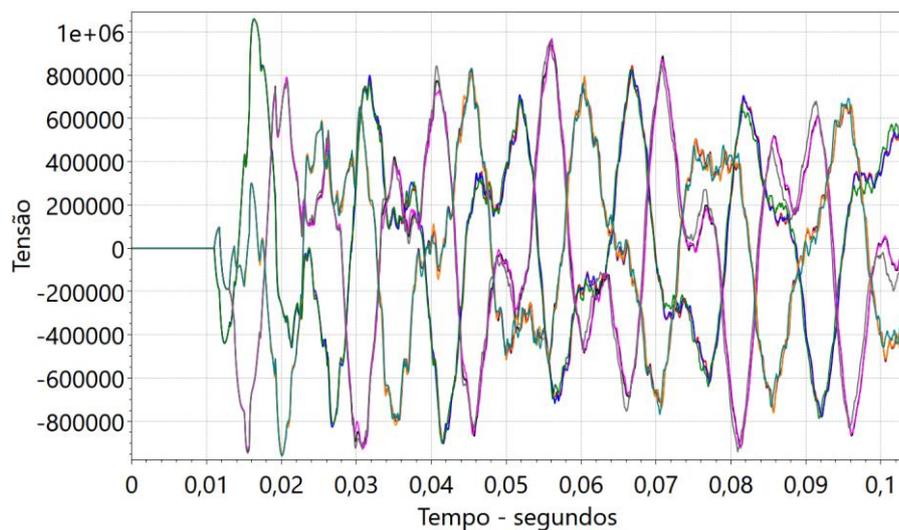


Figura 262 – Tensões no terminal receptor da linha para o caso equilibrado com transposição ideal com ampliação da visualização

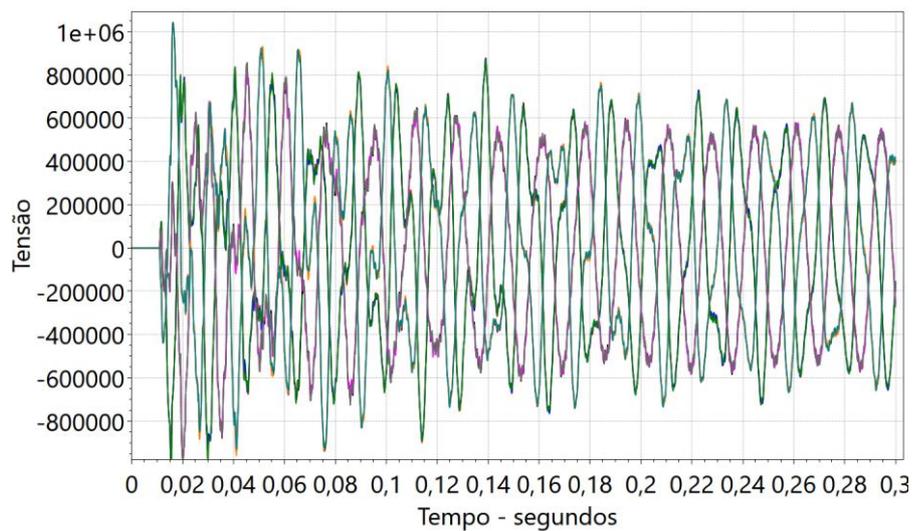


Figura 263 – Tensões no terminal receptor da linha para o caso com um trecho de transposição no sentido BCA

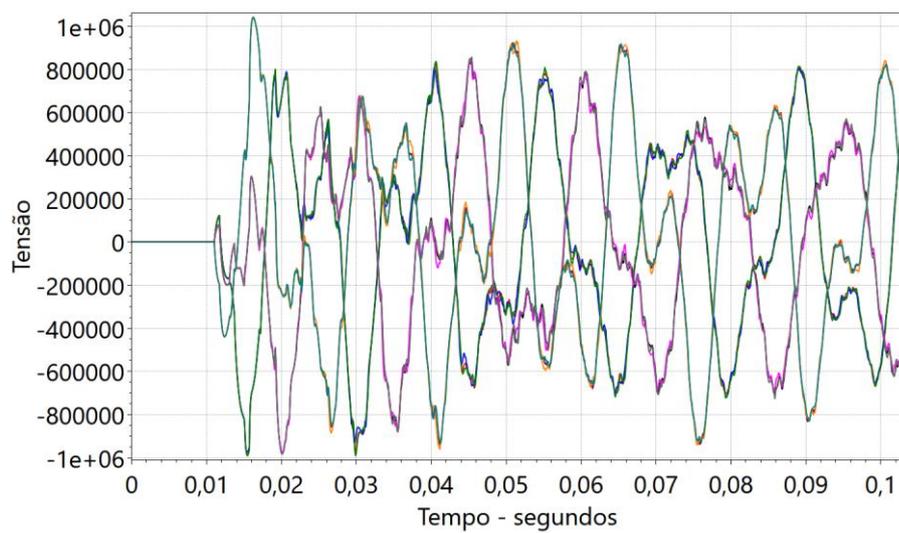


Figura 264 – Tensões no terminal receptor da linha para o caso com um trecho de transposição no sentido BCA com ampliação da visualização

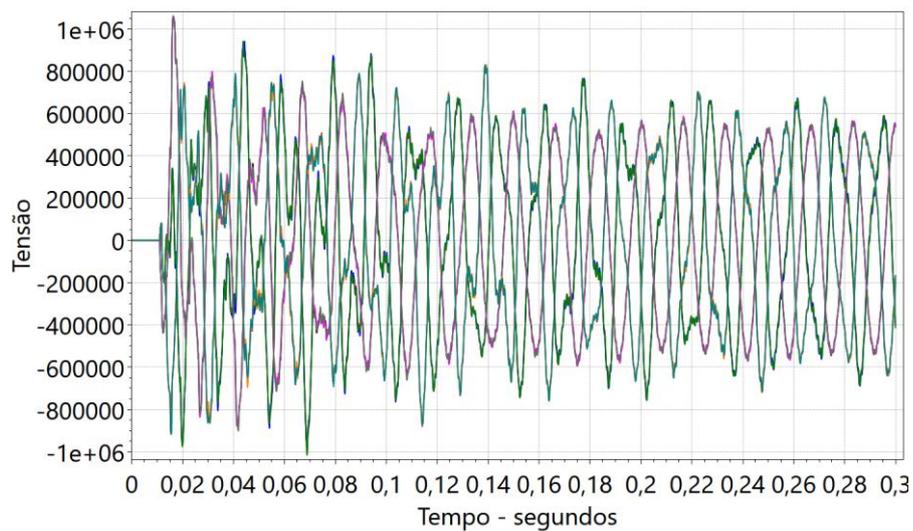


Figura 265 – Tensões no terminal receptor da linha para o caso com um trecho de transposição no sentido CAB

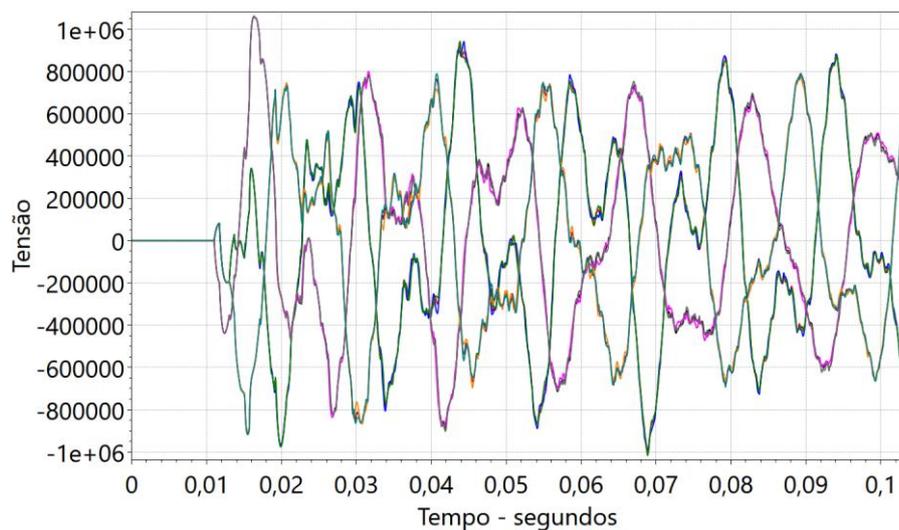


Figura 266 – Tensões no terminal receptor da linha para o caso com um trecho de transposição no sentido CAB com ampliação da visualização

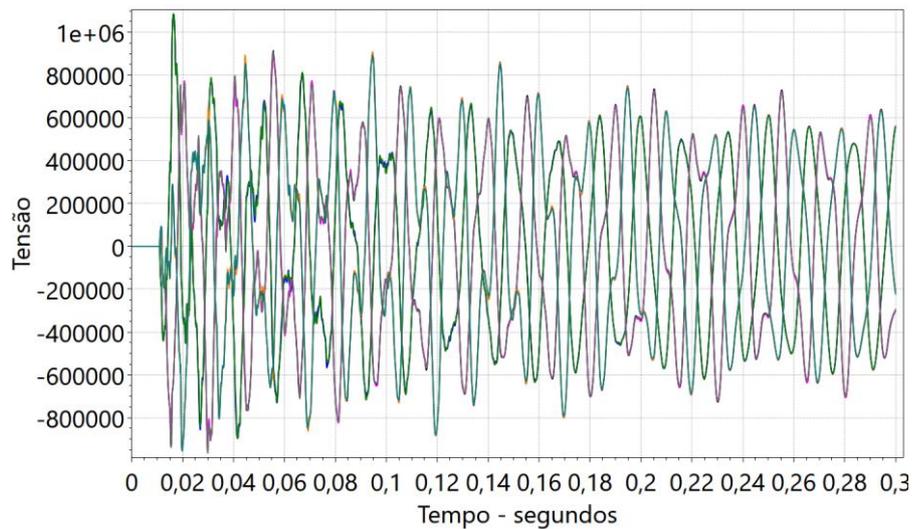


Figura 267 – Tensões no terminal receptor da linha para com transposição finita completa nas proporções de 20%, 30%, 40% e 10% no sentido BCA

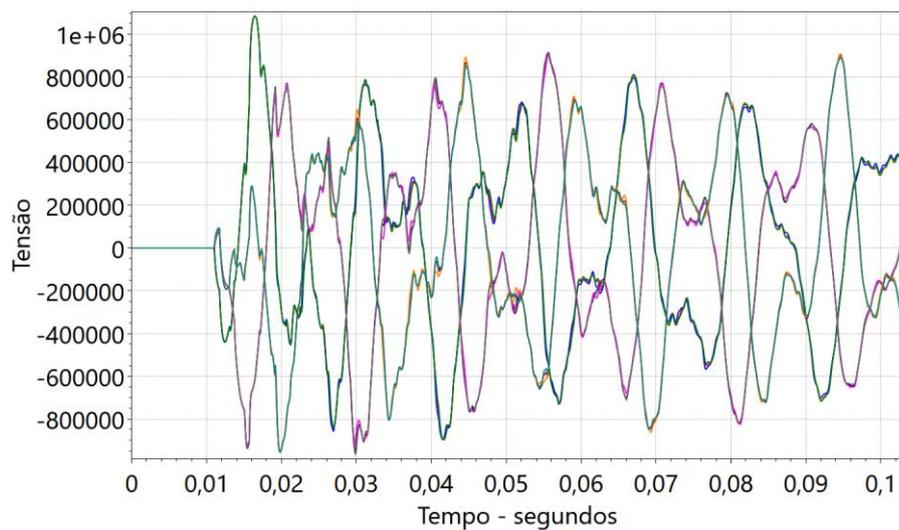


Figura 268 – Tensões no terminal receptor da linha para com transposição finita completa nas proporções de 20%, 30%, 40% e 10% no sentido BCA com ampliação da visualização

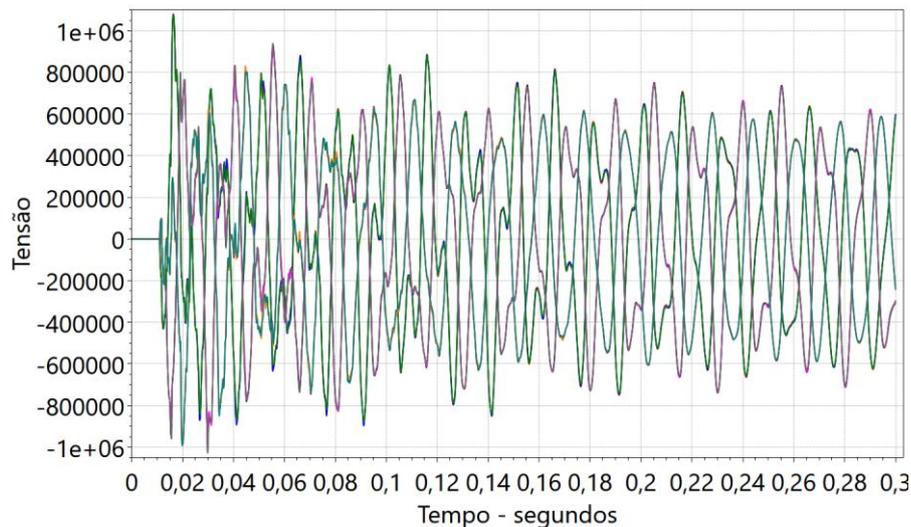


Figura 269 – Tensões no terminal receptor da linha para com transposição finita completa nas proporções de 20%, 30%, 40% e 10% no sentido CAB

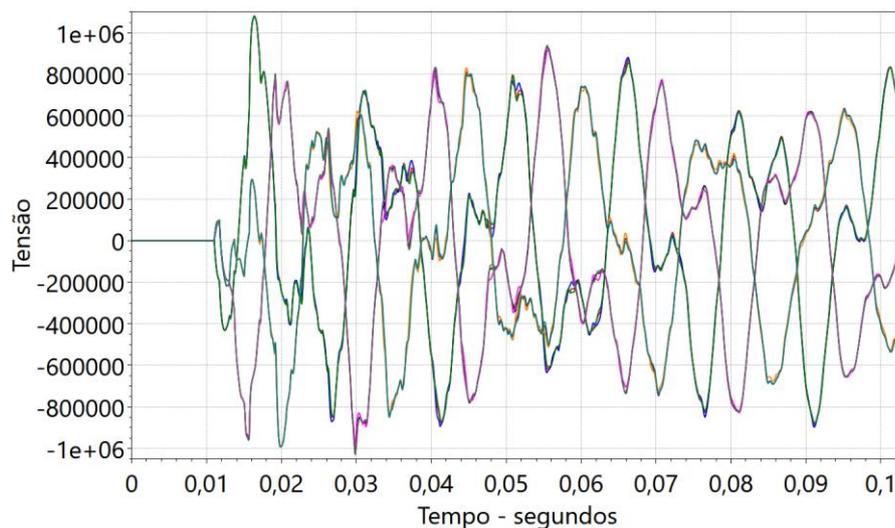


Figura 270 – Tensões no terminal receptor da linha para com transposição finita completa nas proporções de 20%, 30%, 40% e 10% no sentido CAB com ampliação da visualização

