

ESTUDOS PARA A LICITAÇÃO DA EXPANSÃO DA TRANSMISSÃO

*DETALHAMENTO DA ALTERNATIVA DE REFERÊNCIA:
RELATÓRIO R2*

*Expansão da Interligação entre as
Regiões Norte/Nordeste e Sudeste/Centro-Oeste
Elo de Corrente Contínua ± 800 kV Xingu –Terminal Rio*



Empresa de Pesquisa Energética

**Ministério de
Minas e Energia**





GOVERNO FEDERAL
MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA

Ministério de Minas e Energia

Ministro

Edison Lobão

Secretário-Executivo do MME

Márcio Pereira Zimmerman

Secretário de Planejamento e Desenvolvimento Energético

Altino Ventura Filho

Secretário de Energia Elétrica

Ildo Wilson Grüdtner

Secretário de Petróleo, Gás Natural e Combustíveis Renováveis

Marco Antônio Martins Almeida

Secretário de Geologia, Mineração e Transformação Mineral

Carlos Nogueira da Costa Junior



Empresa de Pesquisa Energética

Empresa pública, vinculada ao Ministério de Minas e Energia, instituída nos termos da Lei nº 10.847, de 15 de março de 2004, a EPE tem por finalidade prestar serviços na área de estudos e pesquisas destinadas a subsidiar o planejamento do setor energético, tais como energia elétrica, petróleo e gás natural e seus derivados, carvão mineral, fontes energéticas renováveis e eficiência energética, dentre outras.

Presidente

Maurício Tiomno Tolmasquim

Diretor de Estudos Econômico-Energéticos e Ambientais

Amílcar Guerreiro

Diretor de Estudos de Energia Elétrica

José Carlos de Miranda Farias

Diretor de Estudos de Petróleo, Gás e Biocombustíveis

Diretor de Gestão Corporativa

Álvaro Henrique Matias Pereira

URL: <http://www.epe.gov.br>

Sede

SCN, Quadra 1, Bloco C, nº 85, Sl. 1712/1714
70711-902 - Brasília – DF

Escritório Central

Av. Rio Branco, 01 – 11º Andar
20090-003 - Rio de Janeiro – RJ

ESTUDOS PARA A LICITAÇÃO DA EXPANSÃO DA TRANSMISSÃO

DETALHAMENTO DA ALTERNATIVA DE REFERÊNCIA: RELATÓRIO R2

*Expansão da Interligação entre as
Regiões Norte/Nordeste e
Sudeste/Centro-Oeste
Elo de Corrente Contínua ± 800 kV Xingu –
Terminal Rio*

Coordenação Geral

Maurício Tiomno Tolmasquim
José Carlos de Miranda Farias

Coordenação Executiva

José Marcos Bressane

Coordenação Técnica

Dourival de Souza Carvalho Jr.

Equipe Técnica:

Alexandre de Melo Silva
Aretha de Souza Vidal Campos
Fábio de Almeida Rocha
João Henrique Magalhães Almeida
Jose Antonio D'Affonseca Santiago Cardoso
Tiago Campos Rizzotto
Thiago Jose Masseran Antunes Parreiras

Nº EPE-DEE-RE-136/2014-rev0

Data: 30 de outubro de 2014

 Empresa de Pesquisa Energética		Contrato/Aditivo	Data de assinatura do contrato/Aditivo
Área de Estudo DETALHAMENTO DA ALTERNATIVA DE REFERÊNCIA – RELATÓRIO R2			
Estudo <i>Expansão da Interligação entre as Regiões Norte/Nordeste e Sudeste/Centro-Oeste - Elo de Corrente Contínua $\pm$ 800 kV Xingu – Terminal Rio</i>			
Macro-atividade ESTUDOS PARA LICITAÇÃO DA EXPANSÃO DA TRANSMISSÃO			
Ref. Interna (se aplicável)			
Revisões	Data de emissão	Descrição sucinta	
r0	30/10/2014	Emissão original	

GRUPO TÉCNICO EXECUTIVO

PARTICIPANTE		EMPRESA
Adinã Martins Pena	Daniel Henrique V. Lisboa	CEMIG
Rafael Montes Fontoura		
Fabício Lucas Lirio	Franklin Clement Veliz	CEPEL
Fernando Dart	João Clávio Salari Filho	
Luis A. Domingues	Carlos Ruy N. Barbosa	
Leonardo Pinto de Almeida	Luciano de Oliveira Daniel	
Rogério Magalhães de Azevedo	Wo Wei Ping	
Mariana Pires Monteiro	Romulo Braga Broetto	CTEEP
Evandro Meira Machado	Fernando Edier Freitas	CHESF
Vicente Ribeiro Simoni		
Kenneth R. S. Mendonça	Felipe Alves Sobrinho	Eletrobrás Eletronorte
Claudenei Simão	Leonardo Grander	Eletrobrás Eletrosul
Miguel Pires de Carli	Rafael Eduardo S. Ristow	
Orlando José Rothstein		
Arnaldo Dias Junior	Fernando Cattan Jusan	Eletrobrás Furnas
Luiza Maria de Sousa Carijó	Yuri Rosenblum de Souza	
André Bianco	Carlos Belmiro Campinho	ONS
Hélio Pessoa de Oliveira Junior	Maria Jose Ximenes	
Arnoldo Rodrigo Saavedra	Marcio Szechtman	Consultor ONS
José Roberto de Medeiros		
Li Junlin	Wang Jingfang	State Grid
John Graham		Consultor State Grid Brazil
Alexandre de Melo Silva	Aretha S. Vidal Campos	EPE
Dourival de Souza Carvalho Jr	Fábio de Almeida Rocha	
Jose Antonio D'Affonseca S. Cardoso	João Henrique M. Almeida	
Tiago Campos Rizzotto	Thiago Jose Masseran A. Parreiras	
Donald Fredrick Menzies		Consultor EPE

GRUPO DE APOIO TÉCNICO

PARTICIPANTE	EMPRESA
Antônio Ricardo Carvalho	CEPEL
Carlos Kleber da Costa Almeida	
Roberto Vaisman	
Luis York Giro	CTEEP
Fernando Alves	
Oswaldo Regis Jr.	CHESF
Carlos Massami Tangi	
Éber Ávila Rose	Eletrobras Eletronorte
Marinete da Rocha Quintanilha	
Vanderlei Machado	
Afonso de Oliveira e Silva	
Guilherme Sarcinelli Luz	Eletrobras Furnas
Pedro Marcondes de Brito	
Ricardo André Gonçalves	
Regina Célia P. B. Costa	
Antônio Carlos Carvalho	
Márcio Accioly	ONS
Guo Xiaojiang	
Yin Weiyang	State Grid Brazil
Xi Zongyue	

SUMÁRIO

GRUPO TÉCNICO EXECUTIVO	2
GRUPO DE APOIO TÉCNICO	3
SUMÁRIO.....	4
1 INTRODUÇÃO	8
2 OBJETIVO	12
3 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	13
3.1 LINHA DE TRANSMISSÃO EM ± 800 kV CC	13
3.2 MODELAGEM DA REDE E ELO DE CORRENTE CONTÍNUA.....	14
3.3 TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS	15
3.4 ESTUDOS DE DESEMPENHO DINÂMICO	15
3.5 ANÁLISE MULTI-INFEED.....	16
3.6 REPRESENTAÇÃO DA IMPEDÂNCIA HARMÔNICA DA REDE.....	17
3.7 ELEMENTOS PARA ESPECIFICAÇÃO BÁSICA	17
3.8 LT 500 kV TERMINAL RIO – NOVA IGUAÇU, C1 E C2	18
4 LINHA DE TRANSMISSÃO EM ± 800 KV CC	19
4.1 INTRODUÇÃO	19
4.2 METODOLOGIA.....	20
4.3 CRITÉRIOS ADOTADOS NOS CÁLCULOS	22
4.4 CRITÉRIOS E PROCEDIMENTOS PARA CONCEPÇÃO DA LINHA	25
4.4.1 Critérios	25
4.4.2 Concepção básica da linha de transmissão	27
4.5 DETERMINAÇÃO DO CONDUTOR ÓTIMO	29
4.5.1 Sumário das etapas para determinação do condutor ótimo	29
4.5.2 Condutor recomendado	32
4.6 SUMÁRIO DA CONFIGURAÇÃO BÁSICA DA LINHA DE TRANSMISSÃO.....	32
5 MODELAGEM DA REDE.....	33
5.1 CENÁRIOS DE INTERCÂMBIO ENTRE SUB SISTEMAS	33
5.1.1 Cenário Norte - Sul (2L)	33
5.1.2 Cenário SE-> N-NE (7P).....	34
5.2 REPRESENTAÇÃO DA REDE ELÉTRICA	35
5.2.1 Configuração da rede retida Norte/Nordeste	37
5.2.2 Configuração da rede retida Sul/Sudeste	37
5.2.3 Rede equivalente para o cenário 2L.....	38
5.2.4 Rede equivalente para o cenário 7P	40
5.2.5 Representações para os diferentes estudos realizados	42
5.3 CRITÉRIOS PARA MODELAGEM DA REDE.....	42
5.3.1 Linhas de transmissão CA	42
5.3.2 Transformadores.....	42
5.3.3 Geradores e compensadores síncronos.....	43
5.3.4 Compensadores estáticos	43

5.3.5	Reatores em derivação	43
5.3.6	Cargas	44
5.3.7	Linhas de transmissão CC.....	44
5.3.8	Representação dos elos CCAT	44
6	ELO DE CORRENTE CONTÍNUA	46
6.1	DESCRIÇÃO DO CIRCUITO PRINCIPAL	46
6.1.1	Filtros CC	46
6.1.2	Linha CC	47
6.1.3	Transformador conversor.....	48
6.1.4	Reator de alisamento.....	49
6.1.5	Linhas de eletrodos	49
6.1.6	Capacitores de surto	49
6.1.7	Resumo dos dados do circuito principal.....	49
6.2	DETALHAMENTO DOS FILTROS CA.....	51
6.2.1	Topologia considerada.....	53
6.3	DESCRIÇÃO DOS CONTROLES DAS CONVERSoras DO ELO CCAT (PSCAD)	56
6.3.1	Modelo do bipolo Xingu – Estreito.....	57
6.3.2	Modelo dos bipolos Xingu – Estreito e Xingu – T. Rio	57
6.3.3	Controle do elo CCAT em nível de Polo	60
6.3.4	Controle de potência de bipolo e ordem de transferência de potência entre bipolos	63
6.3.5	Sequências de Bloqueio.....	64
7	TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS	65
7.1	CONDIÇÕES GERAIS.....	65
7.2	ELO CCAT TRANSMITINDO NORTE-SUL, CENÁRIO 2L	65
7.2.1	Curto-circuito na rede CA	65
7.2.2	Curto-circuito na linha de transmissão em 800 kV CC	69
7.2.3	Bloqueio de bipolo.....	70
7.3	ELO CCAT TRANSMITINDO SUL-NORTE, CENÁRIO 7P	73
7.3.1	Curto-circuito na rede CA	73
7.3.2	Curto-circuito na linha de transmissão em 800 kV CC – cenário 7P.....	77
7.3.3	Bloqueio de bipolo.....	78
7.4	PRINCIPAIS CONSTATAÇÕES	80
8	ESTUDOS DE DESEMPENHO DINÂMICO	81
8.1	CAPACIDADE DE SOBRECARGA DE LONGA E CURTA DURAÇÃO	82
8.2	RECUPERAÇÃO DO ELO CCAT APÓS FALTAS NO SISTEMA CA	85
8.3	FUNÇÕES DO CONTROLE MESTRE	91
8.3.1	Redistribuir a potência ativa entre os bipolos 1 e 2	92
8.3.2	Redução ou limitação da ordem de potência dos bipolos.....	96
8.3.3	Risco de auto-excitação	99
8.3.4	Evitar sobretensão nas subestações	101
8.3.5	Chaveamento de filtros por requisitos de desempenho harmônico.....	101
8.4	CONDICIONANTES DE RESSONÂNCIA SUBSÍNCRONA	102
8.5	PRINCIPAIS CONSTATAÇÕES	104
9	ANÁLISE MULTI-INFEED	106
9.1	INTRODUÇÃO	106
9.2	PREMISSAS E CRITÉRIOS	107
9.3	ANÁLISE ESTATICA	109
9.4	MODELAGEM NO PSCAD	111
9.5	ANÁLISE DINÂMICA	116

9.6	PRINCIPAIS CONSTATAÇÕES DA ANÁLISE MULTI-INFEED.....	121
10	REPRESENTAÇÃO DA IMPEDÂNCIA HARMÔNICA DA REDE.....	123
10.1	IMPEDÂNCIA HARMÔNICA VISTA DA BARRA DE XINGU 500 kV	127
10.2	IMPEDÂNCIA HARMÔNICA VISTA DA BARRA DO TERMINAL RIO 500 kV	136
10.3	PRINCIPAIS CONSTATAÇÕES	143
11	ELEMENTOS PARA ESPECIFICAÇÃO BÁSICA.....	144
11.1	CARACTERÍSTICAS NOMINAIS BÁSICAS	144
11.2	CONFIGURAÇÃO DAS CONVERSoras	145
11.3	TRANSFORMADORES CONVERSORES	146
11.3.1	<i>Possibilidades de configuração</i>	<i>146</i>
11.3.2	<i>Parâmetros elétricos dos transformadores conversores.....</i>	<i>147</i>
11.4	ELETRODOS E LINHAS DOS ELETRODOS.....	147
11.4.1	<i>Chaveamento entre linhas dos eletrodos de duas conversoras</i>	<i>148</i>
11.4.2	<i>Distância entre eletrodo e conversora</i>	<i>148</i>
11.4.3	<i>Parâmetros elétricos da linha do eletrodo e do eletrodo.....</i>	<i>148</i>
11.4.4	<i>Potenciais de passo e toque</i>	<i>148</i>
11.4.5	<i>Isolamento.....</i>	<i>149</i>
11.4.6	<i>Capacidade operativa</i>	<i>149</i>
11.5	TENSÃO NOMINAL DA RETIFICADORA NA TRANSMISSÃO REVERSA.....	149
11.6	REQUISITOS PARA OS REATORES DE ALISAMENTO.....	150
11.7	PERDAS MÁXIMAS NAS CONVERSoras	150
11.8	FACILIDADES DE LOCAIS DE ÁGUA REFRIGERAÇÃO	150
11.9	REQUISITOS PARA CONCEPÇÃO DOS FILTROS CA.....	150
11.10	REQUISITOS DE <i>HIGH MVAR</i>	150
11.11	REQUISITOS DE OPERAÇÃO	151
11.11.1	<i>Operação em tensão reduzida</i>	<i>151</i>
11.11.2	<i>Operação com potência reduzida</i>	<i>152</i>
11.11.3	<i>Modos de operação.....</i>	<i>152</i>
12	LT 500 KV TERMINAL RIO – NOVA IGUAÇU, C1 E C2.....	154
12.1	INTRODUÇÃO	154
12.2	DEFINIÇÃO DO CONDUTOR.....	156
12.3	CAPACIDADE DE TRANSMISSÃO	157
12.4	ESTUDOS DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS	157
12.5	PRINCIPAIS CONSTATAÇÕES	159
13	REFERÊNCIAS.....	160
	ANEXO I – EQUIVALENTES	162
	ANEXO II - MODELAGEM DO SISTEMA CA.....	176
	ANEXO III – MODELAGEM EM FREQUÊNCIA DAS CARGAS DO SIN	183
	ANEXO IV –PRINCIPAIS CONTROLES DOS ELOS CCAT 800 KV	188
	ANEXO V – TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS	195
	ANEXO VI – CURVA DE SATURAÇÃO DAS MÁQUINAS_ANATEM E PSCAD	253
	ANEXO VII – TESTES NOS REGULADORES DAS MÁQUINAS DE BELO MONTE	259

ANEXO VIII – TESTES REGULADORES_ MÁQUINAS DE TUCURUÍ	267
ANEXO IX – TESTES DE MAIS MÁQUINAS - ANATEM X PSCAD	276
ANEXO X - CONSOLIDAÇÃO DA BASE DE DADOS DINÂMICA	305
ANEXO XI – DESEMPENHO DINÂMICO	310
ANEXO XII – MULTI-INFEED	334

1 INTRODUÇÃO

Em continuidade aos estudos para expansão da transmissão, na interligação entre as regiões Norte/Nordeste – Sudeste/Centro Oeste (Norte-Sul), este Relatório R2 apresenta os resultados dos estudos de detalhamento da alternativa de referência, correspondente ao segundo bipolo em Corrente Contínua em Alta Tensão – CCAT – (“High Voltage Direct Current – HVDC”) em ± 800 kV, 4000 MW, a ser implantado, ligando as subestações Xingu 500 kV e Terminal Rio 500 kV.

Esse bipolo é parte integrante da solução indicada pela EPE para expansão da interligação Norte – Sul (Relatório R1), que consiste de dois bipolos em ± 800 kV, 4000 MW de potência nominal cada, ambos se conectando na região norte do SIN na subestação Xingu 500 kV e no sudeste em subestações distintas: o primeiro bipolo na subestação Estreito 500 kV (MG), distante cerca de 2.092 km da SE Xingu; e o segundo bipolo, na subestação Terminal Rio (RJ), distante cerca de 2.439 km da SE Xingu, como ilustrado na Figura 1-1. As linhas de transmissão dos dois bipolos foram concebidas com 6 sub condutores por polo, tipo CAA, com 1590 MCM, “Lapwing”.

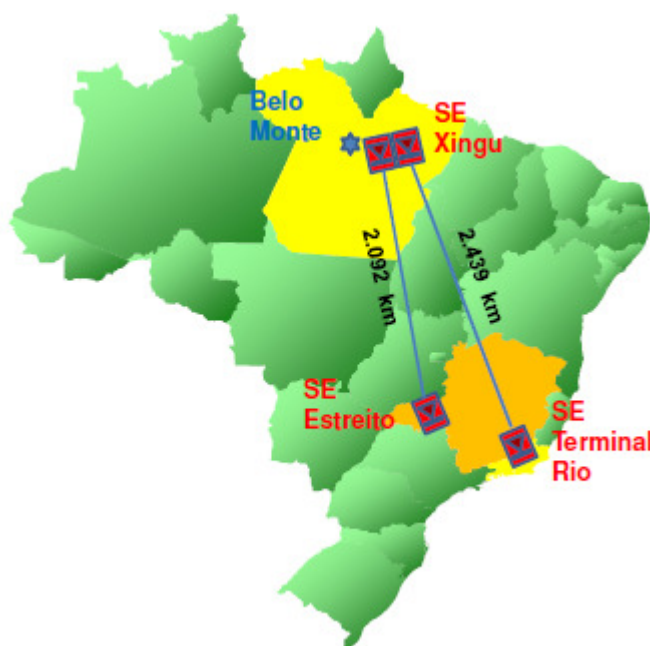


Figura 1-1 – Bipolos em ± 800 kV CC para expansão da interligação Norte - Sul

Essa solução foi resultante de uma série de estudos coordenados pela EPE e com sua efetiva participação, desenvolvidos através de um Grupo de Estudo composto por profissionais integrantes dos principais agentes de transmissão do país, cujos resultados estão apresentados nos seguintes relatórios:

- Expansão das interligações Norte-Sudeste e Norte-Nordeste – Escoamento da usina de Belo Monte e reforços no SIN. Análise técnico-econômica de alternativas: Relatório R1, nº EPE-DEE-RE-040/2011-rev0, agosto 2011.
- Expansão das Interligações Norte-Sudeste e Norte-Nordeste, Parte II, Detalhamento da Alternativa Recomendada, Relatório R1, nº EPE-DEE-RE-063/2012-r0, julho 2012.

Adicionalmente, os critérios que levaram à concepção desse sistema de transmissão CCAT em ± 800 kV, inédito no Brasil, foram divulgados em fóruns técnicos [3] e [4].

O primeiro bipolo integrante dessa solução, ± 800 kV Xingu – Estreito, leilado pela Aneel em 2013, foi objeto de estudo de detalhamento, cujos resultados estão apresentados no Relatório R2, nº EPE-DEE-RE-062/2013-rev1 [5].

No presente relatório (R2) são apresentados os resultados dos estudos de detalhamento, que complementam os estudos do Relatório R1, tendo como objetivo subsidiar os empreendedores, no conhecimento das características técnicas do projeto e à ANEEL no processo de elaboração do edital de leilão do segundo bipolo em ± 800 kV CC, e da LT 500 kV Terminal Rio - Nova Iguaçu, C1 e C2, como solicitado pelo Ministério de Minas e Energia, através do Ofício Circular nº 1/2014-SPE-MME, de 02 de abril de 2014. Os presentes estudos visam assegurar a exequibilidade do bipolo sob o ponto de vista técnico, sem, no entanto, se constituir em um projeto básico.

Esses estudos, coordenados pela EPE, foram desenvolvidos através de sub grupos de estudos integrados por profissionais da EPE e das seguintes empresas:

- Centrais Elétricas do Norte do Brasil – Eletrobrás Eletronorte
- Centro de Pesquisa de Energia Elétrica – CEPEL Eletrobrás
- Cemig Geração e Transmissão S/A
- Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista – CTEEP
- Eletrobrás Furnas S/A
- Eletrobrás Eletrosul
- Eletrobrás CHESF
- Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS
- State Grid Brazil Holding S/A.

No capítulo 2 deste relatório são apresentados seus objetivos principais, e no capítulo 3, um sumário com as conclusões e recomendações.

No capítulo 4 são apresentados os resultados dos estudos que indicaram a solução para a linha de transmissão em ± 800 kV CC, destacando-se que se trata de nova classe de tensão em corrente contínua a ser implantada no país. Esses estudos revisaram a concepção inicialmente considerada nas análises do Relatório R1, resultando em alguns ajustes na configuração básica da linha, mas confirmando a indicação de 6 sub condutores por polo, tipo CAA, com 1590 MCM, "Lapwing". Adicionalmente, neste relatório, foram feitos ajustes na concepção da linha do segundo bipolo, em decorrência de novos limites de campo elétrico na faixa de segurança.

Nos capítulos 5 e 6 são apresentadas as modelagens desenvolvidas, respectivamente, para representação da rede de corrente alternada (CA) e de corrente contínua (CC), e para o elo CCAT no programa computacional PSCAD ("Power Systems Computer Aided Design") desenvolvido pelo Manitoba HVDC Reserch Centre do Canadá.

No capítulo 7, Transitórios Eletromagnéticos, são apresentados os resultados das análises de desempenho da rede CA e do bipolo CCAT quando submetidos a transitórios de manobra. As simulações desses transitórios foram realizadas através do programa PSCAD com representação dos bipolos de corrente contínua em ± 800 kV como desenvolvido para os estudos do primeiro bipolo [5].

No capítulo 8, encontra-se as avaliações de desempenho dinâmico ("Dinamic Performance Study" - DPS) realizadas através do programa PSCAD com o auxílio do programa ANATEM onde foram avaliadas as capacidades de sobrecarga do elo, tempo de recuperação e funções do controle mestre.

No capítulo 9 são apresentadas as análises de *multi-infeed*, quando se representou além dos dois elos CCAT em 800 kV, os elos CCAT em 600 kV do sistema de transmissão do Madeira e do sistema de transmissão CCAT de Itaipu, com o objetivo de se investigar interações entre o novo elo CCAT, objeto do estudo e os demais elos CCAT do SIN.

No capítulo 10, são apresentados, através de lugares geométricos, os valores das impedâncias harmônicas do sistema. Os valores das impedâncias harmônicas foram obtidos através do programa HarmZs do CEPEL e são parâmetros necessários para o projeto dos filtros CA.

No capítulo 11 são considerados os principais elementos relativos ao elo CCAT para serem observados em sua especificação básica.

Finalmente, no capítulo 12, são apresentados os estudos de detalhamento das LT 500 kV Terminal Rio – Nova Iguaçu, C1 e C2, necessárias à integração da subestação Terminal Rio com a SE Nova Iguaçu 500 kV, em decorrência da implantação do bipolo objeto deste relatório.

2 OBJETIVO

Devido às particularidades técnicas da transmissão em corrente contínua, o objetivo deste estudo de detalhamento da alternativa de referência (Relatório R2) é apresentar os requisitos técnicos do circuito principal, filtros e compensação reativa das conversoras, bem como a concepção proposta para a linha de transmissão em corrente contínua, integrantes do elo CCAT em ± 800 kV Xingu – Terminal Rio.

Cabe ressaltar que os aspectos técnicos abordados não se constituem em pré-requisitos de uma especificação técnica propriamente dita, mas sim em condições funcionais que as novas instalações devem apresentar. Ou seja, são subsídios essenciais para elaboração da especificação técnica junto aos fabricantes, indicando as condições às quais os equipamentos deverão estar preparados para estar ou vir a ser submetidos.

Neste relatório também é fornecida a rede elétrica representada no programa PSCAD e utilizada nas análises aqui apresentadas que deve ser considerada no desenvolvimento posterior dos necessários estudos de sobretensões transitórias de manobra, de desempenho dinâmico e de *multi-infeed*. Além disso, são apresentados neste relatório os limites de impedância harmônica da rede, de modo a atender ao conjunto extremo de distorções harmônicas individuais (tensão), estabelecendo assim o requisito de desempenho harmônico para os filtros CA das conversoras.

Desta forma, poderão ser estabelecidos os requisitos técnicos mínimos necessários que deverão ser apresentados no Projeto Básico dos empreendimentos a serem licitados.

3 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Em continuidade aos estudos para expansão da transmissão, este relatório apresenta os resultados dos estudos de detalhamento da alternativa de referência correspondente ao segundo bipolo CCAT em ± 800 kV, 4000 MW, a ser implantado no país, ligando as subestações Xingu 500 kV e Terminal Rio 500 kV, ampliando a interligação entre os subsistemas Norte/Nordeste e Sudeste/Centro Oeste (Norte-Sul).

Os resultados desses estudos de detalhamento, confirmaram os resultados apresentados no Relatório R1 [1][2], com os ajustes introduzidos pelo Anexo Técnico do leilão da Aneel do primeiro bipolo em 800 kV (Xingu – Estreito) e pela Resolução Normativa nº 616 da Aneel, de 01 de julho de 2014 que, dentre outros requisitos, estabelece limites para o campo elétrico nas faixas das linhas de transmissão em corrente contínua. As conclusões e recomendações deste relatório estão sintetizadas a seguir.

3.1 Linha de transmissão em ± 800 kV CC

Como resultado das análises realizadas neste relatório ficou indicada para linha de transmissão em ± 800 kV Xingu – Terminal Rio uma solução composta por 6 condutores tipo CAA de 1590 MCM por polo, “Lapwing”, dispostos geometricamente como indicado na Figura 3-1. Foram considerados polos com feixes circulares, distribuídos horizontalmente, com condutores dos feixes espaçados de 0,60 m, e cabos para-raios tipo “ERA 3/8”. A estrutura predominante é tipo estaiada.

A linha de transmissão em ± 800 kV, foi revista e detalhada considerando a Resolução Normativa nº 616 da Aneel, de 01 de julho de 2014, que estabeleceu limites máximos de campo elétrico na faixa de segurança das linhas em corrente contínua no Brasil, resultando em ajustes na sua concepção básica, mas mantendo as recomendações contidas no Relatório R1, quanto ao tipo, bitola e número de condutores.

Um dos aspectos em destaque desta nova concepção é a altura mínima condutor solo que aumentou para 19,9 metros, quando na concepção da linha em 800 kV já leiloada (Xingu – Estreito) este valor foi estabelecido em 15,8 metros.

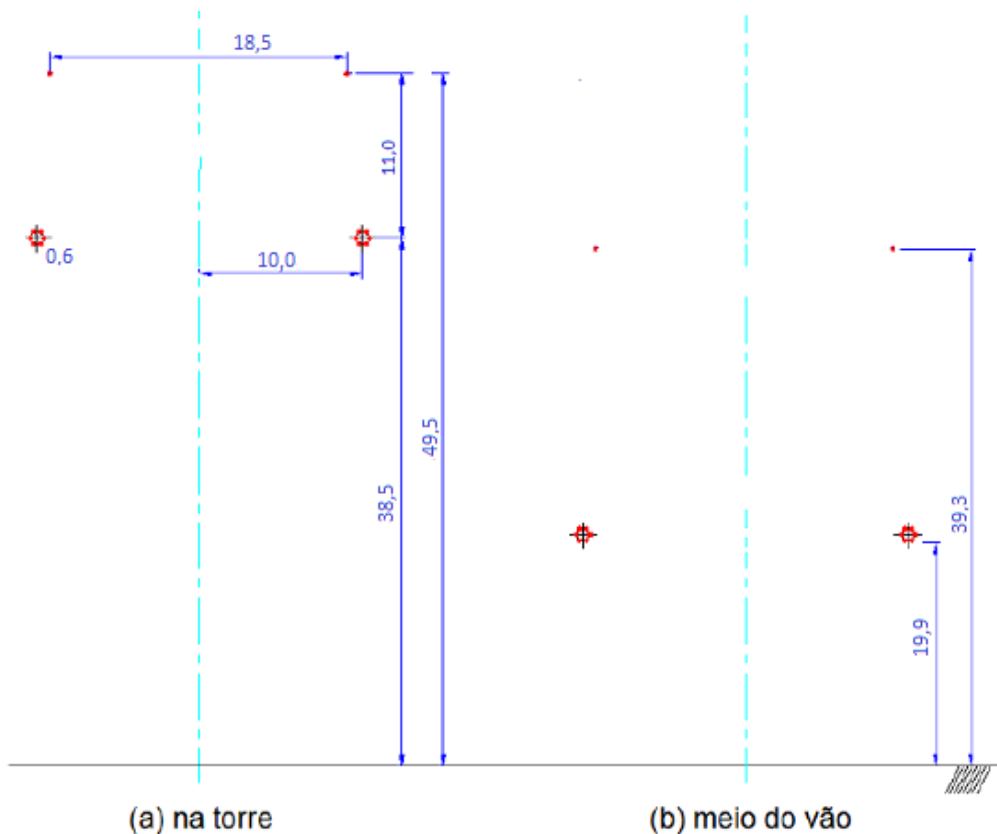


Figura 3-1 - Disposição geométrica dos condutores e para-raios da linha de transmissão em ± 800 kV Xingu – Terminal Rio

3.2 Modelagem da rede e elo de corrente contínua

A rede considerada para simulações neste estudo, correspondeu à prevista para o horizonte 2019/2020, quando da entrada em operação do segundo bipolo em ± 800 kV da conversora de Xingu. Foram selecionados dois cenários de intercâmbio entre os sub sistemas Norte/Nordeste e Sudeste/Centro Oeste do SIN, representativos de situações dimensionadoras, indicadas no Relatório R1 [2], para as condições de transmissão direta (Norte-Sul) e transmissão inversa (Sul-Norte).

A rede do Sistema Interligado Nacional (SIN) foi representada no programa PSCAD, detalhadamente (rede retida) nas regiões no entorno das vizinhanças dos pontos de conexão dos elos de corrente contínua objetos dos estudos, totalizando cerca de 120 barras (trifásicas) representadas, número substancial de barras para a natureza dos estudos realizados. A partir das barras limites dessa rede retida, a representação foi feita através de circuitos equivalentes.

A representação da rede utilizada nos estudos de transitórios eletromagnéticos foi referência básica para as representações utilizadas nas demais simulações apresentados neste relatório, nomeadamente as de *multi-infeed* e de desempenho dinâmico.

Um modelo detalhado, com os principais controles previstos, de um sistema de transmissão CCAT em ± 800 kV, desenvolvido no programa PSCAD e utilizado inicialmente nos estudos do primeiro bipolo em 800 kV de Xingu, foi novamente utilizado neste segundo bipolo, com bons resultados.

As bases de dados do sistema em PSCAD necessária para aferição dos requisitos técnicos estão disponibilizadas em anexo e descritas ao longo deste relatório. Este relatório, entretanto, não contempla um estudo de “otimização” de controles dos bipolos CCAT. Esta análise deverá ser realizada pelos fornecedores dos equipamentos.

3.3 Transitórios eletromagnéticos

No que diz respeito aos transitórios eletromagnéticos de manobra (item 7), com os cenários considerados, não se verificaram restrições à implantação do bipolo em ± 800 kV Xingu – Terminal Rio.

Foram simulados curtos circuitos na rede CA, curtos circuitos na linha de transmissão CC e bloqueio de bipolo sem desligamento de filtros. As sobretensões registradas na rede CA não foram elevadas e não provocarão restrições operativas.

De forma análoga, os tempos de recuperação da potência ativa no elo, após essas faltas na rede CA, ficaram dentro de limites aceitáveis. Para a linha CC os resultados confirmaram os parâmetros e comportamentos previstos para linhas deste tipo, comprimento e classe de tensão.

Quanto às sobretensões decorrente de bloqueio de bipolo sem abertura de filtros das conversoras, os resultados indicaram valores dentro de limites aceitáveis para este fenômeno e modelagem considerada.

3.4 Estudos de desempenho dinâmico

Os estudos de interação do sistema CA/CC envolvem, entre outros, a avaliação da recuperação do sistema após um distúrbio, estabilidade de tensão e sobretensões. Nesta avaliação foram considerados os modelos de máquinas dinâmicas, representados no PSCAD, das usinas de Belo Monte, Tucuruí (1 e 2), Angra (I,II e III), Termorio (I e II), assim como, do compensador síncrono de Grajaú.

Com relação às sobrecargas de curta e longa duração, as análises dinâmicas seguiram as orientações dos estudos do Relatório R1 [2], que estabeleceu:

- sobrecarga de longa duração de cada polo de 33% da potência nominal por 30 minutos no cenário 2L e, de somente 30 segundos no cenário 7P (potência reversa);
- sobrecarga de 10% por 4 horas no cenário 7P (potência reversa); e
- sobrecarga de curta duração (5 segundos) de 50% da potência nominal, com redução em rampa suave até o valor de sobrecarga de longa duração nos dois cenários.

Nas análises efetuadas, com os ajustes propostos de controle, a recuperação da potência do elo CC para faltas na rede CA foi inferior a 200 ms, com desempenho satisfatório dentro dos critérios considerados.

Com base nas análises, o Controle Mestre, previsto junto com a entrada do segundo bipolo, deverá incluir, para os dois sentidos de operação, dentre suas principais funções: redistribuição de potência entre os bipolos; execução de *run-back* da energia CCAT após perda de transmissão ou geração do sistema CA; redução de possíveis sobretensões e chaveamento de filtros por requisitos de desempenho harmônico.

As análises necessárias para verificar se os controles do elo CCAT irão excitar modos torcionais na faixa de frequência subsíncrona, que comprometam o eixo das turbinas, dos geradores da usina de Belo Monte e das usinas térmicas próximas ao Terminal Rio, devem ocorrer na etapa de Projeto Básico conforme item 8.4.

3.5 **Análise *multi-infeed***

Este capítulo do estudo teve como objetivo a análise de interação entre o novo elo CCAT ± 800 kV Xingu – Terminal Rio a ser inserido no SIN, na região Sudeste, com os principais elos CCAT já existentes, ou em processo de instalação nesse sistema (Análise *Multi-Infeed*). Essa análise teve os seguintes resultados em destaque:

- ✓ Não foram identificadas falhas de comutação nos elos CCAT após o início da recuperação de potência CC ocasionadas por curtos-circuitos trifásicos em Xingu e Terminal Rio;
- ✓ Não foram identificadas falhas de comutação nos demais elos CCAT ocasionadas pela falha de disparo de uma válvula em uma conversora de Terminal Rio;

Com base nas premissas e análises realizadas não existem restrições para a inserção do bipolo CCAT ± 800 kV Xingu - Terminal Rio no SIN. Entretanto, caberá ao futuro concessionário (Agente de Transmissão), demonstrar na etapa de Projeto Básico o desempenho satisfatório do seu sistema de controle.

3.6 Representação da impedância harmônica da rede

Os requisitos para concepção dos filtros CA têm como finalidade fornecer informações necessárias ao dimensionamento e desempenho desses filtros CA associados ao bipolo ± 800 kV Xingu – Terminal Rio (segundo bipolo conectado a Xingu) . Estes requisitos devem atender os lugares geométricos das impedâncias harmônicas apresentas no capítulo 10.

O tipo de representação dos filtros do primeiro bipolo (Xingu – Estreito), na SE Estreito, como capacitor equivalente, filtro detalhado ou circuito aberto não influenciou significativamente no valor da impedância harmônica vista pela barra da SE Terminal Rio.

Recomenda-se que o Anexo Técnico do leilão da ANEEL, referente ao empreendimento em estudo, contenha requisitos e condições específicas para a avaliação do desempenho conjunto dos filtros do primeiro bipolo e do segundo bipolo.

3.7 Elementos para especificação básica

O bipolo CCAT ± 800 kV Xingu - Terminal Rio, objeto deste Relatório R2, é o segundo bipolo de uma solução integrada composta por dois bipolos em 800 kV CC para expansão da interligação Norte/Nordeste – Sudeste/Centro-Oeste. Os requisitos técnicos dos dois bipolos são basicamente comuns. O primeiro bipolo, Xingu – Estreito foi licitado pela Aneel em 2013.

Nos estudos realizados para definição dessa solução integrada, apresentados nos relatórios R1 [1] [2] e nos estudos de detalhamento posteriores, apresentados no Relatório R2 do primeiro bipolo [5], foi indicado um conjunto de recomendações com o objetivo de subsidiar a elaboração da especificação básica do sistema estudado. Essas recomendações com pequenos ajustes foram incorporadas ao Anexo Técnico do leilão do primeiro bipolo.

Considerando, portanto, que o segundo bipolo, objeto deste relatório, é parte integrante do sistema de transmissão em CCAT 800 kV mencionado, as recomendações apresentadas anteriormente, com os ajustes realizados na elaboração do Anexo Técnico do leilão da Aneel,

devem ser mantidas para o segundo bipolo. Com esse entendimento, foram avaliadas neste estudo as recomendações anteriores, ajustando-se o item relativo ao requisito de High Mvar.

3.8 LT 500 kV Terminal Rio – Nova Iguaçu, C1 e C2

A LT 500 kV Terminal Rio – Nova Iguaçu, C1 e C2, pode ser implantada com feixes de 4 condutores tipo CAA 954 MCM, "Rail" por fase, com os parâmetros elétricos e capacidade de transmissão aqui definidos, confirmando a solução indicada pelos estudos do Relatório R1. Não existem restrições para manobras da referida linha de transmissão.

4 LINHA DE TRANSMISSÃO EM ± 800 KV CC

4.1 Introdução

Os estudos que definiram a concepção básica das linhas de transmissão em ± 800 kV, Xingu – Estreito e Xingu – Terminal Rio, integrantes da solução em ± 800 kV para expansão da interligação Norte/Nordeste – Sudeste/Centro-Oeste, foram realizados em diferentes etapas, e resultaram em uma concepção única para as duas linhas de transmissão, como detalhado no Relatório R2 do elo em corrente contínua ± 800 kV Xingu – Estreito [5], empreendimento leiloado pela Aneel em novembro de 2013 (Leilão Aneel nº 011/2013).

Posteriormente à realização do referido leilão, a Aneel publicou a Resolução Normativa nº 616, de 01 de julho de 2014 que, dentre outros requisitos, estabelece limites para o campo elétrico nas faixas das linhas de transmissão em corrente contínua [23], limites formalmente inexistente no Brasil à época do planejamento dessas linhas em 800 kV CC. Como esses novos limites são inferiores aos utilizados no planejamento original dessas linhas, fez-se necessário uma revisão na concepção básica da linha integrante do elo em ± 800 kV objeto deste Relatório R2 para adequação às novas exigências.

Este capítulo consiste de uma revisão do apresentado no Relatório R2 da linha já licitada [5], com as adequações na linha a ser licitada, Xingu – Terminal Rio, necessárias ao atendimento dos novos requisitos definidos pela Aneel, em sua Resolução Normativa nº 616, de 01 de julho de 2014.

Os estudos para concepção das linha de transmissão CCAT em ± 800 kV foram iniciados em conjunto com as análises do Relatório R1, ainda na fase de análise técnico-econômica de alternativas para expansão das interligações de transmissão Norte-Sudeste e Norte-Nordeste – escoamento da usina de Belo Monte e reforços no SIN [1].

As análises foram assim conduzidas uma vez que nesse estudo as linhas de transmissão impactam sobremaneira as alternativas consideradas, tanto no requisito técnico como no econômico, constituindo-se, dentre os elementos que compunha uma alternativa, o item de maior custo. Sob a coordenação da EPE e com o apoio do CEPEL e das empresas participantes do Sub Grupo 5 (linhas de transmissão) do Grupo de Estudo de Belo Monte, as linhas integrantes das alternativas estudadas foram otimizadas com base em determinadas premissas que serão detalhadas a seguir.

Posteriormente, com a escolha da alternativa em CCAT ± 800 kV para a expansão da interligação Norte – Sudeste, e a definição dos pontos de conexão dos elos CC no Sudeste, foi realizada uma análise técnico-econômica, considerando os custos de instalação das linhas de transmissão e das conversoras, assim como as perdas totais das linhas CC e do sistema CA malhado, no qual os dois elos CC estão inseridos. Essa análise definiu as potências das conversoras e o condutor das linhas de transmissão integrantes dos dois elos [2].

Nesta etapa do Relatório R2, como indicado a seguir, extraído do relatório do CEPEL em referência [24], para incorporar novas informações relativas às linhas de transmissão em ± 800 kV CC, a concepção da linha foi revista e detalhada, resultando em alterações em algumas dimensões na concepção básica da linha, mas confirmando a indicação prévia de uma solução composta por 6 sub condutores tipo CAA de 1590 MCM, “Lapwing”. Importante destacar que se trata de nova classe de tensão para transmissão de grandes blocos de energia em longas distâncias, já implantada ou em implantação em outros países mas inédita no Brasil.

4.2 Metodologia

O projeto de uma linha de transmissão (LT) envolve uma sequência de atividades, onde as interdependências dos parâmetros elétricos, mecânicos e ambientais que interferem no dimensionamento da LT são estudados de modo a se obter o especificado desempenho operacional do empreendimento aliado aos menores custos possíveis. Para a análise simultânea destas interdependências, foi desenvolvido no CEPEL o sistema computacional ELEKTRA, o qual seleciona uma gama de feixes de condutores econômicos que constituem uma determinada configuração da LT, seja em corrente alternada (CA) ou corrente contínua (CC), podendo-se admitir que os subcondutores dos feixes de uma mesma fase ou polo sejam, ou não, iguais e distribuídos simétrica ou assimetricamente ao redor das mais variadas formas geométricas [7].

Para uma tensão fixa de transmissão, uma configuração básica de LT a ser estudada é constituída pelo conjunto estrutura (considerando a sua fundação, cadeias de isoladores, ferragens etc), cabos para-raios e feixes de cabos condutores que compõem todas as fases (CA) ou polos (CC) da LT.

No presente estudo, para facilidade de cálculo e também em função de não haver descrição do perfil topográfico ao longo da linha e demais dados correlatos, considerou-se uma configuração base constituída apenas por estruturas estaiadas e cadeias de suspensão em I. Os custos das estruturas autoportantes de suspensão e de ancoragem foram calculados por intermédio de

fatores multiplicadores aplicados aos custos dos componentes das estruturas estaiadas de suspensão. Os percentuais considerados para cada tipo de estrutura ao longo do comprimento da LT foram de 85%, 10% e 5% para as estruturas estaiadas de suspensão, autoportantes de suspensão e autoportantes de ancoragem, respectivamente. Considerando-se estes percentuais e as quantidades típicas dos materiais em cada tipo de estrutura, obtiveram-se os fatores multiplicadores apresentados na Tabela 4-1.

Tabela 4-1 - Fatores multiplicadores dos custos dos componentes das linhas de transmissão ⁽¹⁾

Componente	Fator multiplicador
Isolador	1,10
Material da estrutura	1,08
Material da fundação	1,05
Ferragens	1,05

⁽¹⁾ Para levar em conta a participação de estruturas autoportante, de suspensão e de ancoragem

A configuração dos feixes de cabos condutores de uma LT é definida pela quantidade, tipos e localização espacial dos cabos. Sob o ponto de vista de desempenhos elétrico e mecânico, uma dada configuração pode ser atendida por diversos tipos de cabos condutores (bitola e formação). Entre os possíveis condutores de serem utilizados numa alternativa, existe o condutor economicamente ótimo, que é aquele que leva ao menor custo total da alternativa.

Naturalmente, na busca da configuração da LT economicamente ótima pode-se considerar uma quantidade maior ou menor (assumindo que algumas se comportam praticamente constantes com a variação do parâmetro em análise) de parcelas que constituem o custo global do empreendimento, além de um número maior ou menor de condicionamentos elétricos e mecânicos da configuração física da LT. Para os estudos de otimização aqui apresentados e realizados pelo sistema ELEKTRA, considerou-se como parâmetro de decisão na fase inicial da concepção das configurações de LTs a minimização da função custo de instalação da LT adicionada do custo das perdas elétricas (Joule e corona) nos cabos condutores da LT. Nos estudos que sucederam incluíram-se os demais custos do empreendimento.

4.3 Critérios adotados nos cálculos

Econômicos

Considerou-se a vida econômica do empreendimento de transmissão de 30 anos e uma taxa de juros para capitalização das perdas de energia de 8% a.a. Adotou-se o custo unitário das perdas de energia de R\$113,00/MWh.

Potência transmitida

A potência máxima a ser transmitida em condições normais é de 4000 MW. Em condições de sobrecarga, considerou-se um aumento de 33% desta potência. Em função das variações da potência transmitida ao longo dos meses do ano, utilizaram-se os fatores anuais de carga e de perdas iguais a 0,575 e 0,437, respectivamente.

Limites técnicos

Cada configuração estudada foi considerada tecnicamente viável se atendeu aos critérios e valores limites de:

- Campo elétrico na superfície de cada cabo condutor e cada cabo pára-raios.
- Temperatura na superfície de cada cabo condutor e cada cabo pára-raios para o regime de operação normal.
- Campo elétrico com cargas espaciais e corrente iônica próximos da superfície do solo.
- Radiointerferência e ruído audível próximos da superfície do solo.
- Cargas mecânicas na estrutura decorrentes dos pesos dos componentes físicos da LT e da ação do meio ambiente.
- Altura de segurança entre cabo e solo.
- Largura da faixa de segurança da linha.

Na Tabela 4-2 estão apresentados os valores limites adotados. Os limites de campo elétrico e campo magnético são os estabelecidos pela Resolução Normativa da Aneel nº 616, de 01 de julho de 2014. Entre parênteses estão os valores desses limites utilizados na linha do primeiro elo, Xingu – Estreito. Os limites de corrente iônica, radiointerferência e ruído audível junto ao solo apresentados nesta tabela basearam-se nos valores empregados em [8] e [9], e têm apenas a intenção de proporcionar diretrizes para a análise econômica em pauta; portanto, não devem ser encarados como definitivos para a etapa de projeto destas linhas ou de outras semelhantes, já que presentemente não há norma técnica brasileira correlata para esta questão.

Tabela 4-2 - Valores limites adotados para a análise das configurações das linhas

Descrição	Valores
Relação campo elétrico máximo/campo elétrico limite	0,95
Temperatura limite para operação normal (°C)	65
Campo elétrico limite na superfície do solo, considerando as cargas espaciais e sem vento, dentro da faixa de passagem (kV/m)	20 (40*)
Corrente iônica limite na superfície do solo, dentro da faixa de passagem (nA/m ²)	100
Campo magnético limite a 1,5m da superfície do solo, dentro da faixa de passagem (μT)	353.000 (livre*)
Campo elétrico limite na superfície do solo, considerando as cargas espaciais e sem vento, no limite da faixa de passagem (kV/m)	5 (10*)
Corrente iônica limite na superfície do solo, no limite da faixa de passagem (nA/m ²)	5
Radiointerferência limite a 1,5m da superfície do solo e em tempo bom, no limite da faixa de passagem (dB/1μV/m)	46
Ruído audível limite a 1,5m da superfície do solo em tempo bom, no limite da faixa de passagem (dB(A))	42
Campo magnético limite a 1,5m da superfície do solo, no limite da faixa de passagem (μT)	118.000 (livre*)

(*) Limites considerados na concepção do planejamento da linha do primeiro elo em ± 800 kV Xingu – Estreito.

Ambientais

O sistema de transmissão em estudo contempla distâncias superiores a 2000 km. Este fato acarreta que, certamente, sua rota atravessará regiões com características ambientais bastante diversas e diferenciadas entre si. Portanto, é bem provável que a definição final dos parâmetros climáticos e geológicos, a serem adotados nos futuros projetos executivos, seja calcada em estudos minuciosos que considerem essas diversidades regionais.

Para o estudo de seleção da configuração econômica, os parâmetros ambientais devem representar valores característicos da rota como um todo, com requisitos de detalhes compatíveis com qualquer projeto básico de engenharia. Apresentam-se na Tabela 4-3 os valores ambientais aqui considerados.

Tabela 4-3 - Parâmetros ambientais adotados na concepção da linhas de transmissão

Parâmetro	Valor
Velocidade máxima do vento médio de 10 minutos	90 km/h
Velocidade máxima do vento médio de 30 s	100 km/h
Velocidade do vento para cálculo de temperatura do condutor	1 m/s
Temperatura do ar média máxima	33 °C
Temperatura do ar média	25 °C
Densidade relativa do ar (valor com 90% de ser ultrapassado)	0,88
Radiação solar máxima	1000 W/m ²
Resistividade elétrica do solo	1000 Ω .m
Comprimento da LT sujeita à chuva (para o cálculo das perdas corona nos cabos)	25%

4.4 Critérios e procedimentos para concepção da linha

4.4.1 Critérios

Tipo de estrutura

Com base na experiência existente no país, sobretudo com as linhas de transmissão em corrente contínua do sistema Itaipu e do projeto Madeira, foi considerada a concepção com estruturas estaiadas predominantes.

Dados dos cabos

Para cada configuração de feixe proposta, dimensionaram-se as LTs considerando 39 cabos condutores do tipo CAA, com as bitolas variando entre 260 e 2515 MCM. Utilizaram-se nas LTs dois cabos pára-raios de aço tipo EAR 1/2" aterrados nas estruturas. Para a seleção inicial dos cabos condutores, estes foram considerados como sendo cabos novos, com fator de superfície igual a 0,8 [10], coeficiente de emissividade igual a 0,5 e coeficiente de absorção solar igual a 0,5. Na etapa de cálculo do campo elétrico com cargas espaciais junto ao solo, buscando-se uma melhor aderência aos efeitos da variação do clima e do envelhecimento e contaminação dos cabos, considerou-se o fator de superfície dos cabos igual a 0,5 [25][26]. Para os cabos dos polos, adotou-se como tração EDS o valor de 20% da tensão de ruptura do cabo, referida a 25 °C.

Dados dos vãos e das estruturas

Adotou-se o vão médio de 450 m, o sub-vão de 75 m, e a relação entre os vãos de peso e de vento de 0,7.

Dados dos isoladores

Adotaram-se cadeias de isoladores simples, em I, com isoladores do tipo concha e bola, com diâmetro 320 mm e passo 170 mm.

Custos dos componentes da LT

Calcularam-se os custos dos componentes de cada LT com base nos Custos Modulares publicados pela ANEEL, referenciados a julho de 2010 e considerando o valor médio entre as cinco regiões brasileiras [11]. Para o cálculo do custo de instalação da LT por comprimento (C_{INST}), adotou-se neste estudo a seguinte composição:

$$C_{INST} = C_D + C_{INDIR} + C_{EVENT}$$

sendo:

C_D – Custo direto de construção da LT, constituído pelos custos de terrenos e servidões, aquisição de materiais (estruturas, estais, fundações, cabos condutores, cabos pára-raios, isoladores, aterramento, ferragens e acessórios), inspeção de material, canteiro de obras, construção da LT, serviços técnicos (topografia e geologia), engenharia (projetos básico e executivo), custos ambientais e administração local.

C_{INDIR} – Custo total das despesas não alocáveis diretamente à execução da obra (administração central).

C_{EVENT} – Custos de imprevistos que possam ocorrer durante a execução do projeto ou construção da LT (indenizações, desvios de estradas, realocação de linhas existentes etc).

Além disso, normalmente, no estudo para a escolha do cabo condutor ótimo, consideram-se os custos dos cabos em função de seu peso, expressos em valor unitário por quilo. Todavia, o banco de custos da ANEEL expressa os custos reais praticados nos empreendimentos de linhas de transmissão licitadas e construídas, que têm seus custos negociados, caso a caso, entre o proprietário do empreendimento e o fabricante, resultando em pequenas distorções ao se comparar os custos de cabos por peso. Ou seja, existem cabos com bitolas menores mais caros (R\$/kgf) que os de bitolas maiores, mesmo tendo as mesmas formações. Portanto, como o cabo condutor é uma parcela importante na determinação do custo de uma linha de transmissão, consideraram-se como soluções potenciais aquelas com cabos de menor bitola e com custo de

instalação e perdas com variação da ordem de até +3% do respectivo custo da solução com condutor ótimo indicado pelo programa ELEKTRA.

4.4.2 Concepção básica da linha de transmissão

Na sequência são apresentados os principais elementos que definiram a concepção básica da solução adotada.

Silhueta da estrutura

A Figura 4-1 ilustra a silhueta estilizada da estrutura estaiada adotada.

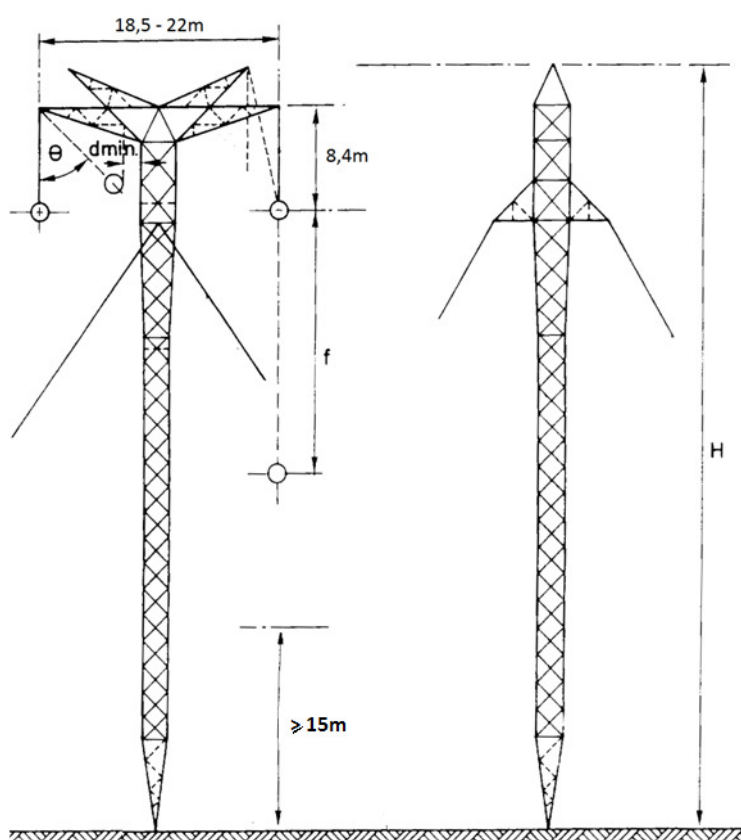


Figura 4-1 - Silhueta estilizada da estrutura estaiada adotada

Feixe de subcondutores

Nas análises iniciais foram comparadas soluções com 4, 6 e 8 subcondutores. As configurações com feixes de 6 subcondutores mostraram-se competitivas economicamente e foram adotadas nas análises que se sucederam. Ressalta-se aqui que esta quantidade de cabos por feixe foi adotada em estudos e empreendimentos recentemente instituídos na China e na Índia [27][28]. Linhas de transmissão em 765 kV CA em outras partes do mundo também já utilizam 6 condutores por feixe,

e mesmo no Brasil, já existe a indicação para linhas em 500 kV, além de um projeto de pesquisa P&D Aneel recente, que instalou um circuito experimental.

Considerou-se o espaçamento entre condutores dos feixes igual a 0,60m. Este aumento em relação ao tradicional espaçamento de 18" (0,4572 m) entre condutores foi impulsionado pelo fato da literatura técnica correlata citar que há possibilidade de fadiga mecânica por efeitos de vibração eólica em cabos mais espessos quando estes têm espaçamento reduzido entre si no feixe, e uma expansão do feixe minimizaria este efeito danoso.

Distâncias de isolamento entre polos e entre polos e partes aterradas e comprimento das cadeias de isoladores

Em geral, para a determinação das distâncias de isolamento entre polos e entre polos e partes aterradas deve-se fazer um rigoroso estudo de coordenação de isolamento. Tal estudo deve envolver a operação da LT em regime de máxima tensão operacional em regime de frequência industrial e em condições de sobretensões de manobra e de origem atmosférica. Devem ser levadas em consideração também as diferentes distâncias existentes entre cabos e entre cabos e partes aterradas, que, por sua vez, dependem da geometria e das dimensões da estrutura empregada. Ainda, deve ser considerado o nível de poluição nos isoladores e as condições climáticas do local de instalação da LT.

No caso das cadeias em I, deve-se ainda considerar o balanço dos cabos condizente com cada uma destas três situações de submissão dos isolamentos; portanto, para cadeias em I, o ângulo de balanço da cadeia bem como o espaçamento entre polos dos cabos em repouso são variáveis com a bitola do cabo.

Após um estudo básico de coordenação de isolamento, obtiveram-se distâncias entre polos variando entre 18,5 m e 22 m conforme a bitola do condutor. Note-se que estas distâncias encerram os valores apresentadas em [9][27][28] para LTs de ± 800 kV. Deve-se também ressaltar que tais distâncias de isolamento devem satisfazer as distâncias necessárias para os serviços de manutenção em linha viva. Considerou-se 48 (quarenta e oito) isoladores por cadeia, culminando no comprimento total da cadeia (com acessórios) de 8,4 m.

Distâncias vertical entre polos e solo

A partir da experiência com a linha de transmissão de ± 600 kV de Itaipu [9], empregou-se como ponto de partida a distância mínima de segurança entre polos e solo de 15 m. Portanto, em função dos condicionamentos apresentados na Tabela 2, sobretudo do (novo) limite do campo elétrico com cargas espaciais de 20 kV/m e da corrente iônica de 100 nA/m², e considerando os condutores com a flecha determinada para a condição de carregamento de emergência (potência transmitida com acréscimo de 33% em relação à potência máxima nominal) a distância vertical entre polos e solo adequada foi automaticamente aumentada pelo programa ELEKTRA para que estes condicionamentos fosse atendidos.

Posicionamento dos cabos para-raios

No presente estágio de avaliação, definiu-se a localização dos cabos para-raios em função de estudos preliminares realizados no CEPEL. Portanto, os dois cabos para-raios estão afastados entre si de 18,5 m, e, junto à estrutura, estão afastados verticalmente de 11 m dos cabos dos polos. Isto oferece um ângulo de blindagem de cerca de 4° dos cabos para-raios aos polos. Futuramente, há que se refinar a localização dos cabos pára-raios para cada configuração.

4.5 Determinação do condutor ótimo

4.5.1 Sumário das etapas para determinação do condutor ótimo

A determinação do condutor ótimo para cada configuração seguiu, portanto, as seguintes etapas:

1. Com base em conhecimentos adquiridos anteriormente no Cepel [5], da experiência de projeto da estrutura estaiada da linha bipolar de ± 600 kV CC de Itaipu [8] e das informações de [9], estabeleceu-se a silhueta da estrutura, observando-se as distâncias de segurança e de proteção entre os cabos condutores e entre as partes vivas e aterradas da LT, a ampacidade e os campos interferentes. Considerou-se distâncias entre polos variantes com o cabo condutor utilizado, cadeias em I e polos constituídos por feixes circulares, com espaçamento entre condutores do feixe igual a 0,60m.

2. Para cada configuração básica estabelecida, a LT foi dimensionada considerando-se vários tipos de cabos condutores, sendo custeadas as alternativas tecnicamente viáveis, ou seja, atendendo a todos os condicionamentos listados na Tabela 2-2. A Figura 4-2 apresenta os custos de instalação e de perdas para estas LTs viáveis, confirmando a escolha do cabo Lapwing. As figuras a seguir (Figura 4-3 e Figura 4-4) apresentam os resultados principais para a LT com 6 cabos CAA Lapwing.

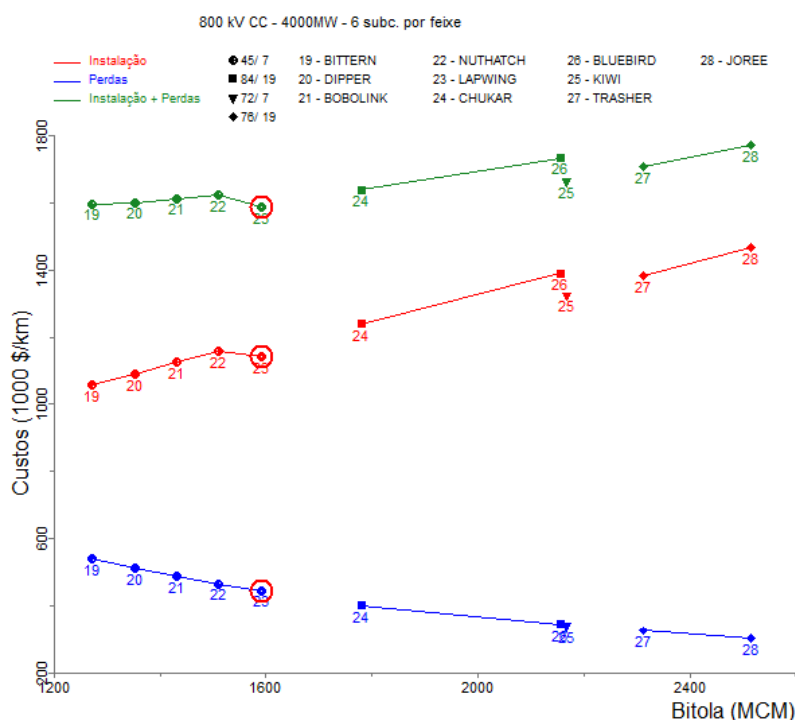


Figura 4-2 – Custos de perdas, instalação e total – 6 subcondutores, LT $\pm$ 800 kV CC, 4000 MW

ESTRUTURA ESTAIADA	PREDOM.	PERDAS MÁXIMAS (kW/km)	
Altura - torre / hmin (m)	49.5 / 19.9	Condutores + para-raios	
Força (kgf)		Joule (400 km)	77.84
Longitudinal	16688	Corona	5.79
Transversal	9804	Estações conversoras (400 km)	
Vertical	5458	Duas estações	0.000
Peso (kgf)		PARÂMETROS (CA-60Hz)	43.7°C 50°C
Estrutura	10268	Sequência positiva/negativa	
Fundação Principal	5002	Resistência (ohm/km)	0.00731 0.00742
Fundação Âncora	0	Reatância (ohm/km)	0.28781 0.28782
Cabos estruturais + estais	0	Admitância (uS/km)	5.67527 5.67601
Escavação (m3)		Corr. Hip. Resistência (400 km)	0.91458 0.91456
Volume	164	Corr. Hip. Reatância (400 km)	0.95704 0.95703
FAIXA DE PASSAGEM		Corr. Hip. Admitância (400 km)	1.02236 1.02237
Largura (m)		Sequência zero	
Por RI	0.0	Resistência (ohm/km)	0.23953 0.23908
Por RA	95.7	Reatância (ohm/km)	0.87908 0.88450
Por CE (Final)	108.0	Admitância (uS/km)	4.00775 4.01218
Por CI	48.4	Corr. Hip. Resistência (400 km)	0.81972 0.81846
Por CM	0.0	Corr. Hip. Reatância (400 km)	0.91506 0.91436
Por balanço	60.5	Corr. Hip. Admitância (400 km)	1.04955 1.04993
Valor no limite da faixa		PARÂMETROS (CA-0.1Hz)	43.7°C 50°C
RI (dB/1microV/m)	29.3	Impedância por pólo	
RA (dB(A))	41.5	Indutância - própria (mH/km)	2.38402 2.38403
CE (kV/m)	5.00	Indutância - mútua (mH/km)	1.61986 1.61987
CI (nA/m2)	0.6	PARÂMETROS (CC)	43.7°C 50°C
CM (uT)	2.9	Impedância por pólo	
Valor máximo na faixa		Resistência (ohm/km)	0.00652 0.00665
CE (kV/m)	19.97	DISTÂNCIAS (m)	
CI (nA/m2)	19.9	Pólo A: Mín. entre cabos	0.600
CM (uT)	21.9	Pólo A: Máx. Vertical	1.039
Dist. ao valor máximo (m)		Pólo A: Máx. Horizontal	1.200
CE - (m)	-14.00	Pólo B: Mín. entre cabos	0.600
CI - (m)	-12.00	Pólo B: Máx. Vertical	1.039
CM - (m)	0.00	Pólo B: Máx. Horizontal	1.200
Condutor na faixa		Pólos A-B: Mín. entre cabos	18.800
ângulo de balanço	30.7		

Figura 4-3 - Principais resultados para a LT ± 800 kV CC - 6 x Lapwing

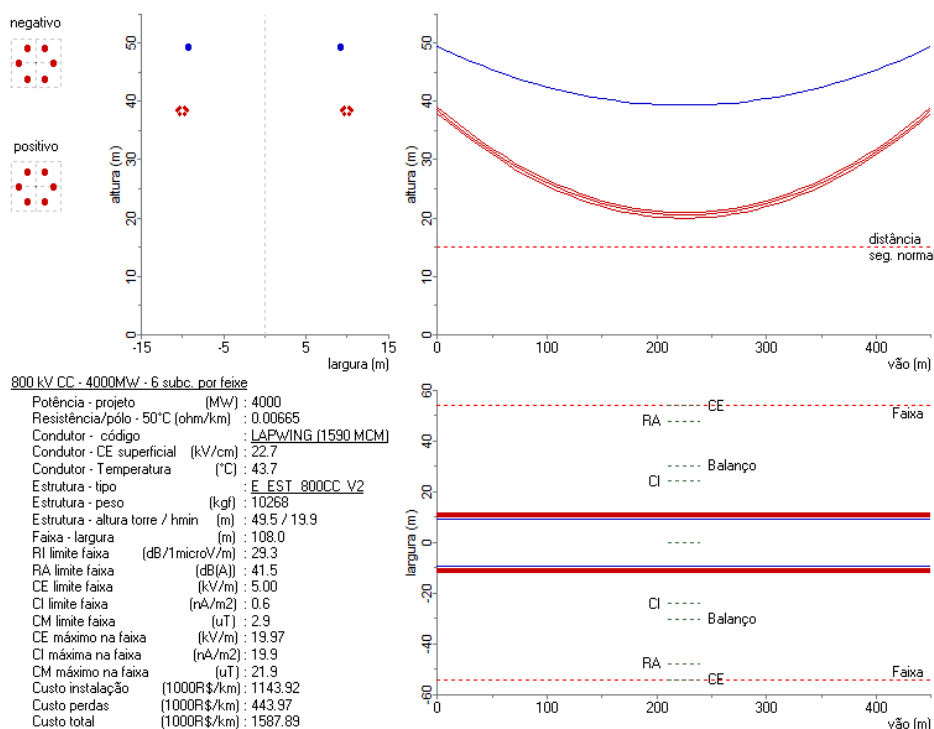


Figura 4-4 - Planta perfil (ELEKTRA) – configuração CAA 6x Lapwing

4.5.2 Condutor recomendado

Os estudos conduzidos na fase de dimensionamento dos bipolos que analisou os custos do conjunto das instalações (linhas e conversoras) e as perdas totais (bipolos CC e sistema CA) recomendou a utilização do cabo “Lapwing”. As análises aqui conduzidas confirmaram a adequação da solução já recomendada de se utilizar feixes de 6 condutores tipo CAA de 1590 MCM por polo na linha de transmissão em ± 800 kV CC.

4.6 Sumário da configuração básica da linha de transmissão

Com base nas análises realizadas ficou indicada para linha de transmissão em ± 800 kV Xingu – Terminal Rio uma solução composta por 6 condutores tipo CAA de 1590 MCM por polo, “Lapwing”, dispostos geometricamente como indicado na Figura 4-5 e detalhado na Figura 4-3. Foram considerados polos com feixes circulares, distribuídos horizontalmente, com condutores dos feixes espaçados de 0,60 m, e cabos para-raios tipo ERA 3/8”. A estrutura predominante é tipo estaiada.

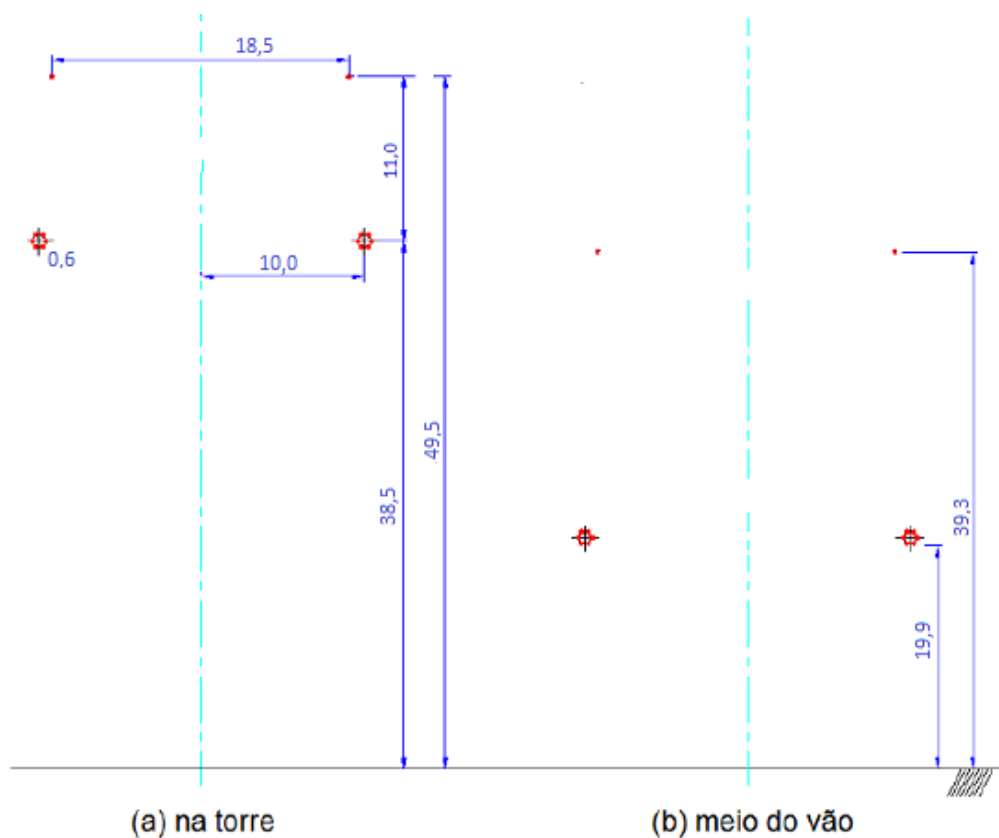


Figura 4-5 Disposição geométrica dos condutores e para-raios da linha de transmissão em ± 800 kV

5 MODELAGEM DA REDE

A rede considerada para simulações neste estudo, correspondeu à prevista para o horizonte 2019/2020, quando da entrada em operação do segundo bipolo em ± 800 kV da conversora de Xingu.

Foram selecionados dois cenários de intercâmbio entre os sub sistemas Norte/Nordeste e Sudeste/Centro Oeste do SIN, representativos de situações dimensionadoras, indicadas no Relatório R1 [2], para as condições de transmissão direta (Norte-Sul) e transmissão inversa (Sul-Norte).

5.1 Cenários de intercâmbio entre sub sistemas

Com base nas análises do relatório R1 [2], mantendo a denominação utilizada naquele relatório, foram selecionados para representação da rede analisada os cenários descritos a seguir.

5.1.1 Cenário Norte - Sul (2L)

É o cenário de máxima exportação da região Norte. Este cenário representa o período úmido da região Norte caracterizado pelo despacho elevado das usinas de Belo Monte (18 máquinas) bem como as usinas de Tucuruí I/II (23 máquinas).

Para representar a condição mais desfavorável na região Sudeste foi utilizado o patamar de carga leve.

Nesta condição, considerou-se para o elo de Itaipu despacho de 6.200 MW que corresponde a geração máxima histórica ocorrida em 12/09/00, que apresentou geração nas máquinas de 50Hz de 6.667 MW, 6.390 MW nas de 60Hz, totalizando 13.057 MW. No elo do Madeira foi considerado capacidade instalada das conversoras (6.300 MW) que corresponde ao despacho pleno das máquinas e Santo Antônio e Jirau.

A Figura 5-1 apresenta de forma ilustrativa a condição de despacho das usinas da região Sudeste no cenário adotado.

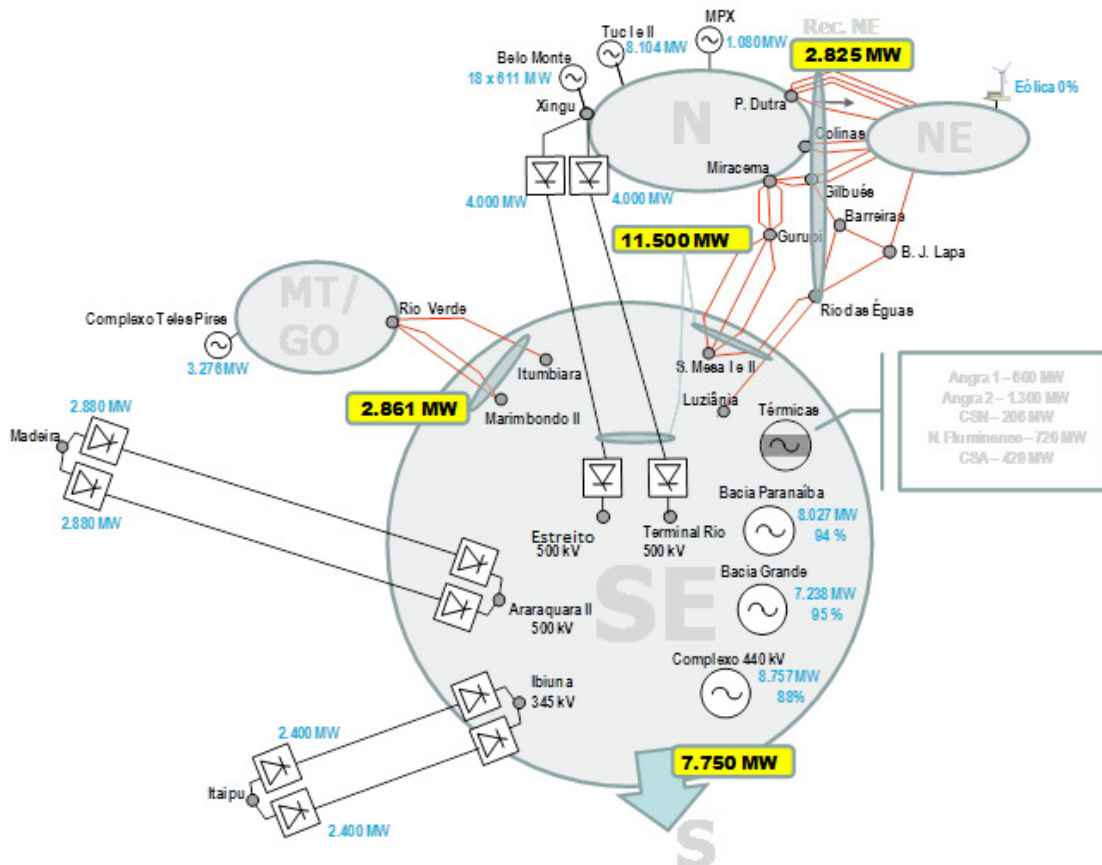
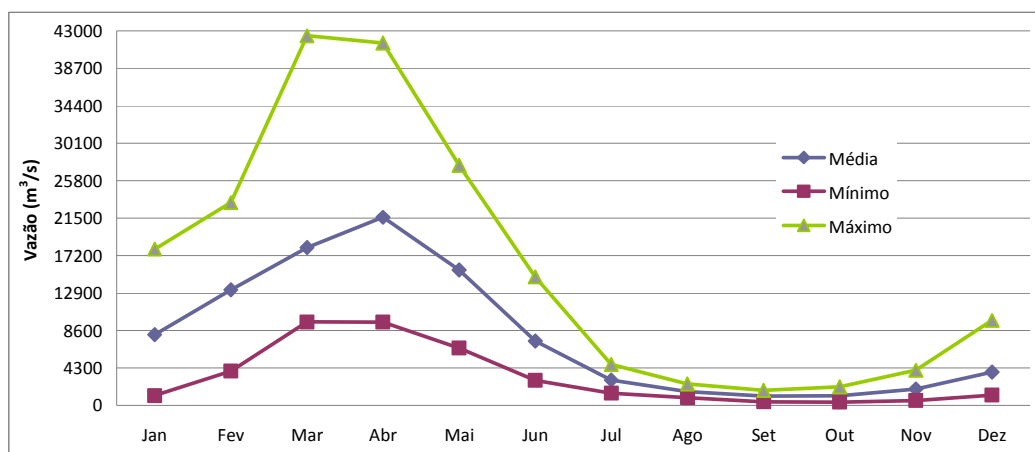


Figura 5-1 – Despacho das principais usinas na região Sudeste. Cenário N-> SE (CENÁRIO 2L).

Neste cenário, os barramentos de Tucuruí I e II devem estar separados com vistas a evitar superação nestas subestações, conforme recomendação em [2].

5.1.2 Cenário SE-> N-NE (7P)

Este cenário é caracterizado pelo período seco da região Norte. A usina Belo Monte (casa de força principal) por não ter reservatório regularizador, sofre influência da vazão do rio Xingu (Figura 5-2) que varia muito ao longo do ano além da necessidade de manter os requisitos mínimos de vazão defluente estabelecido pela licença de operação ambiental - LO. Deste modo, o despacho da casa de força principal poderá ser zero no período seco, de modo que foi previsto no edital de geração da usina Belo Monte a disponibilidade de 3 máquinas operando como síncrono.



Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Média	8134	13297	18132	21610	15555	7388	2929	1585	1085	1116	1892	3835
Mínimo	1132	3960	9585	9564	6605	2880	1421	911	425	380	560	1176
Ano	2003	2003	1971	1951	1998	1998	1998	1998	1969	1969	1969	1969
Máximo	17948	23290	42442	41621	27575	14775	4723	2484	1756	2146	4047	9778
Ano	1990	1982	1943	1967	1955	1955	1995	1946	1956	1986	1986	1989

Resolução ANA, N° 740, de 06 de outubro de 2009

Figura 5-2 – Vazões médias mensais do rio Xingu – (m³/s) – 1931 a 2007

Para avaliar condição mais desfavorável para o dimensionamento do elo neste cenário em que o inversor será na região Norte, foi considerado a condição reduzida de despacho das máquinas de Tucuruí I (7 máquinas, onde 2 operam como compensadores síncrono), estando desligadas as máquinas de Tucuruí II.

Foi utilizado o patamar de carga pesada por possibilitar a máxima exportação da região Sudeste para a região Norte no período seco da região.

Cabe ressaltar que neste cenário é possível manter os barramentos de Tucuruí I e II diretamente conectados, tendo em vista a necessidade de se manter um nível de curto-circuito elevado em Xingu, conforme recomendação em [2].

5.2 Representação da rede elétrica

A rede do Sistema Interligado Nacional (SIN) foi representada no programa PSCAD, detalhadamente (rede retida) nas regiões no entorno das vizinhanças dos pontos de conexão dos elos de corrente contínua objetos dos estudos. A partir das barras limites dessa rede retida, a representação foi feita através de circuitos equivalentes, calculados com o programa ANAFAS do Cepel.

A experiência obtida com a representação da rede estudada nos estudos do Relatório R2, relativo ao primeiro bipolo em ± 800 kV Xingu – Estreito, contribuiu para a delimitação da rede retida. Assim, diferentemente do estudo desse primeiro bipolo, quando se estabeleceu gradativamente a representação da rede retida, partindo-se de equivalentes simplificados até uma rede mais ampla, neste estudo, iniciou-se com a representação da rede retida mais ampla, com uma parte da rede retida na região Norte/Nordeste, outra parte na região Sudeste, como ilustrado na Figura 5-3.

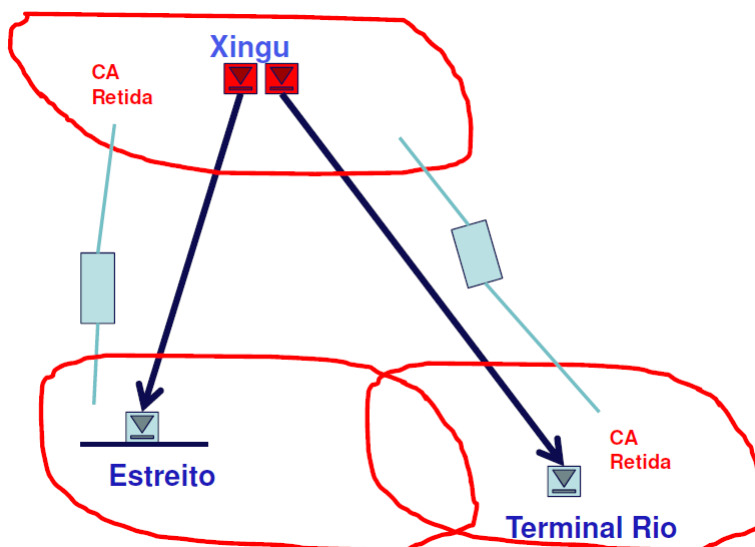


Figura 5-3 – Esquema ilustrativo da representação da rede para simulação no PSCAD

Para delimitação da rede retida foram considerados os seguintes critérios:

- A rede do Sudeste foi retida pelo menos até à segunda vizinhança do entorno da SE Terminal Rio 500 kV (requisito para simulações de transitórios eletromagnéticos) e retida até à primeira vizinhança do entorno da SE Estreito 500 kV.
- A rede retida do Sudeste foi também ampliada para incorporar as barras de conexão das conversoras CCAT ligadas em Araraquara 2 (Madeira) e Ibiuna (Itaipu) com vistas à análise de *multi-infeed*.
- A rede da região Norte/Nordeste foi utilizada à semelhança dos estudos do primeiro bipolo, Xingu – Estreito, com revisões para o horizonte agora considerado.

Os níveis de curto-circuito obtidos na rede completa (SIN) e nos equivalentes propostos são apresentados no Anexo I bem como os valores das tensões, fluxos de potência ativa e reativa para os cenários **2L** e **7P**.

5.2.1 Configuração da rede retida Norte/Nordeste

Com base na configuração do sistema de transmissão previsto quando da entrada do 2º bipolo, a Figura 5-4 apresenta um diagrama esquemático da rede de transmissão retida representada para a região Norte/Nordeste.

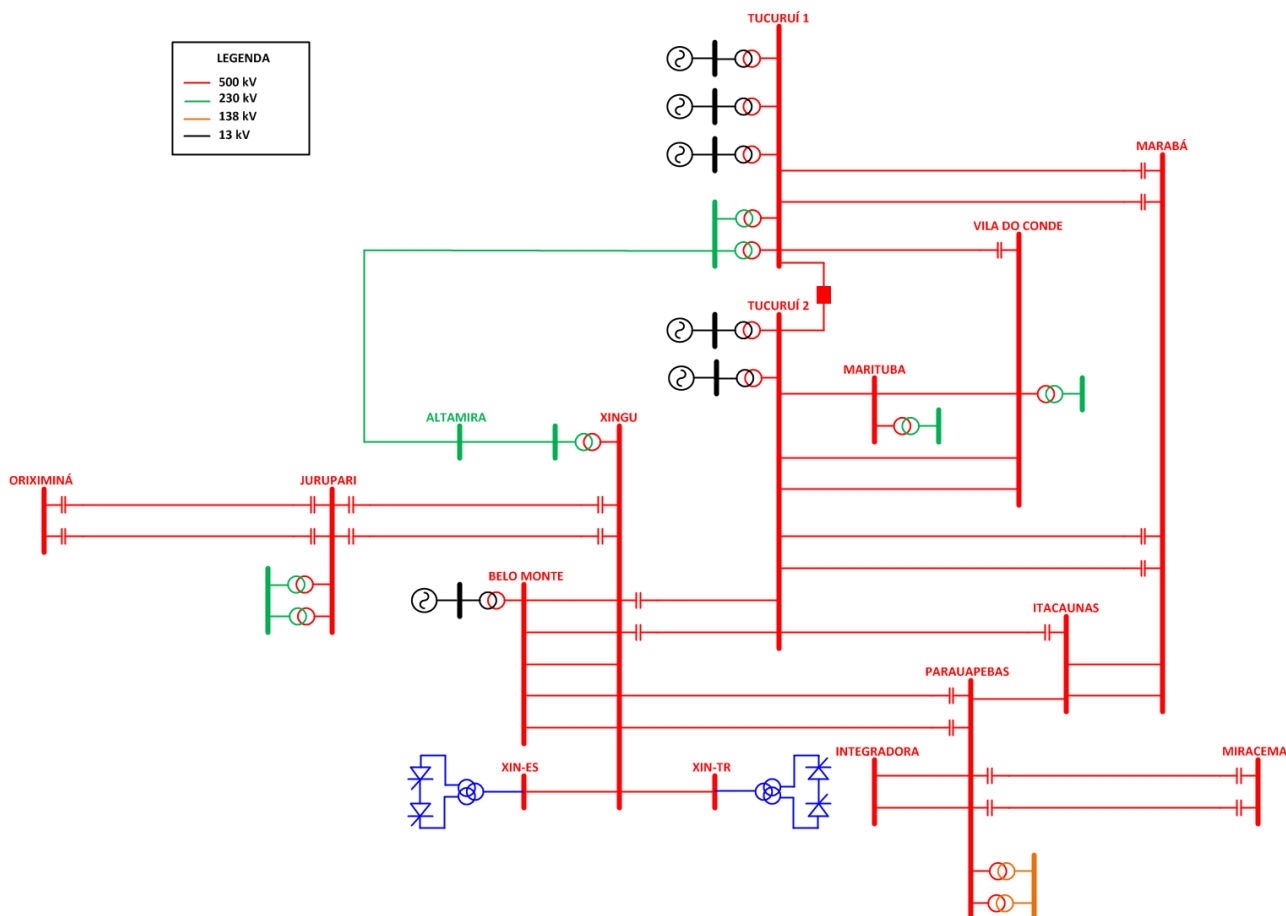


Figura 5-4 – Rede retida Norte/Nordeste.

5.2.2 Configuração da rede retida Sul/Sudeste

Com base na configuração do sistema de transmissão prevista quando da entrada do 2º bipolo, a Figura 5-5 apresenta um diagrama esquemático da rede de transmissão representada para a região Sul/Sudeste.

Uma das razões da grande extensão rede retida, foi a avaliação conjunta do impacto dos dois bipolos que ligam Xingu à região sudeste. As barras adjacentes às barras das conversoras são de grande importância para correta análise dos fenômenos transitórios, sejam eles eletromagnéticos ou eletrodinâmicos. À medida que se distancia das barras das conversoras, as interferências provocadas por barras de segunda e terceira vizinhança são de menor impacto, portanto o erro aceitável nessas barras pode ser flexibilizado em troca de um melhor desempenho do modelo.

Como o número de elementos representados foi consideravelmente alto, procurou-se reduzir ao máximo a rede de equivalentes de modo a preservar um erro mínimo definido para cada conjunto de barras. Tal erro é definido a partir dos níveis curto circuito, sendo a referência os níveis de curto circuito da rede completa. De acordo com a relevância de cada barra, definiu-se as tolerâncias admissíveis conforme indicado na Tabela 5-1.

Tabela 5-1 – Erro admissível no ajuste do equivalente

Vizinhança	Erro (%)
0	8
1	10
2	20

As barras das conversoras são consideradas como vizinhança 0, por se tratar da região de maior interesse a tolerância de erro é reduzida. São consideradas barras de vizinhança 1 as adjacentes às conversoras, as demais barras foram classificadas como de vizinhança 2.

Definidos os limites de erro, o equivalente original gerado pelo ANAFAS foi trabalhado de forma a reduzir o número de elementos equivalentes. Dessa forma atingiu-se considerável redução na rede equivalente, como mostrado na Tabela 5-2.

Tabela 5-2 – Número de impedâncias equivalentes da rede inicial (completa) e após a redução do equivalente (cenário 2L)

Equivalentes	ANAFAS (Inicial)	Após redução
Total de Impedâncias Próprias	41	29
Total de Impedâncias de Transferência	163	38
Total de Equivalentes	204	67

Com a rede reduzida foram calculadas as diferenças dos níveis de curto circuito em relação à rede completa, como ilustrado na Tabela 5-3 para algumas das barras mais relevantes da rede modelada.

Tabela 5-3 – Comparação entre valores de curto circuito da rede equivalente e da rede completa em barras selecionadas – Cenário 2L

Barra	Curto Monofásico (%)	Curto Trifásico (%)
Terminal Rio 500 kV	6,58	4,17
Estreito 500 kV	2,45	4,52
Xingu 500 kV	2,44	4,51
Fernão Dias 500 kV	7,09	4,07
Nova Iguaçu 500 kV	6,80	6,86
Adrianópolis 500 kV	4,41	0,25

Após a modelagem da rede no programa PSCAD foram feitos testes de consistência, como a comparação entre o fluxo de potência e a comparação entre os valores das correntes de curto-circuito. Na Tabela 5-4 é apresentada a comparação entre os níveis de curto-circuito da rede modelada no ANAFAS e no PSCAD.

Tabela 5-4 – Comparação entre os valores das correntes de curto-circuito obtidas com o programas ANAFAS e PSCAD – cenário 2L.

Barra	ANAFAS (kA)		PSCAD (kA)		ERRO (P.U.)	
	3φ	1φ	3φ	1φ	3φ	1φ
T. Rio	19,7	18,19	19,79	19,15	0	-0,05
Xingu 500 kV	48,51	49,6	46,01	48,67	0,05	0,02
Belo Monte 500 kV	49,5	55,97	47,38	54,41	0,04	0,03
Tucuruí 2	41,71	38,74	37,79	34,67	0,1	0,12
Adrianópolis	18,94	18,62	19,19	18,99	-0,013	-0,019
Estreito	26,55	19,52	25,9	20,39	0,03	-0,04
F.DIAS-SP500	23,05	34,23	23,24	34,06	-0,01	0

5.2.4 Rede equivalente para o cenário 7P

Para simplificação da modelagem, tentou-se em primeiro momento manter a mesma rede equivalente concebida no cenário 2L, modificando-se apenas os valores dos elementos equivalentes pelos gerados para o caso 7P. Verificou-se que o erro encontrado ficou pouco superior aos limites definidos, sendo necessário a adição de duas impedâncias próprias para adequação. A seguir segue o resumo dos resultados para cenário 7P.

Tabela 5-5 - Número de impedâncias equivalentes da rede inicial (completa) e após a redução do equivalente (cenário 7P)

Equivalentes	ANAFAS (Inicial)	Após redução
Total de Impedâncias Próprias	43	31
Total de Impedâncias de Transferência	151	38
Total de Equivalentes	194	71

Com a rede reduzida foram calculadas as diferenças dos níveis de curto circuito em relação a rede completa, como ilustrado na Tabela 5-6, para algumas das barras mais relevantes da rede modelada.

Tabela 5-6 - Comparação entre valores de curto circuito da rede equivalente e da rede completa em barras selecionadas – Cenário 7P

Barra	Erro CC Monofásico (%)	Erro CC Trifásico (%)
Terminal Rio 500 kV	2,8	3,3
Estreito 500 kV	1,7	3,2
Xingu 500 kV	0,6	1,0
Fernão Dias 500 kV	6,0	6,1
Belo Monte 500 kV	0,6	0,9
Tucuruí 2 500 kV	1,4	2,1

Após a modelagem da rede no programa PSCAD foram feitos testes de consistência, como a comparação entre o fluxo de potência e a comparação entre os valores das correntes de curto-circuito. Na Tabela 5-4 é apresentada a comparação entre os níveis de curto-circuito da rede modelada para o cenário 7P no ANAFAS e no PSCAD.

Tabela 5-7 - Comparação entre os valores das correntes de curto-circuito obtidas com o programas ANAFAS e PSCAD – cenário 7P

Barra	ANAFAS (kA)		PSCAD (kA)		ERRO (P.U.)	
	3φ	1φ	3φ	1φ	3φ	1φ
T. Rio	30,58	23,86	28,02	22,48	0,09	0,06
Xingu 500 kV	23,74	21,36	20,57	18,01	0,15	0,19
Belo Monte 500 kV	22,91	21,13	20,01	20,51	0,14	0,03
Tucuruí 2	24,85	21,31	21,95	19,37	0,13	0,1
ADRIAN-RJ500	27,2	21,41	24,74	19,98	0,10	0,07
ESTREI-MG500	31,75	24,06	29,83	22,6	0,06	0,06
F.DIAS-SP500	26,73	39,64	26,16	38,34	0,02	0,03

É possível verificar pelos valores apresentados nas tabelas acima que os níveis de curto-circuito ficaram próximos, de forma a validar a rede modelada no PSCAD. Ressalta-se ainda que os níveis

observados no PSCAD são ligeiramente inferiores ao equivalente do ANAFAS, o que torna a análise das sobretensões conservativa.

5.2.5 Representações para os diferentes estudos realizados

A condição inicial de operação da rede foi ajustada para o fluxo de potência de referência, considerando os geradores representados por equivalentes Thevenin, com fonte ideal atrás de reatância, e os elos de CCAT através de fontes de corrente. A etapa seguinte foi substituir as fontes de corrente correspondentes aos elos em ± 800 kV Xingu – Estreito e Xingu – Terminal Rio, pelo modelo de elo CCAT desenvolvido para os estudos do Relatório R2 do primeiro bipolo, Xingu – Estreito. Com esse ajuste foram realizadas as simulações para análise de transitórios eletromagnéticos, como detalhado no capítulo 7 deste relatório.

A representação da rede utilizada nesses estudos de transitórios eletromagnéticos foi referência básica para as representações utilizadas nos demais estudos apresentados neste relatório.

Para as análises de *multi-infeed*, objeto do capítulo 9, foram adicionados à representação da rede dos estudos de transitórios, cenário 2L, modelos específicas dos elos em ± 600 kV do sistema de transmissão de Itaipu e do sistema de transmissão do rio Madeira.

Para as análise de desempenho dinâmico, objeto do capítulo 8, foram inseridas na rede referência dos estudos de transitórios eletromagnéticos, modelos de máquinas e controles, de um conjunto de geradores, em substituição aos correspondentes equivalentes Thevenin.

5.3 Critérios para modelagem da rede

5.3.1 Linhas de transmissão CA

As linhas de transmissão da rede CA foram representadas pelo modelo de parâmetros constantes e distribuídos (Bergeron) conforme dados apresentados no Anexo II. Ressalta-se que as linhas com comprimento menor que 100 km foram modeladas pelo circuito Pi equivalente.

5.3.2 Transformadores

Os transformadores modelados no PSCAD utilizaram o modelo clássico com representação da curva de saturação. Ao contrário do usualmente conhecido, como dados fornecidos a partir da

curva $V \times I$, esses dados são calculados a partir da curva fluxo x pico de corrente conforme exemplo apresentado no Anexo III.

5.3.3 Geradores e compensadores síncronos

Na modelagem básica para as análises de transitórios eletromagnéticos e de *multi-infeed* os geradores foram representadas pelo equivalente de Thevenin, ou seja, uma fonte de tensão constante atrás de reatância subtransitória de eixo direto. Não foi considerada a ação dos reguladores de tensão e de velocidade.

Na modelagem para análise de transitórios eletromecânicos (dinâmica) as máquinas indicadas na Tabela 5-8 foram selecionadas para representação através de modelos de máquinas elétricas e de controles, como detalhado no capítulo 8 deste relatório.

Tabela 5-8 – Relação de geradores selecionados para representação mais apurada nas análises de dinâmica

Geradores da usina	Tipo de representação(*)
Belo Monte principal	Modelo da máquina, RT, PSS
Tucuruí I	Modelo da máquina, RT, PSS
Tucuruí II	Modelo da máquina, RT, PSS
Angra I	Modelo da máquina, RT, PSS
Angra II	Modelo da máquina, RT, PSS
Angra III	Modelo da máquina, RT, PSS
Termorrio I	Modelo da máquina, RT, PSS
Termorrio II	Modelo da máquina, RT, PSS
CS de Grajaú	Modelo da máquina, RT

(*) RT=Regulador de Tensão; PSS=Power System Stabilizer.

5.3.4 Compensadores estáticos

Foram modelados como elementos em derivação (capacitores ou reatores) fixos calculados com base no ajuste dos casos de fluxo de potência prévio. Não se considerou a ação do controle.

5.3.5 Reatores em derivação

Foram representados como impedância fixa, com fator de qualidade igual a 300. Não foram consideradas as respectivas saturações.

5.3.6 Cargas

As cargas foram modeladas como ramos lineares trifásicos, passivos e na configurações Y aterrado. Os valores de impedância são calculados internamente pelo programa a partir do valor de potência informado e permanece fixo ao longo da simulação.

5.3.7 Linhas de transmissão CC

As linhas cc integrantes dos elos em 800 kV foram representada no PSCAD pelo modelo de parâmetros dependentes da frequência. Os dados para o ajuste do modelo no PSCAD e utilizados nos estudos são apresentados na Figura 5-6.

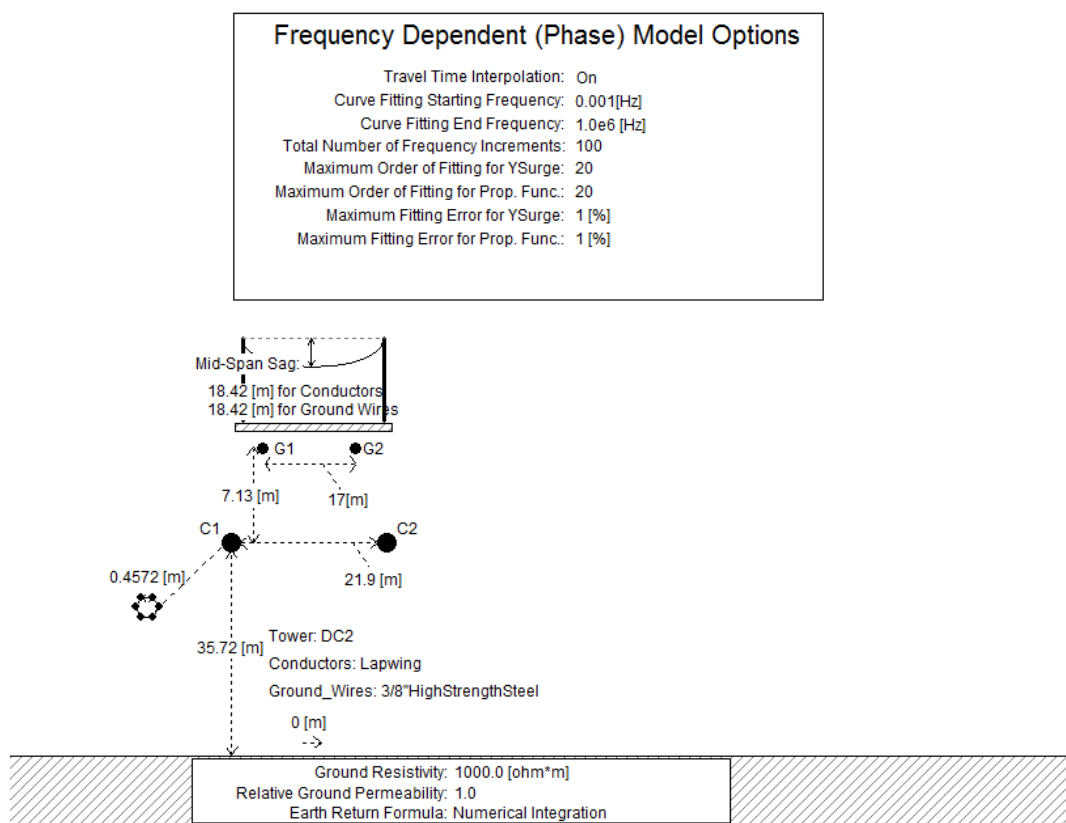


Figura 5-6 – Representação da linha CC no PSCAD variando com a frequência.

Posteriormente, como indicado no capítulo 4, a concepção básica recomendada para a linha foi ajustada, resultando em uma distância entre polos igual a 20 metros, sem alteração na resistência por polo, por unidade de comprimento.

5.3.8 Representação dos elos CCAT

Na representação dos elos CCAT 800 kV foi utilizado o modelo geral desenvolvido previamente

para os estudos do Relatório R2 do primeiro bipolo em 800 kV, Xingu – Estreito, cuja concepção geral está apresentada no capítulo 6 deste relatório.

Nas representações dos elos CCAT em 600 kV utilizadas na análise de *multi-infeed* foram utilizados modelos específicos, como indicado no capítulo 9 deste relatório.

6 ELO DE CORRENTE CONTÍNUA

6.1 Descrição do circuito principal

Os estudos do Relatório R1 [2] indicaram a implantação do elo de corrente contínua em ± 800 kV, entre as subestações de Xingu 500 kV e Terminal Rio 500 kV, com as características nominais sumarizadas na Tabela 6-1.

Tabela 6-1 – Características nominais básicas das conversoras.

Sentido da transmissão	Retificadora	Inversora
Xingu – Terminal Rio (transmissão direta)	<u>Xingu</u>	<u>Terminal Rio</u>
Potência CC (MW)	4.000	3.850
Tensão CC (kV)	800	~760
Corrente (kA)	2,5	2,5
Terminal Rio – Xingu (transmissão reversa)	<u>Terminal Rio</u>	<u>Xingu</u>
Potência CC (MW)	3.270	3.151
Tensão CC (kV)	800	~767
Corrente (kA)	2,04	2,04

Como detalhado no Relatório R1 [1][2], o dimensionamento da potência CC da conversora Terminal Rio, operando como inversora, foi estimada com base na linha de transmissão com comprimento de 2.439 km e resistência à temperatura de 20 °C. Quanto à tensão, foi estimada com base nesse comprimento de linha e temperatura de 50 °C. Na transmissão reversa a potência CC da conversora Terminal Rio, operando como retificadora foi estabelecida em 3.270 MW. Nas simulações foi considerado cada polo com um conversor de 12 pulsos.

6.1.1 Filtros CC

Foi considerado um filtro CC genérico sintonizado para 2ª/12ª/36ª harmônicas foi utilizado no lado CC. A Figura 6-1 apresenta a configuração do filtro CC.

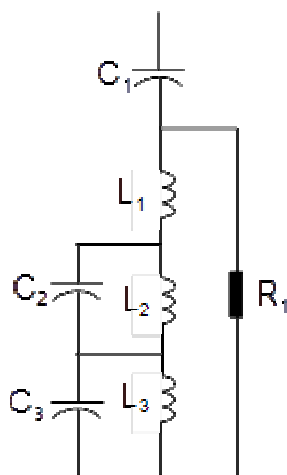


Figura 6-1 – Representação dos filtros CC dos lados retificador e inversor

Os valores dos seus componentes são apresentados na Tabela 6-2.

Tabela 6-2 – Valor dos componentes dos filtros CC

Filter CC	C ₁ (μF)	C ₂ (μF)	C ₂ (μF)	L ₁ (mH)	L ₂ (mH)	L ₃ (mH)	R ₁ (Ω)
	1.05	3.285	5.073	6.501	405.0	8.207	3000

A Figura 6-2 mostra a resposta da frequência dos filtros CC.

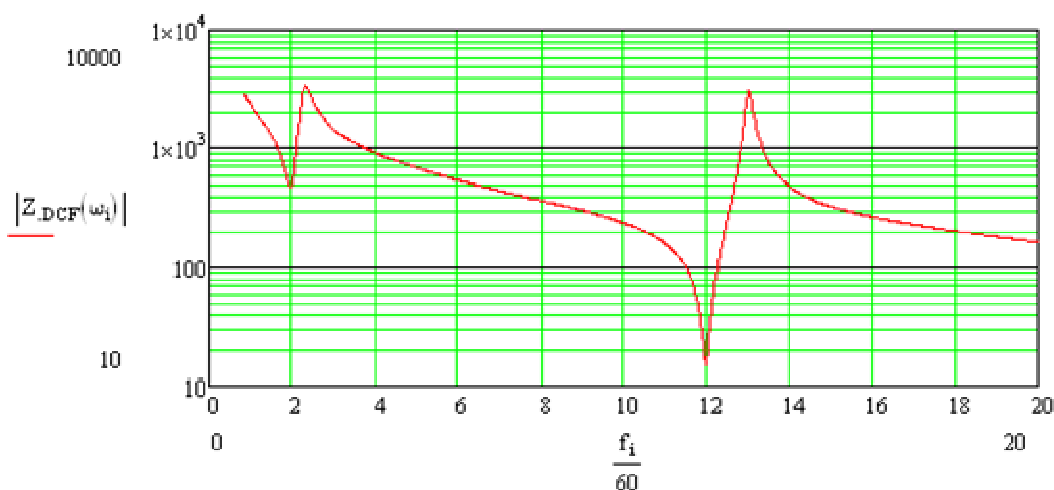


Figura 6-2 - Resposta da frequência dos filtros CC

6.1.2 Linha CC

Os parâmetros da linha CC foram abordados no capítulo 4. Para efeito das simulações, a resistência máxima da linha, considerando 50 °C de temperatura e frequência ~0 Hertz, foi utilizado o valor calculado pelo ELEKTRA do CEPEL conforme apresentado na Tabela 6-3.

Tabela 6-3 – Resistência da linha cc entre Xingu e Terminal Rio

Condutor	Temperatura (°C)	Resistência/km (Ω)	R _{Linha} (Ω) ⁴	P _{Loss} bipolar (MW) ⁵
6x Lapwing (1590 MCM)	25 ¹	0,00603	14,71	183,84
	50 ²	0,00663	16,17	202,13
	50 ³	0,00665	16,22	202,74
	60 ²	0,00687	16,76	209,45

Notas:

- 1) valores referencias do "RedBook"
- 2) estimado usando $R_2 = R_1(T+t_2)/(T+t_1)$ onde $T = 228^{\circ}\text{C}$
- 3) Programa ELEKTRA do CEPEL
- 4) calculado com a linha de 2439 km
- 5) $2I_d^2 R_{Linha}$ onde $I_d = 2,5 \text{ kA}$

6.1.3 Transformador conversor

Para os transformadores das conversores foi assumido uma impedância de 0,15 p.u. na base do próprio transformador.

▪ Curva de saturação utilizada

A característica de saturação recomendada foi baseada em dados do projeto básico das conversoras do sistema de transmissão CCAT do Madeira, como utilizado nos estudos do Relatório R2 do primeiro bipolo [5].

Os dados das curvas de saturação têm como base a potência do transformador conversor e estão no formato de entrada de dados do programa PSCAD. Os dados fornecidos a partir da curva V x I, foram calculados a partir da curva fluxo×pico de corrente, descritas no Anexo III.

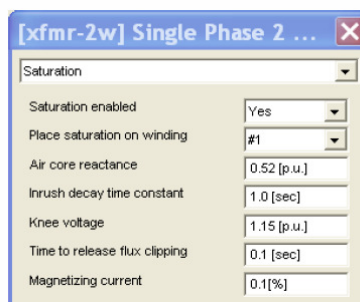


Figura 6-3 – Dados da curva de saturação do transformador conversor utilizados no PSCAD

▪ **Representação dos taps**

Os “taps changers” foram adicionados aos transformadores conversores da seguinte forma:

- Na subestação de Xingu, foram utilizados 31 steps de 1,25%. A posição nominal é TCP = 26, dando a relação de espiras nominal do transformador conversor. Com a tensão primária nominal e TCP = 1 resulta em uma tensão no enrolamento do lado válvula igual a 0,762 pu, adequado para operação com tensão reduzida no lado CC.
- Na subestação de T. Minas, foram utilizados 32 steps de 1,25%. A posição nominal é TCP = 27, dando a relação de espiras nominal do transformador conversor. Com a tensão primária nominal e TCP = 1 resulta em uma tensão no enrolamento do lado válvula igual a 0,755 pu, adequado para operação com tensão reduzida no lado CC.

6.1.4 Reator de alisamento

Foi considerado um reator de alisamento de 300 mH, dividido em dois reatores de 150 mH, um na linha (barramento 800kV) e outro no neutro. Esta divisão foi considerada de modo a reduzir a ondulação de tensão (“ripple”) entre as pontes de 6 pulsos da conversora. Esta consideração tem sido praticada em outros projetos de 800 kV.

6.1.5 Linhas de eletrodos

De modo a tornar o modelo mais completo, foi considerado uma linha de eletrodo de 50 km em ambas as estações.

6.1.6 Capacitores de surto

Os capacitores de surto são instalados na barra de neutro de cada polo. Essa representação foi visada para tornar o modelo mais completo, considerando valores típicos (14 μ F).

6.1.7 Resumo dos dados do circuito principal

A Tabela 6-4 e Tabela 6-5 resumem os dados dos circuitos principais de cada elo representado nas simulações de um bipolo em ambos os sentidos considerados no programa PSCAD. Estes parâmetros dos bipolos não são definitivos, sendo utilizados para mostrar a viabilidade do elo de CCAT e deverão ser ajustados em função do detalhamento final.

Tabela 6-4 – Dados do circuito principal do elo CCAT (Xingu-Terminal Rio). Cenário 2L.

Retificador (Xingu)	$U_{CA} = 500 \text{ kV}$		
	$P_d = 4.000 \text{ MW}$	$U_d = \pm 800 \text{ kV}$	$I_d = 2.500 \text{ A}$
	$U_{d6} = 400 \text{ kV}$	$\alpha_{nom} = 15 \text{ degrees}$	$d_{xnom} = 0,075 \text{ pu}$ $d_{rnom} = 0,003 \text{ pu}$
	Resistência do Reator de Alisamento: $R_l = 0,06 \Omega$	Queda de Tensão no Tiristor/6p: $U_t = 0,36 \text{ kV}$	Indutância do Reator de Alisamento: $L_l = 2 \times 150 \text{ mH}$
	$U_{dionom} = 451,06 \text{ kV}$		
Inversor (T. Rio)	$U_{CA} = 500 \text{ kV}$		
	$P_d = 3.850 \text{ MW}$	$U_d = \pm 764.4 \text{ kV}$	$I_d = 2.500 \text{ A}$
	$U_{d6} = 382,21 \text{ kV}$	$\gamma_{nom} = 17 \text{ degrees}$	$d_{xnom} = 0,075 \text{ pu}$ $d_{rnom} = 0,003 \text{ pu}$
	Resistência do Reator de Alisamento: $R_l = 0,06 \Omega$	Queda de Tensão no Tiristor/6p: $U_t = 0,36 \text{ kV}$	Indutância do Reator de Alisamento: $L_l = 2 \times 150 \text{ mH}$
	$U_{dionom} = 431,6 \text{ kV}$		
	Trafo MVA: 1181/3 = 393,63 MVA MVA /phase	Tensão Nominal do Trafo: 500/ $\sqrt{3}$ / 333,9/ $\sqrt{3}$ YY 500/ $\sqrt{3}$ / 333,9 YD	Reatância de Dispersão do Trafo: $X_l = 0,15 \text{ pu}$
	Trafo MVA: 1130/3 = 376,67 MVA /phase	Tensão Nominal do Trafo: 500/ $\sqrt{3}$ / 319,2/ $\sqrt{3}$ YY 500/ $\sqrt{3}$ / 319,2 YD	Reatância de Dispersão do Trafo: $X_l = 0,15 \text{ pu}$

Tabela 6-5 – Dados do circuito principal do elo CCAT (Terminal Rio-Xingu). Cenário 7P. (Operação reversa)

Retificador (T. Rio)	$U_{CA} = 500 \text{ kV}$		
	$P_d = 3.270 \text{ MW}$	$U_d = \pm 800 \text{ kV}$	$I_d = 2.044 \text{ A}$
	$U_{d6} = 400 \text{ kV}$	$\alpha_{nom} = 15 \text{ degrees}$	
	$U_{dionom} = 451,06 \text{ kV}$		
Inversor (Xingu)	$U_{CA} = 500 \text{ kV}$		
	$P_d = 3.151 \text{ MW}$	$U_d = \pm 770.9 \text{ kV}$	$I_d = 2.044 \text{ A}$
	$U_{d6} = 385,46 \text{ kV}$	$\gamma_{nom} = 17 \text{ degrees}$	
	$U_{dionom} = 431,6 \text{ kV}$		

6.2 Detalhamento dos filtros CA

Quando o terminal Xingu opera como retificador (cenário 2L), a potência reativa requisitada por seus conversores leva a necessidade de suporte de potência reativa de cerca de 1.000 Mvar para cada polo nas condições nominais destes.

A Figura 6-4 apresenta as considerações para o cálculo do consumo da conversora.

Conversora Retificadora (Dados de Entrada)			
P_{PoloN}	2000 MW	dxR 0,075	Queda Resistiva do Transf. Conv. (pu)
U_{dPRN}	800 kV	drR 0,003	Queda indutiva do Transf. Conv.(pu)
α_N	15 °	U_T 0,36	Queda de tensão no Tiristor (kV)
		R_L 0,06	Resist. do Reator de Alisamento (Ohms)
Valores calculados			
I_{dN}	2,500 kA		
I_d	2,500 kA		
U_{dioRN}	451 kV		
U_{VRN}	334,0 kV		
I_{VRN}	2,0 A		
Trafo	1181 MVA		

	radianos	graus
$\alpha_R (\alpha, I_d)$	0,35	20,32
$X_R (\alpha, I_d)$	0,44	
Q_{dRN}	999,4	Mvar

Figura 6-4 – Formulação básica para o cálculo dos filtros CA. Retificadora Xingu.

Conversora Inversora (Dados de Entrada)

P_{PoloN}	1925 MW	dxR	0,075	Queda Resistiva do Transf. Conv. (pu)
R_{Line}	14,23 Ohm	drR	0,003	Queda indutiva do Transf. Conv. (pu)
U_{dPIN}	764,4 kV	U_T	0,36	Queda de tensão no Tiristor (kV)
γ_N	17 °	R_L	0,06	Resist. do Reator de Alisamento (Ohms)

Valores calculados

I_{dN}	2,500 kA
I_d	2,500 kA
U_{dioIN}	431,6 kV
U_{VIN}	319,6 kV
I_{VIN}	2,04 A
Trafo	1130 MVA

	radianos	graus
$\gamma_l (\gamma, I_d)$	0,34	19,26
α_{max}	143,74	
$X_l (\gamma, I_d)$	0,462931	
Q_{dIN}	999,1	Mvar

Figura 6-5 – Formulação básica para o cálculo dos filtros CA. Inversora T. Rio.

Quando o elo estiver com potência reversa (cenário 7P), a potência definida no Terminal Rio será 3.270 MW, sendo assim, há necessidade de suporte de potência reativa de cerca de 820 Mvar para cada polo nas condições nominais destes.

A configuração de filtros CA considerada na presente análise foi calculada para atender às necessidades de desempenho dinâmico do elo CCAT e seu consumo de reativo. Os cenários analisados buscaram as condições mais críticas do sistema e se verificou ser adequada a consideração de fornecimento pela rede no que se refere a subestação de Xingu. Deste modo, no cenário 2L a rede poderá fornecer cerca de 740 Mvar (37% do consumo do consumo de potência reativa da conversora) e no cenário 7P cerca de 395 Mvar (24% do consumo do consumo de potência reativa da conversora).

No caso da subestação T. Rio todo o consumo de potência reativa das conversora deverá ser suprido pelos filtros/capacitores.

No que se refere ao desempenho dos filtros para atender aos critérios de distorções harmônicas, os fornecedores dos equipamentos deverão realizar análises complementares, de forma a dimensionar os seus componentes considerando as impedâncias harmônicas conforme apresentado no capítulo 10.

6.2.1 Topologia considerada

Para os propósitos desse tipo de estudo, a performance do filtro CA não é de grande importância e a obtenção de uma medição de distorção harmônica $D_{total} < 1\%$ sob condições de plena carga foi considerada suficiente. Baseado nos estudos do Madeira, filtros de 11^a/13^a e 24^a/36^a harmônicas foram usados em Xingu e filtros de 12^a/24^a harmônicas foram usados em Estreito e T. Rio (2º bipolo). A potência e o número de filtros, assim como a potência e o número dos bancos *shunt*, estão de acordo com o Relatório R1 [2].

Desta forma, na subestação de Xingu foram considerados filtros de dupla sintonia de 11^o/13^o e 24^o/36^o oferecendo impedâncias baixas para os harmônicos 11^o, 13^o, 23^o, 25^o, 35^o e 37^o.

Em Estreito e T. Rio, além do filtro de 3^o harmônico descrito analisado no Relatório R2 do primeiro bipolo [5] foram considerados filtros de dupla sintonia de 12^o/24^o, oferecendo impedâncias baixas para os harmônicos 11^o, 13^o, 23^o e 25^o. Apesar destes filtros não estarem otimizados para os harmônicos 11^o, 13^o, 23^o e 25^o, satisfazem aos requisitos de filtragem sendo suficientes para modelagem no PSCAD.

Cabe ressaltar que não será necessário modificá-los durante a transmissão com potência inversa em ambos os terminais.

A Figura 6-6 apresenta de forma esquemática a representação de um filtro CA de dupla sintonia.

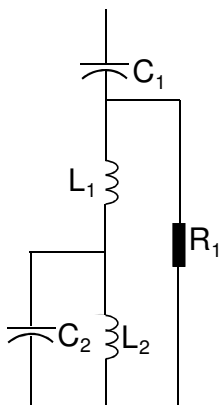


Figura 6-6 – Representação de um filtro CA de dupla sintonia

Os valores dos componentes para os filtros CA são apresentados na Tabela 6-6.

Tabela 6-6 – Valor dos componentes dos filtros CA

Filtro	Potência Nominal (Mvar)	C_1 (μF)	L_1 (mH)	C_2 (μF)	L_2 (mH)	R_1 (Ω)
11 th / 13 th	420	4.456	11.04	158.0	0.3114	1400
24 th / 36 th	420	4.456	1.8275	26.75	0.3044	1400
12 th / 24 th	400	4.244	5.7565	8.45	2.8913	1400

A resposta da frequência dos filtros definidos na Tabela 6-6 são apresentado na Figura 6-7.

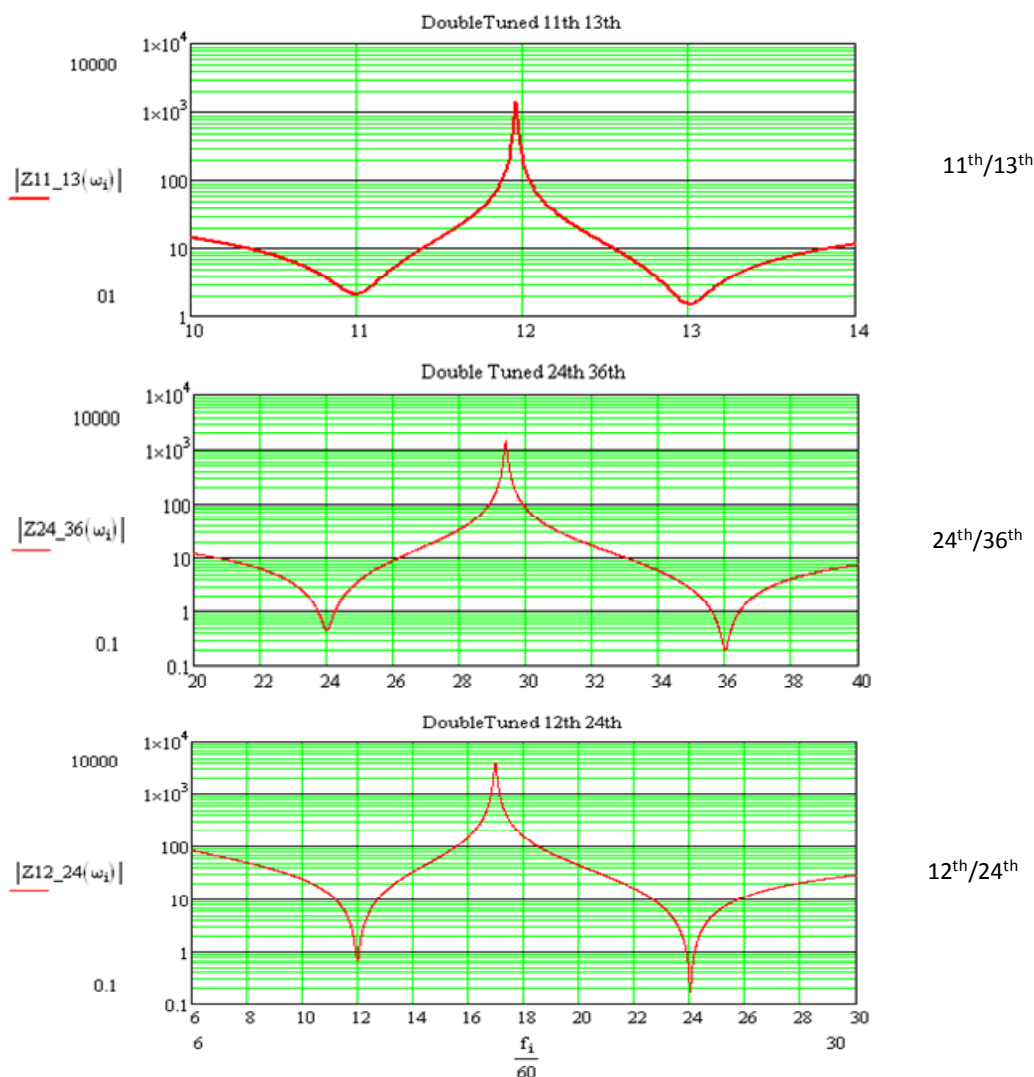


Figura 6-7 – Impedância dos filtros CA

A Tabela 6-7 apresenta de forma resumida os tipos de filtros, quantidade e potência nominal de cada banco de capacitor no lado retificador e inversor do elo para os cenários analisados. Considerou-se bancos de capacitores nos dois terminais que além de oferecer suporte de potência reativa também oferecem filtragem dos harmônicos de ordem acima 35°.

Tabela 6-7 – Tipo, valor nominal e quantidade de filtros CA do elo

Cenário	Xingu	T. Rio
2L (N->SE)	1 x BC; 1 x HP24/36; 1 x 11/13 (3 x 420 Mvar)	2 x BC; 2 x HP12/24; 1 x HP3 (5 x 400 Mvar)
7P (SE->N)	1 x BC; 1 x HP24/36; 1 x 11/13 (3 x 420 Mvar)	2 x BC; 2 x HP12/24 (4 x 400 Mvar)

A Figura 6-8 e a Figura 6-9 a apresentam de forma ilustrativa os modos de operação dos filtros nos dois sentidos de fluxo de potência esperado no elo. Observa-se no cenário 7P que para atender o perfil de tensão na subestação Xingu foi necessário ligar o reator de barra existente nesta subestação.

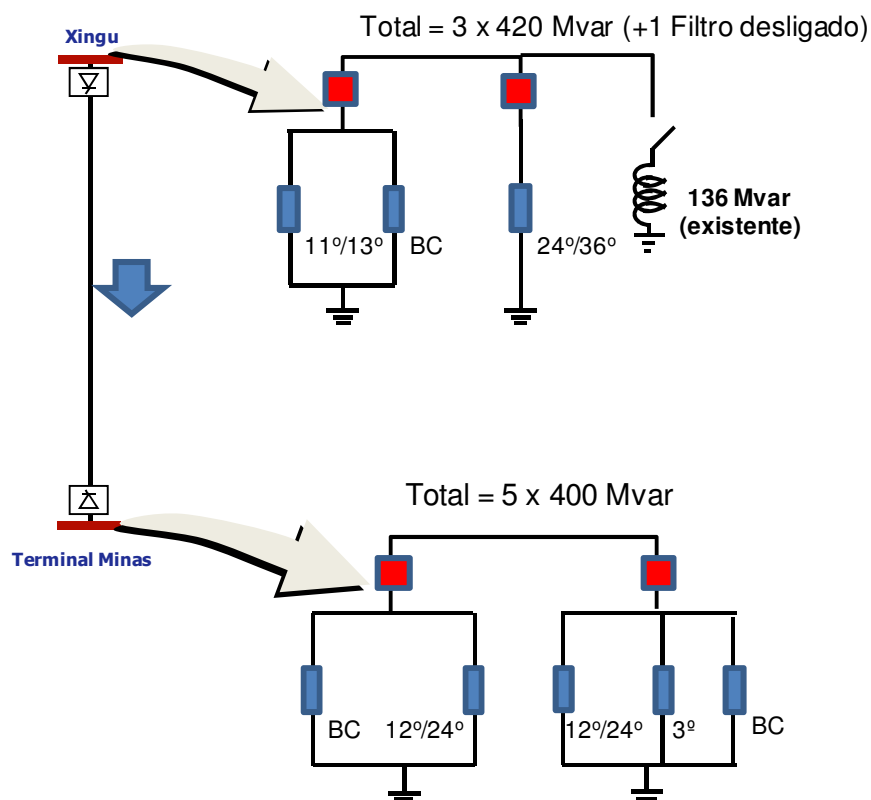


Figura 6-8 – Configuração esperada dos BC e filtros. Elo sentido N => SE.

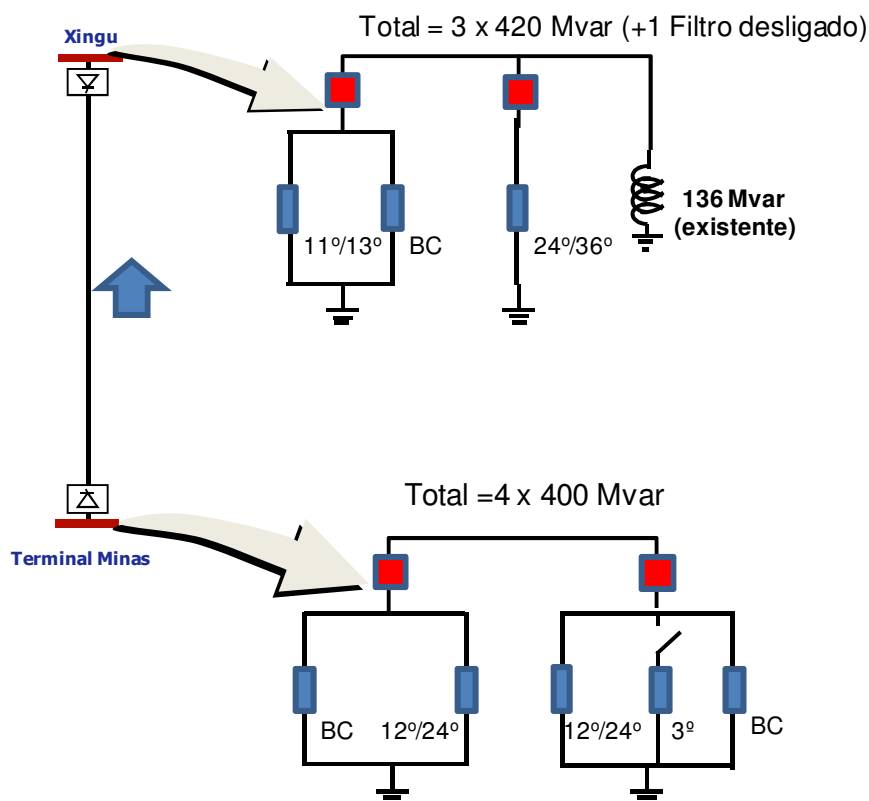


Figura 6-9 – Configuração esperada dos BC e filtros. Elo sentido SE => N (potência reversa).

6.3 Descrição dos controles das conversoras do elo CCAT (PSCAD)

Um modelo detalhado do sistema de transmissão CCAT em ± 800 kV para reforço da interligação Norte-Sul foi desenvolvido para o PSCAD, através de renomado consultor internacional da área de CCAT contratada pela EPE [12]. O objetivo inicial desse modelo foi proporcionar uma fonte para o estudo de transitórios eletromagnéticos. Adicionalmente, o modelo foi baseado na topologia de controle encontrada nos atuais projetos de CCAT. Todos os componentes utilizados no modelo desenvolvido para o PSCAD estão abertos para exame e modificação por parte dos usuários.

Esse modelo PSCAD foi desenvolvido em diferentes etapas, começando a partir de um trabalho anteriormente desenvolvido para o projeto CCAT do Madeira. Posteriormente, por ocasião dos estudos do Relatório R2 do primeiro bipolo em 800 kV diversas alterações foram realizadas considerando equivalentes simples e mais completos da rede CA bem como considerando a inclusão de um e posteriormente, de dois bipolos.

A seguir é apresentada uma breve descrição desse modelo, começando com a do circuito principal do CCAT e concluindo com a dos conceitos de controle utilizados.

6.3.1 Modelo do bipolo Xingu – Estreito

As dimensões do circuito principal do elo CCAT (tensão, corrente, potência nominal dos componentes do elo CCAT), os tipos e dimensões e filtros CA, os parâmetros físicos da linha de transmissão CC e outros dados similares estão descritos nos itens acima. Quanto aos equipamentos para os quais dados específicos não estavam disponíveis (tamanho e faixa dos comutadores de tapes dos transformadores conversores, concepção dos filtros CC, entre outros), valores típicos foram assumidos baseados em projetos anteriores.

A Figura 6-10 (Xingu) e Figura 6-11 (Estreito) ilustram a “vista superior” dos bipolos nos Terminais Xingu e Estreito (anteriormente denominado Terminal Minas) na representação do PSCAD, primeiro modelo de bipolo desenvolvido. A linha CCAT e as linhas do eletrodo foram modeladas usando o modelo do PSCAD dependente com a frequência. Os bancos de filtros CA são bancos genéricos de dupla sintonia, ajustados para fornecer o valores desejados de Mvar e frequências de sintonia. O filtro CC é um filtro genérico de tripla sintonia. Os filtro CC está descrito no item 6.1.1 e os filtros CA estão descritos com maiores detalhes no item 6.2.

A Figura 6-12 ilustra os conversores de 12 pulsos associados a um polo, 800 kV, 2,5 kA, 2000MW, localizado no Terminal Xingu. Os conversores utilizados em Estreito (e Terminal Rio no caso com dois bipolos) diferem dos de Xingu somente quanto às características do transformador. Características de saturação de transformador similares às que foram utilizadas nos estudos do elo CCAT Madeira foram incluídas em todos os transformadores conversores.

6.3.2 Modelo dos bipolos Xingu – Estreito e Xingu – T. Rio

As Figura 6-13 e Figura 6-14 apresentam a “vista superior” do modelo de dois bipolos. Excetuando o fato da linha de transmissão CC ser mais longa, o bipolo 2 é uma réplica do bipolo 1.

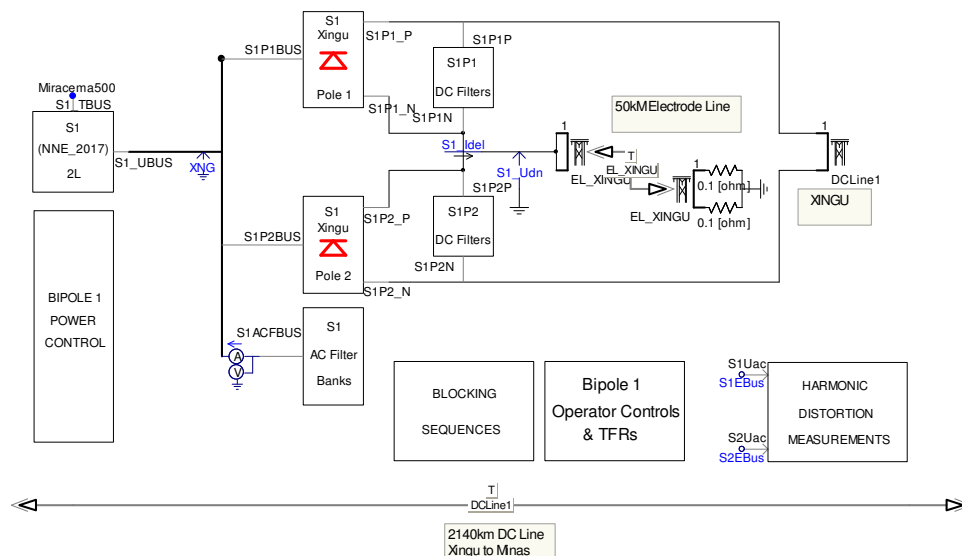


Figura 6-10 – Circuito Principal CCAT Terminal Xingu – bipolo 1

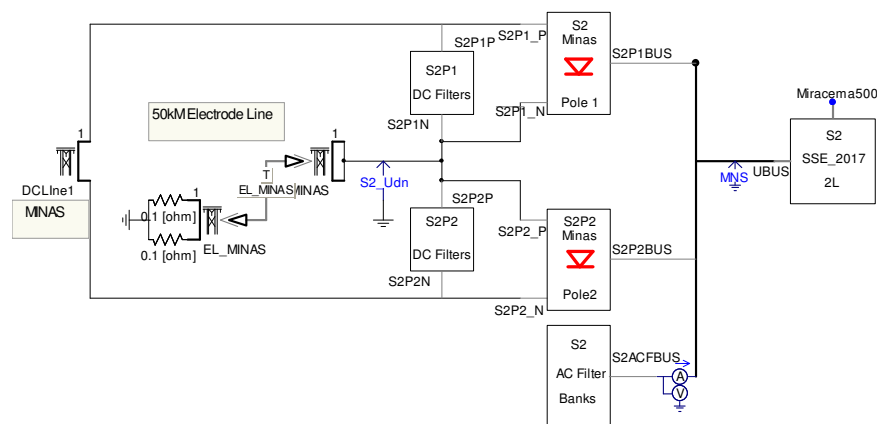


Figura 6-11 – Circuito Principal CCAT Terminal Estreito – bipolo 1

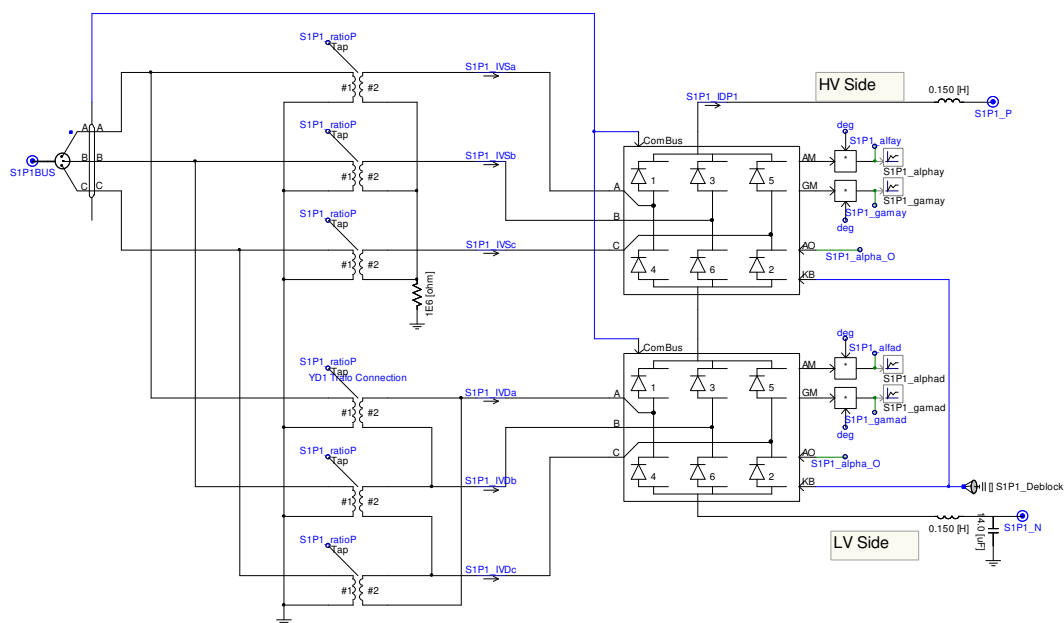


Figura 6-12 – 800kV, 2000MW conversor 12 pulsos

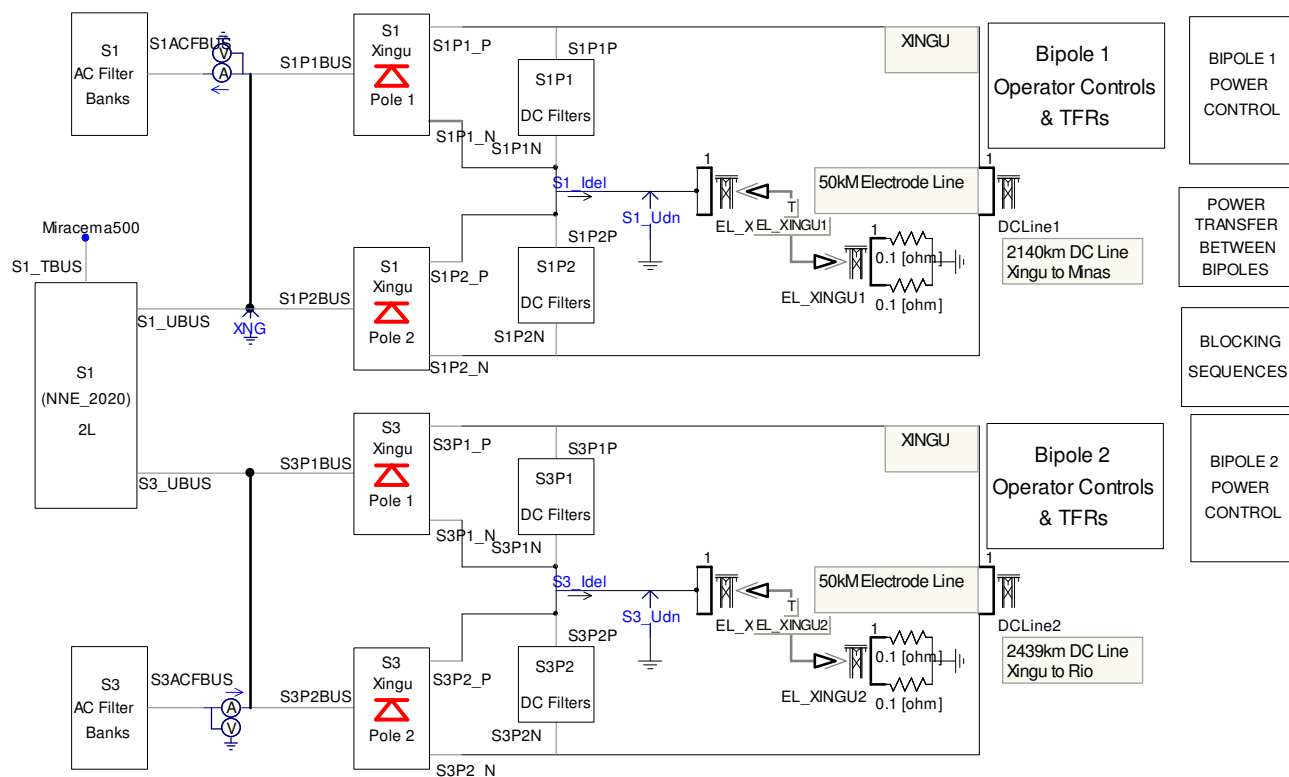


Figura 6-13 – Circuito principal do CCAT T. Xingu – bipolo 1 e 2

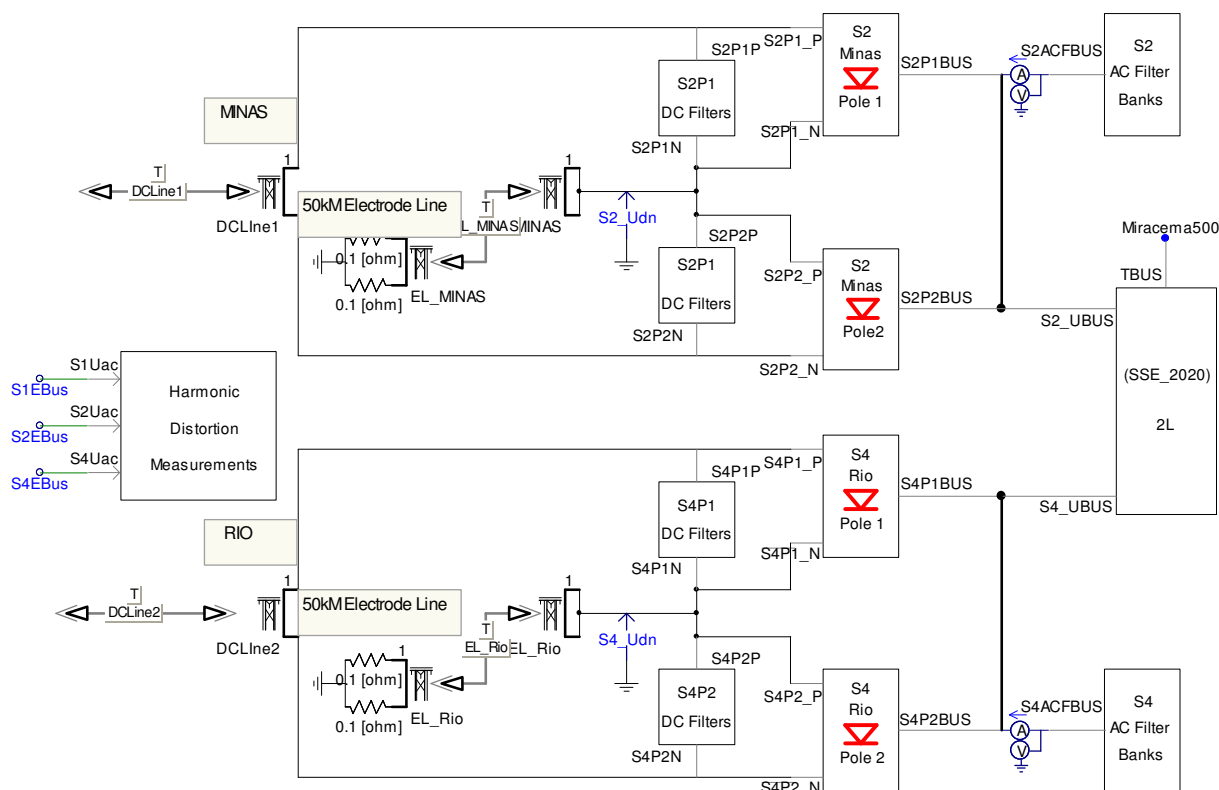


Figura 6-14 – Circuito principal do CCAT Estreito e T. Rio – bipolo 1 e 2

6.3.3 Controle do elo CCAT em nível de Polo

Os controles do elo CCAT utilizados no modelo PSCAD utilizado neste estudo são bastante convencionais e semelhantes aos usados nos projetos CCAT reais. Uma breve descrição é fornecida aqui.

Foi utilizado o controle de disparo do conversor *built-in* do PSCAD. Este é um sistema de malha de sincronismo de fase ("Phase-Locked Loop" - PLL) por vezes referido como o sistema "trans-vector" e está ilustrado na Figura 6-15. Ele proporciona um desempenho adequado, mas sofre algumas limitações em que os limites rígidos de ângulo não estão representados.

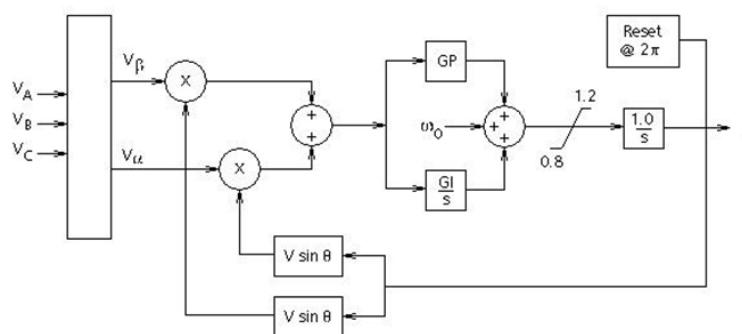


Figura 6-15 – Controle de disparo do conversor built-in do PSCAD

Controles de nível superior, tais como o controle de corrente de polo (CCA) e o controle de tensão de polo (VCA) estão implementados como mostrado na Figura 6-16. A principal diferença entre os controle do retificador e inversor envolve a manipulação dos limites para os reguladores proporcional / integral usados para controle de tensão e corrente. No retificador, os reguladores PI e outras funções de controle formam uma cadeia terminando no limite de $\alpha_{\text{mínimo}}$ ~~αmínimo~~ do controlador de corrente. No inversor, reguladores semelhantes e funções de controle determinam o limite de $\alpha_{\text{máximo}}$ ~~αmáximo~~ do controlador de corrente do inversor.

No arranjo mostrado na Figura 6-16, são apresentadas as três funções que determinam em grande parte o comportamento transitório da transmissão CCAT:

- no retificador, o limite efetivo de $\alpha_{\text{mínimo}}$ ~~αmínimo~~ é uma função das tensões CA e é transitoriamente aumentado durante as faltas CA, retardando a inerente recuperação rápida de potência que ocorre após a remoção das faltas CA no retificador.

- no Inversor, o limite efetivo de $\alpha_{\text{máximo}}$ é calculado para produzir o valor pretendido para o ângulo de extinção γ do inversor. Isto é em grande parte um cálculo de regime permanente e é complementado por aumentos transitórios do ângulo $\gamma_{\text{Referência}}$ durante distúrbios.
- o VDCOL reduz a ordem de corrente como função da tensão CC para melhorar a recuperação após faltas CA através da redução do consumo de potência reativa no conversor durante os distúrbios. A Figura 6-16 apresenta o diagrama de blocos do VDCOL e o Anexo IV apresenta maiores detalhes.

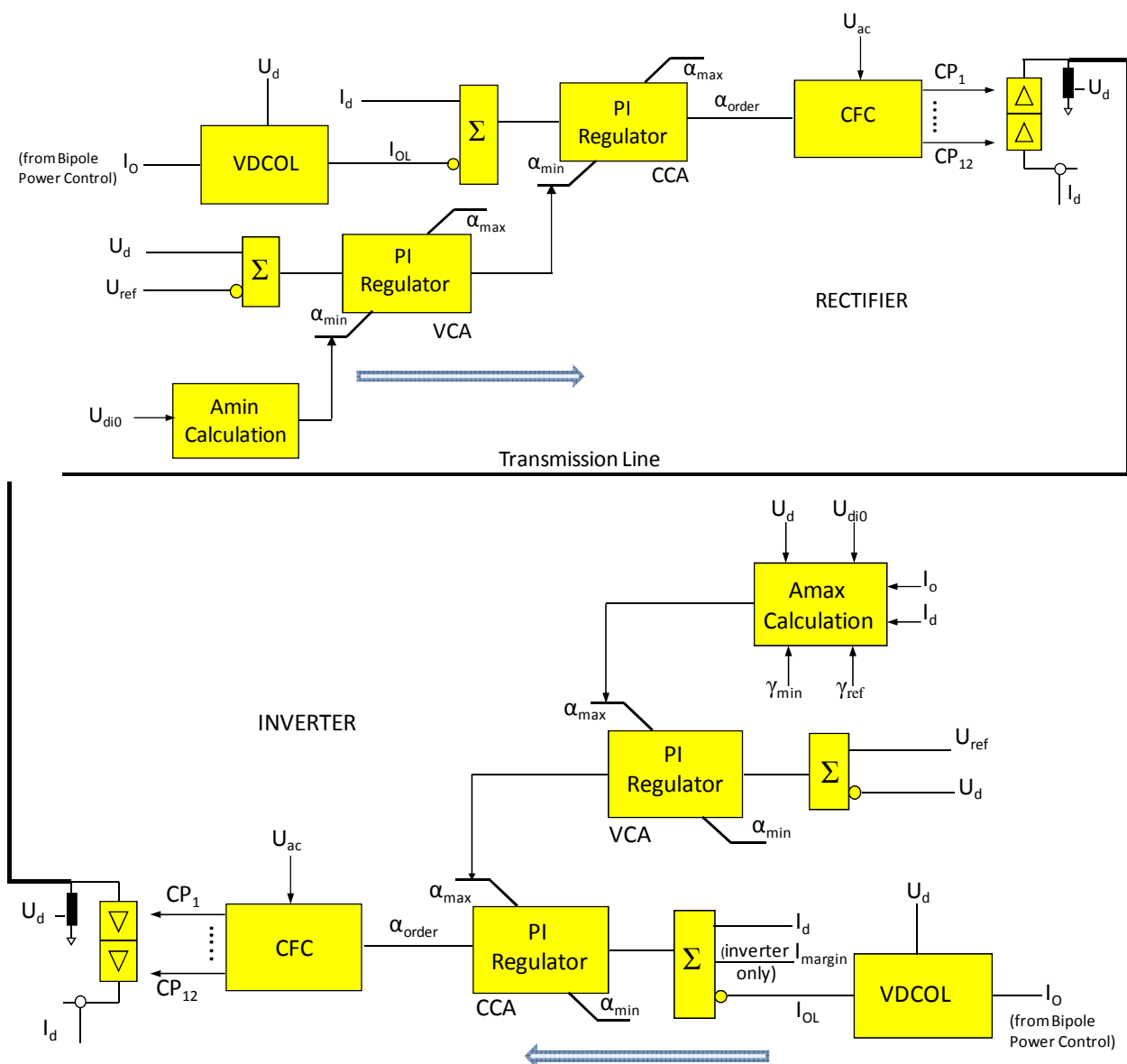


Figura 6-16 – Estratégia de controle de Retificador e Inversor a nível de polo

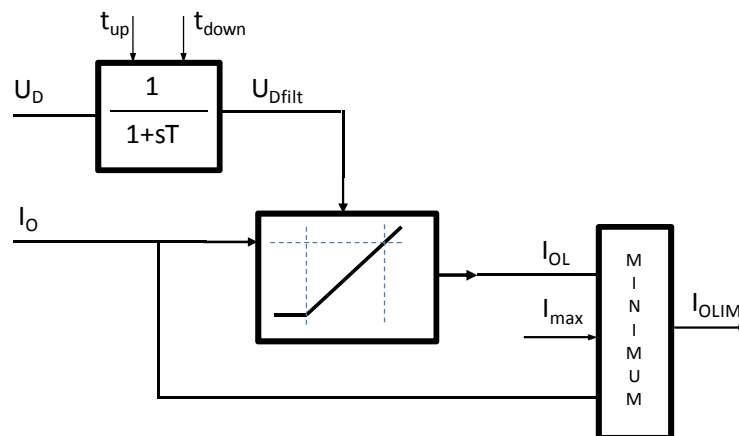


Figura 6-17 – Limitador da ordem de corrente dependente da tensão (VDCOL)

A Figura 6-17 é a representação mais completa em PSCAD dos blocos de controle mostrados na Figura 6-16. Além dos blocos anteriormente mencionados, a Figura 6-18 inclui a proteção da linha CC que detecta faltas para a terra da linha CC por uma combinação de controle derivativo e de nível de tensão para iniciar uma série de ordens de “desliga”, “religa” numa tentativa de extinguir a falta na linha. Depois de um determinado número de tentativas, é tentado o religamento em tensão reduzida CC. Esta sequência é ilustrativa, uma vez que demonstra a capacidade do polo são em compensar a potência perdida devido à falta na linha.

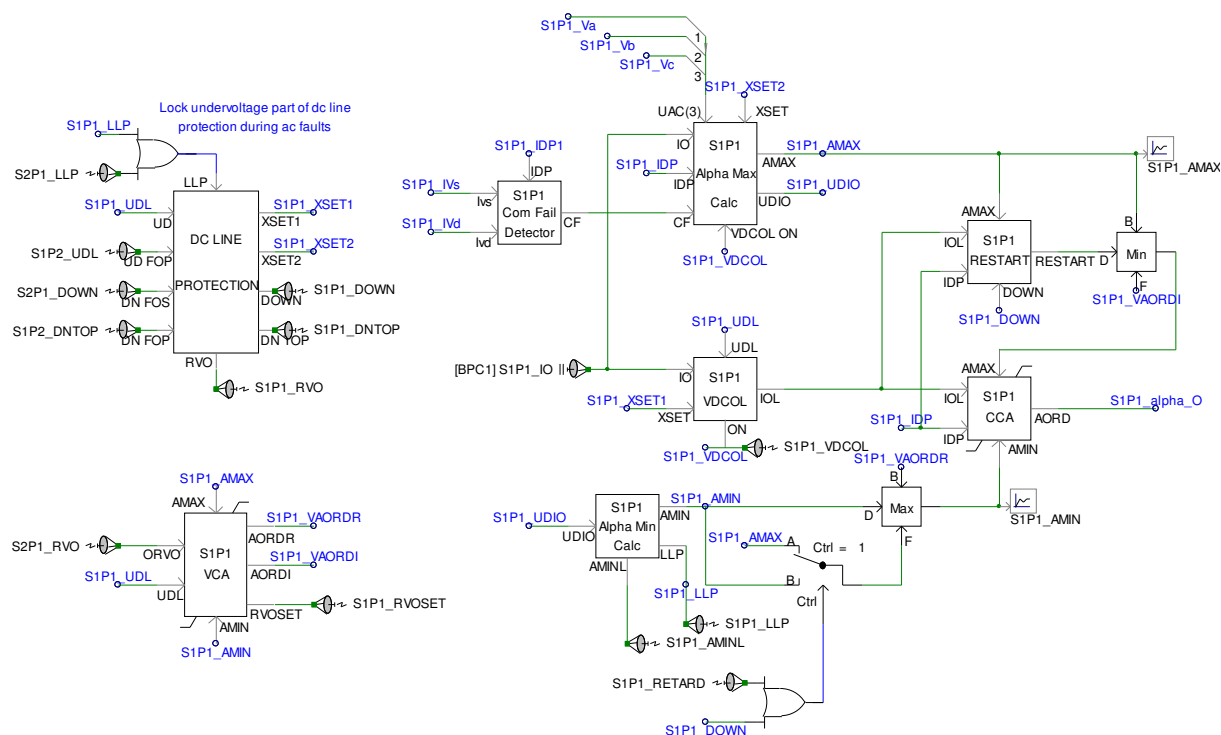


Figura 6-18 – Funções de controle representadas no PSCAD

6.3.4 Controle de potência de bipolo e ordem de transferência de potência entre bipolos

O controle de potência de bipolo (BPC) fornece compensação rápida de potência após a perda de um polo, bem como a manutenção da potência CC constante durante variações lentas de tensão CA. A Figura 6-19 ilustra as características básicas. As tensões CC do polo são fortemente filtradas bem como limitadas para evitar aumentos da ordem de corrente resultantes do afundamento da tensão CA. No caso de uma perda de polo, a filtragem é temporariamente reduzida, permitindo um aumento rápido na ordem de corrente. Controladores de margem de corrente (CMC) são fornecidos para compensar a perda de margem de corrente que deve ocorrer no controle de corrente do inversor. Além disso, a coordenação de telecomunicação é usada para garantir que os aumentos de ordem de corrente sejam aplicados primeiramente no retificador e que as diminuições sejam aplicadas primeiramente no inversor. Foi considerado um atraso de tempo de telecomunicações de 15ms.

Para permitir a transferência de potência entre bipolos, um bloco "transferência de potência entre bipolos" é fornecido. Como mostrado na Figura 6-20, a capacidade de transmissão de cada um dos polos é determinada com base no seu estado de bloqueio/ desbloqueio, na sua referência de tensão ativa e nos limites de corrente eficaz. Neste modelo, os cálculos estão muito simplificados. Se a capacidade de transmissão cair para um valor inferior ao da potência requerida, uma ordem é enviada para que o outro bipolo compense a deficiência.

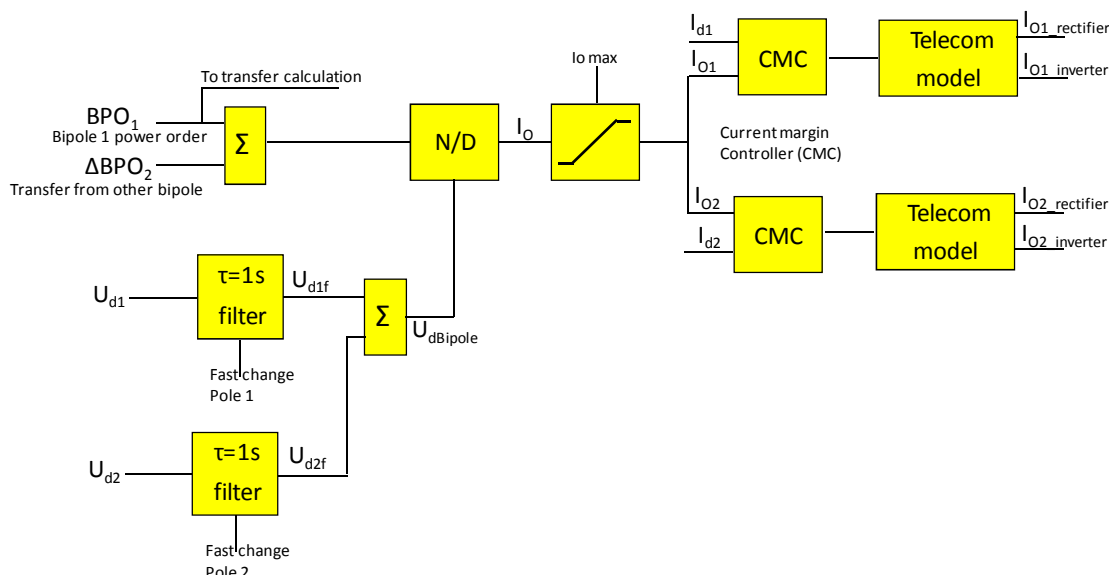


Figura 6-19 – Controle de potência do Bipolo 1 – BPC1 (BPC2 é idêntico)

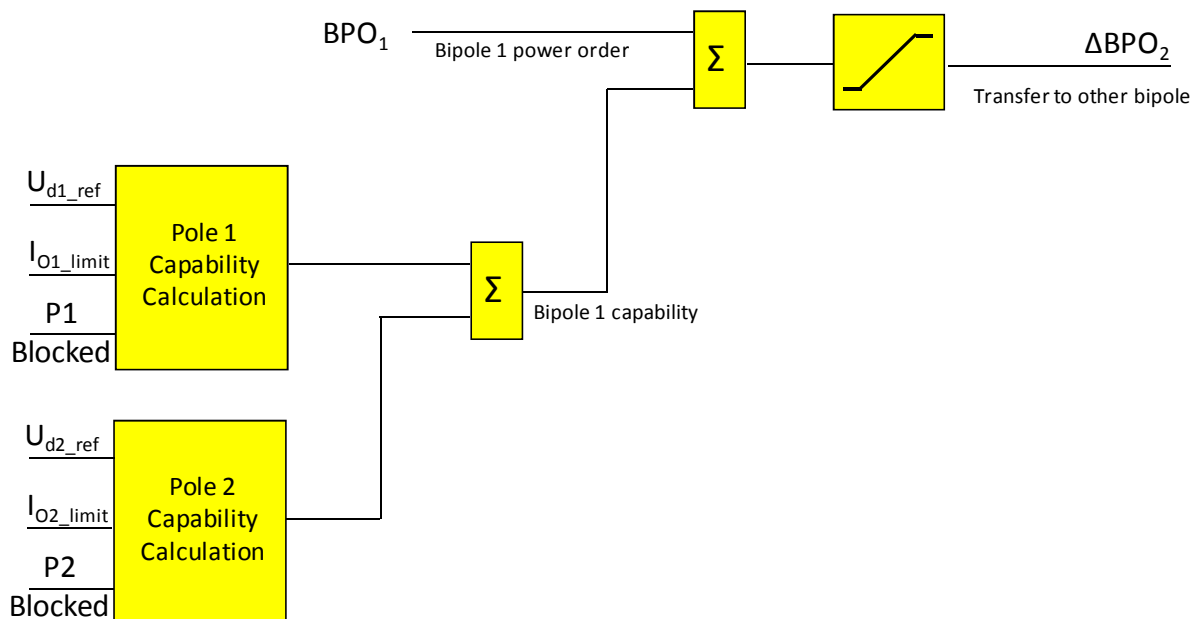


Figura 6-20 – Ordem de transferência de potência entre bipolos (Mostrado para BP1 e BP2. O oposto é também incluído)

6.3.5 Sequências de Bloqueio

Bloqueio protetivo de polo é o evento que iniciará com uma ordem de transferência de potência para o polo são e, possivelmente, para o outro bipolo. Neste modelo, o bloqueio iniciado pelo usuário resulta em um “bypass” das válvulas do inversor, seguido por uma ação *retard* no retificador, no qual o ângulo de disparo do retificador é levado à região de inversão com objetivo de descarregar a linha CC. O bloqueio efetivo do conversor (ou seja, remoção dos pulsos de disparo) é realizado somente após a corrente CC estar em um nível suficientemente baixo. Essa sequência de eventos é semelhante a um bloqueio protetivo do inversor e fornece uma maneira conveniente de testar a ordem de transferência de potência.

7 TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS

7.1 Condições gerais

As simulações de transitórios eletromagnéticos de manobra foram realizadas através do programa PSCAD, com representação dos elos de corrente contínua desenvolvido para os estudos do primeiro bipolo da SE Xingu (± 800 kV Xingu – Estreito) [5], com os ajustes de representação indicados neste relatório e com a rede CA como detalhado nos capítulos anteriores.

As unidades geradoras incluídas na rede retida, correspondentes às usinas de Belo Monte e Tucuruí na região Norte e às usinas de Angra (I, II e III) e Termo Rio na região Sudeste, foram representadas através de modelo de fonte constante atrás de reatância sub transitória equivalente do conjunto de unidades geradoras de cada usina.

Com o intuito de prospectar sobretensões máximas nas barras analisadas, não foram representados para-raios de óxido de zinco em nenhuma barra da rede simulada. Caso esses equipamentos fossem representados os valores máximos encontrados poderiam ser menores.

7.2 Elo CCAT transmitindo Norte-Sul, cenário 2L

Para a configuração da rede completa, transmissão no elo CCAT no sentido Norte-Sul, cenário 2L, foram simulados curtos circuitos na rede CA, curtos circuitos na linha de transmissão CC e bloqueio de bipolo sem desligamento de filtros, como apresentado a seguir. Todos os eventos foram simulados sem retirada de elementos da rede.

7.2.1 Curto-circuito na rede CA

Foram simulados curtos circuitos francos a terra, trifásicos e monofásicos, durante 100 ms, nas barras em 500 kV CA das conversoras em Xingu e em Terminal Rio, além de outras barras mais distantes destas, tanto na região Norte como no Sudeste. A Tabela 7-1 sumariza os resultados encontrados. Observa-se que a sobretensão máxima encontrada nas barras em 500 kV, 1,71 pu, foi registrada em Xingu 500 kV, decorrente de curto trifásico nessa barra. Na barra de T. Rio 500 kV, o maior valor encontrado foi 1,48 pu por curto trifásico na própria barra. Em Belo Monte 18 kV foi registrado 1,77 pu. Os demais casos resultaram em sobretensões inferiores a 1,48 pu. As

sobretensões são rapidamente amortecidas, resultando em máximas sustentadas, após 200 ms da eliminação do curto, abaixo da tensão máxima operativa.

Tabela 7-1 - Sobretensões resultantes de curto-circuito na rede CA – cenário 2L

Curto aplicado		Sobretensão resultante (pu) na barra											
		T Rio 500 kV (1,07 pré)		Xingu 500 kV (1,06 pré)		B.Monte 18 kV (1,04 pré)		Tucuruí 2 500 kV (1,10 pré)		F Dias 500 kV (1,03 pré)		Angra 500 kV (1,05 pré)	
Barra	tipo	Max	Sust	Max	Sust	Max	Sust	Max	Sust	Max	Sust	Max	Sust
T Rio 500 kV	3Ø	1,48	1,06	1,27	1,06	1,14	1,04	1,25	1,10	1,12	1,03	1,29	1,05
	1Ø	1,32	1,07	1,38	1,06	1,20	1,04	1,30	1,11	1,12	1,03	1,22	1,05
Xingu 500 kV	3Ø	1,29	1,06	1,71	1,06	1,77	1,04	1,29	1,11	1,13	1,03	1,18	1,05
	1Ø	1,20	1,06	1,45	1,06	1,34	1,04	1,28	1,11	1,10	1,03	1,20	1,05
Fernão Dias 500 kV	3Ø	1,34	1,06	1,38	1,05	1,19	1,03	1,29	1,10	1,28	1,03	1,27	1,05
	1Ø	1,26	1,06	1,34	1,06	1,19	1,04	1,29	1,11	1,27	1,03	1,16	1,05
Angra 500 kV	3Ø	1,24	1,06	1,35	1,06	1,20	1,04	1,31	1,11	1,11	1,03	1,16	1,05
	1Ø	1,19	1,06	1,28	1,06	1,17	1,04	1,27	1,11	1,08	1,03	1,15	1,05
Nova Iguaçu 500 kV	3Ø	1,34	1,06	1,27	1,06	1,15	1,04	1,23	1,10	1,18	1,03	1,20	1,05
	1Ø	1,27	1,06	1,38	1,06	1,21	1,04	1,31	1,10	1,10	1,03	1,23	1,05

As figuras apresentadas a seguir (Figura 7-1, Figura 7-2 e Figura 7-3) , extraídas das simulações, ilustram o comportamento das tensões transitórias decorrentes de curto circuito. No Anexo V estão apresentados os demais resultados das variáveis simuladas em função do tempo para os casos analisados. De modo geral as sobretensões não são elevadas e não devem provocar restrições operativas.

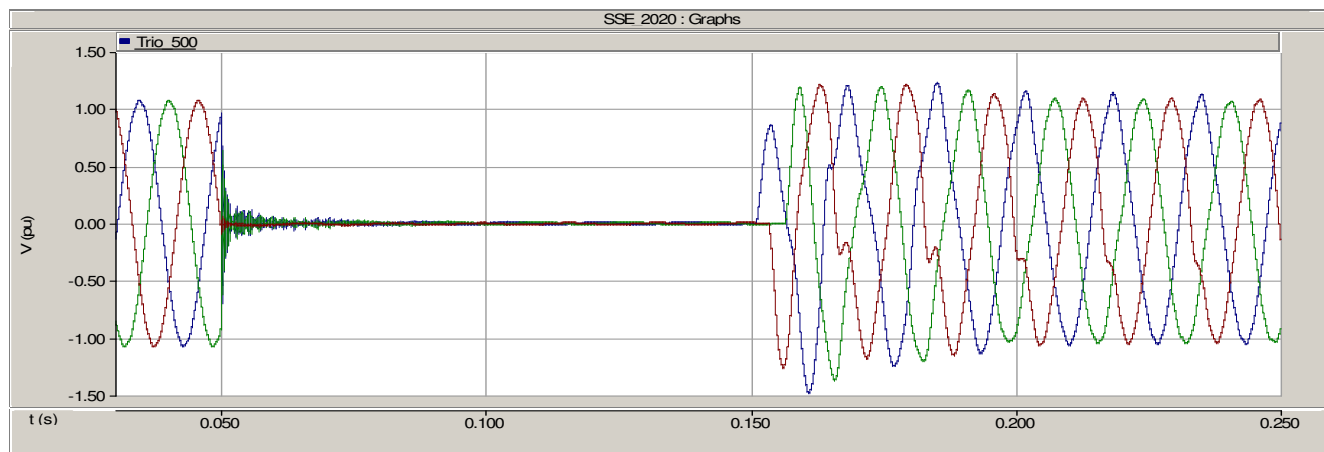


Figura 7-1 - Curto 3Ø em T. Rio 500 kV, tensão em T. Rio 500 kV -2L

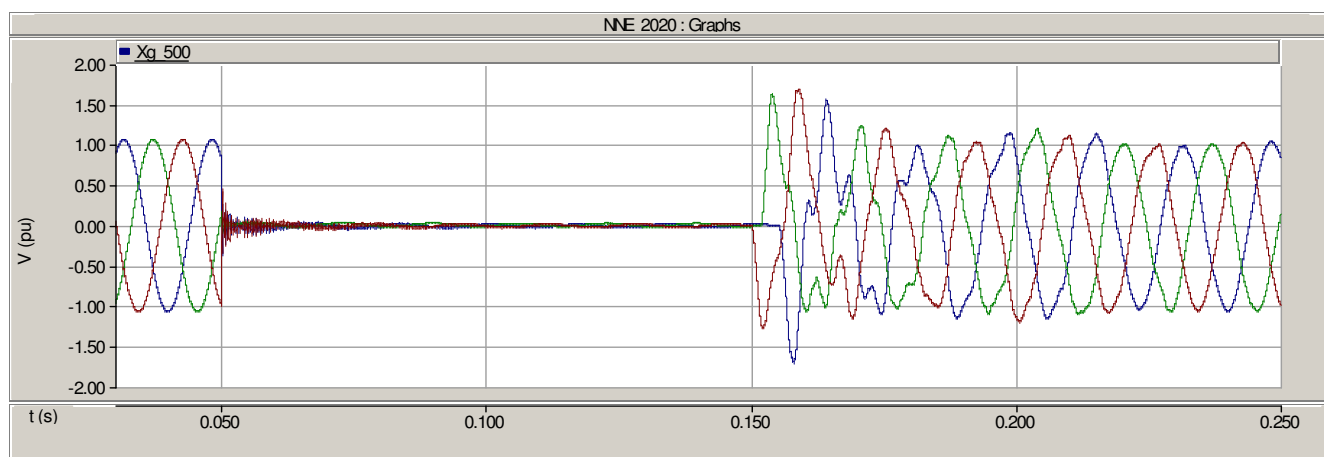


Figura 7-2 – Curto 3Ø em Xingu 500 kV, tensão em Xingu 500 kV – 2L

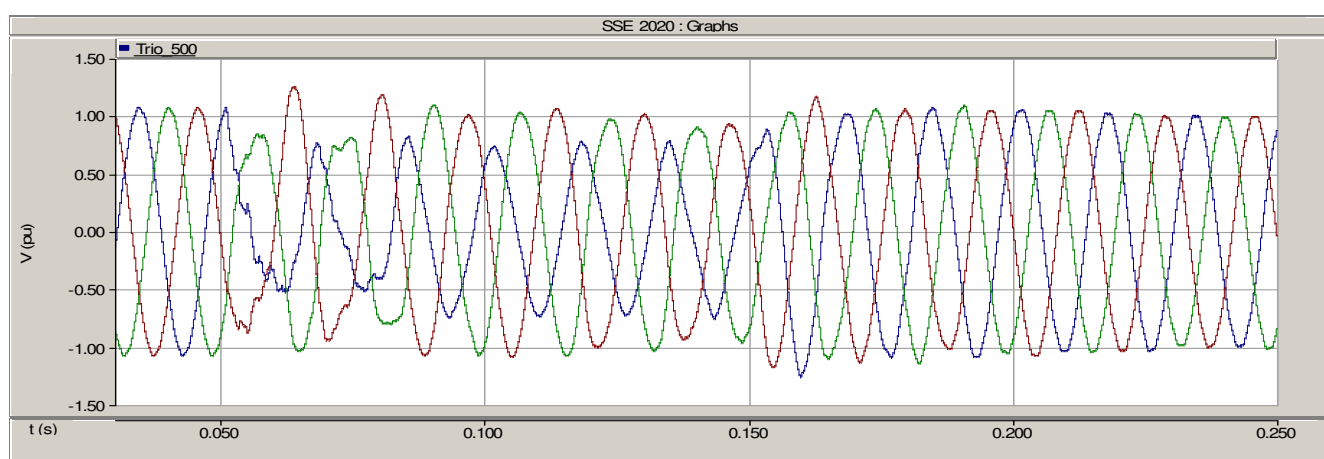


Figura 7-3 - Curto 1Ø em Fernão Dias 500 kV, tensão em T. Rio 500 kV -2L

Os tempos de recuperação da potência ativa no elo, após faltas na rede CA, em nível correspondente a 90% da potência anterior ao curto, sem voltar abaixo de 90%, estão apresentados na Tabela 7-2, para curtos francos, trifásico e monofásico nas barras das conversoras e em um ponto eletricamente mais distante de T. Rio (Fernão Dias 500 kV).

Tabela 7-2 - Tempo de recuperação do elo para faltas francas na rede CA – cenário 2L

Curto aplicado		Tempo de recuperação (ms)
Barra	Tipo	
T. Rio 500 kV	3Ø	203
	1Ø	167
Fernão Dias 500 kV	3Ø	171
	1Ø	160
Xingu 500 kV	3Ø	168

	1Ø	164
--	----	-----

Observa-se que o maior tempo de recuperação foi de 203 ms para curto trifásico na barra 500 kV da inversora, resultando os demais casos em tempos inferiores a 171 ms. As figuras a seguir (Figura 7-4 e Figura 7-5) ilustram a variação da potência do bipolo com aplicação de curto trifásico em T. Rio 500 kV, e curto monofásico em Fernão Dias 500 kV.

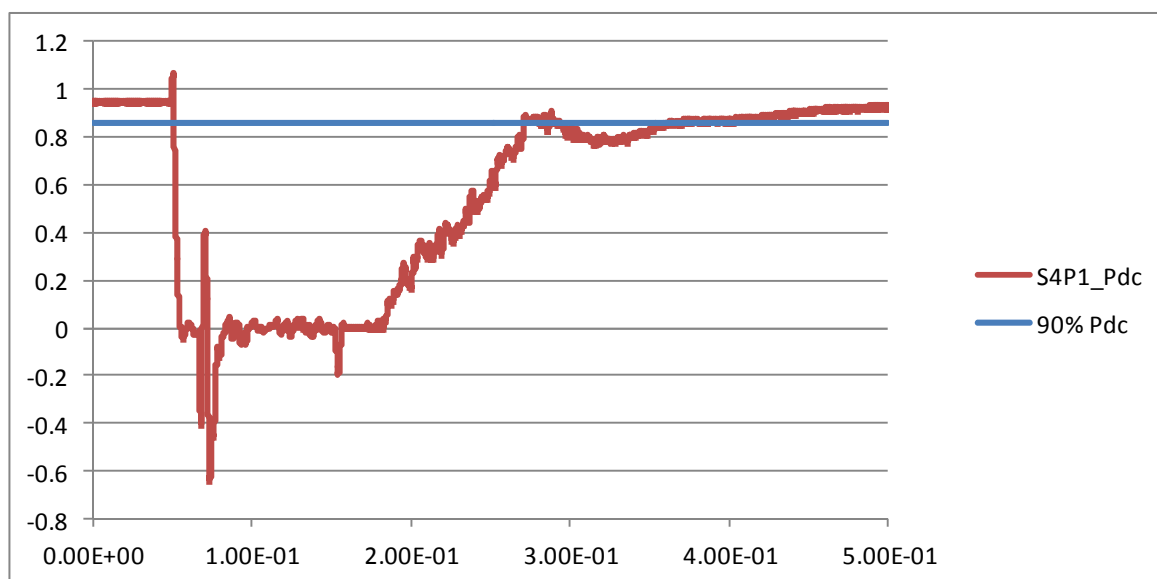


Figura 7-4 - Potência CC em T. Rio com aplicação de curto 3Ø em T. Rio 500 kV – 2L

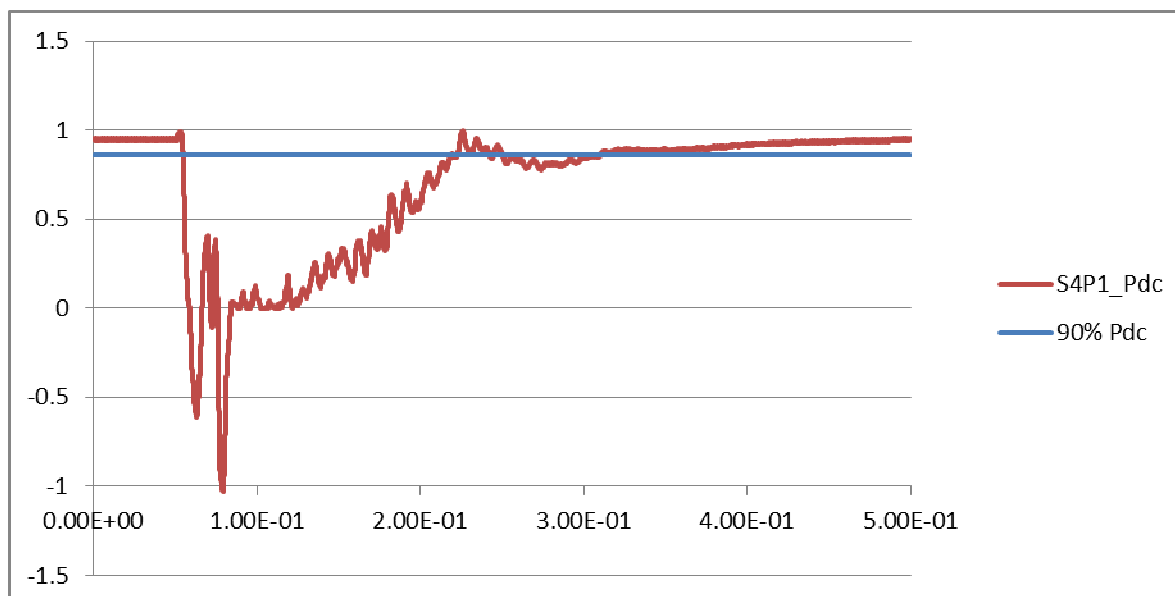


Figura 7-5 – Potência CC em T. Rio com aplicação de curto 1Ø em Fernão Dias 500 kV-2L

7.2.2 Curto-circuito na linha de transmissão em 800 kV CC

Para diferentes localizações ao longo da linha de transmissão em 800 kV CC, nomeadamente, a partir da retificadora, a zero, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$ e $\frac{1}{1}$ do seu comprimento total de 2.439 km, foram simulados curtos-circuitos a terra em um dos polos e medidas as sobretensões máximas resultantes no outro polo (polo são), em todos os pontos considerados, como sumarizado na Tabela 7-3, com valores em por unidade da tensão nominal 800 kV. A tensão no ponto da linha localizado junto à retificadora pré curto foi ajustado em 1,0 pu.

Tabela 7-3 - Sobretensões em um dos polos da linha CC resultante de curto-circuito a terra no polo oposto (em pu de 800 kV) – cenário 2L

Ponto de aplicação do curto ao longo da linha CC	Ponto de medição da tensão (pu)				
	0	1/4	1/2	3/4	1/1
0 (0 km, retificadora)	-1,30	-1,22	-1,07	-1,04	-
$\frac{1}{4}$ (609,75 km)	-1,37	-1,54	-1,36	-1,35	-
$\frac{1}{2}$ (1219,5 km)	-1,26	-1,42	-1,62	-1,40	-1,06
$\frac{3}{4}$ (1829,25 km)	-1,25	-1,37	-1,35	-1,50	-1,17
1/1 (2.439 km, inversora)	-1,22	-1,21	-1,11	-1,04	-1,17

Observa-se que as sobretensões mais elevadas são observadas no ponto da linha onde ocorre o curto, havendo uma redução das sobretensões à medida em que o ponto de medição se afasta da localização do curto. Dentre os casos simulados a maior sobretensão encontrada (1,62 pu) foi no meio da linha para curto neste mesmo ponto. Esses resultados estão em acordo com o relatado na bibliografia que trata desse tipo de fenômeno em linhas de transmissão aéreas CCAT [14].

A Figura 7-6 apresenta as sobretensões resultantes no polo são da linha de transmissão CC quando simulados curtos em diferentes locais selecionados da linha, em distâncias da retificadora correspondentes às seguintes proporções do comprimento total da linha: 0, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$ e $\frac{1}{1}$. No Anexo V são apresentados os resultados das simulações para curtos aplicados em cada uma dessas localizações da linha e medidos na localização de aplicação do curto e nas demais localizações selecionadas.

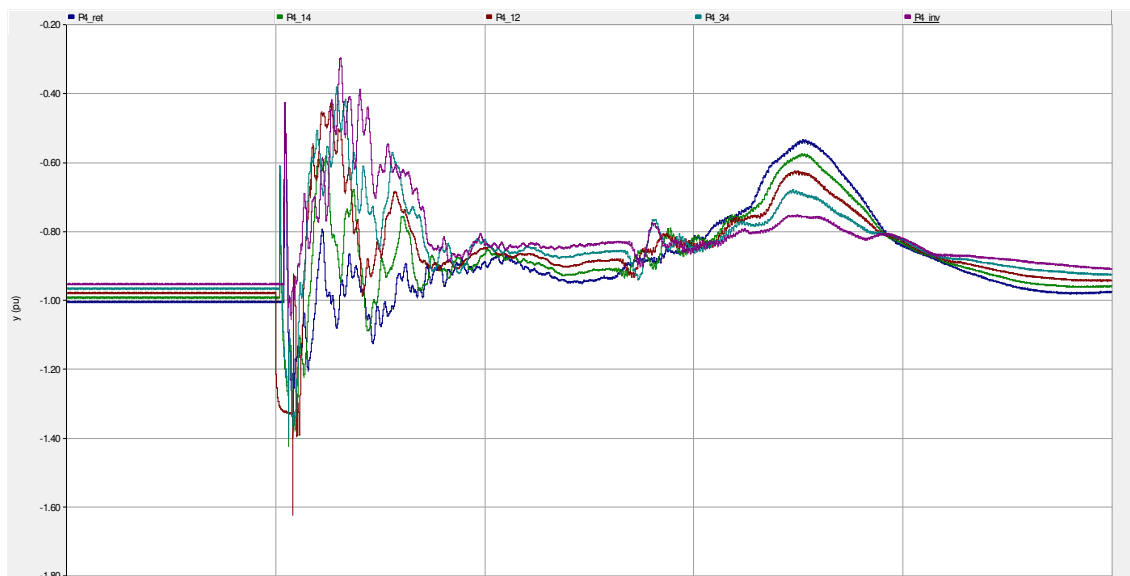


Figura 7-6 – Sobreensões no polo sã ao longo da linha CC resultante de curto entre polo e terra - 2L.

Tendo em conta que o comprimento da linha de transmissão pode ser alterado durante os levantamentos do Relatório R3, ou nas fases posteriores de projeto, foi simulado o curto-circuito no meio da linha, considerando a linha com comprimento 100 km superior. O resultado pouco difere (1,624 p.u.) do encontrado para o comprimento original.

Quando essas simulações são realizadas com representação simplificada do elo CC e com modelos de linhas de transmissão com parâmetros não variando com a frequência, tais como o de Bergeron, valores conservativos, da ordem de 2,0 pu, podem ser encontrados para linhas de comprimento da ordem dos 2000 km. Entretanto, em modelagens mais detalhadas que incluem componentes do elo CC, tais como filtros, e a representação da linha de transmissão com modelos com dependência da frequência, as sobreensões máximas são menores, da ordem de 1,70 pu, para linhas desse comprimento, como indicado em Brochura CIGRE [15] que analisa o fenômeno e faz uma comparação com os modelos comumente utilizados. Nos estudos do Relatório R2 do bipolo em ± 800 kV Xingu – Estreito, a sobreensão máxima encontrada no meio da linha resultou igual a 1,66.

7.2.3 Bloqueio de bipolo

Com o objetivo de verificar as sobreensões máximas decorrentes de bloqueio de bipolo sem abertura de filtros das conversoras, foram simulados dois casos: bloqueio do bipolo em Xingu 500 kV e bloqueio de bipolo em T. Rio 500 kV. Para cada bloqueio foram medidos o maior pico de tensão no intervalo de tempo entre o bloqueio (tempo 100 ms da simulação) e 50 ms após o

bloqueio (tempo 150 ms da simulação) (0-50 ms) e após 50 ms do bloqueio (≥ 50 ms), como indicado na Tabela 7-4.

Tabela 7-4 - Sobretensões máximas decorrentes de bloqueio de bipolo – cenário 2L

Bloqueio do bipolo na conversora	Sobretensão máxima na barra (pu)			
	Xingu 500 kV		T.Rio 500 kV	
	0-50 ms	≥ 50 ms	0-50 ms	≥ 50 ms
Xingu (retificadora)	1,23	1,23	1,32	1,24
T. Rio (inversora)	1,49	1,41	1,36	1,32

As figuras a seguir (Figura 7-7 e Figura 7-8) ilustram o comportamento da tensão nas barras conversoras em decorrência do bloqueio de bipolo. O maior valor encontrado 1,49 pu, resultou em Xingu 500 kV em decorrência de bloqueio em T. Rio 500 kV, em tempo inferior a 50 ms após o bloqueio. Considerando 50 ms após o bloqueio, a maior sobretensão, 1,41 pu foi registrada em Xingu 500 kV, por bloqueio em T. Rio 500 kV. Em T. Rio 500 kV por bloqueio em T Rio 500 kV resultaram igual ou menor que 1,36 pu. Quando o bloqueio foi simulado em Xingu 500 kV as sobretensões resultaram igual ou menor que 1,32 pu.