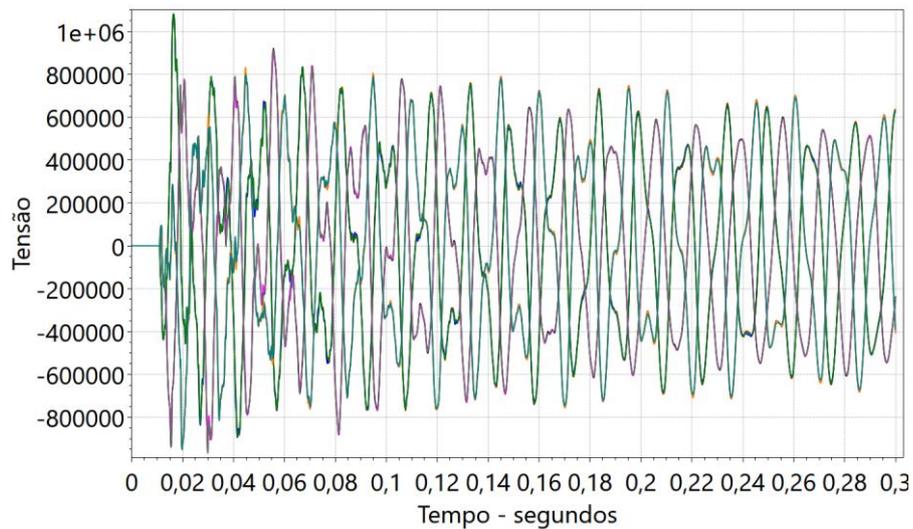


Figura 271 – Tensões no terminal receptor da linha para com transposição finita completa nas proporções de 1/6, 1/3, 1/3 e 1/6 no sentido BCA

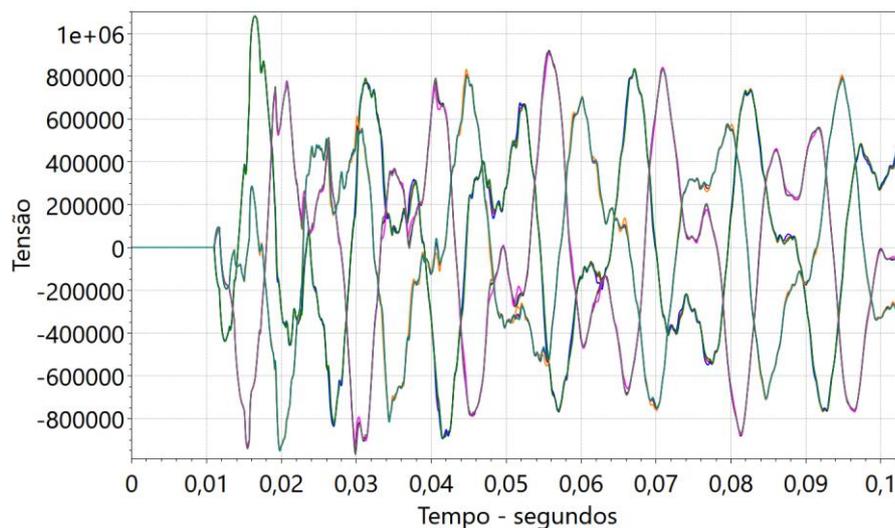


Figura 272 – Tensões no terminal receptor da linha para com transposição finita completa nas proporções de 1/6, 1/3, 1/3 e 1/6 no sentido BCA com ampliação da visualização

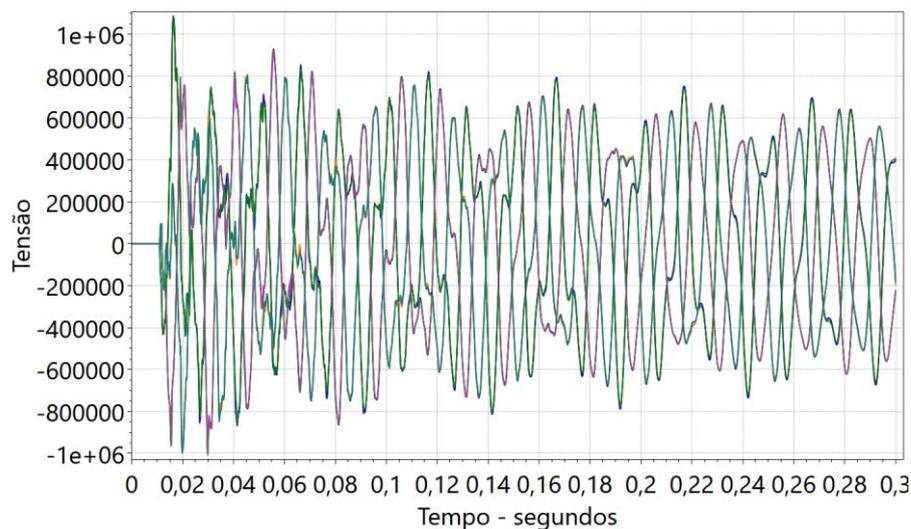


Figura 273 – Tensões no terminal receptor da linha para com transposição finita completa nas proporções de 1/6, 1/3, 1/3 e 1/6 no sentido CAB

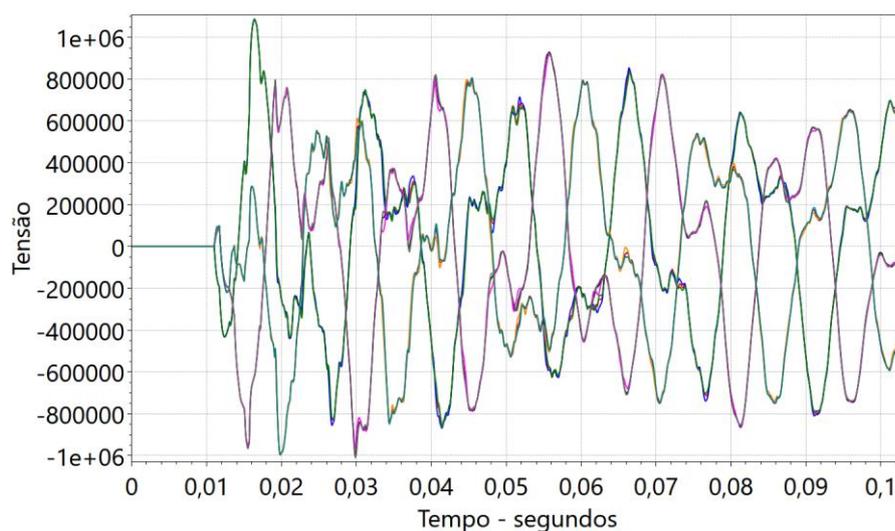


Figura 274 – Tensões no terminal receptor da linha para com transposição finita completa nas proporções de 1/6, 1/3, 1/3 e 1/6 no sentido CAB com ampliação da visualização

Nota-se coerência dos resultados observados, sendo as fases entre ambos os programas preservadas e com o transitório qualitativamente apresentando as mesmas características.

Capítulo 5 - Conclusão

5.1 Considerações

Neste trabalho foi contextualizado os transitórios de manobra no SEP e sua relevância e os principais tipos de estudos. Esses transitórios são eventos rápidos que resultam de chaveamentos ou curtos-circuitos, com impactos significativos no desempenho e na segurança dos sistemas elétricos podendo causar sobretensões, sobrecorrentes e falhas em equipamentos, como transformadores e para-raios, além de apresentar desafios operacionais devido à complexidade de sua modelagem. O capítulo destaca as limitações das metodologias atuais, que dependem de redes equivalentes simplificadas, e apresenta o objetivo central do trabalho que consiste em desenvolver uma metodologia para modelar os principais equipamentos de transitórios de manobra em uma ferramenta fasorial, modelada por fasores dinâmicos.

Na sequência foram explorados os conceitos fundamentais que fundamentam matematicamente as implementações propostas. Assim, foi apresentada de forma didática um exemplo de modelagem de circuitos RL com fasores dinâmicos. A abordagem proposta permite modelar tanto os fenômenos de alta frequência, comuns em transitórios eletromagnéticos, quanto as dinâmicas mais lentas, típicas de sistemas eletromecânicos.

Para a metodologia foram abordados especificamente os modelos e suas principais características. Destaca-se que o primeiro modelo foi o de para-raios e diferente do ATP não interpolou a os pontos da curva com a origem permitindo que o AnaHVDC apresentasse resultados mais realistas. Depois apresentou-se o modelo de matemático da magnetização. Também é apresentada e metodologia para tratar as linhas de transmissão modeladas por sua configuração geométrica, que faz uso da decomposição modal, no contexto de fasores dinâmicos. Buscando uma ferramenta que efetivamente seja capaz de fazer os estudos de transitórios de manobra, fez-se a modelagem da chave de natureza estatística, com inclusão da dispersão normal da dispersão dos polos do disjuntor e com dispersão uniforme modelando a abertura do instante da fase. Além de ser apresentada uma seção tratando da análise do erro dentro do que foi denominado como visualmente coincidente, visando propor uma métrica de erro.

Os modelos implementados foram testados em casos exemplos (energLT e energTRAFO) e no caso BenchCA e validados na ferramenta de referência ATP com

resultados coincidentes em teoria para os modelos de para-raios e magnetização e qualitativamente adequados para chaves estatísticas e linhas com configuração geométrica.

5.2 Conclusões

A abordagem proposta pela ferramenta AnaHVDC apresenta diversas vantagens devido ao uso da metodologia de fasores dinâmicos. Uma das principais vantagens consiste no compartilhamento da base de dados de fluxo de potência (ANAREDE), curto-circuito (ANAFAS) e estabilidade (ANATEM) pelo AnaHVDC, permitindo que uma automatização de cenários seja obtida. Além disso, ao utilizar a rede elétrica completa, evita-se a dispendiosa preparação de equivalentes de redes elétricas. E, por fim, a modelagem por fasores dinâmicos facilita, quando comparada à modelagem tradicional, a inicialização em regime permanente dos componentes do sistema em análise, mesmo em cenários possivelmente instáveis. Então, os proporcionados por esta ferramenta vão desde uma representação completa da rede, concomitante com a automação de cenários diversos, até o fornecimento de resultados com maior grau de confiabilidade.

Nota-se através dos resultados apresentados que a proposta de uma extensão da simulação fasorial aplicada em modelos de equipamentos e componentes utilizados na análise de transitórios eletromagnéticos de manobra foi atendida com êxito. Buscou-se realizar os principais estudos de transitórios eletromagnéticos, sem, no entanto, esgotar o assunto. Entende-se que houve a representação coincidente em teoria dos transitórios eletromagnéticos em redes elétricas.

Outro aspecto que deve ser considerado está relacionado às respostas que os casos simulados proporcionam. Os casos mais reduzidos permitem praticamente validar a ferramenta, isolando o máximo de interferências externas. Sendo esses resultados adequados, a primeira etapa de validação foi atendida. Os casos um pouco maiores, dentro de um cenário mais realista, respondem à adequação do modelo em um sistema mais complexo, podendo ser considerados uma evolução na validação dos modelos.

Os modelos implementados no AnaHVDC tornam a ferramenta apta a realizar os estudos previstos no livro de diretrizes para a elaboração de projetos básicos de empreendimentos de transmissão do ONS, no que se refere especificamente aos estudos de transitórios eletromagnéticos. Em suma, os modelos permitem ampliar o rol de análises realizada pela ferramenta AnaHVDC. Vale ressaltar que, devido à extensão e

complexidade do tema, não foram abordados todos os estudos do grupo de transitórios de manobra, e alguns não foram apresentados na integralidade que um estudo completo exige. No entanto, buscou-se apresentar os estudos relacionados aos modelos implementados e sua respectiva validação, contribuindo para a aplicabilidade da ferramenta nesse contexto.

Uma consequência imediata da validação é a confirmação da viabilidade dos modelos propostos e eventualmente uma possível melhoria de seus aspectos específicos, como, por exemplo, o primeiro ponto da curva do para-raios que era sempre interpolado no ATP e passou a não ser no modelo inserido no AnaHVDC.

5.3 Trabalhos Futuros

Tem-se as seguintes propostas de trabalhos futuros para continuidade das pesquisas desenvolvidas nesta tese de doutorado:

- Investigação de algumas diferenças dos resultados estatísticos encontrados entre ATP e AnaHVDC, talvez utilizando outros programas computacionais para outras referências de comparação;
- Desenvolvimento e implementação computacional de novos modelos, como por exemplo, linhas com dependência dos parâmetros com a frequência, histerese e fluxo residual em núcleos magnéticos, autotransformadores, entre outros;
- Desenvolvimento de metodologia para determinação de modelo equivalente de rede utilizando o sistema completo como referência para corte da rede, na busca da otimização do sistema equivalente em eficiência e precisão;
- Desenvolvimento de nova abordagem estatística, como melhoria do atual procedimento adotado nos estudos elétricos de transitórios de manobra;
- Desenvolvimento de novos critérios de extinção de arco secundário, para melhoria do atual procedimento adotado;
- Desenvolvimento de ferramenta de análise linear trifásica para auxílio na identificação de ressonâncias do sistema e possíveis formas de mitigação por análise de sensibilidade, como realizado atualmente pelo PacDyn de forma monofásica.