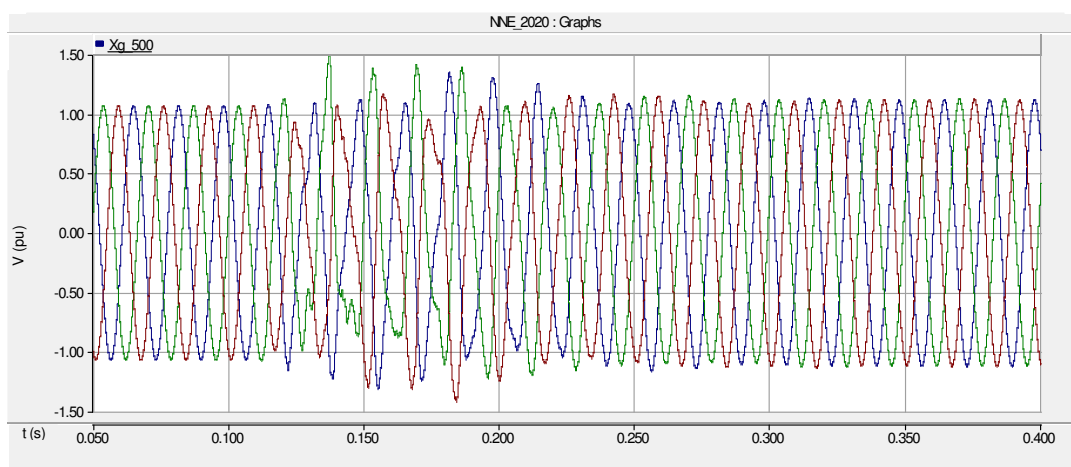


Figura 7-7 - Bloqueio de bipolo em T. Rio 500 kV – tensão em Xingu 500 kV - 2L

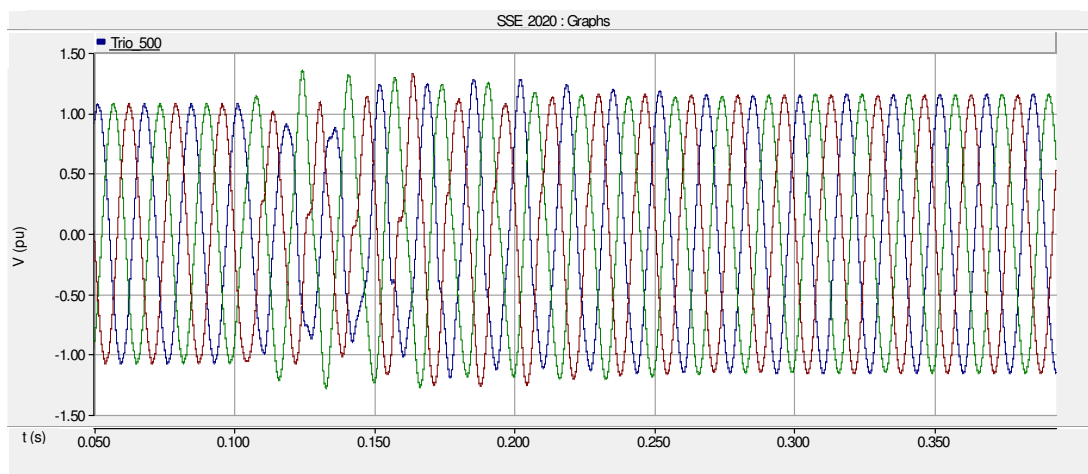


Figura 7-8 - Bloqueio de bipolo em T. Rio 500 kV – tensão em T. Rio 500 kV - 2L

7.3 Elo CCAT transmitindo Sul-Norte, cenário 7P

Para a configuração da rede completa, transmissão no elo CCAT no sentido Sul-Norte, cenário 7P, foram simulados curtos circuitos na rede CA, curtos circuitos na linha de transmissão CC e bloqueio de bipolo sem desligamento de filtros, como apresentado a seguir. Todos os eventos foram simulados sem retirada de elementos da rede.

7.3.1 Curto-circuito na rede CA

Foram simulados curtos circuitos francos a terra, trifásicos e monofásicos, durante 100 ms, nas barras em 500 kV CA das conversoras em Xingu e em T. Rio, além de outras barras mais distantes destas, tanto na região Norte como no Sudeste. A Tabela 7-5 sumariza os resultados encontrados.

Tabela 7-5 - Sobretensões resultantes de curto-circuito na rede CA – cenário 7P

Curto aplicado		Sobretensão resultante (pu) na barra									
		T.Rio 500 kV (1,05 pré)		Xingu 500 kV (1,10 pré)		B.Monte 18 kV (1,04 pré)		Tucuruí 2 500 kV (1,10 pré)		F. Dias 500 kV (1,06 pré)	
Barra	tipo	Max	Sust	Max	Sust	Max	Sust	Max	Sust	Max	Sust
T.Rio 500 kV	3Ø	1.41	1.09	1.26	1.01	1.11	1.03	1.21	1.09	1.14	1.06
	1Ø	1.22	1.05	1.21	1.01	1.05	1.03	1.15	1.09	1.11	1.06
Xingu 500 kV	3Ø	1.31	1.03	1.81	1.09	1.36	1.02	1.69	1.08	1.23	1.06
	1Ø	1.22	1.04	1.78	1.09	1.31	1.03	1.60	1.09	1.18	1.06
Jurupari 500 kV	3Ø	1.19	1.04	1.68	1.10	1.29	1.03	1.35	1.09	1.20	1.06
	1Ø	1.22	1.05	1.31	1.10	1.16	1.03	1.28	1.09	1.14	1.06
Tucuruí 2 500 kV	3Ø	1.25	1.04	1.73	1.10	1.31	1.03	1.83	1.10	1.17	1.06
	1Ø	1.19	1.05	1.40	1.10	1.20	1.03	1.36	1.10	1.14	1.06
Pauapeba 500 kV	3Ø	1.27	1.05	1.68	1.10	1.27	1.03	1.48	1.10	1.14	1.06
	1Ø	1.18	1.05	1.44	1.10	1.18	1.03	1.34	1.09	1.14	1.06
Miracema 500 kV	3Ø	1.17	1.05	1.39	1.10	1.18	1.03	1.36	1.09	1.14	1.06
	1Ø	1.23	1.05	1.27	1.10	1.14	1.03	1.26	1.10	1.13	1.06

Observa-se que a sobretensão máxima encontrada nas simulações, **1,83** pu, foi registrada em Tucuruí 2 500 kV, decorrente de curto trifásico nessa barra. Na barra de Xingu 500 kV a maior

sobretensão encontrada resultou igual a **1,81** pu por falta na própria barra, enquanto que em T. Rio 500 kV o maior valor encontrado foi 1,41 pu por curto trifásico também na própria barra. Os demais casos, com exceção de 1,78 pu e 1,73 em Xingu 500 kV, devido, respectivamente, a curto monofásico nesta barra, e curto trifásico em Tucuruí 500 kV, resultaram inferiores a 1,70 pu. As sobretensões são rapidamente amortecidas resultando em máximas sustentadas abaixo da tensão máxima operativa.

As figuras apresentadas a seguir (Figura 7-9, Figura 7-10 e Figura 7-11) , extraídas das simulações, ilustram o comportamento das tensões transitórias decorrentes de curto circuito. No Anexo V estão apresentados os demais resultados das variáveis simuladas em função do tempo para os casos analisados. De modo geral as sobretensões não são elevadas e não devem provocar restrições operativas.

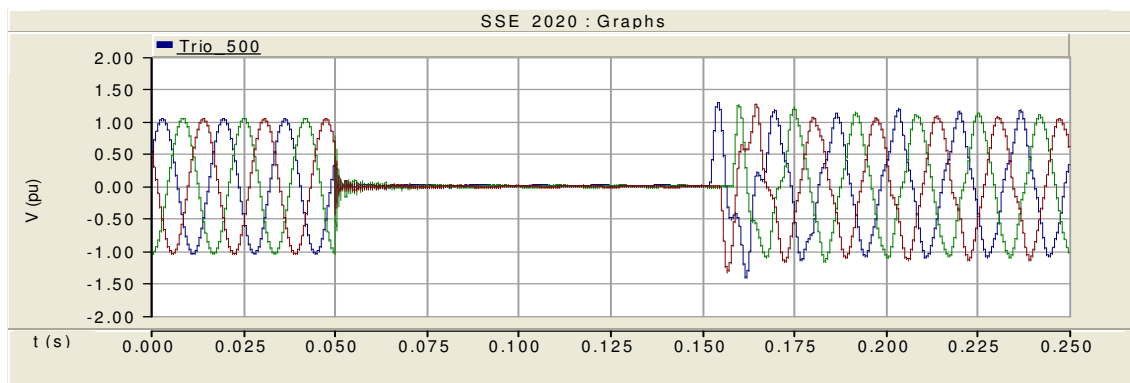


Figura 7-9 - Curto 3Ø em T. Rio 500 kV, tensão em T. Rio 500 kV – 7P

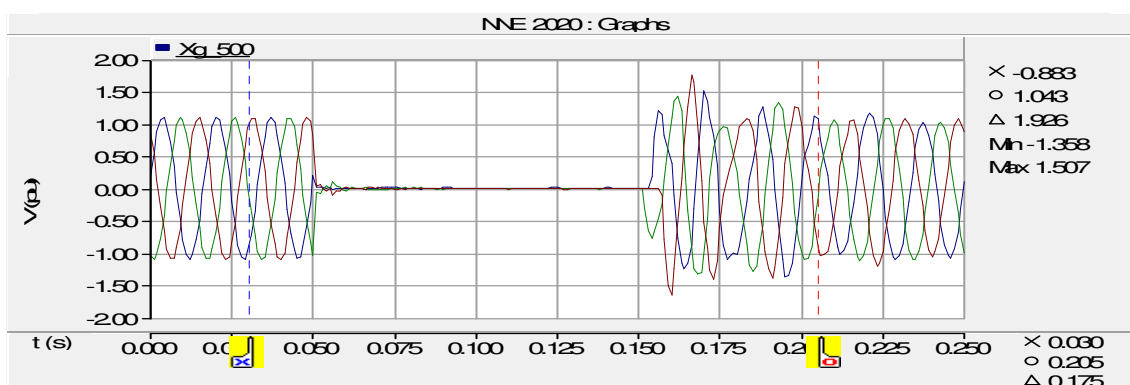


Figura 7-10 - Curto 3Ø em Xingu 500 kV, tensão em Xingu 500 kV – 7P

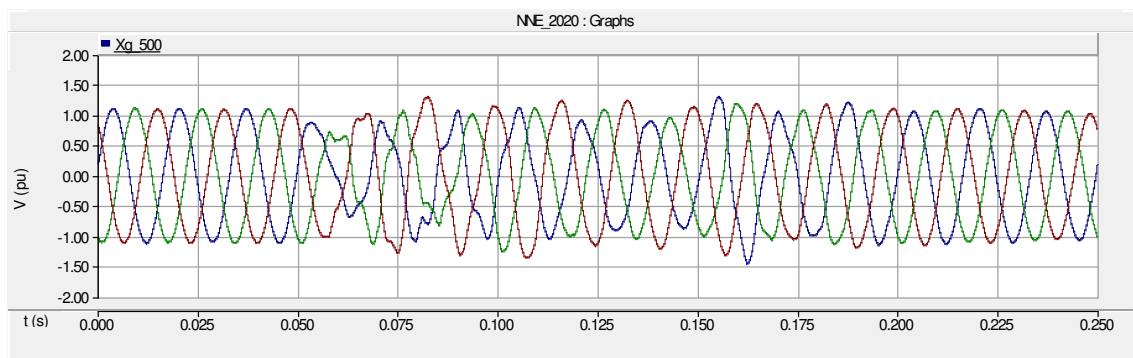


Figura 7-11 - Curto 1Ø em Parauebas 500 kV, tensão em Xingu 500 kV – 7P

A despeito dos curtos aplicados em diferentes barras da rede CA não resultarem em sobretensões elevadas nas barras das conversoras ou em vizinhanças imediatas, um dos casos registrados, curto trifásico em Parauebas 500 kV, chamou atenção pelo valor da sobretensão, 2,71 pu, registrado na barra de Parauebas 500 kV, como ilustrado na Figura 7-12. Com a inclusão de um para-raios de óxido de zinco de 444 kV nominal a sobretensão nessa barra foi reduzida para 2,11 pu (Figura 7-13), com dissipação de energia de 5,4 MJ nos para-raios (valor dentro do limite para uma coluna), sem alterar as tensões máximas obtida nas barras das conversoras e sem redução do tempo de recuperação dos bipolos. Esses casos estão detalhados no Anexo V. Portanto, as variações em Parauebas com a inclusão do para-raios não alteram os resultados já obtidos e sumarizados na Tabela 7-5.

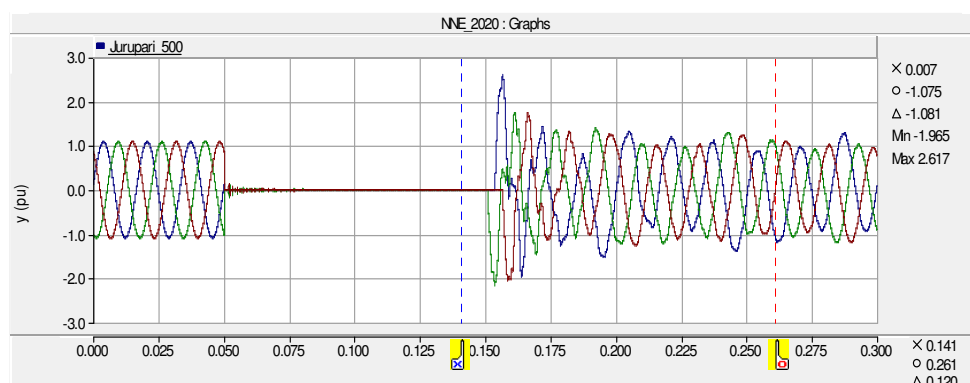


Figura 7-12 - Curto 3Ø em Parauebas 500 kV, tensão em Parauebas 500 kV – 7P

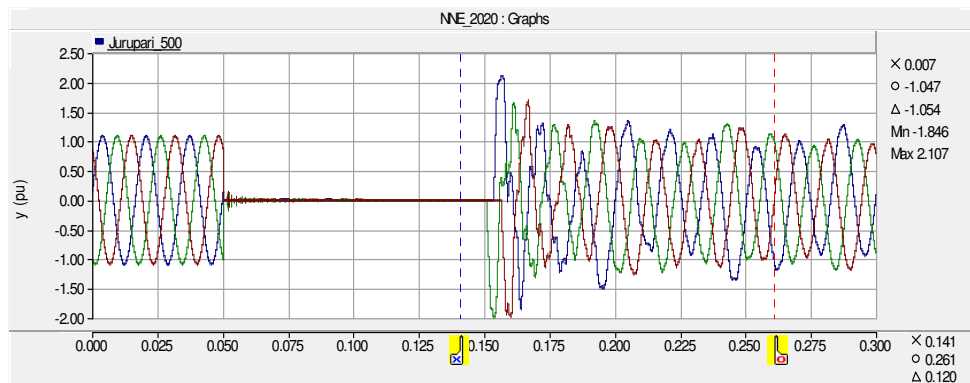


Figura 7-13 - Curto 3Ø em Parauebas 500 kV, tensão em Parauebas 500 kV com ZnO– 7P

Os tempos de recuperação da potência ativa no elo, após faltas na rede CA, em nível correspondente a 90% da potência anterior ao curto, estão apresentados na Tabela 7-6, para curtos francos, trifásico e monofásico nas barras das conversoras e em um ponto mais distante, Parauebas 500 kV.

Tabela 7-6 - Tempo de recuperação do elo para faltas francas na rede CA – cenário 7P

Curto aplicado		Tempo de recuperação (ms)
Barra	Tipo	
T.Rio 500 kV	3Ø	90
	1Ø	56
Parauebas 500 kV	3Ø	169
	1Ø	70
Xingu 500 kV	3Ø	144
	1Ø	127

Observa-se que os maiores tempo de recuperação corresponderam a curtos circuitos trifásico nas barras de Parauebas 500 kV e na inversora em Xingu, respectivamente iguais a 169 ms e 144 ms. Para os demais casos simulados esses tempos foram inferiores a 127 ms. As figuras a seguir (Figura 7-14 e Figura 7-15) ilustram a variação da potência do bipolo com aplicação de curto trifásico em Xingu 500 kV, barra da inversora e curto monofásico em barra mais distante desta, em Parauebas 500 kV.

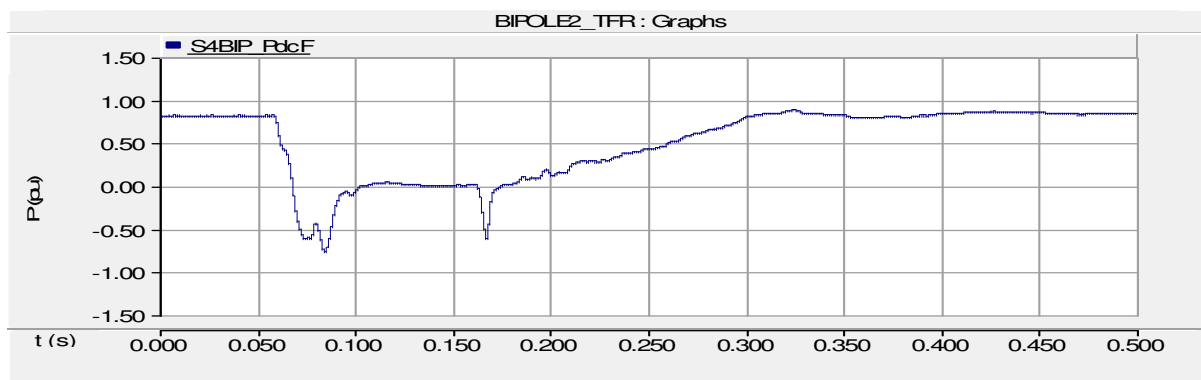


Figura 7-14 - Potência do bipolo com aplicação de curto 3Ø em Xingu 500 kV – 7P

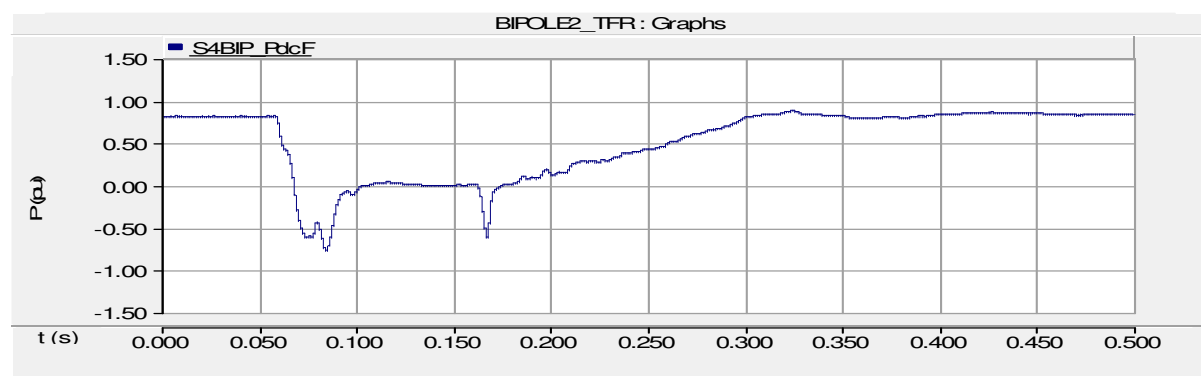


Figura 7-15 - Potência do bipolo com aplicação de curto 1 Ø em Paraupébas 500 kV – 7P

7.3.2 Curto-circuito na linha de transmissão em 800 kV CC – cenário 7P

Para diferentes localizações ao longo da linha de transmissão em ± 800 kV CC, nomeadamente, a partir da retificadora, a zero, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$ e $\frac{1}{1}$ do seu comprimento total de 2.439 km, foram simulados curtos-circuitos a terra em um dos polos e medidas as sobretensões máximas resultantes no outro polo (polo são), em todos os pontos considerados, como sumarizado na Tabela 7-7, com valores em por unidade da tensão nominal 800 kV. A tensão no ponto da linha localizado junto à retificadora em T. Rio pré curto foi ajustado em 0,99 pu.

Tabela 7-7 - Sobretensões em um dos polos da linha CC resultante de curto-circuito a terra no polo oposto (em pu de 800 kV) – cenário 7P

Ponto de aplicação do curto ao longo da linha CC	Ponto de medição da tensão (pu)				
	0	1/4	1/2	3/4	1/1
0 (0 km, retificadora)	1,29	1,20	1,08	1,04	0,98
$\frac{1}{4}$ (609,75 km)	1,12	1,35	1,17	1,04	0,98
$\frac{1}{2}$ (1219,5 km)	1,25	1,45	1,65	1,43	1,09
$\frac{3}{4}$ (1829,25 km)	1,28	1,39	1,37	1,53	1,20
1/1 (2.439 km, inversora)	1,22	1,17	1,08	1,06	1,20

Observa-se que as sobretensões mais elevadas ocorrem no ponto da linha onde ocorre o curto, havendo uma redução das sobretensões à medida em que o ponto de medição se afasta da localização do curto. Dentre os casos simulados a maior sobretensão encontrada (1,65 pu) foi no meio da linha para curto no meio da linha. Esses resultados são similares aos encontrados para a transmissão no sentido Norte-Sul (item 7.2.2) e estão em acordo com o relatado na bibliografia que trata desse tipo de fenômeno em linhas de transmissão aéreas CCAT [14].

A Figura 7-16 apresenta as sobretensões resultantes no polo são da linha de transmissão CC quando simulado curto no meio da linha. No Anexo V são apresentados os resultados das simulações para curtos aplicados em diferentes pontos da linha de corrente contínua.

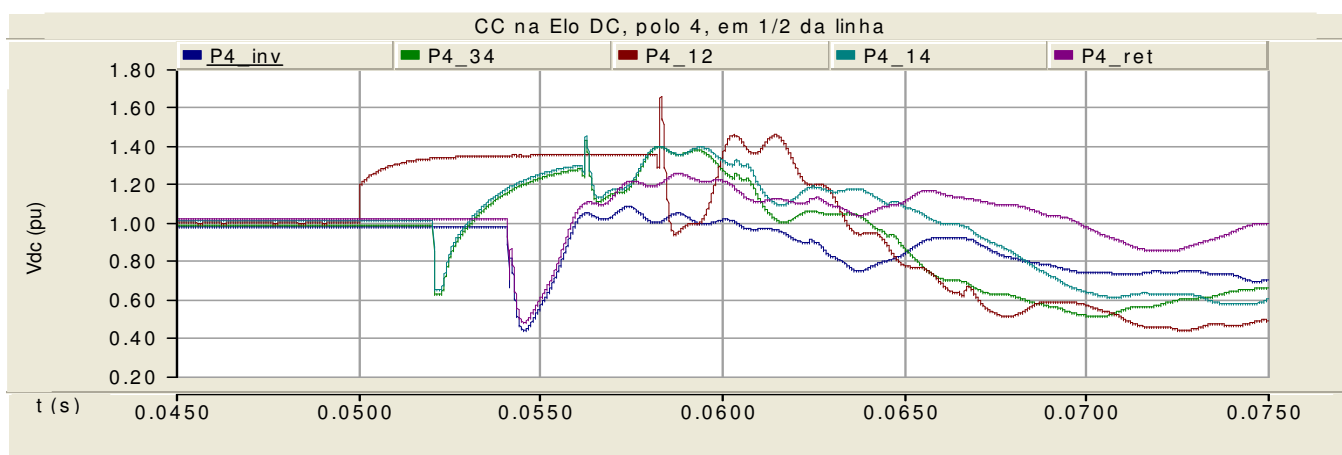


Figura 7-16 – Sobretensões no polo são ao longo da linha CC, resultante de curto entre polo e terra no meio da linha CC de 2.439 km – 7P

Tendo em conta que o comprimento da linha de transmissão pode ser alterado durante os levantamentos do Relatório R3, ou nas fases posteriores de projeto, foi simulado o curto-circuito no meio da linha, considerando a linha com comprimento 100 km superior. O resultado pouco difere (1,66 p.u.) do encontrado para o comprimento original. Considerando ainda que a distância entre polos da linha pode variar em função do projeto, foi simulado curto-circuito no meio da linha para a distância entre polos igual a 20 metros, resultando em sobretensão pouco maior (1,72 p.u.) que a encontrada para a concepção original com 21,90 metros.

7.3.3 Bloqueio de bipolo

Com o objetivo de verificar as sobretensões máximas decorrente de bloqueio de bipolo sem abertura de filtros das conversoras, foram simulados dois casos: bloqueio do bipolo em Xingu 500 kV e bloqueio de bipolo em T. Rio 500 kV. Para cada bloqueio foram medidos o maior pico de

tensão no intervalo de tempo entre o bloqueio (tempo 100 ms da simulação) e 50 ms após o bloqueio (tempo 150 ms da simulação) (0-50 ms) e após 50 ms do bloqueio (≥ 50 ms), como indicado na Tabela 7-8.

Tabela 7-8 - Sobretensões máximas decorrentes de bloqueio de bipolo – cenário 7P

Bloqueio do bipolo na conversora	Sobretensão máxima na barra (pu)			
	Xingu 500 kV		T. Rio 500 kV	
	0-50 ms	> 50 ms	0-50 ms	> 50 ms
Xingu (inversora)	1,29	1,32	1,39	1,21
T. Rio (retificadora)	1,21	1,23	1,21	1,13

As figuras a seguir (Figura 7-17 e Figura 7-18) ilustram o comportamento da tensão nas barras conversoras em decorrência do bloqueio de bipolo. O maior valor encontrado 1,39 pu, resultou em T Rio 500 kV em decorrência de bloqueio em Xingu 500 kV (inversora), em tempo inferior a 50 ms após o bloqueio. Considerando 50 ms após o bloqueio, a maior sobretensão registrada nessa barra foi igual a 1,21 pu. Para Xingu 500 kV, a maior sobretensão resultou igual a 1,32 pu. Todos os valores encontrados situam-se, portanto, abaixo de 1,40 pu.

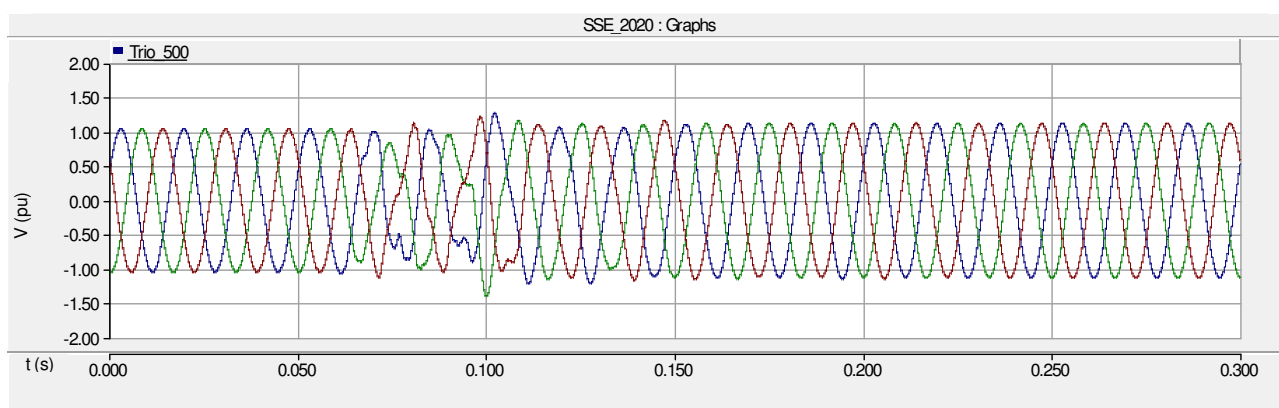


Figura 7-17 - Bloqueio de bipolo em Xingu – tensão em T Rio 500 kV (inversora) – 7P

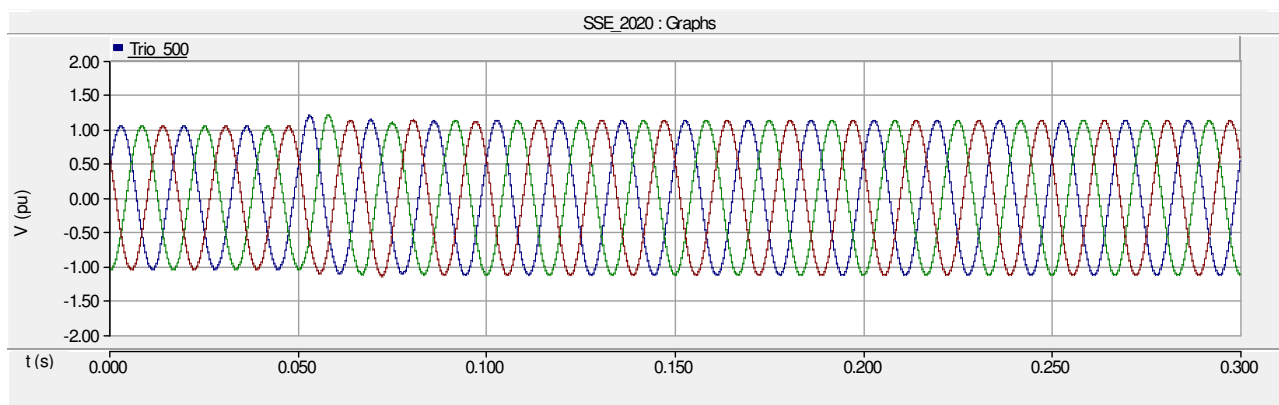


Figura 7-18 - Bloqueio de bipolo em T. Rio – tensão em T. Rio 500 kV (retificadora) – 7P

7.4 Principais constatações

No que diz respeito aos transitórios eletromagnéticos de manobra analisados, com os cenários considerados, transmissão sentido Norte-Sul (2L) e sentido Sul-Norte (7P), não se verificaram restrições à implantação do bipolo em ± 800 kV Xingu – Terminal Rio, segundo bipolo em ± 800 kV do tronco de transmissão CCAT entre a SE Xingu e a região Sudeste. Foram simulados curtos circuitos na rede CA, curtos circuitos na linha de transmissão CC e bloqueio de bipolo sem desligamento de filtros.

As sobretensões registradas na rede CA não foram elevadas e não deverão provocar restrições operativas. De forma análoga, os tempos de recuperação da potência ativa no elo, após essas faltas na rede CA, em nível correspondente a 90% da potência anterior ao curto, estão dentro de limites aceitáveis, abaixo de 200 ms.

Na linha CC foram simulados curtos-circuitos a terra, em diferentes localizações da linha, cada uma correspondente a uma quilometragem com relação ao retificador, aplicado entre um dos polos e a terra, com sobretensões medidas no outro polo (polo são). Os resultados confirmaram resultados previstos para linhas deste tipo, comprimento e classe de tensão.

Quanto às sobretensões decorrente de bloqueio de bipolo sem abertura de filtros das conversoras os resultados indicaram valores dentro de limites aceitáveis para este fenômeno e modelagem considerada.

8 ESTUDOS DE DESEMPENHO DINÂMICO

Os estudos de interação do sistema CA/CC envolve, entre outros aspectos, a avaliação da recuperação do sistema após um distúrbio, estabilidade de tensão e sobretensões especialmente em sistemas em que o elo CCAT esteja conectado em uma rede fraca. As análises foram realizadas com o software PSCAD. Ressalta-se que para avaliação do desempenho dinâmico adequado do sistema CCAT também foi utilizado o programa ANATEM (modelos RMS) com os parâmetros de controle atualizados do estudo de PSCAD/DPS.

A recuperação da potência CC é afetada entre outros pelos ajustes da compensação de corrente reativa (estatismo do regulador automático de tensão - RAT) dos geradores de Belo Monte. As máquinas do Belo Monte foram representadas com seus reguladores automáticos de tensão – RAT, de acordo com os modelos apresentados no Anexo VII onde foram considerados melhorias em relação aos dados utilizados no estudo do R1 considerado os ajustes e testes na modelagem e parametrização do regulador de tensão. Devido à proximidade elétrica das máquinas de Tucuruí I e II à subestação de Xingu, também foi detalhado o controle do RAT dessas máquinas (Anexo VIII).

A Tabela 8-1 apresenta um resumo das simulações realizadas com PSCAD. Algumas destas faltas foram validadas com ANATEM.

Tabela 8-1 - Configuração 2 bipolos. Cenários 2L e 7P

Falta	Tempo (ms)	Local	Contingência
1 ϕ	100	Terminal Xingu	LT 500 kV Xingu-Parauapebas C1
3 ϕ	100	Terminal Xingu	LT 500 kV Xingu-Parauapebas C1
1 ϕ	100	Terminal Xingu	LT 500 kV Xingu-Tucuruí 2 C1
3 ϕ	100	Terminal Xingu	LT 500 kV Xingu-Tucuruí 2 C1
1 ϕ	100	Terminal Rio	LT 500 kV Terminal Rio-Nova Iguaçu C1
3 ϕ	100	Terminal Rio	LT 500 kV Terminal Rio- Nova Iguaçu C1
1 ϕ	100	Fernão Dias	LT 500 kV Terminal Rio-Fernão Dias
3 ϕ	100	Fernão Dias	LT 500 kV Terminal Rio-Fernão Dias
-	-	-	Perda de polo
-	-	-	Perda bipolo

8.1 Capacidade de sobrecarga de longa e curta duração

A capacidade de sobrecarga de corrente, indicada no estudo do R1 [2], foi modelada no PSCAD, com exceção da sobrecarga de 4 horas, conforme descrito a seguir:

- Sobrecarga de longa duração de cada polo de 33% da potência nominal por 30 **minutos** no cenário 2L e de somente 30 **segundos** no cenário 7P (potência reversa).
- Sobrecarga de 10% por 4 horas no cenário 7P (potência reversa) recomendada no R1 [2]. Não foi modelada por ser uma necessidade sistêmica de mais longo termo.
- Sobrecarga de curta duração (5 segundos) de 50% da potência nominal, com redução em rampa suave até o valor de sobrecarga de longa duração **nos dois sentidos de operação**.

Ressalta-se a importância da capacidade de sobrecarga de curta duração para o desempenho dinâmico do sistema elétrico brasileiro, devendo estar disponível nos dois sentidos de operação. Verificou-se a importância da sobrecarga de 50% por 5 segundos principalmente no cenário 2L “sentido Norte para Sudeste”. Na perda de um polo é importante para a estabilidade do sistema que o polo remanescente assuma 50% de sobrecarga, mantendo a distribuição de fluxo mais próxima da condição pré-falta, uma vez que os bipolos chegam em subestações diferentes. No caso da perda de bipolo também foi necessário a sobrecarga de 50% de curta duração, pois proporciona menor corte de máquinas e menor afundamento de tensão no sistema receptor após a perda de um bipolo.

O STOL (“Short Time Overload Limiter”) no PPC (“Pole Power Control”) considerado na presente análise tanto para a transmissão direta como para a transmissão inversa é apresentado na Figura 8-1. Nesta fase do estudo, foi modelado um controle simples em que o limite máximo de corrente no PPC é mantido em 1,5 pu por 5 segundos e, em seguida, limitado à 1,36 pu permanentemente. A ordem de corrente de 1,36 pu refere-se ao valor necessário para produzir 1,33 pu na potência no polo sã. O limite de corrente proposto em um polo (1,36pu) é adequado quando há a perda do outro polo. No entanto, se a transferência de potência é efetuada para o outro bipolo, este irá necessitar de limites ligeiramente superiores pois as tensões da rede CA serão mais impactadas pelo aumento de carga. Assim, dependendo do caso, o limite da máxima ordem de corrente deverá ser melhor ajustado.

Num projeto real, a transição de 1,5 pu de corrente para 1,33 pu de potência envolveria o “tap changer” do transformador conversor. O STOL iria reduzir lentamente o limite de corrente para 1,33 pu, não 1,36pu como no modelo considerado. Deste modo, o comutador iria restaurar,

após algumas dezenas de segundos, a tensão do retificador para 1,0 pu, ponto em que a potência seria 1,33pu como desejado.

Uma vez que não foi modelado um comutador automático de tap no modelo do PSCAD, não será possível simular a ação lenta do comutador. Depende-se, portanto, dos limites da ordem de corrente (acima de 1,36pu) para obter 1,33pu na potência.

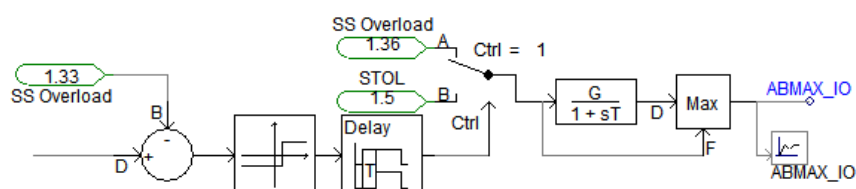


Figura 8-1 STOL (Short Time Overload Limiter- STOL) considerado no estudo

a) potência no sentido direto

Depois do “trip” de um polo, o polo são é chamado a assumir imediatamente 1.5 pu de potência. Há um pequeno “overshoot” medido na corrente devido ao “Current Margin Controllers - CMC” detectar uma perda temporária no controle de corrente do retificador. De modo que o inversor assume o controle de corrente momentaneamente, por algumas centenas de milissegundos. Na sequência, o controle de corrente retorna para o retificador. Para atingir a potência 1,49 pu, foi necessário uma corrente DC de 1,52 pu.

A razão de se ter sobrecorrente transitória ($I_{nom}=2,5$ kA) para conseguir 1,5 pu de potência é devido a uma pequena queda da tensão no elo CCAT. No retificador não há uma queda significativa de tensão, mas a tensão contínua do inversor do bipolo 2 cai de 0,93 pu para cerca 0,89 pu. Após 5 segundos a rampa de corrente cai lentamente para 1,36 pu.

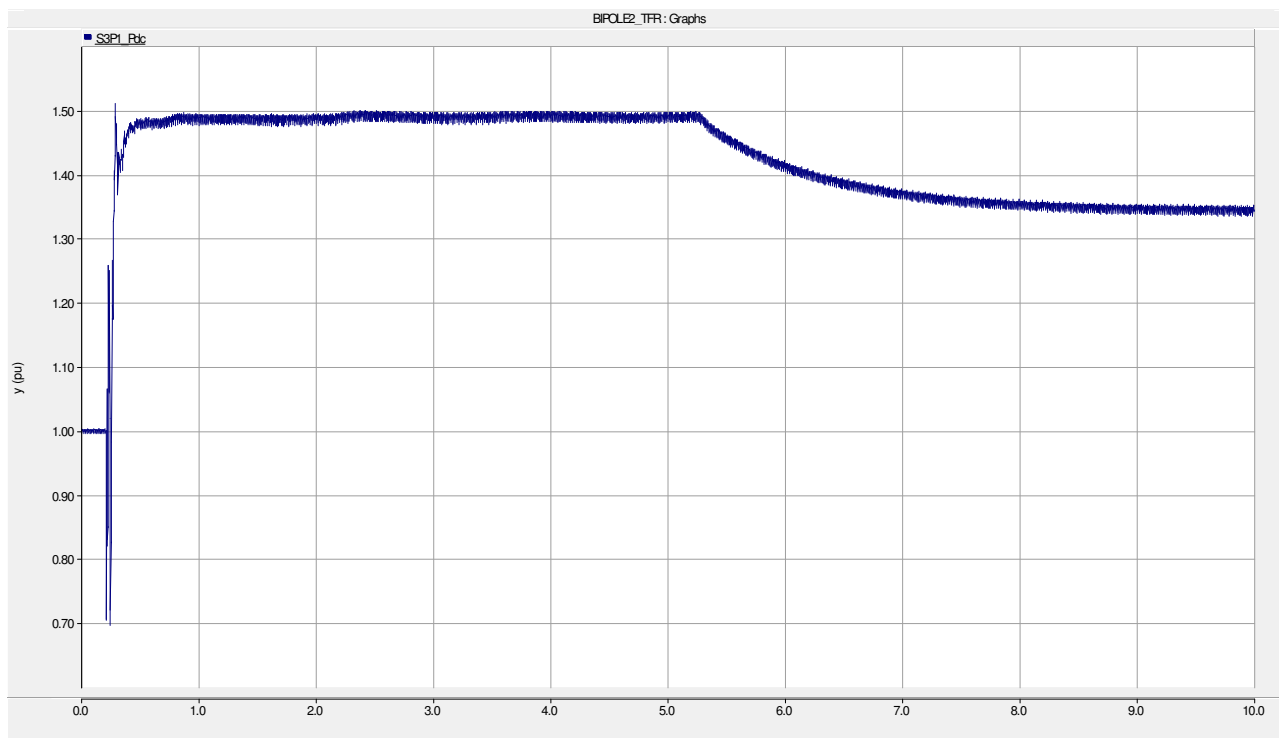
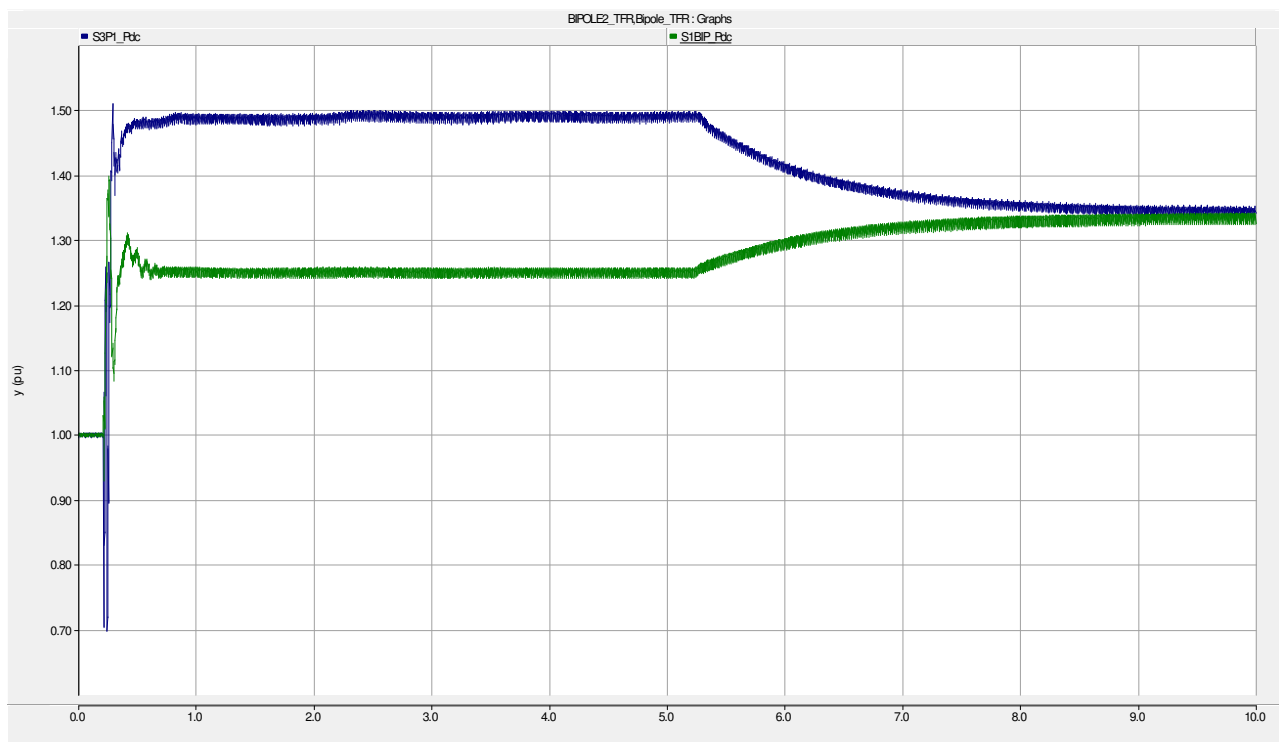


Figura 8-2 Potência polo 1 do retificador após perda do polo 2 (Bipolo2). Cenário 2L.

Na perda de um polo do bipolo 2, é necessário que o bipolo 1 compense parte da potência perdida no bipolo 2. A lógica de redistribuição de potência entre os bipolos está detalhada no item 8.3 e a situação 3 mostrada na Figura 8-3 foi implementada nos casos do PSCAD. A curva azul representa a potência do polo são do bipolo 2 e a curva verde representa a potência do bipolo 1.



— Potência no retificador do polo 1 bipolo2 — Potência no retificador do bipolo 1
Figura 8-3 Potência no retificador do polo 1 bipolo2 e bipolo 1. Perda do polo 2 (Bipolo2). Cenário 2L.

b) potência no sentido reverso

As sobrecargas de potência, curta e longa duração, em sentido reverso serão com base na potência nominal do retificador de 3.270 MW, que corresponde a 2,04 kA. Verificou-se necessário a sobrecarga de 50% por 5 segundos, 33% por 30 segundos e 10% por 4 horas.

8.2 Recuperação do elo CCAT após faltas no sistema CA

A recuperação de potência CC é limitada pela capacidade dos sistemas CA suportarem a variação do consumo de potência reativa durante o transitório de potência.

Segue-se neste capítulo o mesmo critério de tempo de recuperação da potência ativa do elo CCAT: após faltas na rede CA o elo deverá se recuperar em nível correspondente a 90% da potência anterior ao curto, sem voltar abaixo de 90% em tempo inferior a 200 ms.

A Figura 8-4 apresenta o desempenho da potência CC do segundo bipolo de Belo Monte após uma falta CA monofásica, 100 ms, no inversor, Terminal Rio, seguida da abertura da LT 500 kV Terminal Rio-Nova Iguaçu, no CEN 2L (N->SE). Deste modo, a recuperação da potência do

bipolo 2, após a falta, atinge 90% da potência em 96 ms, atendendo os critérios.

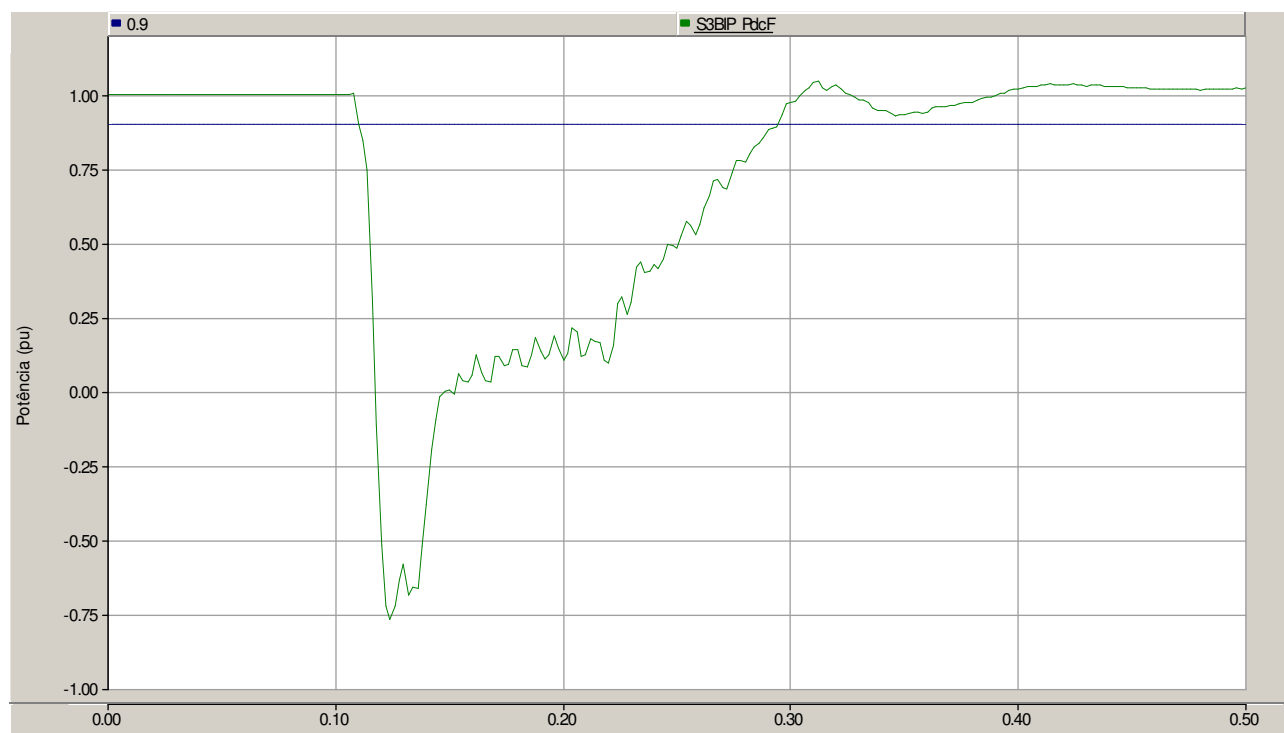


Figura 8-4 – Potência CC do elo Belo Monte. Falta 1F em Terminal Rio com abertura da LT 500 kV Terminal Rio Nova Iguaçu. (PSCAD). Cenário 2L.

A pior situação analisada no cenário 2L, em termos do tempo de recuperação do elo CCAT, correspondeu nas faltas trifásicas no lado inversor no Terminal Rio e Estreito, conforme apresentado na Tabela 8-2. A recuperação da potência para as faltas trifásicas também apresenta tempo inferior a 200 ms para a potência CC atingir 90% do valor inicial considerando procedimento de rede vigente.

O resultado dos defeitos simulados no PSCAD estão apresentados nas figuras do Anexo XI.

Como observado anteriormente, o tempo de recuperação da potência CC é limitada pela capacidade dos sistemas CA fornecerem suporte de potência reativa para sustentar as tensões CA durante o período transitório. No caso do projeto do elo CCAT de Itaipu, foram utilizados quatro compensadores síncronos para aumentar o nível de curto-circuito na barra inversora e fornecer suporte transitório de potência reativa. O mesmo ocorre no do elo CCAT do Belo Monte no cenário 7P, que representa o período seco da região Norte, onde são necessários 3 máquinas operando como síncrono na condição mais adversa. Neste cenário, o tempo de recuperação é observado na Figura 8-5. Embora a corrente especificada para as conversoras em potência reversa seja 2,04 kA, os controles representados no PSCAD tem como referência uma corrente de 2,5 kA. Isto explica porque observamos uma potência de 0,8175 pu quando a potência transmitida é de 3270 MW.

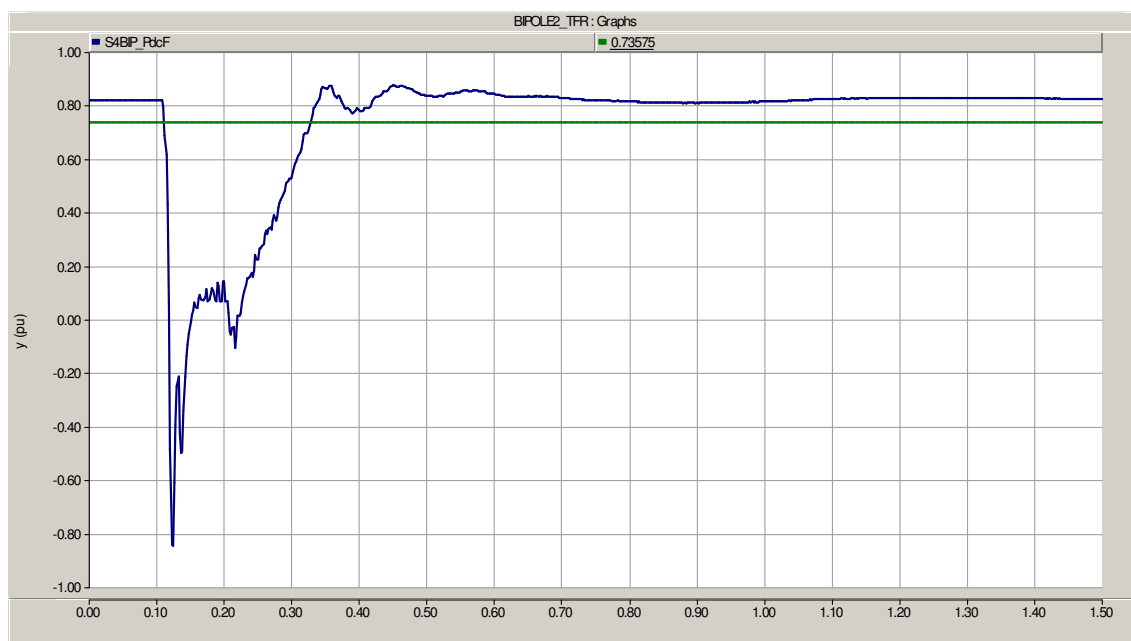


Figura 8-5 – Potência CC do bipolo 2 de Belo Monte. Falta 1F em Xingu e abertura da LT Xingu-Tucuruí 2 (PSCAD). Cenário 7P.

A Tabela 8-2 e Tabela 8-3 resumem os tempos de recuperação, com abertura de linha de transmissão AC, para os cenários 2L e 7P respectivamente.

Tabela 8-2 - Tempo de Recuperação da potência CC para o cenário 2L

Defeito	Bipolo 1 Estreito 500 kV	Bipolo 2 Terminal Rio 500 kV
CC 1F Xingu	85 ms	85 ms
CC 3F Xingu	95 ms	94 ms
CC 1F F.Dias	62 ms	75 ms
CC 3F F.Dias	78 ms	143 ms
CC 1F T. Rio	51 ms	96 ms
CC 3F T.I Rio	65 ms	142 ms

Tabela 8-3 - Tempo de Recuperação da potência CC para o cenário 7P

Defeito	Bipolo 1	Bipolo 2
	Estreito 500 kV	Terminal Rio 500 kV
CC 1F T. Rio	65 ms	54 ms
CC 3F T. Rio	20 ms	103 ms
CC 1F Xingu	114 ms	128 ms
CC 3F Xingu	152 ms	146 ms

As análises para avaliar o comportamento dinâmico foram realizadas no ANATEM com a rede completa (SIN) e comparadas a rede modelada no PSCAD (rede equivalente) de forma a consolidar a resposta dinâmica.

Cabe lembrar, entretanto, que o critério para avaliação do desempenho dinâmico e a estabilidade eletromecânica do sistema CA, com o programa ANATEM, considera apenas as faltas monofásicas. Desta forma, para avaliação do tempo de recuperação, a resposta do elo CCAT deverá estar condicionada ao comportamento dinâmico deste sistema.

A comparação do desempenho dos modelos em ANATEM e PSCAD foi feita no CEN 2L para uma falta monofásica no inversor (Terminal Rio) com abertura da LT 500 kV Terminal Rio – Nova Iguaçu. No Anexo X encontram-se os parâmetros do controle do elo CCAT utilizados em cada programa.

Observa-se na Figura 8-6 que em ambas modelagens, ANATEM e PSCAD, para uma falta CA no inversor, Terminal Rio, ocorre uma acentuada oscilação na tensão de Xingu 500 kV (de 0,2 a 1,4 segundos) melhor amortecida na rede do PSCAD.

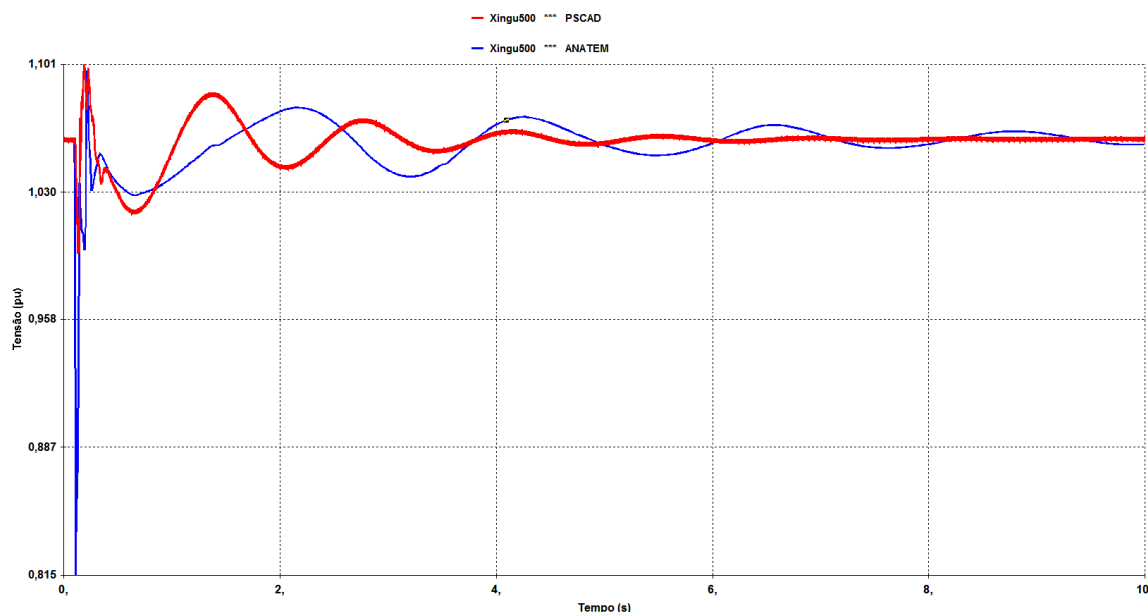


Figura 8-6 – Tensão em Xingu 500 kV, p.u. Falta 1F no Terminal Rio com abertura da LT 500 kV Terminal Rio -Nova Iguaçu.

Cabe ressaltar que o modo de oscilação verificado no caso com a rede completa (ANATEM) prejudica sensivelmente o desempenho do elo de Belo Monte e pode ser amortecido com o ajuste do PSS das máquinas do Norte e Nordeste.

A Figura 8-7 apresenta a comparação do desempenho do elo no CEN 2L para uma falta monofásica, de 100 ms, no inversor (Terminal Rio), com abertura da LT 500 kV Terminal Rio – Nova Iguaçu, obtidas no ANATEM e PSCAD.

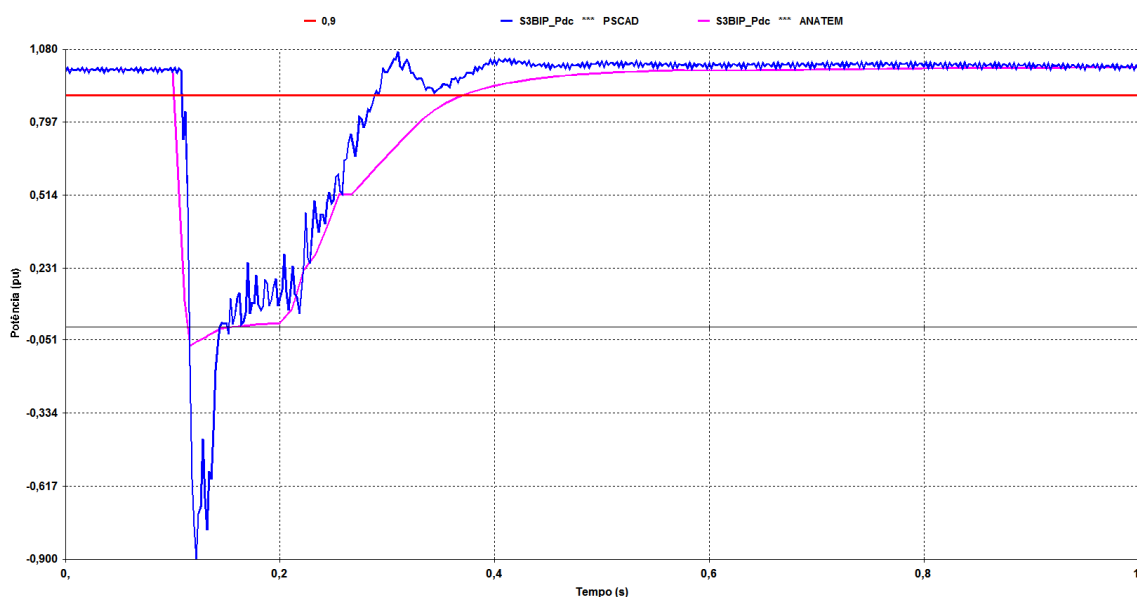
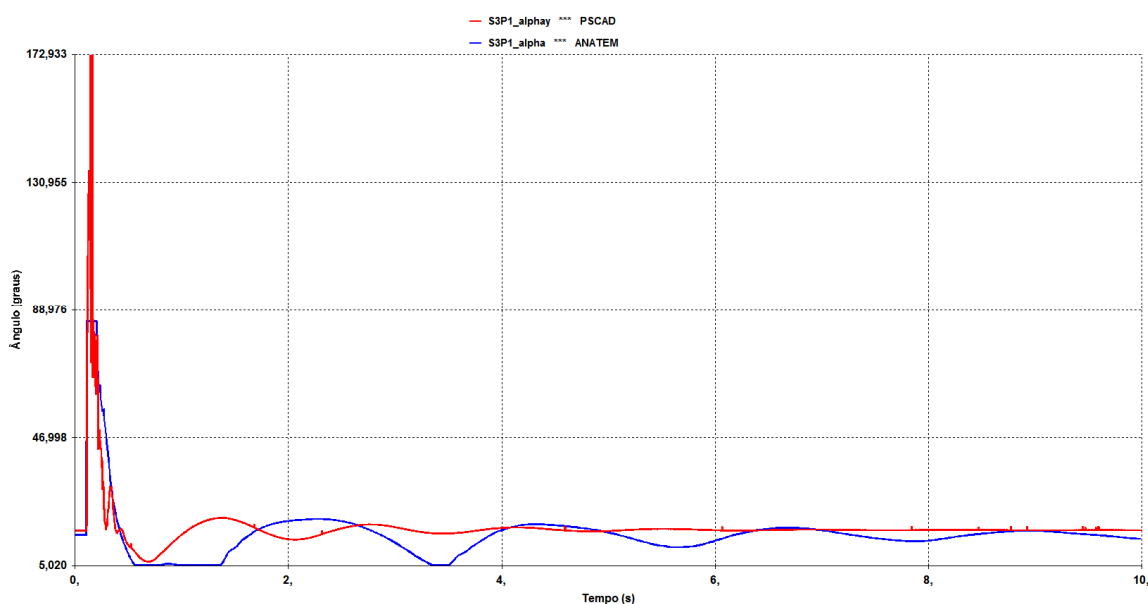


Figura 8-7 – Potência no bipolo 2, em p.u. Falta 1F no Terminal Rio com abertura da LT 500 kV Terminal Rio- Nova Iguaçu.

Nesta emergência, observa-se na modelagem do ANATEM que devido a baixa tensão na retificadora e alta tensão na inversora, α atinge α mínimo, evidenciando a perda de controle da corrente CC pelo retificador.

Uma diferença de modelagem entre ANATEM e PSCAD é o bloco "Alpha Max Calc" modelado no PSCAD, que aumentam o gama durante o tempo de duração da falta e por um curto período após a falta na rede CA. O aumento do gama é uma função baseada na medição da componente fundamental e de segundo harmônico na tensão U_{dio} . Como o ANATEM considera modelo fasorial, os componentes de frequência fundamental e de segundo harmônico não são medidas na tensão U_{dio} , devendo ser modelado o bloco "Alpha Max calc" utilizado no modelo PSCAD para que o gama observado no ANATEM apresente o mesmo desempenho do gama apresentado no modelo PSCAD.



(a)

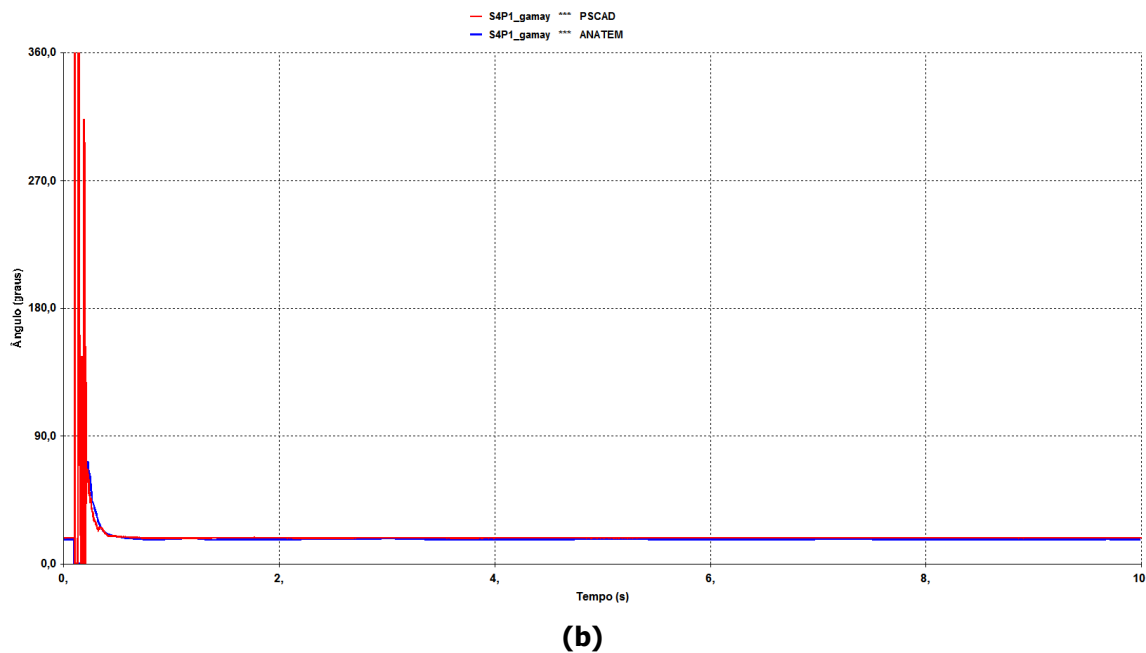


Figura 8-8 – (a) Ângulo alfa do retificador Xingu, em graus e (b) Ângulo gama no inversor no Terminal Rio. Falta 1F no Terminal Rio com abertura da LT 500 kV Terminal Rio Nova Iguaçu.

8.3 Funções do controle mestre

Para os bipolos previstos na transmissão de Belo Monte foram avaliadas as principais funções do Controle Mestre, apresentadas a seguir:

- 1 – Redistribuir a potência ativa entre os polos são dos dois bipolos em caso de perda de capacidade de transmissão de um ou mais polos devido a uma contingência;
- 2 – Reduzir emergencialmente a ordem de potência dos dois bipolos devido à perda de geração de usina ou devido às limitações de transmissão na rede CA em consequência de alguma contingência múltipla. Esta função de redução é conhecida como "runback";
- 3 - Mandar reduzir geração da usina devido a perda de bipolo ou devido à limitações de transmissão na rede CA em consequência de alguma contingência múltipla;
- 4 – Evitar a auto-excitação das máquinas ao monitorar e controlar a quantidade máxima de filtros que podem estar conectados na subestação Xingu, de acordo com configuração operativa da rede CA;
- 5 – Controlar o fluxo de reativos CA/CC/CA, contribuindo para minimizar sobretensões nas subestações da rede CA devido ao excesso de bancos de capacitores ou filtros conectados à rede.

6 - Controlar o chaveamento de filtros do(s) bipolo(s), por requisitos de desempenho harmônico, o que permitirá otimização do uso da filtragem harmônica.

8.3.1 Redistribuir a potência ativa entre os bipolos 1 e 2

A redistribuição de potência deve ser feita considerando todos os quatro polos (os dois bipolos), tanto para o fluxo direto (N/NE->SE), quanto para o fluxo inverso (SE->N/NE), até as suas capacidades máximas de sobrecarga [2].

No caso do sistema CCAT de Belo Monte, a redistribuição de potência ativa após a perda de um bipolo pode ser realizada em nível de bipolo, sem necessidade do Controle Mestre, desde que alguns sinais sejam trocados diretamente entre os bipolos. É o que ocorre no projeto de Itaipu e Nelson River (Canadá). A ação normal do *Bipole Power Control* - BPC é de carregar o polo são até o limite de sobrecarga permitida. Se não for suficiente para satisfazer a ordem de potência do bipolo, a deficiência, calculada localmente no BPC, pode ser enviada diretamente para o outro bipolo sem passar por um nível hierárquico de controle mais alto. Neste caso, a ação é mais efetiva e confiável, dispensando a necessidade do Controle Mestre para esta função.

Para bloqueio de bipolo, toda a potência deve ser transferida para o bipolo remanescente, limitada à capacidade de sobrecarga de curta-duração (150% por 5 segundos) e de longa duração (133% por 30 minutos) dos polos.

Para bloqueio de polo, diferentes estratégias podem ser usadas. A filosofia proposta se baseia no princípio de minimizar a perda de potência transmitida no bipolo no qual houve perda de conversores, uma vez que os bipolos chegam em terminais localizados em pontos elétricos distintos. Com isso, variações súbitas de potência nos terminais receptores são minimizadas.

Após o bloqueio de um polo, o déficit de potência deverá ser transferido integralmente para o polo remanescente do mesmo bipolo, limitado à sua capacidade de sobrecarga de curta e longa duração. Três situações podem ocorrer:

1º situação:

Caso após assumir o déficit de potência, a ordem de potência do polo remanescente seja inferior às suas capacidades de curta-duração e de longa-duração, nenhuma potência é transferida para o

outro bipolo, pois o próprio bipolo tem capacidade de absorver o déficit de potência, conforme mostrado na Figura 8-9.

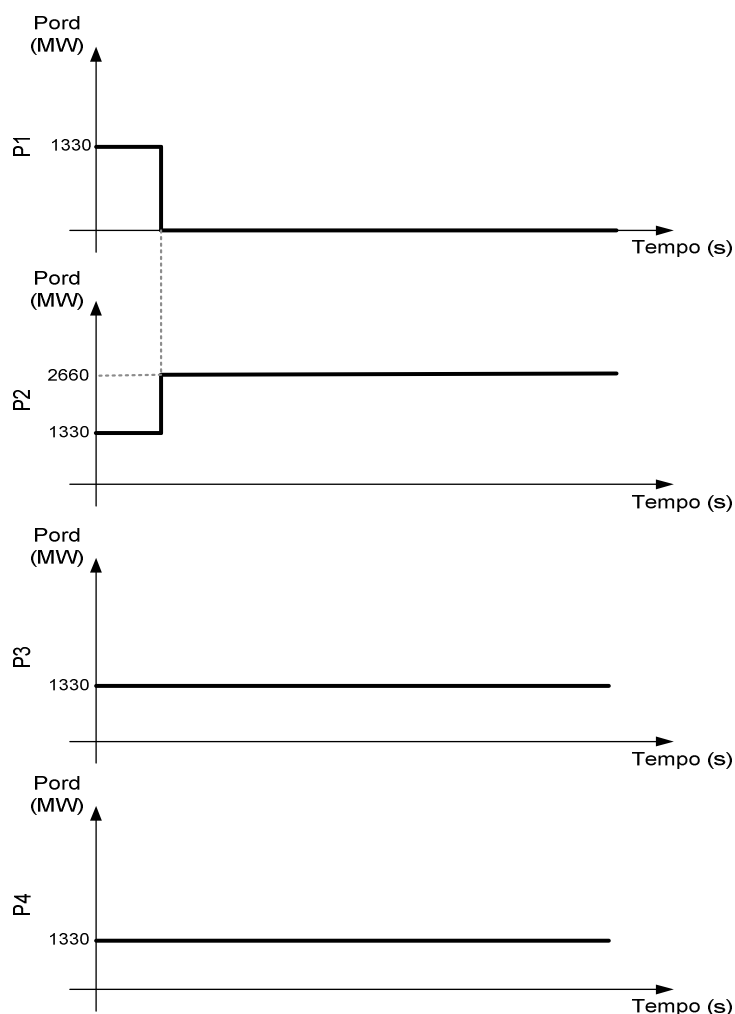


Figura 8-9 - 1ª situação

2ª situação:

Caso após assumir o déficit de potência, a ordem de potência do polo remanescente seja superior à sua capacidade de longa duração (133%) e inferior à de curta-duração (150%), nenhuma potência é transferida inicialmente para o outro bipolo. O polo remanescente entra na região de sobrecarga de curta-duração e, após certo tempo (5s para 150%), o STOL do polo atua, reduzindo a ordem de corrente do polo em rampa suave para o limite de longa-duração (133%). Durante a atuação do STOL, há perda de potência transmitida. Essa potência é então automaticamente transferida para o outro bipolo (na mesma taxa que o STOL atua), conforme mostrado na Figura 8-10.

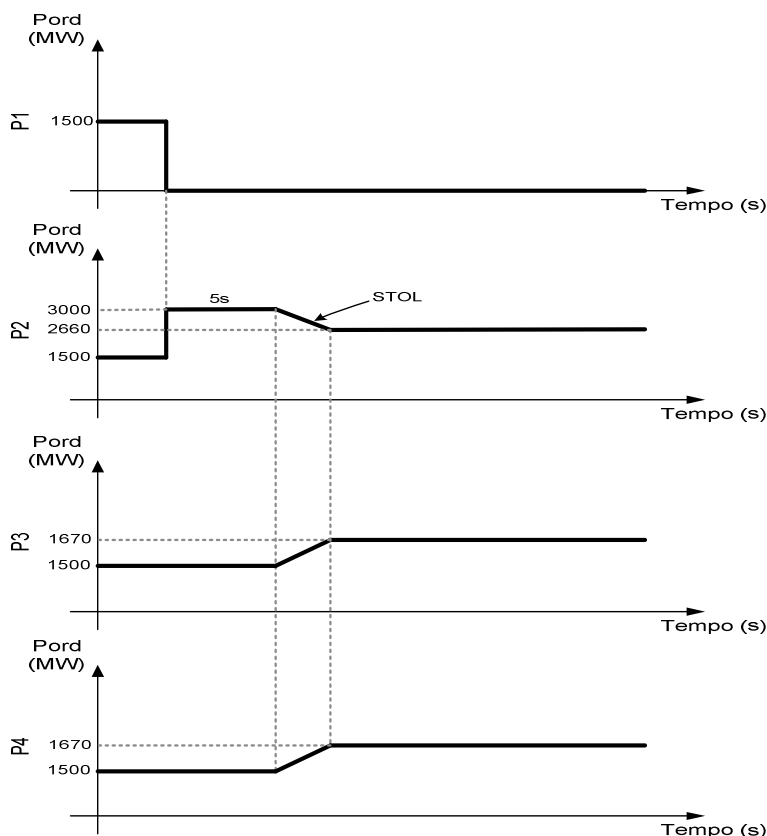


Figura 8-10 - 2ª situação

3ª situação:

Caso após assumir o déficit de potência, a ordem de potência do polo remanescente seja superior à sua capacidade de curta-duração (150%), o mesmo assume a potência até o seu limite de curta-duração e o excedente é transferido instantaneamente para o outro bipolo (delay apenas de processamento). O polo remanescente entra na região de sobrecarga de curta-duração e, após certo tempo (5s para 150%), o STOL do polo atua, reduzindo a ordem de corrente do polo em rampa suave para o limite de longa-duração (133%). Durante a atuação do STOL, há perda de potência transmitida. Essa potência é então automaticamente transferida para o outro bipolo (na mesma taxa que o STOL atua), conforme mostrado na Figura 8-11.

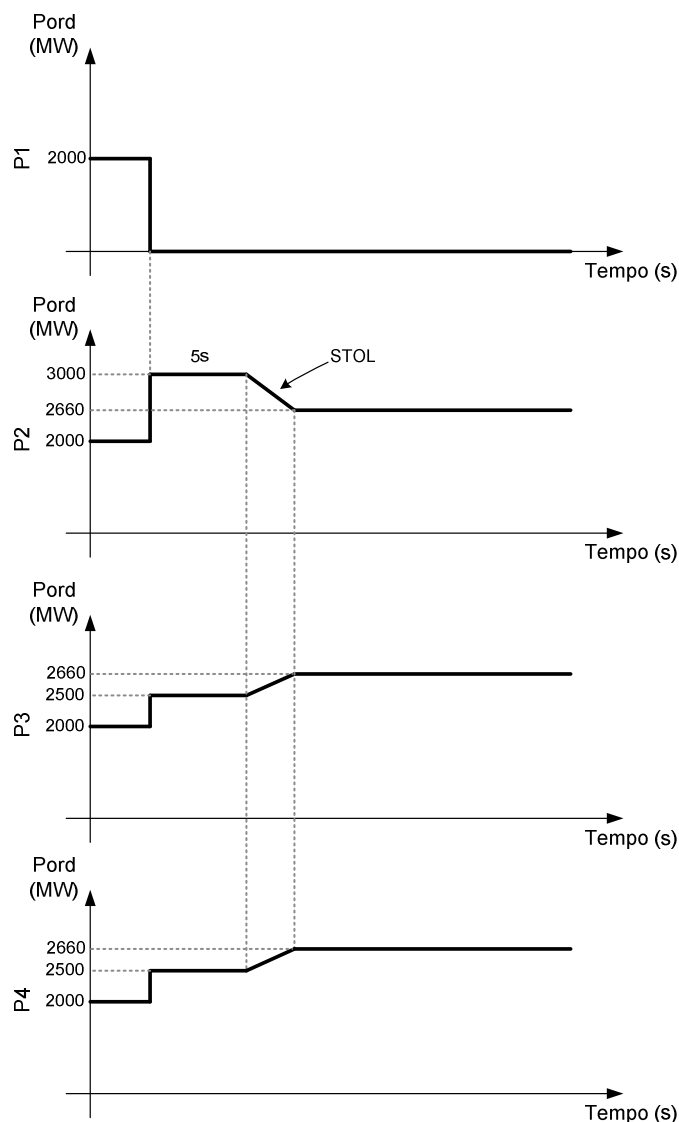


Figura 8-11 - 3ª situação

Esta filosofia se aplica naturalmente quando o sentido de transmissão de potência é de Xingu para Estreito / Terminal Rio. Entretanto, quando a transmissão é no sentido reverso, a separação geográfica das retificadoras exige ponderações.

Existindo telecomunicações entre os terminais retificador e inversor dos polos, entre os polos positivo e negativo de um mesmo bipolo e entre estações conversoras, a redistribuição de potência ativa pode ser realizada em qualquer lugar.

Quando o sentido de transmissão é N/NE->SE, o retificador dos dois bipolos estão na mesma estação e a troca de sinais não depende de um sistema de comunicação externo à SE Xingu. Quando o sentido de transmissão é SE->N/NE, os retificadores estão separados geograficamente.

Neste caso, é necessário uma comunicação rápida e confiável entre Estreito e Terminal Rio, o que

EPE-DEE-RE-136/2014-rev0- Detalhamento da alternativa de referência- Relatório R2_ Expansão da interligação entre as regiões Norte/Nordeste e Sudeste/Centro Oeste. Elo de Corrente Contínua ± 800 kV Xingu –Terminal Rio.

pode ser feito a partir da comunicação dos próprios bipolos, através dos cabos OPGW da linha CC ou usando um sistema de comunicação externo, através da rede elétrica CA. A melhor forma para a implementação prática da filosofia de redistribuição de potência recomendada neste relatório deverá ser avaliada na etapa de Projeto Básico.

8.3.2 Redução ou limitação da ordem de potência dos bipolos

Na transmissão do Madeira, o “runback” foi recomendado na perda de uma ou mais máquinas das usinas de Jirau ou Santo Antônio ou devido a limitações de transmissão na SE Coletora Porto Velho ou na SE Araraquara 2, em consequência de contingências severas.

A configuração da SE GIS Belo Monte apresenta arranjo conforme apresentado na Figura 8-12 onde as barras são seccionadas por disjuntores de forma a oferecer maior confiabilidade operativa ao sistema.

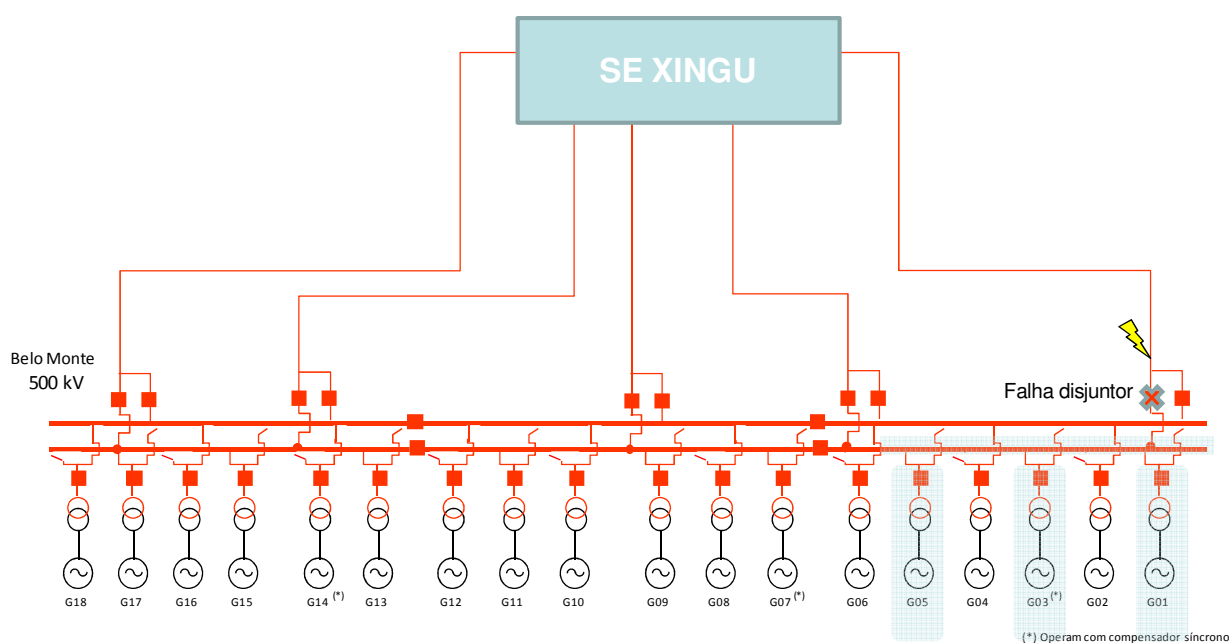


Figura 8-12 – Configuração da SE 500 kV Belo Monte (disjuntor separando os barramento)

De acordo com o diagrama esquemático Figura 8-12, o número máximo de unidades geradoras que podem ser desligadas simultaneamente na condição mais adversa pode chegar a três o que representa uma perda de cerca de 1.800 MW. A condição que leva a perda de uma das seções do barramento ocorre no defeito de uma das LTs 500 kV Belo Monte-Xingu havendo falha do disjuntor.

Observa-se nesta situação que as variações de frequência e abertura angular das máquinas da região é bastante reduzido.

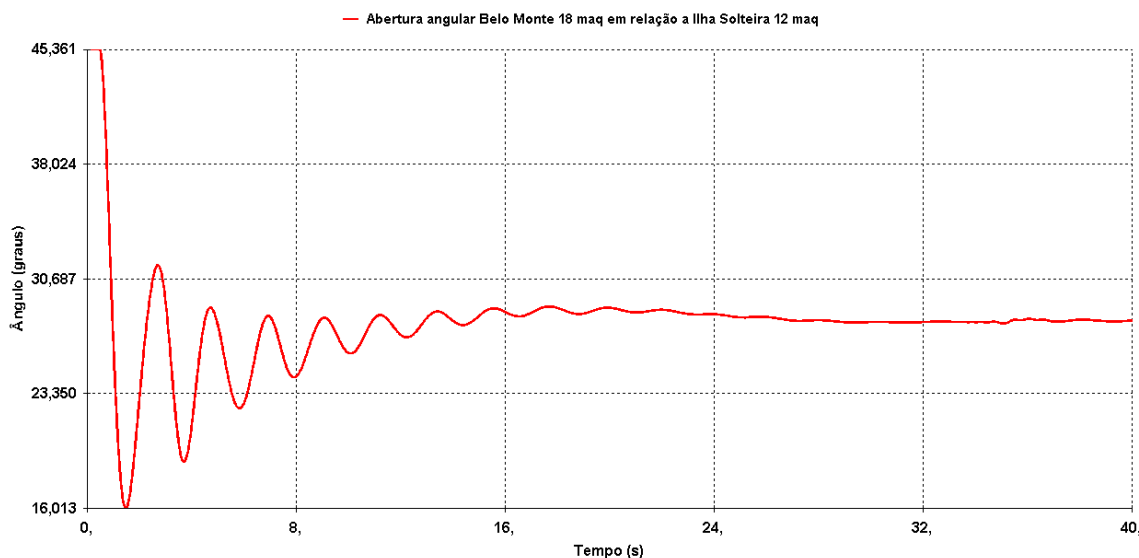


Figura 8-13 – Abertura angular entre as usinas de Belo Monte e as máquinas de Ilha Solteira. Perda de 3 máquinas de Belo Monte. Cenário 2L.

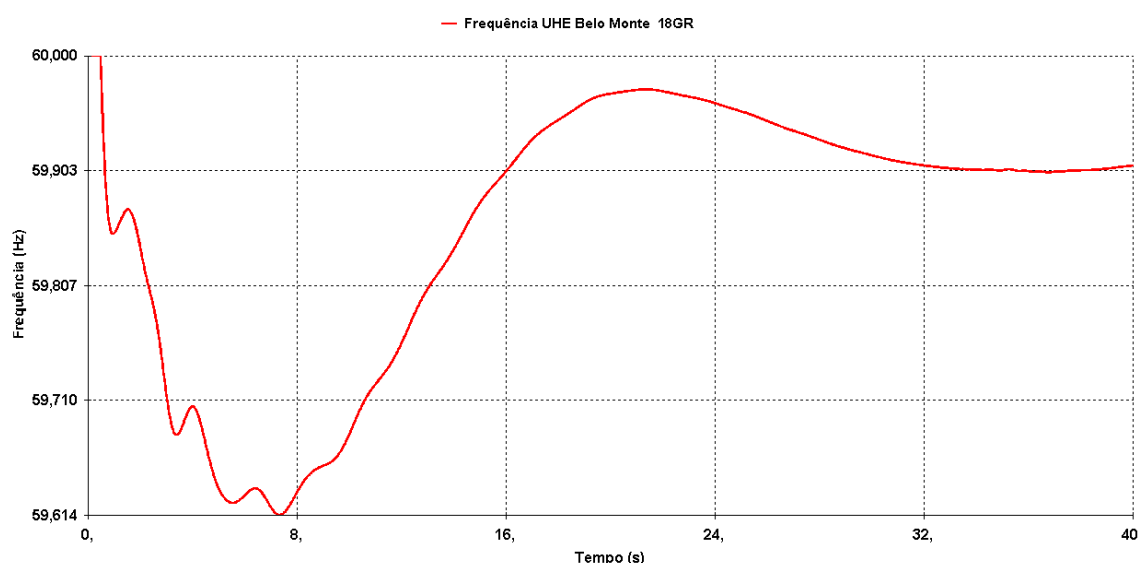


Figura 8-14 – Frequência angular das usinas de Belo Monte. Perda de 3 máquinas de Belo Monte. Cenário 2L.

Observa-se que não há sobretensões sustentadas nas barras do sistema Norte 500 kV e da interligação Norte-Sul.

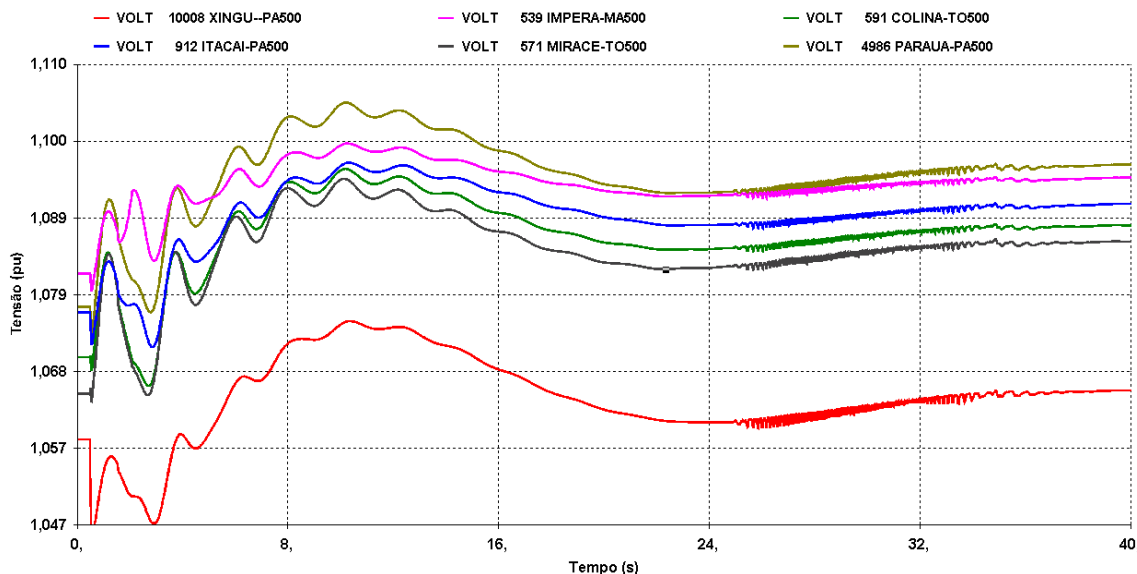


Figura 8-15 – Tensão nas subestações 500 kV próximo à Xingu. Perda de 3 máquinas da UHE Belo Monte. Cenário 2L.

Contudo, uma redução ou limitação da potência durante perdas de elementos no sistema CA inversor pode ser necessária em situações de emergências múltiplas que reduzam significativamente o nível de curto-circuito na subestação inversora. Este limitador reduz transitoriamente a ordem de potência para níveis que a rede CA possa suportar e evita colapsos de tensão sucessivos. No caso do Belo Monte, no cenário 7P, sentido SE->N/NE, a utilização do "runback" é importante visto que a SE Xingu apresenta níveis de curto-circuito que podem vir a requisitar este controle em situações mais adversas.

Para a utilização do "runback" com apenas 1 bipolo pode ser realizado a nível do bipolo, Contudo se faz necessário a implantação do GSC (Generator Station Coordinator) na usina de Belo Monte.

Com a presença do 2º bipolo, o Master Control é realmente importante. A utilização de "runbacks" no GSC na usina de Belo Monte ou em outros locais precisam ser distribuídos ou repartidos entre os dois bipolos. Os bipolos podem estar operando com diferentes cargas ou talvez um polo ou bipolo esteja fora de operação. Assim, os "runbacks" precisam ser enviados para o bipolo que tem a maior potência transmitida. Algum tipo de alocação "runback" é necessário e será melhor realizado por um controle mestre que supervisiona os dois bipolos.

Além disso, faz-se necessário prever o "trip" rápido de filtros CA na utilização de grandes "runbacks".

8.3.3 Risco de auto-excitação

As unidades geradoras de Belo Monte possuem grande capacidade de absorção de reativos. Além disso, a usina está conectada também à rede CA na região Norte. Estes dois fatores diminuem sobremaneira o risco de auto-excitação das máquinas da UHE Belo Monte.

A situação mais crítica é período seco da região Norte com o elo no sentido SE → Norte onde haverá apenas três unidades geradoras em operação funcionando como compensadores síncronos. Mesmo neste cenário essas máquinas têm capacidade de absorver o excedente de potência reativa proveniente dos filtros conectados em Xingu. A figura a seguir apresenta o consumo de potência reativa das máquinas de Belo Monte na perda do bipolo, que estarão operando como compensadores síncronos (3 máquinas). Neste cenário, com todos os filtros presentes, as máquinas absorverão o equivalente a 45% da potência reativa que o elo necessita em regime. Após a perda do bipolo, as máquinas de Belo Monte ainda dispõem de 33% de sua capacidade para absorver potência reativa.

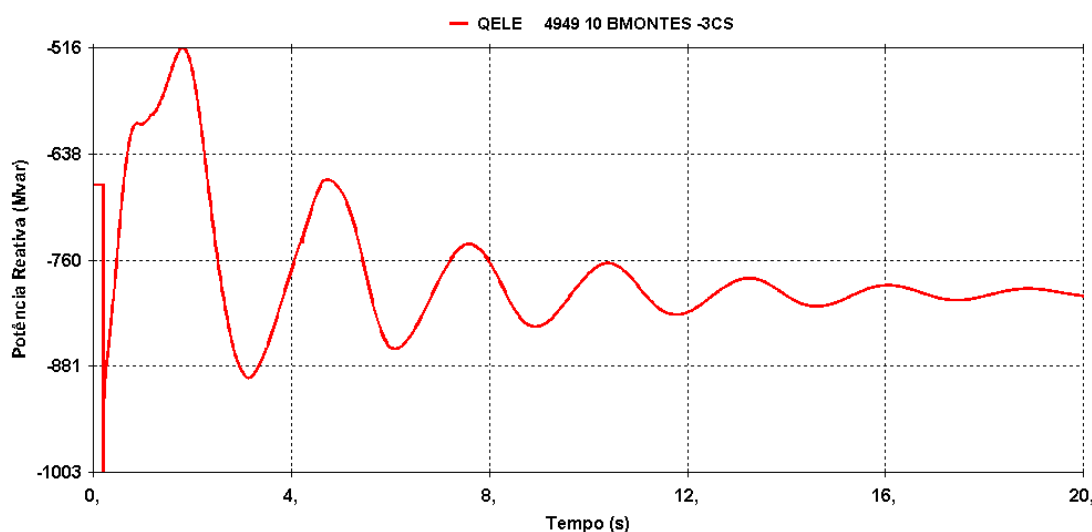
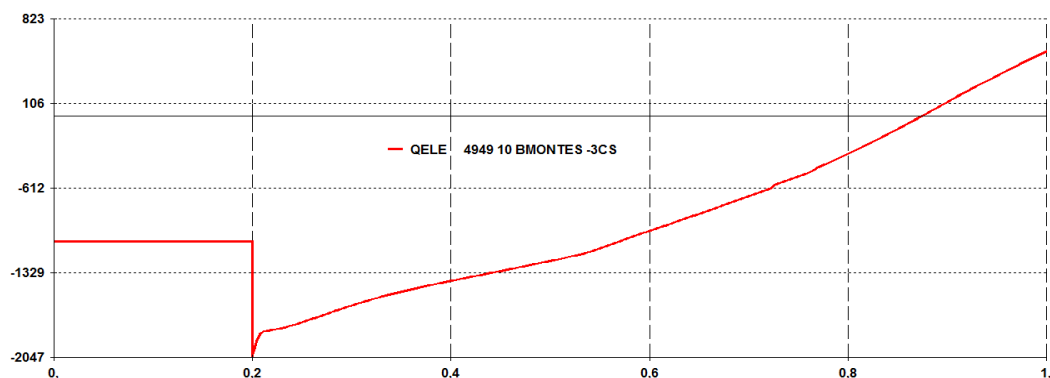


Figura 8-16 – Potência reativa das 3 máquinas da UHE Belo Monte que estarão operando como síncrono. Configuração filtros cenário 7P (3x420 Mvar em Xingu). Perda do bipolo (configuração com 1 bipolo)

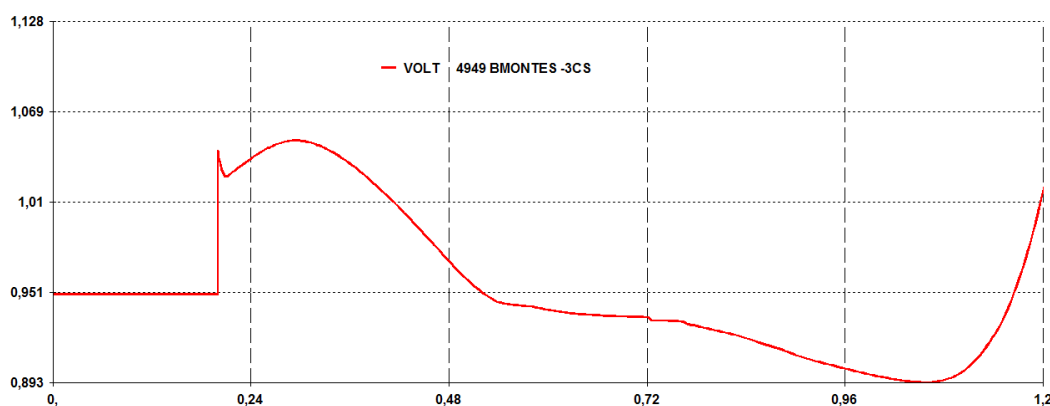
Assim, não seria necessária a função de retirada de filtros no Controle Mestre, sendo esta função executada pelo controle do bipolo.

Na configuração com 2 bipolos transmitindo potência nominal no cenário 7P (2x3264 MW) considerando 3 operando como síncronos na UHE Belo Monte e todos os filtros previstos (3x 420 Mvar em Xingu para cada bipolo) a perda dos dois bipolos é a condição mais severa para avaliar o

risco de auto-excitação. Para tornar a condição mais desfavorável, foi considerado um filtro adicional (totalizando 7 x 420 Mvar). A Figura 8-17 apresenta a potência reativa (a) e a tensão na usina de Belo Monte na perda dos dois bipolos na configuração final prevista.



(a)



(b)

Figura 8-17 – (a) Potência reativa das 3 máquinas da UHE Belo Monte que estarão operando como síncrono e (b) tensão na usina de Belo Monte. Configuração filtros cenário 7P (3x420 Mvar em Xingu). Perda dos bipolos (configuração com 2 bipolos).

Não se observa risco de auto-excitação nas unidades geradoras de Belo Monte por estar previsto no projeto a operação de 3 máquinas como compensadores síncronos e a rede CA a qual o conversor está conectado é capaz de absorver o excedente de potência reativa.

Embora não tenha se observado risco de auto-excitação devido à capacidade dos geradores de Belo Monte em absorver potência reativa excedente é importante prever desligamento de filtros CA na perda de carga do CCAT.

8.3.4 Evitar sobretensão nas subestações

Para controle de sobretensões na subestação de Xingu recomenda-se que, com a entrada em operação do segundo bipolo, e consequentemente o aumento do número de filtros, faz-se necessária a retirada coordenada de filtros dos dois bipolos de modo a evitar possíveis sobretensões, assim, seria aconselhável que esta função estivesse presente no Controle Mestre da estação.

Estas sobretensões podem ocorrer na perda de conversores, onde o Controle Mestre deverá supervisionar a retirada automática de filtros CA para reduzir as sobretensões nos sistemas CA. Na perda de várias saídas de linhas de transmissão da rede CA, durante perturbações sistêmicas, os filtros CA também poderão vir a ser retirados.

8.3.5 Chaveamento de filtros por requisitos de desempenho harmônico

O chaveamento de filtros por requisitos de desempenho harmônico também pode ser incluído no nível de Controle Mestre no terminal de Xingu. Isso permite uma otimização do uso da filtragem harmônica dos dois bipolos, principalmente em condições de baixa potência.

No sistema de transmissão CCAT do Madeira, esta função foi deixada no nível de Controle de bipolo simplesmente porque não haviam requisitos para a operação conjunta, o que vem acarretando problemas de excesso de reativos em condições de baixa potência transmitida com os dois bipolos, uma vez que ambos os bipolos devem atender os requisitos individuais, independente do desempenho conjunto. Em Estreito e no Terminal Rio, obviamente estas funções devem ser implantadas em nível de controle de bipolo ou até mesmo em nível de controle de polo, se a estratégia adotada pelo fabricante para o chaveamento de filtros for realizada neste nível de controle.

Os filtros de CA devem ser totalmente flexíveis. Por exemplo, BP1 pode operar usando BP2 filtros CA e vice-versa, sem restrições. O Controle Mestre precisa controlar tanto BP1 e BP2 filtros CA para garantir a filtragem de harmônicas adequadas e eliminar o excesso de filtros se a perda de carga CCAT ocorrer.

8.4 Condicionantes de ressonância subsíncrona

Os controles do conversor CCAT podem excitar modos torcionais no eixo da turbina do gerador na faixa de frequência subsíncrona. Além disso, várias linhas próximas a usina de Belo Monte são equipadas com capacitores série com elevado grau de compensação, conforme apresentado na Figura 8-18. Se o complemento da frequência do modo subsíncrono da rede elétrica for próxima à frequência do modo torcional, há risco de instabilidade deste modo devido a ressonância subsíncrona (SSR – *Subsynchronous Resonance*).

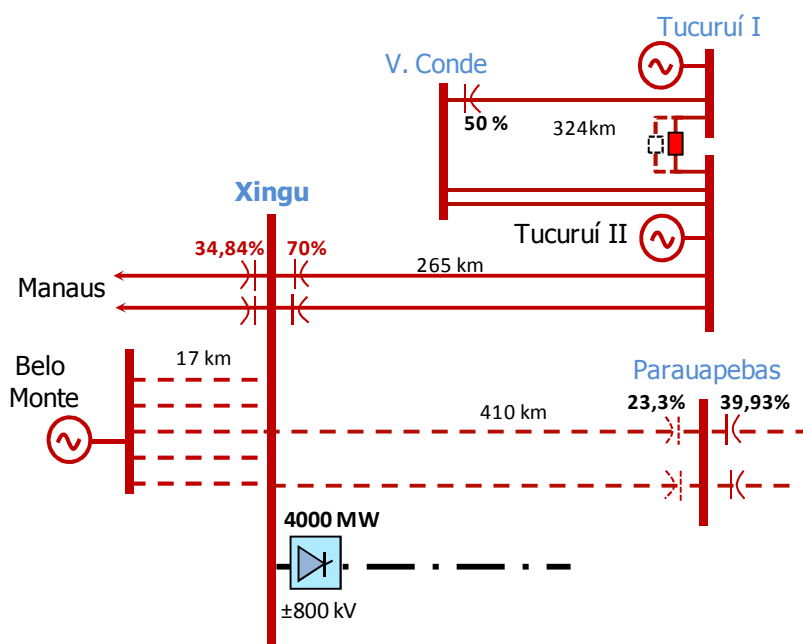


Figura 8-18 – Transmissão do Belo Monte.

Espera-se que os geradores da usina hidrelétrica de Belo Monte sejam menos susceptíveis a problemas de interação torcional subsíncrona (SSTI - *SubSynchronous Torsional Interaction*). Esta imunidade não está necessariamente relacionada à faixa de frequência dos modos torcionais do eixo turbina-gerador, uma vez que hidrogeradores podem apresentar modos torcionais em frequências na faixa de 5 a 25Hz. Boa parte desta faixa pode ser excitada tanto pelo controle de conversores CCAT quanto pela presença de compensação série nas linhas CA próximas.

O principal motivo pelo qual os geradores de usinas hidrelétricas são "imunes" a problemas de SSTI é a elevada razão entre as constantes de inércia do gerador e da turbina ($n=H_g/H_t$), tipicamente entre 7 e 40. As referências [21] e [22] demonstram que o amortecimento mecânico modal (isto é, o amortecimento mecânico efetivo na frequência do modo torcional) é dado aproximadamente por:

$$D_m \approx n^2 \cdot D_t$$

onde D_t é a constante de amortecimento mecânico associada à turbina.

Ou seja, se a turbina de um hidrogerador tem amortecimento mecânico D_t , para o modo torcional este amortecimento será efetivamente entre $49 \times D_t$ e $1600 \times D_t$ (considerando a faixa típica de n), aproximadamente, tornando-se em geral muito maior que a contribuição de amortecimento elétrico negativo proveniente da interação adversa com os controles dos conversores CCAT. Nestes casos, mesmo que a frequência do modo subsíncrono de uma rede série-compensada seja complementar à frequência do modo torcional (condição mais crítica para a ocorrência de ressonância subsíncrona), as oscilações serão amortecidas.

Como não se tem conhecimento prévio de D_t , uma hipótese comum e bastante conservadora é adotar $D_t=0$. Para usinas térmicas, esta hipótese é razoável. Contudo, para hidráulicas nas quais o parâmetro n é elevado, esta hipótese pode levar a conclusões precipitadas. Isso poderia equivocadamente sugerir a necessidade do projeto e instalação de controles suplementares para mitigar um problema de instabilidade que na prática não deve existir.

No caso das usinas do Rio Madeira, devido às incertezas em relação ao valor do D_t das usinas bulbo, foi assumido $D_t=0$ acarretando, conseqüentemente, à necessidade de instalação de um controle suplementar. Para a usina de Santo Antônio, por exemplo, n é da ordem de 8, que não é tão elevado.

Como a usina de Belo Monte usará turbinas do tipo Francis, espera-se desta forma que n seja bastante elevado (superior a 15 ou 20). Além disso, há convicção de que o amortecimento viscoso intrínseco ao rotor desta turbina seja naturalmente elevado. Com isso, o risco de SSTI é minimizado.

Por outro lado, algumas usinas termelétricas estão localizadas nas proximidades do Terminal Rio, como as usinas de Angra (I, II e III), UTE Leonel Brizola e UTE Baixada. Assim, neste caso, recomenda-se que este fenômeno seja cuidadosamente estudado na etapa de Projeto Básico. Como é prevista a operação do Bipolo 2 do sistema de transmissão de Belo Monte no sentido SE→N, a atenção deve ser redobrada, uma vez que a operação como retificador é a mais crítica sob o ponto de vista da SSTI.

O fenômeno descrito nos parágrafos anteriores envolve a resposta do sistema CA/CC a pequenas perturbações, uma vez que a SSTI está associada a estabilidade dos modos torcionais do eixo turbina-gerador. Ou seja, é um fenômeno que se manifesta até mesmo em regime permanente.

Por outro lado, distúrbios de manobra, como abertura e religamento de linhas, e faltas na rede elétrica provocam transitórios de potência e de torque elétrico que também excitam oscilações torcionais nos eixos dos geradores termelétricos. Como os modos torcionais são em geral muito pouco amortecidos, as oscilações permanecem por muitos segundos após uma perturbação, geralmente por muito mais tempo que as oscilações de torque eletromagnético que as originaram. O efeito acumulativo dos esforços provocados por estes torques transitórios causa perda de vida útil do eixo por fadiga cíclica, podendo levar em último caso à sua ruptura. Oscilações torcionais decorrentes de eventos em cascata, como curtos-circuitos seguidos de religamentos automáticos podem reforçar as oscilações iniciais, amplificando as vibrações a níveis perigosos. A forma e amplitude dos torques aplicados ao eixo são fortemente dependentes do tipo de perturbação e da temporização dos chaveamentos subsequentes. Isto ocorre porque se a variação de potência elétrica ocorrer num instante em fase com a oscilação torcional pré-existente, o efeito será amplificado, e caso se dê em oposição de fase será amortecido. A presença de capacitores série e a ação dos controles dos conversores CCAT podem agravar este fenômeno em determinadas condições [22] e, portanto, requer uma análise específica.

Como as análises para avaliar o risco de SSTI e os impactos decorrentes de grandes perturbações nas oscilações torcionais requerem tempo e necessitam de informações mais detalhadas do eixo turbina-gerador, recomenda-se que estas análises sejam conduzidas na etapa de Projeto Básico.

8.5 Principais constatações

O STOL ("Short Time Overload Limiter") considerado nas análises seguiu as orientações dos estudos do R1 [2], que estabeleceram as sobrecargas de curta e longa duração descritas a seguir:

- sobrecarga de longa duração de cada polo de 33% da potência nominal por 30 **minutos** no cenário 2 e de somente 30 **segundos** no cenário 7 (potência reversa);
- sobrecarga de 10% por 4 horas no cenário 7 (potência reversa); e
- sobrecarga de curta duração (5 segundos) de 50% da potência nominal, com redução em

rampa suave até o valor de sobrecarga de longa duração nos dois cenários.

Nas análises efetuadas, com os ajustes propostos de controle, a recuperação da potência do elo CC para faltas na rede CA foi inferior a 200 ms, com desempenho satisfatório dentro dos critérios considerados.

Com base nas análises, o Controle Mestre, previsto junto com a entrada do segundo bipolo, deverá incluir, para os dois sentidos de operação, dentre suas principais funções: redistribuição de potência entre os bipolos; execução de *run-back* da energia CCAT após perda de transmissão ou geração do sistema CA; redução de possíveis sobretensões e chaveamento de filtros por requisitos de desempenho harmônico.

As análises necessárias para verificar se os controles do elo CCAT irão excitar modos torcionais na faixa de frequência subsíncrona, que comprometam o eixo das turbinas, dos geradores da usina de Belo Monte e das usinas térmicas próximas ao Terminal Rio, devem ocorrer na etapa de Projeto Básico conforme item 8.4.

9 ANÁLISE MULTI-INFEED

9.1 Introdução

O objetivo deste capítulo é apresentar os resultados da análise de interação entre o novo elo CCAT ± 800 kV Xingu – Terminal Rio a ser inserido no SIN, na região Sudeste, com os principais elos CCAT já existentes, ou em processo de instalação nesse sistema (Análise *Multi-Infeed*).

A configuração esquemática dos bipolos (*Multi-Infeed*) alimentando a região Sudeste é indicada na Figura 9-1.

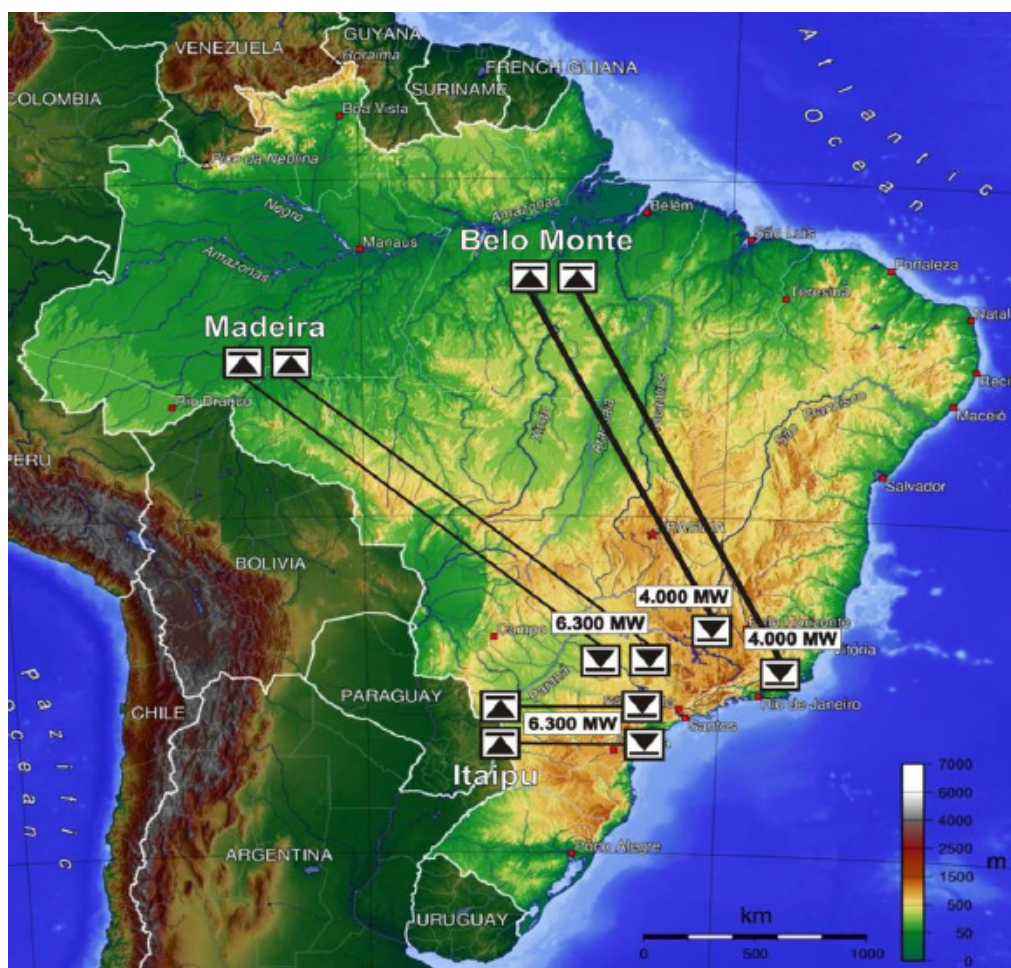


Figura 9-1 Diagrama esquemático da configuração dos bipolos CCAT na região Sudeste

Os principais aspectos a serem analisados nessa análise *Multi-Infeed* são:

- falhas de comutação induzidas entre o bipolo Xingu – Terminal Rio e os demais;

- propagação de faltas internas do bipolo Xingu – Terminal Rio pelos demais;
- risco de falhas de comutação sucessivas envolvendo um ou mais bipolos;
- estabilidade de tensão;
- recuperação de potência frente às emergências na rede de transmissão, que determinará se haverá necessidade de coordenação entre os controles; e
- sobretensões e instabilidade harmônica devido às ressonâncias.

Após a entrada em operação do elo de corrente contínua de 800 kV entre Xingu e Terminal Rio, haverá quatro subestações com inversoras de elos CCAT conversoras operando na rede de transmissão da região Sudeste, com um total de aproximadamente 19 GW de capacidade de injeção de potência nessa rede, conforme esquematizado na Figura 9-1. Portanto, torna-se extremamente importante analisar as interações entre essas conversoras frente às condições operativas mais adversas.

A análise *Multi-Infeed* reveste-se de importância quando da injeção de potência de todos os bipolos na região Sudeste. Desta forma, no que se refere aos bipolos Xingu - Estreito e Xingu – Terminal Rio, que podem ter seus fluxos invertidos, do Sudeste para o Norte, os cenários estudados são os de transferência do Norte para o Sudeste.

Desta forma, buscou-se o cenário de carga/geração de menor inércia e nível de curto-circuito na região Sudeste. O cenário analisado (2L) foi aquele no qual há elevada disponibilidade de geração na região Norte e reduzido despacho de usinas da região Sudeste no patamar de carga leve, cenário descrito no capítulo 5.

9.2 Premissas e Critérios

Os modelos dos controles dos bipolos de Itaipu, Madeira e do bipolo CCAT 800 kV entre Xingu e Estreito fornecidos, na base de dados, são considerados como genéricos, representando aproximadamente os controles reais. Sobre esta base de dados, o futuro concessionário da transmissão do bipolo CCAT 800 kV entre Xingu e Terminal Rio deve inserir seu controle real e efetuar as investigações e estudos requeridos. Entretanto, para os bipolos em 800 kV foi desenvolvido um modelo genérico, através de consultor internacional contratado pela EPE [12], modelo previamente testado nos estudos do Relatório R2 do bipolo Xingu – Estreito [5].

Os resultados apresentados devem ser considerados como viáveis para a inserção do bipolo 2 de Belo Monte entre as barras de Xingu e Terminal Rio. Caberá ao futuro concessionário (Agente de Transmissão), demonstrar na etapa de Projeto Básico que seu sistema de controle apresenta desempenho superior ao indicado no presente relatório.

Na análise de configurações *multi-infeed*, normalmente as publicações focam em dois tipos de eventos:

- a) Faltas sistêmicas, trifásicas e monofásicas junto ao terminal inversor do bipolo sob investigação, que em função da proximidade elétrica com os outros bipolos impacta todos os demais; nesta análise, o objetivo é o de observar a dinâmica da recuperação dos bipolos e do sistema CA, após a eliminação das faltas. Nesses casos, não será permitido que o bipolo Xingu – Terminal Rio apresente falha de comutação durante o período de recuperação pós-falta, nem induza falhas na recuperação dos demais bipolos. Além disso, busca-se analisar a recuperação do elo sob investigação, Xingu – Terminal Rio, frente à faltas nos terminais inversores dos elos presentes no sistema de transmissão do Sudeste.
- b) Faltas internas ao bipolo Xingu – Terminal Rio que, em princípio, não deveriam apresentar reflexos significativos para os outros bipolos: (i) são faltas trifásicas e monofásicas no terminal do retificador; (ii) faltas na linha CC do bipolo Xingu – Terminal Rio; (iii) falhas do trem de pulsos do controle dos tiristores – fenômeno conhecido como “valve misfire”. Nesses casos o objetivo é o de observar os efeitos de propagação de falhas de comutação pelos demais bipolos, admitindo-se uma falha de comutação no bipolo sob investigação decorrente de sua falta interna.

No corpo desse capítulo são descritos, de forma condensada, os casos de faltas trifásicas na barra de Xingu (retificador), em Terminal Rio (inversor), e “valve misfire” na válvula do inversor. No Anexo XII são incluídos outros casos relevantes de faltas, tais como: faltas monophasares na linha CC, faltas monofásicas nas barras em 500 kV CA dos terminais do bipolo Xingu – Terminal Rio, faltas monofásicas em Araraquara 2 500 kV e Ibiúna 345 kV e faltas monofásicas e trifásicas em Estreito 500 kV.

A rede representada (equivalentes) se originou da resultante do capítulo de transitórios, como indicado no item 5.2.5. Todas as máquinas foram representadas por equivalentes de Thévenin. Isto porque, no caso da análise de Multi-Infeed, a janela de interesse maior situa-se na faixa dos primeiros 500 milissegundos após a eliminação da falta, onde as interações entre bipolos, falhas de

comutação induzidas, ou falhas na recuperação pós-falta são cruciais e a dinâmica associada às máquinas elétricas não é muito relevante.

Evidentemente que a análise de *multi-infeed* nos estudos posteriores aos do planejamento não se restringe ao uso de ferramenta do tipo EMT – “Electromagnetic Transient Program” (neste estudo o programa PSCAD), devendo ser complementada e coordenada com simulações em programas de estabilidade eletromecânica (ANATEM), no qual a análise do comportamento dinâmico com a rede completa deve ser compatibilizada com os resultados da análise aqui realizada EMT.

9.3 Análise Estática

O bipolo de CCAT 800 kV entre Xingu e Terminal Rio terá a capacidade de transmitir 4000 MW no sentido Xingu → Terminal Rio, provocando uma injeção da ordem de 3800 MW numa área elétrica do Sudeste, aqui designada como área *multi-infeed*, na qual outros três inversores poderão estar injetando potência ativa simultaneamente:

- i) Araraquara 2, fornecendo a rede aproximadamente 5600 MW,
- ii) Ibiúna, injetando na rede aproximadamente 4700 MW e
- iii) Estreito, disponibilizando na rede aproximadamente 3800 MW.

Para comparação com índices similares de outros sistemas existentes, foram feitos estudos preliminares do tipo estáticos para determinar os índices principais relacionados com as características de capacidade de recepção da região Sudeste. Deve-se ressaltar que, como qualquer outro índice estático, os a seguir apresentados são essencialmente indicativos de potenciais interações entre elos. Não devem ser considerados como um resultado final e definitivo, mas sim, como indicadores, a serem considerados, como elemento de “entrada” para as simulações de EMT e estabilidade, estas sim, como parâmetros finais de avaliação da rede *Multi-Infeed*. Os índices considerados nessa análise foram:

a) *Multi-Infeed Interaction Factors (MIIFs)* entre inversores, os quais formam a Matriz de *Multi-Infeed* com $n \times n$ elementos $MIIF(i,j)$, sendo i =linhas e j =colunas. Os elementos *MIIFs* de cada linha da matriz indicam em pu a variação de tensão medida em cada inversor j devida a uma pequena variação de tensão provocada no inversor i ;

b) relações de curto-circuito (*SCRs*) vistas da barra de cada inversor, sem considerar os outros inversores, e

c) *Multi-Infeed Short Circuit Ratios (MISCRs)*, que consideram os efeitos conjuntos de todos os inversores em cada barra inversora.

As equações para cálculo do *SCRs* e dos *MISCRs* estão mostradas abaixo.

$$(I) \quad SCR_i = \frac{S_{CCi}}{P_{DCi}}$$

$$(II) \quad MISCR_i = \frac{S_{CCi}}{P_{DCi} + \sum_j (P_{DCj} * MIIF_{ji})}$$

Na Tabela 9-1, são apresentadas as matrizes de *Multi-Infeed Interaction Factors (MIIFs)* calculadas para a rede completa e para a rede equivalente. Os elementos desta matriz foram, calculados utilizando o programa ANATEM a partir da energização de um reator de 500 Mvar no barramento e medindo-se as variações de tensão resultantes nas demais inversoras

Tabela 9-1– Matrizes de *Multi-Infeed Interaction Factors (MIIFs)*.

REDE COMPLETA					REDE EQUIVALENTE				
Inversor	T.RIODC	ESTREITO	ARARAQ2	IBIUNA3	Inversor	T.RIODC	ESTREITO	ARARAQ2	IBIUNA3
T.RIODC	1,000	0,630	0,542	0,477	T.RIODC	1,000	0,530	0,457	0,376
ESTREITO	0,413	1,000	0,502	0,383	ESTREITO	0,337	1,000	0,370	0,262
ARARAQ2	0,357	0,463	1,000	0,436	ARARAQ2	0,295	0,366	1,000	0,331
IBIUNA3	0,317	0,383	0,472	1,000	IBIUNA3	0,295	0,321	0,407	1,000

Se as potências injetadas (P_{dc}) de todos os inversores fossem iguais, os *MIIFs* das matrizes acima, seriam suficientes para analisar a interação potencial entre inversores, mas como existem significativas diferenças, foram determinados os índices *MISCRs*, apresentados na Tabela 9-2.

Tabela 9-2 - Índices *Short Circuit Ratio (SCR)* e *Multi-Infeed Short Circuit Ratios (MISCRs)*

Potências CC transmitidas		REDE COMPLETA			REDE EQUIVALENTE		
Inversor	Pd, MW	Sc, MVA	SCR	MISCR	Sc, MVA	SCR	MISCR
TRIODC-RJ500	3797	16000	4,21	1,81	16586	4,37	2,05
ESTREI-MG500	3826	20177	5,27	1,91	21393	5,59	2,29
ARARA2-SP500	5560	19848	3,57	1,69	20639	3,71	1,95
IBIUNA-SP345	4633	20536	4,43	1,99	20434	4,41	2,29

Na Tabela 9-2 são apresentados os índices mais completos que consideram as potências injetadas e os níveis de curto-circuito, tanto para rede completa, como para a rede equivalente utilizada nos estudos com o programa PSCAD. Deve ser considerado que estas condições são pessimistas, pois

os níveis de curto-circuito considerados corresponderam a uma condição extrema com número mínimo de máquinas (mínima inércia), com todos os elos transmitindo potência elevada simultaneamente, o que tem baixa probabilidade, tendo em conta as dispersões de disponibilidades das usinas hidroelétricas associadas a cada elo CCAT.

O grupo de trabalho do CIGRÉ (TB364 - *Systems with multiple DC Infeed*, 2008) publicou recentemente análises dos índices *MIIFs* para interações *Multi-Infeed*. As conclusões do grupo foram:

- *MIIF* até 0,15: baixa interação.
- *MIIF* de 0,15 a 0,40: interação moderada.
- *MIIF* acima de 0,40: forte interação.

De uma maneira geral, ao se examinar os resultados expostos na Tabela 9-2, percebe-se que a rede estudada se posicionaria na faixa de interação moderada a forte. Ao analisarmos, especificamente, os valores relativos ao Terminal Rio, nota-se uma maior potencial interação sobre Estreito, como esperado.

Embora as relações de curto-circuito (*SCRs*) individuais de cada inversor sejam elevadas, o que indicaria operação muito segura se não houvesse mais inversores, os índices *MISCRs* são um pouco inferiores aos valores considerados seguros na literatura internacional. Adicionalmente às condições pessimistas acima mencionadas sobre esta avaliação das *MISCRs*, deve ser considerado que nesse sistema *multi-infeed* existe significativa concentração de cargas nas proximidades dos inversores, o que significa que as potências injetadas não trafegam a longas distâncias pelas redes elétricas, ou seja, existem melhores condições de estabilidade de tensão que nos casos mais críticos com cargas distantes, o que não é bem refletido pelos tradicionais índices *SCR* e *MISCR*.

9.4 Modelagem no PSCAD

As representações da rede de transmissão das regiões Sudeste e Norte foram detalhadas no capítulo 5, bem como a representação dos bipolos CCAT ± 800 kV Xingu – Estreito e Xingu – Terminal Rio, no capítulo 6. As condições iniciais de cada bipolo CCAT estão no ANEXO XII desse relatório. A seguir, encontra-se o detalhamento dos elos de CCAT entre Foz do Iguaçu – Ibiúna e Porto Velho – Araraquara 2. Destaca-se que foi considerado um tempo mínimo de extinção para os tiristores das válvulas de 400 μ s, que corresponde ao tempo mínimo pelo qual a válvula deverá ser

polarizada reversamente após o último bloqueio para garantir o sucesso da comutação. Isso significa que se os tiristores da válvula serão novamente disparados ("re-fire") se a tensão sobre a válvula se tornar positiva durante esse período, o que acarretará em falha de comutação.

✓ Controles dos conversores do elo CCAT de Itaipu e do Madeira – Representação no PSCAD.

Para os conversores e controles associados aos elos de corrente contínua do Madeira e de Itaipu, representados no PSCAD, foram utilizados modelos típicos desenvolvidos com base na filosofia de controle do sistema CCAT de Itaipu.

Os elos CCAT de Itaipu e do Madeira são constituídos por dois bipolos ± 600 kV e potência nominal de 3150 MW, totalizando uma potência em corrente contínua (CC) de 6.300 MW. Para minimizar o número de elementos a serem modelados no PSCAD, os pólos de mesma polaridade de cada bipólo foram representados através de um pólo equivalente com o dobro da potência, e quatro polos sendo que dois são retificadores e dois inversores, conforme mostrado na Figura 9-2 .

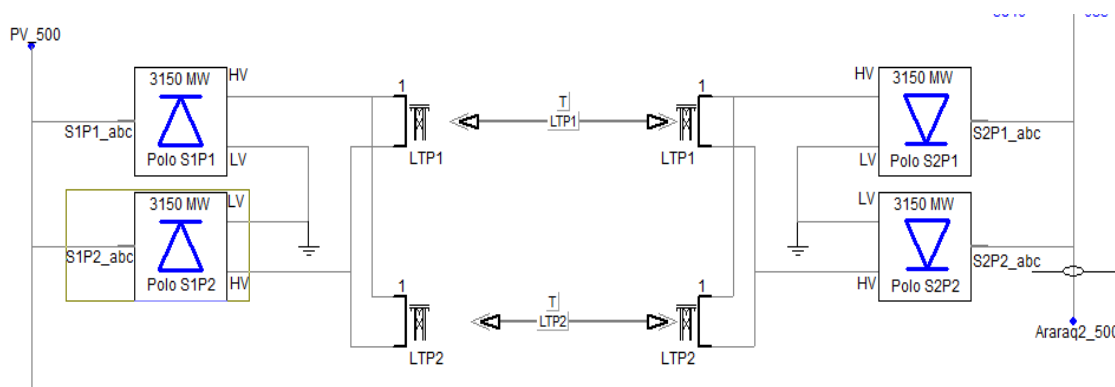


Figura 9-2 Representação esquematizada no PSCAD do elo CCAT do Madeira

Cada polo equivalente foi representado por um conversor de 12 pulsos, composto por dois bancos de transformadores (YY e YΔ) e duas pontes de tiristores em série no lado CC. Foram utilizados ainda modelos típicos para os filtros nos lados de corrente alternada (CA) e CC, reatores de alisamento e linhas de transmissão. A Figura 9-3 ilustra a representação de um polo. O controle de disparo das válvulas "firing" foi considerado o modelo genérico disponível no PSCAD.

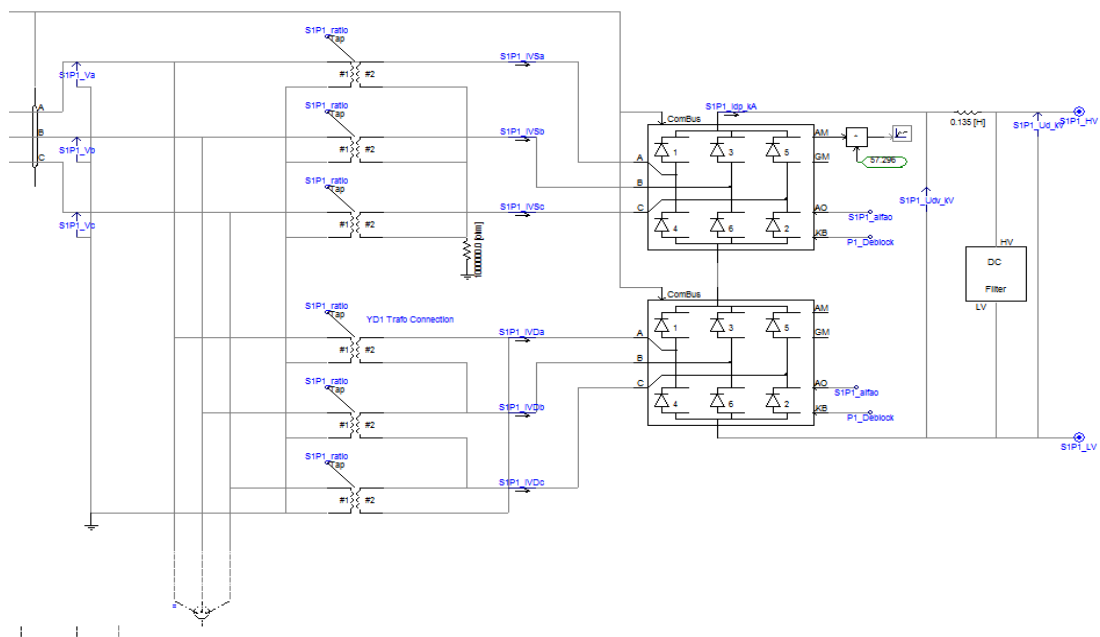


Figura 9-3 Representação esquematizada de um polo de 12 pulsos no PSCAD

Cada polo possui um conjunto de controles para o inversor e para o retificador, respectivamente mostrados na Figura 9-4 e na Figura 9-5. Os controles são constituídos por um regulador de corrente (CCA - *Current Control Amplifier*), e um limitador de ordem de corrente dependente da tensão (VDCOL - *Voltage Dependant Current Order Limiter*), tanto para o terminal retificador quanto para o terminal inversor. O VDCOL reduz a ordem de corrente em função da tensão CC em cada terminal para ajudar a recuperação do elo CC após faltas. A recuperação da tensão CC é realizada através de constantes de tempo distintas para redução da tensão CC (*t_{down}*) e aumento da tensão CC (*t_{up}*).

O CCA do inversor normalmente opera "saturado" no limite superior (α_{MAX}). O valor calculado de α_{MAX} é uma função da ordem de corrente e da tensão CA, e é calculado continuamente para manter uma área mínima de comutação. Em condições nominais, esta área equivale a um valor mínimo de ângulo de extinção de 17° (γ_{REF}). Este valor pode ser temporariamente aumentado no caso de ocorrência de falhas de comutação ou de atuação do VDCOL.

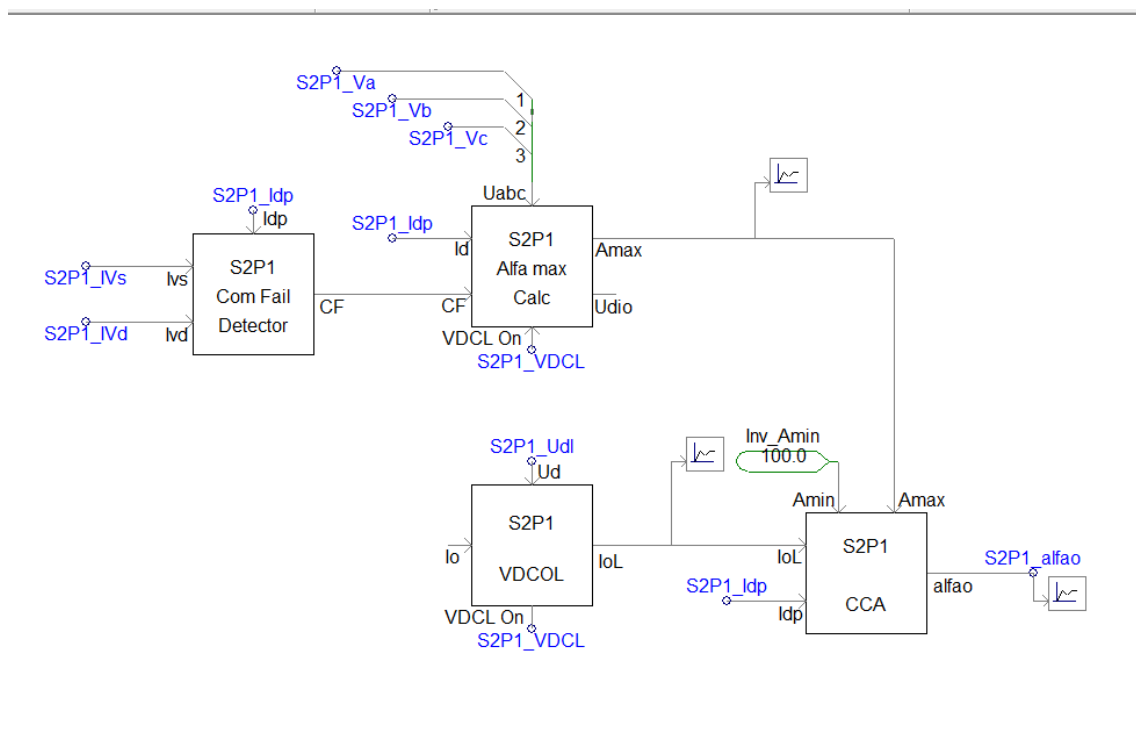


Figura 9-4 Controles do inversor no PSCAD (Itaipu e Madeira)

No terminal retificador (Figura 9-5), o CCA opera normalmente em controle de corrente CC. O limite inferior do CCA (a_{min}) é calculado continuamente no bloco "Alfamin Calc" e, em condições normais, corresponde a um ângulo de disparo de 5° . Durante faltas no sistema CA do retificador, a_{min} é aumentado temporariamente.

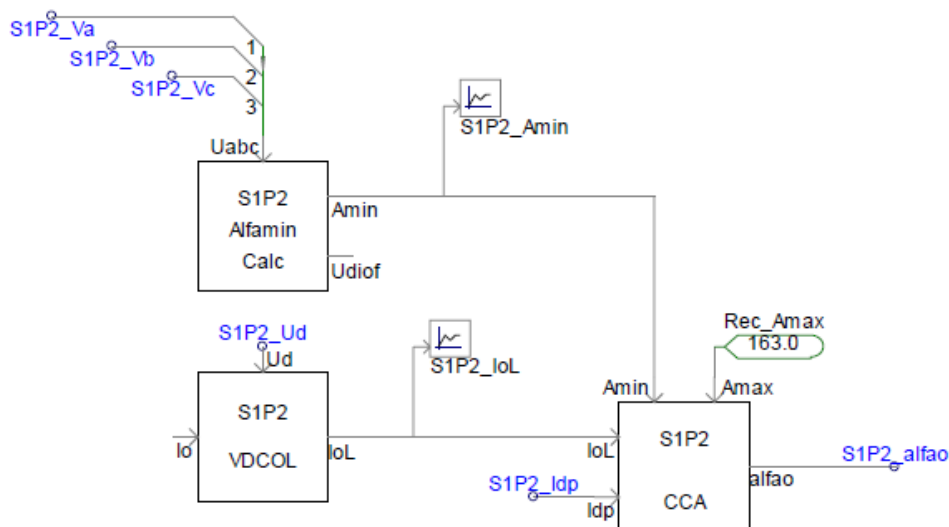


Figura 9-5 Controles do retificador no PSCAD (Itaipu e Madeira)

A Tabela 9-3 a seguir informa os ajustes dos principais parâmetros dos controladores dos elos CCAT representados no PSCAD. Observa-se que os elos do Madeira e de Itaipu estão com os mesmos ajustes.

Tabela 9-3 – Parâmetros dos controles

Controle		Madeira & Itaipu	
		Retificador	Inversor
CCA	Ganho Proporcional	60	60
	Ganho integral	9000	9000
Alfa calc	Alfamax	163°	90° - 163°
	Alfamin	5° - 30°	100°
VDCOL	tup	0,05 ms	0,05 ms
	tdown	0,005 ms	0,005 ms
	Limite inferior	0,3 pu	0,3
	Ativo	$1/(2,5) = 0,4$ pu	$1/(2,78) = 0,36$ pu

As ordens de corrente enviadas ao retificador e ao inversor devem ser coordenadas, de forma que não haja perda de margem de corrente durante perturbações. Para um aumento na ordem de corrente, a ordem de corrente no retificador deve ser atualizada antes do inversor. Para uma redução na ordem de corrente, esta só deve ser atualizada no retificador depois de confirmado o recebimento pelo terminal inversor, após o atraso de telecomunicação ao longo da linha CC. Esta coordenação das ordens de corrente dos terminais retificador e inversor é representada no PSCAD, conforme mostrado na Figura 9-6.

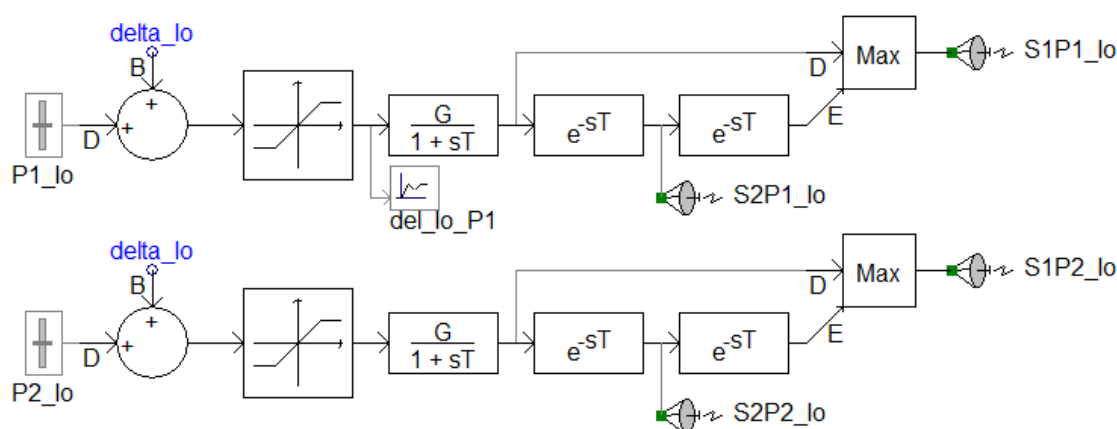


Figura 9-6 Coordenação das ordens de corrente (Itaipu e Madeira)

✓ Sistema de Transmissão de Porto Velho e Araraquara 2.

Foram utilizados equivalentes Thevenin para representar a rede pela qual as máquinas da UHE Itaipu são conectadas às conversoras retificadoras do elo CCAT Foz do Iguaçu – Ibiúna e para representar a rede pela qual as máquinas das UHEs Santo Antônio e Jirau são conectadas às conversoras retificadoras do elo CCAT.

9.5 Análise dinâmica

Nessa análise foram aplicadas as seguintes emergências:

1. Curto-circuito trifásico e monofásico no barramento de 500 kV da SE Xingu por 100 ms;
2. curto-circuito trifásico e monofásico no barramento de 500 kV da SE Terminal Rio por 100 ms;
3. curto-circuito trifásico e monofásico no barramento de 500 kV da SE Estreito por 100 ms;
4. curto-circuito monofásico no barramento de 500 kV da SE Araraquara 2 por 100 ms;
5. curto-circuito monofásico no barramento de 345 kV da SE Ibiúna por 100 ms;
6. Falha de um pulso de disparo da válvula 1 da ponte em Y da conversora da SE Terminal Rio (*Misfiring*);
7. curto-circuito em um pólo da linha de transmissão em corrente contínua de 800 kV do bipolo CCAT Xingu - Terminal Rio.

A Tabela 9-4 apresenta os tempos de recuperação para cada emergência em cada conversora e o tempo no qual ocorreram falhas de comutação. Destaca-se que para todos os conversores, a recuperação é definida a partir do instante, após a falta, que a potência CC do elo atinge 90% da potência CC anterior à falta. Ressalta-se que, uma vez atingido o valor de 90% da potência inicial, o mesmo não deve cair abaixo deste valor.

Tabela 9-4– Tempos de recuperação das conversoras CCAT [ms].

Emergências	Conversoras CCAT			
	Terminal Rio	Estreito	Araraquara 2	Ibiúna
CC-30-Xingu	169	169	148	-
CC-10-Xingu	-	-	-	-
CC-30-Terminal Rio	100	107	111	150
CC-10-Terminal Rio	102	104	115	123
CC-30-Estreito	99	103	118	137
CC-10-Estreito	108	128	173	137
CC-10-Araraquara2	101	140	145	108
CC-10-Ibiúna	96	169	116	111
<i>Misfiring</i> -TerminalRio	185	-	-	-
CC-LT-CC-Terminal Rio		-	-	-

Tabela 9-5– Duração das falhas de comutação das conversoras CCAT durante as emergências [ms].

Emergências	Conversoras CCAT			
	Terminal Rio	Estreito	Araraquara 2	Ibiúna
CC-30-Xingu	-	-	16	-
CC-10-Xingu	-	-	-	-
CC-30-Terminal Rio	105	32	32	16
CC-10-Terminal Rio	105	32	32	16
CC-30-Estreito	32	103	32	16
CC-10-Estreito	32	103	32	16
CC-10-Araraquara2	32	32	32	16
CC-10-Ibiúna	32	32	32	32
<i>Misfiring</i> -TerminalRio	16	-	-	-
CC-LT-CC-Terminal Rio	-	-	-	-

A seguir, apresenta-se, através de gráficos retirados diretamente do PSCAD, a variação no tempo das principais variáveis analisadas para as contingências simuladas.

✓ Curto-Circuito Trifásico em Xingu 500 kV

Nessa emergência percebem-se sobretensões em Estreito e Terminal Rio, atingindo 1,20 pu em ambas as subestações. Por outro lado, as tensões em Ibiúna e Araraquara 2 sofreram uma queda de aproximadamente 0,10 pu.

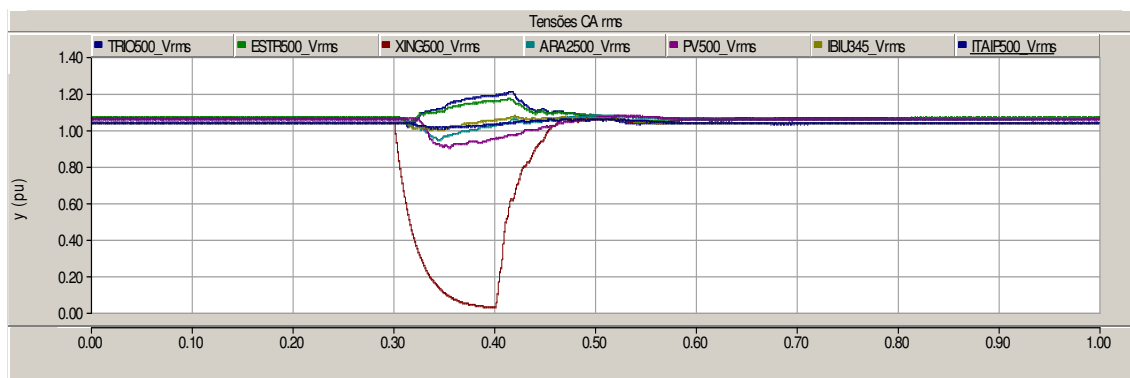


Figura 9-7 Tensões no sistema (rms)

Nessa emergência houve uma redução da potência CC entregue ao sistema Sudeste durante a falta. Não ocorreram falhas de comutação após a recuperação das potências dos elos CCAT.

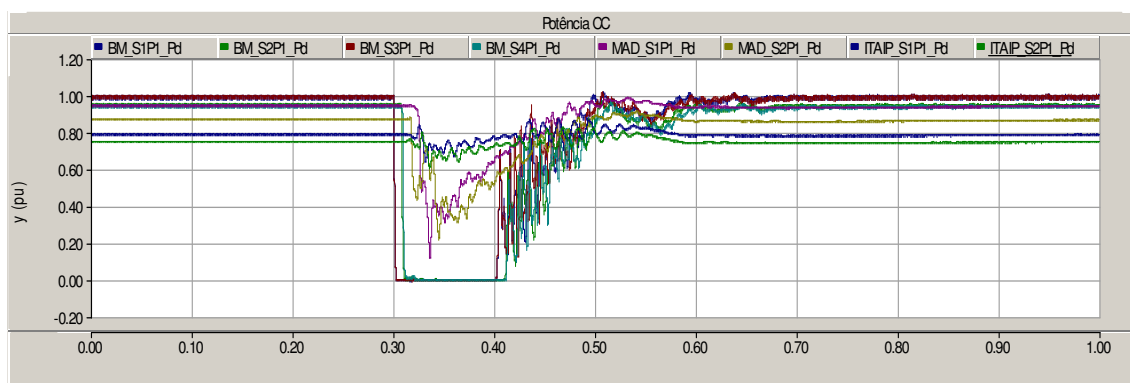


Figura 9-8 Potência nos elos de Corrente Contínua (pu)

Houve falha de comutação nos bipolos do Madeira após 16 ms da aplicação da falta devido a queda de tensão CA observada em Araraquara 2.

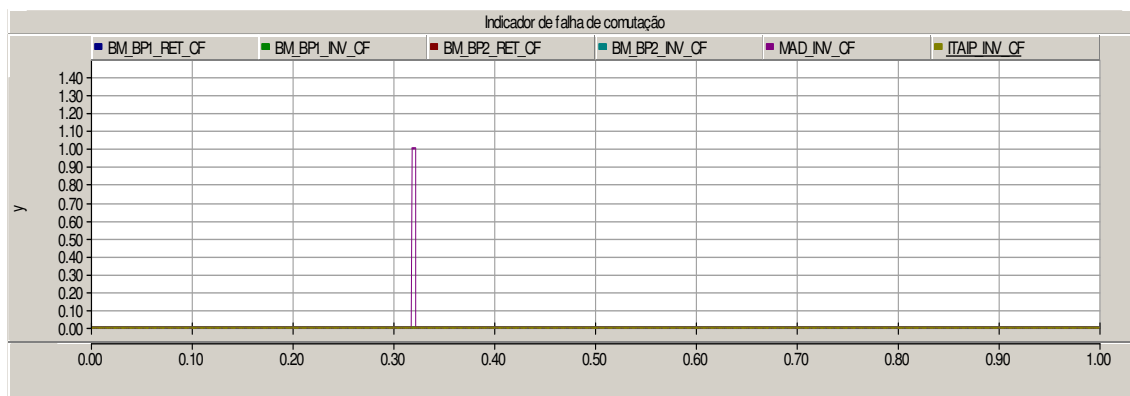


Figura 9-9 Detecção de falha de comutação nas conversoras de potência [pu].

✓ Curto-Circuito Trifásico em Terminal Rio 500 kV

Nessa emergência percebem-se sobtensões em Porto Velho e Xingu, atingindo 1.20 pu em Porto Velho. Por outro lado, as tensões em Ibiúna e Estreito sofreram um afundamento de tensão para 0.80 pu.

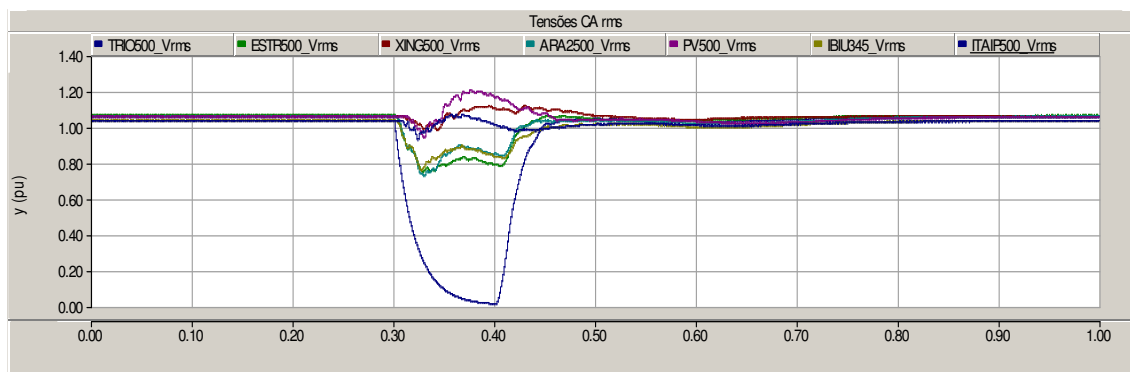


Figura 9-10 Tensões no sistema (rms)

Nessa emergência houve uma redução da potência CC entregue ao sistema Sudeste durante a falta. Não ocorreram falhas de comutação após a recuperação das potências dos elos CCAT.

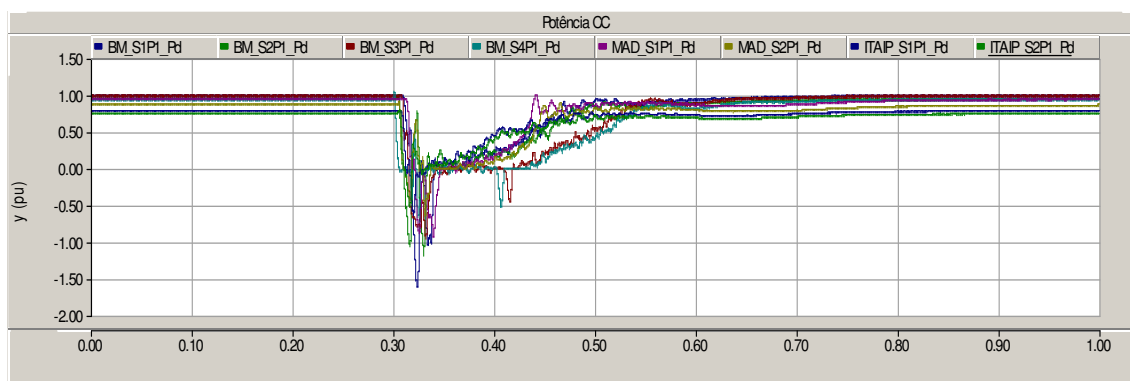


Figura 9-11 Potência nos elos de corrente contínua (pu)

Houve falha de comutação nos bipolos de Ibiúna, Estreito e Terminal Rio no instante de aplicação da falta. Já os Bipolos do Madeira sofreram falha de comutação após 16 ms da emergência.

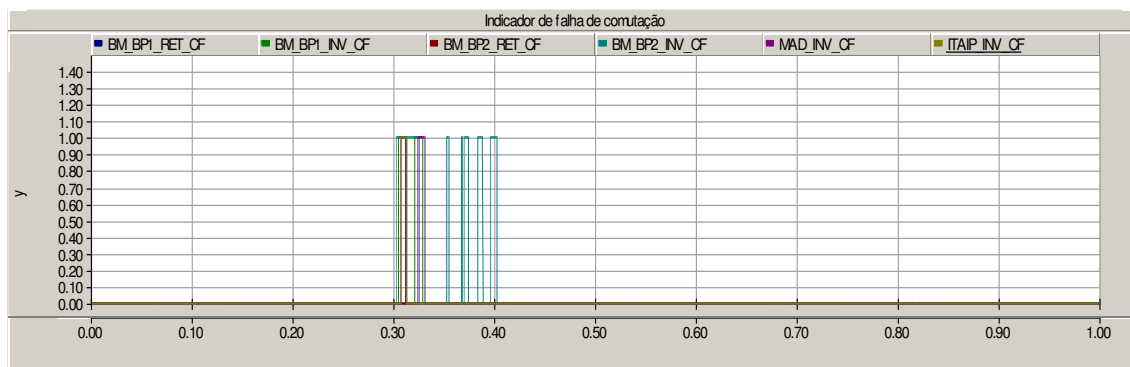


Figura 9-12 D Detecção de Falha de Comutação nas Conversoras de Potência [pu].

✓ Valve Misfiring (falha de disparo de uma válvula) na conversora do Terminal Rio

Não houve afundamentos de tensão para tensões inferiores a 1.0 pu para a falha de disparo de uma válvula na conversora do Terminal Rio.

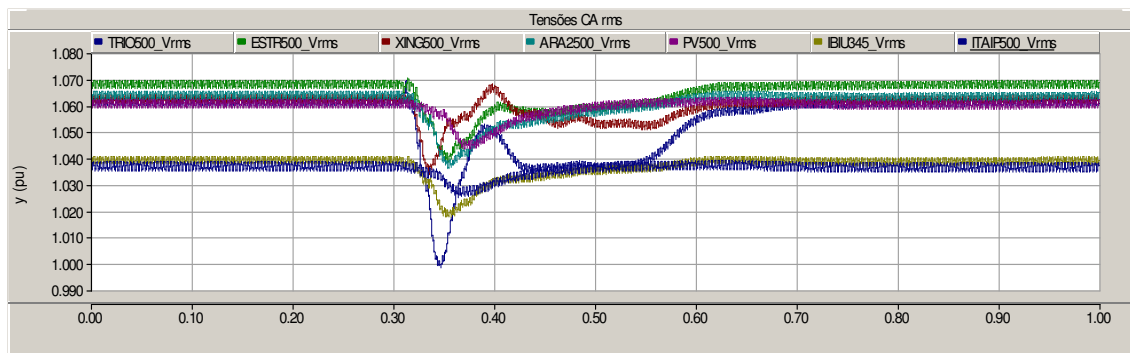


Figura 9-13 Tensões no sistema (rms)

Nessa emergência houve uma redução da potência CC apenas no elo CCAT Xingu – Terminal Rio durante a falta. Ocorreu uma falha de comutação nesse elo.

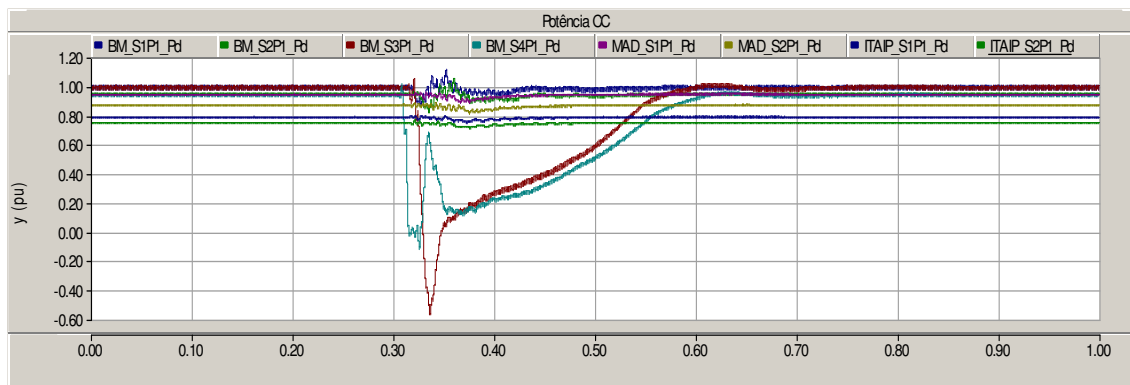


Figura 9-14 Potência nos Elos de Corrente Contínua [pu].

Nessa emergência houve apenas uma única falha de comutação no bipolo no qual foi aplicado *valve misfiring*.

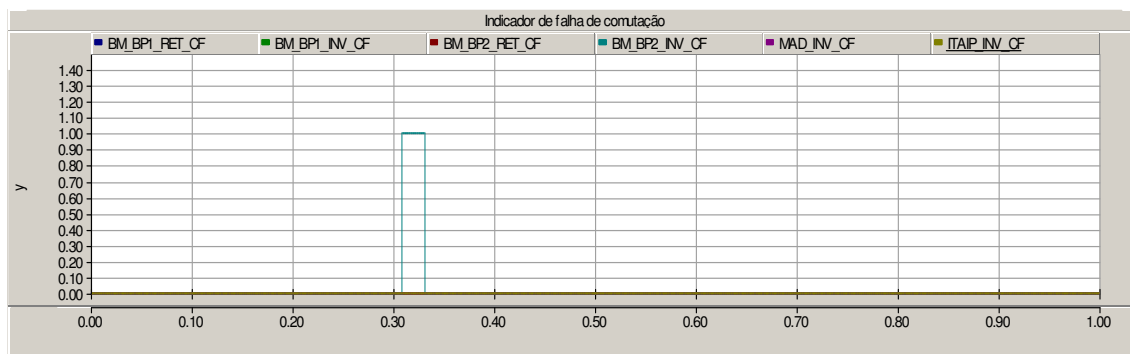


Figura 9-15 Detecção de Falha de Comutação nas Conversoras de Potência [pu].

9.6 Principais constatações da análise Multi-Infeed

- ✓ Embora as relações de curto-circuito (*SCRs*) individuais sejam altas, as *MISCRs* resultantes são relativamente baixas, comparativamente com as faixas estabelecidas na literatura internacional;
- ✓ Cabe ressaltar que os índices *MIESCR* e *MIIF* não devem ser considerados como um resultado final e definitivo, mas sim, indicadores, a serem considerados, como elemento de “entrada” para as simulações de desempenho dinâmico - *EMT* e estabilidade;
- ✓ Deve ser considerado também que neste sistema *Multi-Infeed* existe alta concentração de cargas nas proximidades dos inversores, o que significa que as potências injetadas não trafegam a longas distâncias pelas redes elétricas, o que permite operar com relações de curto-circuito menores que nos casos quando ocorre o contrário. Ou seja, existem melhores condições de estabilidade de tensão que nos casos mais críticos (cargas distantes), o que não é refletido pelos tradicionais índices SCR e MISCR;
- ✓ Não foram identificadas falhas de comutação nos elos CCAT após o início da recuperação de potência CC ocasionadas por curtos-circuitos trifásicos em Xingu e Terminal Rio;
- ✓ Não foram identificadas falhas de comutação nos demais elos CCAT ocasionadas pela falha de disparo de uma válvula em uma conversora de Terminal Rio;

- ✓ Para uma melhor aferição do tempo de recuperação dos elos CCAT do Madeira frente à emergências na rede de transmissão do Sudeste, aferição fora do escopo deste relatório, sugere-se que se atualize os modelos do elo CCAT entre Porto Velho – Araraquara 2 e da rede de transmissão que conecta as máquinas das UHEs Santo Antônio e Jirau, bem como atualize os modelos do elo CCAT entre Foz do Iguaçu – Ibiúna;
- ✓ Com base nas premissas e análises realizadas não existem restrições para a inserção do bipolo CCAT ± 800 kV Xingu - Terminal Rio no SIN. Entretanto, caberá ao futuro concessionário (Agente de Transmissão), demonstrar na etapa de Projeto Básico que seu sistema de controle apresenta desempenho superior ao indicado no presente relatório.

10 REPRESENTAÇÃO DA IMPEDÂNCIA HARMÔNICA DA REDE

Esta análise teve como objetivo levantar a impedância harmônica vista das barras CA das subestações conversoras Xingu e Terminal Rio, com a finalidade de fornecer as informações necessárias ao dimensionamento e verificação do desempenho dos filtros CA associados ao bipolo 2 do sistema de transmissão em ± 800 kV.

O cálculo das impedâncias harmônicas foi realizado com o programa HarmZs, versão 2.0.1, desenvolvido pelo CEPEL. Para a sua utilização foram criados casos base a partir de casos de fluxo de potência do programa ANAREDE, também do CEPEL.

Para o cálculo da impedância harmônica, foram criados arquivos para o programa HarmZs (extensão .hzs) a partir dos casos de fluxo de potência do plano decenal 2023 referentes aos anos 2019-2020 a 2022-2023 nos cenários norte exportador, norte importador e intercâmbio zero, patamares de carga leve e pesada.

A partir dos casos citados acima foram criados os casos "raiz" do HarmZs, sobre os quais foram realizadas as seguintes adequações:

- Inclusão da variação da resistência de linhas, transformadores e geradores conforme a equação abaixo e a Tabela 10-1 [18].

$$R(f) = R_{60Hz} (A \cdot f^{\alpha} + B \cdot f^{\beta} + C)$$

Tabela 10-1 - Parâmetros para a correção da resistência com a frequência

Elemento	α	β	A	B	C
Linhas	0.7316	0.7158	-1.243	1.549	0.6
Transformadores	1.909	1.5	0.1431	-0.08121	0.91
Geradores	0.8802	0.8069	-0.8222	1.37	0.6

- Resistência dos transformadores: 2% da reatância de dispersão dos transformadores (fator de qualidade 50) para os que não possuíam informação na base de dados de fluxo de potência;
- Resistência dos geradores calculadas conforme recomendado em [19]:

$$R_{g60Hz} = \frac{X_d''}{\omega \cdot T_{d0}''}$$

onde R_{g60Hz} é a resistência do gerador à frequência fundamental, X''_d é a reatância subtransitória de eixo direto, ω é a frequência angular nominal do sistema ($2\pi \cdot 60$) e T''_{d0} é a constante de tempo subtransitória de eixo direto em circuito aberto.

- Modelagem das cargas em todo o sistema a partir de ramais típicos de distribuição inseridos entre os transformadores e as cargas conforme detalhado no Anexo III.
- Correção da reatância dos transformadores elevadores das usinas com base no número de máquinas despachadas em cada caso de fluxo de potência utilizando o programa ANAT0, desenvolvido pelo CEPEL;
- Inserção os dados correspondentes às reatâncias subtransitórias de eixo direto (X''_d) das máquinas segundo o número de máquinas despachadas no caso de fluxo de potência;
- Foram desligados os capacitores das barras CA do bipolo 1 do Terminal Xingu. As possíveis interações entre os projetos dos filtros do bipolo 1 e do bipolo 2 e sua compatibilidade deverão ser avaliadas na etapa de Projeto Básico;
- Foram desligados os capacitores das barras CA do bipolo 2, uma vez que estes constituem os filtros que serão projetados;
- Os filtros de harmônicos das estações conversoras Ibiúna 345 kV e Araraquara 2 500 kV foram representados detalhadamente por seus parâmetros RLC no programa HarmZs. A definição do número e dos tipos de filtros conectados foi feita com base na potência reativa do caso de fluxo de potência e na sequência normal de chaveamento;
- Para definir a melhor forma de representação dos filtros referentes ao bipolo 1 na SE Estreito, foi feita uma análise de sensibilidade. A impedância harmônica vista da barra da SE Terminal Rio foi calculada para casos selecionados representando os filtros da SE Estreito de três formas distintas: (i) circuito aberto; (ii) como um capacitor equivalente e (iii) representação detalhada através dos parâmetros RLC conforme relatório R2 do primeiro bipolo [5]. Os resultados dos cálculos mostraram que a impedância harmônica vista pela barra da SE Terminal Rio não era significativamente afetada pela forma de representação dos filtros na SE Estreito, especialmente se considerarmos as margens de segurança que estão sendo adotadas neste estudo. A Figura 10-1 ilustra o resultado destes cálculos para um caso típico. Decidiu-se então os filtros do bipolo 1 na SE Estreito seriam representados como capacitores em todos os casos.

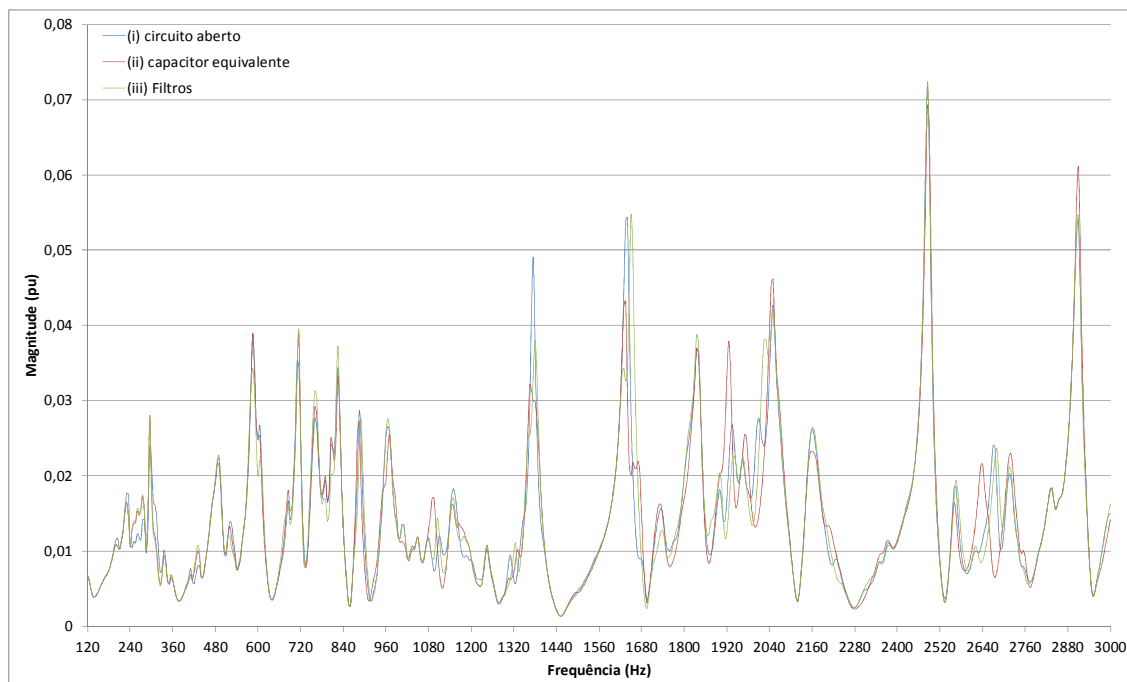


Figura 10-1 - Impedância harmônica vista pela SE Terminal Rio representando os filtros conectados na SE Estreito de três formas distintas para um caso típico

No cálculo das impedâncias harmônicas foram adotadas as seguintes premissas e simplificações:

- $Z(\omega)$ calculado do 2º até o 50º harmônico (120-3000 Hz);
- $Z(\omega)$ calculado para as frequências de 59.5 Hz, 60 Hz e 60.5 Hz e seus harmônicos, ou seja: $59.5 \cdot h$, $60 \cdot h$ e $60.5 \cdot h$, onde $h=1, 2, 3, \dots, 49, 50$;
- Foram analisadas as configurações de rede completa e a indisponibilidade de um elemento de rede nas regiões de interesse (critério N-1).
- Representação de todas as cargas do SIN nas tensões de 345 kV, 230 kV, 138 kV, 88 kV e 69 kV conforme modelo desenvolvido pelo CEPEL/ ONS e disponível no software HarmZs. Nos demais níveis de tensão, as cargas são assumidas desligadas.
- Máquinas sem modelos na base de dados do Anatem foram consideradas desligadas.
- Linhas de transmissão representadas por infinitos circuitos "pi" equivalentes associados em cascata;
- Agrupamento das nuvens de pontos para a definição dos lugares geométricos das impedâncias: harmônicos de ordem 2 e 3 para $h=2$, $h \pm 1$ do 3º até o 9º harmônico e $h \pm 2$ do 10º até o 50º harmônico. Por exemplo, o envelope para o 3º harmônico inclui os pontos calculados para o 2º, 3 e 4º harmônicos. O envelope para o 11º

harmônico inclui os pontos calculados para o 9º, 10º, 11º, 12º e 13º harmônicos, e assim por diante.

- Exemplos dos lugares geométricos das impedâncias que podem ser utilizados para o agrupamento das nuvens de impedância são apresentados nas figuras a seguir (Figura 10-2 e Figura 10-3), respectivamente um polígono hexagonal e um setor angular.

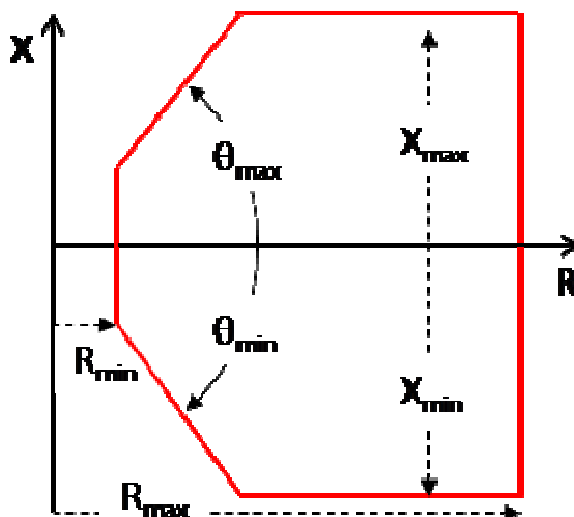


Figura 10-2 - Lugar Geométrico - Polígono Hexagonal.

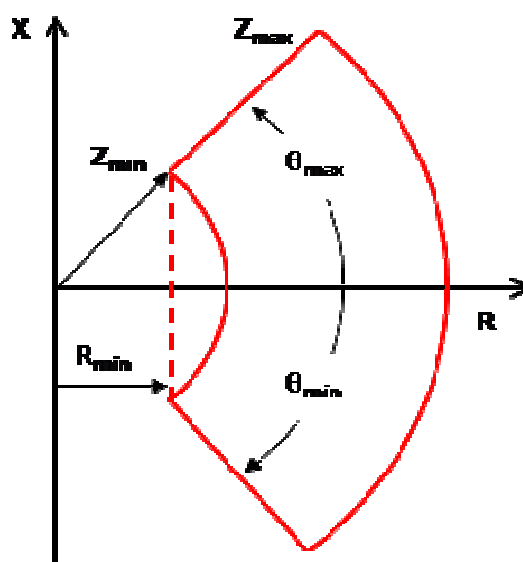


Figura 10-3 - Lugar geométrico - Setor Angular

10.1 Impedância harmônica vista da barra de Xingu 500 kV

Além do caso de rede completa, foram consideradas as condições de rede alterada até a terceira vizinhança da barra de Xingu 500 kV. As principais contingências avaliadas são listadas a seguir:

- LT Belo Monte - Xingu - 500kV
- LT Xingu - Parauapebas - 500kV
- LT Tucuruí 2 - Xingu - 500kV
- LT Jurupari - Xingu - 500kV
- LT Tucuruí 2 - Marabá - 500kV
- LT Tucuruí 1 - Tucuruí 2 - 500kV
- LT Tucuruí 2 - Vila do Conde - 500kV
- LT Tucuruí 2 - Itacaiúnas - 500kV
- LT Parauapebas - Itacaiúnas - 500kV

No caso da SE Xingu foram também consideradas variações em relação ao número de unidades geradoras presentes nas Usinas Hidrelétricas Belo Monte, Tucuruí e São Luiz do Tapajós (cenários do ano 2023).

Os casos base de fluxo de potência foram processados nas configurações conforme a **Tabela 10-2**, totalizando, entre casos base e contingência 2269 impedâncias para cada ordem harmônica.

Tabela 10-2 - Configuração dos casos bases de fluxo de potência - Xingu

Ano	Intercâmbio	Carga	Nº máquinas			Cenário
			Tucuruí	Belo Monte	S.L. do Tapajós	
2019-2020	Norte Exportador	Leve	23	18	0	1
			23	14	0	2
			18	18	0	3
	Zero	Leve	13	9	0	4
			13	7	0	5
	Norte Importador	Leve	7	3	0	6
			11	3	0	7
			7	7	0	8
2022-2023	Norte Exportador	Leve	23	18	36	9
			23	14	36	10
			18	18	28	11
	Zero	Leve	12	9	18	12
			12	5	18	13
	Norte Importador	Leve	7	3	4	14
			11	3	18	15
			7	7	4	16
2019-2020	Norte Exportador	Pesada	23	18	0	17
			23	14	0	18
			18	18	0	19
	Zero	Pesada	13	9	0	20
			13	7	0	21
	Norte Importador	Pesada	7	3	0	22
			11	3	0	23
			7	7	0	24
2022-2023	Norte Exportador	Pesada	23	18	36	25
			23	14	36	26
			18	18	28	27
			16	9	18	28
	Norte Importador/Zero	Pesada	7	3	4	29
			11	3	18	30
			7	7	4	31

Como o sistema de transmissão associado a UHE Tapajós (presente apenas nos cenários do ano 2023) é ainda referencial, decidiu-se não representar os filtros associados ao bipolo representado nos casos base. Como análise de sensibilidade, representou-se os filtros apenas no cenário 28, através de capacitores.

Por falta de oferta de energia excedente no subsistema Sudeste/Centro-Oeste no ano de 2023, patamar de carga pesada, não foi possível obter separadamente os cenários Norte Importador e

intercâmbio zero. Devido a esta restrição de oferta, as linhas de intercâmbio entre as regiões N/NE e SE/CO se apresentaram pouco carregadas podendo, portanto, considerar o cenário Norte Importador como equivalente ao cenário de intercâmbio zero.

A partir das “nuvens” de impedância calculadas para cada ordem harmônica, incluindo aquelas calculadas para $59.5 \times h$ e $60.5 \times h$, como as mostrada na Figura 10-4 e Figura 10-5, respectivamente para a 3ª e 11ª ordens harmônicas, obteve-se os seguintes parâmetros que definem os lugares geométricos de cada harmônico.

Nas Tabela 10-3 e Tabela 10-4 são apresentados os parâmetros que definem os lugares geométricos das impedâncias para a SE Xingu, respectivamente, quando se considera os harmônicos individuais ou agrupados ($h \pm 1$ ou $h \pm 2$).

Nas Tabela 10-5 e Tabela 10-6 são apresentados os parâmetros que definem os lugares geométricos das admitâncias para a SE Xingu, respectivamente, quando se considera os harmônicos individuais ou agrupados ($h \pm 1$ ou $h \pm 2$).