Capítulo 6 - Bibliografia

- [1] KUNDUR, Prabha. “Power system stability. Power system stability and control”, v. 10, 2007.
- [2] ZANETTA Jr., Luiz Cera. “Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência” Vol. 52. EdUSP, 2003.
- [3] D'AJUZ, Ary et al. “Transitórios Elétricos e Coordenação do Isolamento–Aplicação em Sistemas Elétricos de Alta Tensão”. 1987.
- [4] Empresa de Pesquisa Energética[online] Disponível na Internet via ww.epe.gov.br Acessado em 04 de março de 2022.
- [5] Operador Nacional do Sistema Elétrico. [online] Disponível na Internet via ww.ons.org.br Acessado em 04 de março de 2022.
- [6] Operador Nacional do Sistema Elétrico, “Diretrizes para a Elaboração de Projetos Básicos para Empreendimentos de Transmissão”, 2013.
- [7] DE OLIVEIRA DANIEL, Luciano. “Simulador De Transitórios Eletromagnéticos Utilizando Fasores Dinâmicos Para Análise Não-Linear De Redes Elétricas Com Equipamentos Facts”. 2018. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [8] GOMES Jr., S.; Almeida, L. P.; Lirio, F. L.; Parreiras, T. J. M. A.; Daniel, L. O.; Amaral, T. S.; Rocha, T. J. B.; Azevedo, R. G. "O novo Programa Computacional AnaHVDC para Simulação dos Múltiplos Elos HVDC do SIN considerando Transitórios Eletromecânicos e Eletromagnéticos". XXV SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Belo Horizonte, 2019.
- [9] CAMPELLO, T. M. et al. Reviewing the large electrical network equivalent methods under development for electromagnetic transient studies in the Brazilian Interconnected power system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 151, p. 109033, 2023.
- [10] CAMPELLO, T. M.; VARRICCHIO, S. L.; TARANTO, G. N. Three-Phase Frequency-Dependent Network Equivalents in the ATP for Lumped Parameter Systems Using Descriptor Formulation, Rational Models, and Symmetrical Component Data. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, v. 32, n. 6, p. 1690-1703, 2021.

- [11] CAMPELLO, T. M.; VARRICCHIO, S. L.; TARANTO, G. N. Representation of multiport rational models in an electromagnetic transients program: Networks with lumped and distributed parameters. *Electric Power Systems Research*, v. 178, p. 106029, 2020.
- [12] Centro de Pesquisa de Energia Elétrica – CEPEL, “ANAREDE – Programa de Análise de Redes - Manual do Usuário - Versão 11.05.05”, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2021.
- [13] Centro de Pesquisa de Energia Elétrica – CEPEL, “ANATEM – Programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos - Manual do Usuário - Versão 12.00.03”, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2021.
- [14] Centro de Pesquisa de Energia Elétrica – CEPEL, “ANAFAS - - Programa de Análise de Falhas Simultâneas: Manual do Usuário. Versão 7.5. Rio de Janeiro: CEPEL, 2021.
- [15] SCOTT, W.; LIU, T. “Alternative transients program ATP rule book”. Portland: Canadian/American EMTP User Group, 1992.
- [16] HEVIA, Orland P. Hysteresis Hevia: “A new routine to generate input data for inductors with hysteresis”. *EEUG News*, v. 6, n. 1–2, p. 19-28, 2000.
- [17] NAIDU, S. R. “Transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência”. Editora GRAFSET, Campina Grande, Brasil, 1985.
- [18] GOMES Jr., S. “Otimização de linhas aéreas de transmissão considerando novas concepções construtivas para os feixes de condutores”. 1995. Tese de Mestrado. MS thesis, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [19] BRANDÃO FARIA, J. A. On the modal decomposition of n-coupled transmission lines. *Microwave and Optical Technology Letters*, v. 14, n. 4, p. 247-249, 1997.
- [20] CABALLERO, Pablo Torrez; COSTA, Eduardo C. Marques; KUROKAWA, Sérgio. Modal decoupling of overhead transmission lines using real and constant matrices: Influence of the line length. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 92, p. 202-211, 2017.
- [21] ARAÚJO, Antônio EA; NEVES, Washington Luiz Araujo. “Cálculo de transitórios eletromagnéticos em sistemas de energia”. Ed. da UFMG, 2005.
- [22] DOMMEL, H.W., "Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single and Multiphase Networks", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-88, No. 4, April 1969

- [23] DOMMEL, H.W, "Nonlinear and Time-Varying Elements in Digital Simulation of Electromagnetic Transients," in IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-90, no. 6, pp. 2561-2567, Nov. 1971.
- [24] NODA, T., Semlyen, A., Iravani, R., "Reduced-Order Realization of a Nonlinear Power Network Using Companion-Form State Equations with Periodic Coefficients", IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 18, NO. 4, OCTOBER 2003, pages 1478-1488.
- [25] STANKOVIC, A.M., Mattavelli, P., Caliskan, V., Verghese G. C., "Modeling and Analysis of FACTS Devices with Dynamics Phasors", IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, January 2000.
- [26] SEMLYEN, A. I. S-domain methodology for assessing the small signal stability of complex systems in nonsinusoidal steady state. IEEE Transactions on Power Systems, v. 14, n. 1, p. 132-137, 1999.
- [27] GOMES Jr., S.; Varricchio, S.L.; Martins, N.; Portela, C.; "Results on modal analysis to speed-up electromagnetic transient simulations", Power Engineering Society General Meeting, 2005. IEEE, June 12-16, 2005 Pages:2744 – 2751.
- [28] GUEDES, S.D., "Modelagem Tensorial de GCSC e Projeto de Controlador de Potência Ativa", Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, R.J, Brasil, 2018.
- [29] KRON, G., "Tensorial Analysis of Integrated Transmission Systems - Part I. The Six Basic Reference Frames", Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Volume: 70, Issue: 2, July 1951, Pages 1239 - 1248.
- [30] KRON, G., "Tensorial Analysis of Integrated Transmission Systems - Part II. Off-Nominal Turn Ratios", Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems, Volume: 71, Issue: 1, Jan. 1952, Pages 505 - 512.
- [31] KRON, G., "Tensorial Analysis of Integrated Transmission Systems - Part III. The "Primitive" Division", Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems, Volume: 71, Issue: 1, Jan. 1952, Pages 814 - 822.
- [32] KRON, G., "Tensorial Analysis of Integrated Transmission Systems - Part IV. The Interconnection of Transmission Systems", Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems, Volume: 72, Issue: 2, Jan. 1953, Pages 827 - 839.

- [33] PORTELA, C. M., “Análise de Redes Elétricas – Algumas Aplicações”, Edição subsidiada pelo Instituto de Alta Cultura, Lisboa, Portugal, 1970.
- [34] MATTAVELLI, P., Verghese G. C., Stankovic A. M., “Phasor Dynamics of Thyristor-Controlled Series Capacitor Systems”, *IEEE Transactions of Power Systems*, vol. 12, no. 3, pp. 1259-1267, August 1997.
- [35] DANIEL, L.O., “Modelagem, Análise e Controle de um Elo de Tensão Contínua com Conversores VSC Conectados em Back-to-back”, Dissertação de mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, R.J, Brasil, 2011.
- [36] GODIM DE AZEVEDO, R., “Avaliação Dinâmica De Elos De Corrente Contínua Em Alta Frequência Utilizando Fasores Dinâmicos”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2019.
- [37] LEITE, N.S., “Modelagem Em Fasores Dinâmicos De Conversores Com Capacitores De Comutação”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2021
- [38] DEMIRAY, T., MILANO, F., ANDERSSON, G., “Dynamic Phasor Modeling of the Doubly-fed Induction Generator under Unbalanced Conditions”. 2007.
- [39] CHUDASAMA, M. C., KULKARNI, A. M., “Dynamic Phasor Analysis of SSR Mitigation Schemes Based on Passive Phase Imbalance”, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no 3, p. 1668–1676, ago. 2011, doi: 10.1109/TPWRS.2010.2072793.
- [40] STANKOVIC, A. M., SANDERS, S., AYDIN, T., “Dynamic Phasors in Modeling and Analysis of Unbalanced Polyphase Ac Machines”, *IEEE Power Eng. Rev.*, vol. 22, no 2, p. 58–58, fev. 2002, doi: 10.1109/MPER.2002.4311986.
- [41] S. Henschel, “Analysis of Electromagnetic and Electromechanical Power System Transients with Dynamic Phasors,” Ph. D. dissertation, The University of British Columbia, Vancouver, Canada, 1999.
- [42] P. Zhang, J. R. Martí, H. W. Dommel, “Shifted Frequency Analysis for EMTF Simulation of Power-System Dynamics”, *IEEE Transactions on Circuits and Systems, I – Regular Papers*, vol. 57, No. 9, September 2010, pp. 2564-2574.
- [43] Gao, S., Song, Y., Chen, Y., Yu, Z., Tan, Z.: Shifted frequency-based electromagnetic transient simulation for AC power systems in symmetrical component domain. *IET Renewable Power Gener.* **17**(1), 83–94 (2023).
- [44] K. Strunz, R. Shintaku, and F. Gao, “Frequency-adaptive network modeling for integrative simulation of natural and envelope waveforms in power systems and circuits,” *IEEE Trans. Circuits Syst. I*, vol. 53, no. 12, pp. 2788–2803, Dec. 2006.

- [45] F. Gao and K. Strunz, "Frequency-Adaptive Power System Modeling for Multiscale Simulation of Transients," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 24, no. 2, pp. 561-571, May 2009, doi: 10.1109/TPWRS.2009.2016587.
- [46] K. Strunz, Y. Chen and Y. Xia, "Bridging Scales With the Shift Frequency: Frequency-adaptive simulation of multiscale transients in power systems," in *IEEE Electrification Magazine*, vol. 11, no. 4, pp. 29-37, Dec. 2023, doi: 10.1109/MELE.2023.3320487.
- [47] <https://dpsim.fein-aachen.org/docs/>
- [48] M. Mirz, S. Vogel, G. Reinke, and A. Monti, "DPsim A dynamic phasor real-time simulator for power systems," *SoftwareX*, vol. 10, p. 100253, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.softx.2019.100253>
- [49] DOMMEL, H. W. "EMTP theory book". 2nd. ed. Vancouver: Microtran Power Systems Analysis Corporation, 1996.
- [50] TOMINAGA, S.; AZUMI, K.; SHIBUYA, Y.; IMATAKI, M.; FUJIWARA, Y.; NISHIDA, S. "Protective performance of metal oxide surge arrester based on the dynamic V-I characteristics". *IEEE Transactions on Power Apparatus Systems*, PAS-98, n. 6, 1979. 1860-1871.
- [51] SCHMIDT, W.; MEPPPELINK, J.; RICHTER, B.; FESER, K.; KEHL, L.; QIU, D. "Behaviour of MO-surge-arrester blocks to fast transients". *IEEE Transactions on Power Delivery*, 4, n. 1, 1989. 292-300.
- [52] CIGRÉ. "Guidelines for the evaluation of the dielectric strength of external insulation". Working Group 07 (Dielectric strength of external insulation under transient voltage) of study committee 33 (Overvoltages and Insulation Coordination). Paris: Cigré. 1992. p. 80.
- [53] IEEE C62.22-2009 – "IEEE guide for the application of metal-oxide surge arresters for alternating-current systems". IEEE. New York, p. 143. 2009.
- [54] KIM, I.; FUNABASHI, T.; SASAKI, H.; HAGIWARA, T.; KOBAYASHI, M. "A study of ZnO arrester model for steep front wave". *IEEE Transactions on Power Delivery*, 11, n. 2, 1996.
- [55] PINCETI, P.; GIANNETTONI, M. "A simplified model for zinc oxide surge arresters". *IEEE Transactions on Power Delivery*, 14, n. 2, 1999. 393-398.
- [56] FERNÁNDEZ, F.; DÍAZ, R. "Metal-oxide surge arrester model for fast transient simulations." *International Conference on Power System Transients (IPST'01)*, 2001. 20-24.

- [57] POPOV, M.; SLUIS, L. V. D.; PAAP, G. C. "Application of a new surge arrester model in protection studies concerning switching surges." *IEEE Power Engineering Review*, 22, n. 9, 2002. 52-53.
- [58] MARDIRA, K. P.; SAHA, T. K. "A simplified lightning model for metal oxide surge arrester." *Australasian Universities Power Engineering Conference*, Melbourne, 1, 2002.
- [59] MAGRO, M. C.; GIANNETTONI, M.; PINCETI, P. "Validation of ZnO surge arresters model for overvoltages studies." *IEEE Transactions on Power Delivery*, 19, n. 4, 2004.
- [60] VALSALAL, P.; USA, S.; UDAYAKUMAR, K. "Importance of capacitance on metal oxide arrester block model for VFTO applications." *IEEE Transactions on Power Delivery*, 26, n. 2, 2011. 1294–1295.
- [61] NEVES, Washington LA. "Transformer modelling for transient studies". 1994. Tese de Doutorado. University of British Columbia.
- [62] ABREU, Rodrigo Leão de. "Modelagem e Simulação de Transformadores, sob Condições Transitórias, levando em Consideração os Efeitos da Saturação e Histerese do Núcleo Ferromagnético". 2011.
- [63] PATEL, Kunal J. "Effects of transformer inrush current". 2013.
- [64] CHIESA, Nicola. "Power transformer modeling for inrush current calculation". 2010.
- [65] MOUSAVI, Seyedali. "Electromagnetic modelling of power transformers for study and mitigation of effects of GICs". 2015. Tese de Doutorado. KTH Royal Institute of Technology.
- [66] PRUSTY, S.; RAO, M. "A direct piecewise linearized approach to convert rms saturation characteristic to instantaneous saturation curve". *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 16, n. 1, p. 156-160, 1980.
- [67] HEVIA, Orland P., "Inductor no lineal TANH en el ATP: Determinación de los parâmetros".
- [68] HEVIA, Orlando P. "Inductor con pérdidas en el ATP".
- [69] HEVIA, Orlando P. "HYSTI: Programa para generar datos de inductores con histéresis".
- [70] PRIKLER, L.; HØIDALEN, H. K. ATPDraw version 5.6 for Windows. Users' Manual. SINTEF Energy Research, Norway, 2009.

- [71] Manitoba HVDC Research Center, "PSCAD/EMTDC Simulation Program- V4.2 User's Manual" - Winnipeg Canada, 2005.
- [72] BERGERON, Louis Jean Baptiste. "Water hammer in hydraulics and wave surges in electricity". Wiley, 1961.
- [73] WEDEPOHL, L. M. "Application of matrix methods to the solution of travelling-wave phenomena in polyphase systems." In: Proceedings of the Institution of Electrical Engineers. IET Digital Library, 1963. p. 2200-2212.
- [74] HEDMAN, D. E. "Propagation on overhead transmission lines I-Theory of modal analysis." IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. 84, n. 3, p. 200-205, 1965.
- [75] WEDEPOHL, L. M.; MOHAMED, S. E. T. "Multiconductor transmission lines. Theory of natural modes and Fourier integral applied to transient analysis." In: Proceedings of the Institution of Electrical Engineers. IET Digital Library, 1969. p. 1553-1563.
- [76] HESSE, M. H. "Electromagnetic and electrostatic transmission-line parameters by digital computer." IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. 82, n. 66, p. 282-291, 1963.
- [77] DWIGHT, Herbert B. "Skin effect in tubular and flat conductors." Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, v. 37, n. 2, p. 1379-1403, 1918.
- [78] CARSON, John R. "Wave propagation in overhead wires with ground return." The Bell System Technical Journal, v. 5, n. 4, p. 539-554, 1926.
- [79] DERI, Agnes et al. "The complex ground return plane a simplified model for homogeneous and multi-layer earth return." IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, n. 8, p. 3686-3693, 1981.
- [80] SEMLYEN, Adam; DABULEANU, A. "Fast and accurate switching transient calculations on transmission lines with ground return using recursive convolutions." IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. 94, n. 2, p. 561-571, 1975.
- [81] MARTI, José R. "Accurate modelling of frequency-dependent transmission lines in electromagnetic transient simulations." IEEE Transactions on power apparatus and systems, n. 1, p. 147-157, 1982.
- [82] MORCHED, Atef; GUSTAVSEN, Bjorn; TARTIBI, Manoocher. "A universal model for accurate calculation of electromagnetic transients on overhead lines and

- underground cables." IEEE Transactions on Power Delivery, v. 14, n. 3, p. 1032-1038, 1999.
- [83] GUSTAVSEN, Bjorn; SEMLYEN, Adam. "Rational approximation of frequency domain responses by vector fitting." IEEE Transactions on power delivery, v. 14, n. 3, p. 1052-1061, 1999.
- [84] NODA, T.; NAGAOKA, N.; AMETANI, A. "Phase domain modeling of frequency-dependent transmission lines by means of an ARMA model." IEEE Transactions on Power Delivery, v. 11, n. 1, p. 401-411, 1996.
- [85] NODA, T.; NAGAOKA, N.; AMETANI, A. "Further improvements to a phase-domain ARMA line model in terms of convolution, steady-state initialization, and stability." IEEE Transactions on Power Delivery, v. 12, n. 3, p. 1327-1334, 1997.
- [86] GUSTAVSEN, Bjorn; SEMLYEN, Adam. "Enforcing passivity for admittance matrices approximated by rational functions." IEEE Transactions on Power Systems, v. 16, n. 1, p. 97-104, 2001.
- [87] FERNANDES, Alecio B.; NEVES, Washington LA. "Frequency-dependent transformation matrices for phase-domain transmission line models." In: 2001 Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No. 01CH37262). IEEE, 2001. p. 1782-1787.
- [88] GUSTAVSEN, Bjørn. "Computer code for rational approximation of frequency dependent admittance matrices." IEEE Transactions on Power Delivery, v. 17, n. 4, p. 1093-1098, 2002.
- [89] LIMA, Antonio CS; FERNANDES, Alécio B.; CARNEIRO, S. "Rational approximation of frequency domain responses in the S and Z planes." In: IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005. IEEE, 2005. p. 126-131.
- [90] GUSTAVSEN, Bjørn; SEMLYEN, Adam. "Admittance-based modeling of transmission lines by a folded line equivalent." IEEE Transactions on Power Delivery, v. 24, n. 1, p. 231-239, 2008.
- [91] HEVIA, Orlando P. "Alternative transients program: comparison of transmission line models." Revista Latinoamericana del ATP, v. 1, p. 1-5, 1999.
- [92] Feng Gao and K. Strunz, "Modeling of constant distributed parameter transmission line for simulation of natural and envelope waveforms in power electric networks," *Proceedings of the 37th Annual North American Power Symposium, 2005.*, Ames, IA, USA, 2005, pp. 247-252, doi: 10.1109/NAPS.2005.1560533.

- [93] H. Ye, K. Strunz and Y. Xia, "Comparison of three different multi-scale models for transmission lines to simulate diverse transients in power systems," *2014 International Conference on Power System Technology*, Chengdu, China, 2014, pp. 355-361, doi: 10.1109/POWERCON.2014.6993640.
- [94] Ye, H., Strunz, K.: Multi-scale and frequency-dependent modeling of electric power transmission lines. *IEEE. Trans. Power Del.* 33(1), 32–41 (2018)
- [95] Azevedo, R. G.; GOMES Jr., S.; Almeida, L. P.; Parreiras, T. J. M. A.; "Aplicação da Nova Ferramenta Computacional AnaHVDC em Estudos de Transitórios Eletromagnéticos de Manobra". XXVI SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Rio de Janeiro, 2022.
- [96] Azevedo, R. G.; Parreiras, T. J. M. A.; GOMES Jr., S.; Almeida, L. P.; Amaral, T. S." Análise Estatística de Transitórios Eletromagnéticos de Manobra Utilizando o AnaHVDC ". XXVII SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Brasília, 2023.
- [97] CLOSE, C.M., *Circuitos Lineares*, 2 edição, LTC S.A., 1975.
- [98] DIRECTOR, S.W., "Circuit Theory, A Computational Approach," J. Wiley, New York, 1975.
- [99] VARRICCHIO, Sergio Luis ; GOMES JUNIOR, Sergio ; VÉLIZ, Franklin Clement; ALBUQUERQUE, I. F. ; ARAÚJO, Leandro Ramos de . Método de Newton Raphson para Utilização de Dados de Fluxo de Potência na Modelagem de Linhas de Transmissão para Estudos de Comportamento Harmônico de Sistemas de Potência. In: V Seminário Brasileiro sobre Qualidade de Energia - V SBQEE, 2003, Aracaju - SE. V SBQEE, 2003CHEN, Chi-Tsong. *Linear system theory and design*. Saunders college publishing, 1984.
- [100] DALTIM, Rodrigo Serra. Representação modal alternativa de linhas de transmissão trifásicas simétricas não idealmente transpostas. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.
- [101] KRAULICH, Leyla; AGOSTINI, André S.; SILVA, Marcio S.; PORTO, Wagner F. Análise estocástica de transitórios em subestações utilizando o método de Monte Carlo integrado ao ATP. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.
- [102] https://en.cppreference.com/w/cpp/numeric/random/normal_distribution
- [103] https://en.cppreference.com/w/cpp/numeric/random/uniform_int_distribution

- [104] GOMES Jr., S.; CASTRO, A.; PARREIRAS, T. J. M. “A. Integração entre o PacDyn e ANATEM para Estudos Dinâmicos de Sistema Elétricos.” XX Seminário Nacional de Produção e Transm. de Energia Elétrica-SNPTEE, Recife, 2009.
- [105] IEEE C37.100 – “Standard Definitions for Power Switchgear,” 1992
- [106] MIGUEL, P. M. “Modelo de chave com representação do arco elétrico e sua utilização para a simulação de fenômenos de VFTO.” XXI Seminário Nacional de Produção e Transm. de Energia Elétrica-SNPTEE, Florianópolis, 2011.
- [107] Operador Nacional do Sistema Elétrico, “Critérios Para Análise De Superação De Equipamentos E Instalações De Alta Tensão”, Nota Técnica ONS nº0048/2014, Revisão 1/Fevereiro/2015.
- [108] IEC 62271-100:2021 “High-voltage switchgear and controlgear - Part 100: Alternating-current circuit-breakers”, 2021
- [109] MATHWORKS. *MATLAB User's Guide*. Natick: The MathWorks, Inc., 2023.
- [110] <https://www.mathworks.com/help/stats/kstest.html>
- [111] <https://www.mathworks.com/help/stats/kstest2.html>

Apêndice A – Entrada de dados: “BenchCA”

Arquivo de dados do caso base do sistema “BenchCA” no AnaHVDC.

```

TITU
(Caso base BenchCA - Tensao pre-operacional em 1.1pu)
Bench CA
DHIS
('Filename' )(Case number)
'BENCHCA.SAV'      2
DLOA
(label) (nb1) (type)
ALL          0
FIM
DLTA
(label) (from) (toid) (ncir) (length) (nPi) (minTal) (fParNom)
ALL          0      0      1
FIM
DANA
('Anafas file' )
'BENCHCA.ANA'
DSIM
(step) (duration) (period) (tolerr) (maxiter)
10e-6      0.20      1
FIM
DPLT
(' label      ') (mode) (device) (variable) (id1) (id2) (id3) (Seq) ( factor ) ( T )
'AnaHVDC: V07 A' INST  BUS      VOLT      7          A  408248.29
'AnaHVDC: V07 B' INST  BUS      VOLT      7          B  408248.29
'AnaHVDC: V07 C' INST  BUS      VOLT      7          C  408248.29
'AnaHVDC: V08 A' INST  BUS      VOLT      8          A  408248.29
'AnaHVDC: V08 B' INST  BUS      VOLT      8          B  408248.29
'AnaHVDC: V08 C' INST  BUS      VOLT      8          C  408248.29
'AnaHVDC: V09 A' INST  BUS      VOLT      9          A  408248.29
'AnaHVDC: V09 B' INST  BUS      VOLT      9          B  408248.29
'AnaHVDC: V09 C' INST  BUS      VOLT      9          C  408248.29
FIM

```

Apêndice B – Ajuste da tensão interna das fontes modeladas como barras infinitas

O Apêndice B apresenta o cálculo da tensão interna a partir do ponto de operação obtido do arquivo de fluxo de potência. Sendo conhecidas, a potência ativa e reativa da barra terminal e tensão e ângulo da barra terminal, resta calcular a tensão e ângulo da barra geradora.

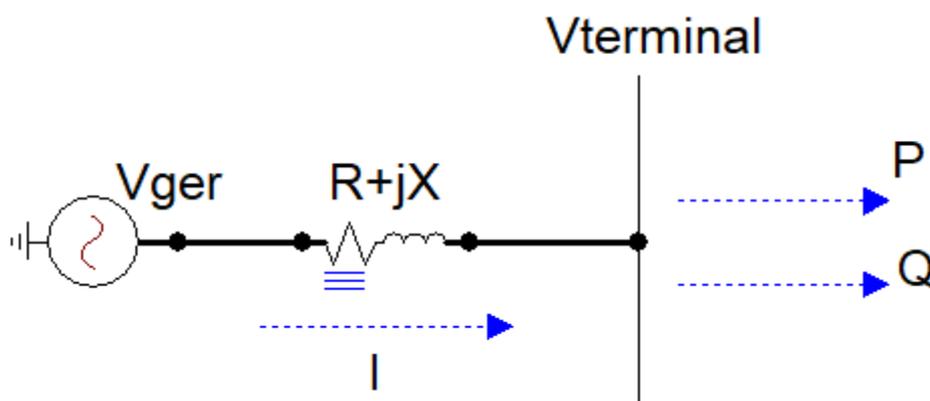


Figura 275 – Cálculo da tensão interna de uma determina barra

Inicialmente, calcula-se a potência aparente e seu respectivo ângulo, a partir dos dados de fluxo da barra terminal, disponibilizado pelo programa de fluxo de potência.

$$|S| = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (333)$$

$$\theta_s = \text{atan}\left(\frac{P}{Q}\right) \quad (334)$$

Assim, na sequência, calcula-se a corrente e ângulo da corrente:

$$|I| = \frac{S}{|V_T|} \quad (335)$$

$$\theta_I = -(\theta_T - \theta_s) \quad (336)$$

O ramo resistivo está em fase com a corrente obtida. Sua tensão e ângulo são dados por:

$$|V_r| = r|I| \quad (337)$$

$$\theta_r = \theta_I \quad (338)$$

O ramo indutivo está em quadratura com a corrente equivalente, logo, sua tensão e ângulo são dados por:

$$|V_x| = x|I| \quad (339)$$

$$\theta_x = \theta_I + \frac{\pi}{2} \quad (340)$$

A tensão na barra terminal pode ser descrita em suas componentes reais e imaginárias por:

$$V_{Tre} = |V_T| \cos(\theta_T) \quad (341)$$

$$V_{Tim} = |V_T| \sin(\theta_T) \quad (342)$$

Analogamente, a tensão no ramo resistivo pode ser descrita em suas componentes reais e imaginárias por:

$$V_{rre} = |V_r| \cos(\theta_r) \quad (343)$$

$$V_{rim} = |V_r| \sin(\theta_r) \quad (344)$$

Do mesmo modo, a tensão no ramo indutivo pode ser descrita em suas componentes reais e imaginárias por:

$$V_{xre} = |V_x| \cos(\theta_x) \quad (345)$$

$$V_{xim} = |V_x| \sin(\theta_x) \quad (346)$$

As componentes reais e imaginárias totais são dadas por:

$$V_{re} = V_{Tre} + V_{rre} + V_{xre} \quad (347)$$

$$V_{im} = V_{Tim} + V_{rim} + V_{xim} \quad (348)$$

Resultando no seguinte equacionamento para a tensão e ângulo interno da barra geradora:

$$|V_{ger}| = \sqrt{V_{re}^2 + V_{im}^2} \quad (349)$$

$$\theta_{ger} = -\left(\text{atan}\left(\frac{V_{re}}{V_{im}}\right) + \frac{\pi}{2}\right) \quad (350)$$