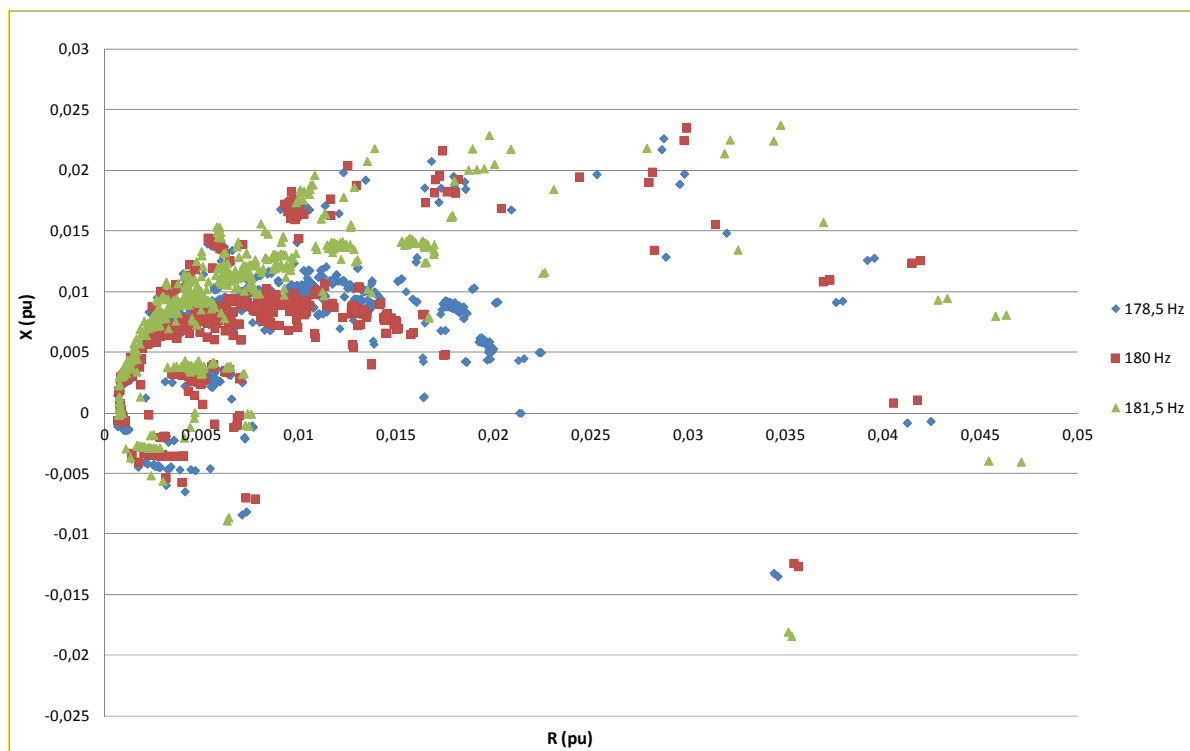


Figura 10-4 Pontos no plano R-X para a frequência de 180 Hz, Xingu

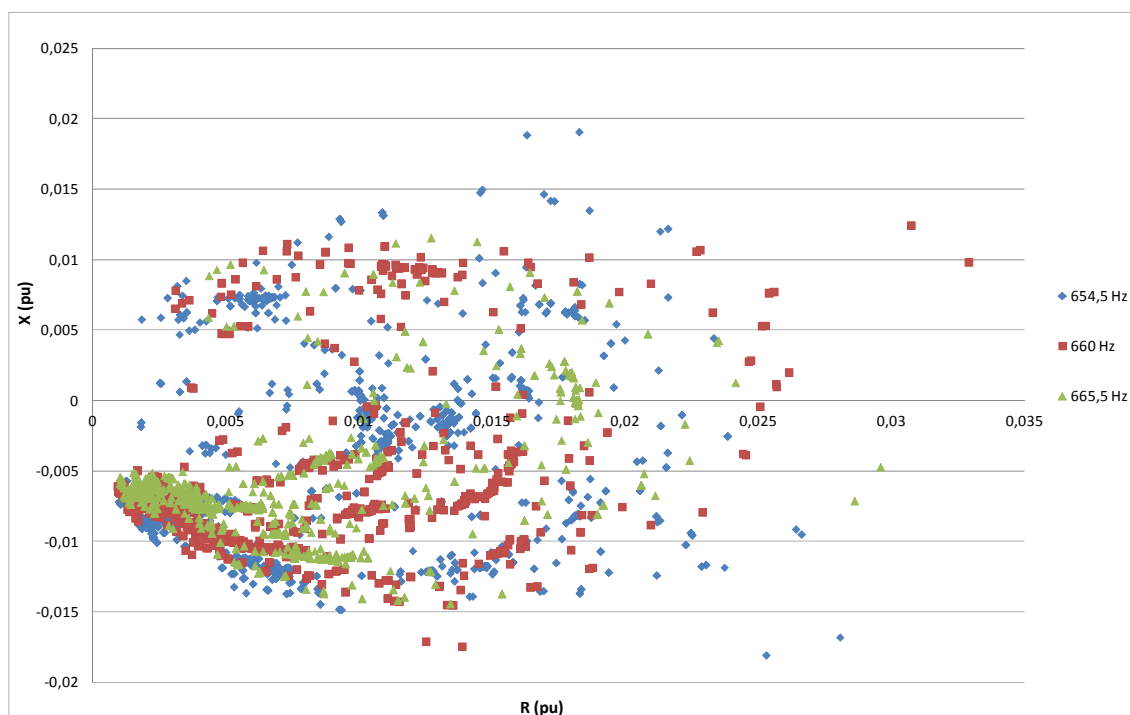


Figura 10-5 – Pontos no plano R-X para a frequência harmônica de 660 Hz Xingu

Tabela 10-3 - Parâmetros dos Lugares Geométricos das impedâncias – Xingu (pu)

Harmônicos Individuais

h	Rmin	Rmax	Xmin	Xmax	Zmin	Zmax	θmin (°)	θmax (°)
2	0,0015	0,0215	-0,0100	0,0115	0,0043	0,0222	-34,8194	74,7050
3	0,0007	0,0471	-0,0184	0,0237	0,0007	0,0472	-70,1802	76,0177
4	0,0013	0,0328	-0,0147	0,0185	0,0013	0,0332	-49,5440	70,3843
5	0,0010	0,0407	-0,0256	0,0203	0,0021	0,0407	-71,2894	70,9958
6	0,0010	0,0102	-0,0063	-0,0011	0,0022	0,0104	-72,1618	-9,0447
7	0,0013	0,0244	-0,0137	0,0108	0,0014	0,0248	-66,6108	67,1082
8	0,0008	0,0180	-0,0125	0,0062	0,0023	0,0182	-78,3371	38,9200
9	0,0010	0,0075	-0,0062	0,0024	0,0014	0,0083	-66,9909	37,8311
10	0,0009	0,0188	-0,0081	0,0066	0,0010	0,0189	-72,3677	48,4691
11	0,0009	0,0329	-0,0181	0,0191	0,0024	0,0343	-82,1181	72,3522
12	0,0008	0,0142	-0,0079	0,0015	0,0012	0,0147	-73,7108	34,6546
13	0,0005	0,0301	-0,0210	0,0210	0,0050	0,0327	-85,3363	63,8281
14	0,0004	0,0138	-0,0096	0,0026	0,0017	0,0154	-82,5550	11,8718
15	0,0005	0,0143	-0,0084	0,0056	0,0010	0,0146	-83,0322	48,2493
16	0,0002	0,0336	-0,0203	0,0025	0,0012	0,0344	-87,5603	39,9133
17	0,0002	0,0141	-0,0189	-0,0024	0,0025	0,0236	-86,5917	-53,2433
18	0,0008	0,0074	-0,0041	0,0031	0,0016	0,0075	-68,8278	41,7828
19	0,0004	0,0220	-0,0135	0,0145	0,0018	0,0227	-84,3332	63,8006
20	0,0007	0,0183	-0,0102	0,0060	0,0012	0,0184	-80,2403	59,7399
21	0,0002	0,0380	-0,0166	0,0243	0,0018	0,0413	-86,4348	64,4674
22	0,0001	0,0435	-0,0210	0,0056	0,0012	0,0446	-87,2910	8,5815
23	0,0001	0,0197	-0,0143	0,0087	0,0019	0,0202	-87,2631	53,5522
24	0,0005	0,0084	-0,0043	0,0029	0,0013	0,0084	-78,1356	24,5465
25	0,0002	0,0193	-0,0092	0,0081	0,0022	0,0197	-85,0091	31,4695
26	0,0002	0,0142	-0,0081	0,0008	0,0018	0,0143	-84,9967	3,4445
27	0,0001	0,0187	-0,0134	0,0080	0,0012	0,0201	-86,5524	46,4706
28	0,0002	0,0133	-0,0074	0,0030	0,0014	0,0133	-83,8168	28,4068
29	0,0002	0,0183	-0,0072	0,0057	0,0018	0,0186	-84,7920	34,4722
30	0,0002	0,0104	-0,0081	0,0018	0,0017	0,0126	-83,8205	15,0412
31	0,0001	0,0319	-0,0144	0,0116	0,0013	0,0328	-87,0392	59,8900
32	0,0001	0,0335	-0,0199	0,0130	0,0014	0,0338	-87,9195	54,2341
33	0,0001	0,0179	-0,0152	0,0020	0,0014	0,0182	-88,1138	6,2730
34	0,0001	0,0172	-0,0135	0,0011	0,0013	0,0217	-87,7249	7,5968
35	0,0000	0,0112	-0,0134	0,0031	0,0011	0,0147	-88,3847	30,7417
36	0,0001	0,0074	-0,0061	0,0005	0,0010	0,0094	-84,8053	7,5268
37	0,0001	0,0146	-0,0070	0,0065	0,0015	0,0151	-85,8588	47,9724
38	0,0001	0,0197	-0,0115	0,0005	0,0013	0,0200	-87,6890	3,2721
39	0,0001	0,0167	-0,0108	0,0045	0,0010	0,0196	-87,6399	53,2599
40	0,0001	0,0196	-0,0129	0,0094	0,0011	0,0202	-87,8160	46,3123
41	0,0000	0,0189	-0,0157	-0,0012	0,0012	0,0201	-88,5589	-7,5380
42	0,0001	0,0103	-0,0051	0,0038	0,0011	0,0107	-87,4616	21,7680
43	0,0000	0,0204	-0,0142	0,0084	0,0010	0,0237	-89,0471	42,3589
44	0,0000	0,0174	-0,0135	0,0009	0,0010	0,0210	-89,1991	10,2274
45	0,0000	0,0079	-0,0115	-0,0003	0,0009	0,0139	-88,2292	-3,6240
46	0,0001	0,0114	-0,0084	-0,0006	0,0010	0,0138	-86,8109	-3,6145
47	0,0000	0,0089	-0,0101	0,0013	0,0009	0,0124	-87,6797	13,5449
48	0,0001	0,0184	-0,0088	0,0076	0,0009	0,0188	-87,3886	35,7096
49	0,0000	0,0248	-0,0138	0,0031	0,0010	0,0251	-88,7355	9,4055
50	0,0000	0,0063	-0,0120	-0,0009	0,0009	0,0129	-88,6842	-31,2387

Tabela 10-4 - Parâmetros dos Lugares Geométricos das impedâncias – Xingu (pu)
Harmônicos Agrupados

h	Rmin	Rmax	Xmin	Xmax	Zmin	Zmax	θmin (°)	θmax (°)
2	0,0007	0,0471	-0,0184	0,0237	0,0007	0,0472	-70,1802	76,0177
3	0,0007	0,0471	-0,0184	0,0237	0,0007	0,0472	-70,1802	76,0177
4	0,0007	0,0471	-0,0256	0,0237	0,0007	0,0472	-71,2894	76,0177
5	0,0010	0,0407	-0,0256	0,0203	0,0013	0,0407	-72,1618	70,9958
6	0,0010	0,0407	-0,0256	0,0203	0,0014	0,0407	-72,1618	70,9958
7	0,0008	0,0244	-0,0137	0,0108	0,0014	0,0248	-78,3371	67,1082
8	0,0008	0,0244	-0,0137	0,0108	0,0014	0,0248	-78,3371	67,1082
9	0,0008	0,0188	-0,0125	0,0066	0,0010	0,0189	-78,3371	48,4691
10	0,0008	0,0329	-0,0181	0,0191	0,0010	0,0343	-82,1181	72,3522
11	0,0005	0,0329	-0,0210	0,0210	0,0010	0,0343	-85,3363	72,3522
12	0,0004	0,0329	-0,0210	0,0210	0,0010	0,0343	-85,3363	72,3522
13	0,0004	0,0329	-0,0210	0,0210	0,0010	0,0343	-85,3363	72,3522
14	0,0002	0,0336	-0,0210	0,0210	0,0010	0,0344	-87,5603	63,8281
15	0,0002	0,0336	-0,0210	0,0210	0,0010	0,0344	-87,5603	63,8281
16	0,0002	0,0336	-0,0203	0,0056	0,0010	0,0344	-87,5603	48,2493
17	0,0002	0,0336	-0,0203	0,0145	0,0010	0,0344	-87,5603	63,8006
18	0,0002	0,0336	-0,0203	0,0145	0,0012	0,0344	-87,5603	63,8006
19	0,0002	0,0380	-0,0189	0,0243	0,0012	0,0413	-86,5917	64,4674
20	0,0001	0,0435	-0,0210	0,0243	0,0012	0,0446	-87,2910	64,4674
21	0,0001	0,0435	-0,0210	0,0243	0,0012	0,0446	-87,2910	64,4674
22	0,0001	0,0435	-0,0210	0,0243	0,0012	0,0446	-87,2910	64,4674
23	0,0001	0,0435	-0,0210	0,0243	0,0012	0,0446	-87,2910	64,4674
24	0,0001	0,0435	-0,0210	0,0087	0,0012	0,0446	-87,2910	53,5522
25	0,0001	0,0197	-0,0143	0,0087	0,0012	0,0202	-87,2631	53,5522
26	0,0001	0,0193	-0,0134	0,0081	0,0012	0,0201	-86,5524	46,4706
27	0,0001	0,0193	-0,0134	0,0081	0,0012	0,0201	-86,5524	46,4706
28	0,0001	0,0187	-0,0134	0,0080	0,0012	0,0201	-86,5524	46,4706
29	0,0001	0,0319	-0,0144	0,0116	0,0012	0,0328	-87,0392	59,8900
30	0,0001	0,0335	-0,0199	0,0130	0,0013	0,0338	-87,9195	59,8900
31	0,0001	0,0335	-0,0199	0,0130	0,0013	0,0338	-88,1138	59,8900
32	0,0001	0,0335	-0,0199	0,0130	0,0013	0,0338	-88,1138	59,8900
33	0,0000	0,0335	-0,0199	0,0130	0,0011	0,0338	-88,3847	59,8900
34	0,0000	0,0335	-0,0199	0,0130	0,0010	0,0338	-88,3847	54,2341
35	0,0000	0,0179	-0,0152	0,0065	0,0010	0,0217	-88,3847	47,9724
36	0,0000	0,0197	-0,0135	0,0065	0,0010	0,0217	-88,3847	47,9724
37	0,0000	0,0197	-0,0134	0,0065	0,0010	0,0200	-88,3847	53,2599
38	0,0001	0,0197	-0,0129	0,0094	0,0010	0,0202	-87,8160	53,2599
39	0,0000	0,0197	-0,0157	0,0094	0,0010	0,0202	-88,5589	53,2599
40	0,0000	0,0197	-0,0157	0,0094	0,0010	0,0202	-88,5589	53,2599
41	0,0000	0,0204	-0,0157	0,0094	0,0010	0,0237	-89,0471	53,2599
42	0,0000	0,0204	-0,0157	0,0094	0,0010	0,0237	-89,1991	46,3123
43	0,0000	0,0204	-0,0157	0,0084	0,0009	0,0237	-89,1991	42,3589
44	0,0000	0,0204	-0,0142	0,0084	0,0009	0,0237	-89,1991	42,3589
45	0,0000	0,0204	-0,0142	0,0084	0,0009	0,0237	-89,1991	42,3589
46	0,0000	0,0184	-0,0135	0,0076	0,0009	0,0210	-89,1991	35,7096
47	0,0000	0,0248	-0,0138	0,0076	0,0009	0,0251	-88,7355	35,7096
48	0,0000	0,0248	-0,0138	0,0076	0,0009	0,0251	-88,7355	35,7096
49	0,0000	0,0248	-0,0138	0,0076	0,0009	0,0251	-88,7355	35,7096
50	0,0000	0,0248	-0,0138	0,0076	0,0009	0,0251	-88,7355	35,7096

Tabela 10-5 - Parâmetros dos Lugares Geométricos das admitâncias – Xingu (pu)
Harmônicos Individuais

h	Gmax	Gmin	Bmax	Bmin	Ymax	Ymin	θmax(°)	θmin(°)
2	41,0970	114,7000	-202,7700	32,7560	44,9689	230,8906	-74,7051	34,8198
3	19,6280	1340,6000	-662,9700	759,3400	21,1650	1372,7340	-76,0176	70,1796
4	26,8750	772,5900	-160,3100	302,0500	30,1041	773,1634	-70,3849	49,5441
5	17,1880	337,8700	-414,0800	88,1620	24,5580	477,5051	-70,9948	71,2894
6	65,8800	210,2400	18,3230	404,4700	95,8231	448,9962	9,0449	72,1621
7	35,6480	664,4600	-256,2200	336,8000	40,2467	714,1936	-67,1079	66,6108
8	30,8650	257,8200	-80,6130	406,1500	54,9134	431,4931	-38,9202	78,3370
9	74,3650	681,2000	-214,2200	434,1200	120,3769	695,9391	-37,8292	66,9914
10	51,5100	1033,7000	-392,5400	537,9500	52,9531	1040,1216	-48,4686	72,3677
11	18,9390	321,6300	-158,8600	277,3200	29,1253	421,0306	-72,3522	82,1179
12	56,4200	803,5600	-212,9100	513,2400	68,0515	813,0528	-34,6557	73,7111
13	12,8230	52,4100	-88,3850	195,6400	30,5476	198,7470	-63,8281	85,3363
14	29,4980	434,1200	-16,9890	563,0700	64,7406	594,1634	-11,8716	82,5550
15	31,2750	935,5000	-285,0300	645,9300	68,6089	952,5615	-48,2498	83,0321
16	10,4440	792,9100	-230,3300	498,9100	29,0459	819,4646	-39,9135	87,5602
17	16,8450	118,1300	33,9780	394,6600	42,4099	408,0948	53,2430	86,5917
18	109,8100	532,0100	-181,8600	481,1900	134,0866	640,7658	-41,7831	68,8278
19	23,9340	489,0900	-215,8800	343,7100	44,0637	547,4400	-63,8011	84,3334
20	39,3550	742,9600	-299,2300	471,8500	54,2855	845,9851	-59,7383	80,2407
21	14,2390	318,1200	-62,5120	458,9800	24,2251	547,5842	-64,4677	86,4347
22	13,8030	639,3600	-3,9844	652,2600	22,3970	853,2797	-8,5813	87,2909
23	17,0290	295,5800	-191,5300	516,5100	49,6213	531,6638	-53,5536	87,2631
24	85,3570	752,7100	-93,3510	608,9400	118,7451	758,3782	-24,5460	78,1359
25	30,4410	191,1100	-33,8400	426,3400	50,8270	452,4033	-31,4685	85,0090
26	33,0010	336,1100	-4,7857	528,6000	69,7044	569,7669	-3,4445	84,9969
27	25,4900	564,3900	-218,3200	718,3900	49,8652	851,9692	-46,4709	86,5524
28	49,0700	597,9700	-75,3050	629,2800	75,2872	696,9089	-28,4058	83,8169
29	39,9180	277,8200	-64,3090	479,7600	53,7514	546,2713	-34,4725	84,7922
30	51,7610	188,5300	-38,3710	565,1200	79,3994	593,7287	-15,0414	83,8205
31	23,3240	517,8800	-176,3900	640,6400	30,4949	755,0019	-59,8904	87,0390
32	15,6440	432,6000	-135,4800	628,4000	29,5805	711,1928	-54,2351	87,9195
33	17,3230	287,7600	-6,0833	722,4500	54,9360	734,2202	-6,2730	88,1138
34	21,6030	204,5500	-16,4580	748,9300	46,0299	767,5219	-7,5968	87,7249
35	16,7040	278,5900	-121,0200	832,1000	67,9357	871,4498	-30,7415	88,3847
36	59,7140	538,2100	-35,5340	869,2800	106,0245	985,5130	-7,5267	84,8053
37	41,7500	136,5100	-104,7600	644,0800	66,1375	654,4794	-47,9735	85,8587
38	25,9740	205,0100	-6,0935	767,3400	50,0750	771,7328	-3,2719	87,6890
39	27,0560	753,4400	-183,0900	893,7200	51,0017	1032,9559	-53,2606	87,6399
40	25,7810	292,9600	-112,7900	902,2500	49,4429	938,4241	-46,3126	87,8160
41	18,3780	122,5600	7,1613	803,8600	49,6666	804,6595	7,5383	88,5589
42	35,5420	230,3400	-36,3590	922,8200	93,5439	948,0293	-21,7683	87,4616
43	13,1340	471,4200	-62,2970	896,5300	42,1925	981,4574	-42,3590	89,0471
44	11,3860	199,3300	-35,7790	1005,5000	47,5822	1017,1251	-10,2273	89,1991
45	26,1040	444,4900	13,3320	1031,3000	71,9002	1086,2184	3,6240	88,2293
46	51,5650	215,5100	7,0000	1022,7000	72,4436	1043,8696	3,6143	86,8109
47	36,9190	337,2700	-40,9400	1121,3000	80,6755	1154,7036	-13,5457	87,6797
48	40,5750	293,5700	-177,8500	1121,9000	53,1713	1147,9784	-35,7104	87,3885
49	21,2050	64,9530	-8,7314	1008,6000	39,7939	1009,2462	-9,4053	88,7356
50	22,5300	172,9400	71,9850	1129,5000	77,8065	1136,7251	31,2380	88,6842

Tabela 10-6 - Parâmetros dos Lugares Geométricos das admitâncias – Xingu (pu)
Harmônicos Agrupados

h	Gmax	Gmin	Bmax	Bmin	Ymax	Ymin	θmax(°)	θmin(°)
2	19,6280	1340,6000	-662,9700	759,3400	21,1650	1372,7340	-76,0176	70,1796
3	19,6280	1340,6000	-662,9700	759,3400	21,1650	1372,7340	-76,0176	70,1796
4	17,1880	1340,6000	-662,9700	759,3400	21,1650	1372,7340	-76,0176	71,2894
5	17,1880	772,5900	-414,0800	404,4700	24,5580	773,1634	-70,9948	72,1621
6	17,1880	664,4600	-414,0800	404,4700	24,5580	714,1936	-70,9948	72,1621
7	30,8650	664,4600	-256,2200	406,1500	40,2467	714,1936	-67,1079	78,3370
8	30,8650	681,2000	-256,2200	434,1200	40,2467	714,1936	-67,1079	78,3370
9	30,8650	1033,7000	-392,5400	537,9500	52,9531	1040,1216	-48,4686	78,3370
10	18,9390	1033,7000	-392,5400	537,9500	29,1253	1040,1216	-72,3522	82,1179
11	12,8230	1033,7000	-392,5400	537,9500	29,1253	1040,1216	-72,3522	85,3363
12	12,8230	1033,7000	-392,5400	563,0700	29,1253	1040,1216	-72,3522	85,3363
13	12,8230	935,5000	-285,0300	645,9300	29,1253	952,5615	-72,3522	85,3363
14	10,4440	935,5000	-285,0300	645,9300	29,0459	952,5615	-63,8281	87,5602
15	10,4440	935,5000	-285,0300	645,9300	29,0459	952,5615	-63,8281	87,5602
16	10,4440	935,5000	-285,0300	645,9300	29,0459	952,5615	-48,2498	87,5602
17	10,4440	935,5000	-285,0300	645,9300	29,0459	952,5615	-63,8011	87,5602
18	10,4440	792,9100	-299,2300	498,9100	29,0459	845,9851	-63,8011	87,5602
19	14,2390	742,9600	-299,2300	481,1900	24,2251	845,9851	-64,4677	86,5917
20	13,8030	742,9600	-299,2300	652,2600	22,3970	853,2797	-64,4677	87,2909
21	13,8030	742,9600	-299,2300	652,2600	22,3970	853,2797	-64,4677	87,2909
22	13,8030	752,7100	-299,2300	652,2600	22,3970	853,2797	-64,4677	87,2909
23	13,8030	752,7100	-191,5300	652,2600	22,3970	853,2797	-64,4677	87,2909
24	13,8030	752,7100	-191,5300	652,2600	22,3970	853,2797	-53,5536	87,2909
25	17,0290	752,7100	-218,3200	718,3900	49,6213	851,9692	-53,5536	87,2631
26	25,4900	752,7100	-218,3200	718,3900	49,8652	851,9692	-46,4709	86,5524
27	25,4900	597,9700	-218,3200	718,3900	49,8652	851,9692	-46,4709	86,5524
28	25,4900	597,9700	-218,3200	718,3900	49,8652	851,9692	-46,4709	86,5524
29	23,3240	597,9700	-218,3200	718,3900	30,4949	851,9692	-59,8904	87,0390
30	15,6440	597,9700	-176,3900	640,6400	29,5805	755,0019	-59,8904	87,9195
31	15,6440	517,8800	-176,3900	722,4500	29,5805	755,0019	-59,8904	88,1138
32	15,6440	517,8800	-176,3900	748,9300	29,5805	767,5219	-59,8904	88,1138
33	15,6440	517,8800	-176,3900	832,1000	29,5805	871,4498	-59,8904	88,3847
34	15,6440	538,2100	-135,4800	869,2800	29,5805	985,5130	-54,2351	88,3847
35	16,7040	538,2100	-121,0200	869,2800	46,0299	985,5130	-47,9735	88,3847
36	16,7040	538,2100	-121,0200	869,2800	46,0299	985,5130	-47,9735	88,3847
37	16,7040	753,4400	-183,0900	893,7200	50,0750	1032,9559	-53,2606	88,3847
38	25,7810	753,4400	-183,0900	902,2500	49,4429	1032,9559	-53,2606	87,8160
39	18,3780	753,4400	-183,0900	902,2500	49,4429	1032,9559	-53,2606	88,5589
40	18,3780	753,4400	-183,0900	922,8200	49,4429	1032,9559	-53,2606	88,5589
41	13,1340	753,4400	-183,0900	922,8200	42,1925	1032,9559	-53,2606	89,0471
42	11,3860	471,4200	-112,7900	1005,5000	42,1925	1017,1251	-46,3126	89,1991
43	11,3860	471,4200	-62,2970	1031,3000	42,1925	1086,2184	-42,3590	89,1991
44	11,3860	471,4200	-62,2970	1031,3000	42,1925	1086,2184	-42,3590	89,1991
45	11,3860	471,4200	-62,2970	1121,3000	42,1925	1154,7036	-42,3590	89,1991
46	11,3860	444,4900	-177,8500	1121,9000	47,5822	1154,7036	-35,7104	89,1991
47	21,2050	444,4900	-177,8500	1121,9000	39,7939	1154,7036	-35,7104	88,7356
48	21,2050	337,2700	-177,8500	1129,5000	39,7939	1154,7036	-35,7104	88,7356
49	21,2050	337,2700	-177,8500	1129,5000	39,7939	1154,7036	-35,7104	88,7356
50	21,2050	293,5700	-177,8500	1129,5000	39,7939	1147,9784	-35,7104	88,7356

10.2 Impedância harmônica vista da barra do Terminal Rio 500 kV

Além do caso de rede completa, foram consideradas as condições de rede alterada até a terceira vizinhança da barra Terminal Rio 500 kV. As principais contingências avaliadas são listadas a seguir:

- LT Terminal Rio - Adrianópolis - 500kV
- LT Terminal Rio - Fernão Dias - 500kV
- LT Terminal Rio - Nova Iguaçu - 500kV
- LT Terminal Rio - Resende - 500kV
- LT Nova Iguaçu - Taubaté 2 - 500kV
- LT Nova Iguaçu - Angra dos Reis - 500kV
- LT Nova Iguaçu - Grajaú - 500kV
- LT Nova Iguaçu - Zona Oeste - 500kV
- LT Grajaú - Adrianópolis - 500kV
- LT São José - Adrianópolis - 500kV
- LT Taubaté - Cachoeira Paulista - 500kV
- LT Tijuco Preto - Cachoeira Paulista - 500kV
- LT Angra - Cachoeira Paulista - 500kV
- LT Cachoeira Paulista - Resende - 500kV
- LT Cachoeira Paulista - CSN - 500kV
- LT Cachoeira Paulista - Resende - 500kV

Para o Terminal Rio, não foram feitas varreduras em relação ao número de máquinas das usinas próximas, uma vez que os casos de fluxo de potência já contemplam uma varredura suficiente. No entanto, foram inseridos os casos base do Plano Decenal (PD), carga pesada e carga leve, para os anos 2021 e 2022.

Os casos bases de fluxo de potência foram processados nas configurações conforme a **Tabela 10-7** totalizando, entre casos base e contingências, 2453 impedâncias para cada ordem harmônica:

Tabela 10-7 - Configuração dos casos bases de fluxo de potência – Terminal Rio

Ano	Intercâmbio	Patamar de carga	Cenário
2019-2020	Norte Exportador	Leve	1
2019-2020	Zero	Leve	2
2019-2020	Norte Importador	Leve	3
2020-2021	Norte Exportador	Leve	4
2021-2022	Norte Exportador	Leve	5
2022-2023	Norte Exportador	Leve	6
2022-2023	Zero	Leve	7
2022-2023	Norte Importador	Leve	8
2019-2020	Norte Exportador	Pesada	9
2019-2020	Zero	Pesada	10
2019-2020	Norte Importador	Pesada	11
2020-2021	Norte Exportador	Pesada	12
2021-2022	Norte Exportador	Pesada	13
2022-2023	Norte Exportador	Pesada	14
2022-2023	Norte Importador/Zero	Pesada	15

A partir das “nuvens” de impedância calculadas para cada ordem harmônica, incluindo aquelas calculadas para $59.5 \times h$ e $60.5 \times h$, como as mostrada na Figura 10-6 e na Figura 10-7, respectivamente para a 11ª e 13ª ordens harmônicas, obteve-se os seguintes parâmetros que definem os lugares geométricos de cada harmônico.

Nas **Tabela 10-8** e **Tabela 10-9** são apresentados os parâmetros que definem os lugares geométricos das impedâncias para a SE Terminal Rio, respectivamente, quando se considera os harmônicos individuais ou agrupados ($h \pm 1$ ou $h \pm 2$).

Nas **Tabela 10-10** e **Tabela 10-11** são apresentados os parâmetros que definem os lugares geométricos das admitâncias para a SE Terminal Rio, respectivamente, quando se considera os harmônicos individuais ou agrupados ($h \pm 1$ ou $h \pm 2$).

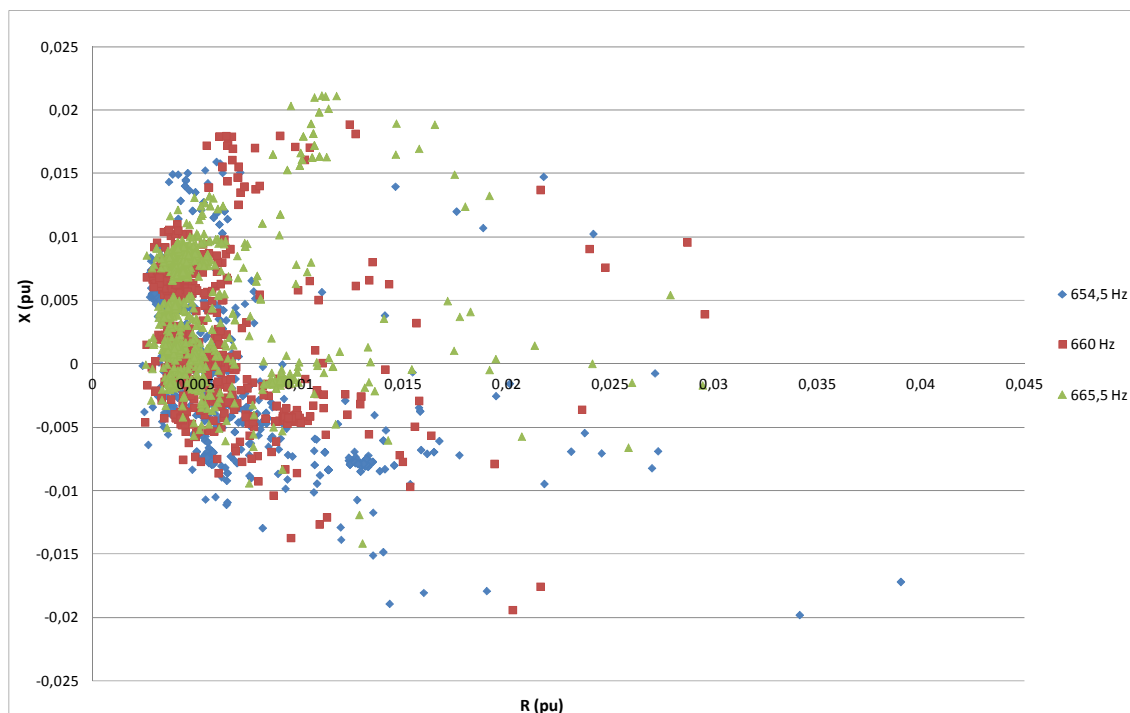


Figura 10-6 - Pontos no plano R-X para a frequência harmônica de 660 Hz Terminal Rio



Figura 10-7 - Pontos no plano R-X para a frequência harmônica de 780 Hz - Terminal Rio

Tabela 10-8 - Parâmetros dos Lugares Geométricos das impedâncias – Terminal Rio (pu)

Harmônicos Individuais

h	Rmin	Rmax	Xmin	Xmax	Zmin	Zmax	θmin (°)	θmax (°)
2	0,0055	0,0127	0,0014	0,0053	0,0064	0,0133	7,5909	35,3066
3	0,0023	0,0053	0,0056	0,0091	0,0062	0,0101	54,7961	73,1446
4	0,0038	0,0430	-0,0181	0,0263	0,0078	0,0446	-39,0408	72,4625
5	0,0015	0,0310	-0,0181	0,0124	0,0022	0,0313	-69,7612	44,7534
6	0,0018	0,0131	-0,0063	0,0139	0,0028	0,0147	-38,3831	75,6230
7	0,0020	0,0309	-0,0124	0,0128	0,0026	0,0314	-56,3215	77,3735
8	0,0013	0,0384	-0,0034	0,0269	0,0042	0,0408	-12,6246	82,3652
9	0,0031	0,0235	-0,0049	0,0157	0,0035	0,0252	-28,3834	59,3393
10	0,0035	0,0645	-0,0349	0,0381	0,0054	0,0661	-60,4705	72,7960
11	0,0024	0,0390	-0,0198	0,0212	0,0024	0,0426	-67,2448	75,6385
12	0,0010	0,0496	-0,0185	0,0373	0,0012	0,0506	-55,4354	68,6367
13	0,0039	0,0729	-0,0313	0,0347	0,0053	0,0734	-50,1267	71,5421
14	0,0019	0,0855	-0,0430	0,0367	0,0052	0,0858	-76,4858	55,6272
15	0,0023	0,0365	-0,0187	0,0165	0,0028	0,0367	-65,1637	58,2899
16	0,0040	0,0460	-0,0227	0,0282	0,0091	0,0464	-50,2530	70,1426
17	0,0022	0,0224	-0,0143	0,0066	0,0022	0,0240	-59,9630	40,6547
18	0,0024	0,0363	-0,0139	0,0245	0,0026	0,0417	-56,0043	73,4733
19	0,0029	0,0649	-0,0249	0,0456	0,0037	0,0658	-67,2295	73,8576
20	0,0013	0,0254	-0,0197	0,0097	0,0015	0,0273	-60,8046	56,1958
21	0,0020	0,0253	-0,0101	0,0094	0,0021	0,0258	-58,6477	46,8692
22	0,0011	0,0433	-0,0186	0,0160	0,0028	0,0433	-50,0275	76,8759
23	0,0012	0,0813	-0,0363	0,0512	0,0014	0,0814	-70,3786	78,5110
24	0,0009	0,1895	-0,0860	0,0923	0,0010	0,1918	-74,7837	80,6639
25	0,0008	0,0214	-0,0292	0,0141	0,0020	0,0310	-72,9977	84,0238
26	0,0009	0,0155	-0,0110	0,0319	0,0032	0,0344	-63,3305	83,4999
27	0,0016	0,0912	-0,0253	0,0462	0,0032	0,0913	-58,0985	83,1717
28	0,0027	0,0473	-0,0236	0,0339	0,0029	0,0484	-63,7012	70,8107
29	0,0042	0,0288	-0,0050	0,0176	0,0051	0,0292	-16,7882	70,3259
30	0,0033	0,0406	-0,0053	0,0297	0,0081	0,0406	-24,2152	75,8891
31	0,0046	0,0378	-0,0138	0,0247	0,0073	0,0387	-46,9945	67,9689
32	0,0056	0,0720	-0,0210	0,0406	0,0062	0,0731	-48,9808	63,4305
33	0,0067	0,0503	-0,0237	0,0224	0,0083	0,0503	-50,6800	62,5405
34	0,0045	0,0675	-0,0301	0,0305	0,0094	0,0714	-68,6727	60,0854
35	0,0018	0,0527	-0,0233	0,0132	0,0023	0,0528	-71,1601	49,8757
36	0,0023	0,0382	-0,0231	0,0193	0,0023	0,0417	-54,2950	63,1587
37	0,0027	0,0391	-0,0121	0,0121	0,0035	0,0397	-56,6094	50,9055
38	0,0015	0,0340	-0,0213	0,0085	0,0018	0,0340	-60,1575	68,2075
39	0,0017	0,0247	-0,0154	0,0220	0,0024	0,0283	-54,4982	75,6581
40	0,0018	0,0253	-0,0044	0,0277	0,0025	0,0314	-22,7293	77,8639
41	0,0017	0,0809	-0,0441	0,0470	0,0032	0,0873	-54,3101	77,9315
42	0,0017	0,0591	-0,0313	0,0525	0,0031	0,0728	-69,2270	73,0224
43	0,0015	0,1077	-0,0275	0,0378	0,0049	0,1095	-49,4542	79,9045
44	0,0038	0,0566	-0,0430	0,0298	0,0048	0,0608	-70,8341	70,0800
45	0,0031	0,0380	-0,0141	0,0264	0,0032	0,0462	-72,1211	67,9230
46	0,0026	0,0298	-0,0074	0,0146	0,0051	0,0307	-26,0938	76,9023
47	0,0026	0,0192	-0,0023	0,0256	0,0064	0,0281	-8,0180	79,4618
48	0,0026	0,1133	-0,0242	0,0465	0,0104	0,1133	-46,9448	81,7881
49	0,0024	0,0649	-0,0398	0,0300	0,0054	0,0651	-61,1975	81,4290
50	0,0020	0,0149	-0,0028	0,0388	0,0039	0,0393	-25,9747	83,2997

**Tabela 10-9 - Parâmetros dos Lugares Geométricos das impedâncias – Terminal Rio
(pu)**

Harmônicos Agrupados

h	Rmin	Rmax	Xmin	Xmax	Zmin	Zmax	θmin (°)	θmax (°)
2	0,0023	0,0127	0,0014	0,0091	0,0062	0,0133	7,5909	73,1446
3	0,0023	0,0430	-0,0181	0,0263	0,0062	0,0446	-39,0408	73,1446
4	0,0015	0,0430	-0,0181	0,0263	0,0022	0,0446	-69,7612	73,1446
5	0,0015	0,0430	-0,0181	0,0263	0,0022	0,0446	-69,7612	75,6230
6	0,0015	0,0310	-0,0181	0,0139	0,0022	0,0314	-69,7612	77,3735
7	0,0013	0,0384	-0,0124	0,0269	0,0026	0,0408	-56,3215	82,3652
8	0,0013	0,0384	-0,0124	0,0269	0,0026	0,0408	-56,3215	82,3652
9	0,0013	0,0645	-0,0349	0,0381	0,0035	0,0661	-60,4705	82,3652
10	0,0010	0,0645	-0,0349	0,0381	0,0012	0,0661	-67,2448	82,3652
11	0,0010	0,0729	-0,0349	0,0381	0,0012	0,0734	-67,2448	75,6385
12	0,0010	0,0855	-0,0430	0,0381	0,0012	0,0858	-76,4858	75,6385
13	0,0010	0,0855	-0,0430	0,0373	0,0012	0,0858	-76,4858	75,6385
14	0,0010	0,0855	-0,0430	0,0373	0,0012	0,0858	-76,4858	71,5421
15	0,0019	0,0855	-0,0430	0,0367	0,0022	0,0858	-76,4858	71,5421
16	0,0019	0,0855	-0,0430	0,0367	0,0022	0,0858	-76,4858	73,4733
17	0,0022	0,0649	-0,0249	0,0456	0,0022	0,0658	-67,2295	73,8576
18	0,0013	0,0649	-0,0249	0,0456	0,0015	0,0658	-67,2295	73,8576
19	0,0013	0,0649	-0,0249	0,0456	0,0015	0,0658	-67,2295	73,8576
20	0,0011	0,0649	-0,0249	0,0456	0,0015	0,0658	-67,2295	76,8759
21	0,0011	0,0813	-0,0363	0,0512	0,0014	0,0814	-70,3786	78,5110
22	0,0009	0,1895	-0,0860	0,0923	0,0010	0,1918	-74,7837	80,6639
23	0,0008	0,1895	-0,0860	0,0923	0,0010	0,1918	-74,7837	84,0238
24	0,0008	0,1895	-0,0860	0,0923	0,0010	0,1918	-74,7837	84,0238
25	0,0008	0,1895	-0,0860	0,0923	0,0010	0,1918	-74,7837	84,0238
26	0,0008	0,1895	-0,0860	0,0923	0,0010	0,1918	-74,7837	84,0238
27	0,0008	0,0912	-0,0292	0,0462	0,0020	0,0913	-72,9977	84,0238
28	0,0009	0,0912	-0,0253	0,0462	0,0029	0,0913	-63,7012	83,4999
29	0,0016	0,0912	-0,0253	0,0462	0,0029	0,0913	-63,7012	83,1717
30	0,0027	0,0720	-0,0236	0,0406	0,0029	0,0731	-63,7012	75,8891
31	0,0033	0,0720	-0,0237	0,0406	0,0051	0,0731	-50,6800	75,8891
32	0,0033	0,0720	-0,0301	0,0406	0,0062	0,0731	-68,6727	75,8891
33	0,0018	0,0720	-0,0301	0,0406	0,0023	0,0731	-71,1601	67,9689
34	0,0018	0,0720	-0,0301	0,0406	0,0023	0,0731	-71,1601	63,4305
35	0,0018	0,0675	-0,0301	0,0305	0,0023	0,0714	-71,1601	63,1587
36	0,0015	0,0675	-0,0301	0,0305	0,0018	0,0714	-71,1601	68,2075
37	0,0015	0,0527	-0,0233	0,0220	0,0018	0,0528	-71,1601	75,6581
38	0,0015	0,0391	-0,0231	0,0277	0,0018	0,0417	-60,1575	77,8639
39	0,0015	0,0809	-0,0441	0,0470	0,0018	0,0873	-60,1575	77,9315
40	0,0015	0,0809	-0,0441	0,0525	0,0018	0,0873	-69,2270	77,9315
41	0,0015	0,1077	-0,0441	0,0525	0,0024	0,1095	-69,2270	79,9045
42	0,0015	0,1077	-0,0441	0,0525	0,0025	0,1095	-70,8341	79,9045
43	0,0015	0,1077	-0,0441	0,0525	0,0031	0,1095	-72,1211	79,9045
44	0,0015	0,1077	-0,0430	0,0525	0,0031	0,1095	-72,1211	79,9045
45	0,0015	0,1077	-0,0430	0,0378	0,0032	0,1095	-72,1211	79,9045
46	0,0026	0,1133	-0,0430	0,0465	0,0032	0,1133	-72,1211	81,7881
47	0,0024	0,1133	-0,0398	0,0465	0,0032	0,1133	-72,1211	81,7881
48	0,0020	0,1133	-0,0398	0,0465	0,0039	0,1133	-61,1975	83,2997
49	0,0020	0,1133	-0,0398	0,0465	0,0039	0,1133	-61,1975	83,2997
50	0,0020	0,1133	-0,0398	0,0465	0,0039	0,1133	-61,1975	83,2997

Tabela 10-10 - Parâmetros dos Lugares Geométricos das admitâncias – Terminal Rio (pu)

Harmônicos Individuais

h	Gmin	Gmax	Bmin	Bmax	Ymin	Ymax	θmin(°)	θmax(°)
2	70,7800	135,3100	-83,3010	-11,5030	75,3699	155,4544	-35,3060	-7,5912
3	34,2560	74,3560	-145,6600	-85,9790	98,8851	161,1101	-73,1447	-54,7960
4	17,0960	110,4900	-107,2100	44,4980	22,4293	127,9822	-72,4629	39,0414
5	26,7310	405,3800	-137,6900	298,2400	31,9616	451,9834	-44,7529	69,7602
6	20,5820	348,3800	-178,9800	116,9400	68,2230	356,2936	-75,6226	38,3824
7	21,7310	379,6000	-223,0400	168,8100	31,8891	390,9771	-77,3736	56,3213
8	11,1740	126,9300	-220,0200	14,0070	24,4993	238,4874	-82,3648	12,6247
9	31,7850	267,7800	-141,0800	69,8450	39,6602	282,6904	-59,3392	28,3834
10	11,5930	172,9000	-93,3120	76,7460	15,1280	186,3265	-72,7962	60,4713
11	16,1630	414,4500	-169,2900	184,6800	23,4580	415,1057	-75,6383	67,2453
12	12,1740	693,9800	-451,9000	110,5400	19,7582	828,1436	-68,6376	55,4358
13	13,4310	186,8300	-81,3460	64,0840	13,6183	187,2273	-71,5416	50,1274
14	11,6170	139,0400	-34,9970	160,3400	11,6610	193,4916	-55,6272	76,4865
15	26,5610	342,1900	-179,4100	212,1600	27,2664	351,8341	-58,2912	65,1643
16	17,4850	101,9800	-88,0560	39,4410	21,5702	109,9024	-70,1426	50,2545
17	33,4230	440,8100	-147,2500	192,1000	41,7068	447,5042	-40,6560	59,9622
18	20,4250	374,3900	-156,5700	195,0000	23,9929	391,3994	-73,4733	56,0036
19	9,4764	266,3400	-132,1400	133,6200	15,2037	267,2206	-73,8572	67,2304
20	25,0790	628,3600	-118,7000	373,6300	36,5825	686,9726	-56,1954	60,8056
21	38,1390	470,6000	-220,0800	237,2000	38,8153	471,0493	-46,8692	58,6473
22	23,0620	208,9000	-312,8300	53,5320	23,0751	356,3178	-76,8755	50,0274
23	6,7652	623,7800	-67,6750	418,4000	12,2780	691,1778	-78,5109	70,3784
24	5,1544	1008,6000	-534,8900	385,9100	5,2149	1008,6241	-80,6642	74,7834
25	7,4351	440,0600	-322,3600	214,4500	32,2845	508,7410	-84,0241	72,9974
26	6,2743	255,5600	-190,0000	129,1100	29,0705	316,8414	-83,4998	63,3305
27	7,2740	309,1100	-144,8400	154,2300	10,9544	312,9659	-83,1718	58,0984
28	12,2720	338,7400	-146,5900	139,0300	20,6550	339,9768	-70,8100	63,7006
29	23,6720	189,5900	-102,5200	25,8140	34,2980	195,3366	-70,3264	16,7890
30	15,1400	101,0600	-96,3860	37,6190	24,6512	123,9164	-75,8894	24,2154
31	16,4560	123,8100	-94,9150	52,8500	25,8313	136,8188	-67,9696	46,9947
32	11,1310	151,6600	-73,4330	54,6170	13,6833	160,3474	-63,4310	48,9818
33	19,0960	119,8800	-62,9690	47,4690	19,8960	120,7030	-62,5402	50,6801
34	13,2420	96,2070	-64,0030	76,1080	14,0092	106,8888	-60,0858	68,6725
35	18,8750	376,9400	-50,9310	209,0300	18,9441	430,0939	-49,8751	71,1610
36	21,5240	427,8500	-164,5300	66,2020	24,0010	433,4367	-63,1588	54,2954
37	24,8420	267,7300	-108,2400	182,7500	25,1984	282,1565	-50,9058	56,6094
38	23,3910	565,9000	-326,4200	221,1800	29,4094	566,3646	-68,2082	60,1566
39	17,4190	371,3600	-217,6500	201,5300	35,3950	414,7534	-75,6583	54,4983
40	13,8910	398,0200	-256,4900	47,4670	31,8076	402,1238	-77,8641	22,7302
41	8,7584	311,7100	-206,2200	96,9070	11,4568	315,4959	-77,9311	54,3117
42	8,2051	269,6100	-272,1700	129,4900	13,7375	322,1720	-73,0224	69,2275
43	8,9785	199,6400	-168,2200	46,4480	9,1296	204,0976	-79,9046	49,4547
44	10,0250	198,2000	-100,4000	64,3250	16,4423	207,9815	-70,0801	70,8337
45	17,7670	296,0600	-118,6400	136,5000	21,6234	310,3376	-67,9232	72,1206
46	17,6350	180,8000	-152,0000	74,5890	32,6145	196,4896	-76,9030	26,0944
47	9,6035	118,0500	-132,3000	8,5944	35,6194	156,3621	-79,4621	8,0182
48	6,7455	74,8140	-71,1560	22,2660	8,8237	96,0514	-81,7880	46,9441
49	6,4201	155,1600	-161,2100	138,9500	15,3549	185,3991	-81,4291	61,1980
50	3,9507	235,3600	-124,0300	68,4630	25,4645	257,2047	-83,2997	25,9759

Tabela 10-11 - Parâmetros dos Lugares Geométricos das admitâncias – Terminal Rio
(pu)
Harmônicos Agrupados

h	Gmax	Gmin	Bmax	Bmin	Ymax	Ymin	θmax(°)	θmin(°)
2	34,2560	135,3100	-145,6600	-11,5030	75,3699	161,1101	-73,1447	-7,5912
3	17,0960	135,3100	-145,6600	44,4980	22,4293	161,1101	-73,1447	39,0414
4	17,0960	405,3800	-145,6600	298,2400	22,4293	451,9834	-73,1447	69,7602
5	17,0960	405,3800	-178,9800	298,2400	22,4293	451,9834	-75,6226	69,7602
6	20,5820	405,3800	-223,0400	298,2400	31,8891	451,9834	-77,3736	69,7602
7	11,1740	379,6000	-223,0400	168,8100	24,4993	390,9771	-82,3648	56,3213
8	11,1740	379,6000	-223,0400	168,8100	24,4993	390,9771	-82,3648	56,3213
9	11,1740	267,7800	-220,0200	76,7460	15,1280	282,6904	-82,3648	60,4713
10	11,1740	693,9800	-451,9000	184,6800	15,1280	828,1436	-82,3648	67,2453
11	11,5930	693,9800	-451,9000	184,6800	13,6183	828,1436	-75,6383	67,2453
12	11,5930	693,9800	-451,9000	184,6800	11,6610	828,1436	-75,6383	76,4865
13	11,6170	693,9800	-451,9000	212,1600	11,6610	828,1436	-75,6383	76,4865
14	11,6170	693,9800	-451,9000	212,1600	11,6610	828,1436	-71,5416	76,4865
15	11,6170	440,8100	-179,4100	212,1600	11,6610	447,5042	-71,5416	76,4865
16	11,6170	440,8100	-179,4100	212,1600	11,6610	447,5042	-73,4733	76,4865
17	9,4764	440,8100	-179,4100	212,1600	15,2037	447,5042	-73,8572	67,2304
18	9,4764	628,3600	-156,5700	373,6300	15,2037	686,9726	-73,8572	67,2304
19	9,4764	628,3600	-220,0800	373,6300	15,2037	686,9726	-73,8572	67,2304
20	9,4764	628,3600	-312,8300	373,6300	15,2037	686,9726	-76,8755	67,2304
21	6,7652	628,3600	-312,8300	418,4000	12,2780	691,1778	-78,5109	70,3784
22	5,1544	1008,6000	-534,8900	418,4000	5,2149	1008,6241	-80,6642	74,7834
23	5,1544	1008,6000	-534,8900	418,4000	5,2149	1008,6241	-84,0241	74,7834
24	5,1544	1008,6000	-534,8900	418,4000	5,2149	1008,6241	-84,0241	74,7834
25	5,1544	1008,6000	-534,8900	418,4000	5,2149	1008,6241	-84,0241	74,7834
26	5,1544	1008,6000	-534,8900	385,9100	5,2149	1008,6241	-84,0241	74,7834
27	6,2743	440,0600	-322,3600	214,4500	10,9544	508,7410	-84,0241	72,9974
28	6,2743	338,7400	-190,0000	154,2300	10,9544	339,9768	-83,4998	63,7006
29	7,2740	338,7400	-146,5900	154,2300	10,9544	339,9768	-83,1718	63,7006
30	11,1310	338,7400	-146,5900	139,0300	13,6833	339,9768	-75,8894	63,7006
31	11,1310	189,5900	-102,5200	54,6170	13,6833	195,3366	-75,8894	50,6801
32	11,1310	151,6600	-96,3860	76,1080	13,6833	160,3474	-75,8894	68,6725
33	11,1310	376,9400	-94,9150	209,0300	13,6833	430,0939	-67,9696	71,1610
34	11,1310	427,8500	-164,5300	209,0300	13,6833	433,4367	-63,4310	71,1610
35	13,2420	427,8500	-164,5300	209,0300	14,0092	433,4367	-63,1588	71,1610
36	13,2420	565,9000	-326,4200	221,1800	14,0092	566,3646	-68,2082	71,1610
37	17,4190	565,9000	-326,4200	221,1800	18,9441	566,3646	-75,6583	71,1610
38	13,8910	565,9000	-326,4200	221,1800	24,0010	566,3646	-77,8641	60,1566
39	8,7584	565,9000	-326,4200	221,1800	11,4568	566,3646	-77,9311	60,1566
40	8,2051	565,9000	-326,4200	221,1800	11,4568	566,3646	-77,9311	69,2275
41	8,2051	398,0200	-272,1700	201,5300	9,1296	414,7534	-79,9046	69,2275
42	8,2051	398,0200	-272,1700	129,4900	9,1296	402,1238	-79,9046	70,8337
43	8,2051	311,7100	-272,1700	136,5000	9,1296	322,1720	-79,9046	72,1206
44	8,2051	296,0600	-272,1700	136,5000	9,1296	322,1720	-79,9046	72,1206
45	8,9785	296,0600	-168,2200	136,5000	9,1296	310,3376	-79,9046	72,1206
46	6,7455	296,0600	-152,0000	136,5000	8,8237	310,3376	-81,7880	72,1206
47	6,4201	296,0600	-161,2100	138,9500	8,8237	310,3376	-81,7880	72,1206
48	3,9507	235,3600	-161,2100	138,9500	8,8237	257,2047	-83,2997	61,1980
49	3,9507	235,3600	-161,2100	138,9500	8,8237	257,2047	-83,2997	61,1980
50	3,9507	235,3600	-161,2100	138,9500	8,8237	257,2047	-83,2997	61,1980

10.3 Principais Constatações

O tipo de representação dos filtros do primeiro bipolo da UHE Belo Monte, na SE Estreito como capacitor equivalente, filtro detalhado ou circuito aberto não influenciou significativamente no valor da impedância harmônica vista pela barra da SE Terminal Rio.

Recomenda-se que o Anexo Técnico da ANEEL contenha requisitos e condições específicas para a avaliação do desempenho conjunto dos filtros do primeiro bipolo e do segundo bipolo.

11 ELEMENTOS PARA ESPECIFICAÇÃO BÁSICA

O bipolo CCAT ± 800 kV Xingu - Terminal Rio, objeto deste Relatório R2, é o segundo bipolo de uma solução integrada composta por dois bipolos em 800 kV CC para expansão da interligação Norte/Nordeste – Sudeste/Centro-Oeste. Os requisitos técnicos dos dois bipolos são basicamente comuns. O primeiro bipolo, Xingu – Estreito foi licitado pela Aneel em 2013.

Nos estudos realizados para definição dessa solução integrada, apresentados nos relatórios R1 [1] [2] e nos estudos de detalhamento posteriores, apresentados no Relatório R2 do primeiro bipolo [5], foi indicado um conjunto de recomendações com o objetivo de subsidiar a elaboração da especificação básica do sistema estudado. Essas recomendações com pequenos ajustes foram incorporadas ao Anexo Técnico do leilão do primeiro bipolo.

Considerando, portanto, que o segundo bipolo, objeto deste relatório, é parte integrante do sistema de transmissão em CCAT 800 kV mencionado, as recomendações apresentadas anteriormente, com os ajustes realizados na elaboração do Anexo Técnico do leilão da Aneel, devem ser mantidas para o segundo bipolo. Com esse entendimento, foram avaliadas neste estudo as recomendações anteriores, ajustando-se o item relativo ao requisito de High Mvar, mantendo-se o teor dos demais itens, como detalhado a seguir.

11.1 Características nominais básicas

Os estudos do Relatório R1 indicaram a implantação do elo de corrente contínua em ± 800 kV, entre as subestações de Xingu 500 kV e Terminal Rio 500 kV, com as seguintes características nominais básicas indicadas na Tabela 11-1, reproduzida do capítulo 6 deste relatório.

Como detalhado no Relatório R1 [1][2], o dimensionamento da potência CC da conversora Terminal Rio, operando como inversora, foi estimada com base na linha de transmissão em 800 kV CC com comprimento de 2.439 km e resistência à temperatura de 20 °C. Quanto à tensão CC nessa inversora, foi estimada com base nesse comprimento de linha e temperatura de 50 °C. Na transmissão reversa a potência CC da conversora Terminal Rio, operando como retificadora foi estabelecida em 3.270 MW.

Tabela 11-1 – Características nominais básicas

Sentido da transmissão	Retificadora	Inversora
Xingu – Terminal Rio (transmissão direta)	<u>Xingu</u>	<u>Terminal Rio</u>
Potência CC (MW)	4.000	3.850
Tensão CC (kV)	800	~760
Corrente (kA)	2,5	2,5
Terminal Rio – Xingu (transmissão reversa)	<u>Terminal Rio</u>	<u>Xingu</u>
Potência CC (MW)	3.270	3.151
Tensão CC (kV)	800	~767
Corrente (kA)	2,04	2,04

11.2 Configuração das conversoras

Conforme estabelecido no Relatório R1 [2], deverá ser deixado a cargo do empreendedor junto com o fabricante, a escolha da configuração da conversora tendo em vista a capacidade e a tecnologia de cada um na fabricação e as restrições de transporte até cada subestação.

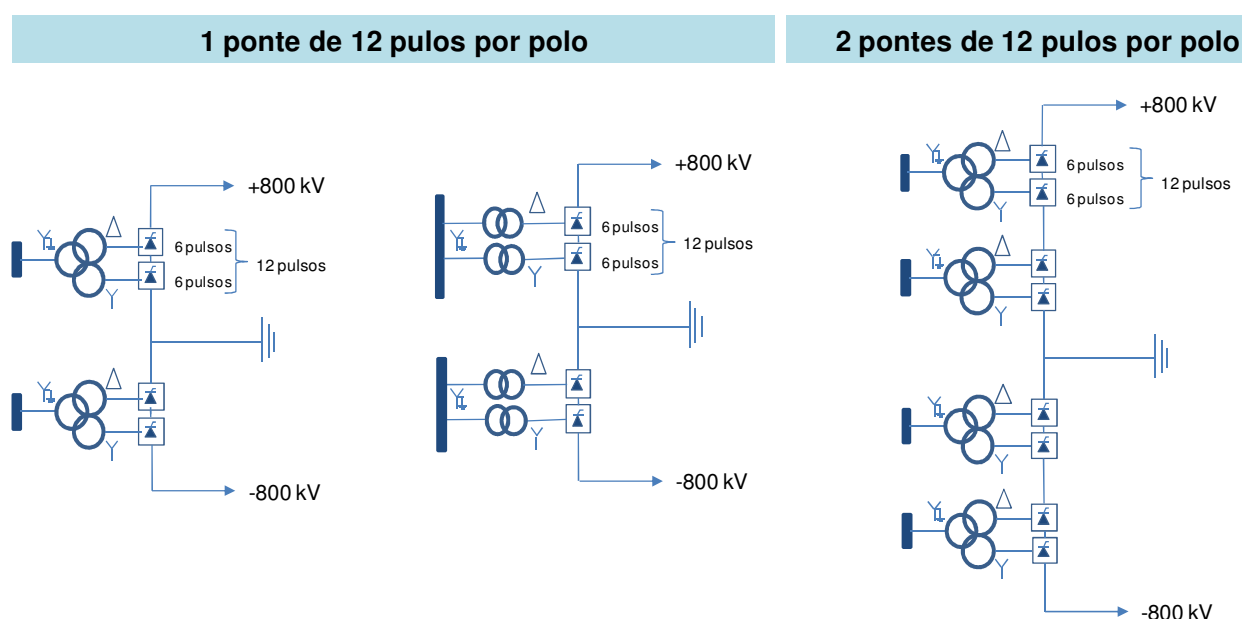


Figura 11-1 – Possibilidade de arranjo das pontes conversoras

O arranjo de 12 pulsos tem número superior de componentes e peças de reposição. Os requisitos de sobrecarga temporária por pólo pode ser reduzido e o salão de válvula maiores de layout para acomodar o conversor os transformadores.

De fato a solução com duas pontes série tem custo mais elevado que a solução com uma ponte, considerando apenas equipamentos. Quando se considera as instalações a diferença aumenta. Entretanto, a razão para que seja deixado em aberto a definição do número de pontes em série por polo é permitir a otimização do projeto por cada proponente.

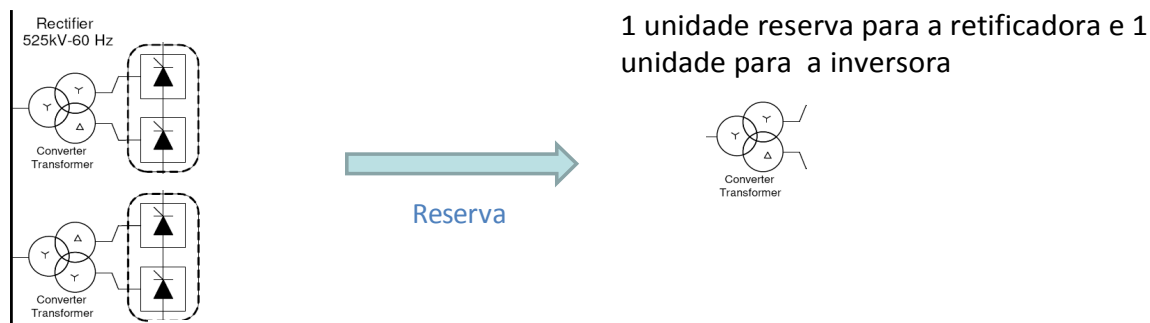
Desta forma, a escolha deve se basear em critérios de confiabilidade, disponibilidade e manutenção, além da disponibilidade de construir e receber equipamentos de grandes dimensões que serão avaliados pela transmissora.

11.3 Transformadores conversores

11.3.1 Possibilidades de configuração

Da mesma forma, a utilização de transformadores de 2 ou 3 enrolamentos não é relevante do ponto de vista de planejamento. Ressalta-se, no entanto, que se faz necessário recomendar um mínimo de 1 transformador reserva de cada tipo conforme ilustrado na Figura 11.3.

Configuração das conversoras considerando trafos de 3 enrolamentos



Configuração das conversoras considerando trafos de 2 enrolamentos

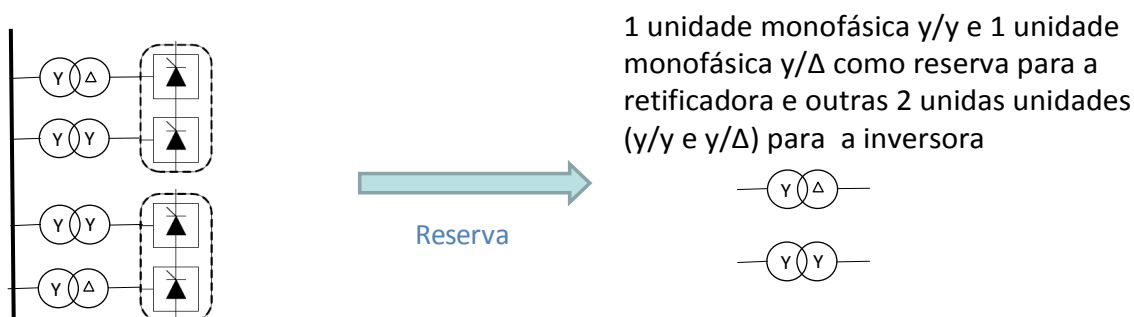


Figura 11-2 – Possibilidades de configuração dos transformadores das conversoras

11.3.2 Parâmetros elétricos dos transformadores conversores

Não deve ser estabelecido valores para parâmetros elétricos dos transformadores conversores, tais como reatância dos enrolamentos e a curva de magnetização. Esses parâmetros são decorrente do projeto das conversoras.

11.4 Eletrodos e linhas dos eletrodos

Cada bipolo deverá ser provido de um eletrodo com uma linha de transmissão (linha do eletrodo) conectando as instalações da conversora ao eletrodo. Os eletrodos da retificadora e da inversora deverão ser capazes de operar tanto no modo anódico como catódico.

11.4.1 Chaveamento entre linhas dos eletrodos de duas conversoras

As linhas dos eletrodos do Terminal Xingu devem ser providas de sistema de chaveamento que permita, em casos de indisponibilidade da linha ou do eletrodo de um bipolo, a operação alternativa de compartilhar a linha e eletrodo do outro bipolo quando o 2º bipolo estiver em operação. Ou seja, com a saída da linha ou do eletrodo de um dos bipolos, haverá a alternativa de operação compartilhada com a linha e/ou eletrodo do bipolo remanescente. A linha de transmissão de cada eletrodo deverá ser independente da linha de transmissão do outro eletrodo, inclusive não devendo haver compartilhamento de estruturas de suporte para as duas linhas.

Ressalta-se que o eletrodo deve ser dimensionado para todas as condições de operação considerando somente um bipolo e quando o eletrodo estiver compartilhado deverão ser tomadas as devidas medidas operativas de modo a evitar superação das instalações com vistas a não requisitar um sobre dimensionamento para o eletrodo.

11.4.2 Distância entre eletrodo e conversora

Em razão de interferências diversas as instalações do eletrodo devem ser localizadas a uma distância mínima de cerca de 15 km da conversora. A localização do eletrodo será função de condicionantes locais, dentre os quais as características do solo e outras instalações existentes.

11.4.3 Parâmetros elétricos da linha do eletrodo e do eletrodo

Para limitar as perdas em operação com retorno pela terra, a resistência de aterramento do eletrodo de terra deve ser igual ou inferior a $0,35 \Omega$.

11.4.4 Potenciais de passo e toque

Os potenciais de passo e toque deverão ser limitados a valores compatíveis com os Procedimentos de Rede do ONS, que indicam:

".... os potenciais de passo, de toque e transferidos deverão ser determinados e limitados em forma semelhante àquela do projeto de um sistema de aterramento CA, devendo ser considerada uma corrente de 5,0 mA-CC como limite tolerável por pessoas" (submódulo 2.6, item 4.15.2).

11.4.5 Isolamento

O isolamento elétrico deve ser dimensionado para suportar as condições de operação, manobras e descargas atmosféricas da região onde serão instalados, respeitando o previsto nos procedimentos de rede dentre os quais, mas não se limitando a esse:

"As linhas de eletrodo com seus isoladores, centelhadores e aterramentos devem ser dimensionadas de maneira que ocorra sempre extinção de arcos iniciados por descargas atmosféricas."(submódulo 2.6, item 4.15.3)

11.4.6 Capacidade operativa

Em condições de operação monopolar, com retorno pela terra, cada sistema de eletrodo deve ser capaz de operar com valores de corrente desde uma corrente mínima correspondente a desequilíbrios na conversora até a corrente nominal da linha CC, sem restrições.

Em condições de sobrecarga nas conversoras, como indicado no R1 [2], cada sistema de eletrodo deve ser capaz de operar adequadamente para atender a essas condições.

11.5 Tensão nominal da retificadora na transmissão reversa

A tensão nominal CC em qualquer das conversoras, em Xingu e em T. Rio, operando como retificadora deverá ser igual a 800 kV, quer a transmissão ocorra no sentido Norte-Sul quer a transmissão ocorra no sentido Sul-Norte.

Esta recomendação se baseia no fato de que a tensão nominal CC em T. Rio operando como retificadora tecnicamente poderia ser estabelecida numa faixa desde 800 kV até 760 kV, valor correspondente à queda de tensão na linha CC quando transmitindo no sentido Norte-Sul.

Entretanto, quando se compara os custos adicionais estimados ao considerar o requisito da tensão nominal em 800 kV na conversora T. Rio(operando como retificadora) são atrativos em relação ao aumento das perdas elétricas na transmissão ao considerar a tensão nominal menor [2]. Assim, em favor de menores perdas de energia para o sistema é recomendado se estabelecer 800 kV como tensão nominal para as duas conversoras quando estiverem operando com retificadora.

Sendo assim, as válvulas e transformadores dos conversores de ambos os terminais terão o mesmo valor de tensão no secundário do transformador da conversora, trazendo também benefícios de concepção e fabricação dos transformadores e válvulas.

11.6 Requisitos para os reatores de alisamento

O projeto do reator de alisamento, inclusive a repartição entre componentes instalados na alta tensão e na baixa tensão deve ser deixado a cargo do fornecedor da conversora. Esse equipamento é parte integrante da conversora e da solução de cada fornecedor.

11.7 Perdas máximas nas conversoras

As perdas máximas por conversora devem ser estabelecidas no máximo iguais a 0,75% da potência nominal da conversora. Este limite foi considerado nas conversoras do projeto dos elos CCAT $\pm$ 600 kV do Madeira.

11.8 Facilidades de locais de água refrigeração

Diferente dos projetos CCAT mais antigos que necessitavam de recursos de água para refrigeração das conversoras nos locais de instalação desses equipamentos, os projetos atuais são providos de sistemas de refrigeração fechados, com consumo inexpressivo de água. Portanto, não é requisito para implantação da conversora recursos de água local.

11.9 Requisitos para concepção dos filtros CA

Os projetos dos filtros CA, considerando a avaliação do desempenho e definição de suas capacidades nominais, deverão ter como base os valores de impedâncias (ou admitâncias) harmônicas da Rede apresentados nas tabelas: Tabela 10-3, Tabela 10-4, Tabela 10-5, Tabela 10-6, Tabela 10-8, Tabela 10-9, Tabela 10-10, Tabela 10-11.

11.10 Requisitos de *High Mvar*

A operação do elo CCAT no modo High Mvar produz elevado grau de estresse nos transformadores conversores devido aos altos níveis de distorção e dv/dt presentes nas tensões CC.

O grau de severidade associado a este modo de operação e o histórico de falhas do elo CCAT de Itaipu indicam que em projetos atuais e futuros de elos CCAT, devem ser tomados cuidados especiais para que sejam atendidas as necessidades sistêmicas, mas evitando expor os transformadores conversores a estresses além daqueles contemplados em projeto. Desta forma, deve-se levar em conta que este tipo de operação pode trazer consequência para vida útil dos equipamentos envolvidos.

Para consumir mais potência reativa, os ângulos de disparo (nas estações onde é necessário o aumento do consumo reativa) devem aumentar acima dos valores usuais. Uma das consequências deste aumento é uma redução da tensão contínua e um aumento em corrente contínua caso se desejar manter os mesmos níveis de potência, como no consumo normal Mvar. Neste modo de operação há um aumento das perdas na conversora e também na linha por operar com tensão mais baixa não devendo ser utilizada de forma frequente.

Além do exposto acima, do ponto de vista sistêmico e mesmo econômico, caso se identifique, necessidade de compensação reativa adicional no sistema CA, além daquela necessária ao bom funcionamento do elo CCAT e ao atendimento aos intercâmbios de reativos entre os sistemas CA e CC identificados pelos relatórios de planejamento que dão suporte ao empreendimento, essa compensação adicional deve ser objeto de um reforço pontual, desvinculado do empreendimento CCAT.

A operação em tensão reduzida (70% a 95%), que faz parte do conjunto de modos operativos a serem especificados, já implica em operação com ângulos de disparo mais elevados. Qualquer elevação acima destes valores não será exigida das conversoras. A Transmissora deve informar os padrões de consumo de reativos para a faixa de tensão em operação reduzida.

Portanto, o presente relatório não propõe a adoção de um modo operativo específico, denominado usualmente como *High Mvar*.

11.11 Requisitos de Operação

11.11.1 Operação em tensão reduzida

Operação em tensão reduzida é efetiva na redução do risco de ocorrência de *flash-overs* na linha CC durante condições climáticas desfavoráveis, níveis elevados de poluição ou mesmo na operação com o isolamento danificado da linha CC. É uma característica comum na maioria dos projetos CCAT que têm um conversor de 12 pulsos por polo.

Nos projetos atuais de CCAT em 800 kV, a operação em tensões reduzidas até 0,7 p.u. tem sido praticada apesar de requerer uma faixa maior de *taps* do transformador conversor além do que considerado neste estudo.

Esta operação com limite até 0,7 foi considerada nas conversoras do projeto CCAT 600 kV do Madeira sendo também recomendada para este projeto.

11.11.2 Operação com potência reduzida

O fluxo mínimo nos polos é consequência dos condicionantes de transmissão do sistema estudado. Requisitos de 10% não representam problemas tecnológicos para os fabricantes de conversoras convencionais nem custos adicionais [16]. Desta forma, deverá ser previsto o elo CC poder operar com potência mínima de até 10% da potência nominal.

11.11.3 Modos de operação

Os polos do elo CCAT deverão ser providos de chaves que permitam alterações de configuração na operação, com chaveamentos do lado de corrente contínua. A Tabela 11-2 apresenta um resumo das diferentes opções de operação previstas para o elo CCAT e a Figura 11-3 apresenta o modo de operação normal, cada polo na própria linha. A Figura 11-4 ilustra o modo de operação monopolar com retorno via terra e a

Figura 11-5 o modo de operação com retorno metálico.

Tabela 11-2 – Resumo das configurações para operação do elo CCAT

Configuração	Exemplo
Normal	Cada polo na própria linha
Monopolar com retorno via terra	P1 ou P2 fora de operação
Monopolar com retorno metálico	Neutro de P1 na linha L2

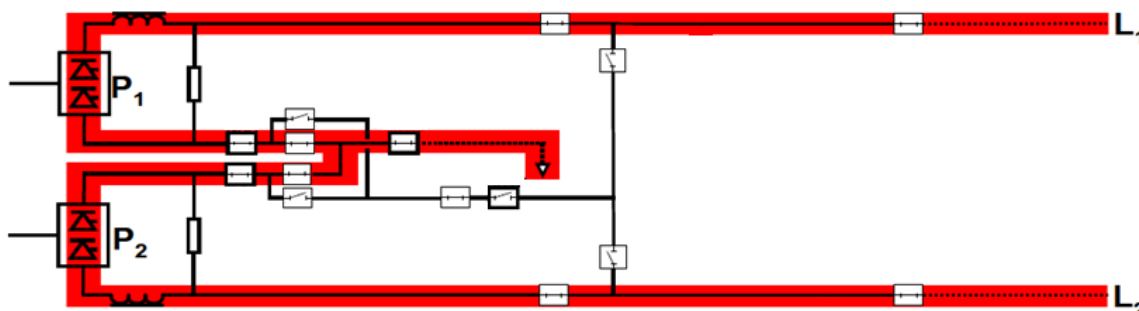


Figura 11-3 Modo de operação normal do elo CCAT

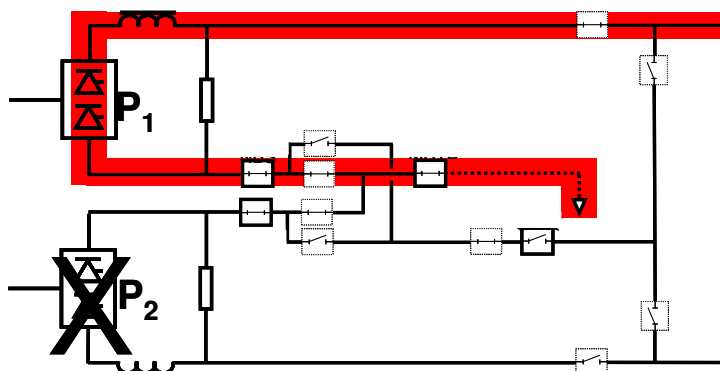


Figura 11-4 Modo de operação monopolar com retorno via terra do elo CCAT

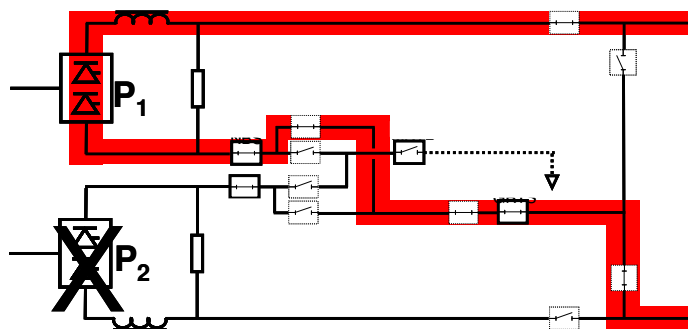


Figura 11-5 Modo de operação monopolar com retorno metálico do elo CCAT

12 LT 500 KV TERMINAL RIO – NOVA IGUAÇU, C1 E C2

12.1 Introdução

Os estudos de planejamento que indicaram a conexão do segundo bipolo em ± 800 kV CCAT na nova SE Terminal Rio 500 kV [2] conceberam a integração desta subestação com a SE Nova Iguaçu 500 kV, como reproduzido na Figura 12-1, através de 2 linhas de transmissão paralelas, circuito simples, em 500 kV, com feixes expandidos de 4 condutores CAA 954 MCM, "Rail", com comprimento inicialmente (Relatório R1) estimado de 20 km cada.

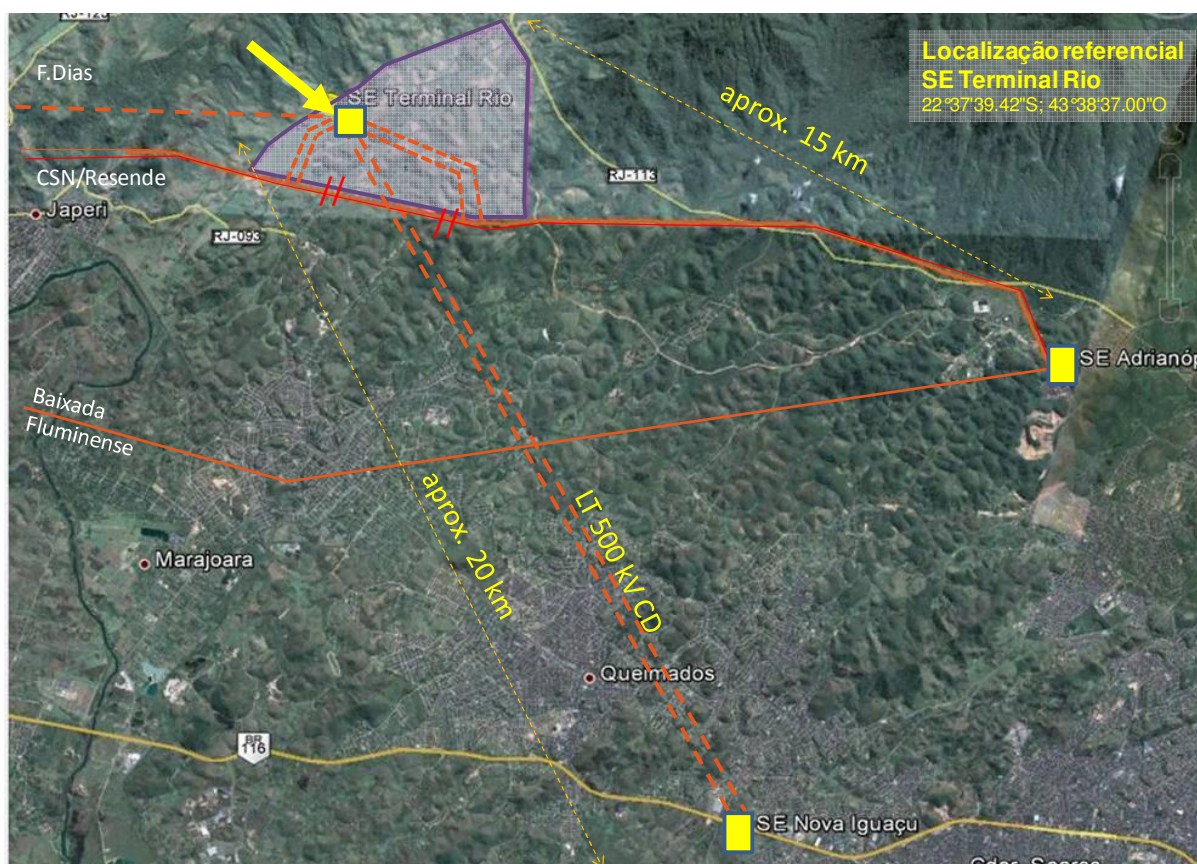


Figura 12-1 Área sugerida no Relatório R1 para instalação da SE Terminal Rio (Figura 79, Relatório R1, rev2 [2]) –alterado pelo Relatório R3

Além de se integrar com a SE Nova Iguaçu 500 kV, a SE Terminal Rio integra-se ao SIN através de 4 linhas em 500 kV, por seccionamento da LT 500 kV Adrianópolis – Cachoeira Paulista C1 e C2 (ver Figura 12-2) e através da LT 500 kV Terminal Rio – Fernão Dias 500 kV, como ilustrado no diagrama esquemático da Figura 12-2

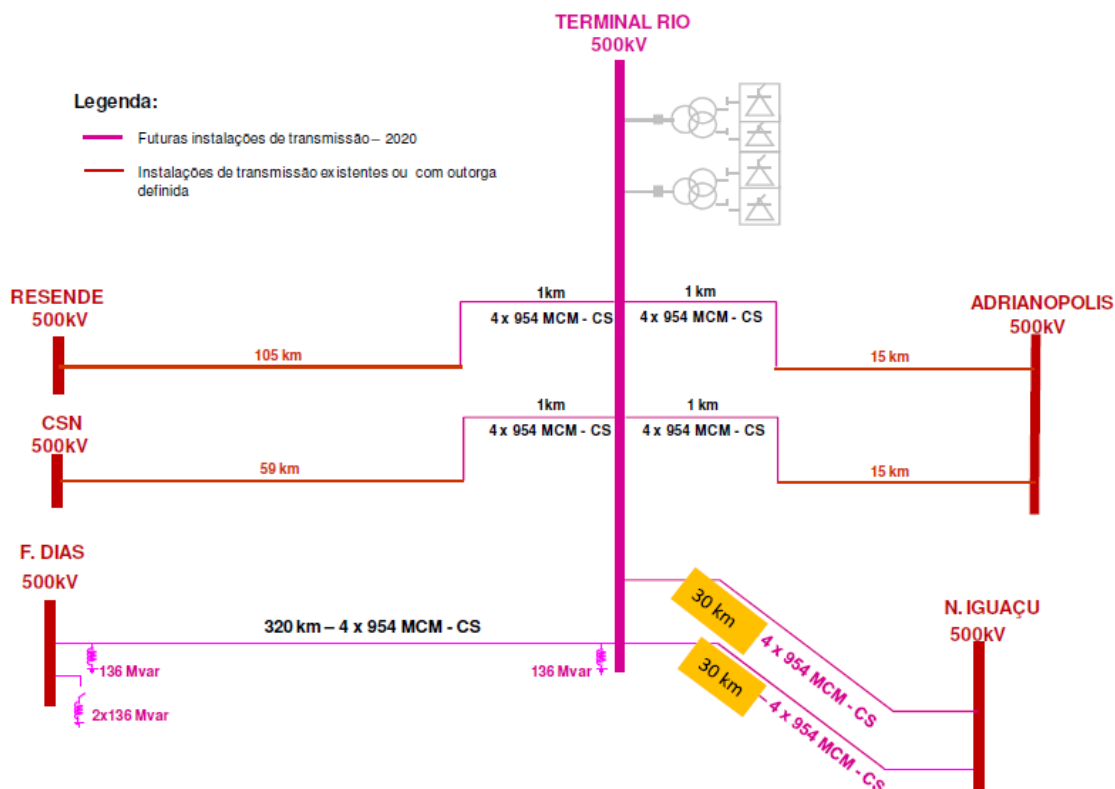


Figura 12-2 Inserção da SE Terminal Rio no SIN [2]

Posteriormente, as análises do Relatório R3 para o bipolo em ± 800 kV Xingu – Terminal Rio, descartaram a opção de localização da SE Terminal Rio, indicada preliminarmente no Relatório R1, consideraram outras opções de localização e, finalmente indicaram a localização em Paracambi (RJ), como ilustrado na Figura 12-3. Com essa nova localização a LT 500 kV Terminal Rio – Nova Iguaçu, C1 e C2, passou a ter 30 km de comprimento por circuito.



Figura 12-3 Inserção da SE Terminal Rio no SIN, em Paracambi (Relatório R3)

Os estudos previstos para Relatório R2 da LT 500 kV Terminal Rio – Nova Iguaçu, C1 e C2 são objeto deste relatório. Vale ressaltar, contudo, que em decorrência das particularidades dessa linha extremamente curta, algumas das análises usualmente realizadas para linhas de transmissão, como indicado nas diretrizes elaboradas pela EPE [15], puderam ser simplificadas, como justificado no decorrer deste trabalho.

12.2 Definição do condutor

Os estudos do Relatório R1 indicaram para a LT 500 kV Terminal Rio – Nova Iguaçu, C1 e C2 uma solução constituída por 4 condutores tipo CAA, 954 MCM "Rail", com feixe expandido de 1,2 m, com SIL da ordem de 1200 MW, concepção já testada em outras linhas da região Sudeste.

Esta mesma concepção é utilizada na LT 500 kV Adrianópolis – Cachoeira Paulista, C1 e C2, que tem previsão de ser seccionada para integração da SE Terminal Rio ao SIN, assim como na LT 500 kV Terminal Rio – Fernão Dias.

Considerando ainda, que cada circuito da LT 500 kV – Terminal Rio, C1 e C2, terá comprimento de apenas cerca de 30 km, eventuais ganhos econômicos na alteração da bitola dos seus condutores não representa resultados substanciais para o custo total do empreendimento.

Desta forma justifica-se a manutenção dessa linha com características similares às demais linhas que integram o Terminal Rio ao SIN, como indicação do Relatório R1, dispensando-se avaliações do tipo condutor ótimo.

12.3 Capacidade de transmissão

Considerando que os dois circuitos em análise integram a subestações Terminal Rio à subestação Nova Iguaçu, e com a saída de um dos circuitos o remanescente transmitirá a potência máxima entre essas subestações e, ainda, considerando as incertezas para um horizonte além do estudado, justifica-se uma folga adicional na capacidade de transmissão dessas linhas de transmissão. Como as linhas são extremamente curtas, sendo necessário, poderão operar com carregamento próximo ao que resulta no limite térmico dos cabos condutores. Por esses motivos cada um dos circuitos da LT 500 kV Terminal Rio – Nova Iguaçu deverá ter as seguintes capacidades:

- Capacidade de longa duração: 4000 A
- Capacidade de curta duração (com o fator previsto na resolução 191 da Aneel): 4760 A

12.4 Estudos de transitórios eletromagnéticos

A linha de transmissão objeto desta análise é extremamente curta, com aproximadamente 30 km de comprimento, justificando-se suprimir algumas das simulações de transitórios de manobras usualmente realizadas no escopo do Relatório R2.

As manobras de energização para uma linha de transmissão com este comprimento, características e classe de tensão, sabidamente não resultam em sobretensão em níveis que se aproximem das tensões de atuação dos pára-raios de óxido de zinco, equipamentos empregados para limitar as sobretensões impostas nos terminais das linhas de transmissão. Sendo assim, justifica-se suprimir esta simulação do estudo.

Com relação à rejeição de carga, por saída súbita e simultânea dos dois circuitos paralelos, esta condição foi simulada, através do programa PSCAD, para a condição de máximo carregamento da linha correspondente à transmissão do bipolo ± 800 kV CC Xingu – Terminal Rio, cenário 2L (transmissão Norte-Sul). Nesse cenário (2L), foi registrado o fluxo de 918,4 MW por circuito, sentido Nova Iguaçu, enquanto para o cenário 7P, mesmo sentido do fluxo, foi registrado 334,3 MW por circuito.

Os resultados da simulação com curto monofásico na linha, comprovam a baixa severidade do fenômeno para esta linha extremamente curta, com a máxima sobretensão na extremidade aberta igual a 1,63 pu, como ilustrado na Figura 12-4, e 1,27 pu no terminal remanescente de Nova Iguaçu 500 kV, como ilustrado na Figura 12-5. Rejeição sem curto não resultaram em sobretensões. Esses casos foram simulados com a mesma representação detalhada da rede CA e do bipolo CC utilizada nas simulações de desempenho do bipolo em ± 800 kV CC apresentada neste relatório.

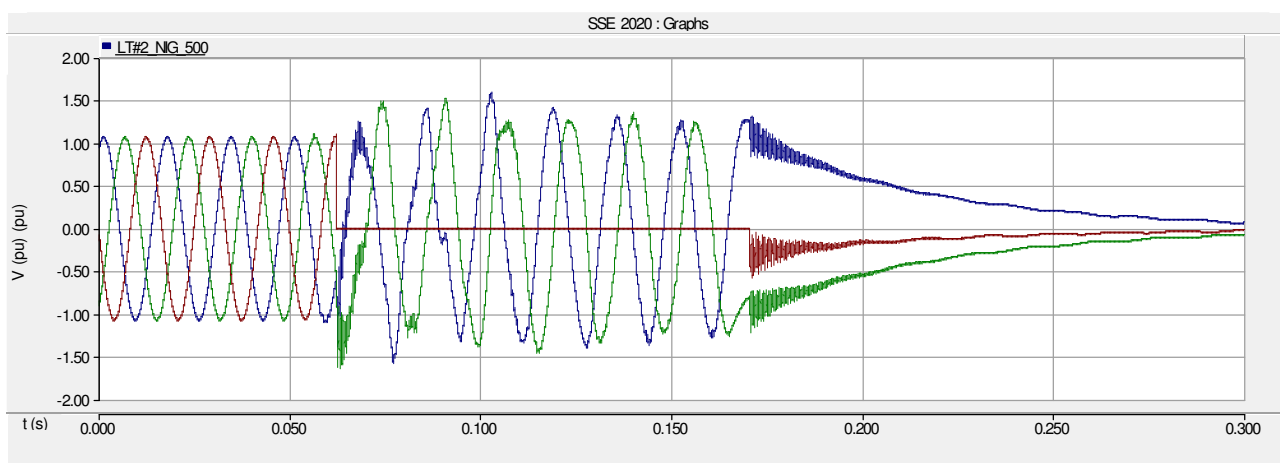


Figura 12-4 Rejeição dupla com falta monofásica – LT T Rio- Nova Iguaçu- tensões na linha em Nova Iguaçu

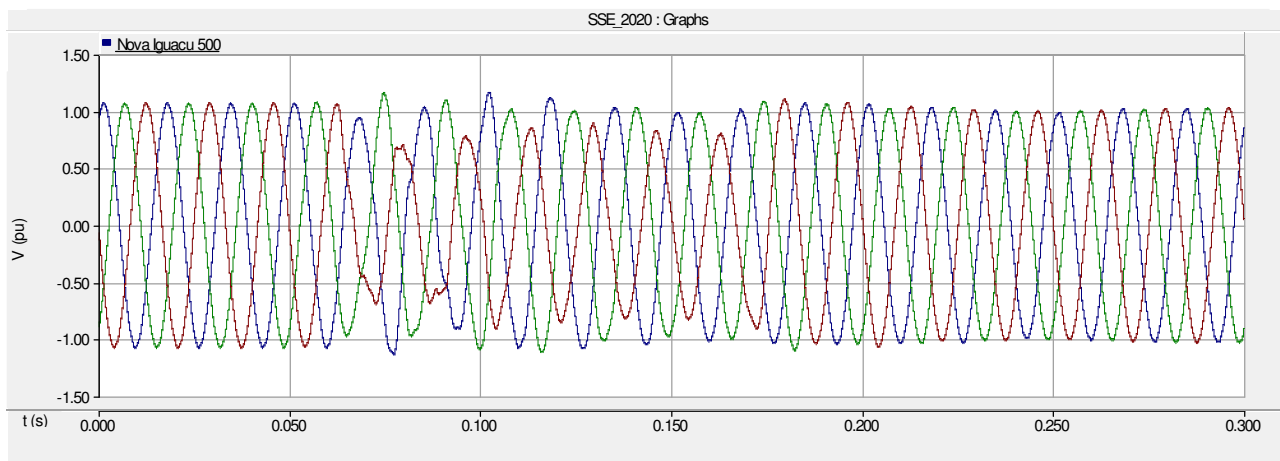


Figura 12-5 Rejeição dupla com falta monofásica – LT T Rio- Nova Iguaçu- tensões na SE Nova Iguaçu 500 kV

Com base nas análises apresentadas não existem restrições para manobras com a LT 500 kV Terminal Rio – Nova Iguaçu, C1 e C2

12.5 Principais Constatações

Com base nas análises realizadas a LT 500 kV Terminal Rio – Nova Iguaçu, C1 e C2, pode ser implantada com feixes de 4 condutores tipo CAA 954 MCM, “Rail” por fase, com os parâmetros elétricos e capacidade de transmissão aqui definidos, confirmando a solução indicada pelos estudos do Relatório R1. Assim, não existem restrições para manobras a referida linha de transmissão.

13 REFERÊNCIAS

- [1] Expansão das interligações Norte-Sudeste e Norte-Nordeste – Escoamento da usina de Belo Monte e reforços no SIN. Análise técnico-econômica de alternativas: Relatório R1, nº EPE-DEE-RE-040/2011-rev0, agosto 2011.
- [2] Expansão das Interligações Norte-Sudeste e Norte-Nordeste, Parte II, Detalhamento da Alternativa Recomendada, Relatório R1, nº EPE-DEE-RE-063/2012-r0, julho 2012.
- [3] D.S. Carvalho, D.F. Souza, P.C.V. Esmeraldo, Aspectos relevantes à concepção do sistema de transmissão CCAT 800 kV, ampliação da interligação Norte-Sul, para integração da usina de Belo Monte, XXII SNPTEE, Grupo VII, Brasília, 2013.
- [4] D.S. Carvalho, D.F. Souza, P.C.V. Esmeraldo, Planning conceptions for a ± 800 kV HVDC transmission system in Brazil; CIGRE CE-B4, Colloquium HVDC and Power Electronics to Boost Network Performance, Brasilia, Brazil, October 2013.
- [5] Expansão da Interligação entre as Regiões Norte/Nordeste e Sudeste/Centro-Oeste – Elo de corrente contínua ± 800 kV Xingu – T. Minas. Detalhamento da alternativa de referência, Relatório R2, nº EPE-DEE-RE-062/2013-rev1, agosto 2013.
- [6] J. C. Salari, J. I. Silva Filho, F. C. Dart , 2013, “Estudo de Alternativas para Linhas de Transmissão em ± 800 kV CC”, Relatório Técnico CEPEL/DLE no 18384.
- [7] J. C. Salari, J. I. Silva Filho, F. C. Dart, 2006, “O Sistema computacional ELEKTRA - Integração de Modelos Matemáticos para o Dimensionamento Otimizado de Linhas de Transmissão com Feixes Convencionais e Não Convencionais”, X SEPOPE, Florianópolis, Brasil, maio.
- [8] Peixoto, C. A., Mello, J. C. P., Brasil, D. O. C., et al., 1984, “Critérios de Limitação dos Efeitos Eletrostáticos e Eletromagnéticos Causados pelas Linhas de Transmissão de 750 kV CA e ± 600 kV CC”. In: Anais do VII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE), Brasília, Brazil.
- [9] CIGRE JWG-B2/B4.17, 2009, Brochure 388 – Impacts of HVDC Lines on the Economics of HVDC Projects.
- [10] L. A. M. C. Domingues, J. I. Silva Filho, A. M Palantinos Neto, F. C. Dart, V. H. Andrade, 2010, “Performance of HVDC Transmission Lines in Brazil Analysis of Field Data and Calculation Methods”, Cigré, Paris.
- [11] ANEEL, 2008, “Estabelecimento da Metodologia de Definição do Banco de Preços de Referência ANEEL a ser Utilizado nos Processos de Autorização, Licitação e Revisão Tarifária das Concessionárias de Transmissão de Energia Elétrica”, Nota Técnica no. 099/2008–SRT/ANEEL.
- [12] D. F. MENZIES, “Modelo de representação de elos de corrente contínua em 800 kV com representação dos filtros”. Notas Técnicas elaboradas para a EPE, 2012.
- [13] L. Jiayu, L. Zehong, J. Young, et al., 2009, “The Progress on the Electromagnetic Environment Study of UHVDC Transmission Line”, Second International IEC/Cigré Symposium on Standards for Ultra High Voltage Transmission, Nova Deli, India, janeiro.

- [14] Hingorani, N.G.; Transient overvoltage on a bipolar HVDC overhead line caused by DC line faults. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-89, no 4, April 1970.
- [15] Impacts of HVDC lines on the economics of HVDC projects; Cigre Brochure no 388, joint Working Group B2/B4/C1.17, August 2009.
- [16] Sistema de transmissão em CCAT ± 800 kV, ampliação da Interligação Norte/Nordeste – Sudeste/Centro Oeste, para integração da usina de Belo Monte – informações complementares – Nota Técnica, no EPE-DEE-RE-087/2012-rev0, de outubro/2012.
- [17] Diretrizes para elaboração dos relatórios técnicos referentes às novas instalações da Rede Básica, EPE-DEE-RE-0001/2005-r1, maio de 2005.
- [18] De Carli, M. P, et al. Sistema de Transmissão do Rio Madeira: Modelagem da Resistência Harmônica dos Componentes do Sistema Elétrico de Potência para o Projeto de Filtros. Florianópolis: SNPTEE, 2011.
- [19] CIGRÉ JWG 12/14.10, “Consideration of impedance and tolerances for HVDC converter transformer”, Electra 167, August 1996
- [20] Robert, A.; Deflandre, T. Guide for Assessing the Network Impedance. ÉLECTRA, Paris, n. 167. 1996.
- [21] G. Andersson et al., “Influence of Hydro Units’ Generator-to-Turbine Inertia Ratio on Damping of Subsynchronous Oscillations”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No.8, August 1984.
- [22] Cattán, F.J.; interação torcional subsíncrona envolvendo conversores CCAT e hidrogeradores: análise teórica e simulações com o programa PSCAD. Brasília: SNPTEE, 2013.
- [23] Resolução Normativa nº 616, Aneel, 01 de julho de 2004.
- [24] J. C. Salari, F. C. Dart, C. K. C. Arruda, L. A. M. C. Domingues, C. R. N. Barbosa, 2014, “Estudo de Alternativas para Linhas de Transmissão em ± 800 kV CC Considerando os Novos Limites dos Campos Elétrico e Magnético Estabelecidos na Resolução da Aneel nº 616/2014”, Relatório Técnico CEPEL/DLE, em emissão.
- [25] P. S. Maruvada, 2012, “Electric Field and Ion Current Environment of HVDC Transmission Lines: Comparison of Calculations and Measurements”, IEEE Trans. Power Del., vol. 27, no. 1, pp. 401-410.
- [26] P. Sarma Maruvada, 2014, “Influence of Wind on the Electric Field and Ion Current Environment of HVDC Transmission Lines”, IEEE Trans. Power Del., Aceito para publicação em janeiro de 2014.
- [27] Gunnar Asplund, Dong Wu, “Advantage of HVDC transmission at 800 kV”, 14th ISH as Keynote Lecture, Beijing, China, August 25-28, 2005.
- [28] Chandrakant et al; “Application of New Technology Solutions for Minimizing Land Use for Overhead Transmission Lines – Indian Experience”, Cigre, Bienal Session, paper B2-104, Paris, 2014.

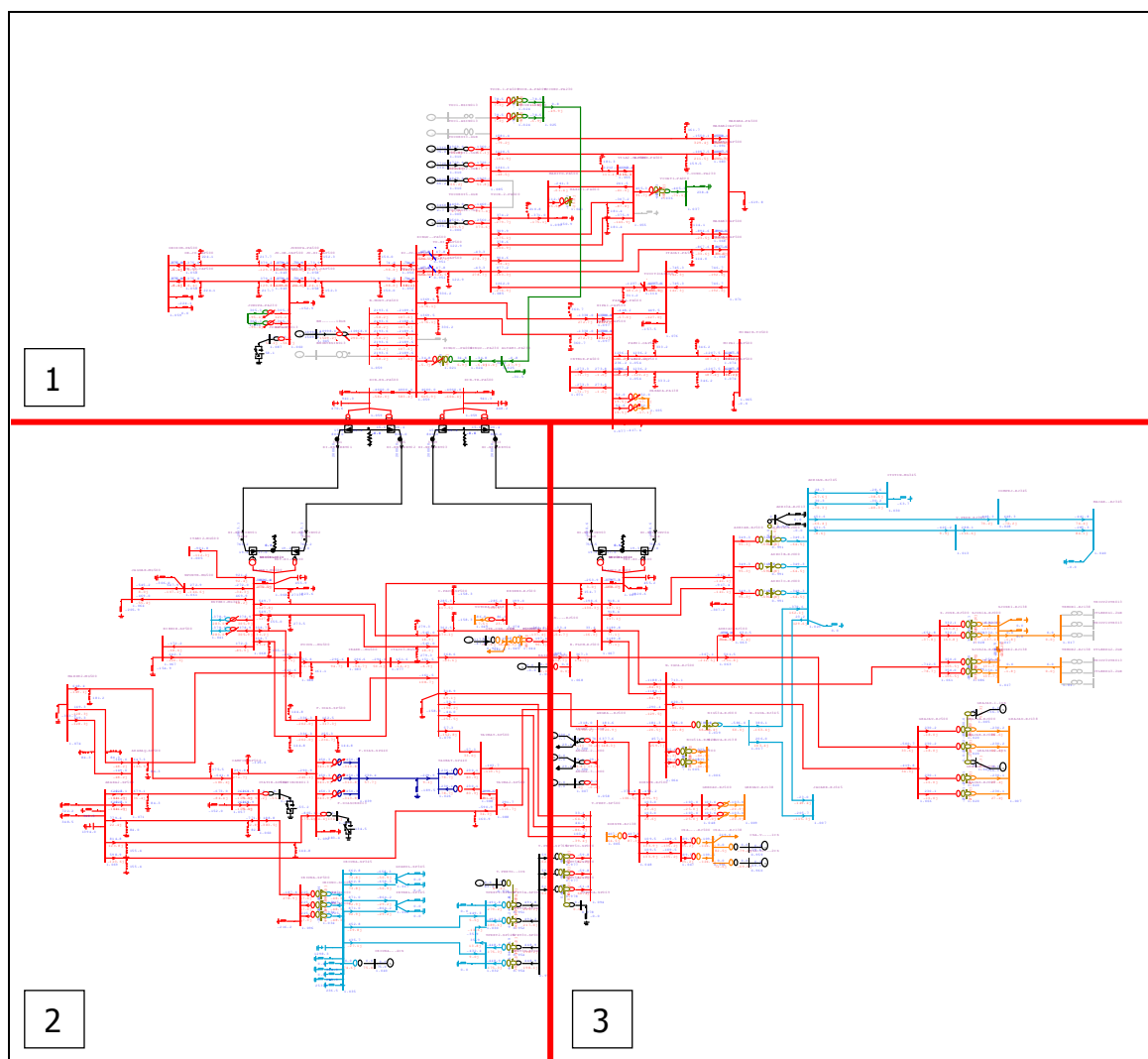
ANEXO I – EQUIVALENTES

Os ajustes na topologia do equivalente foram realizados considerando as informações obtidas no ANAREDE para sistema completo. As representações das contribuições de curto-circuito nas barras tiveram como referência o sistema completo representado no ANAFAS. Após definição da rede retida, os níveis de curto-circuito do sistema equivalente foram comparados com os da rede completa, de forma a validar a rede o sistema equivalente.

I.1 CENÁRIO 2L

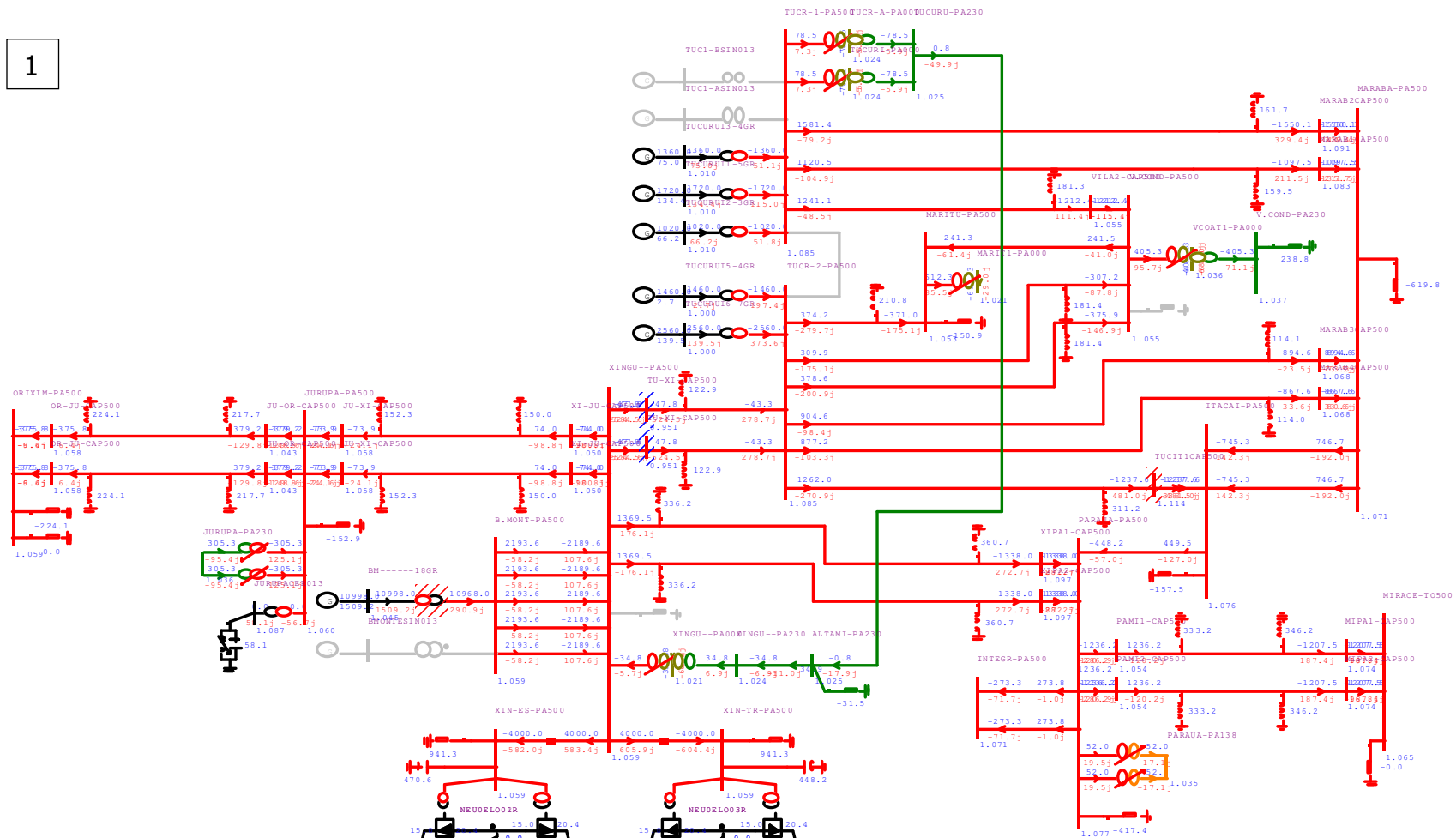
I.1.1 Rede completa (SIN)

No diagrama a seguir, extraído do ANAREDE, são apresentados os elementos da rede retida SSE-NNE, bem como os fluxos e tensões ajustados na reprodução do Cenário 2L.

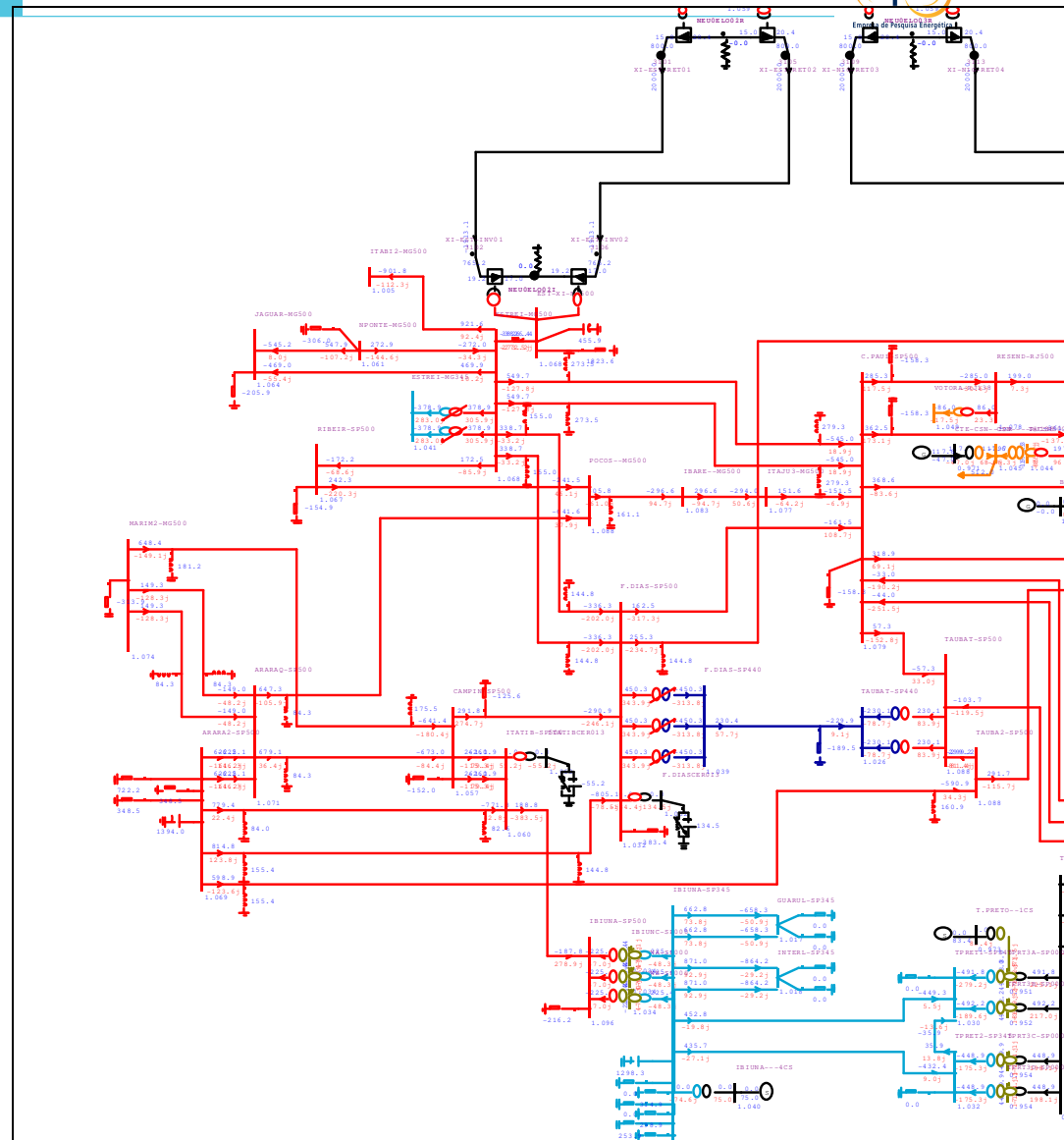


I.1.1 Topologia da rede equivalente – 2L

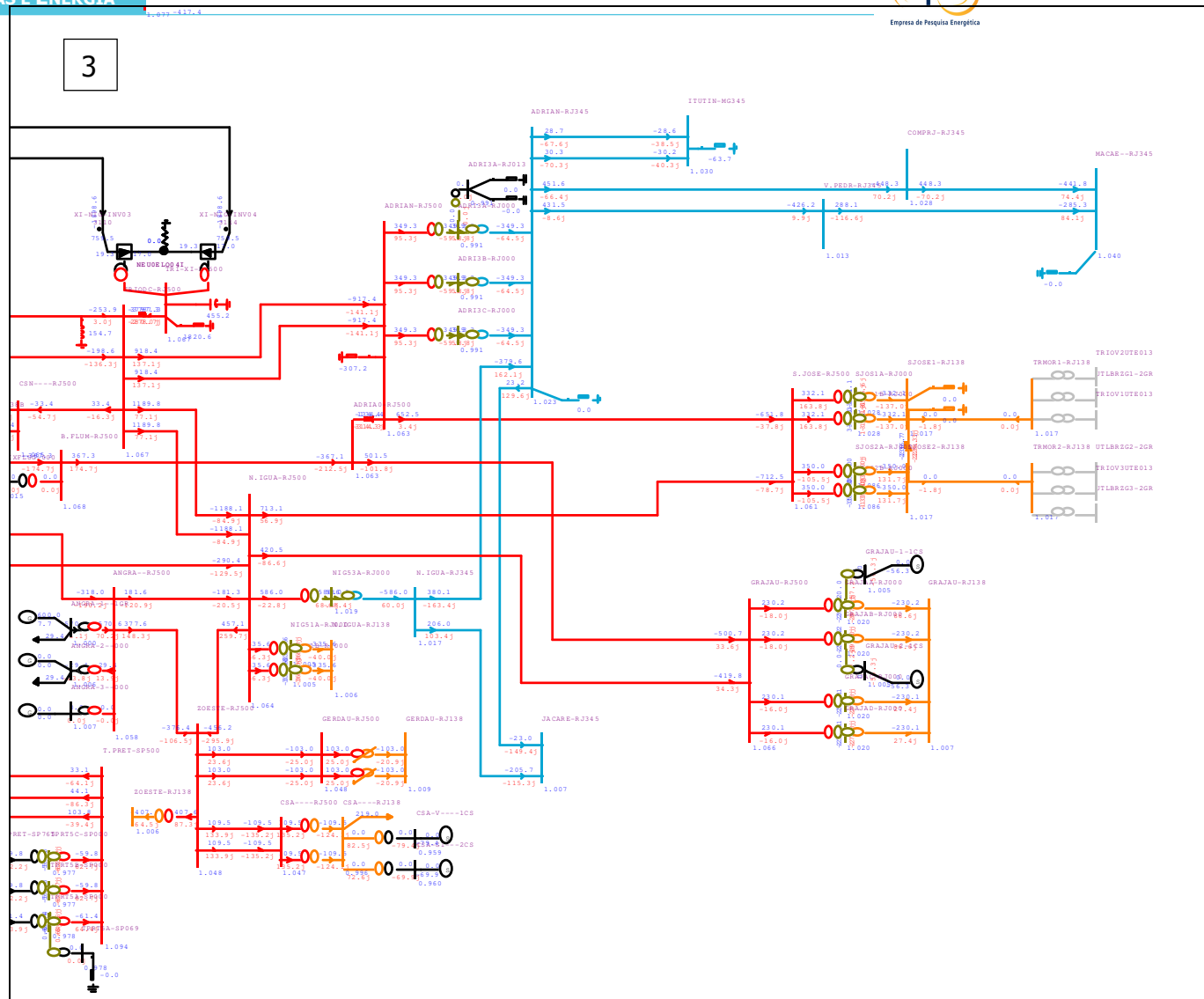
1



I.1.2 Topologia da rede equivalente NNE – 2L



I.1.3 Topologia da rede equivalente SSE1 – 2L



I.1.4 Topologia da rede equivalente SSE2 – 2L

I.1.3 Impedâncias próprias e mútuas da rede equivalente.

Nas tabelas a seguir são apresentados os valores de impedância de sequência positiva e zero obtidas para a representação da rede externa do equivalente SSE-NNE no Cenário 2L. Os valores de impedâncias percentuais estão na base de potência de 100 MVA. Ressalta-se ainda que os nomes e numeração são referentes à base de dados da EPE, utilizadas nos programas ANAREDE e ANAFAS.

Impedâncias Próprias					
Núm.	Nome	R1(%)	X1(%)	R0(%)	X0(%)
298	V.COND-PA230	3,00E-15	8,852	0,0368	1,793
362	ALTAMI-PA230	0,67966	16,415	0,55037	6,7315
571	MIRACE-TO500	0,06175	0,75018	0,11118	0,91763
599	MARABA-PA500	0,03114	2,0973	0,24654	2,1794
912	ITACAI-PA500	0,7631	7,4055	1,6055	11,645
1483	ITABI2-MG500	0,13008	3,0399	0,1319	0,84192
1488	JAGUAR-MG500	0,01832	3,2348	0,06508	1,0912
1512	NPONTE-MG500	0,03571	1,4308	0,10878	1,0751
2929	INTERL-SP345	0,09755	4,4594	0,08909	1,4576
3668	T.PRET-SP765	0,07624	1,4119	0,3318	2,6553
3690	IBIUNA-SP500	0,29045	2,6646	1,1483	6,4221
3717	ITATIB-SP500	0,53153	5,9243	1,1473	6,3747
3720	C.PAUL-SP500	0,45722	66,517	0,01829	3,917
3749	SJOSE1-RJ138	2,5592	23,044	7,5822	30,256
3784	MACAE--RJ345	0,94677	9,365	0,00797	0,49664
3807	ITUTIN-MG345	0,34552	6,6439	0,21496	2,3871
3816	POCOS--MG500	0,09007	25,96	0,0259	3,3481
3831	GUARUL-SP345	1,4273	17,789	0,82469	5,4247
3852	ARARAQ-SP500	0,41794	9,4781	3,0612	13,967
3946	ESTREI-MG345	0,12791	2,8084	0,12913	1,6244
4307	RIBEIR-SP500	0,5367	7,7507	0,48891	3,4839
4321	F.DIAS-SP440	0,37901	5,288	1,068	4,1219
4325	N.IGUA-RJ138	0,59702	8,1339	0,55357	3,9969
4598	MARIM2-MG500	0,03371	1,039	0,11255	1,0207
5202	ARARA2-SP500	0,0935	3,1348	0,52231	2,4632
10000	JURUPA-PA230	0,76263	10,445	3,862	16,805
10011	ORIXIM-PA500	0,48602	8,0387	0,02836	1,5849

Impedâncias de Transferência							
Núm. DE	Nome DE	Núm. PARA	Nome PARA	R1(%)	X1(%)	R0(%)	X0(%)
298	V.COND-PA230	14302	MARITU-PA230	0,27686	1,5432	3,4532	10,195
571	MIRACE-TO500	912	ITACAI-PA500	0,17266	1,3065	5,3632	14,242
571	MIRACE-TO500	1512	NPONTE-MG500	0,86874	5,8622	4741,53	3149,32
912	ITACAI-PA500	13010	INTEGR-PA500	0,65576	7,2202	5,3338	21,937
1483	ITABI2-MG500	1488	JAGUAR-MG500	0,20387	3,2037	343,68	560,52
1483	ITABI2-MG500	1512	NPONTE-MG500	0,35042	5,3497	3961,04	4082,5
1483	ITABI2-MG500	3784	MACAE--RJ345	1,3258	13,867	2173,98	2668,61
1483	ITABI2-MG500	3807	ITUTIN-MG345	0,44677	3,8647	11,467	28,206
1488	JAGUAR-MG500	3946	ESTREI-MG345	0,12874	2,372	3,6303	14,458
1488	JAGUAR-MG500	4598	MARIM2-MG500	0,75339	10,057	67,695	149,76
1512	NPONTE-MG500	4598	MARIM2-MG500	0,44992	5,9421	84,81	159,14
2929	INTERL-SP345	3670	TPRET1-SP345	0,21075	2,0158	3,3315	9,2215
2929	INTERL-SP345	3831	GUARUL-SP345	0,04121	0,65143	0,57489	1,9985
2929	INTERL-SP345	4321	F.DIAS-SP440	0,26934	3,623	5,0552	15,888
3670	TPRET1-SP345	3671	TPRET2-SP345	0,04956	0,46701	0,45898	1,5811
3670	TPRET1-SP345	3831	GUARUL-SP345	0,43108	4,076	4,8525	15,934
3670	TPRET1-SP345	5202	ARARA2-SP500	0,60328	13,824	36,04	108,89
3671	TPRET2-SP345	3831	GUARUL-SP345	0,44363	4,1739	3,4413	13,998
3671	TPRET2-SP345	5202	ARARA2-SP500	0,6914	16,31	26,395	98,953
3700	CAMPIN-SP500	3831	GUARUL-SP345	0,22038	5,2369	3,7615	14,75
3717	ITATIB-SP500	4307	RIBEIR-SP500	9,132	50,742	8227,42	16693
3729	ADRIAN-RJ345	3783	V.PEDR-RJ345	0,91895	9,1552	8,2943	42,465
3750	SJOSE2-RJ138	4325	N.IGUA-RJ138	0,8491	5,0084	3,719	19,661
3760	GRAJAU-RJ138	3769	JACARE-RJ345	0,18606	2,5197	1,2476	7,0443
3760	GRAJAU-RJ138	3779	ZOESTE-RJ138	0,97744	4,1331	29,756	72,167
3769	JACARE-RJ345	3779	ZOESTE-RJ138	0,21239	3,6222	2,9011	16,595
3807	ITUTIN-MG345	3946	ESTREI-MG345	1,0331	8,6285	66,088	130,79
3816	POCOS--MG500	3831	GUARUL-SP345	0,25374	6,7468	5,3565	19,262
3816	POCOS--MG500	3946	ESTREI-MG345	0,29178	7,6067	9,2091	48,473
3831	GUARUL-SP345	3946	ESTREI-MG345	2,2448	15,253	209,19	364,43
3831	GUARUL-SP345	4321	F.DIAS-SP440	0,55438	7,6173	6,7861	30,332
3831	GUARUL-SP345	5202	ARARA2-SP500	2,8679	27,812	148,41	440,38
3946	ESTREI-MG345	4598	MARIM2-MG500	2,4079	17,164	139,78	325,92
4307	RIBEIR-SP500	4321	F.DIAS-SP440	0,95943	13,899	3743,2	6364,55
4307	RIBEIR-SP500	4598	MARIM2-MG500	0,16302	2,6994	6,4361	20,49
4307	RIBEIR-SP500	5202	ARARA2-SP500	0,74282	8,9744	29,612	108,15
4321	F.DIAS-SP440	5202	ARARA2-SP500	0,33779	6,1203	133,9	357,99
4598	MARIM2-MG500	5202	ARARA2-SP500	1,0804	13,711	72,386	209,59

I.1.4 Comparação do nível de curto-circuito rede completa (SIN) x rede equivalente

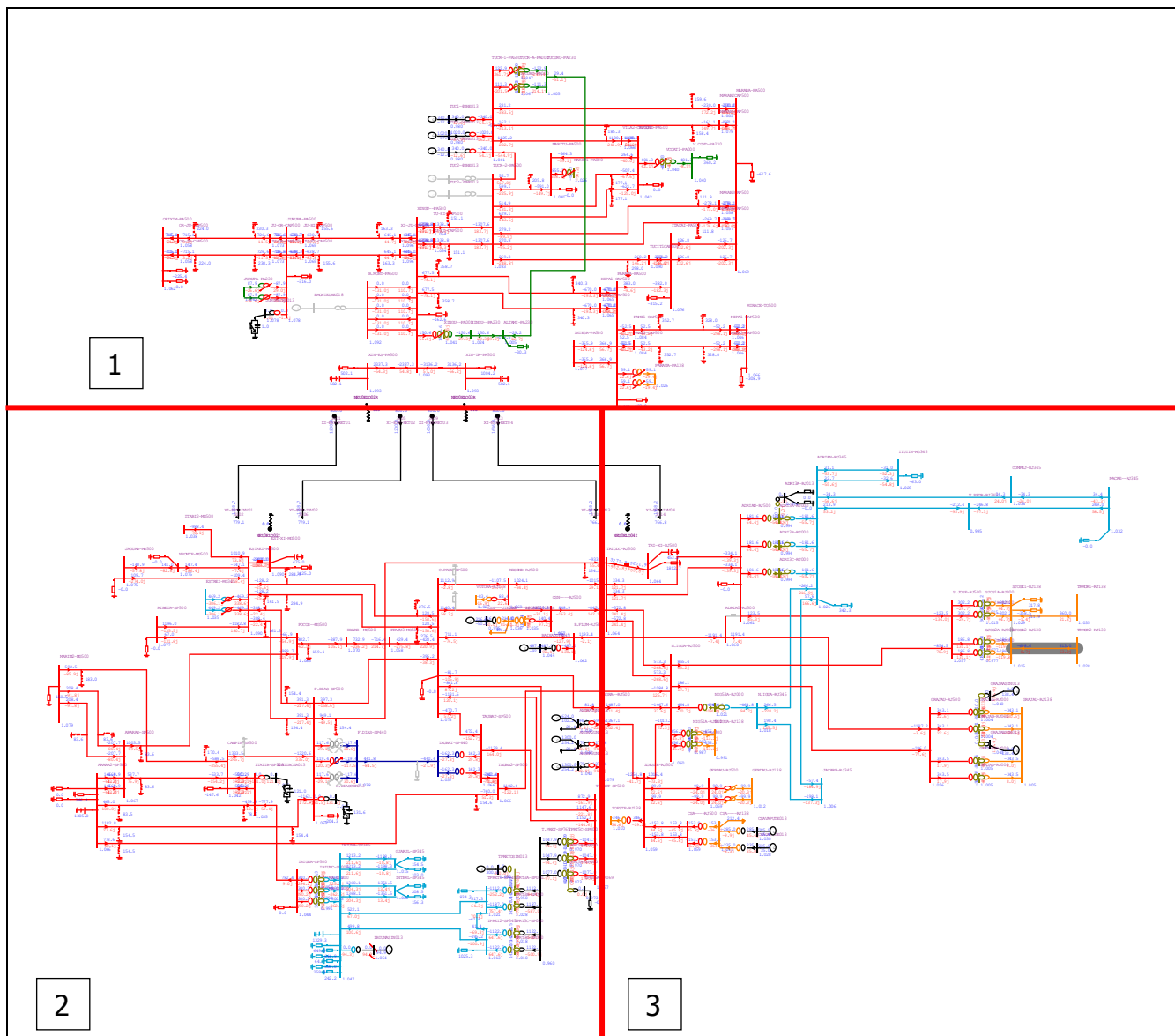
Na tabela a seguir são apresentados os valores comparativos de potência de curto-circuito trifásico e monofásico obtidos para o sistema completo e o sistema equivalente NNE-SSE no Cenário 2L. Pode-se observar o desvio inferior a 8% nas barras representativas das subestações conversoras representadas.

COMPARAÇÃO DA POTÊNCIA DE CURTO-CIRCUITO EM BARRAS DA REDE INTERNA					
Núm	Nome	Curto	MVA_Completo	MVA_Equivalente	%_Módulo
4291	TERMINAL RIO DC	monofasico	16888,8	15778	6,58
4291	TERMINAL RIO DC	trifasico	17834,2	17091	4,17
4302	ESTREITO-MG500	monofasico	17364,3	16939	2,45
4302	ESTREITO-MG500	trifasico	24137,1	23046	4,52
4943	ESTREITO DC-MG500	monofasico	17330,7	16907	2,44
4943	ESTREITO DC-MG500	trifasico	24079,1	22993	4,51
4945	XINGU DC-PA500	monofasico	42877,8	42765	0,26
4945	XINGU DC-PA500	trifasico	41988,9	41835	0,37
4946	XINGU DC-PA500	monofasico	42876,7	42764	0,26
4946	XINGU DC-PA500	trifasico	41988,9	41835	0,37
4947	TERMINAL RIO DC-RJ500	monofasico	16858	15751	6,57
4947	TERMINAL RIO DC-RJ500	trifasico	17802,5	17062	4,16
10008	XINGU--PA500	monofasico	43065,4	42951	0,26
10008	XINGU--PA500	trifasico	42165,7	42010	0,37
596	TUCURUI-2-PA500	monofasico	33804,7	33552	0,75
596	TUCURUI-2-PA500	trifasico	36506,8	36119	1,06
1488	JAGUARA-MG500	monofasico	17174,5	16338	4,87
1488	JAGUARA-MG500	trifasico	19784,4	18250	7,76
1512	NOVAPONTE-MG500	monofasico	15990,4	15548	2,76
1512	NOVAPONTE-MG500	trifasico	19038,4	18126	4,79
3691	IBIUNA-SP345	monofasico	21371,3	20214	5,42
3691	IBIUNA-SP345	trifasico	21507,6	19831	7,79
3720	CACHOEIRA PAULISTA-SP500	monofasico	18656,8	17422	6,62
3720	CACHOEIRA PAULISTA-SP500	trifasico	22287	21261	4,60
3728	ADRIANOPOLIS-RJ500	monofasico	17352,4	16122	7,09
3728	ADRIANOPOLIS-RJ500	trifasico	17095,3	16399	4,07
3782	RESENDE-RJ500	monofasico	6740	6600	2,07
3782	RESENDE-RJ500	trifasico	11024,7	10781	2,21
3805	CSN - RJ500	monofasico	7978,1	7822	1,96
3805	CSN - RJ500	trifasico	10970,9	10727	2,22
3946	ESTREITO-MG345	monofasico	15289,4	14492	5,22
3946	ESTREITO-MG345	trifasico	18212,2	16660	8,52
4307	RIBEIRAO PRETO-SP500	monofasico	9579	9062	5,40
4307	RIBEIRAO PRETO-SP500	trifasico	13908	12577	9,57
4322	FERNAO DIAS-SP500	monofasico	31811	29648	6,80
4322	FERNAO DIAS-SP500	trifasico	21432	19961	6,86
4326	NOVA IGUACU-RJ500	monofasico	18016,9	16705	7,28
4326	NOVA IGUACU-RJ500	trifasico	17792,2	17007	4,41
4942	BELO MONTE-PA500	monofasico	48590,2	48469	0,25
4942	BELO MONTE-PA500	trifasico	43013	42875	0,32
4986	PARAUPEBAS-PA500	monofasico	12367,9	11909	3,71
4986	PARAUPEBAS-PA500	trifasico	23070	22450	2,69
5202	ARARAQUARA 2-SP500	monofasico	14615,5	13876	5,06
5202	ARARAQUARA 2-SP500	trifasico	22530,3	20486	9,07
10009	JURUPARI-PA500	monofasico	12115,9	12109	0,06
10009	JURUPARI-PA500	trifasico	17536,5	17514	0,13
13502	XINGU--PA230	monofasico	1975,2	1975	0,01
13502	XINGU--PA230	trifasico	1777,3	1777	0,01

I.2 CENÁRIO 7P

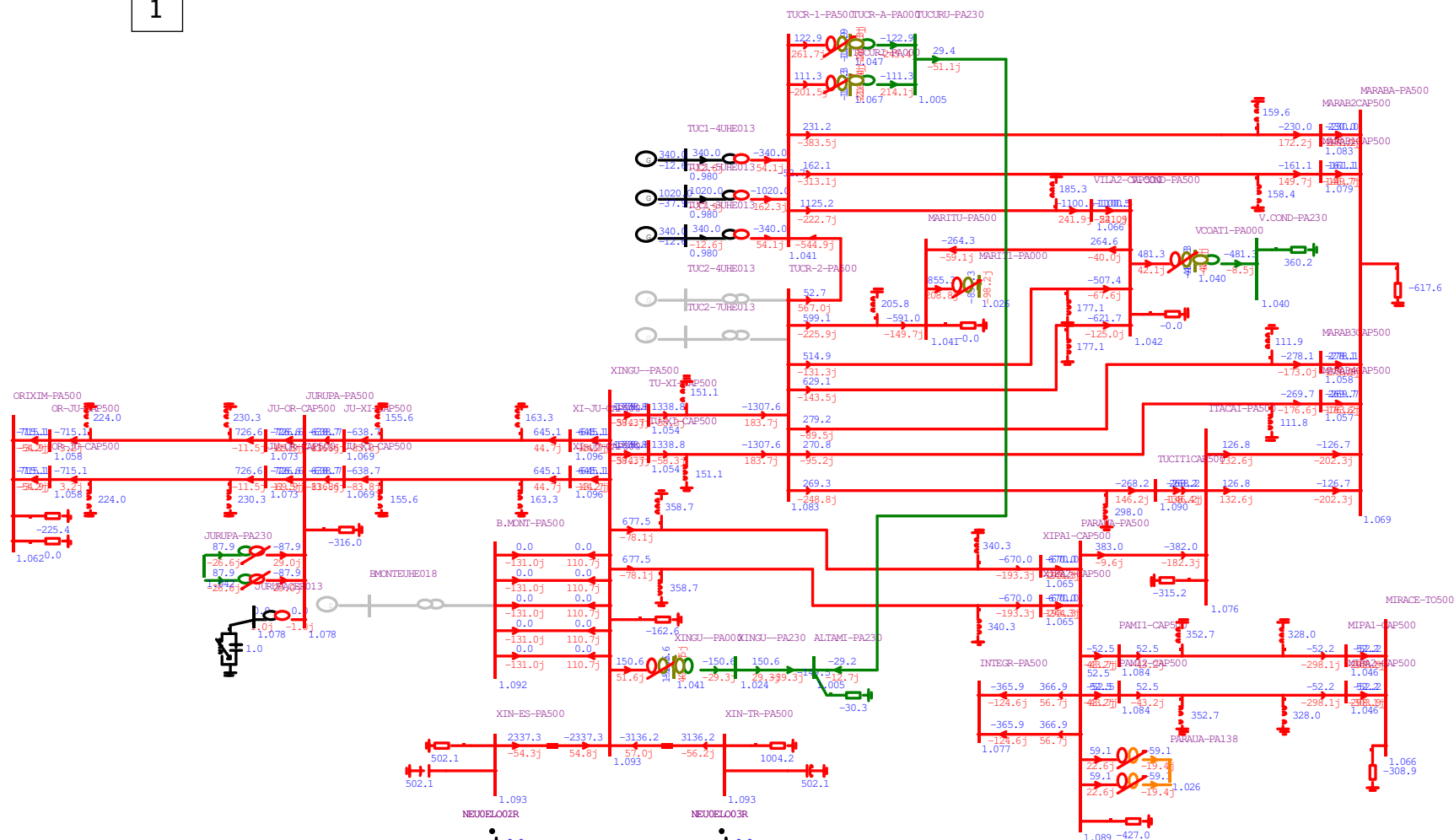
I.2.1 Rede completa (SIN)

No diagrama a seguir são apresentados os elementos da rede retida SSE-NNE, bem como os fluxos e tensões tomados como referência para o ponto de operação representativo do Cenário 7P.



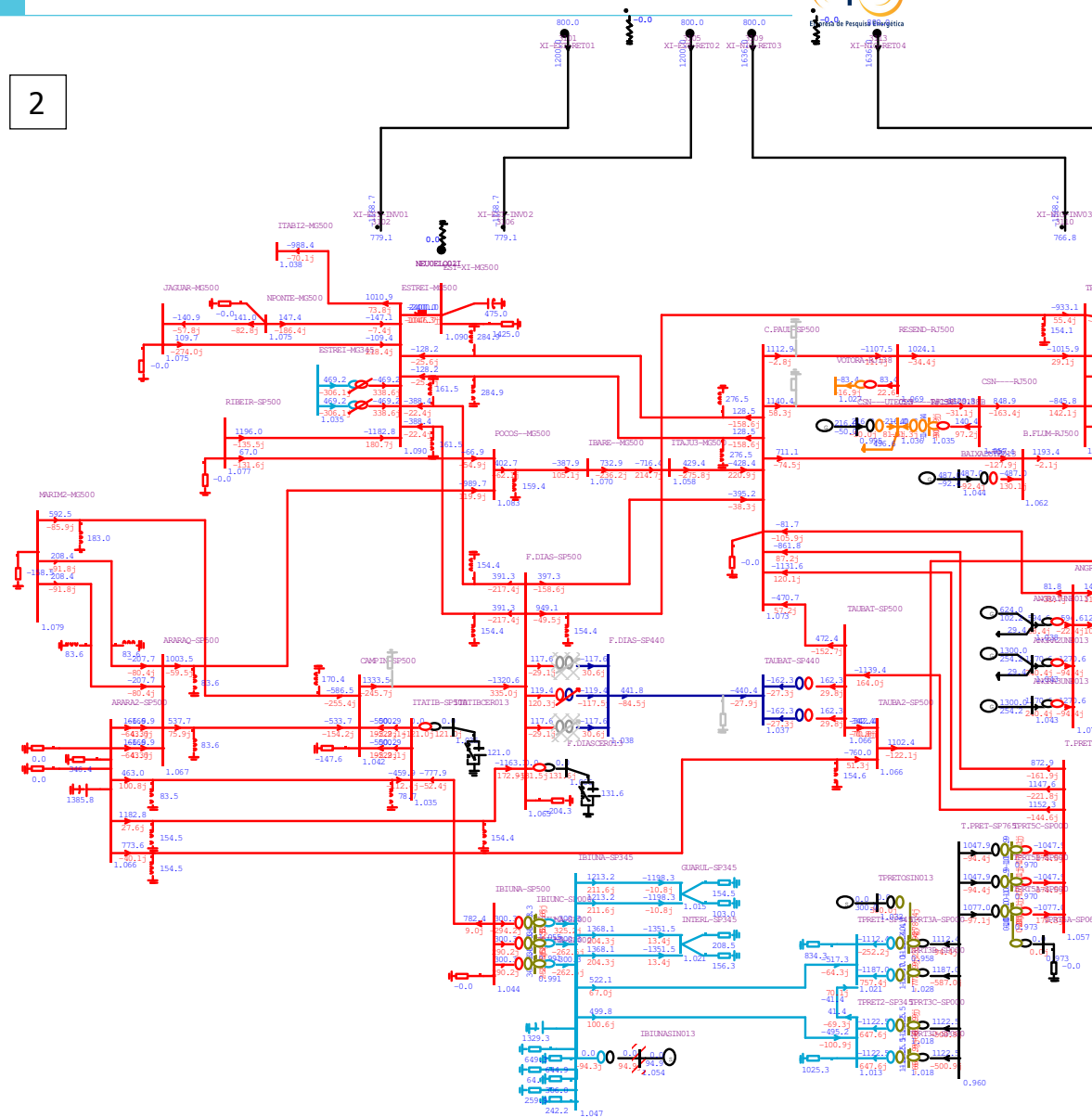
I.1.6 Topologia da rede equivalente – 7P

1



1.1.7 Topologia da rede equivalente NNE – 7P

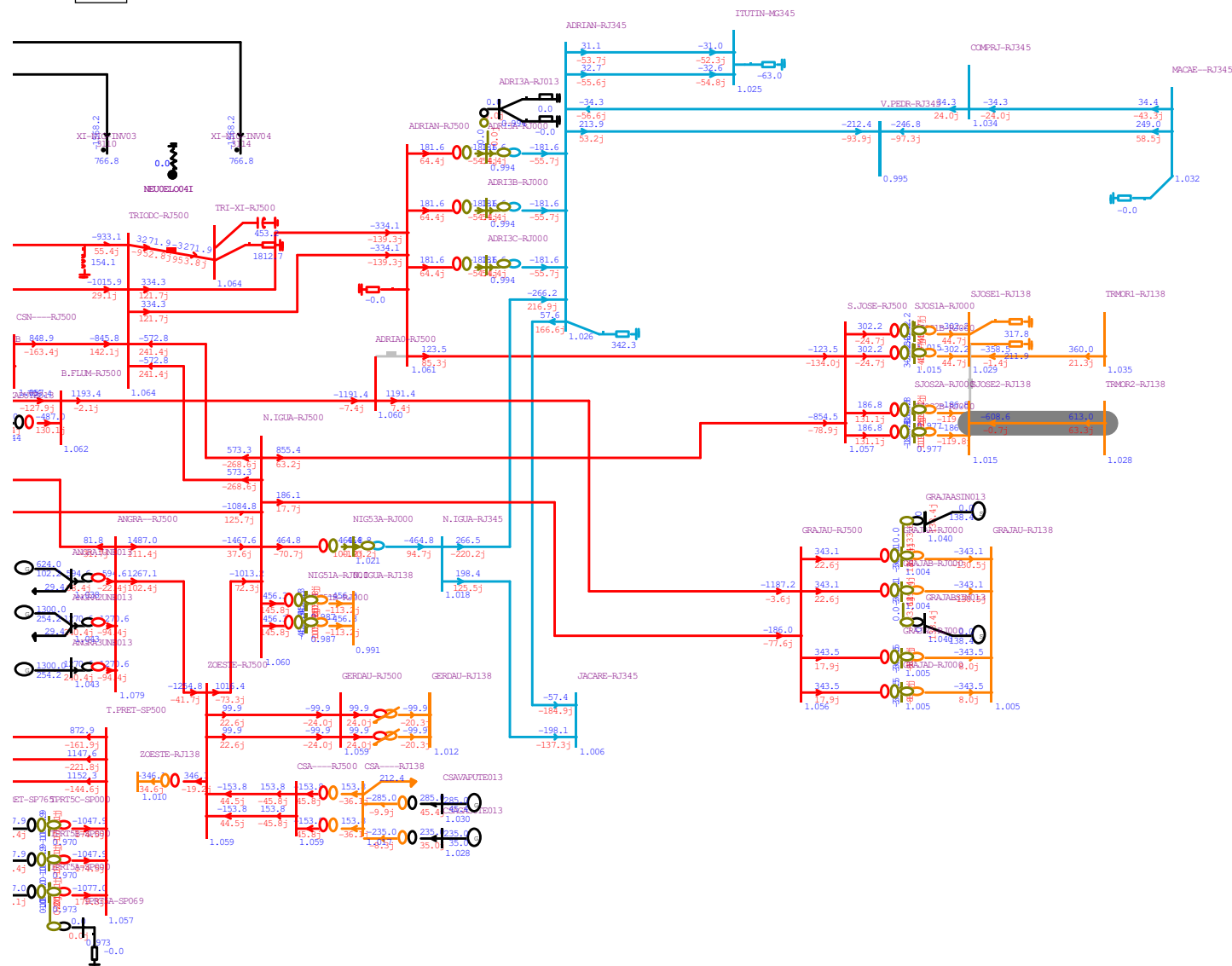
2



171

171

3



I.1.9 Topologia da rede equivalente SSE2 – 7P

EPE-DEE-RE-136/2014-rev0- Detalhamento da alternativa de referência- Relatório R2_ Expansão da interligação entre as regiões Norte/Nordeste e Sudeste/Centro Oeste. Elo de Corrente Contínua ± 800 kV Xingu –Terminal Rio.

I.2.2 Impedâncias próprias e mútuas da rede equivalente

Nas tabelas a seguir são apresentados os valores de impedância de sequência positiva e zero obtidos para a representação da rede externa do equivalente SSE-NNE no Cenário 7P, na base de 100 MVA.

Impedâncias de Próprias				
Nome	R1 [%]	X1 [%]	R0 [%]	X0 [%]
V.COND-PA230	0.0000	8.8520	0.0434	1.9480
ALTAMI-PA230	0.6745	15.8990	0.5213	6.4312
MIRACE-TO500	0.0613	0.6778	0.0951	0.8518
MARABA-PA500	0.0460	1.9237	0.1947	1.9581
ITACAI-PA500	0.7735	6.8889	1.1183	9.8329
ITABI2-MG500	0.1338	2.4161	0.1295	0.8349
JAGUAR-MG500	0.0284	2.6124	0.0729	1.1054
NPONTE-MG500	0.0350	1.1723	0.1129	1.0390
INTERL-SP345	0.0474	2.0607	0.1257	1.6286
T.PRET-SP765	0.0707	1.1548	0.3326	2.6536
IBIUNA-SP500	0.2681	2.3332	1.4676	7.2292
ITATIB-SP500	0.5103	4.8096	1.3118	6.7908
C.PAUL-SP500	0.4831	48.6490	0.0211	3.9115
ADRIAN-RJ345	17.9730	115.8200	0.0000	3.5530
SJOSE1-RJ138	2.4691	19.0780	15.1920	0.0000
ZOESTE-RJ138	0.0274	4.6278	0.8886	4.5607
V.PEDR-RJ345	13.8170	111.0200	0.0365	6.8233
MACAE--RJ345	0.0288	1.2399	0.0082	0.4984
ITUTIN-MG345	0.2968	5.0545	0.2334	2.4368
POCOS--MG500	0.1717	12.5630	0.0000	3.1305
GUARUL-SP345	1.1189	10.7890	3.6603	10.7580
ARARAQ-SP500	0.4124	7.5150	1.5541	10.0600
ESTREI-MG345	0.0700	1.5495	0.0934	1.1889
RIBEIR-SP500	0.1908	3.3377	0.5081	3.3831
F.DIAS-SP440	0.3242	3.6720	1.4314	4.7159
N.IGUA-RJ138	0.2521	3.7288	0.5655	3.8818
MARIM2-MG500	0.0225	0.7119	0.0605	0.6408
ARARA2-SP500	0.0966	2.0045	6.1901	6.0012
JURUPA-PA230	0.6495	7.4024	3.0993	13.5360
ORIXIM-PA500	0.2844	3.7838	0.0282	1.5864
IBARE--MG500	0.0000	7.6160	0.0000	2.8288

Impedâncias de Transferência					
De	Para	R1 [%]	X1 [%]	R0 [%]	X0 [%]
V.COND-PA230	MARITU-PA230	0.2768	1.5430	3.4529	10.1940
MIRACE-TO500	ITACAI-PA500	0.1728	1.3151	5.3553	14.2040
MIRACE-TO500	NPONTE-MG500	1.0390	6.7528	6388.6700	4033.8400
ITACAI-PA500	INTEGR-PA500	0.6523	7.2451	5.6906	22.7160
ITABI2-MG500	JAGUAR-MG500	0.2061	3.2612	340.3200	563.3400
ITABI2-MG500	NPONTE-MG500	0.3663	5.5982	4010.8700	4228.5200
JAGUAR-MG500	MARIM2-MG500	0.8710	11.0220	84.1110	172.5900
NPONTE-MG500	MARIM2-MG500	0.5968	7.1318	135.5900	233.7700
INTERL-SP345	TPRET1-SP345	0.2251	2.1907	3.7061	10.1080
INTERL-SP345	GUARUL-SP345	0.0412	0.6522	0.5517	1.9641
TPRET1-SP345	TPRET2-SP345	0.0503	0.4693	0.4515	1.5735
TPRET1-SP345	GUARUL-SP345	0.4323	4.0958	4.6446	15.5770
TPRET2-SP345	GUARUL-SP345	0.4447	4.1856	3.2851	13.6820
ITATIB-SP500	RIBEIR-SP500	9.9077	58.6150	7244.7900	15942.0000
ADRIAN-RJ345	V.PEDR-RJ345	0.9186	9.1623	6.8373	39.0050
SJOSE2-RJ138	N.IGUA-RJ138	0.8491	5.0084	3.7190	19.6610
GRAJAU-RJ138	ZOESTE-RJ138	1.1060	4.5270	29.2580	71.0170
ITUTIN-MG345	ESTREI-MG345	1.3139	10.0020	102.0000	189.8000
GUARUL-SP345	ESTREI-MG345	2.5609	16.8390	299.9000	499.3100
RIBEIR-SP500	MARIM2-MG500	0.1806	2.8857	7.6363	22.6020
RIBEIR-SP500	ARARA2-SP500	1.0821	12.2590	29.7550	115.6500
MARIM2-MG500	ARARA2-SP500	1.5531	19.6740	81.9610	229.3200
ITABI2-MG500	MACAE--RJ345	1.6767	18.1650	2063.7300	2575.8100
ITABI2-MG500	ITUTIN-MG345	0.4576	3.9564	11.4090	28.1080
JAGUAR-MG500	ESTREI-MG345	0.1461	2.5140	5.4297	19.3770
INTERL-SP345	F.DIAS-SP440	0.2757	3.7276	3.9352	14.0550
TPRET1-SP345	ARARA2-SP500	0.5813	15.2530	33.1390	104.5500
TPRET2-SP345	ARARA2-SP500	0.6782	17.7530	23.9620	94.4580
CAMPIN-SP500	GUARUL-SP345	0.2196	5.2578	3.6924	14.5350
GRAJAU-RJ138	JACARE-RJ345	0.1860	2.5402	1.2331	6.9764
JACARE-RJ345	ZOESTE-RJ138	0.2625	3.9726	2.8499	16.3290
POCOS--MG500	GUARUL-SP345	0.2574	6.8534	5.3240	19.2520
POCOS--MG500	ESTREI-MG345	0.3695	8.3639	14.1800	67.1290
GUARUL-SP345	F.DIAS-SP440	0.5517	7.7780	5.3173	26.9550
GUARUL-SP345	ARARA2-SP500	3.0881	32.2180	127.8700	405.7500
ESTREI-MG345	MARIM2-MG500	3.1532	21.2840	271.8900	536.1900
RIBEIR-SP500	F.DIAS-SP440	0.9705	15.8850	3377.7300	6147.9900
F.DIAS-SP440	ARARA2-SP500	0.3507	6.9044	106.7500	318.5200

I.2.3 Comparação do nível de curto-circuito rede completa(SIN) x rede equivalente

Na tabela a seguir são apresentados os valores comparativos de potência de curto-circuito trifásico e monofásico obtidos para o sistema completo e o sistema equivalente NNE-SSE no Cenário 7P. Pode-se observar o desvio inferior a 8% nas barras representativas das subestações conversoras do elo CCAT do Belo Monte.

Núm	Nome	Curto	MVA_Completo	MVA_Equivalente	%_Desvio	%_Módulo
4291	TRIODC-RJ500	monofasico	22680	22051	-2.77	2.77
4291	TRIODC-RJ500	trifasico	28855.6	27914	-3.26	3.26
4302	ESTREI-MG500	monofasico	21000.6	20645	-1.70	1.70
4302	ESTREI-MG500	trifasico	28579.7	27675	-3.17	3.17
4943	EST-XI-MG500	monofasico	20954.3	20600	-1.69	1.69
4943	EST-XI-MG500	trifasico	28498.4	27598	-3.16	3.16
4945	XIN-ES-PA500	monofasico	18234.6	18118	-0.64	0.64
4945	XIN-ES-PA500	trifasico	20756.9	20555	-0.97	0.97
4946	XIN-TR-PA500	monofasico	18234.6	18118	-0.64	0.64
4946	XIN-TR-PA500	trifasico	20756.9	20555	-0.97	0.97
4947	TRI-XI-RJ500	monofasico	22624.7	21999	-2.77	2.77
4947	TRI-XI-RJ500	trifasico	28772.7	27837	-3.25	3.25
10008	XINGU--PA500	monofasico	18269.7	18152	-0.64	0.64
10008	XINGU--PA500	trifasico	20799.9	20597	-0.98	0.98
596	TUCR-2-PA500	monofasico	18703.6	18441	-1.41	1.41
596	TUCR-2-PA500	trifasico	21972.8	21517	-2.07	2.07
1488	JAGUAR-MG500	monofasico	18170.3	17473	-3.84	3.84
1488	JAGUAR-MG500	trifasico	22129.3	20700	-6.46	6.46
1512	NPONTE-MG500	monofasico	16681.5	16305	-2.26	2.26
1512	NPONTE-MG500	trifasico	20523	19690	-4.06	4.06
3691	IBIUNA-SP345	monofasico	24117.2	22860	-5.21	5.21
3691	IBIUNA-SP345	trifasico	25757.3	23742	-7.83	7.83
3720	C.PAUL-SP500	monofasico	22589.6	21639	-4.21	4.21
3720	C.PAUL-SP500	trifasico	30872	29675	-3.88	3.88
3728	ADRIAN-RJ500	monofasico	23750.5	23049	-2.95	2.95
3728	ADRIAN-RJ500	trifasico	27890.7	26994	-3.21	3.21
3782	RESEND-RJ500	monofasico	7749.7	7662	-1.14	1.14
3782	RESEND-RJ500	trifasico	13124.6	12939	-1.42	1.42
3805	CSN----RJ500	monofasico	8694.9	8622	-0.84	0.84
3805	CSN----RJ500	trifasico	13909.2	13720	-1.36	1.36
3946	ESTREI-MG345	monofasico	18636.2	17923	-3.83	3.83
3946	ESTREI-MG345	trifasico	21782.3	20414	-6.28	6.28
4307	RIBEIR-SP500	monofasico	9968	9602	-3.67	3.67
4307	RIBEIR-SP500	trifasico	15534.9	14452	-6.97	6.97
4322	F.DIAS-SP500	monofasico	37894.9	35607	-6.04	6.04
4322	F.DIAS-SP500	trifasico	25582.9	24020	-6.11	6.11
4326	N.IGUA-RJ500	monofasico	25521	24687	-3.27	3.27
4326	N.IGUA-RJ500	trifasico	29420.9	28383	-3.53	3.53
4942	B.MONT-PA500	monofasico	18175.7	18066	-0.60	0.60
4942	B.MONT-PA500	trifasico	19923.6	19743	-0.91	0.91
4986	PARAUA-PA500	monofasico	11406.3	10899	-4.45	4.45
4986	PARAUA-PA500	trifasico	19151.7	18688	-2.42	2.42
5202	ARARA2-SP500	monofasico	14710	14100	-4.15	4.15
5202	ARARA2-SP500	trifasico	27104.9	25027	-7.67	7.67
10009	JURUPA-PA500	monofasico	10646.9	10620	-0.26	0.26
10009	JURUPA-PA500	trifasico	13712.1	13646	-0.48	0.48
13502	XINGU--PA230	monofasico	1849.6	1849	-0.04	0.04
13502	XINGU--PA230	trifasico	1629.9	1629	-0.05	0.05

ANEXO II - MODELAGEM DO SISTEMA CA

Os parâmetros elétricos dos equipamentos CA modelados no PSCAD são apresentados neste Anexo, os de impedância percentual são apresentados na base 100 MVA, com exceção aqueles devidamente explicitados.

II.1 Rede equivalente N/NE

II.1.1 Linhas de transmissão

Tabela II.1 – Parâmetros das linhas de transmissão da rede retida N/NE

LT's de 500 kV N-NE						R1 (Ω/km)	X1 (Ω/km)	C1 (uS/km)	R0 (Ω/km)	X0 (Ω/km)	C0 (uS/km)
Nº DE	De	Nº PARA	Para	NC	km						
10008	Xingu	4987	Parauapebas	1	414	0,012500	0,181500	8,785200	0,254100	0,855900	5,271100
10008	Xingu	4988	Parauapebas	1	414	0,012500	0,181500	8,785200	0,254100	0,855900	5,271100
4990	Parauapebas	4985	Miracema	1	409	0,014000	0,192000	8,651000	0,350000	1,392000	3,153000
4989	Parauapebas	4984	Miracema	1	409	0,014000	0,192000	8,651000	0,350000	1,392000	3,153000
596	Tucuruí II	4956	Itacaiúnas	1	272	0,017000	0,223000	5,144000	0,338000	1,077000	2,271000
4986	Parauapebas	912	Itacaiúnas	1	115	0,017000	0,268700	6,160000	0,392000	1,100000	3,313000
4942	Belo Monte	10008	Xingu	1	13	0,018000	0,308000	5,304000	0,229000	0,872000	3,040000
4942	Belo Monte	10008	Xingu	2	13	0,018000	0,308000	5,304000	0,229000	0,872000	3,040000
4942	Belo Monte	10008	Xingu	3	13	0,018000	0,308000	5,304000	0,229000	0,872000	3,040000
4942	Belo Monte	10008	Xingu	4	13	0,018000	0,308000	5,304000	0,229000	0,872000	3,040000
4942	Belo Monte	10008	Xingu	5	13	0,018000	0,308000	5,304000	0,229000	0,872000	3,040000
10210	Jurupari	10208	Xingu	1	244	0,019000	0,269000	6,243300	0,218700	0,952300	3,478700
10211	Jurupari	10209	Xingu	1	244	0,019000	0,269000	6,243300	0,218700	0,952300	3,478700
10206	Xingu	596	Tucuruí II	1	265	0,019000	0,269000	6,243300	0,218700	0,952300	3,478700
10207	Xingu	596	Tucuruí II	1	265	0,019000	0,269000	6,243300	0,218700	0,952300	3,478700
596	Tucuruí II	598	Vila do Conde	1	324	0,026000	0,326000	5,097000	0,431000	1,268000	3,368000
597	Tucuruí I	20000	Vila do Conde	1	328,7	0,017000	0,266000	6,086000	0,424000	1,357000	2,708000
596	Tucuruí II	598	Vila do Conde	2	324	0,017000	0,266000	6,086000	0,424000	1,357000	2,708000
597	Tucuruí I	499	Marabá	1	223,3	0,024800	0,314200	5,290000	0,301800	1,110000	3,369000
597	Tucuruí I	399	Marabá	2	223,3	0,016800	0,264300	6,158000	0,299400	1,195000	2,708000
596	Tucuruí II	197	Marabá	1	217,41	0,016800	0,265100	6,251000	0,285200	1,283000	2,708000
596	Tucuruí II	397	Marabá	2	222,2	0,016800	0,265100	6,251000	0,285200	1,283000	2,708000
599	Marabá	912	Itacaiúnas	1	39,8	0,018000	0,269000	6,223000	0,184000	0,923000	3,425000
599	Marabá	912	Itacaiúnas	2	39,8	0,018000	0,269000	6,223000	0,184000	0,923000	3,425000
10212	Jurupari	10214	Oriximiná	1	350	0,019000	0,269000	6,243300	0,218700	0,952300	3,478700
10213	Jurupari	10215	Oriximiná	1	350	0,019000	0,269000	6,243300	0,218700	0,952300	3,478700
4986	Parauapebas	13010	Integradora	1	58	0,033200	0,478000	4,779300	0,726800	2,323700	2,867600
4986	Parauapebas	13010	Integradora	2	58	0,033200	0,478000	4,779300	0,726800	2,323700	2,867600
596	Tucuruí II	14102	Marituba	1	380	0,018000	0,260000	6,435000	0,406000	1,280000	3,491000
14102	Marituba	598	Vila do Conde	1	59	0,018000	0,260000	6,435000	0,406000	1,280000	3,491000

LT's de 230 kV N-NE						R1 (Ω/km)	X1 (Ω/km)	C1 (uS/km)	R0 (Ω/km)	X0 (Ω/km)	C0 (uS/km)
Nº DE	De	Nº PARA	Para	NC	km						
297	Altamira	362	Tucuruí I	1	325,7	0,042400	0,302800	5,414000	0,423000	1,637000	2,349000
362	Xingu	13502	Altamira	1	61	0,042400	0,302800	5,414000	0,423000	1,637000	2,349000

II.1.2 Compensação série e shunt das linhas

Tabela II.1 – Parâmetros compensação da rede CA da rede N/NE

Linha de Transmissão	Tensão (kV)	Compensação Série (X%)		Compensação Reativa Shunt (Mvar)		
		De	Para	De	Para	Barra
Jurupari - Oriximiná C1	500	1,33	1,33	200	200	-
Jurupari - Oriximiná C2	500	1,33	1,33	200	200	-
Jurupari - Xingu C2	500	0,94	0,94	136	136	-
Jurupari - XinguC1	500	0,94	0,94	136	136	-
Parauapebas -Miracema C1	500	1,2	0,7	300	300	-
Parauapebas -Miracema C2	500	1,2	0,7	300	300	-
Tucuruí - Marabá C1	500	-	0,876	-	136	-
Tucuruí - Marabá C2	500	-	0,712	-	136	-
Tucuruí I - Vila do Conde C2	500	-	1,7	-	163	-
Tucuruí II - Marabá C1	500	-	0,71	-	100	-
Tucuruí II - Marabá C2	500	-	0,71	-	100	-
Tucuruí II - Marituba	500	-	-	-	190	-
Tucuruí II - Vila do Conde C1	500	-	-	-	163	-
Tucuruí II - Vila do Conde C2	500	-	-	-	163	-
Tucuruí II- Itacaiunas	500	-	1,002	-	251	-
Xingu - Tucuruí II C1	500	1,94	-	136	-	-
Xingu - Tucuruí II C2	500	1,94	-	136	-	-
Xingu -Parauapebas C1	500	-	1,19	300	300	-
Xingu -Parauapebas C2	500	-	1,19	300	300	-

II.1.3 Transformadores

Tabela II.3 – Parâmetros dos transformadores da rede CA da rede retida N/NE

Subestação	S [MVA]	Unidades	Relação	Ligação	Dados de Reatância dos Transformadores Base 100 MVA		
					Xps [%]	Xpt [%]	Xst [%]
Jurupari	450	2	500/230-13.8	¥ ¥ Δ	3,111	18,222	14,445
Jurupari CER	200	1	500/13.8	¥ Δ	4,999	-	-
Belo Monte UHE	680	18	500/18	¥ Δ	3,081	-	-
Xingu	300	1	500/230/13,8	¥ ¥ Δ	9,924	4,657	4,657
Tucurui UHE	405	5	500/13,8	¥ Δ	4,273	-	-
Tucurui UHE	405	3	500/13,8	¥ Δ	3,457	-	-
Tucurui UHE	405	4	500/13,8	¥ Δ	2,774	-	-
Tucurui2 UHE	405	7	500/13,8	¥ Δ	5,464	-	-
Tucurui2 UHE	405	4	500/13,8	¥ Δ	3,755	-	-
Tucurui	450	2	500/230/13,8	¥ ¥ Δ	2,430	10,340	7,010
Parauapebas	150	2	500/138	¥ ¥	8,700	-	-
Vila do Conde	750	4	500/230/13,8	¥ ¥ Δ	1,567	4,823	2,869
Marituba	900	1	500/230/13,8	¥ ¥ Δ	1,400	23,624	21,884

Tabela II.4 – Parâmetros da curva de saturação dos transformadores modelados na rede CA da rede retida N/NE

Subestação	S [MVA]	Unidades	Xac %	Joelho pu	Imag %
Jurupari	450	2	35,38	1,20	0,3
Jurupari CER	200	1	18,17	1,23	0,3
Belo Monte UHE	680	18	16,91	1,23	0,3
Xingu	300	1	18,57	1,18	0,3
Tucurui UHE	405	5	18,56	1,18	0,3
Tucurui UHE	405	3	18,56	1,18	0,3
Tucurui UHE	405	4	18,56	1,18	0,3
Tucurui2 UHE	405	7	18,56	1,18	0,3
Tucurui2 UHE	405	4	18,56	1,18	0,3
Tucurui 500/230	450	2	18,57	1,18	0,3
Parauapebas	150	2	18,57	1,18	0,3
Vila do Conde	750	4	64,24	1,22	0,3
Marituba	900	1	17,54	1,25	0,07

Dados da curva de saturação na base da potência nominal do transformador

II.2 Rede Equivalente S/SE

II.2.1 Linhas de transmissão

Tabela II.5 – Parâmetros das linhas de transmissão da rede CA do equivalente S/SE

LT's de 500 kV S-SE						R1 (Ω/km)	X1 (Ω/km)	C1 (uS/km)	R0 (Ω/km)	X0 (Ω/km)	C0 (uS/km)
Nº DE	De	Nº PARA	Para	NC	km						
4326	Nova Iguaçu	2662	Taubaté 2	1	231	0,018277	0,264893	6,213940	0,344422	1,299570	3,209630
4326	Nova Iguaçu	3745	Angra	1	110	0,023000	0,352000	4,719000	0,198000	1,537000	3,137000
4326	Nova Iguaçu	3781	Zona Oeste	1	38	0,022537	0,352013	4,719240	0,197721	1,537180	3,136910
4326	Nova Iguaçu	4291	Terminal Rio	1	20	0,017280	0,271320	6,172290	0,324000	1,342920	3,537370
4326	Nova Iguaçu	4291	Terminal Rio	2	20	0,017280	0,271320	6,172290	0,324000	1,342920	3,537370
4326	Nova Iguaçu	3759	Grajaú	1	47	0,022537	0,352013	4,719240	0,197721	1,537180	3,136910
4326	Nova Iguaçu	3748	São José	1	23	0,015000	0,311000	5,364000	0,324000	1,427000	3,100000
2662	Taubaté 2	5202	Araraquara 2	1	356	0,019258	0,318864	5,157992	0,212299	0,799611	3,280576
3745	Angra	3781	Zona Oeste	1	98	0,022537	0,352013	4,719240	0,197721	1,537180	3,136910
3745	Angra	3720	Cachoeira Paulista	1	103	0,022537	0,359235	4,637710	0,197678	1,522790	3,191010
3748	São José	3728	Adrianópolis	1	33	0,015100	0,311000	5,365600	0,321500	1,442500	3,260800
3727	Adrianópolis	3759	Grajaú	1	55	0,015100	0,311000	5,365600	0,321500	1,442500	3,260800
3728	Adrianópolis	4291	Terminal Rio	1	15	0,022537	0,352013	4,719240	0,197721	1,537180	3,136910
3728	Adrianópolis	4291	Terminal Rio	2	15	0,022537	0,352013	4,719240	0,197721	1,537180	3,136910
4291	Terminal Rio	3782	Resende	1	99	0,022537	0,352013	4,719240	0,197721	1,537180	3,136910
3782	Resende	3720	Cachoeira Paulista	1	56	0,022537	0,352013	4,719240	0,197721	1,537180	3,136910
4291	Terminal Rio	3805	CSN	1	53	0,022537	0,352013	4,719240	0,197721	1,537180	3,136910
3805	CSN	3720	Cachoeira Paulista	1	103	0,022537	0,352013	4,719240	0,197721	1,537180	3,136910
3727	Adrianópolis	4288	Baixada Fluminense	1	23,5	0,017300	0,267700	6,243000	0,337000	1,282000	3,654000
4288	Baixada Fluminense	3720	Cachoeira Paulista	1	154	0,017300	0,267700	6,243000	0,337000	1,282000	3,654000
3720	Cachoeira Paulista	2655	Taubaté	1	83	0,025100	0,331800	4,961200	0,399700	1,179400	2,978200
3720	Cachoeira Paulista	3669	Tijuco Preto C1	1	181	0,022829	0,348254	4,761160	0,364342	1,427430	3,100170
3720	Cachoeira Paulista	3669	Tijuco Preto C2	2	181,5	0,019000	0,264000	6,306000	0,363000	1,343000	3,563000
3669	Tijuco Preto	2655	Taubaté	1	108,5	0,025100	0,331800	4,961200	0,399700	1,179400	2,978200
3720	Cachoeira Paulista	4302	Estreito C1	1	340	0,013900	0,221210	7,432570	0,037900	1,330630	3,069250
3720	Cachoeira Paulista	4302	Estreito C2	2	340	0,013900	0,221210	7,432570	0,037900	1,330630	3,069250
4322	Fernão Dias	4291	Terminal Rio	1	320	0,016600	0,271300	6,217200	0,035480	1,317500	3,769300
3717	Itatiba	3690	Ibiuna	1	86,46	0,022829	0,348254	4,761160	0,364342	1,427430	3,100170
4302	Estreito	4322	Fernão Dias	1	328	0,017000	0,266900	6,240900	0,398000	1,382300	3,227100
4302	Estreito	4322	Fernão Dias	2	328	0,017000	0,266900	6,240900	0,398000	1,382300	3,227100
4302	Estreito	1512	Nova Ponte	1	141	0,023000	0,346200	4,801800	0,366600	1,431600	3,135600
1512	Nova Ponte	1488	Jaguara	1	106	0,024100	0,357000	4,666700	0,350400	1,313900	3,080500
4302	Estreito	1488	Jaguara	1	53	0,020800	0,301900	3,833200	0,367700	1,431600	2,530300
4302	Estreito	1483	Itabirito II	1	370	0,017900	0,267000	6,116000	0,354000	1,500000	2,719900
4302	Estreito	4307	Ribeirão Preto	1	118	0,022800	0,359000	4,719000	0,364000	1,420000	3,137000
4598	Marimondo II	3700	Campinas	1	367	0,013900	0,220900	7,547800	0,346700	1,390600	3,234400
4307	Ribeirão Preto	3816	Poços de Caldas	1	136	0,022800	0,351900	4,719200	0,364200	1,419700	3,136900
3816	Poços de Caldas	26467	Ibaré	1	102	0,232000	0,350500	4,700000	0,191900	1,515000	3,057000
26467	Ibaré	1486	Itajubá 3	1	35	0,232000	0,350500	4,700000	0,191900	1,515000	3,057000
1486	Itajubá 3	3720	Cachoeira Paulista	1	53	0,022500	0,352000	4,719200	0,197700	1,537200	3,136900
4322	Fernão Dias	3720	Cachoeira Paulista	1	170	0,022537	0,352013	4,719240	0,197721	1,537180	3,136910
4322	Fernão Dias	3700	Campinas	1	86	0,022537	0,352013	4,719240	0,197721	1,537180	3,136910
4322	Fernão Dias	5202	Araraquara 2	1	240	0,017100	0,266600	6,119700	0,372500	1,491600	2,754200
3852	Araraquara	5202	Araraquara 2	1	15	0,017384	0,329305	5,128591	0,324221	1,039065	3,703244
3852	Araraquara	5202	Araraquara 2	2	15	0,017384	0,329305	5,128591	0,324221	1,039065	3,703244
3852	Araraquara	3700	Campinas	1	171	0,022500	0,352000	4,719200	0,197700	1,537200	3,136900
3700	Campinas	3717	Itatiba	1	29	0,022829	0,348254	4,761160	0,364342	1,427430	3,100170
3700	Campinas	3717	Itatiba	2	29	0,022829	0,348254	4,761160	0,364342	1,427430	3,100170
3717	Itatiba	5202	Araraquara 2	1	170	0,022500	0,352000	4,719200	0,197700	1,537200	3,136900
3852	Araraquara	4598	Marimondo II	1	195	0,022500	0,352000	4,719200	0,197700	1,537200	3,136900
3852	Araraquara	4598	Marimondo II	2	195	0,022500	0,352000	4,719200	0,197700	1,537200	3,136900
3852	Araraquara	3816	Poços de Caldas	1	176	0,022500	0,352000	4,719200	0,197700	1,537200	3,136900

Tabela II.5 – Parâmetros das linhas de transmissão da rede CA do equivalente S/SE (continuação)

LT's de 440 kV S-SE						R1 (Ω/km)	X1 (Ω/km)	C1 (uS/km)	R0 (Ω/km)	X0 (Ω/km)	C0 (uS/km)
Nº DE	De	Nº PARA	Para	NC	km						
4321	Fernão Dias	2656	Taubaté	1	120	0,012475	0,156850	5,196900	0,301996	0,546513	2,887950

LT's de 345 kV S-SE						R1 (Ω/km)	X1 (Ω/km)	C1 (uS/km)	R0 (Ω/km)	X0 (Ω/km)	C0 (uS/km)
Nº DE	De	Nº PARA	Para	NC	km						
3807	Itutinga	3729	Adrianópolis C1	1	199	0,039768	0,392931	4,253680	0,395983	1,470000	3,093610
3807	Itutinga	3729	Adrianópolis C2	2	199	0,033805	0,374583	4,435840	0,209426	1,629170	2,897260
4328	Nova Iguaçu	3729	Adrianópolis	2	13,4	0,022500	0,352000	4,719200	0,197700	1,537200	3,136900
4328	Nova Iguaçu	3769	Jacarepaguá	2	28,6	0,022500	0,352000	4,719200	0,197700	1,537200	3,136900
3769	Jacarepaguá	3729	Adrianópolis	1	38	0,022500	0,352000	4,719200	0,197700	1,537200	3,136900
3729	Adrianópolis	3783	V. Pedras	1	106	0,033805	0,374583	4,435840	0,209426	1,629170	2,897260
3783	V. Pedras	3784	Macaé	1	115,5	0,033805	0,374583	4,435840	0,209426	1,629170	2,897260
3729	Adrianópolis	4320	Comperj	1	59	0,033805	0,374583	4,435840	0,209426	1,629170	2,897260
4320	Comperj	3784	Macaé	1	120	0,033805	0,374583	4,435840	0,209426	1,629170	2,897260
3691	Ibiuna	2929	Interlagos	1	61,3	0,018407	0,291000	5,744060	0,353832	1,395000	3,161906
3691	Ibiuna	2929	Interlagos	2	61,3	0,018407	0,291000	5,744060	0,353832	1,395000	3,161906
3691	Ibiuna	3831	Guarulhos	1	75	0,017000	0,291000	5,730000	0,344000	1,461000	3,154000
3691	Ibiuna	3831	Guarulhos	2	75	0,017000	0,291000	5,730000	0,344000	1,461000	3,154000
3691	Ibiuna	3670	Tijuco Preto	1	97	0,023000	0,320000	5,197000	0,350000	1,491000	3,003000
3691	Ibiuna	3671	Tijuco Preto	1	97	0,023000	0,320000	5,197000	0,350000	1,491000	3,003000

LT's de 138 kV S-SE						R1 (Ω/km)	X1 (Ω/km)	C1 (uS/km)	R0 (Ω/km)	X0 (Ω/km)	C0 (uS/km)
Nº DE	De	Nº PARA	Para	NC	km						
3749	São José	4390	Termo Rio	1	13,50	0,017290	0,252253	6,605130	0,179558	0,921301	3,255890
3750	São José	4401	Termo Rio	2	13,50	0,017290	0,252253	6,605130	0,179558	0,921301	3,255890

II.2.2 Compensação shunt das linhas

Tabela II.6 – Parâmetros da compensação da rede CA do equivalente S/SE

Linha de Transmissão		Tensão (kV)	Compensação Série (X%)		Compensação Reativa Shunt (Mvar)			Compensação Capacitiva Shunt (Mvar)
			De	Para	De	Para	Barra	
Angra	Zona Oeste	500	-	-	136	-	-	-
Araraquara	Campinas	500	-	-	73,5	-	-	-
Araraquara	Marimbondo 2 C1	500	-	-	73,5	-	-	-
Araraquara	Marimbondo 2 C2	500	-	-	73,5	-	-	-
Araraquara	Poços de Caldas	500	-	-	73,5	-	-	-
Cachoeira Paulista	Estreito C1	500	-	-	240	240	-	-
Cachoeira Paulista	Estreito C2	500	-	-	240	240	-	-
CSN	Cachoeira Paulista	500	-	-	-	136	-	-
Estreito	Itabirito II	500	-	-	136	136	-	-
Fernão Dias	Terminal Rio	500	-	-	136	136	-	-
Fernão Dias	Campinas	500	-	-	-	112	-	-
Fernão Dias	Araraquara 2	500	-	-	136	136	-	-
Fernão Dias	Estreito C1	500	-	-	136	136	-	-
Fernão Dias	Estreito C2	500	-	-	136	136	-	-
Itatiba	Araraquara 2	500	-	-	73,5	73,5	-	-
Marimbondo II	Campinas	500	-	-	157	157	-	-
Nova Iguaçu	Taubaté 2	500	-	-	136	-	-	-
Poços de Caldas	Ibaré	500	-	-	136	-	-	-
Resende	Cachoeira Paulista	500	-	-	-	136	-	-
Taubaté 2	Araraquara 2	500	-	-	136	136	-	-

LT 440 kV		Tensão (kV)	Compensação Série (X%)		Compensação Reativa Shunt (Mvar)			Compensação Capacitiva Shunt (Mvar)
De	Para		De	Para	De	Para	Barra	Barra
Fernão Dias	Taubaté	440				180		

II.2.3 Transformadores

Tabela II.7 – Parâmetros dos transformadores da rede CA do equivalente S/SE

Subestação	S [MVA]	Unidades	Relação	Ligação	Dados de Reatância dos Transformadores Base 100 MVA		
					Xps [%]	Xpt [%]	Xst [%]
Angra I	760	1	500/19	¥ Δ	1,970	-	-
Angra II	1460	1	500/25	¥ Δ	0,950	-	-
Angra III	1460	1	500/25	¥ Δ	0,670	-	-
Estreito	900	2	500/345/13,8	¥ ¥ Δ	1,260	24,890	23,430
Fernão Dias	1200	3	500/440/13,8	¥ ¥ Δ	1,083	5,683	5,683
Gerdau	300	2	500/138	¥ ¥	4,000	-	-
CSA	300	2	500/138	¥ ¥	4,000	-	-
Zona Oeste	900	1	500/138-13,8	¥ ¥ Δ	1,440	29,640	27,540
Nova Iguaçu	900	1	500/345-13,8	¥ ¥ Δ	1,110	22,784	21,174
Nova Iguaçu	900	2	500/138-13,8	¥ ¥ Δ	1,440	29,640	27,540
Baixada Fluminense	278	3	500/15	¥ Δ	5,020	-	-
Adrianópolis	560	3	500/345-13,8	¥ ¥ Δ	2,407	20,903	17,770
CSN	675	2	500/138-13,8	¥ ¥ Δ	2,290	24,307	21,723
Taubaté	900	2	500/440-13,8	¥ ¥ Δ	1,030	21,330	19,700
Resende	120	1	500/138-13,8	¥ ¥ Δ	8,300	*	*
Resende	150	1	500/138-13,8	¥ ¥ Δ	6,200	*	*
Grajaú	600	4	500/138-13,8	¥ ¥ Δ	2,216	5,013	2,641
São José	600	4	500/138-13,8	¥ ¥ Δ	2,200	18,717	16,293
Tijuco Preto	1650	3	765/500-69	¥ ¥ Δ	0,663	4,304	3,493
Tijuco Preto	1500	4	765/345-13,8	¥ ¥ Δ	0,896	3,542	2,472
Ibiuna	750	3	500/345-13,8	¥ ¥ Δ	1,735	23,362	21,133

Tabela II.8 – Parâmetros da curva de saturação dos transformadores modelados na rede CA do equivalente S/SE (potência base igual a potência nominal)

Subestação	S [MVA]	Unidades	Xac %	Joelho pu	Imag %
Angra II	1460	1	37,41	1,25	0,3
Angra III	1460	1	37,41	1,25	0,3
Estreito	900	2	41,57	1,2	0,3
Fernão Dias	1200	3	26,73	1,24	0,3
Gerdau	300	2	13,2	1,24	0,3
CSA	300	2	13,20	1,24	0,3
Zona Oeste	900	1	37,36	1,25	0,3
Nova Iguaçu	900	1	37,36	1,25	0,3
Nova Iguaçu	900	2	37,36	1,25	0,3
Baixada Fluminense	278	3	14	1,2	0,3
Adrianópolis	560	3	23,73	1,21	0,3
CSN	675	2	48,74	1,20	0,3
Taubaté	900	2	37,36	1,25	0,3
Resende	120	1	18,05	1,20	0,3
Resende	150	1			0,3
Grajaú	600	4	37,36	1,25	0,3
São José	600	4	37,36	1,25	0,3
Tijuco Preto 765/500	1650	3	119,58	1,31	0,3
Tijuco Preto 765/345	1500	4	137,55	1,17	0,3
Ibiuna	750	3	26,73	1,24	0,3
Conv. XNG	1181		53,45	1,21	0,05
Conv. MG RJ	1130		53,42	1,21	0,05

ANEXO III – MODELAGEM EM FREQUÊNCIA DAS CARGAS DO SIN

Foram modeladas todas as cargas do SIN ligadas em barramentos de 345 kV, 230 kV, 138 kV, 88 kV e 69 kV.

Para cada uma destas tensões, foram utilizados modelos típicos de ramais de cargas, cujos diagramas unifilares são mostrados a seguir:

- **Tensão de 88 e 69 kV:**

Na Figura III-1, mostra-se o circuito do ramal de distribuição típico para as tensões de 88 kV e 69 kV no ponto de acoplamento entre a carga e o SIN.

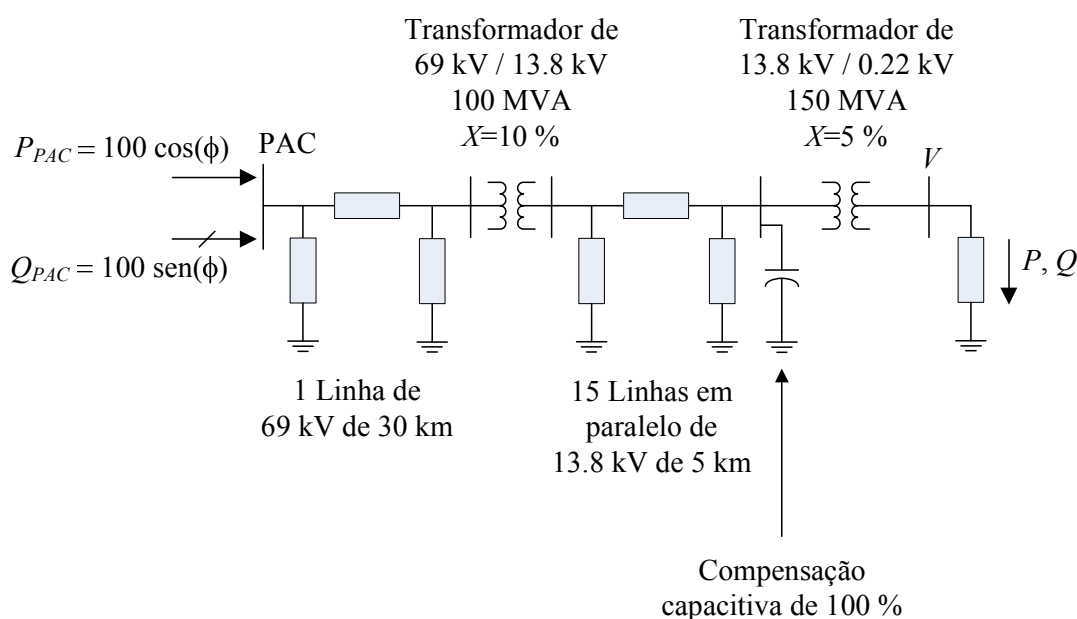


Figura III-1: Ramal de distribuição de 88 kV ou 69 kV

- **Tensão de 138 kV:**

A seguir é mostrado o circuito do ramal de distribuição típico para a tensão de 138 kV no ponto de acoplamento entre a carga e o SIN.

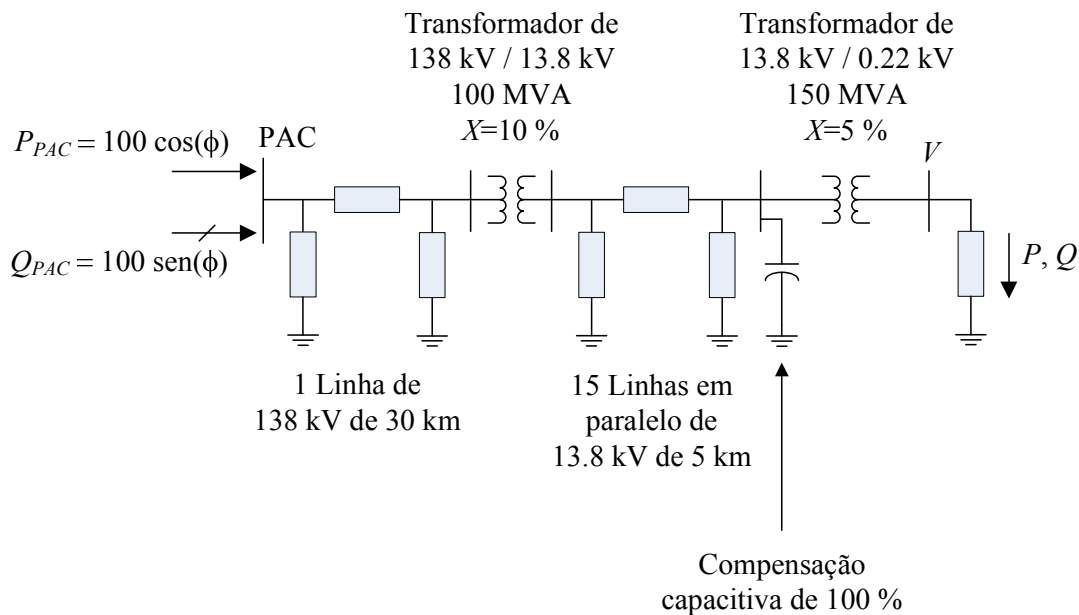


Figura III-2: Ramal de distribuição de 138 kV

- **Tensão de 230 kV:**

No diagrama unifilar da Figura III-3, está mostrado o circuito do ramal de distribuição típico para a tensão de 230 kV no ponto de acoplamento entre a carga e o SIN.

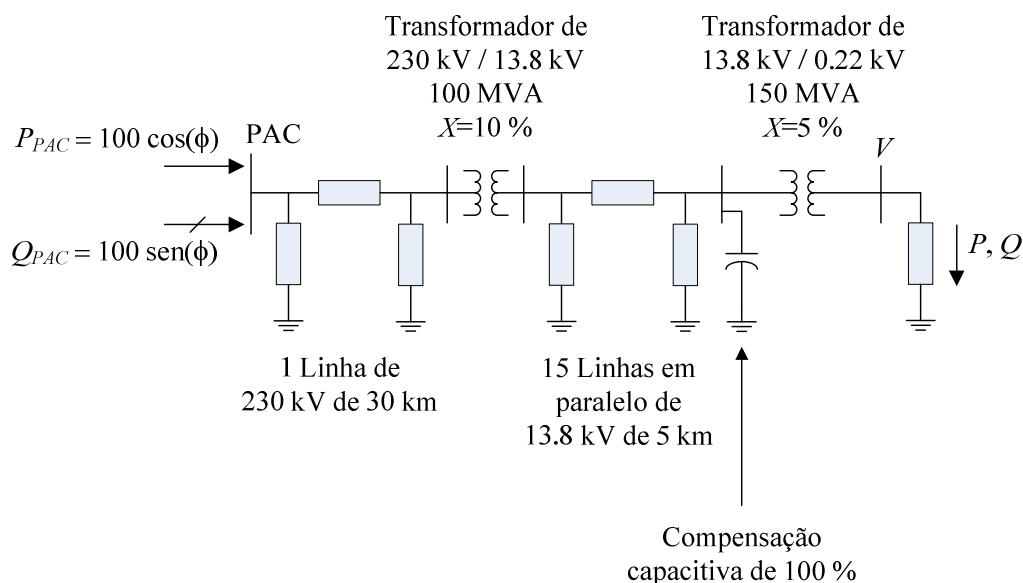


Figura III-3: Ramal de distribuição de 230 kV

- **Tensão de 345 kV:**

No diagrama da Figura III-4, mostra-se o circuito do ramal de distribuição típico para a tensão de 345 kV no ponto de acoplamento entre a carga e o SIN.

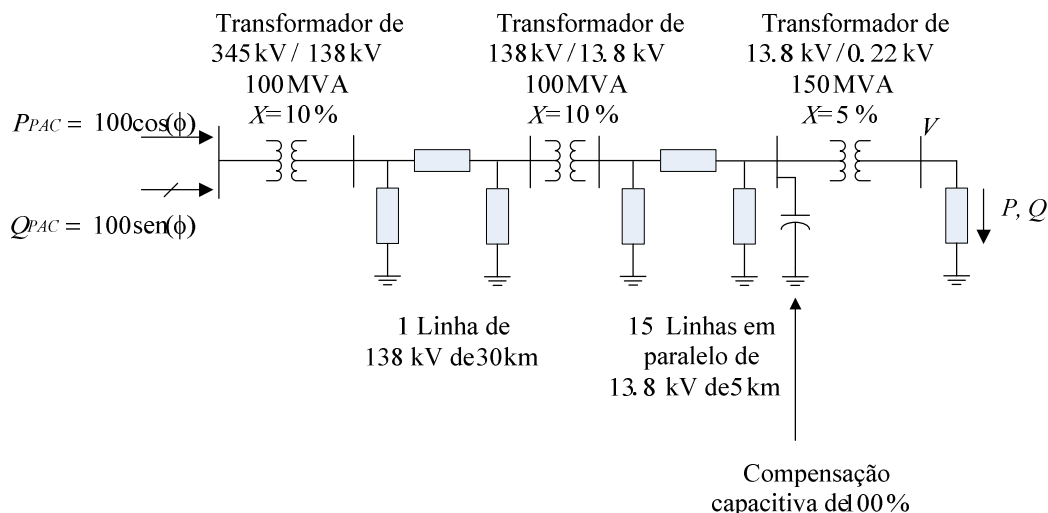


Figura III-4: Ramal de distribuição de 345 kV

Deve-se observar que estes ramais típicos de distribuição consideram uma potência consumida de 100 MVA (1 pu). Assim, os parâmetros adotados como típicos para as linhas de transmissão e transformadores foram corrigidos por um fator “k”, cujo valor é dado pela correspondente potência aparente em pu das cargas modeladas (k = potência aparente da carga em pu oriunda do arquivo de fluxo de potência).

Desta forma, para cada uma das cargas modeladas, as resistências e indutâncias das linhas de transmissão e dos transformadores foram divididas por k e as capacitâncias multiplicadas por k .

Os parâmetros dos transformadores e linhas de transmissão destes ramais típicos sem correção são mostrados nas Tabelas III-1 e III-2.

Tabela III-1: Impedâncias dos transformadores adotadas para os modelos de cargas típicas do SIN

Tensão (kV)	Z(345 kV /138 kV) (pu)	Z(138 kV /13,8 kV) (pu)	Z(13,8 kV /220 V) (pu)
345	0.1	0.1	0.0333

230	-	0.1	0.0333
138	-	0.1	0.0333
88	-	0.1	0.0333
69	-	0.1	0.0333

Tabela III-2: Parâmetros das linhas de transmissão adotados para os modelos de cargas típicos do SIN

Tensão (kV)	Ind. (H/km)	Cap. (uF/km)	Comp. (km)	Diam. Sub. (cm)	Diam. Aço (cm)	Sub.	Res. DC (ohm /km)	Res. Solo (ohm x m)
230	0,00125	0,0089	30	2,515	0,943	1	0,101	1000
138	0,00123	0,00908	30	1,829	0,673	1	0,191	1000
88	0,00117	0,00952	30	1,829	0,673	1	0,191	1000
69	0,00117	0,00952	30	1,829	0,673	1	0,191	1000
13,8	0,00104	0,01067	5	1,43	0,478	1	0,293	1000

Para as potências reativas consumidas pelas cargas terminais considerou-se o fator de potência típico de 0,85.

Para as potências ativas das cargas terminais destes ramais típicos, considerou-se 70% com característica linear, sendo o restante atribuído a características não lineares destas cargas terminais, não sendo, portanto importante para o amortecimento das impedâncias harmônicas.

Para as frequências harmônicas de interesse as cargas terminais foram modeladas por circuitos "RL" em paralelo, cujas resistências "R" foram determinadas para os 40% das potências ativas com característica linear. Observa-se que foi considerada a variação destas resistências em função da frequência.

O percentual de 60% das potências ativas restantes com característica linear é consumido por motores industriais convencionalmente encontrados em sistemas de distribuição. Observa-se que estes motores consomem a potência ativa apenas na frequência fundamental do sistema. Portanto, para qualquer outra frequência estes motores foram

representados pelas indutâncias “L” dos correspondentes circuitos “RL” em paralelo que modelam as cargas terminais.

Para a compensação reativa de cada uma das cargas terminais, foi determinada a capacitância de modo a obter 100% de compensação reativa.

ANEXO IV –PRINCIPAIS CONTROLES DOS ELOS CCAT 800 KV

IV.1 Detector de falhas de comutação (COMMUTATION FAILURE DETECTOR)

O detector de falhas de comutação existe tanto em Xingu como no terminal Rio.

Utilizando como exemplo o polo 1 do inversor no lado do Terminal Rio (CEN 2L), o detector de falhas de comutação é usado no cálculo do alfa máximo, aumentando os valores de gama mínimo e gama de referência em caso de falha de comutação.

Entradas do controle:

- **S4P1_IDP** – Corrente DC medida no inversor;
- **S4P1 IVd** – Correntes CA medidas nas três fases no secundário do transformador conversor ligado em delta;
- **S4P1 IVs** – Correntes CA medidas nas três fases no secundário do transformador conversor ligado em estrela;
- **S4P1_XSET** – Se este sinal for igual a 1, isso significa que o outro polo deste bipolo está bloqueado. Se for igual a 0, significa que o outro polo está desbloqueado.

Saída do controle:

- **S4P1_CF** – Indicador de que há falha de comutação;

As funções dos blocos enumeradas conforme Figura IV.1 são descritas a seguir.

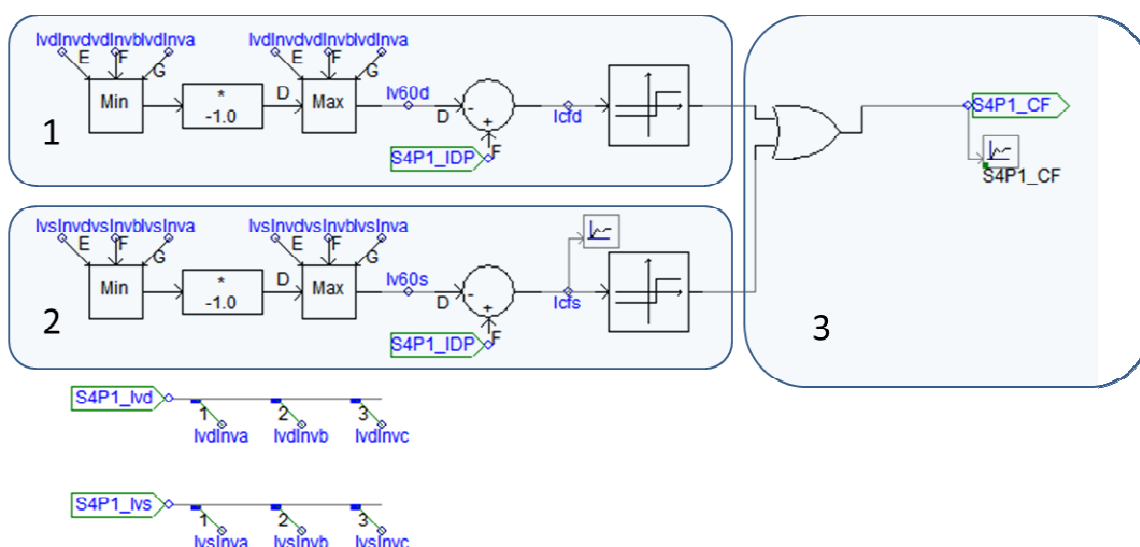


Figura IV.1 - Funções dos blocos do detector de falhas de comutação

1 – Primeiramente, detecta-se o maior valor absoluto de corrente CA (em kA) entre cada uma das fases do secundário do transformador conversor ligado em delta. Numa rede equilibrada este valor será igual a uma constante que é o valor de pico das correntes das fases. Posteriormente, compara-se este valor com a corrente DC (também em kA). Se a diferença entre a corrente DC (S4P1_IDP) e a corrente CA (Iv60d ou IvDmax) for superior a 0,2 kA, então a saída desta parte do controle será "1". Senão, a mesma saída será 0. Em regime normal de operação, a diferença entre essas correntes é muito próxima de zero e muito abaixo de 0,2 kA. Em caso de falha de comutação, a corrente DC (S4P1_IDP) terá uma subida repentina que nem sempre será acompanhada da subida do máximo da corrente CA (Iv60d ou IvDmax). Assim, o sinal diff_D que é a diferença entre as correntes será maior do que 0,2 kA, o que fará com que a saída desta parte do controle seja igual a 1. A figura IV.2 mostra o comportamento das variáveis desta parte do controle em regime normal e em durante uma falha de comutação devido a uma falta CA monofásica no Terminal Rio.