Essa lógica foi escrita em *script* no *Octave* para determinação das tensões internas das máquinas do caso BenchCA.

```

close all;
clear all;
clc

% Resistencias e Impedancias do ANAFAS
% SeqPos = SeqZero
ranafas = [0.01389 0.01389 0.0046296 0.00694 0.00694];
xanafas = [1.389 1.389 0.46296 0.69444 0.69444];
% Bases do Sistema
sbase = 100E6;
vbase = 20E3;
zbase = vbase*vbase/sbase;
f = 60;
w = 2*pi*f;

% Potencias obtidas do ANAREDE (Fluxo de Potencia)
p = [1696.2E6 1600E6 4054.4E6 3000.0E6 3000.0E6];
q = [205.3E6 338.2E6 556.7E6 686.4E6 636.6E6];

% Tensao pre-operacional (V09 = 1.076pu)

% Impedancias convertidas para o ATP
r = ranafas.*(zbase/100);
l = 1000*xanafas.*(zbase/100)/w;

% Modulo e Angulo das tensoes na Barra Terminal (VT)
v = 1.045*20E3;
vtabs = v*ones(1,5);
vtang = [-30.0 -36.3 -66.0 -79.0 -59.0].*pi/180;

% Tensao pre-operacional (V09 = 1.076pu)
%vtabs = [1.09 1.1 1.1 1.1 1.1]*vbase;
%vtang = [-30.0 -35.5 -60.0 -71.0 -55.0].*pi/180;

% Reatancia Indutiva wm ohms
x = l*w/1000;

% Potencia Aparente
s = p +j*q;
sabs = abs(s);
sang = angle(s);

for k=1:max(size(p))

    % VF/Ang(VF) = VT/Ang(VT) + Vr/Ang(Vr) + Vx/Ang(Vx)

    % Tensao terminal em componentes real e imaginaria
    vtre(k) = vtabs(k)*cos(vtang(k));
    vtim(k) = vtabs(k)*sin(vtang(k));

    % Calculo da corrente no ramo
    iabs(k) = (sabs(k)/vtabs(k));
    % Calculo do angulo (sinal menos representa o conjugado)
    iang(k) = -(sang(k) - vtang(k));

    % Queda de tensao na resistencia
    vrabs(k) = r(k)*iabs(k);
    vrang(k) = iang(k);
    vrre(k) = vrabs(k)*cos(vrang(k));
    vrim(k) = vrabs(k)*sin(vrang(k));

    % Queda de tensao na reatancia indutiva
    vxabs(k) = x(k)*iabs(k);
    vxang(k) = iang(k) + pi/2;
    vxre(k) = vxabs(k)*cos(vxang(k));
    vxim(k) = vxabs(k)*sin(vxang(k));

    % Soma das componentes reais e imaginarias da tensoes
    somare(k) = (vtre(k) + vrre(k) + vxre(k));
    somaim(k) = (vtim(k) + vrim(k) + vxim(k));

    % Apresentar todas as casas decimais da Fonte de Tensao (VF)
    % Exibir resultados no formato ATP (V e Graus)
    format longg
    vfabs(k) = sqrt(somare(k)*somare(k) + somaim(k)*somaim(k));
    fprintf('v(%d) = %f \n', k, vfabs(k));
    % Soma 90 graus para compatibilizar com referencia cossenoidal

```

```
vfang(k) = -(180*atan(somare(k)/somaim(k))/pi + 90);  
fprintf('a(%d) = %f \n\n', k, vfang(k));  
  
endfor
```

Executando o script, tem-se o seguinte resultado:

```
v(1) = 22120.443128  
a(1) = -145.489062  
  
v(2) = 22530.492642  
a(2) = -83.778850  
  
v(3) = 22441.542354  
a(3) = -50.013115  
  
v(4) = 22687.052198  
a(4) = -92.668072  
  
v(5) = 22674.251251  
a(5) = -53.011482
```

Apêndice C – Ajuste das cargas

O Apêndice C apresenta o cálculo para ajustar o valor de um determinado valor de carga em um barramento a partir de suas condições de fluxo de potência. Assim, para uma determinada carga no barramento, mede-se a tensão e decompõe-se em coordenadas cartesianas com o objetivo de realizar o divisor de tensão e conseqüentemente calcular os parâmetros R e X (ou L). Então, tem-se que:

$$V = V_r + jV_x \quad (351)$$

Tendo as relações de potência ativa e reativa:

$$P = \frac{V_r^2}{R} \therefore R = \frac{V_r^2}{P} \quad (352)$$

$$Q = \frac{V_x^2}{X} \therefore X = \frac{V_x^2}{Q} \quad (353)$$

Do triângulo de potência, por equivalência de triângulos, pode-se fazer:

$$\frac{V_r}{P} = \frac{V}{S} \therefore V_r = \left(\frac{P}{S}\right)V \quad (354)$$

$$\frac{V_x}{Q} = \frac{V}{S} \therefore V_x = \left(\frac{Q}{S}\right)V \quad (355)$$

Assim:

$$R = \frac{V_r^2}{P}$$

$$R = \frac{\left[\left(\frac{P}{S}\right)V\right]^2}{P} \quad (356)$$

$$R = P \left(\frac{V}{S}\right)^2$$

Analogamente, para o termo reativo, tem-se que:

$$X = \frac{V_x^2}{Q}$$

$$X = \frac{\left[\left(\frac{Q}{S}\right)V\right]^2}{Q} \quad (357)$$

$$X = Q \left(\frac{V}{S} \right)^2$$

Desse modo, para se obter os valores de R e X basta calcular a potência aparente e utilizar as relações obtidas acima. Ilustraremos isso utilizando os dados da barra 6.

Tabela 30 – Dados da barra 6

Barra	Geração		Potência		Transformador	Carga		Filtro
	V [kV]	Fase [°]	P [MW]	Q [Mvar]	X [%]	P [MW]	Q [Mvar]	Q [Mvar]
6	1,031	-11,0	-	-	-	100	50	318,6

$$S_{06} = \sqrt{P_{06}^2 + Q_{06}^2}$$

$$R_{06} = P_{06} \left(\frac{V_{06}}{S_{06}} \right)^2 = P_{06} \left(\frac{V_{06}}{\sqrt{P_{06}^2 + Q_{06}^2}} \right)^2 \quad (358)$$

$$R_{06} = \frac{P_{06}}{P_{06}^2 + Q_{06}^2} V_{06}^2$$

O mesmo procedimento pode ser realizado para a reatância:

$$X_{06} = \frac{Q_{06}}{P_{06}^2 + Q_{06}^2} V_{06}^2 \quad (359)$$

Substituindo pelos respectivos valores numéricos:

$$R_{06} = \frac{100}{100^2 + 50^2} (1,031 \times 500)^2 = 2125,922 \quad (360)$$

$$X_{06} = \frac{50}{100^2 + 50^2} (1,031 \times 500)^2 = 1062,961 \quad (361)$$

Ou ainda, se quisermos calcular a indutância:

$$L_{06} = \frac{X_{06}}{\omega} = \frac{1062,961}{2\pi 60} = 2,8195916243984H \quad (362)$$

Para o filtro ou carga puramente capacitiva, tem-se, então que:

$$V_C = V_{06} \quad (363)$$

$$Q_{06} = \frac{V_{06}^2}{X_C} \therefore Q_{06} = V_{06}^2 \omega C_{06} \quad (364)$$

$$C_{06} = \frac{Q_{06}}{\omega V_{06}^2}$$

$$C_{06} = \frac{318,6}{2\pi 60(1,031 \times 500)^2} = 3,18022109115185\mu F \quad (365)$$

Tabela 31 – Dados de carga do ANAREDE convertidos

Carga		Filtro	Transformador
X [Ω]	L [H]	C [μ F]	X [Ω]
-	-	-	13,889
-	-	-	13,889
-	-	-	4,62975
-	-	-	6,9445
-	-	-	-
2125,922	2,819592	3,180221	-
-	-	-	-
-	-	5,830374	-
49,92013	0,005297	1,590488	-
132,5297	0,008789	-	-
107,7013	0,005714	-	-
72,66076	0,005507	3,498629	-
-	-	-	-
-	-	-	6,9445

Apêndice D – Conversão de dados no formato ANAREDE/ANAFAS para o ATP

O Apêndice D apresenta a conversão de dados de resistência e indutância no formato ANAREDE/ANAFAS, conforme apresentado na Tabela 32, em percentual ou pu para formato ATP em unidade de Ω e mH (opções do ATP de $XOPT = 0$ e $COPT = 0$).

Tabela 32 – Dados de impedância (em pu e percentual)

Usina	R0, R1 (%)	X0, X1 (%)
V01	0,013890	1,3889
V02	0,013890	1,3889
V03	0,04630	0,46296
V04	0,006940	0,694440
V14	0,00694	0,694440

Do lado das fontes, a tensão base assume o valor de $V_{base} = 20kV$, e a potência base adotada é a do sistema, tal que $S_{base} = 100MVA$. Então, tem-se que:

$$Z_{base} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} = \frac{20^2}{100} = 4\Omega \quad (366)$$

Convertendo-se de percentual em pu para Ω e mH, de forma generalizada:

$$R[\Omega] = \frac{R[\%]}{100} \times Z_{base} \quad (367)$$

$$L[mH] = \frac{X[\%]}{100} \times \frac{Z_{base}}{2\pi f} \times 1000 \quad (368)$$

Substituindo e calculando para cada uma das unidades geradoras:

$$R_{V01}[\Omega] = R_{V02}[\Omega] = \frac{0,01389}{100} \times 4 = 0,0005556 \Omega \quad (369)$$

$$L_{V01}[mH] = L_{V02}[mH] = \frac{1,3889}{100} \times \frac{4}{376,99} \times 1000 = 0,14736687 mH \quad (370)$$

$$R_{V03}[\Omega] = \frac{0,04630}{100} \times 4 = 0,001852 \Omega$$

$$L_{V03}[mH] = \frac{4,6296}{100} \times \frac{4}{376,99} \times 1000 = 0,04912158 mH \quad (371)$$

$$R_{V04}[\Omega] = R_{V14}[\Omega] = \frac{0,006940}{100} \times 4 = 0,0002776 \Omega \quad (372)$$

$$L_{V04}[mH] = L_{V14}[mH] = \frac{0,06940}{100} \times \frac{4}{376,99} \times 1000 = 0,07368237 mH \quad (373)$$

Apêndice E – Conversão de parâmetros nominais de linha de transmissão para parâmetros de sequência

O Apêndice E apresenta a conversão de parâmetros nominais corrigidos hiperbolicamente para compor os dados de entrada de sequência positiva do programa de fluxo de potência ANAREDE e de sequência zero do diretamente no AnaHVDC. Os valores nominais de uma dada linha de transmissão podem ser dados de saída de programas de transitórios eletromagnéticos, a exemplo do AnaHVDC e do ATP.

Tabela 33 – Dados de entrada para a conversão para parâmetros de sequência positiva e zero

Variável	Descrição
$dist$	Comprimento da linha em km
V_{base}	Tensão base em kV
S_{base}	Potência aparente base em MVA
$freq$	Frequência em Hz
r_1	Resistência de sequência positiva por unidade de comprimento em Ω/km
l_1	Indutância de sequência positiva por unidade de comprimento em mH/km
c_1	Capacitância de sequência positiva por unidade de comprimento em $\mu F/km$
r_0	Resistência de sequência zero por unidade de comprimento em Ω/km
l_0	Indutância de sequência zero por unidade de comprimento em mH/km
c_0	Capacitância de sequência zero por unidade de comprimento em $\mu F/km$

O primeiro passo consiste em calcular a velocidade angular ω , a impedância base Z_{base} e passar as unidades de indutância para de mH para H (dividir por 10^3) e de capacitância de μC para F (dividir por 10^6). Tem-se assim que:

$$\omega = 2\pi freq \quad (374)$$

$$Z_{base} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} \quad (375)$$

Quanto a conversão o primeiro passo consiste em calcular a impedância longitudinal e admitância transversal de sequência positiva e zero:

$$z_{long1} = r_1 + j\omega l_1 \quad (376)$$

$$z_{long0} = r_0 + j\omega l_0 \quad (377)$$

$$y_{trans1} = j\omega c_1 \quad (378)$$

$$y_{trans0} = j\omega c_0 \quad (379)$$

Na sequência calcula-se a impedância característica e a velocidade de propagação:

$$z_{c1} = \sqrt{\frac{z_{long1}}{y_{trans1}}} \quad (380)$$

$$z_{c0} = \sqrt{\frac{z_{long0}}{y_{trans0}}} \quad (381)$$

$$v_1 = \sqrt{z_{long1} y_{trans1}} \quad (382)$$

$$v_0 = \sqrt{z_{long0} y_{trans0}} \quad (383)$$

O próximo passo corresponde a correção hiperbólica da impedância e admitância:

$$z_1 = z_{c1} \sinh(v_1 \text{ dist}) \quad (384)$$

$$z_0 = z_{c0} \sinh(v_0 \text{ dist}) \quad (385)$$

$$y_1 = \frac{2}{z_{c1}} \tanh\left(v_1 \frac{\text{dist}}{2}\right) \quad (386)$$

$$y_0 = \frac{2}{z_{c0}} \tanh\left(v_0 \frac{\text{dist}}{2}\right) \quad (387)$$

Esses parâmetros são convertidos em pu:

$$z_{1pu} = \frac{z_1}{Z_{base}} \quad (388)$$

$$Z_{0pu} = \frac{Z_1}{Z_{base}} \quad (389)$$

$$y_{1pu} = y_1 Z_{base} \quad (390)$$

$$y_{1pu} = y_0 Z_{base} \quad (391)$$

Os parâmetros para o programa de fluxo de potência ANAREDE são dados em percentual para a impedância e a admitância é fornecida em termos de potência reativa.

$$z_{1per} = z_{1pu} 100 \quad (392)$$

$$Q_1 = \text{imag}(y_{1pu}) S_{base} \quad (393)$$

Os parâmetros de sequência zero informados diretamente no AnaHVDC são dados em pu e individualizados para a resistência, indutância e capacitância.

$$R_0 = \text{real}(z_{0pu}) \quad (394)$$

$$L_0 = \frac{\text{imag}(z_{0pu})}{\omega} \quad (395)$$

$$C_0 = -\frac{1}{\omega \text{imag}(y_{0pu})} \quad (396)$$

Essa lógica foi escrita em *script* no *Octave* para determinação dos parâmetros de sequência positiva e zero.

```

close all;
clear all;
clc

% Dados de entrada
% Parametros gerais
dist = 300; %[km]
Vbase = 500; %[kV]
Sbase = 100; %[MVA]
freq = 60; %[Hz]
% Parametros nominais da LT
r1 = 0.027137 %[ohms/km]
l1 = 0.849997 %[mH/km]
c1 = 0.0135023 %[uF/km]
r0 = 0.340061 %[ohms/km]
l0 = 3.73011 %[mH/km]
c0 = 0.00822118 %[uF/km]
% Entrada de Dados - Ajuste das unidades
R1 = r1;
R0 = r0;
%Indutancias e capacitancias por unidade de comprimento
C1 = c1/1E6;
C0 = c0/1E6;
L1 = l1/1E3;
L0 = l0/1E3;
%
omega = 2*pi*freq;
Zbase = Vbase^2/Sbase;
fprintf('-----\n\n');
%
%Calculos
%Impedancia longitudinal e admitancia transversal
zn11 = (R1 + i*omega*L1);
zn10 = (R0 + i*omega*L0);
yn11 = (i*omega*C1);
yn10 = (i*omega*C0);
%Impedancia caracteristica/velocidade de propagacao
Zc1_ = sqrt(zn11/yn11);
Zc0_ = sqrt(zn10/yn10);
vc1_ = sqrt(zn11*yn11);
vc0_ = sqrt(zn10*yn10);
%Parametros corrigidos hiperbolicamente
z1 = Zc1_*sinh(vc1_*dist);
z0 = Zc0_*sinh(vc0_*dist);
y1 = (2/Zc1_)*tanh(vc1_*dist/2);
y0 = (2/Zc0_)*tanh(vc0_*dist/2);
%Parametros corrigidos hiperbolicamente em pu
z1pu = z1/Zbase;
z0pu = z0/Zbase;
y1pu = y1*Zbase;
y0pu = y0*Zbase;
%
%Dados de Saida
%Sequência Positiva - ANAREDE
fprintf('-----');
fprintf('\nDADOS DE SAIDA - ANAREDE \n');
fprintf('-----');
fprintf('\n\nParametros corrigidos hiperbolicamente em percentual - ANAREDE\n');
fprintf('-----\n');
zlper = z1pu*100
fprintf('\nPotencia Reativa - ANAREDE\n');
fprintf('-----\n');
blpu = imag(y1pu);

```

```

Q1t = blpu*Sbase
%
%Sequência Zero - ANAFAS
fprintf('-----');
fprintf('\nDADOS DE SAIDA - ANAFAS \n');
R0 = real(z0pu)
L0 = imag(z0pu)/omega
C0 = -1/(omega*imag(1/y0pu))

```

Executando o script, tem-se o seguinte resultado:

```

r1 =          0.027137
l1 =          0.849997
c1 =          0.0135023
r0 =          0.340061
l0 =          3.73011
c0 =          0.00822118
-----

-----
DADOS DE SAIDA - ANAREDE
-----

Parametros corrigidos hiperbolicamente em percentual - ANAREDE
-----
zlper =          0.3098832294162975 +          3.752561579020377i

Potencia Reativa - ANAREDE
-----
Q1t = 386.5079622326327
-----

DADOS DE SAIDA - ANAFAS
R0 = 0.03562386789352214
L0 = 0.0004205316633566936
C0 = 0.006375578889771979

```

Apêndice F – Planilha “criaEnvTRT_PLT.xlsm”

O apêndice F apresenta um manual de uso da planilha auxiliar denominada “criaEnvTRT_PLT.xlsm”. O objetivo da planilha foi de facilitar a análise em estudos de tensão de restabelecimento transitório (TRT). O roteiro resumido de análise de TRT é exemplificado na Figura 276.

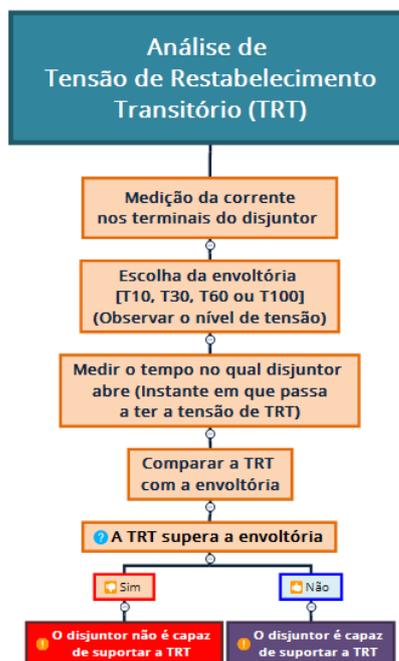


Figura 276 – Análise da tensão de restabelecimento transitória

A corrente medida para a escolha da envoltória consiste na corrente simétrica de defeito medida nos terminais do disjuntor. Assim, tal corrente tem a característica de uma corrente de regime permanente (simétrica e senoidal). Mede-se o pico desse valor e calcula o valor percentual em relação à capacidade do disjuntor. Esse percentual, calculado em (362), permite a escolha da curva. Assim sendo, a lógica de escolha da envoltória é a seguinte: para valores inferiores a curva 10% usa-se a curva T10, para valores iguais ou maiores que 10% e inferiores a curva 30% usa-se a T30, para valores iguais ou maiores que 30% e inferiores à 60% usa-se a curva T60, e por fim, para valores iguais ou maiores que 60% até 100% usa-se a curva T100.

$$I(\%) = \frac{\left(\frac{I_{PICO}}{\sqrt{2}}\right)}{I_{CAP\ DISJUNTOR}} \quad (397)$$

Uma vez identificado o percentual de corrente e sabendo a tensão base do sistema, utiliza-se alguma norma de referência para buscar os valores dos parâmetros que constroem as envoltórias. No que concerne às envoltórias, essas ainda se subdividem em envoltórias a dois parâmetros (T10 e T30) e a quatro parâmetros (T60 e T100).

De forma qualitativa pode-se afirmar que quanto maior a corrente medida mais conservativa acaba sendo a envoltória. Envoltórias a dois parâmetros representam uma dinâmica mais rápida (a taxa de crescimento da TRT, denominada TCTRT, é bem íngreme) e acomodam valores de crista mais elevados.

Como exemplo considere a Figura 277. Do lado esquerdo é notório que uma corrente de curto de 30% é superior à de 10%. No lado direito estão as respectivas T10 e T30. Como são ambas as curvas a dois parâmetros, a distinção está na TCTRT e no valor de cista. Observa-se que a TCTRT da T30 é mais lenta e que o valor de crista é menor. A mesma análise pode ser feita caso fossem consideradas a T60 e T100, concluindo-se então que para maiores correntes, as sobretensões (TRT) que não superem o disjuntor devem ser qualitativamente mais baixas e mais lentas.

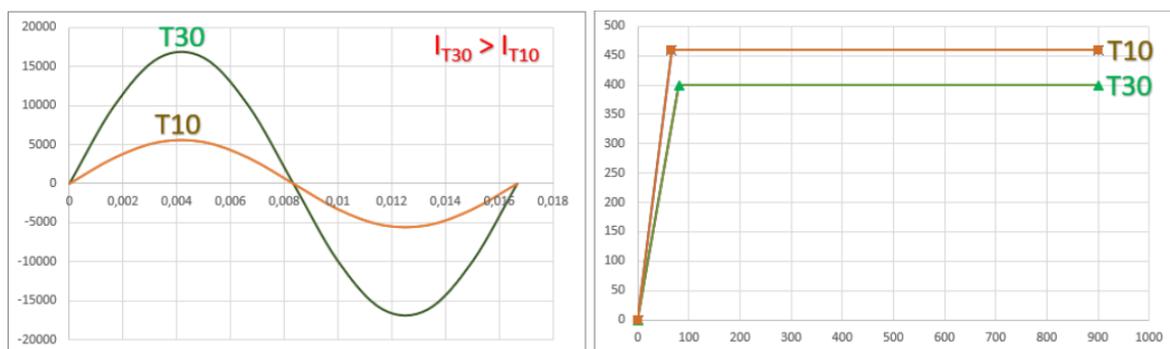


Figura 277 – Envoltórias T10 e T30

Uma vez tendo simulado o caso, deve-se medir então em que momento passa a ter tensão nos polos do disjuntor. Essa é a tensão de interesse doravante denominada TRT. O início da reta de cada uma das envoltórias deve ser coincidente com o instante de surgimento de tensão nos polos do disjuntor. Esse tempo será necessário para informar à planilha. Sendo assim, a tensão é confrontada com a envoltória, sendo que a envoltória surge ao mesmo tempo passa a ter tensão nos terminais do disjuntor.

Desse modo, já é possível apresentar a interface da planilha auxiliar. Trata-se de um desenvolvimento feito na versão do Microsoft Office 2019 com a ferramenta *Visual Basic for Applications* (VBA). Toda a entrada de dados fornecida pelo usuário está localizada em formulário que abre simultaneamente à abertura da planilha, ou ainda ao se acessar a chamada por meio do botão “Carregar Formulário”.

Na aba principal estão recomendações gerais de uso e algumas observações que se fazem necessárias. Pode-se observar a interface na Figura 278.

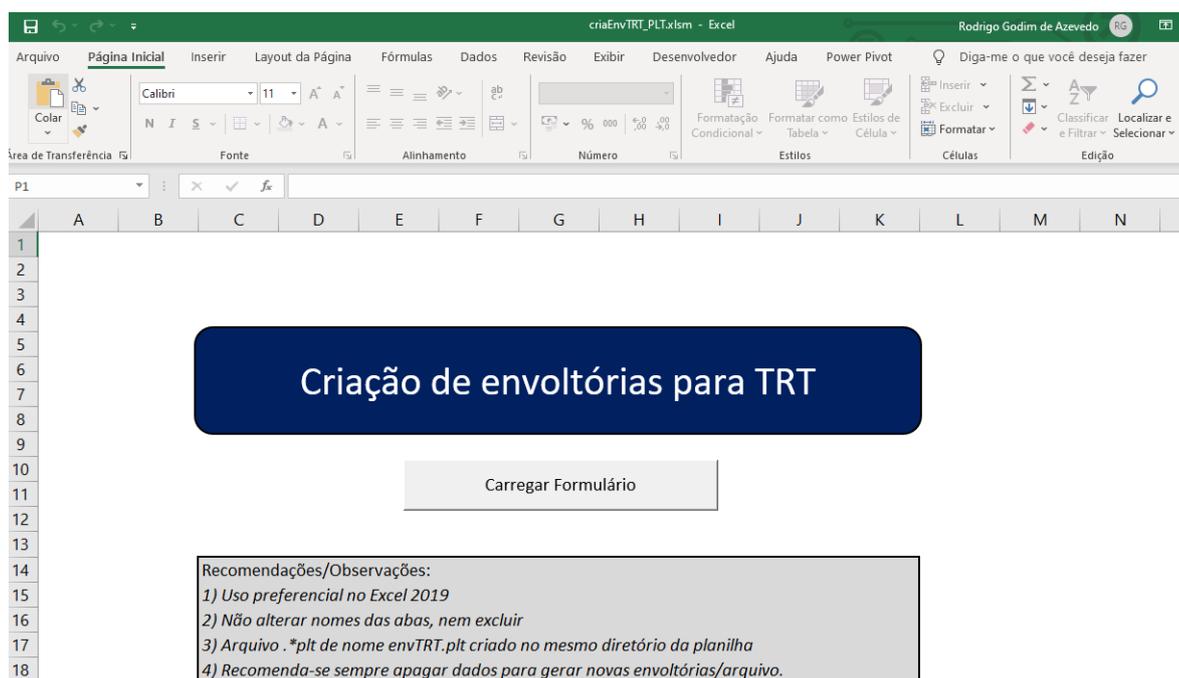


Figura 278 – Interface da planilha “criaEnvTRT_PLT.xlsm”

A Tabela 34 que está a base de dados para as envoltórias. O intervalo considerado para os níveis de tensão foi de 100kV até 800kV e a norma utilizada foi a IEC-62271-100.

Tabela 34 – Dados da envoltória para níveis de tensão de 100kV até 800kV

Tensão	Envoltória	t_1 (s)	u_1 (V)	t_2 (s)	u_c (V)
100 kV	T10	-	-	0,000027	187000
	T30	-	-	0,000033	163000
	T60	0,000027	80000	0,000162	159000
	T100	0,00004	80000	0,00016	149000
123 kV	T10	-	-	0,000033	230000
	T30	-	-	0,00004	201000
	T60	0,000033	98000	0,000198	196000

Tensão	Envoltória	t_1 (s)	u_1 (V)	t_2 (s)	u_c (V)
	T100	0,000049	98000	0,000196	183000
145 kV	T10	-	-	0,000039	272000
	T30	-	-	0,000047	237000
	T60	0,000038	115000	0,000228	231000
	T100	0,000058	115000	0,000232	215000
170 kV	T10	-	-	0,000046	319000
	T30	-	-	0,000056	278000
	T60	0,000045	135000	0,00027	271000
	T100	0,000068	135000	0,000272	253000
245 kV	T10	-	-	0,000066	459000
	T30	-	-	0,00008	400000
	T60	0,000065	195000	0,00039	390000
	T100	0,000098	195000	0,00039	364000
300 kV	T10	-	-	0,00008	562000
	T30	-	-	0,000098	490000
	T60	0,00008	239000	0,00048	478000
	T100	0,000119	239000	0,000476	446000
362 kV	T10	-	-	0,000097	678000
	T30	-	-	0,000118	592000
	T60	0,000096	288000	0,000576	576000
	T100	0,000144	288000	0,000576	538000
420 kV	T10	-	-	0,000112	787000
	T30	-	-	0,000137	686000
	T60	0,000111	334000	0,000666	669000
	T100	0,000167	334000	0,000668	624000
550 kV	T10	-	-	0,000147	1031000
	T30	-	-	0,00018	899000
	T60	0,000146	438000	0,000876	876000
	T100	0,000219	438000	0,000876	817000
800 kV	T10	-	-	0,000214	1499000
	T30	-	-	0,000262	1308000
	T60	0,000212	637000	0,001272	1274000
	T100	0,000318	637000	0,001272	1189000

A tela com o formulário é mostrada na Figura 279.

Cria envoltórias TRT (*.plt) [Padrão IEC-62271-100] X

Versão 2.0 - Agosto 2024

Dados da envoltória

Nível de tensão 245 kV

Tipo de operação Monopolar

Tipo de Envoltória (ref. na fase A)

Fase A T10 Incluir parte negativa?

Fase B Incluir parte negativa?

Fase C Incluir parte negativa?

Dados de simulação

Tempos iniciais (s)

Fase A 0,00001 dt 0,000001

Fase B Tsim 0,0005

Fase C

Adicionar curva Limpar dados Gerar PLT

Figura 279 – Formulário para criação de envoltórias

Inicialmente escolhe-se o nível de tensão (Figura 280). As envoltórias possuem parâmetros distintos por cada nível de tensão considerado. Na figura destaca-se que por padrão o nível de tensão em 550kV está selecionado.

Cria envoltórias TRT (*.plt) [Padrão IEC-62271-100] X

Versão 2.0 - Agosto 2024

Dados da envoltória

Nível de tensão 550 kV

Tipo de operação Tripolar

Tipo de Envoltória (ref. na fase A)

Fase A T10 Incluir parte negativa?

Fase B T30 Incluir parte negativa?

Fase C T60 Incluir parte negativa?

Dados de simulação

Tempos iniciais (s)

Fase A 0,00001 dt 0,000001

Fase B 0,00001 Tsim 0,0005

Fase C 0,00001

Adicionar curva Limpar dados Gerar PLT

Figura 280 – Escolha do nível de tensão

Na sequência, destacada na Figura 281, é selecionado o tipo de operação. Para a operação monopolar é habilitada o tipo de envoltória apenas para a fase a, assim como o tempo inicial para a fase a.