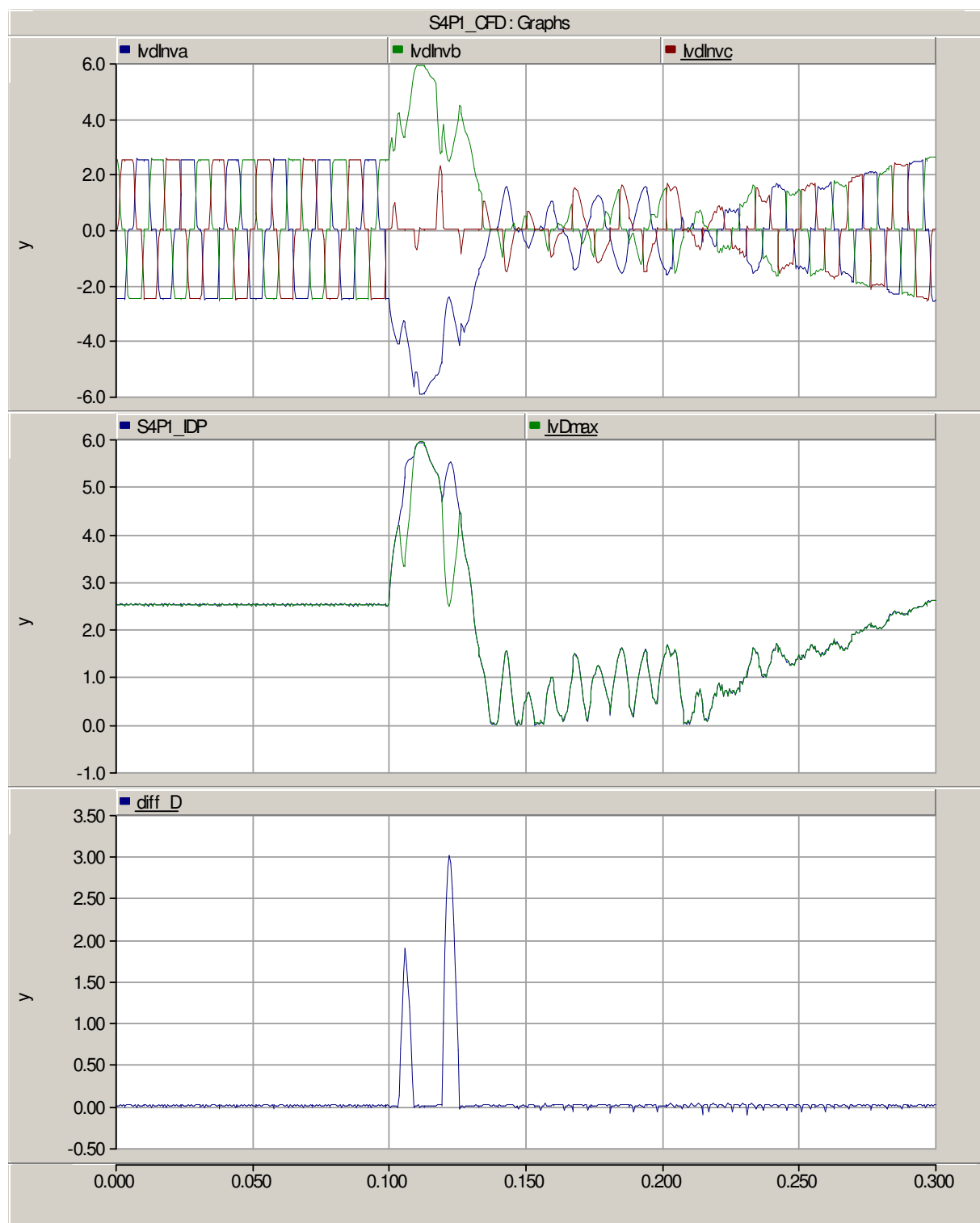


Figura IV.2

2 – Essa parte do controle faz o mesmo que a parte 1. A diferença é que a corrente CA é medida nas fases do secundário do transformador conversor ligado em estrela. A figura IV.3 mostra o comportamento das variáveis desta parte do controle em regime normal e durante uma falha de comutação devido a uma falha CA monofásica no Terminal Rio.

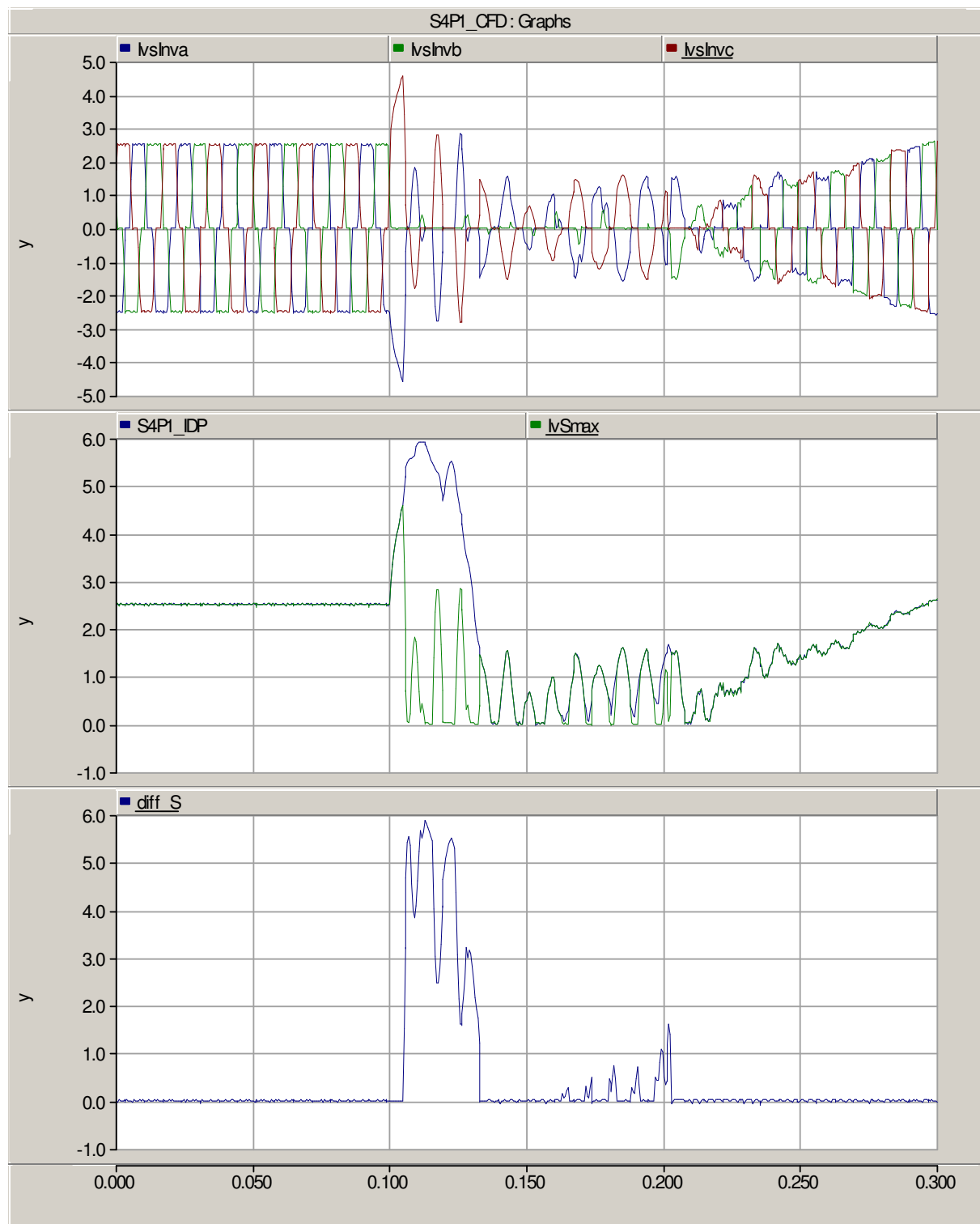


Figura IV.3

3 – Se qualquer uma das saídas da parte 1 ou da parte 2 for igual a "1", este sinal será exportado, indicando que há falha de comutação no inversor deste elo.

Voltage Dependent Current Order Limiter (VDCOL)

Na ocorrência de faltas onde a tensão CA no retificador ou no inversor é reduzida, não é saudável para o sistema que o elo de corrente contínua tente manter a sua ordem de corrente igual àquela anterior à falta, pois isso pode causar um colapso da tensão CA durante a recuperação da falta.

Neste exemplo, foi estudado o VDCOL no retificador do polo 1. Este controle é igual no inversor.

Entradas do controle:

- **S3P1_IO** – Corrente de ordem;
- **S3P1_UDL** – Tensão DC;
- **S3P1_XSET** – Se este sinal for igual a 1, isso significa que o outro polo deste bipolo está bloqueado. Se for igual a 0, significa que o outro polo está desbloqueado;
- **RVO1** – Se este sinal for igual a 1, o polo está trabalhando com tensão reduzida. Se este sinal for igual a 0, o polo está operando com tensão nominal.

Saídas do controle:

- **S3P1_IOL** – Corrente de ordem ajustada pelo VDCOL;
- **S3P1VDCOL_ON** – Indicador do estado do VDCOL (atuante ou não atuante).

A figura IV.4 mostra o VDCOL modelado no PSCAD.

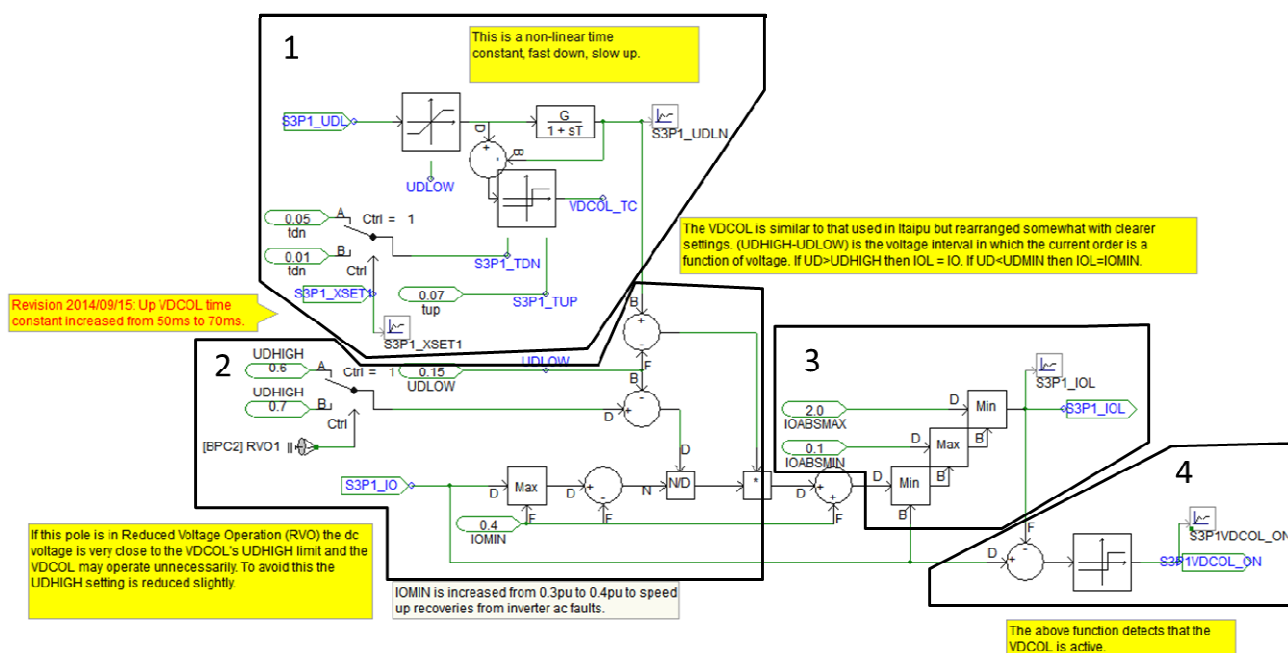


Figura IV.4

Este controle é mostrado de forma simplificada na figura IV.5.

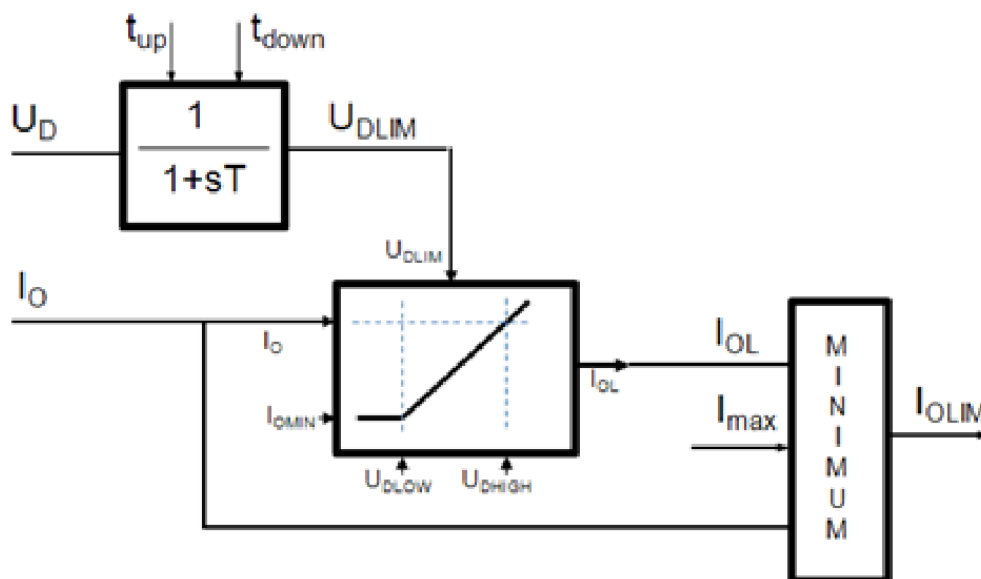


Figura IV.5

As funções da Figura IV.4 são descritas a seguir.

1 - A tensão DC passa por um limitador com limites 1 pu e UDLOW (0,15 pu). Depois do limitador, a tensão DC passa por um filtro cuja constante de tempo será de 10 ms na queda da tensão DC e de 50 ms na subida de tensão. O objetivo é que o VDCOL responda rapidamente a uma queda na tensão DC e que, no retorno da falta, a ordem de corrente suba mais suavemente contribuindo para a recuperação da rede. Caso o sinal S3P1_XSET seja igual a 1, indicando que o outro polo deste bipolo está bloqueado, a constante de tempo do filtro será de 50 ms na subida e na descida.

2 – Essa parte do controle representa a curva do VDCOL conforme figura IV.6:

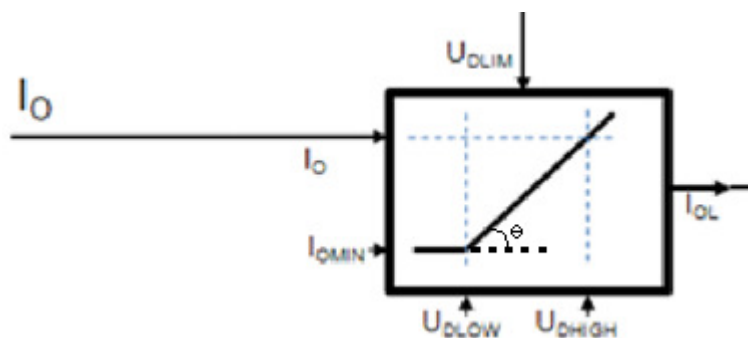


Figura IV.6

Considerando a figura IV.6 temos que:

$$I_{OL} - I_{0MIN} = (U_{DLIM} - U_{DLOW}) \times \tan \theta$$

$$\tan \theta = \frac{I_0 - I_{0MIN}}{U_{DHIGH} - U_{DLOW}}$$

Logo:

$$I_{0L} = \left[\left(\frac{I_0 - I_{0MIN}}{U_{DHIGH} - U_{DLOW}} \right) \times (U_{DLIM} - U_{DLOW}) \right] + I_{0MIN}$$

Equação 1

Agora, ao analisar-se o diagrama de blocos do PSCAD, vê-se que a corrente de ordem (S3P1_I0) entra em um comparador de máximo com o sinal I0MIN que é igual a 0,4 pu e depois é subtraído do mesmo sinal I0MIN. Isso significa dizer que a ordem de corrente mínima quando o VDCOL estiver ativado será de 0,4 pu. A saída do somador é dividida pela tensão DC UDHIGH menos a tensão DC UDLOW (0,15 pu). A tensão UDHIGH será 0,7 pu quando o polo estiver trabalhando com tensão nominal e 0,6 pu quando o polo estiver trabalhando em modo de tensão reduzida. Essa diferenciação evita que o VDCOL seja ativado indevidamente no modo de tensão reduzida.

A saída deste divisor é multiplicada pela tensão DC filtrada (S3P1_UDLN) menos UDLOW (0,15 pu) e depois é somada novamente com I0MIN (0,4 pu). O controle descrito nestes dois últimos parágrafos pode ser resumido na Equação 1:

$$I_{0VDCOL} = \left[\left(\frac{S3P1_I0 - I_{0MIN}}{UDHIGH - UDLOW} \right) \times (S3P1_UDLN - UDLOW) \right] + I_{0MIN}$$

Equação 2

Verifica-se, assim, que as equações 1 e 2 são iguais, o que demonstra a igualdade entre a Figura IV.6 e o trecho do controle descrito neste item.

Então:

- Se S3P1_UDLN for maior do que 0,7 pu (0,6 pu em tensão reduzida) então I0VDCOL = I0;
- Se S3P1_UDLN for menor do que 0,7 pu (0,6 pu em tensão reduzida) então há a atuação do VDCOL que reduzirá a ordem de corrente (I0VDCOL) para um valor que segue a inclinação da Figura IV.6 com uma corrente mínima de 0,4 pu.

3 – Nessa parte do controle, primeiramente, a corrente calculada para o VDCOL e a corrente de ordem na entrada do controle entram em um comparador de mínimo. Isso significa dizer que, se a corrente de ordem for menor do que 0,4 pu, o VDCOL não atuará mesmo com a queda de tensão DC. Depois disso, essa ordem de corrente será limitada inferiormente em 10% da corrente nominal e superiormente em 150% da corrente nominal. Tem-se, assim, a saída do VDCOL que consiste em uma ordem de corrente reduzida em caso de tensão DC inferior a UDHIGH (0,7 pu).

4 – Este trecho apenas indica se o VDCOL está ativado.

0 = VDCOL desativado;

1 = VDCOL ativado

ANEXO V – TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS

V.1 Transmissão Sentido Norte-Sul, cenário 2L

V.1.1 Curto Circuito na Rede CA

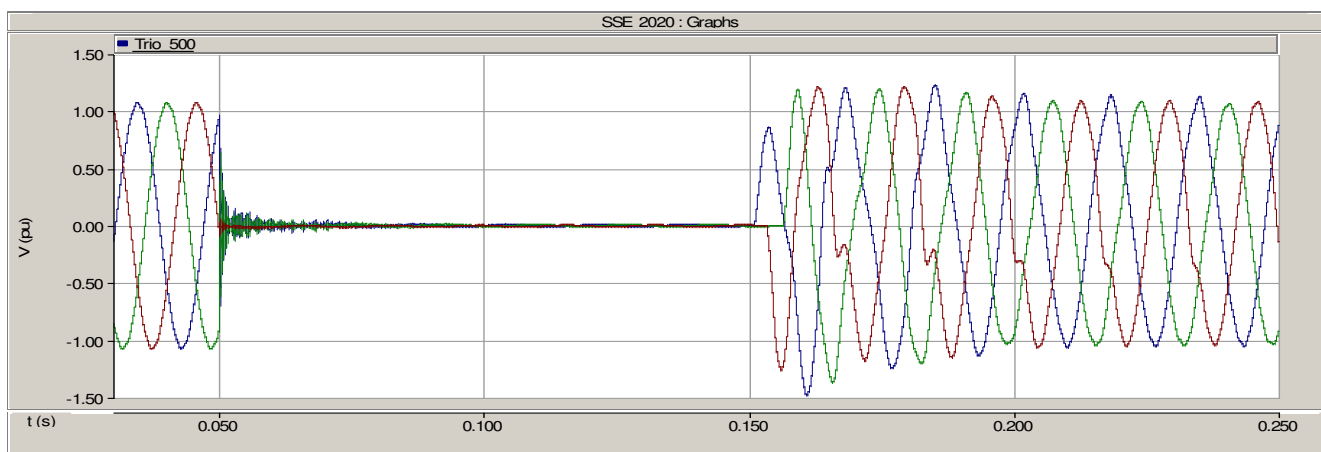


Figura V-1 Curto trifásico no T. Rio 500 kV, tensão em T. Rio 500 kV – 2L

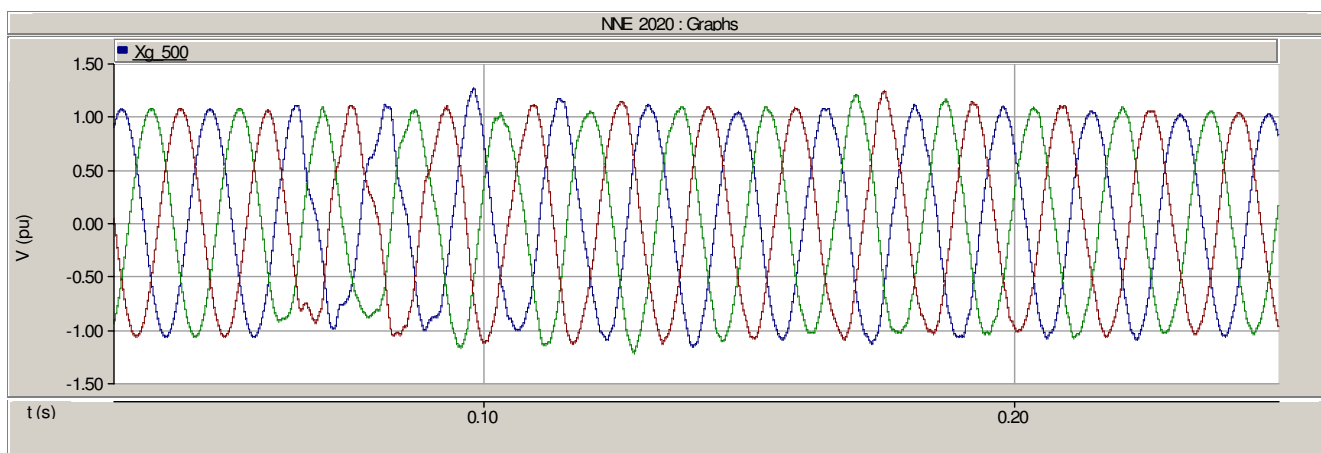


Figura V-2 Curto trifásico no T. Rio 500 kV, tensão em Xingu 500 kV – 2L

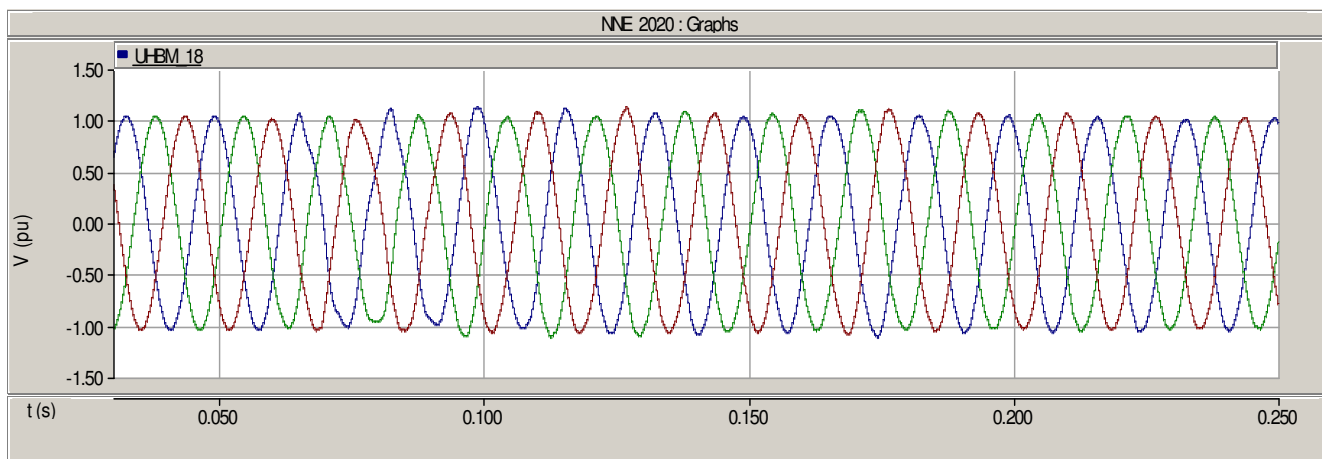


Figura V-3 Curto trifásico no T. Rio 500 kV, tensão em Belo Monte 18 kV – 2L

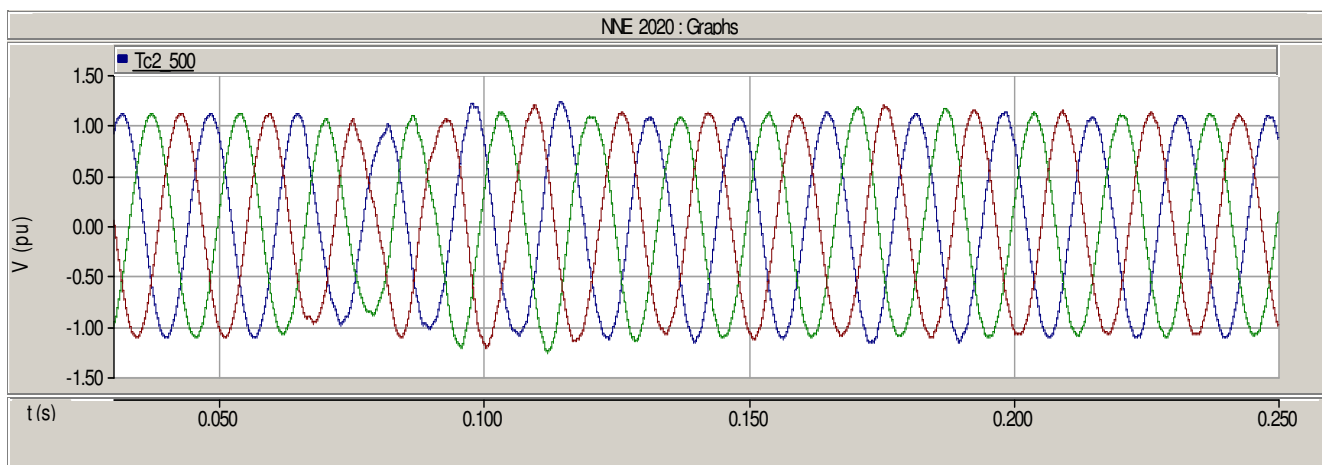


Figura V-4 Curto trifásico no T. Rio 500 kV, tensão em Tucuruí 2 500 kV – 2L

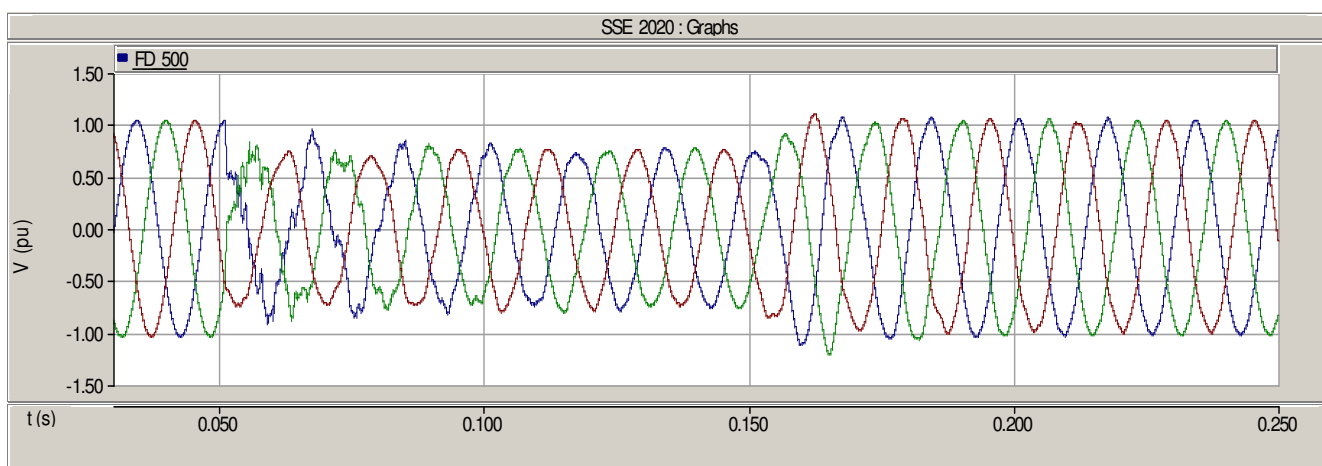


Figura V-5 Curto trifásico no T. Rio 500 kV, tensão em Fernão Dias 500 kV – 2L

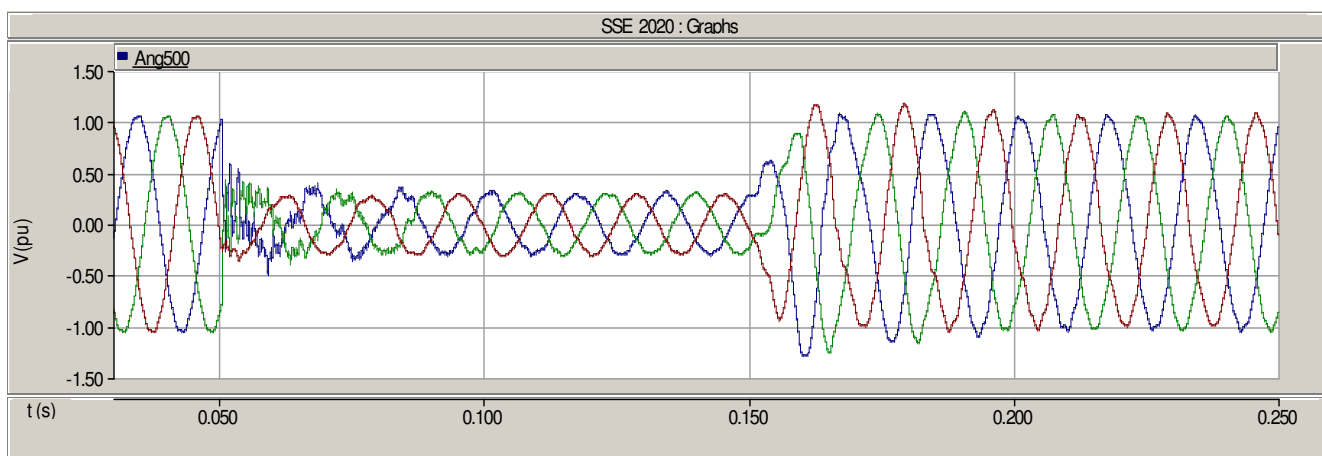


Figura V-6 Curto trifásico no T. Rio 500 kV, tensão em Angra 500 kV – 2L

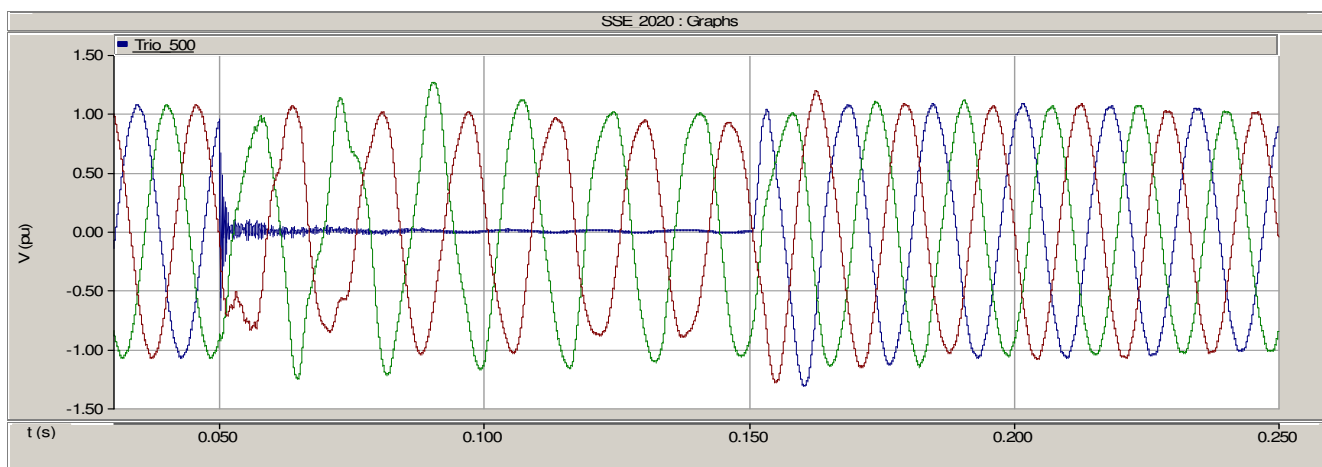


Figura V-7 Curto monofásico no T. Rio 500 kV, tensão em T. Rio 500 kV – 2L

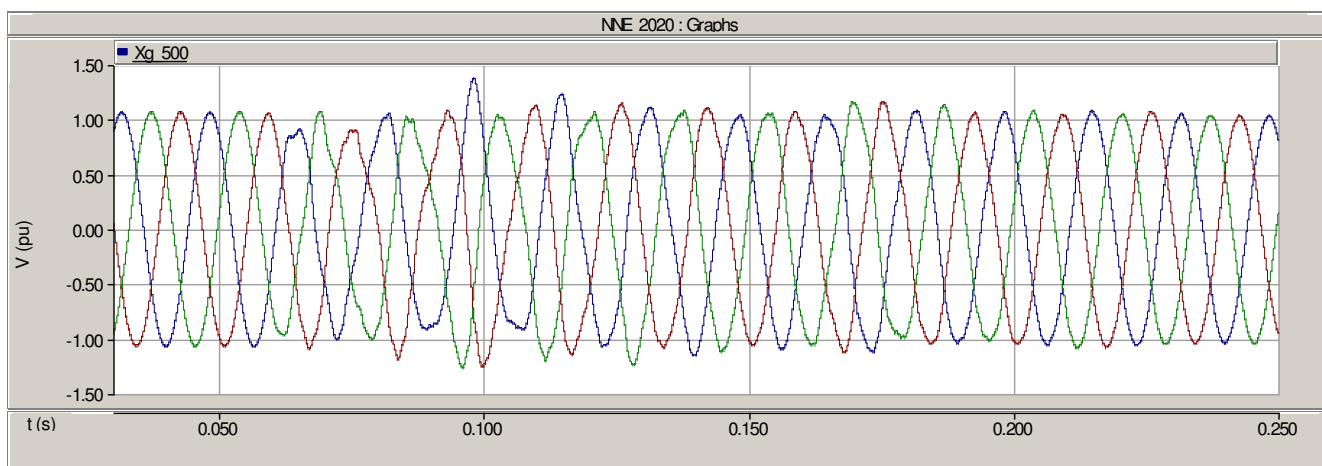


Figura V-8 Curto monofásico no T. Rio 500 kV, tensão em Xingu 500 kV – 2L

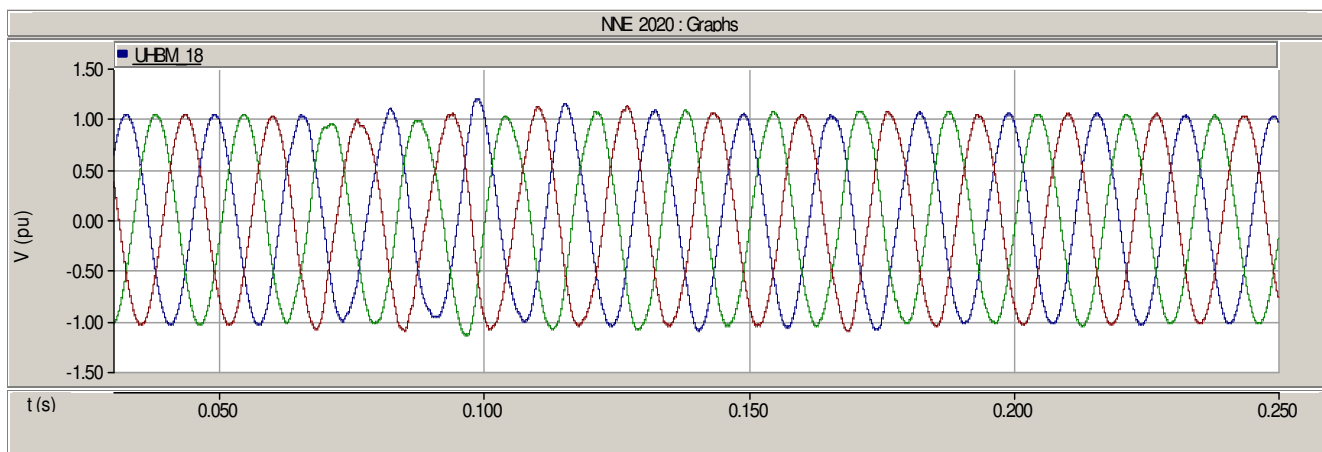


Figura V-9 Curto monofásico no T. Rio 500 kV, tensão em Belo Monte 18 kV – 2L

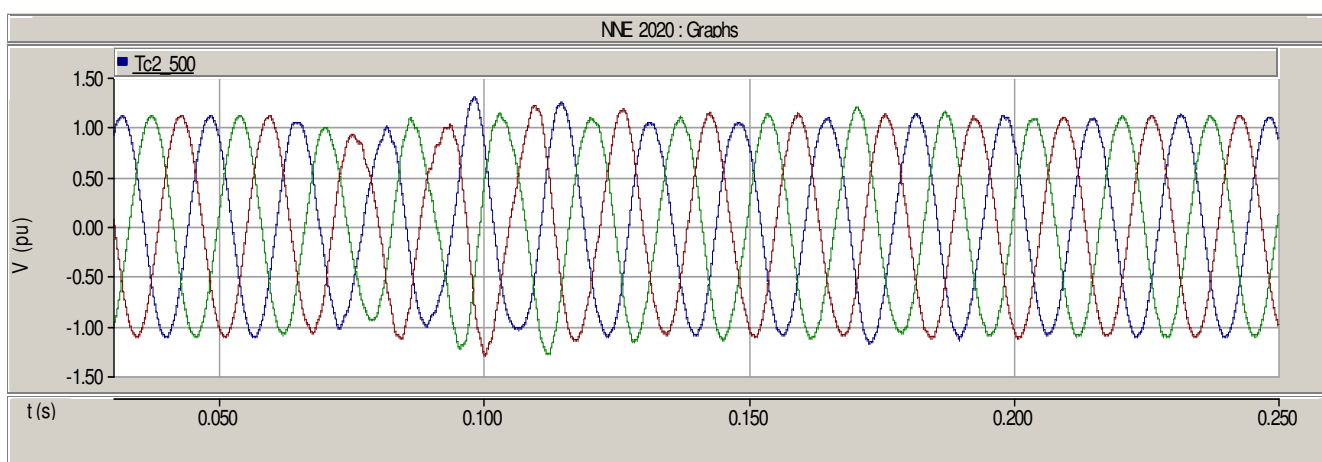


Figura V-10 Curto monofásico no T. Rio 500 kV, tensão em Tucuruí 2 500 kV – 2L

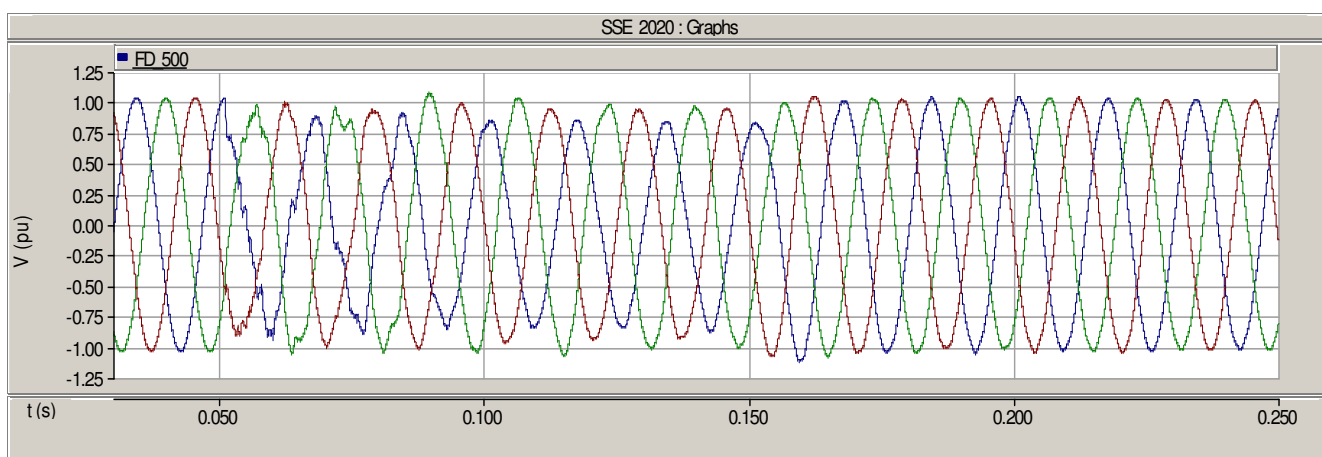


Figura V-11 Curto monofásico no T. Rio 500 kV, tensão em Fernão Dias 500 kV – 2L

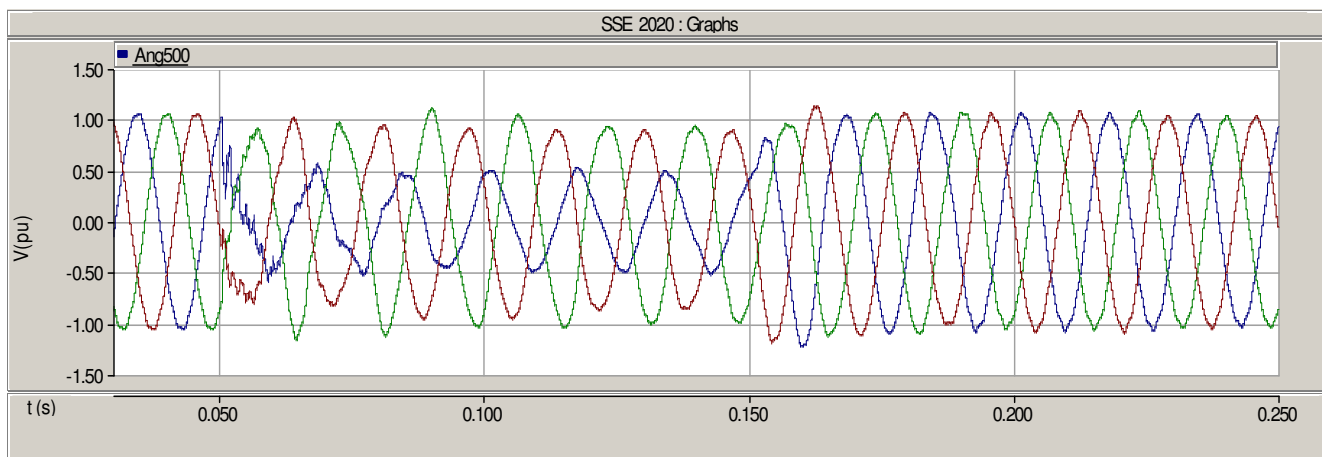


Figura V-12 Curto monofásico no T. Rio 500 kV, tensão em Angra 500 kV – 2L

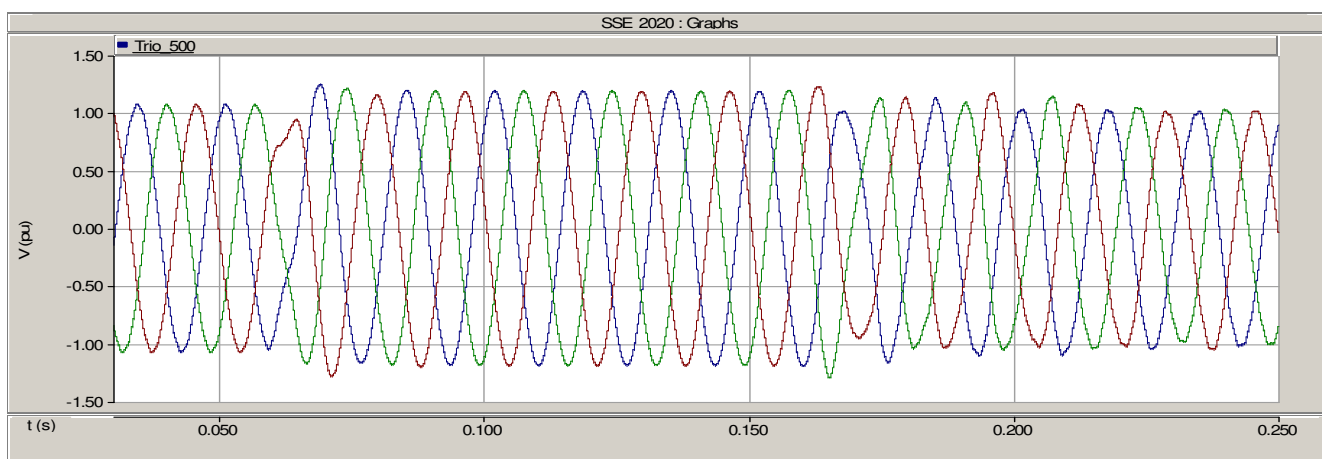


Figura V-13 Curto trifásico em Xingu 500 kV, tensão em T. Rio 500 kV – 2L

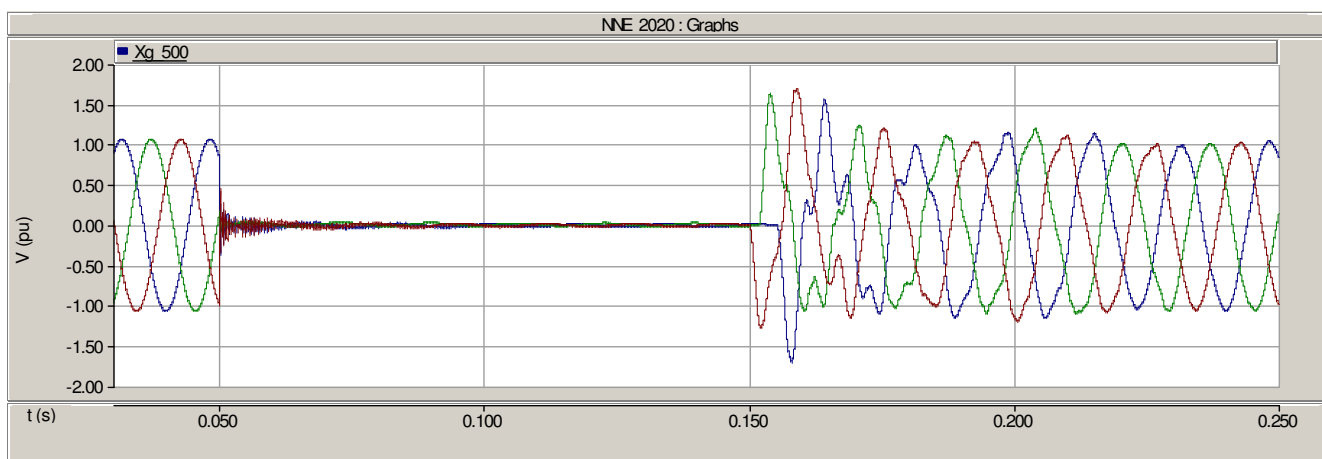


Figura V-14 Curto trifásico em Xingu 500 kV, tensão em Xingu 500 kV – 2L

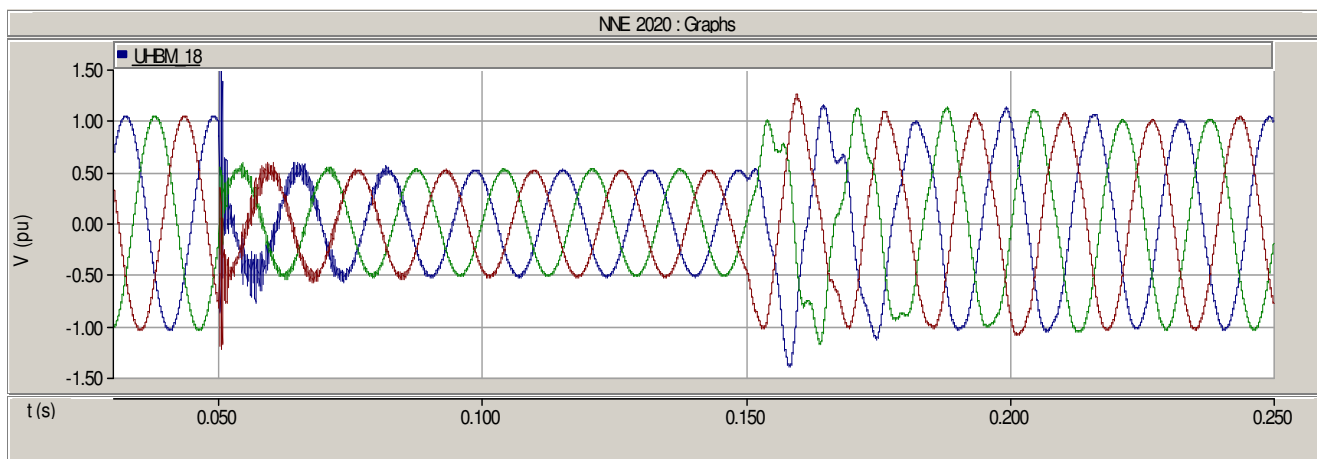


Figura V-15 Curto trífase em Xingu 500 kV, tensão em Belo Monte 18 kV – 2L

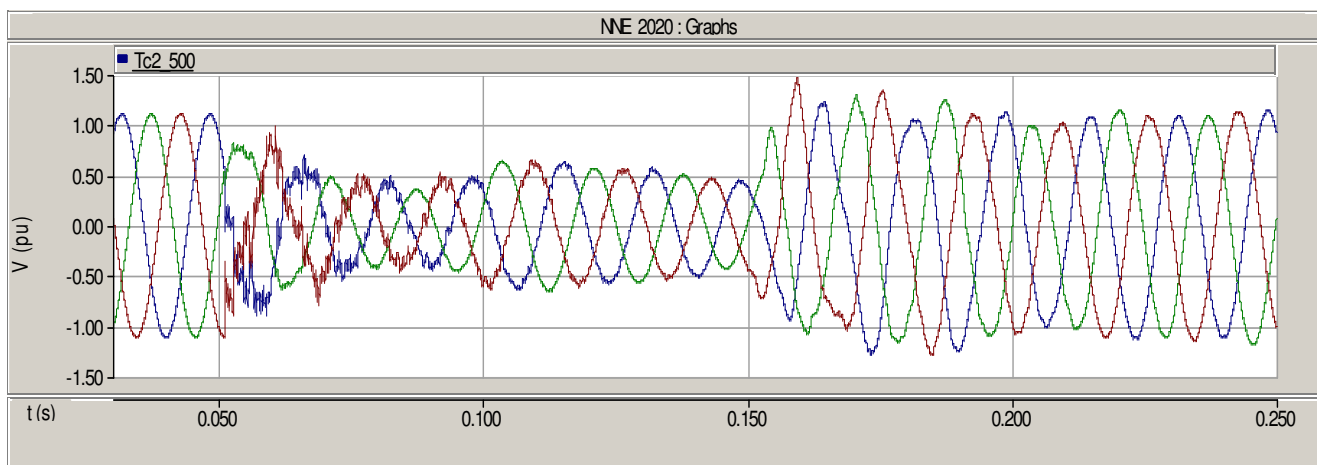


Figura V-16 Curto trífase em Xingu 500 kV, tensão em Tucuruí 2 500 kV – 2L

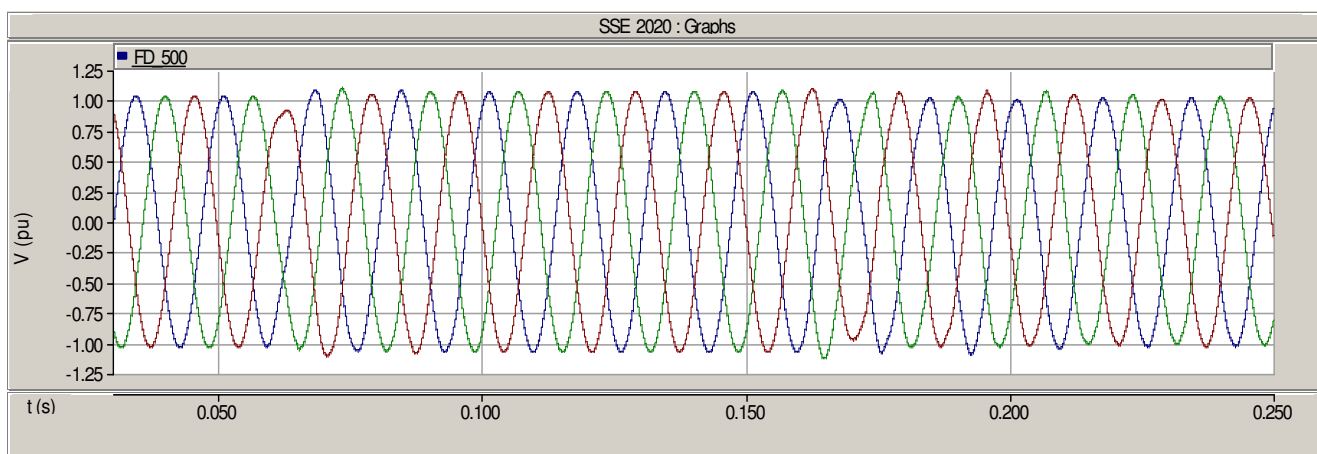


Figura V-17 Curto trífase em Xingu 500 kV, tensão em Fernão Dias 500 kV – 2L

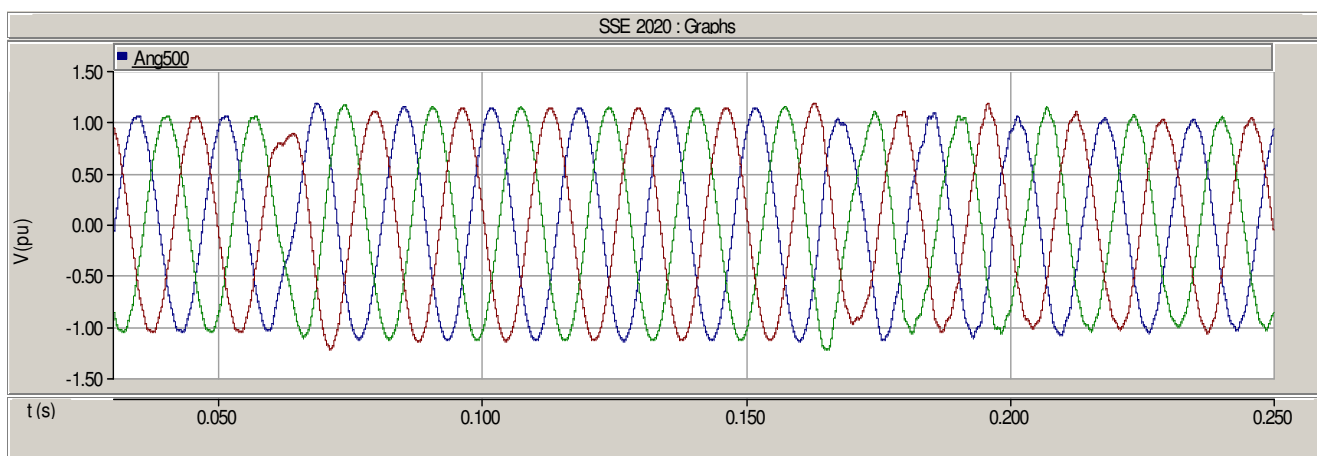


Figura V-18 Curto trifásico em Xingu 500 kV, tensão em Angra 500 kV – 2L

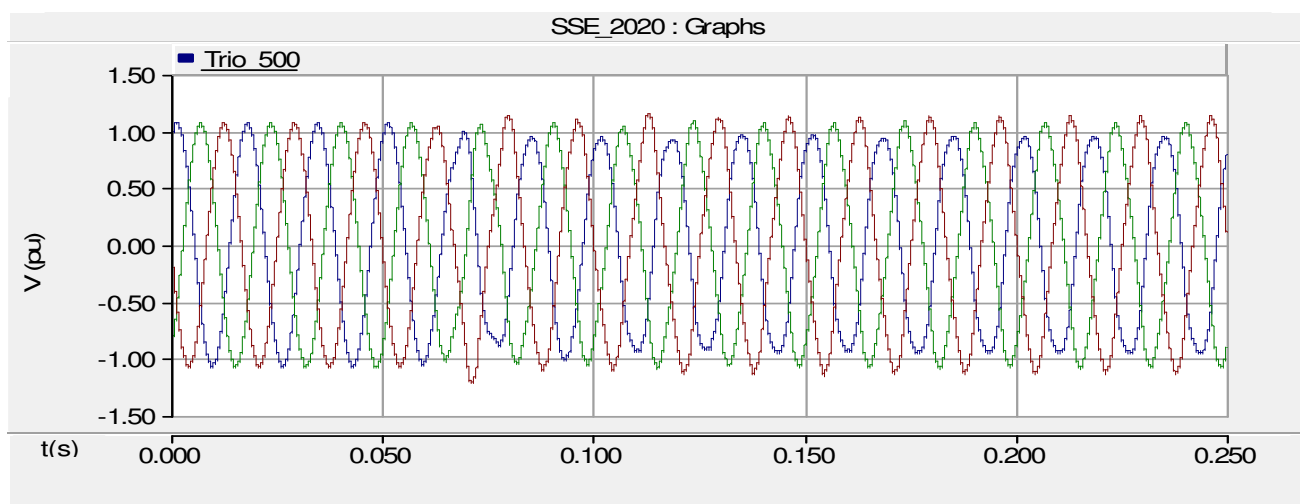


Figura V-19 Curto monofásico em Xingu 500 kV, tensão em T. Rio 500 kV – 2L

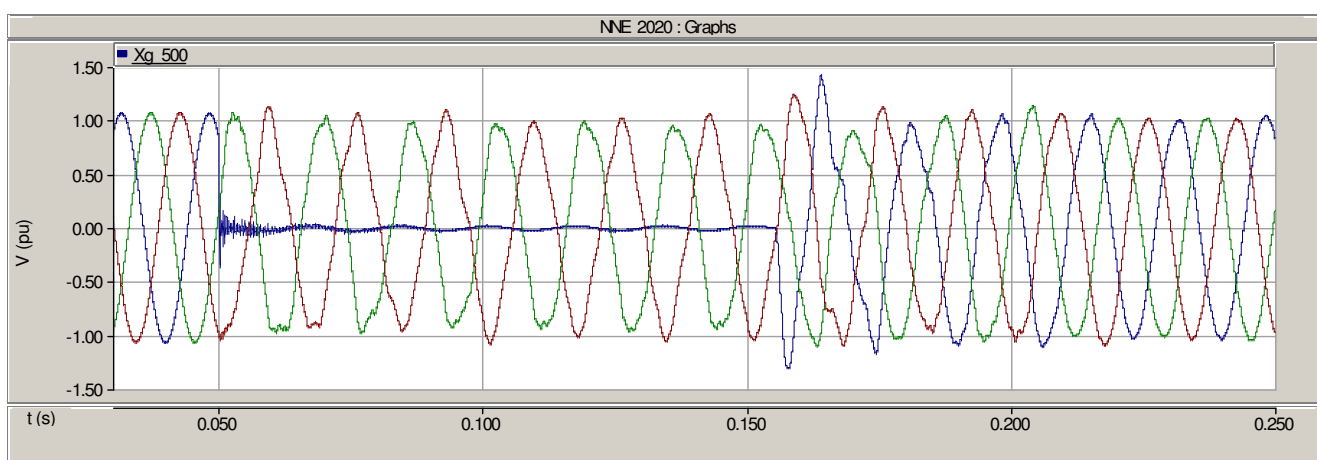


Figura V-20 Curto monofásico em Xingu 500 kV, tensão em Xingu 500 kV – 2L

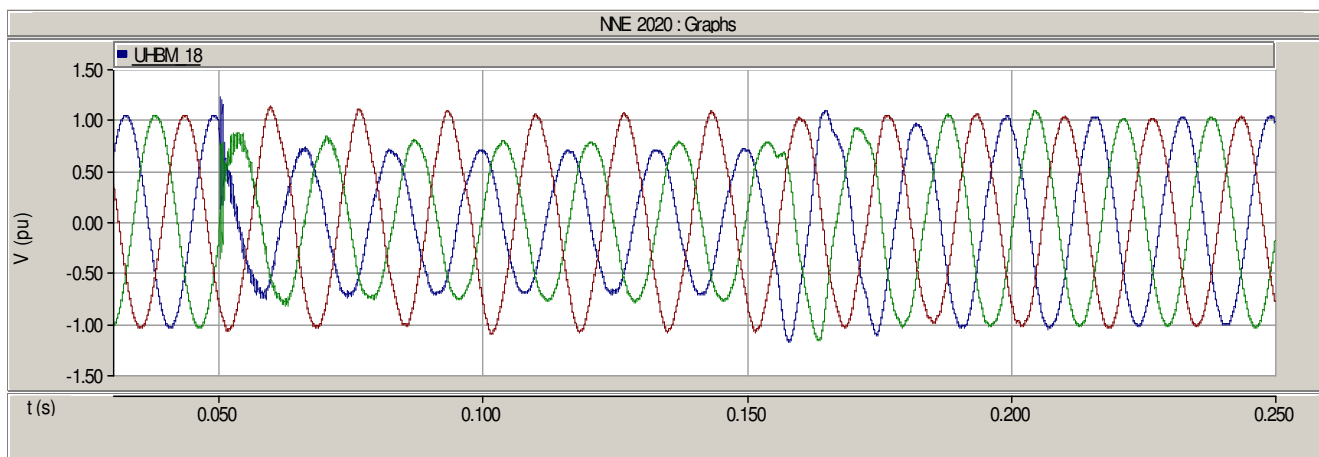


Figura V-21 Curto monofásico em Xingu 500 kV, tensão em Belo Monte 18 kV – 2L

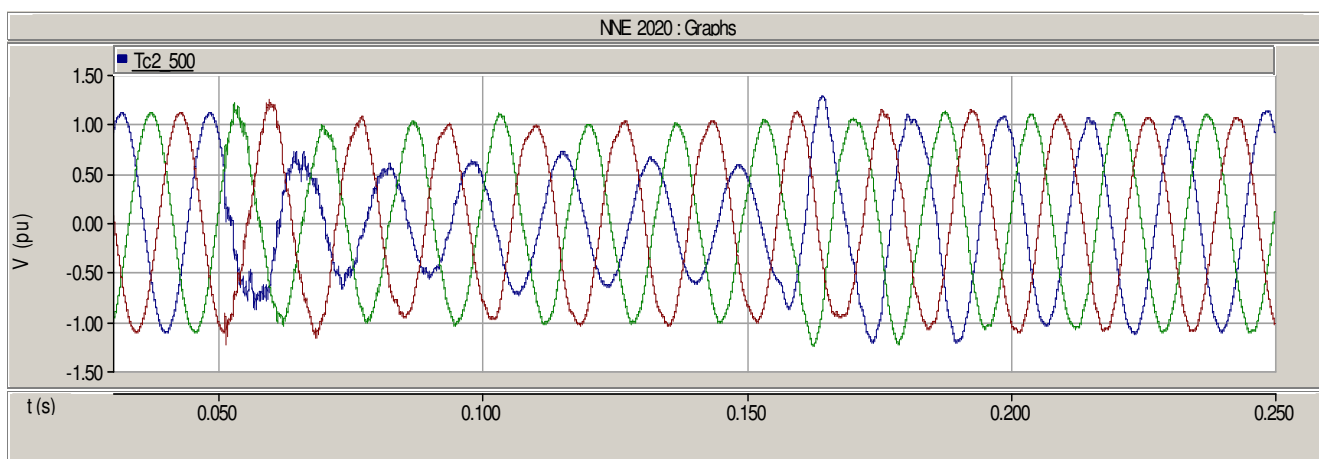


Figura V-22 Curto monofásico em Xingu 500 kV, tensão em Tucuruí 2 500 kV – 2L

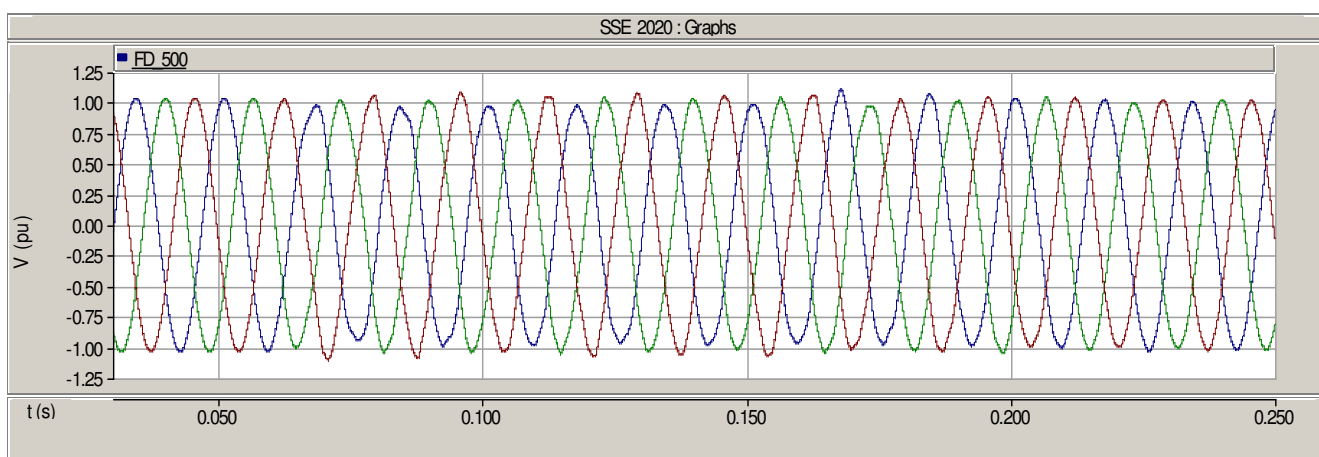


Figura V-23 Curto monofásico em Xingu 500 kV, tensão em Fernão Dias 500 kV – 2L

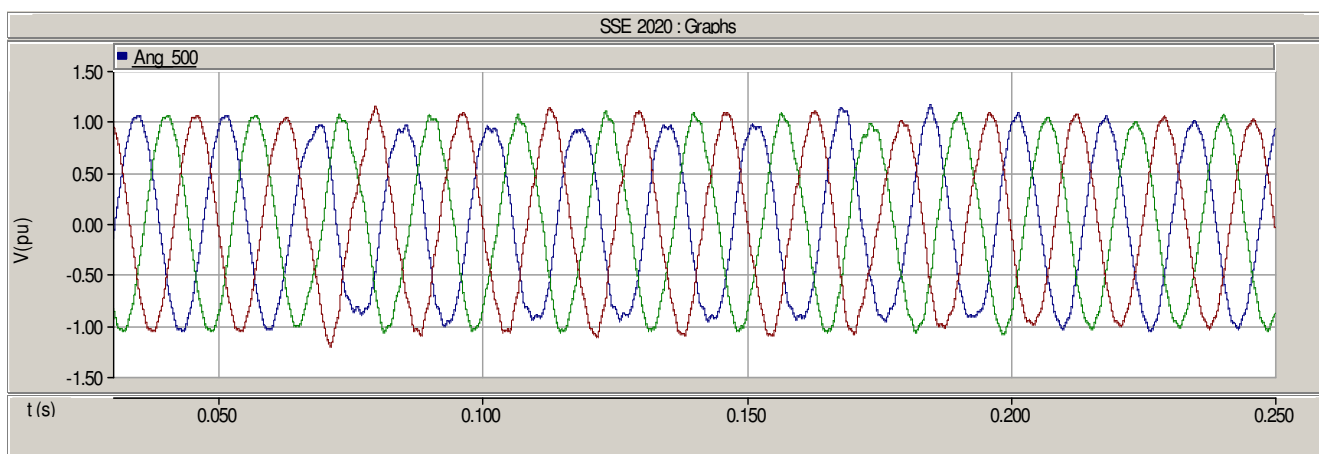


Figura V-24 Curto monofásico em Xingu 500 kV, tensão em Angra 500 kV – 2L

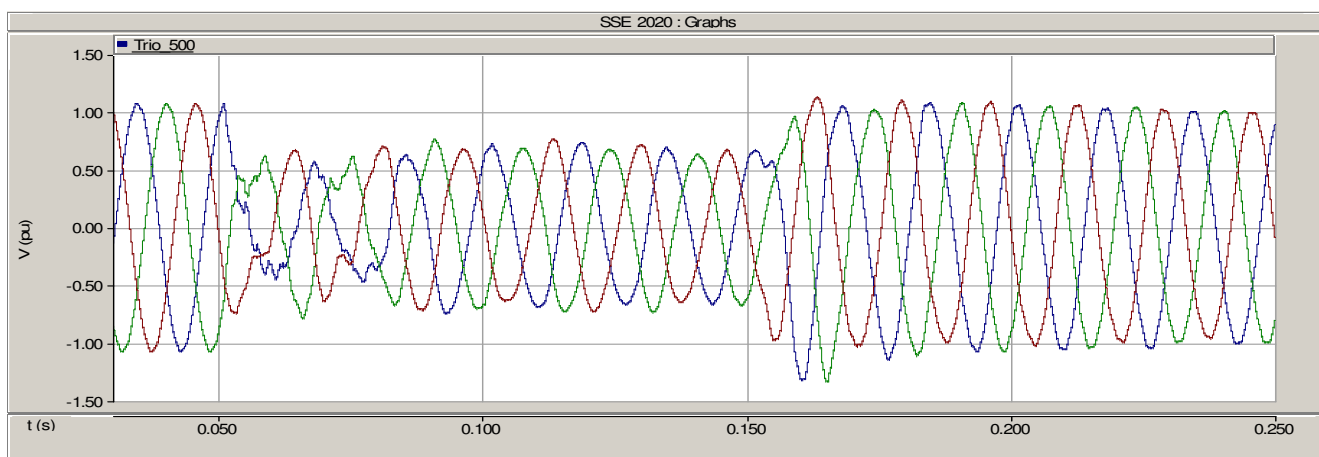


Figura V-25 Curto trifásico em F. Dias 500 kV, tensão em T. Rio 500 kV – 2L

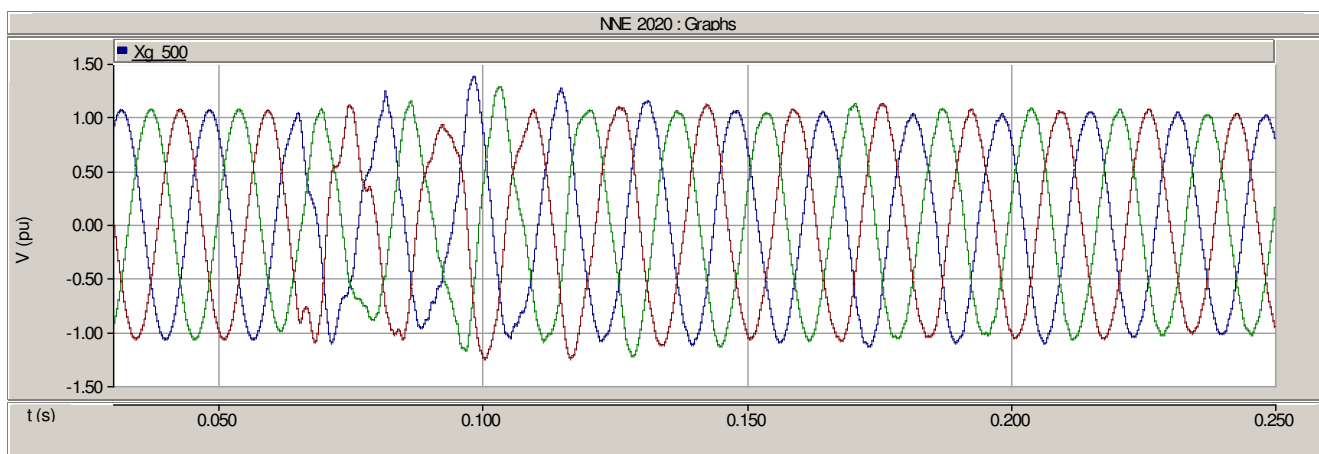


Figura V-26 Curto trifásico em F. Dias 500 kV, tensão em Xingu 500 kV – 2L

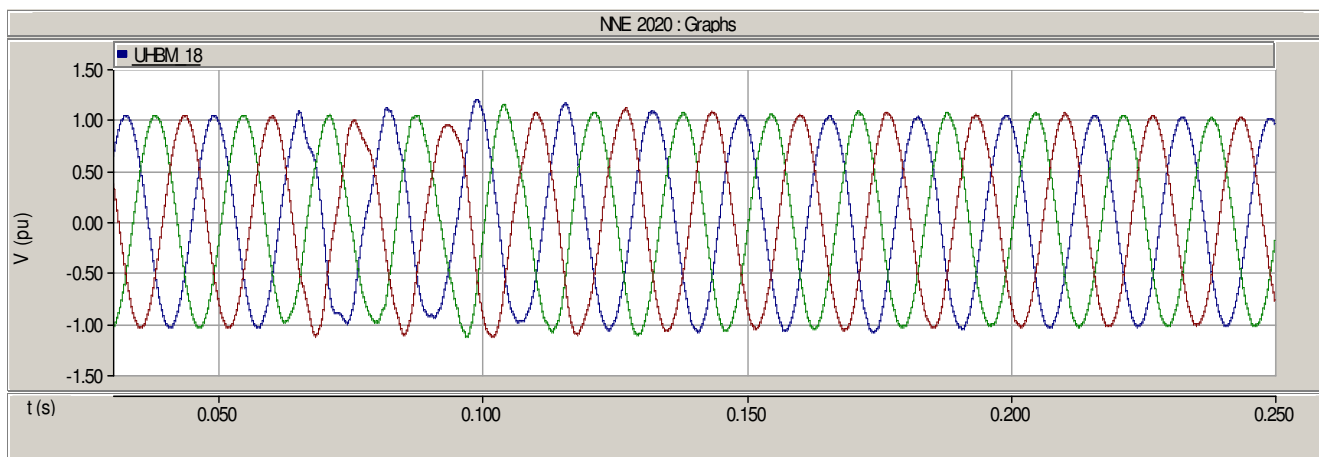


Figura V-27 Curto trifásico em F. Dias 500 kV, tensão em Belo Monte 18 kV – 2L

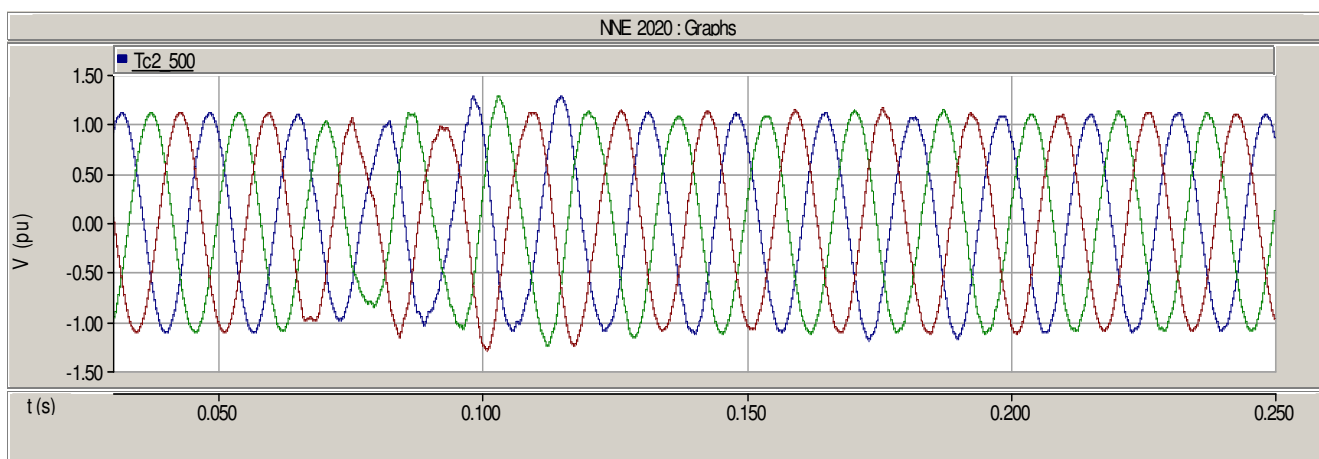


Figura V-28 Curto trifásico em F. Dias 500 kV, tensão em Tucuruí 2 500 kV – 2L

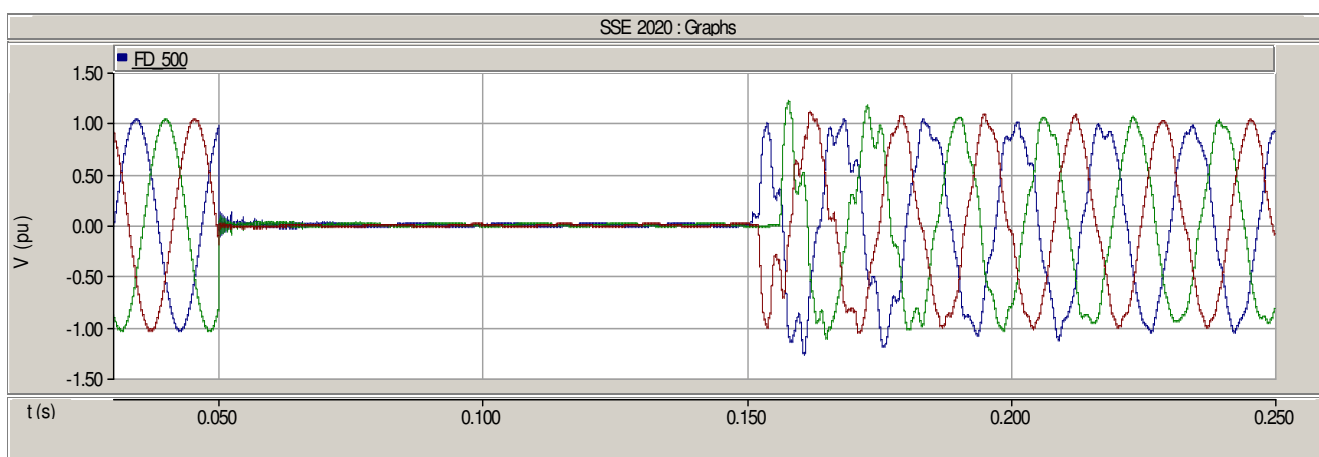


Figura V-29 Curto trifásico em F. Dias 500 kV, tensão em Fernão Dias 500 kV – 2L

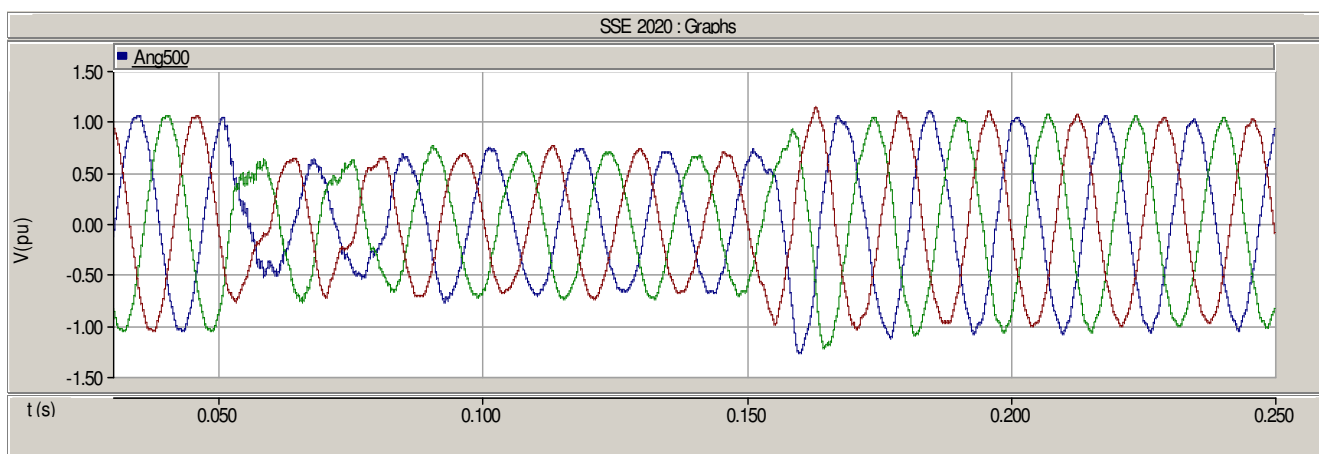


Figura V-30 Curto trifásico em F. Dias 500 kV, tensão em Angra 500 kV – 2L

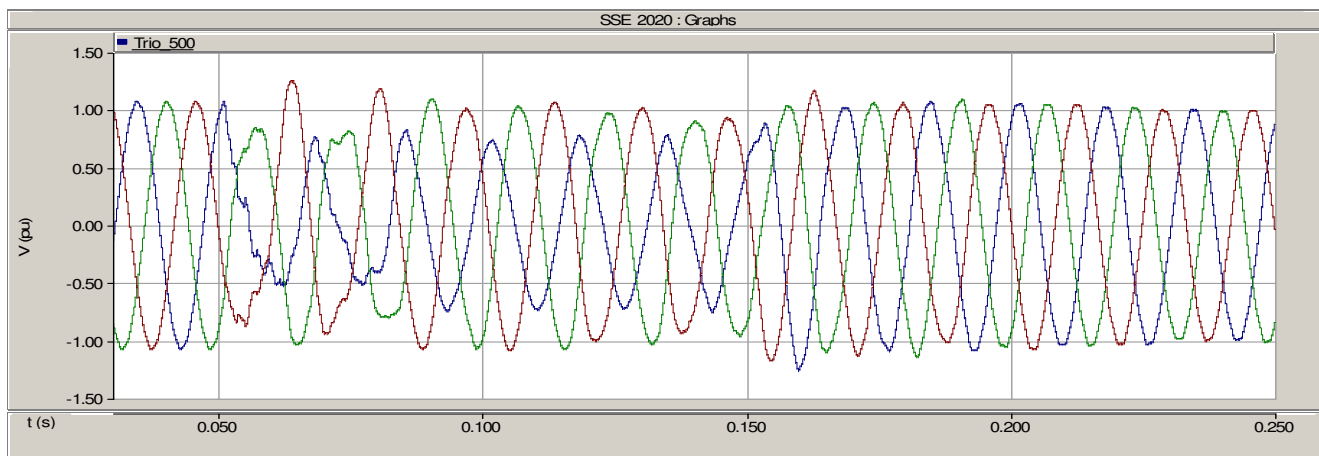


Figura V-31 Curto monofásico em F. Dias 500 kV, tensão em T. Rio 500 kV – 2L

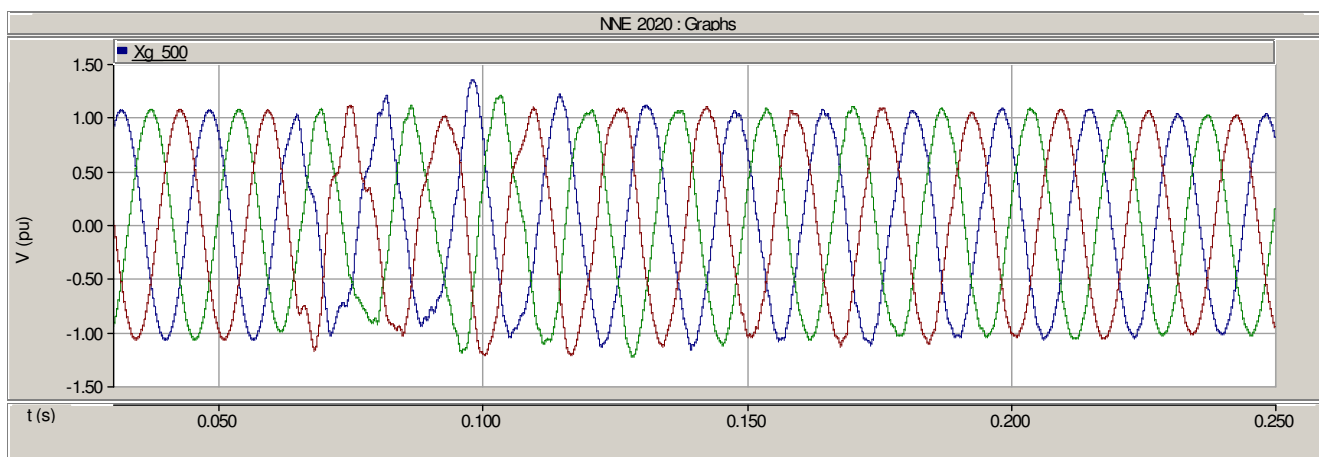


Figura V-32 Curto monofásico em F. Dias 500 kV, tensão em Xingu 500 kV – 2L

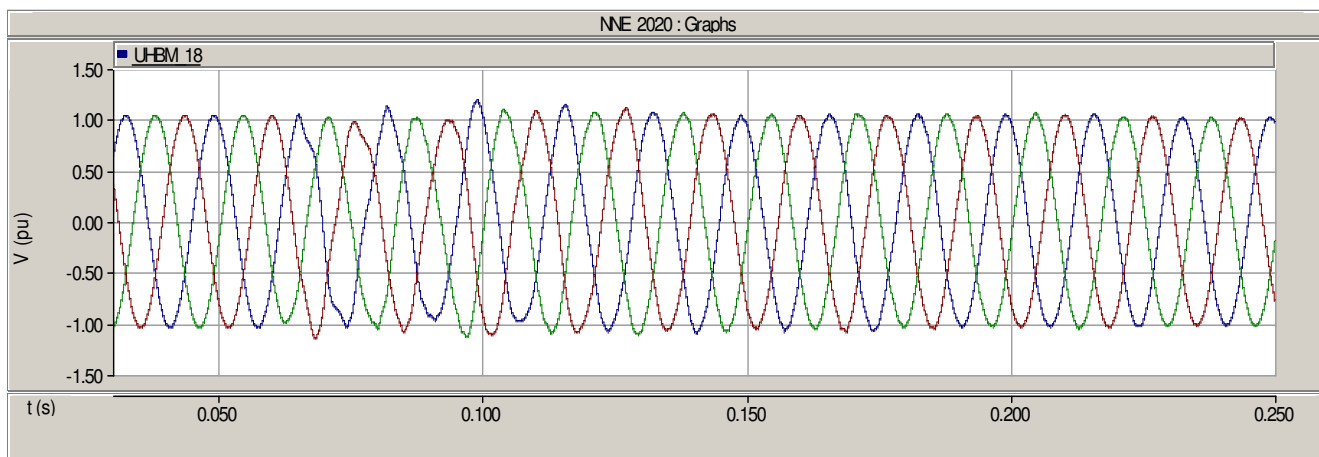


Figura V-33 Curto monofásico em F. Dias 500 kV, tensão em Belo Monte 18 kV – 2L

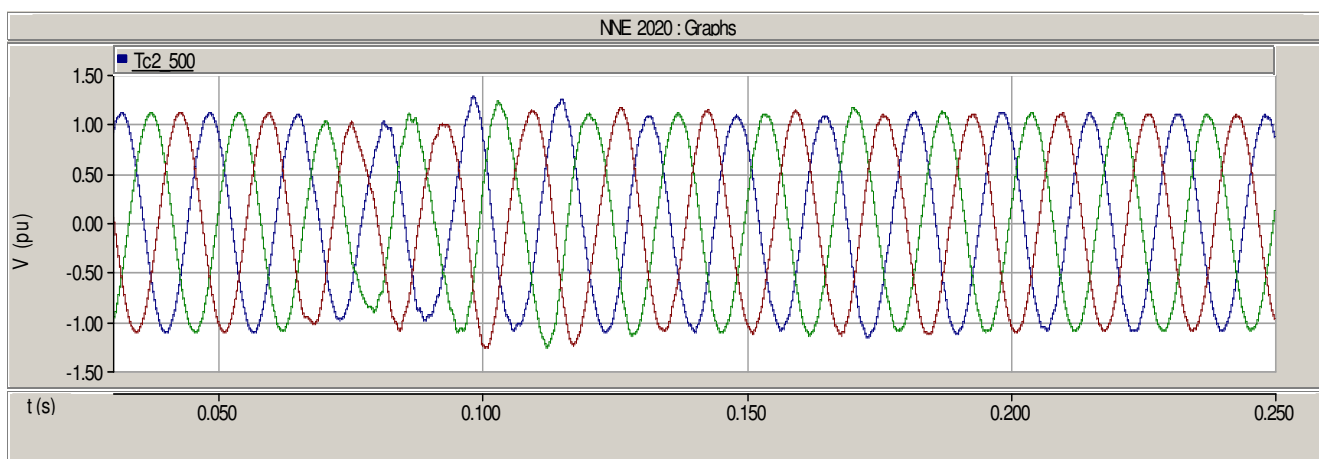


Figura V-34 Curto monofásico em F. Dias 500 kV, tensão em Tucuruí 2 500 kV – 2L

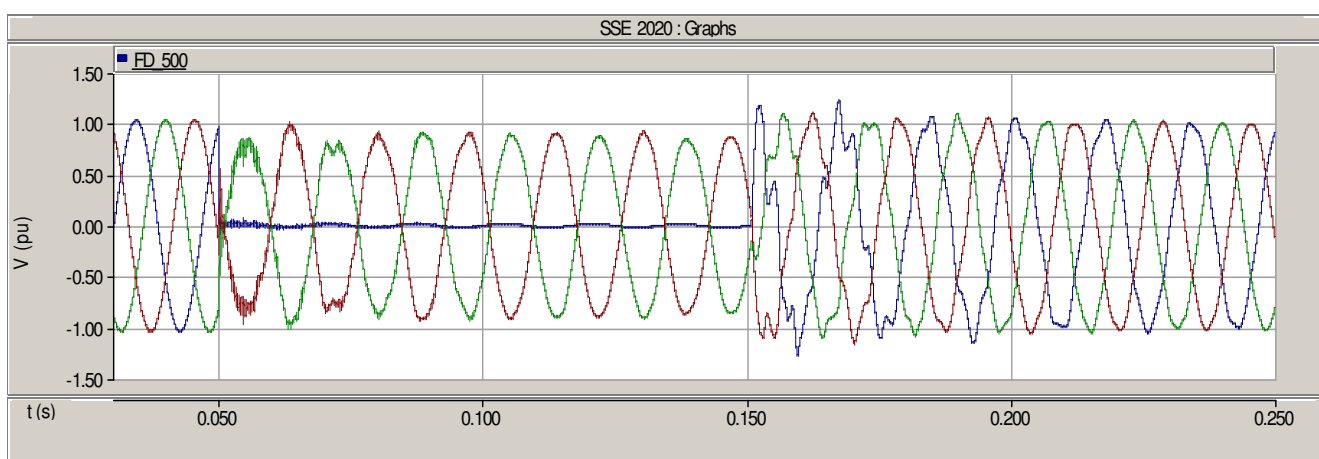


Figura V-35 Curto monofásico em F. Dias 500 kV, tensão em Fernão Dias 500 kV – 2L