Cria envoltórias TRT (*.plt) [Padrão IEC-62271-100] X

Versão 2.0 - Agosto 2024

Dados da envoltória

Nível de tensão 550 kV

Tipo de operação Tripolar

Tipo de Envoltória (ref. na fase A)

Fase A T10 Incluir parte negativa?

Fase B T30 Incluir parte negativa?

Fase C T60 Incluir parte negativa?

Dados de simulação

Tempos iniciais (s)

Fase A 0,00001 dt 0,000001

Fase B 0,00001 Tsim 0,0005

Fase C 0,00001

Adicionar curva Limpar dados Gerar PLT

Figura 281 – Escolha do tipo de defeito

A Figura 282 destaca a escolha dos tipos de envoltória (T10, T30, T60 e T100) por fase. Por padrão vem selecionada a inclusão da parte negativa. Esse padrão é definido dessa forma pois a curva deve ser comparada tanto no seu semi-ciclo positivo como negativo.

Cria envoltórias TRT (*.plt) [Padrão IEC-62271-100] X

Versão 2.0 - Agosto 2024

Dados da envoltória

Nível de tensão 550 kV

Tipo de operação Tripolar

Tipo de Envoltória (ref. na fase A)

Fase A T10 Incluir parte negativa?

Fase B T30 Incluir parte negativa?

Fase C T60 Incluir parte negativa?

Dados de simulação

Tempos iniciais (s)

Fase A 0,00001 dt 0,000001

Fase B 0,00001 Tsim 0,0005

Fase C 0,00001

Adicionar curva Limpar dados Gerar PLT

Figura 282 – Escolha do tipo de envoltória

Na Figura 283 está destacada a inclusão dos tempos iniciais, passo de integração e tempo de simulação. Os tempos iniciais são aqueles nos quais a tensão em cima do disjuntor passa a ser diferente de zero. Ou seja, preliminarmente deve ser executada a simulação para que com posse desses valores seja informado à planilha.

Cria envoltórias TRT (*.plt) [Padrão IEC-62271-100] X

Versão 2.0 - Agosto 2024

Dados da envoltória

Nível de tensão 550 kV

Tipo de operação Tripolar

Tipo de Envoltória (ref. na fase A)

Fase A T10 Incluir parte negativa?

Fase B T30 Incluir parte negativa?

Fase C T60 Incluir parte negativa?

Dados de simulação

Tempos iniciais (s)

Fase A 0,00001 dt 0,000001

Fase B 0,00001 Tsim 0,0005

Fase C 0,00001

Adicionar curva Limpar dados Gerar PLT

Figura 283 – Dados de simulação

Na Figura 284 estão destacadas as funcionalidades: “Adicionar Curva” que insere a informação do formulário em aba auxiliar, consistindo na preparação preliminar à geração do PLT; “Limpar Dados” que limpa os campos do formulário e da aba auxiliar, permitindo nova entrada de dados e; “Gerar PLT” que gera arquivo no formato *.plt com as informações existentes em aba auxiliar.

OBS: Essa aba auxiliar fica inacessível ao usuário, sendo utilizada internamente pela planilha para formatação dos dados e criação posterior do arquivo no formato *.plt.

Cria envoltórias TRT (*.plt) [Padrão IEC-62271-100] X

Versão 2.0 - Agosto 2024

Dados da envoltória

Nível de tensão: 550 kV

Tipo de operação: Tripolar

Tipo de Envoltória (ref. na fase A)

Fase A: T10 Incluir parte negativa?

Fase B: T30 Incluir parte negativa?

Fase C: T60 Incluir parte negativa?

Dados de simulação

Tempos iniciais (s)

Fase A: 0,00001 dt: 0,000001

Fase B: 0,00001 Tsim: 0,0005

Fase C: 0,00001

Adicionar curva Limpar dados Gerar PLT

Figura 284 – Funcionalidades da planilha

A Figura 285 e a Figura 286 mostram o arquivo gerado pela planilha aberto no programa PlotCepel.

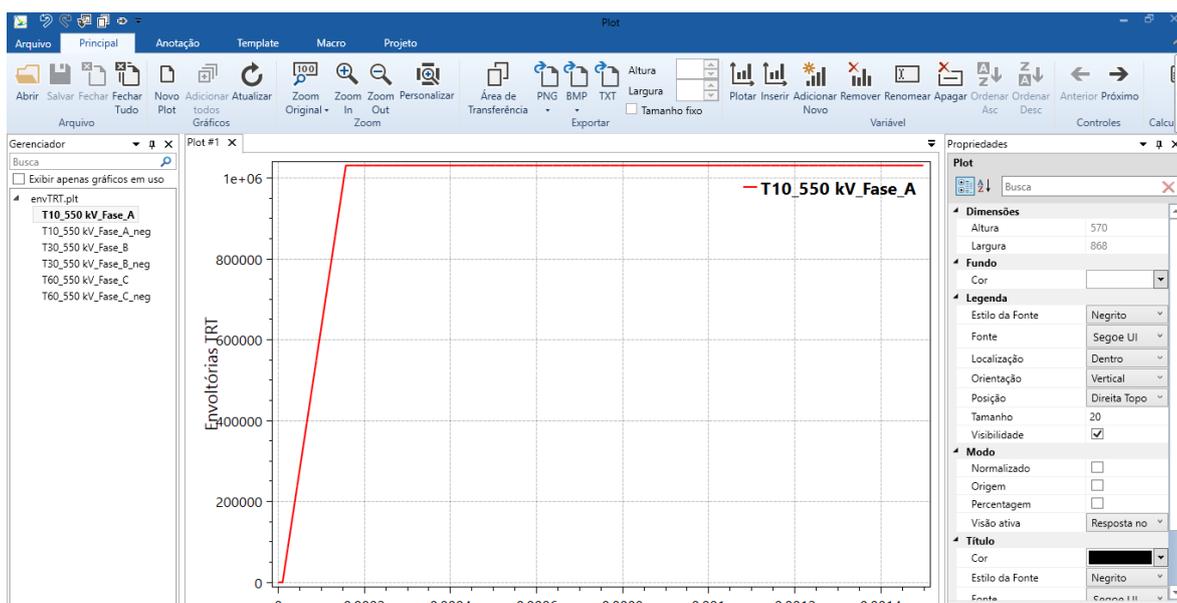


Figura 285 – PLT gerado a partir da planilha

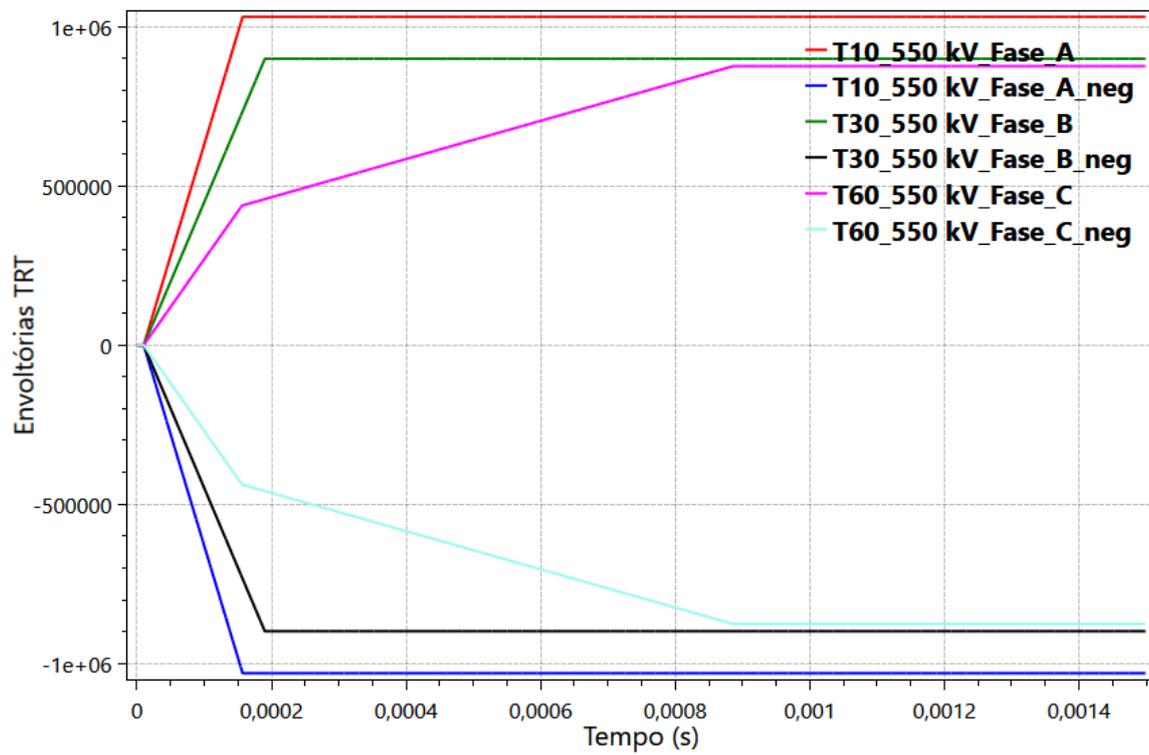


Figura 286 – Curvas geradas para nível de tensão de 500kV

Apêndice G – Entrada de dados: “BenchCA” estatístico

Arquivo de dados do caso base do sistema “BenchCA” com energização de linha de transmissão estatístico no AnaHVDC.

```

TITU
(Energizacao de LT estatística no terminal da barra 09 (sem para-raios))
Bench CA
DHIS
('Filename' )(Case number)
'..\BENCHCA.SAV'      2
DLOA
(label) (nb1) (type)
ALL          0
FIM
DLTA
(label) (from) (toid) (ncir) (length) (nPi) (minTal) (fParNom)
ALL          0      0      1
FIM
DANA
('Anafas file' )
'..\BENCHCA.ANA'
DLT
(fromid) (toid) (ncir)  ( r ) ( l ) ( c ) [ r0 ] [ l0 ]
[ c0 ] (length) (Pi) (minTal) (fParNom)
  9      15      1      2.7312e-03  1.060776e-04  0.9765e-02  2.3766e-02  5.06724e-04
4.9575e-03  1      0
FIM
DBRK
(id) (type) (nb1) (nb2) (nb3) (gOn) (gOff) (Imargin) (State) (MaxTd.)
1     LINE   9     15     1     2500e+6  0.0     0.0     OPEN  0.006
FIM
DSTAT
(nsim) (sigmax) (degmin) (degmax) (statfr) (seed) (nthreads)
200     4      0      360     60     123     8
FIM
DMSTAT
(label) (device) (variable) (nb1) (nb2) (nb3)
'Voltage#BUS9'  BUS     VOLT     9
'Voltage#BUS15'  BUS     VOLT     15
FIM
DSIM
(step) (duration) (period) (tolerr) (maxiter)
10e-6     0.10     1
FIM
DEVT
(type) ( time ) (nb1) (nb2) (nb3) (value)
CLOSE_STAT      0.050  1
FIM
DPLT
(' label ') (mode) (device) (variable) (id1) (id2) (id3) (Seq) (
factor ) ( T )
( Barra do terminal emissor da LT
'AnaHVDC: Tensão na Barra 9 A'      INST  BUS     VOLT     9      A
408248.290463863
'AnaHVDC: Tensão na Barra 9 B'      INST  BUS     VOLT     9      B
408248.290463863
'AnaHVDC: Tensão na Barra 9 C'      INST  BUS     VOLT     9      C
408248.290463863
( Barra do terminal receptor da LT
'AnaHVDC: Tensão na Barra 15 A'     INST  BUS     VOLT     15     A
408248.290463863
'AnaHVDC: Tensão na Barra 15 B'     INST  BUS     VOLT     15     B
408248.290463863
'AnaHVDC: Tensão na Barra 15 C'     INST  BUS     VOLT     15     C
408248.290463863
FIM

```

Anexo A – Cálculo da matriz de impedância

Para o cálculo da matriz de impedância são definidas as variáveis na Tabela 35. O cálculo pode ser feito considerando a primeira aproximação de Carson ou por penetração complexa. Em ambas as situações são apresentados os cálculos considerando os elementos na diagonal e fora da diagonal.

Tabela 35 – Tabela de variáveis para o cálculo da matriz de impedância

Variável	Descrição
n_f	Número de fases
n_s	Número de condutores
n_{pr}	Número de para-raios
$flag_{solo}$	Flag para identificar se o cálculo será feito usando a primeira aproximação de Carson (flag com valor 0) ou penetração complexa (flag com valor 1)
ρ	Resistividade do solo
r_{ac}	Resistência do cabo condutor
rm_g	Raio médio geométrico do cabo condutor
$r_{ac_{pr}}$	Resistência do cabo para-raios
rm_{pr_g}	Raio médio geométrico do cabo para-raios
$freq$	Frequência
ω	Velocidade angular
μ	Permeabilidade
x_s, y_s	Coordenadas x e y dos cabos condutores
x_{pr}, y_{pr}	Coordenadas x e y dos cabos para-raios

- Para os cabos condutores, tem-se:

Elementos na diagonal considerando primeira aproxima de Carson ($flag_{solo} = 0$)

$$Z_{ii} = r_{ac} + 9,88 \cdot 10^{-7} freq + j \frac{\omega\mu}{2\pi} \ln \left(\frac{658,368 \sqrt{\frac{\rho}{freq}}}{rmg} \right) \quad (398)$$

Elementos na diagonal considerando penetração complexa ($flag_{solo} = 1$)

$$Z_{ii} = r_{ac} + j \frac{\omega\mu}{2\pi} \ln \left(\frac{2 \left(y_{si} + \sqrt{\frac{\rho}{j\omega\mu}} \right) - j2 \sqrt{\frac{\rho}{j\omega\mu}}}{rmg} \right) \quad (399)$$

Elementos fora da diagonal considerando primeira aproxima de Carson ($flag_{solo} = 0$)

$$Z_{ij} = r_{ac} + 9,88 \cdot 10^{-7} freq + j \frac{\omega\mu}{2\pi} \ln \left(\frac{658,368 \sqrt{\frac{\rho}{freq}}}{\sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}} \right) \quad (400)$$

Elementos fora da diagonal considerando penetração complexa ($flag_{solo} = 1$)

$$Z_{ij} = Z_{ji} = j \frac{\omega\mu}{2\pi} \ln \left(\frac{\sqrt{(x_j - x_i)^2 + \left(y_j + y_i + 2 \sqrt{\frac{\rho}{j\omega\mu}} \right)^2}}{\sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}} \right) \quad (401)$$

- Para elementos entre os cabos condutores e cabo para-raios, tem-se:

Elementos na diagonal considerando primeira aproxima de Carson primeira aproxima de Carson ($flag_{solo} = 0$)

$$Z_{i,n_f n_s + j} = 9,88 \cdot 10^{-7} freq + j \frac{\omega\mu}{2\pi} \ln \left(\frac{658,368 \sqrt{\frac{\rho}{freq}}}{\sqrt{(x_{pr_j} - x_i)^2 + (y_{pr_j} - y_i)^2}} \right) \quad (402)$$

Para elementos entre os cabos condutores e cabo para-raios considerando penetração complexa ($flag_{solo} = 1$)

$$Z_{i,n_f \cdot n_s + j} = j \frac{\omega \mu}{2\pi} \ln \left(\frac{\sqrt{(x_{pr_j} - x_i)^2 + \left(y_{pr_j} + y_i + 2 \sqrt{\frac{\rho}{j\omega\mu}}\right)^2}}{\sqrt{(x_{pr_j} - x_i)^2 + (y_{pr_j} - y_i)^2}} \right) \quad (403)$$

Onde:

$$Z_{i,n_f \cdot n_s + j} = Z_{n_f \cdot n_s + j, i} \quad (404)$$

- Para os cabo para-raios, tem-se:

Elementos na diagonal considerando primeira aproxima de Carson ($flag_{solo} = 0$)

$$Z_{n_f \cdot n_s + j, n_f \cdot n_s + j} = r_{ac_{pr}} + 9,88 \cdot 10^{-7} freq + j \frac{\omega \mu}{2\pi} \ln \left(\frac{658,368 \sqrt{\frac{\rho}{freq}}}{rmg_{pr}} \right) \quad (405)$$

Elementos na diagonal considerando penetração complexa ($flag_{solo} = 1$)

$$Z_{n_f \cdot n_s + j, n_f \cdot n_s + j} = r_{ac_{pr}} + j \frac{\omega \mu}{2\pi} \ln \left(\frac{2 \left(y_{pr_j} + \sqrt{\frac{\rho}{j\omega\mu}} \right) - j 2 \sqrt{\frac{\rho}{j\omega\mu}}}{rmg_{pr}} \right) \quad (406)$$

Anexo B – Cálculo da matriz de potencial

Para o cálculo da matriz de potencial são definidas as variáveis na Tabela 36.

Tabela 36 – Tabela de variáveis para o cálculo da matriz de potencial

Variável	Descrição
n_f	Número de fases
n_s	Número de condutores
n_{pr}	Número de para-raios
ϵ_0	Permissividade do vácuo
rmg	Raio médio geométrico do cabo condutor
x_s, y_s	Coordenadas x e y dos cabos condutores
x_{pr}, y_{pr}	Coordenadas x e y dos cabos para-raios
r_{out}	Vetor de raio externos

- Para os cabos condutores, tem-se:

Elementos na diagonal:

$$P_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \left(\frac{2y_i}{rmg} \right) \quad (407)$$

Elementos fora da diagonal:

$$P_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \left(\frac{\sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j + y_i)^2}}{\sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}} \right) \quad (408)$$

- Para elementos entre os cabos condutores e cabo para-raios, tem-se:

$$P_{i,n_f \cdot n_s + j} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \left(\frac{\sqrt{(x_{prj} - x_i)^2 + (y_{prj} + y_i)^2}}{\sqrt{(x_{prj} - x_i)^2 + (y_{prj} - y_i)^2}} \right) \quad (409)$$

Onde:

$$P_{i,n_f \cdot n_s + j} = P_{n_f \cdot n_s + j, i} \quad (410)$$

- Para os cabos para-raios, tem-se:

Elementos na diagonal:

$$P_{n_f \cdot n_s + j, n_f \cdot n_s + j} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \left(\frac{2y_{prj}}{r_{out_{n_f \cdot n_s + j}}} \right) \quad (411)$$

Elementos fora da diagonal:

$$P_{n_f \cdot n_s + j, n_f \cdot n_s + i} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \left(\frac{\sqrt{(x_{prj} - x_{pri})^2 + (y_{prj} + y_{pri})^2}}{\sqrt{(x_{prj} - x_{pri})^2 + (y_{prj} - y_{pri})^2}} \right) \quad (412)$$

Onde:

$$P_{i,n_f \cdot n_s + j} = P_{n_f \cdot n_s + j, i} \quad (413)$$

Anexo C – Redução matricial

Inicialmente, é apresentado o sistema de equações diferenciais matriciais que representam as equações de propagação de linhas de transmissão, que correspondem as equações não reduzidas:

$$-\frac{d}{dz} \mathbf{U} = \mathbf{Z} \mathbf{I} \quad (414)$$

$$-\frac{d}{dz} \mathbf{I} = \mathbf{Y} \mathbf{U} \quad (415)$$

Sendo \mathbf{U} e \mathbf{I} os vetores de tensões e correntes dos condutores da linha, e \mathbf{Z} e \mathbf{Y} as matrizes de impedância e admitância da linha. A dimensão das matrizes é da ordem $n_f \cdot n_c + n_{pr}$, ou seja, dos condutores da linha ($n_f n_c$) incluindo os cabos para-raios (n_{pr}).

No que se refere aos cabos para-raios, esses são utilizados com objetivo de proteger os condutores de fase contra descargas atmosféricas, podendo ser aterrados ou isolados. Para a condição de ser considerados aterrados as tensões são consideradas nulas e para a condição de ser considerados isolados as correntes são consideradas nulas. Assim, pode-se reduzir as matrizes considerando o efeito dos cabos para-raios. Para a redução, utiliza-se a equação descrita em (416). O índice f corresponde às variáveis de fase, sendo \mathbf{U}_f e \mathbf{I}_f a tensão e a corrente de fase, respectivamente. O índice pr , por sua vez, corresponde às variáveis de fase, sendo \mathbf{U}_{pr} e \mathbf{I}_{pr} a tensão e a corrente de fase, respectivamente. Por fim, a matriz de impedância \mathbf{Z} é subdividida nas submatrizes \mathbf{Z}_1 , \mathbf{Z}_2 , \mathbf{Z}_3 e \mathbf{Z}_4 .

$$-\frac{d}{dz} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_f \\ \mathbf{U}_{pr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_1 & \mathbf{Z}_2 \\ \mathbf{Z}_3 & \mathbf{Z}_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_f \\ \mathbf{I}_{pr} \end{bmatrix} \quad (416)$$

Considerando os cabos para-raios aterrados, tem-se que:

$$U_{pr} = 0 \Rightarrow \frac{d}{dz} U_{pr} = 0 \quad (417)$$

O sistema matricial pode então ser reescrito

$$-\frac{d}{dz} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_f \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_1 & \mathbf{Z}_2 \\ \mathbf{Z}_3 & \mathbf{Z}_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_f \\ \mathbf{I}_{pr} \end{bmatrix} \quad (418)$$

Ou ainda:

$$-\frac{d}{dz} \mathbf{U}_f = \mathbf{Z}_1 \mathbf{I}_f + \mathbf{Z}_2 \mathbf{I}_{pr} \quad (419)$$

$$0 = \mathbf{Z}_3 \mathbf{I}_f + \mathbf{Z}_4 \mathbf{I}_{pr} \quad (420)$$

Usando a equação (420) para isolar o termo \mathbf{I}_{pr} :

$$\mathbf{I}_{pr} = -\mathbf{Z}_4^{-1} \mathbf{Z}_3 \mathbf{I}_f \quad (421)$$

E substituir na equação (419), resultando em:

$$-\frac{d}{dz} \mathbf{U}_f = \mathbf{Z}_1 \mathbf{I}_f + \mathbf{Z}_2 (-\mathbf{Z}_4^{-1}) \mathbf{Z}_3 \mathbf{I}_f \quad (422)$$

$$-\frac{d}{dz} \mathbf{U}_f = (\mathbf{Z}_1 - \mathbf{Z}_2 \mathbf{Z}_4^{-1} \mathbf{Z}_3) \mathbf{I}_f \quad (423)$$

Assim, tem-se que:

$$-\frac{d}{dz} \mathbf{U}_f = \mathbf{Z}_{\text{red}} \mathbf{I}_f \quad (424)$$

Logo, a matriz reduzida considerando os para-raios aterrados assume a seguinte expressão:

$$\mathbf{Z}_{\text{red}} = \mathbf{Z}_1 - \mathbf{Z}_2 \mathbf{Z}_4^{-1} \mathbf{Z}_3 \quad (425)$$

Se os cabos para-raios fosse considerados isolados em vez de aterrados, tem-se que:

$$\mathbf{I}_{pr} = 0 \quad (426)$$

O sistema matricial pode então ser reescrito

$$-\frac{d}{dz} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_f \\ \mathbf{U}_{pr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_1 & \mathbf{Z}_2 \\ \mathbf{Z}_3 & \mathbf{Z}_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_f \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (427)$$

Ou ainda:

$$-\frac{d}{dz} \mathbf{U}_f = \mathbf{Z}_1 \mathbf{I}_f \quad (428)$$

Assim, a matriz \mathbf{Z}_{red} é coincidente com a submatriz \mathbf{Z}_1 :

$$\mathbf{Z}_{\text{red}} = \mathbf{Z}_1 \quad (429)$$

Para a redução considerando a matriz de admitância, utiliza-se a equação descrita em (430). O índice f corresponde às variáveis de fase, sendo \mathbf{U}_f e \mathbf{I}_f a tensão e a corrente de fase, respectivamente. O índice pr , por sua vez, corresponde às variáveis de fase, sendo

U_{pr} e I_{pr} a tensão e a corrente de fase, respectivamente. Por fim, a matriz de impedância \mathbf{Y} é subdividida nas submatrizes \mathbf{Y}_1 , \mathbf{Y}_2 , \mathbf{Y}_3 e \mathbf{Y}_4 .

$$-\frac{d}{dz} \begin{bmatrix} I_f \\ I_{pr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_1 & \mathbf{Y}_2 \\ \mathbf{Y}_3 & \mathbf{Y}_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_f \\ U_{pr} \end{bmatrix} \quad (430)$$

Considerando os cabos para-raios aterrados, tem-se que:

$$U_{pr} = 0 \quad (431)$$

O sistema matricial pode então ser reescrito

$$-\frac{d}{dz} \begin{bmatrix} I_f \\ I_{pr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_1 & \mathbf{Y}_2 \\ \mathbf{Y}_3 & \mathbf{Y}_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_f \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (432)$$

Ou ainda:

$$-\frac{d}{dz} I_f = \mathbf{Y}_1 I_f \quad (433)$$

Assim, a matriz \mathbf{Y}_{red} é coincidente com a submatriz \mathbf{Y}_1 :

$$\mathbf{Y}_{red} = \mathbf{Y}_1 \quad (434)$$

Considerando os cabos para-raios isolados, tem-se que:

$$I_{pr} = 0 \Rightarrow \frac{d}{dz} I_{pr} = 0 \quad (435)$$

O sistema matricial pode então ser reescrito

$$-\frac{d}{dz} \begin{bmatrix} I_f \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_1 & \mathbf{Y}_2 \\ \mathbf{Y}_3 & \mathbf{Y}_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_f \\ U_{pr} \end{bmatrix} \quad (436)$$

Ou ainda:

$$-\frac{d}{dz} I_f = \mathbf{Y}_1 I_f + \mathbf{Y}_2 I_{pr} \quad (437)$$

$$0 = \mathbf{Y}_3 I_f + \mathbf{Y}_4 I_{pr} \quad (438)$$

Usando a equação (420) para isolar o termo I_{pr} :

$$I_{pr} = -\mathbf{Y}_4^{-1} \mathbf{Y}_3 I_f \quad (439)$$

E substituir na equação (419), resultando em:

$$-\frac{d}{dz} I_f = \mathbf{Y}_1 I_f + \mathbf{Y}_2 (-\mathbf{Y}_4^{-1}) \mathbf{Y}_3 U_f \quad (440)$$

$$-\frac{d}{dz} \mathbf{I}_f = (\mathbf{Y}_1 - \mathbf{Y}_2 \mathbf{Y}_4^{-1} \mathbf{Y}_3) \mathbf{U}_f \quad (441)$$

Assim, tem-se que:

$$-\frac{d}{dz} \mathbf{I}_f = \mathbf{Y}_{red} \mathbf{U}_f \quad (442)$$

Logo, a matriz reduzida considerando os para-raios aterrados assume a seguinte expressão:

$$\mathbf{Y}_{red} = \mathbf{Y}_1 - \mathbf{Y}_2 \mathbf{Y}_4^{-1} \mathbf{Y}_3 \quad (443)$$

Ao reduzir-se as matrizes quanto aos cabos para-raios, obtém-se então:

$$-\frac{d}{dz} \mathbf{U}_f = \mathbf{Z}_{red} \mathbf{I}_f \quad (444)$$

$$-\frac{d}{dz} \mathbf{I}_f = \mathbf{Y}_{red} \mathbf{U}_f \quad (445)$$

As possibilidades de redução matricial dos para-raios estão resumidamente descritas na Figura 287.

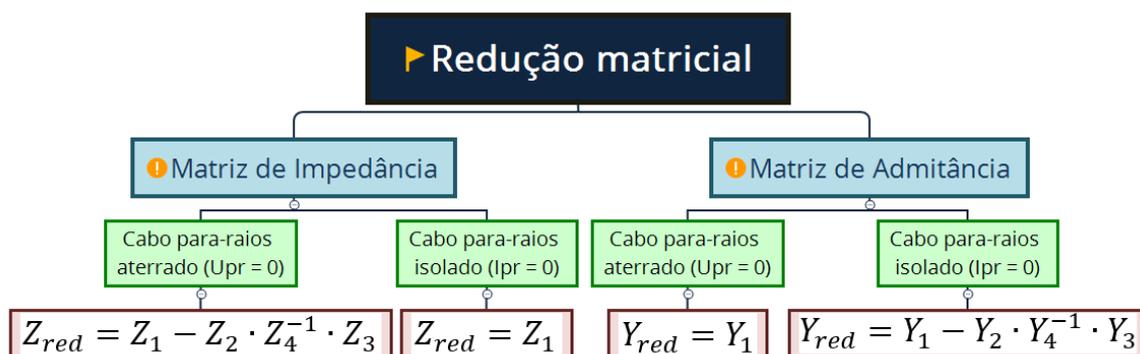


Figura 287 – Resultados da redução matricial de para-raios