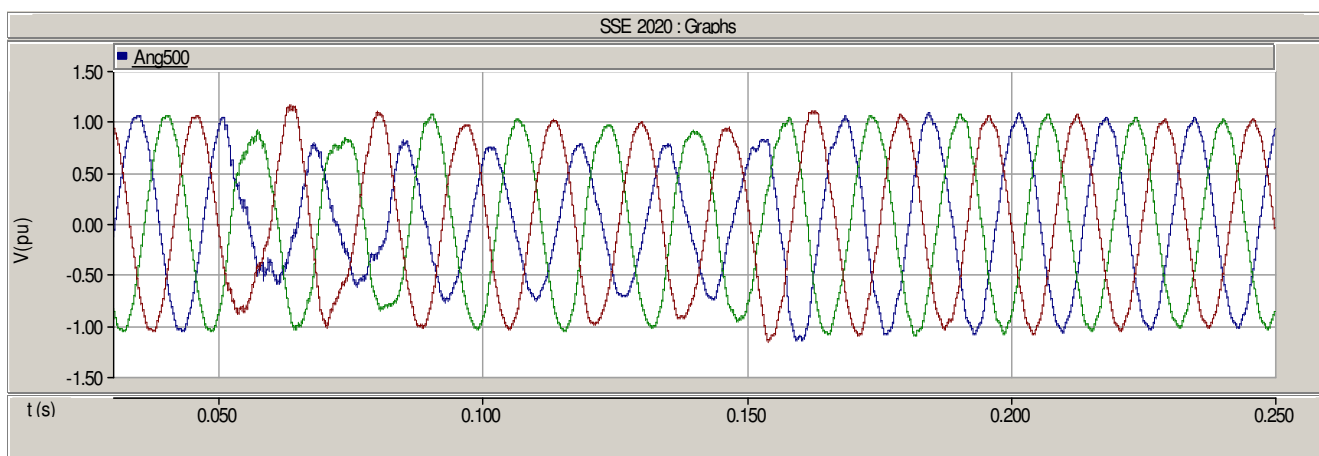


Figura V-36 Curto monofásico em F. Dias 500 kV, tensão em Angra 500 kV – 2L

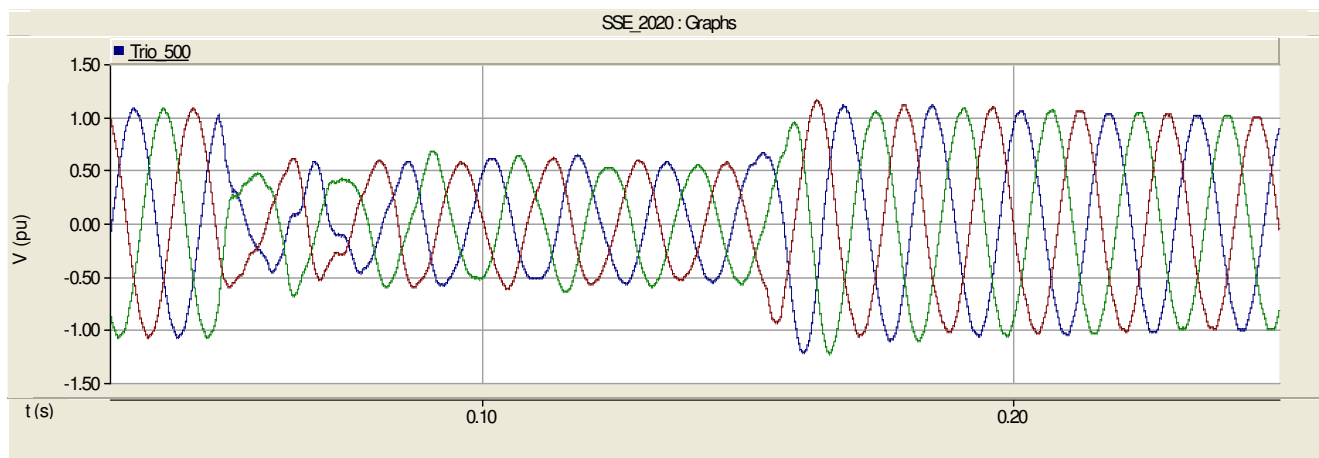


Figura V-37 Curto trifásico em Angra 500 kV, tensão em T. Rio 500 kV – 2L

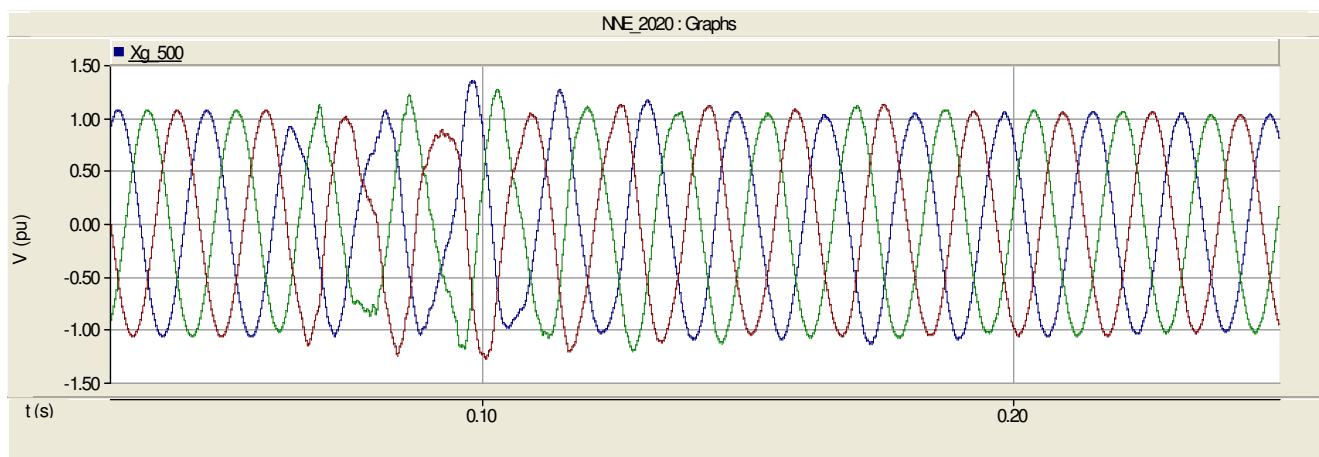


Figura V-38 Curto trifásico em Angra 500 kV, tensão em Xingu 500 kV – 2L

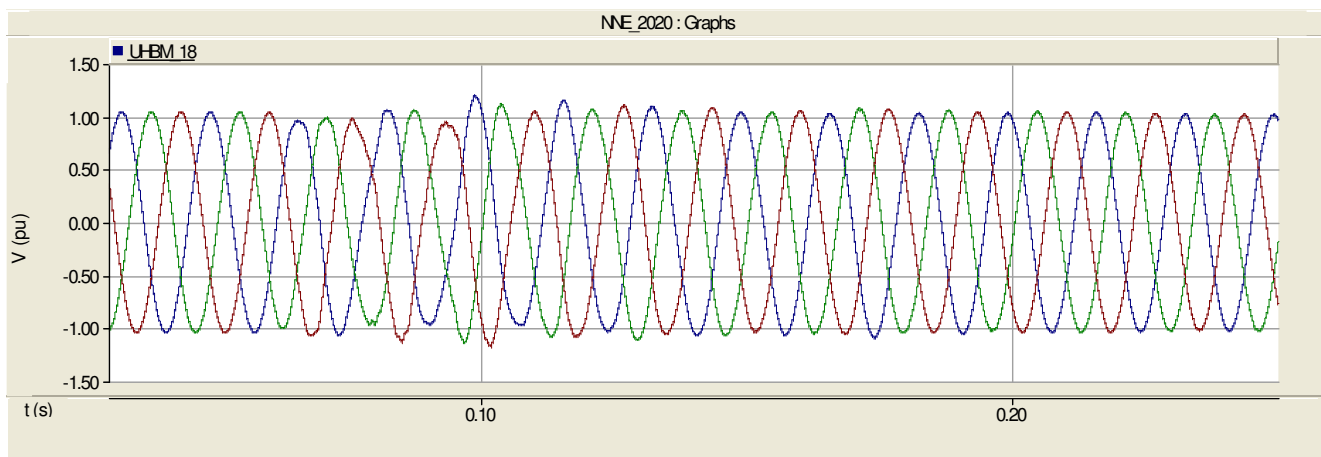


Figura V-39 Curto trífase em Angra 500 kV, tensão em Belo Monte 18 kV – 2L

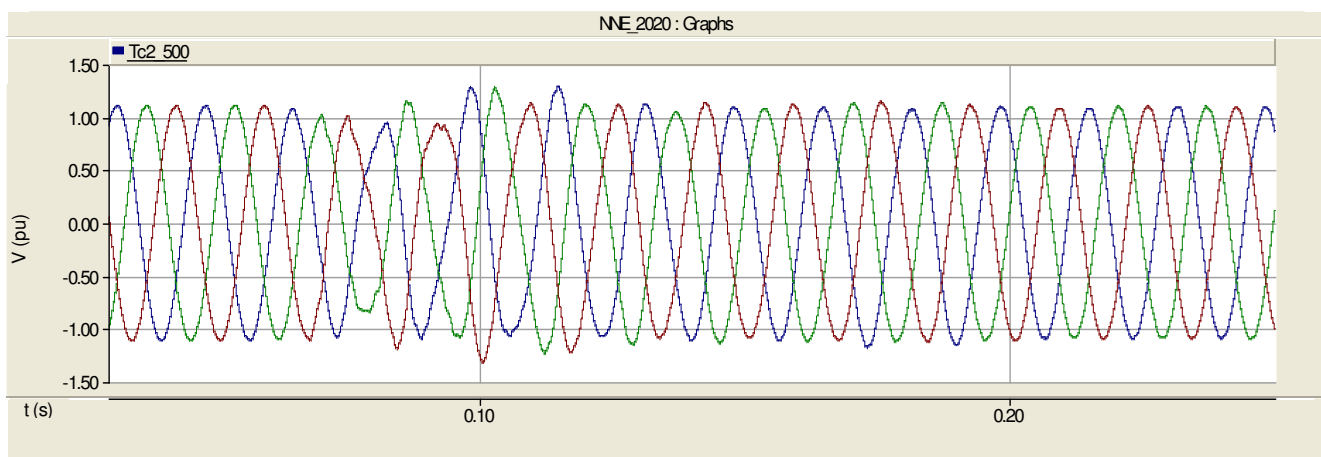


Figura V-40 Curto trífase em Angra 500 kV, tensão em Tucuruí 2 500 kV – 2L

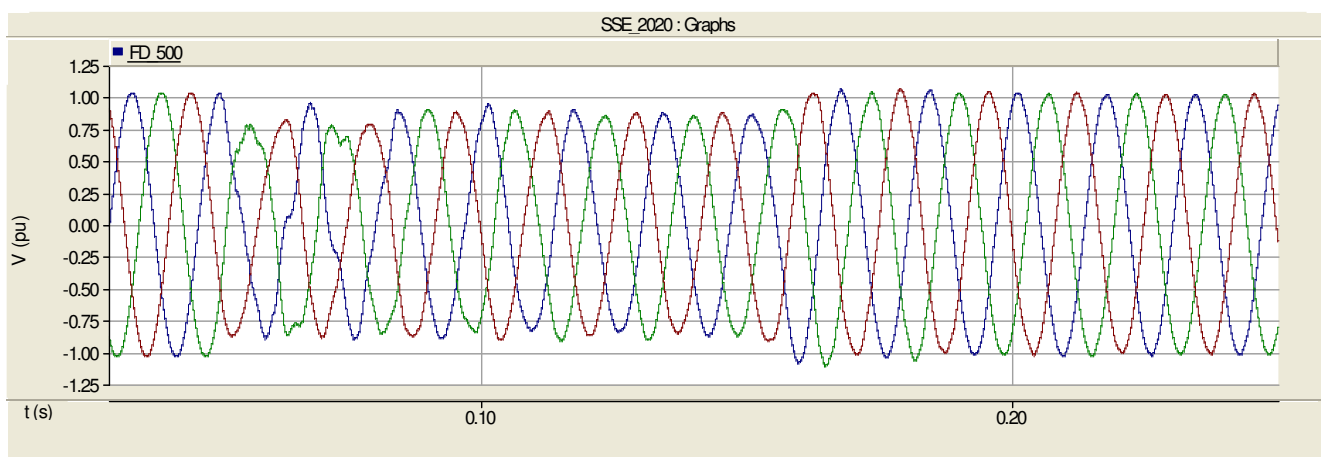


Figura V-41 Curto trífase em Angra 500 kV, tensão em Fernão Dias 500 kV – 2L

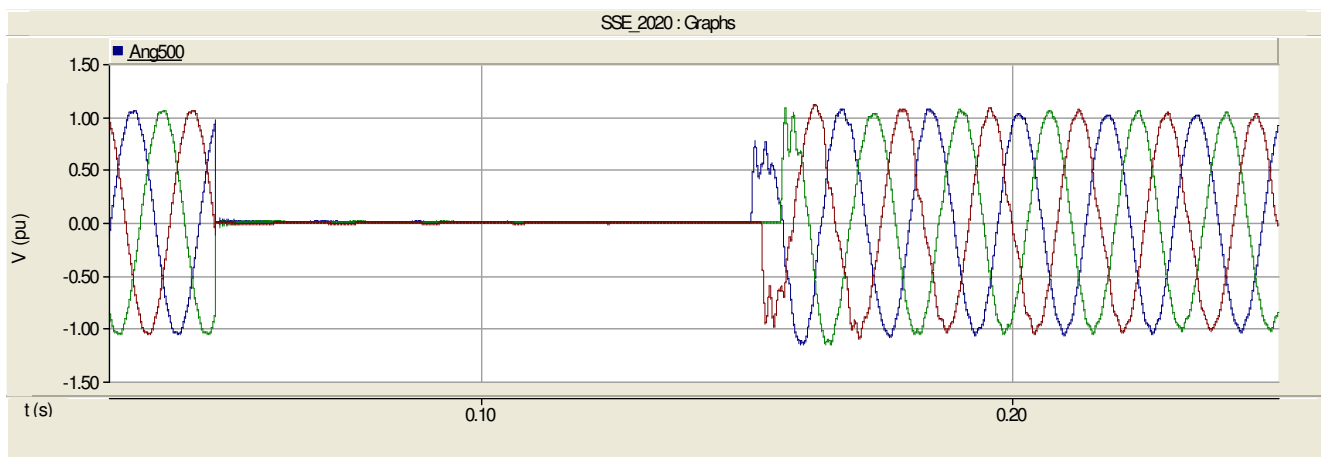


Figura V-42 Curto trifásico em Angra 500 kV, tensão em Angra 500 kV – 2L

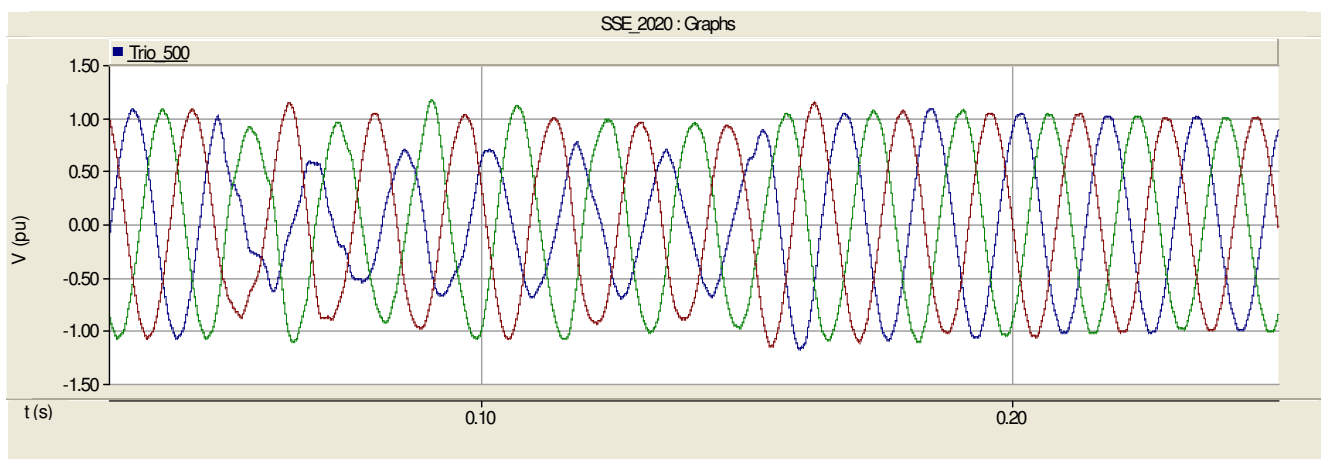


Figura V-43 Curto monofásico em Angra 500 kV, tensão em T. Rio 500 kV – 2L

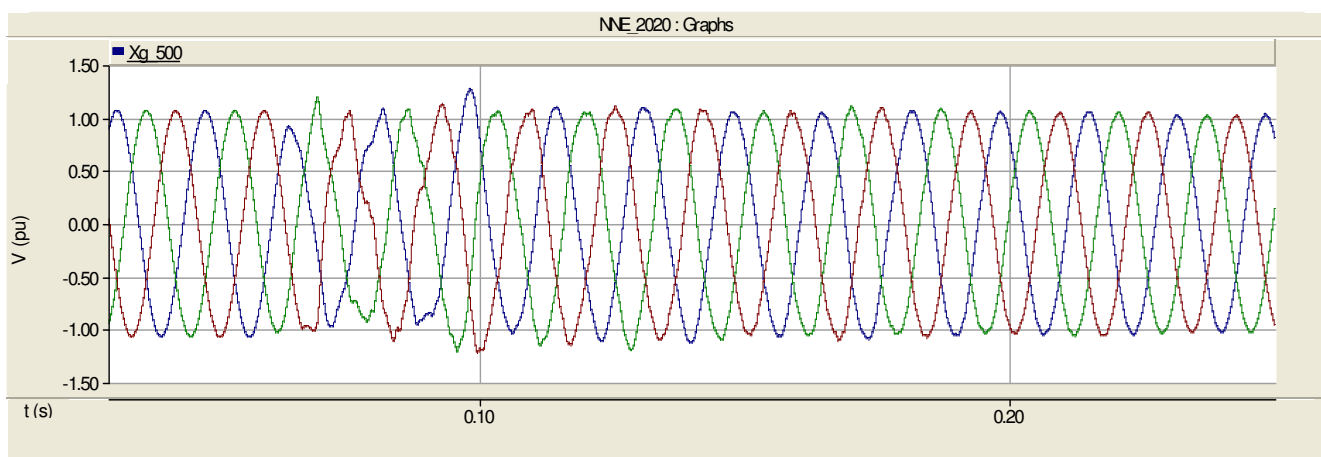


Figura V-44 Curto monofásico em Angra 500 kV, tensão em Xingu 500 kV – 2L

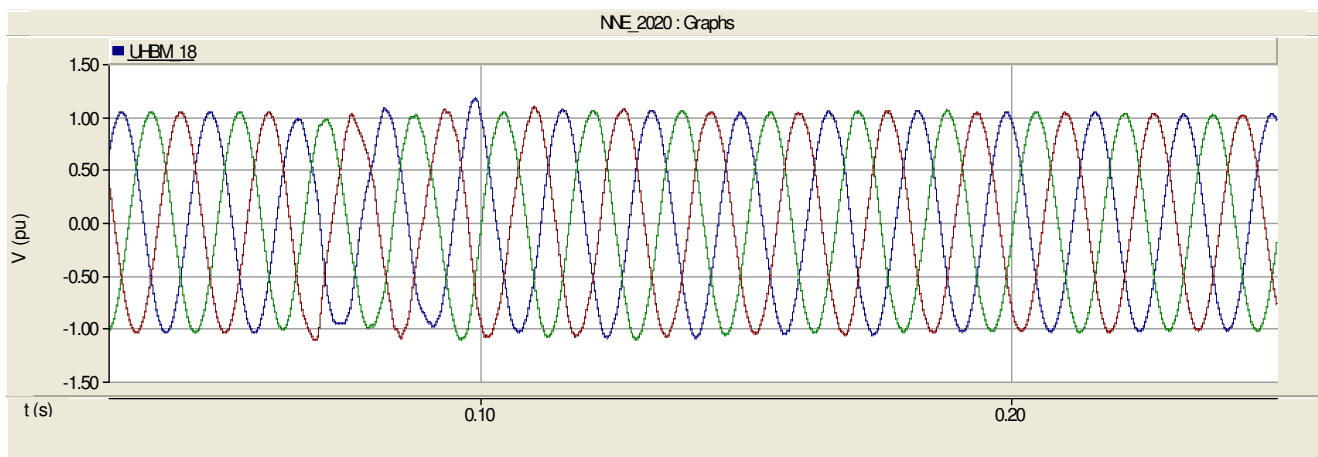


Figura V-45 Curto monofásico em Angra 500 kV, tensão em Belo Monte 18 kV – 2L

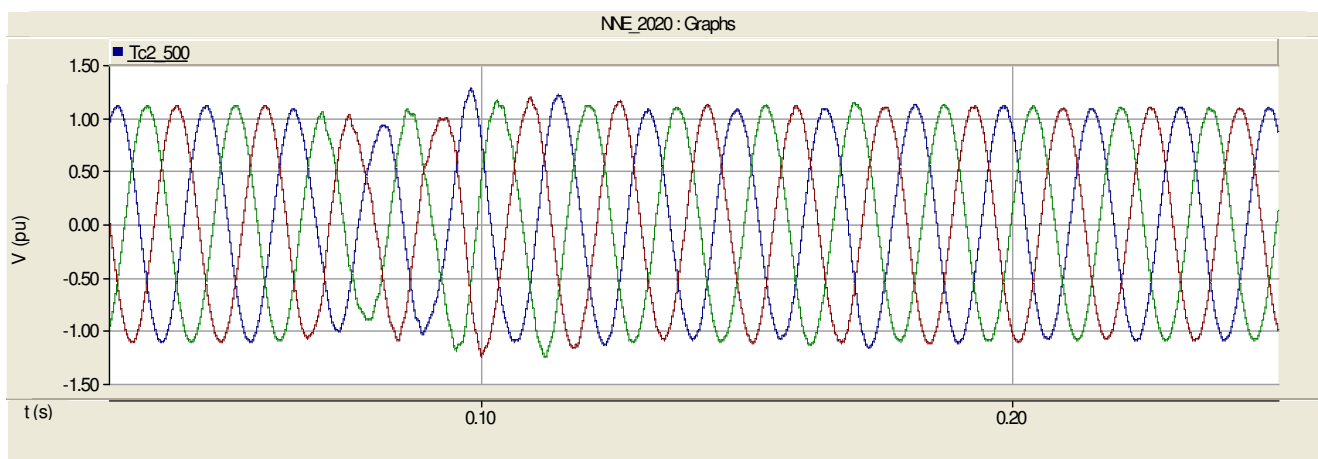


Figura V-46 Curto monofásico em Angra 500 kV, tensão em Tucuruí 2 500 kV – 2L

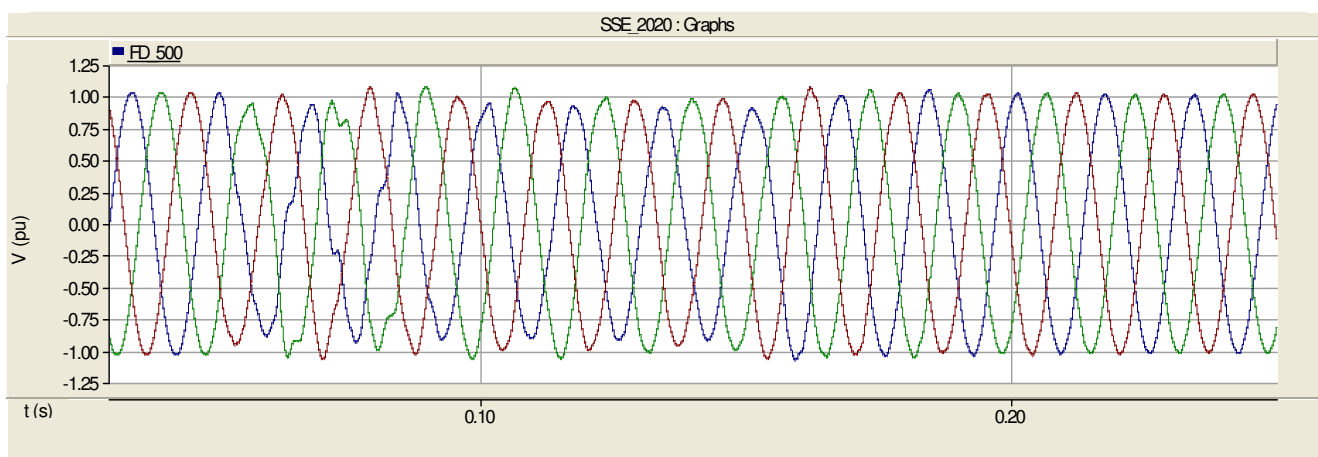


Figura V-47 Curto monofásico em Angra 500 kV, tensão em Fernão Dias 500 kV – 2L

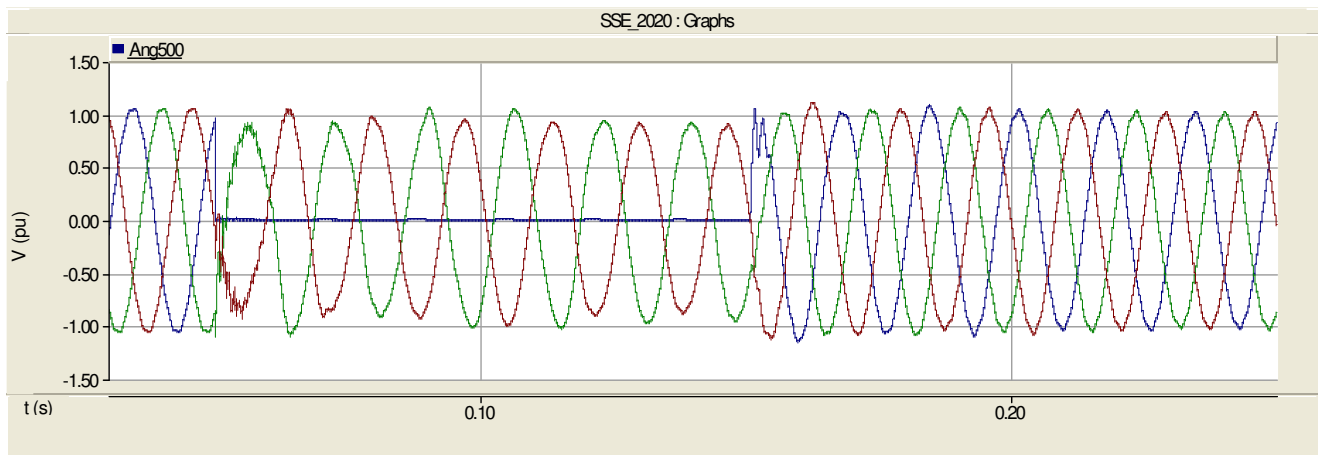


Figura V-48 Curto monofásico em Angra 500 kV, tensão em Angra 500 kV – 2L

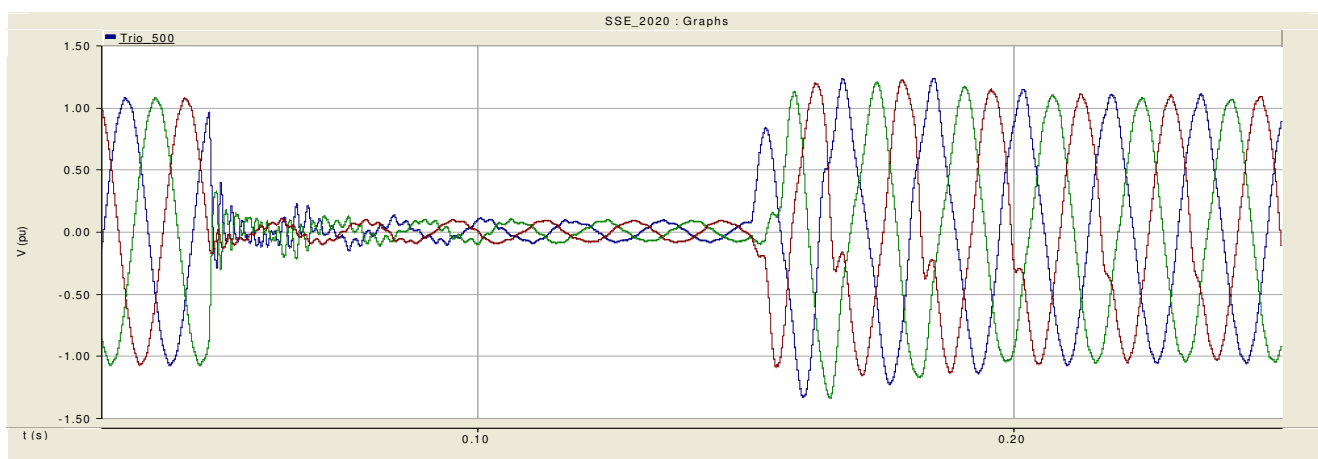


Figura V-49 Curto trifásico em N. Iguaçu 500 kV, tensão em T. Rio 500 kV – 2L

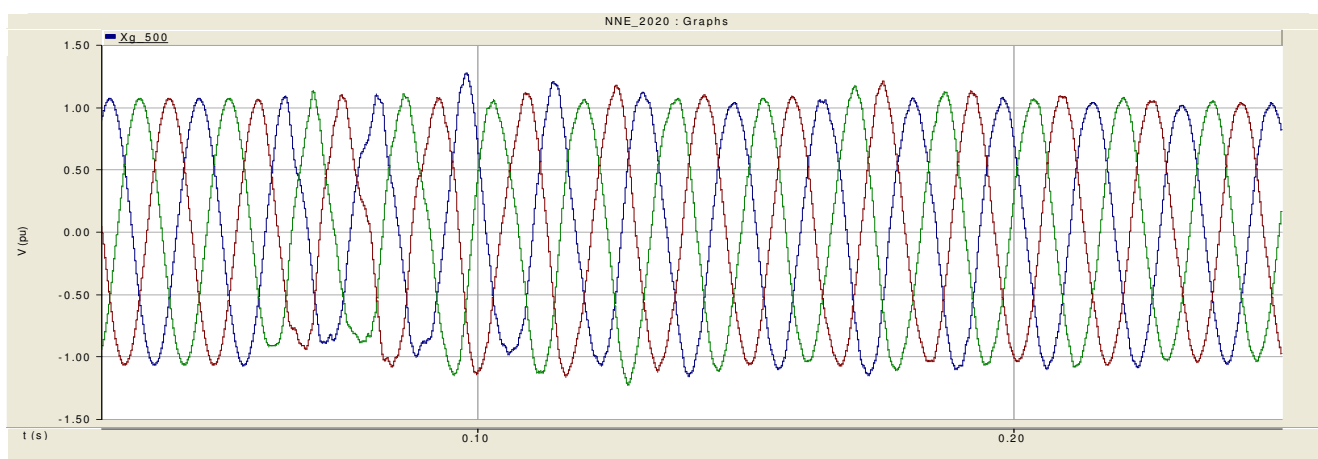


Figura V-50 Curto trifásico em N. Iguaçu 500 kV, tensão em Xingu 500 kV – 2L

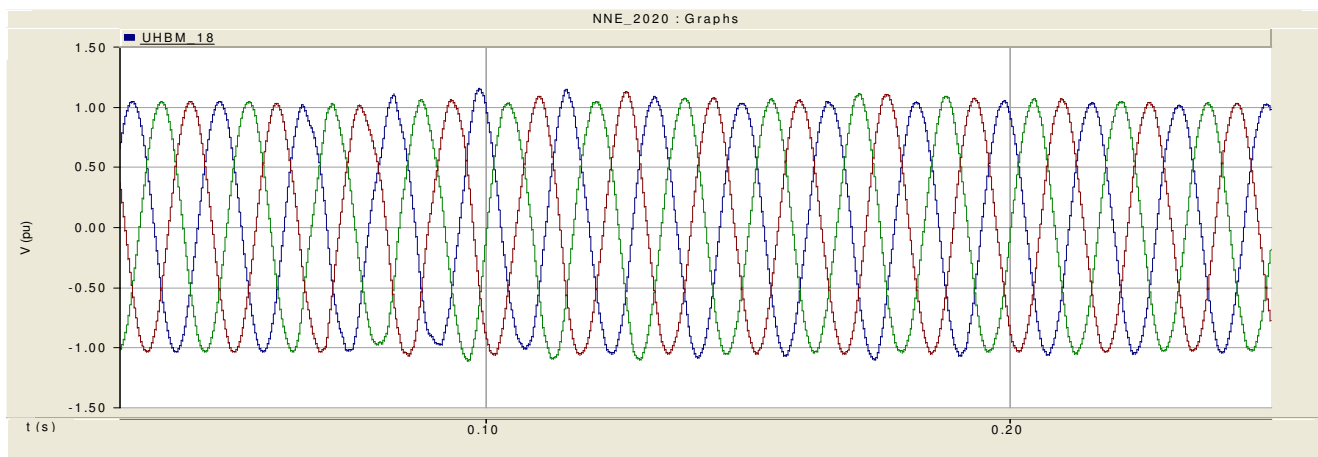


Figura V-51 Curto trifásico em N. Iguazu 500 kV, tensão em Belo Monte 18 kV – 2L

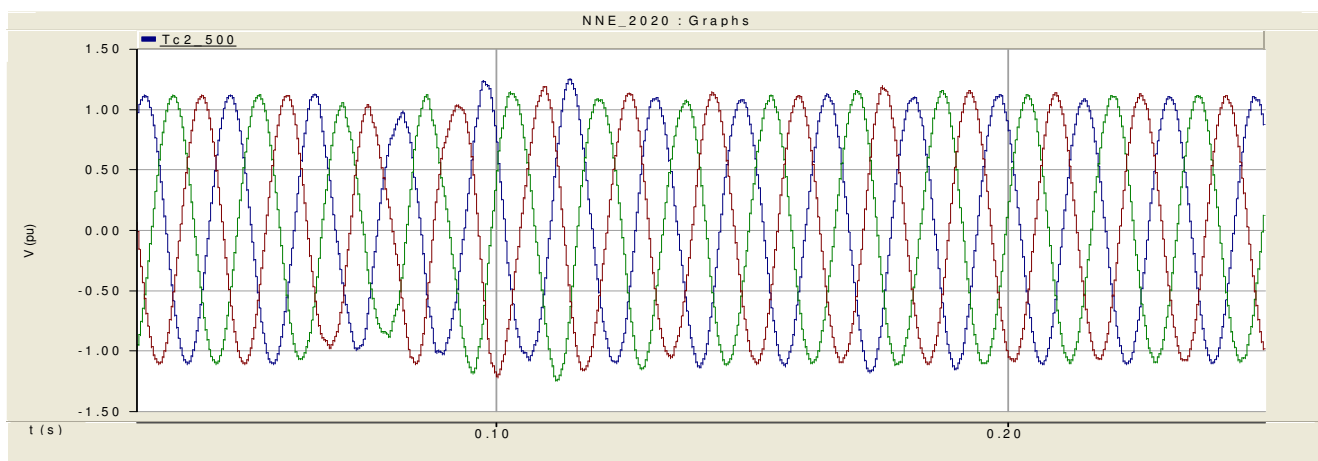


Figura V-52 Curto trifásico em N. Iguazu 500 kV, tensão em Tucuruí 2 500 kV – 2L

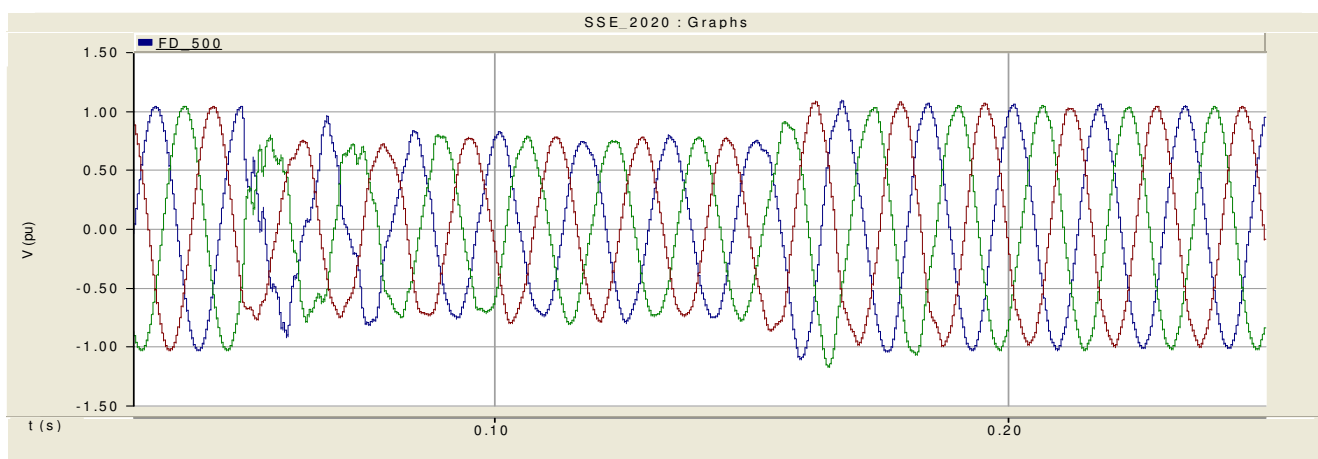


Figura V-53 Curto trifásico em N. Iguazu 500 kV, tensão em Fernão Dias 500 kV – 2L

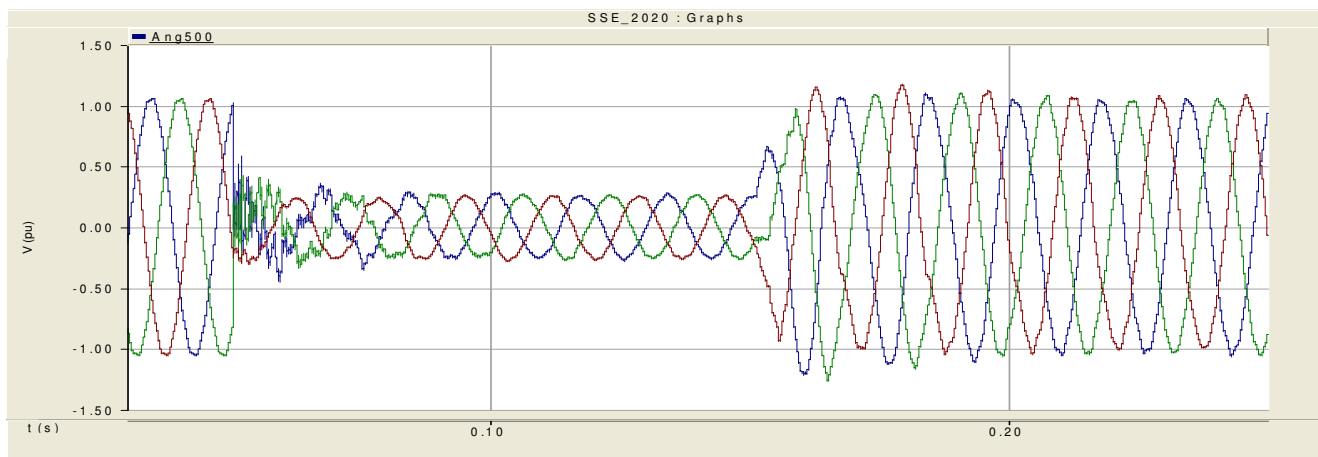


Figura V-54 Curto trifásico em N. Iguazu 500 kV, tensão em Angra 500 kV – 2L

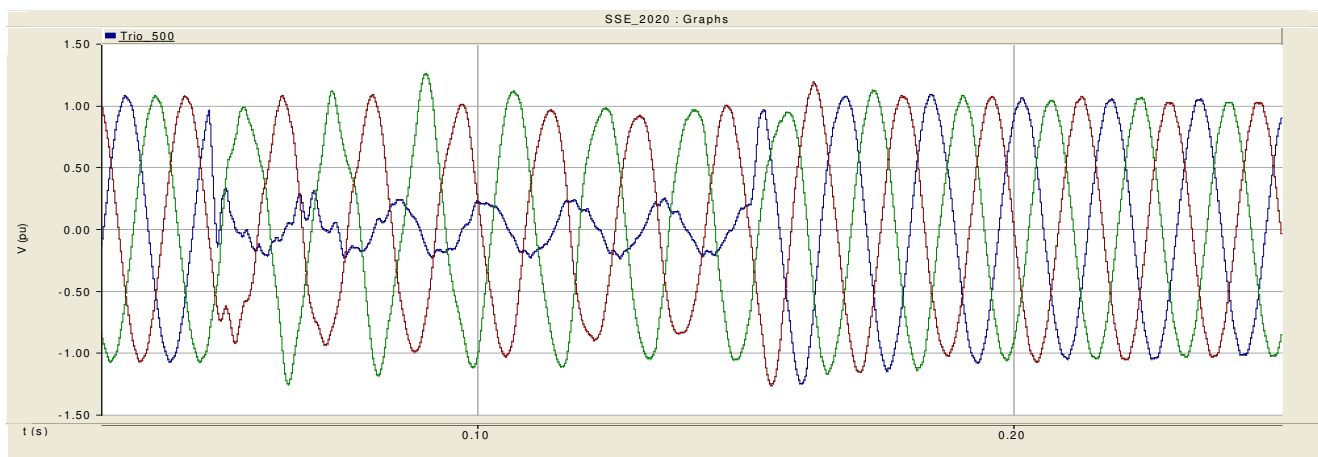


Figura V-55 Curto monofásico em N. Iguazu 500 kV, tensão em T. Rio 500 kV – 2L

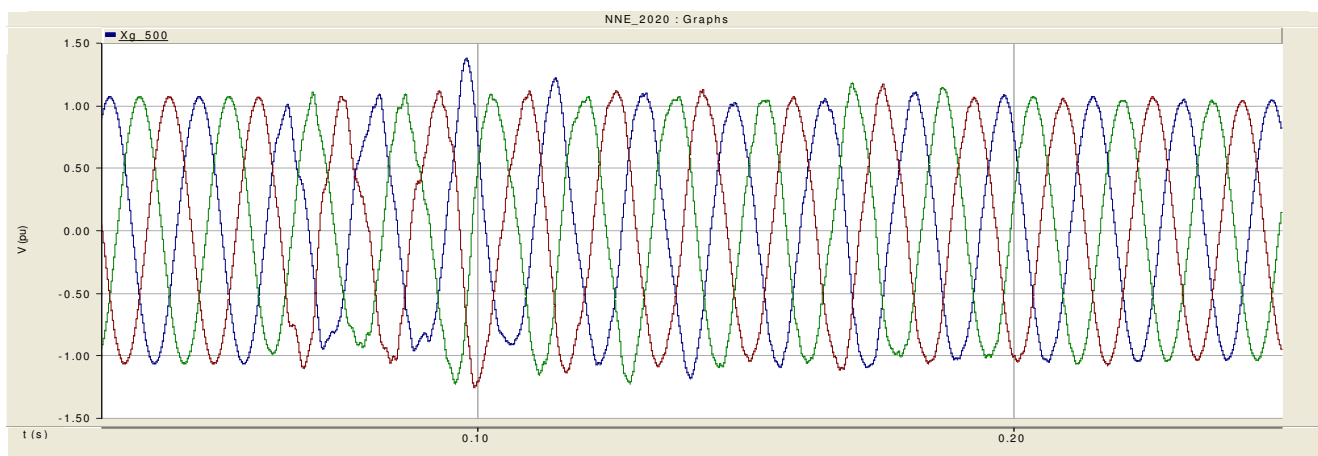


Figura V-56 Curto monofásico em N. Iguazu 500 kV, tensão em Xingu 500 kV – 2L

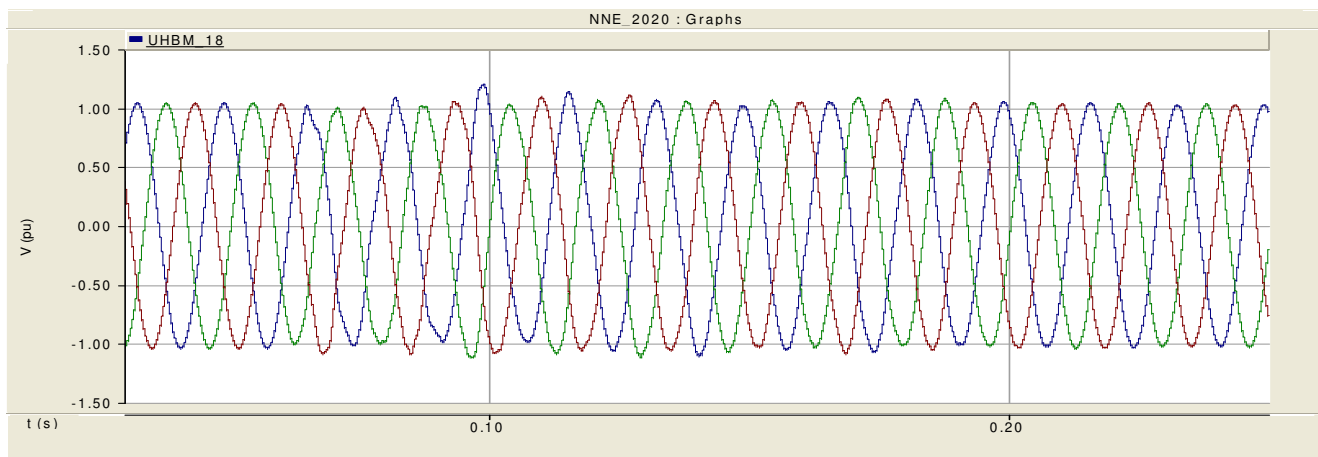


Figura V-57 Curto monofásico em N. Iguaçu 500 kV, tensão em Belo Monte 18 kV – 2L

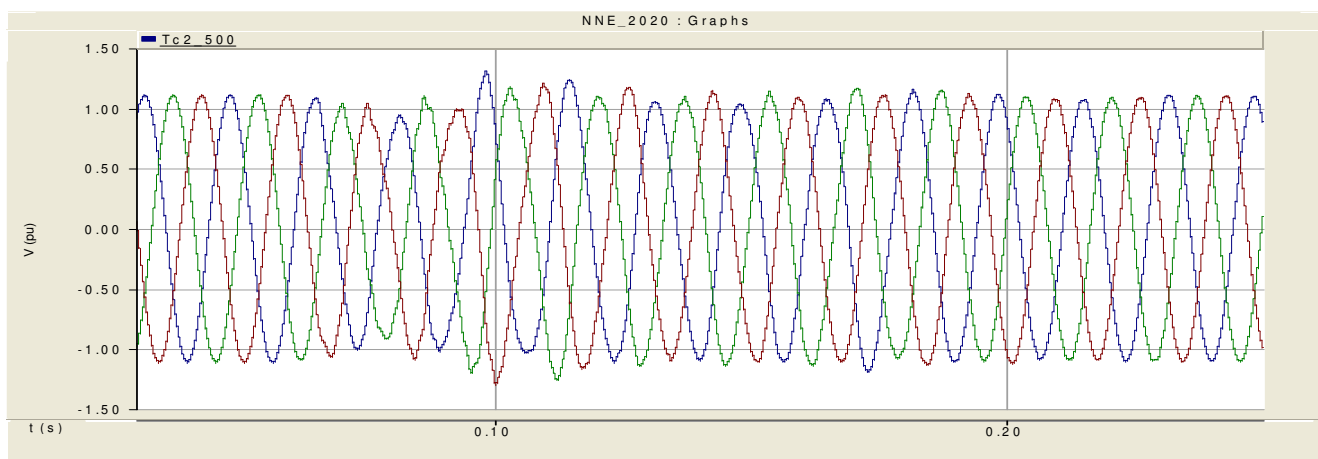


Figura V-58 Curto monofásico em N. Iguaçu 500 kV, tensão em Tucuruí 2 500 kV – 2L

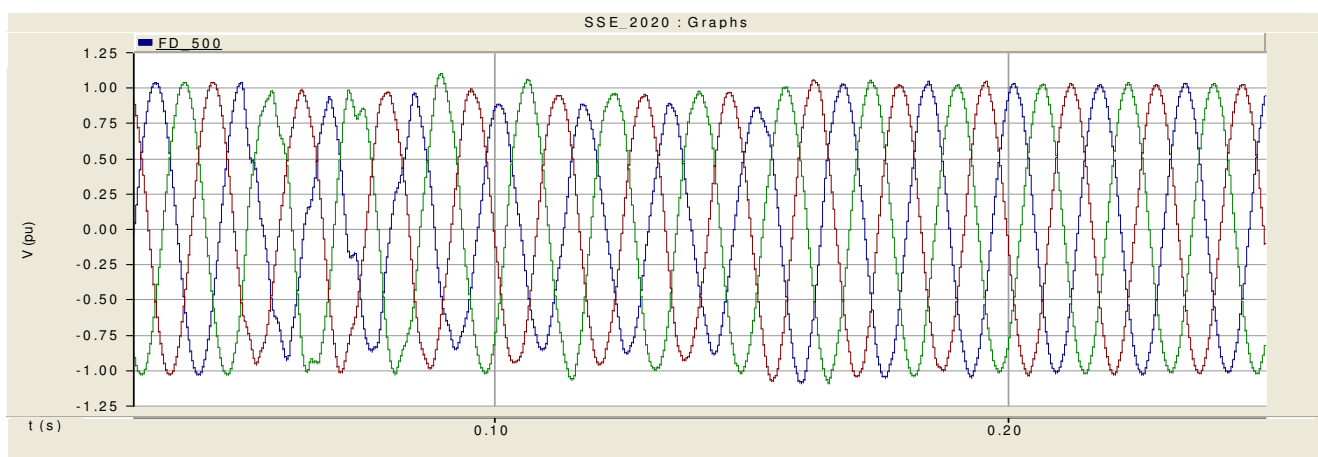


Figura V-59 Curto monofásico em N. Iguaçu 500 kV, tensão em Fernão Dias 500 kV – 2L

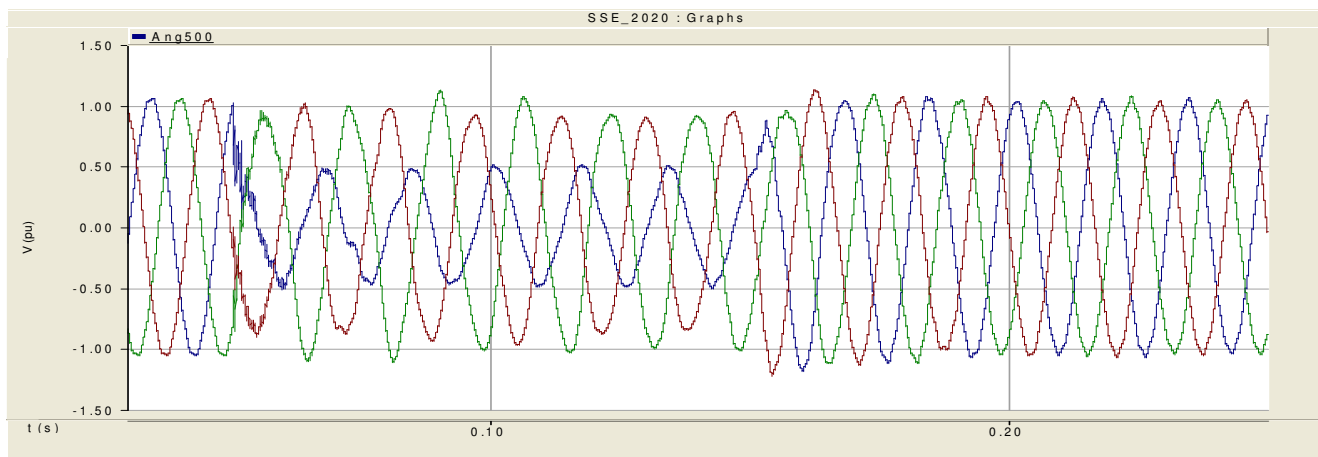


Figura V-60 Curto monofásico em N. Iguaçu 500 kV, tensão em Angra 500 kV – 2L

V.1.2 Recuperação da potência do bipolo

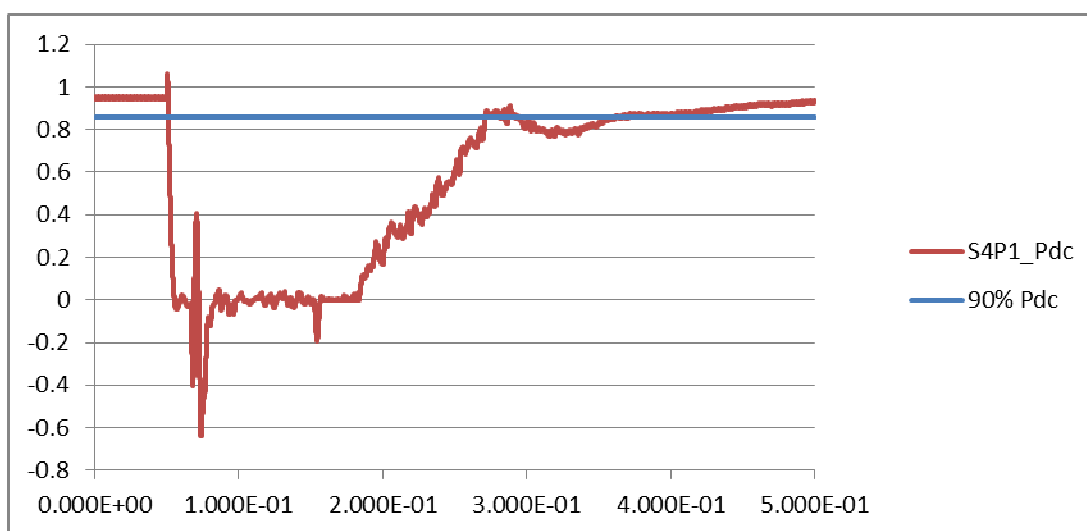


Figura V-61 Curto trifásico no T. Rio 500 kV, potência CC em T. Rio – 2L

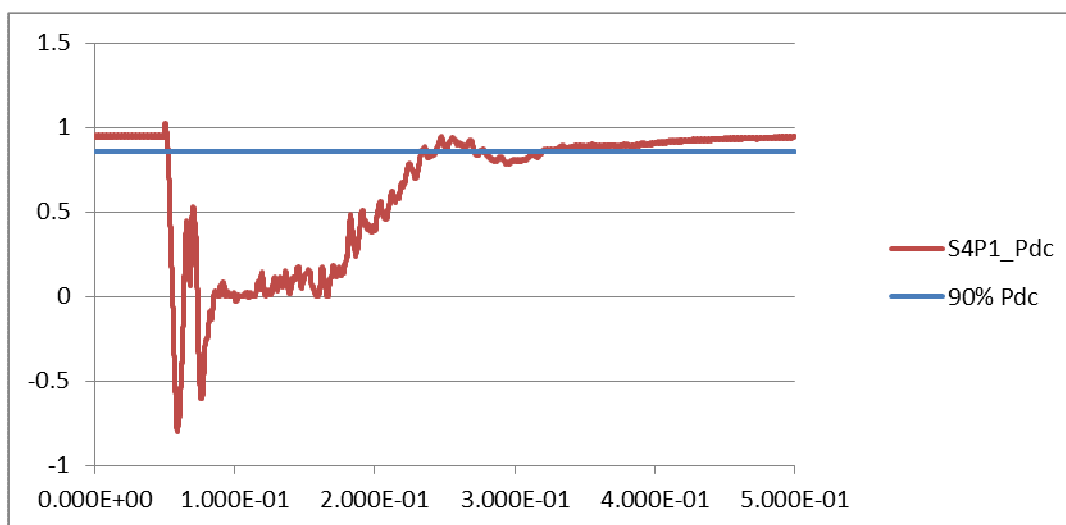


Figura V-62 Curto monofásico no T. Rio 500 kV, potência CC em T. Rio – 2L

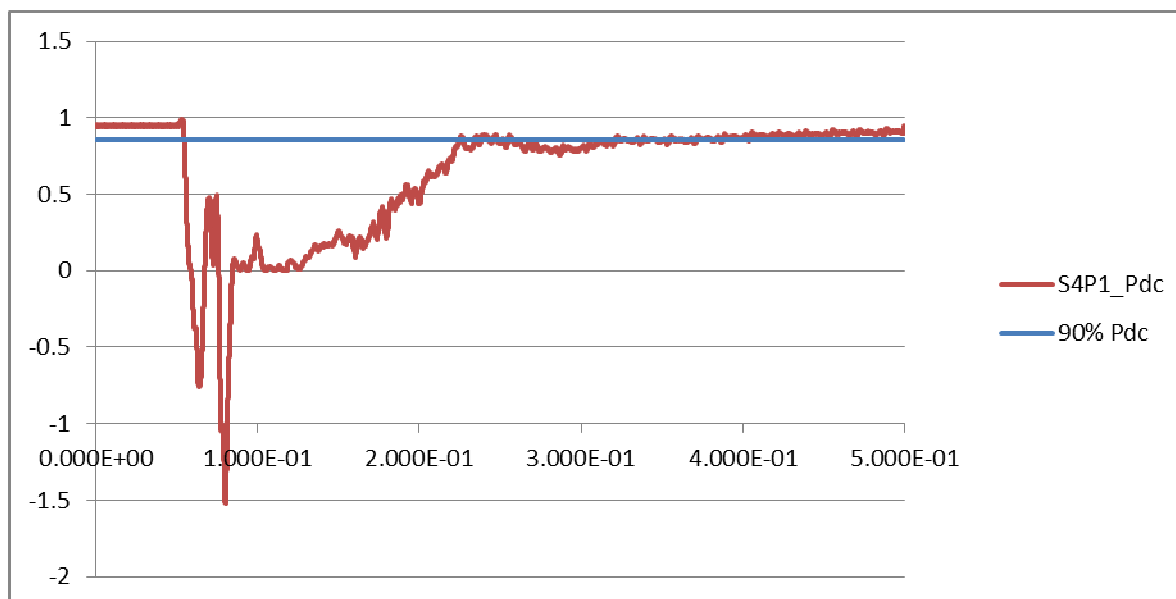


Figura V-63 Curto trifásico em F. Dias 500 kV, potência CC em T. Rio – 2L

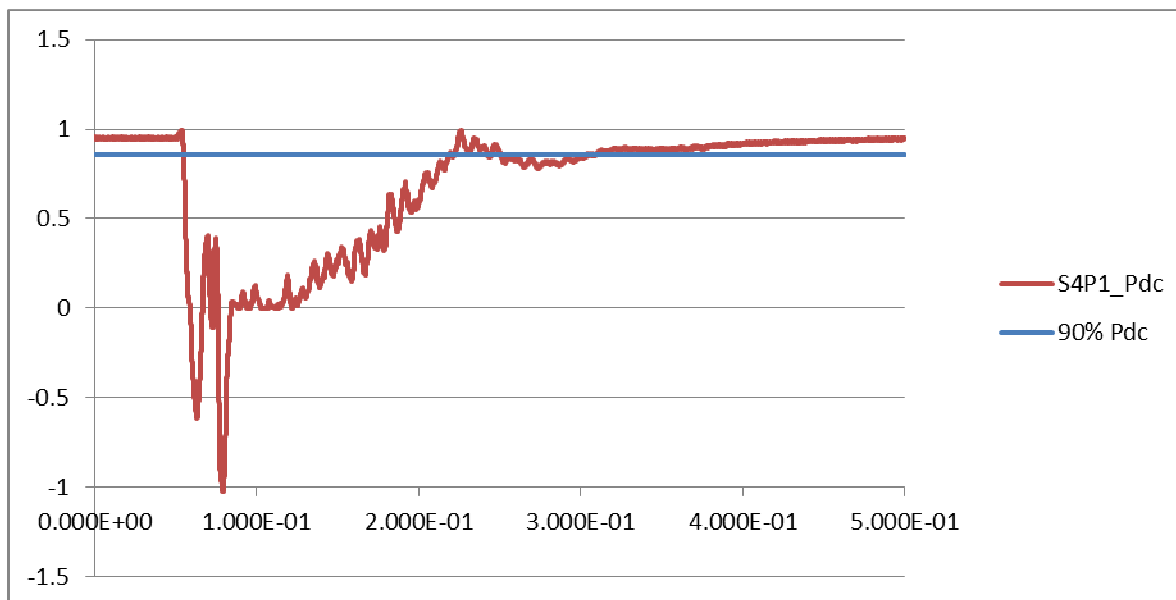


Figura V-64 Curto monofásico em F. Dias 500 kV, potência CC em T. Rio – 2L

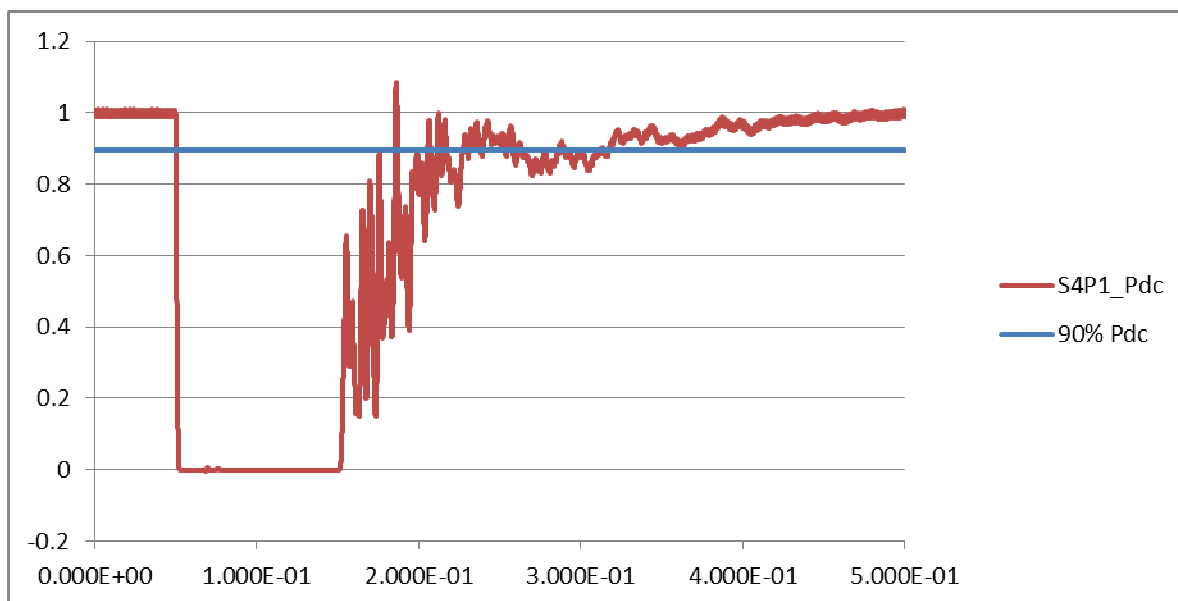


Figura V-65 Curto trifásico em Xingu 500 kV, potência CC em Xingu – 2L

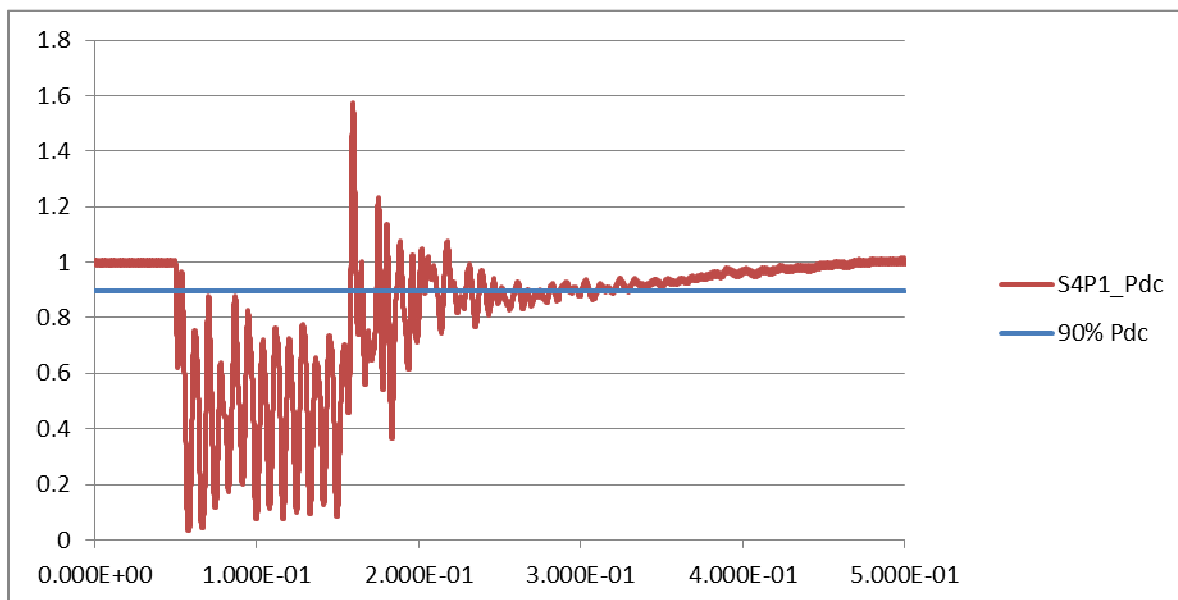


Figura V-66 Curto monofásico em Xingu 500 kV, potência CC em Xingu – 2L

V.1.3 Bloqueio de bipolo

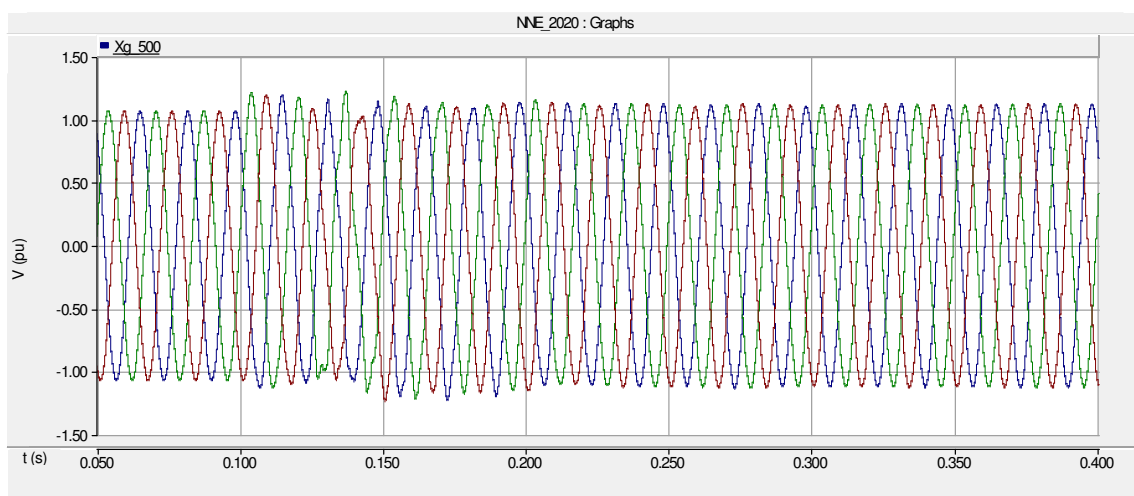


Figura V-67 Bloqueio de bipolo em Xingu 500 kV – tensão em Xingu 500 kV - 2L

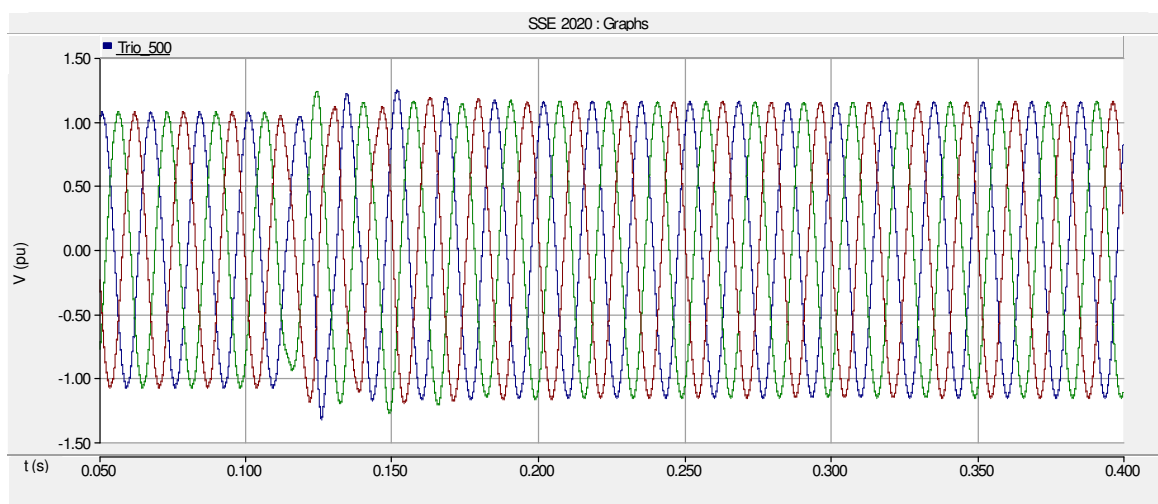


Figura V-68 Bloqueio de bipolo em Xingu 500 kV – tensão em T. Rio 500 kV - 2L

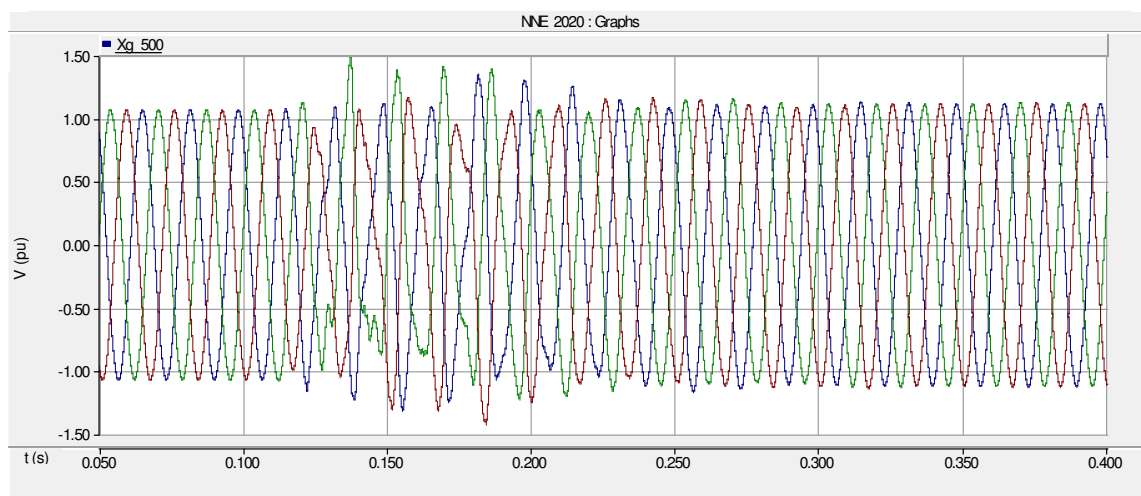


Figura V-69 Bloqueio de bipolo em T. Rio 500 kV – tensão em Xingu 500 kV - 2L

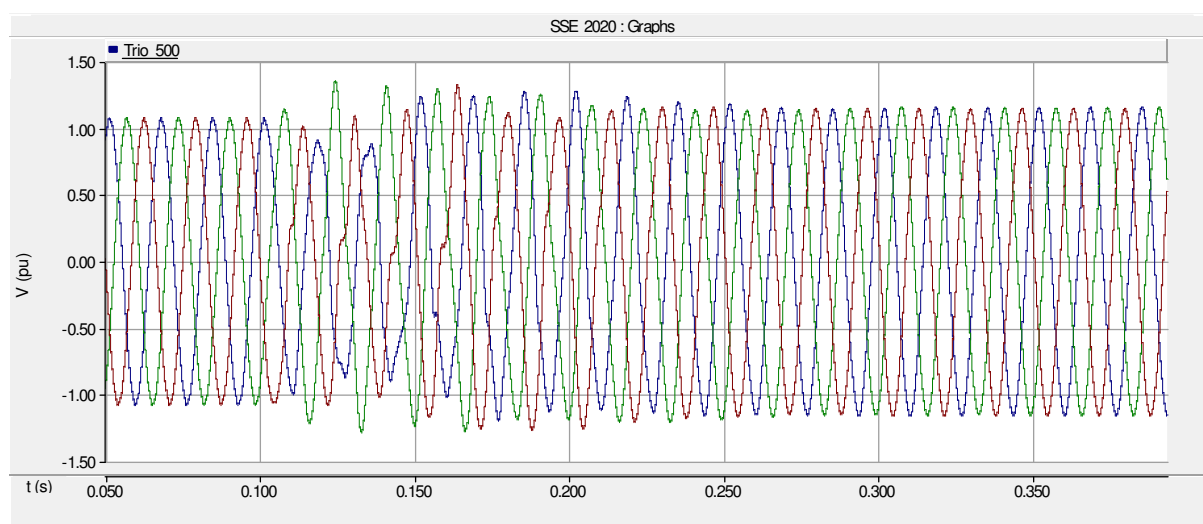


Figura V-70 Bloqueio de bipolo em T. Rio 500 kV – tensão em T. Rio 500 kV - 2L

V.1.4 Curto-circuito na linha CC – 2L

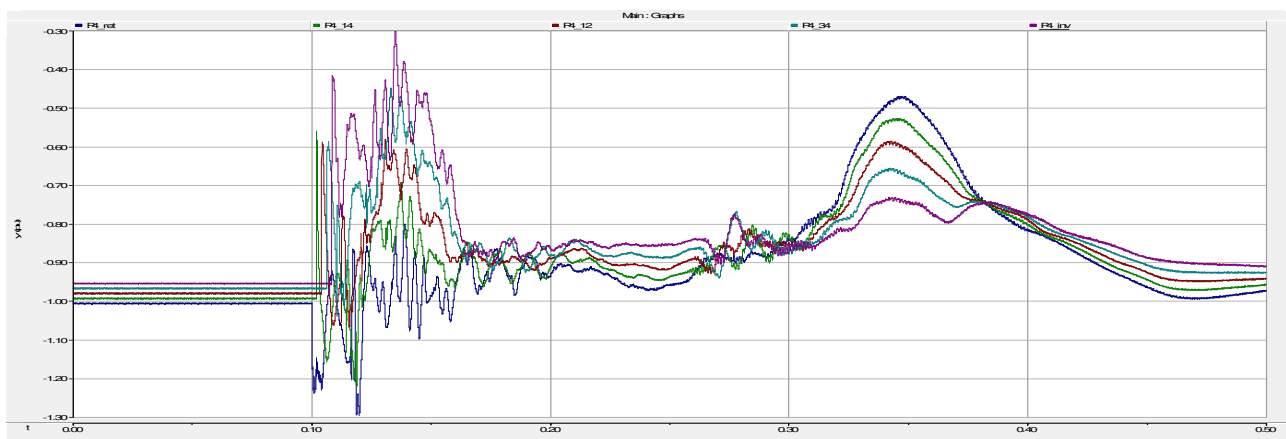


Figura V-71 Sobreensões no polo são ao longo da linha cc, curto a 0 km (retificadora) da linha – 2L

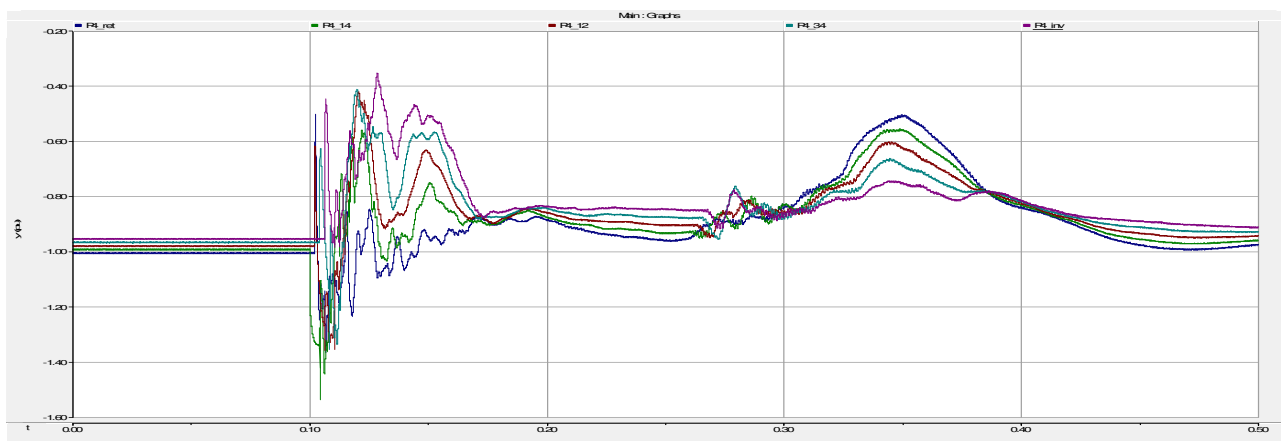


Figura V-72 Sobreensões no polo são ao longo da linha cc, curto a 1/4 do comprimento da linha – 2L

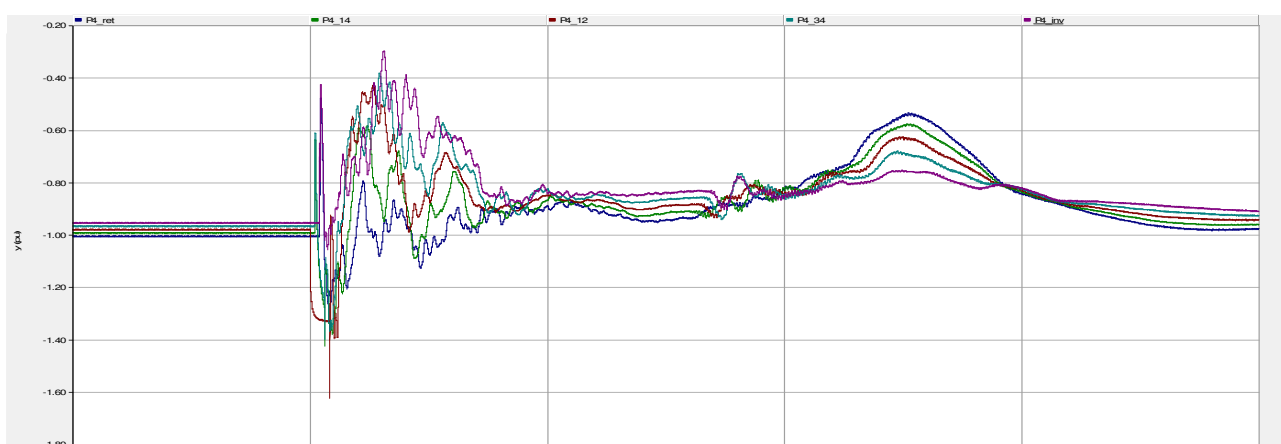


Figura V-73 Sobreensões no polo são ao longo da linha cc, curto a 1/2 do comprimento da linha – 2L

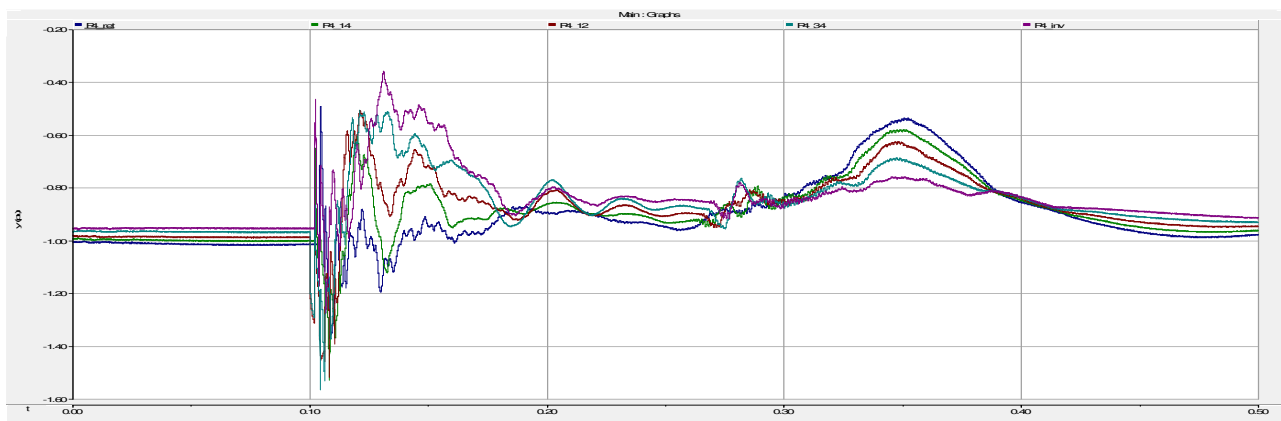


Figura V-74 Sobreensões no polo são ao longo da linha cc, curto a 3/4 do comprimento da linha – 2L

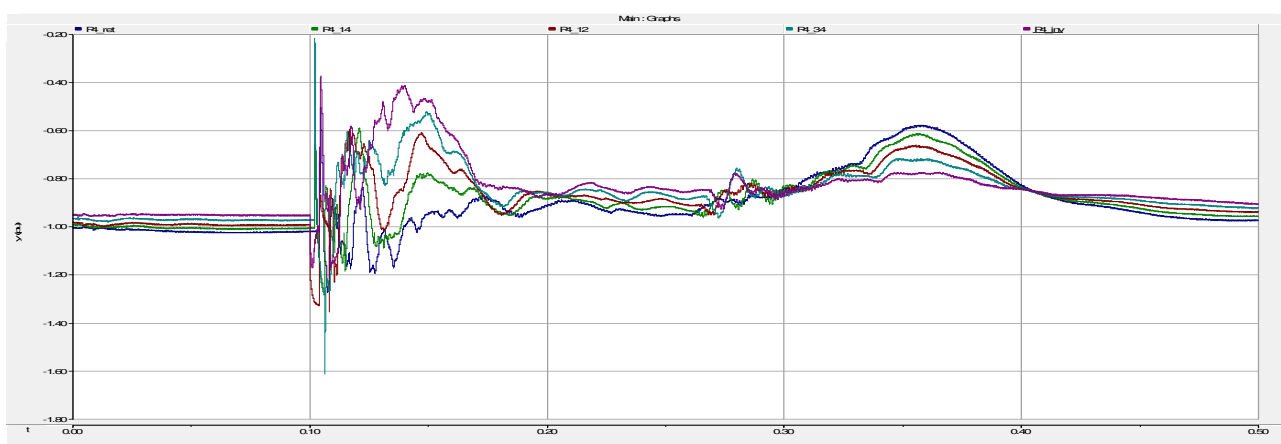


Figura V-75 Sobreensões no polo são ao longo da linha cc, curto final (inversora) da linha – 2L

V.2 Transmissão Sentido Sul - Norte, cenário 7P

V.2.1 Curto Circuito na Rede CA]

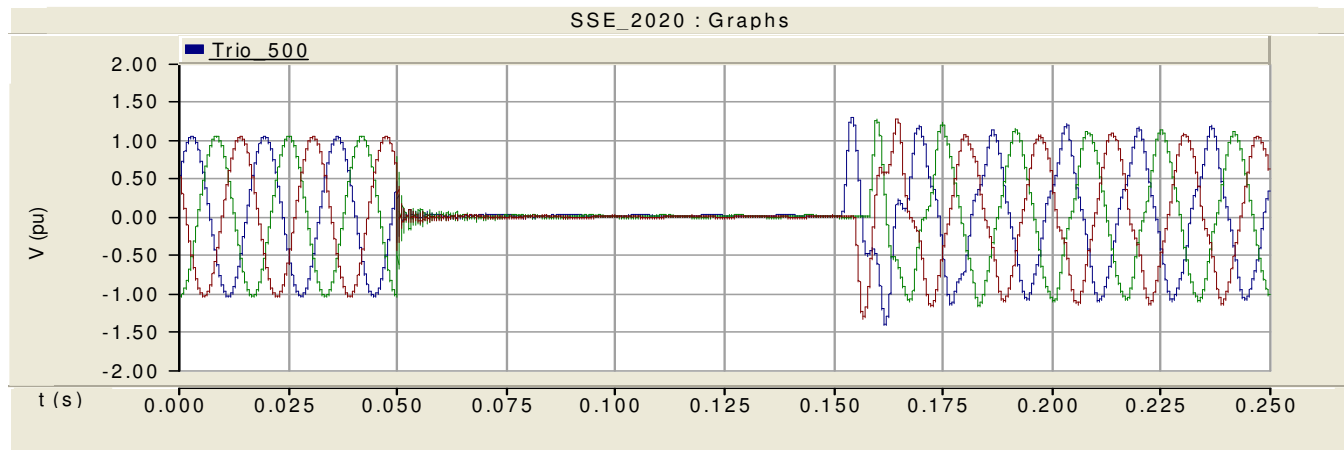


Figura V-76 Curto trifásico no T. Rio 500 kV, tensão em T. Rio 500 kV – 7P

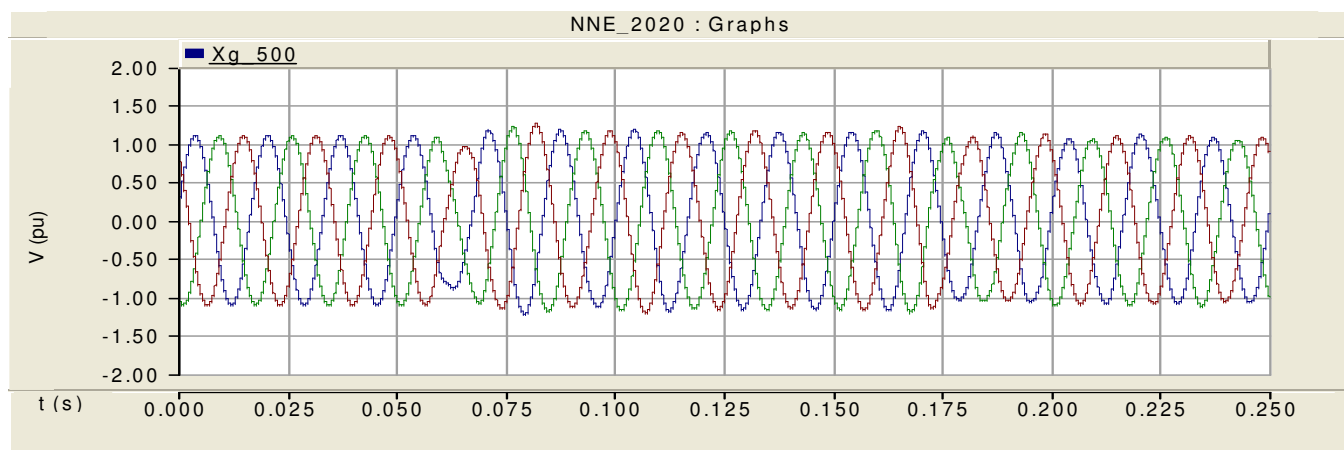


Figura V-77 Curto trifásico no T. Rio 500 kV, tensão em Xingu 500 kV – 7P

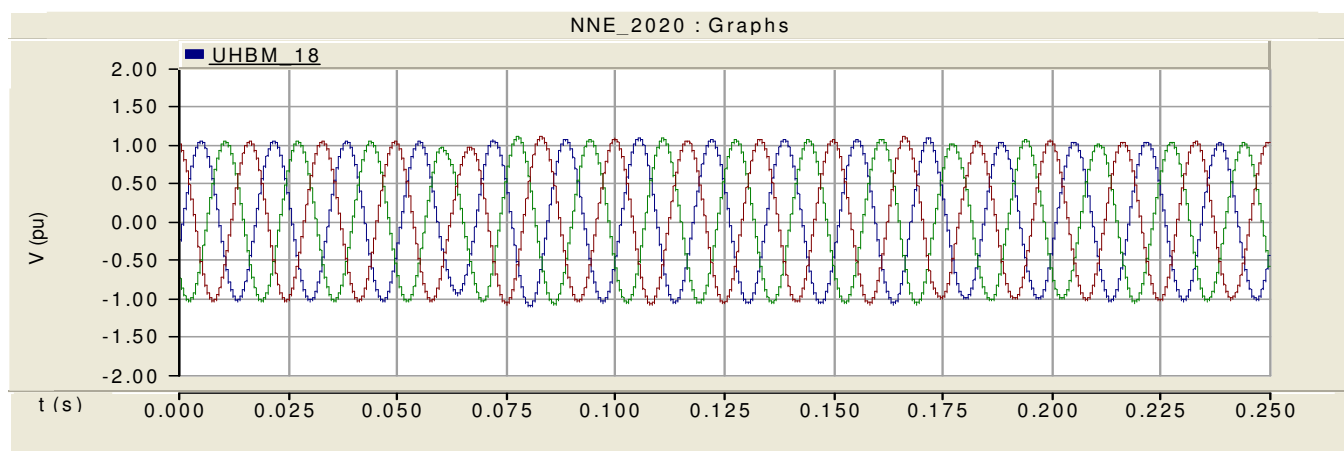


Figura V-78 Curto trifásico no T. Rio 500 kV, tensão em Belo Monte 18 kV – 7P

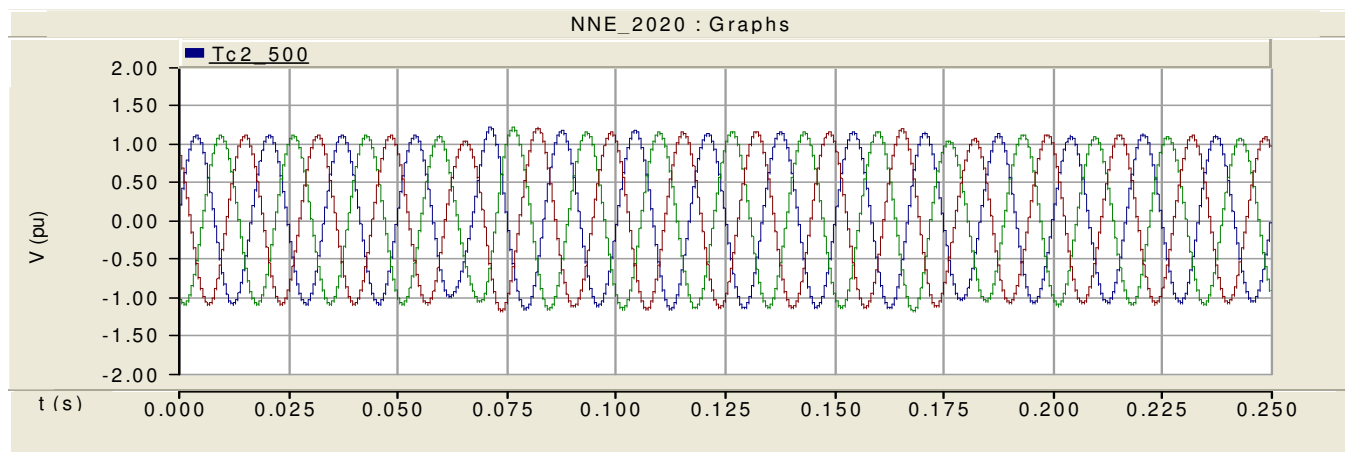


Figura V-79 Curto trifásico no T. Rio 500 kV, tensão em Tucuruí 2 500 kV – 7P

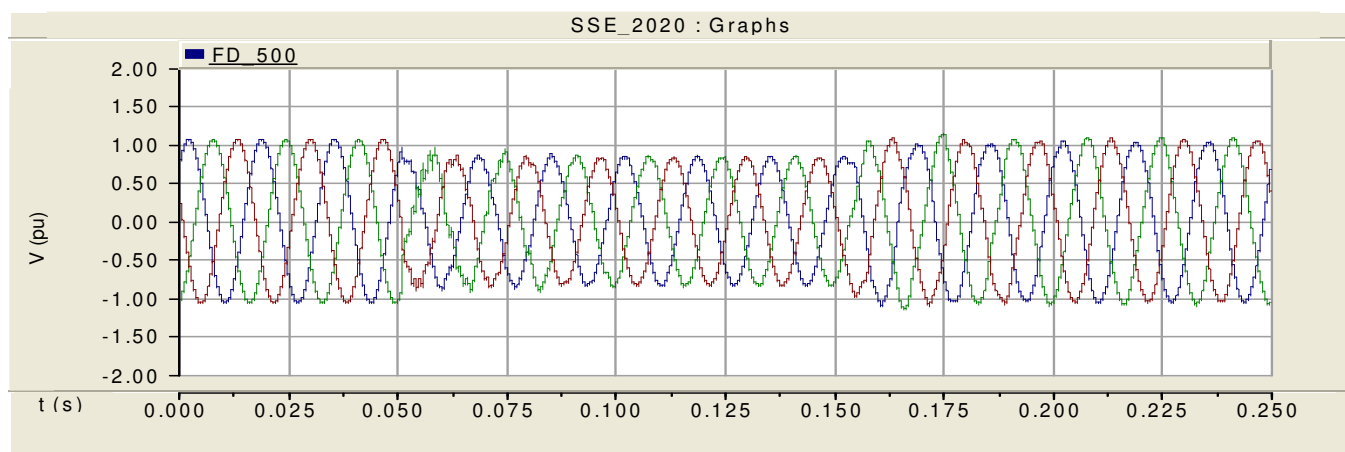


Figura V-80 Curto trifásico no T. Rio 500 kV, tensão em Fernão Dias 500 kV – 7P

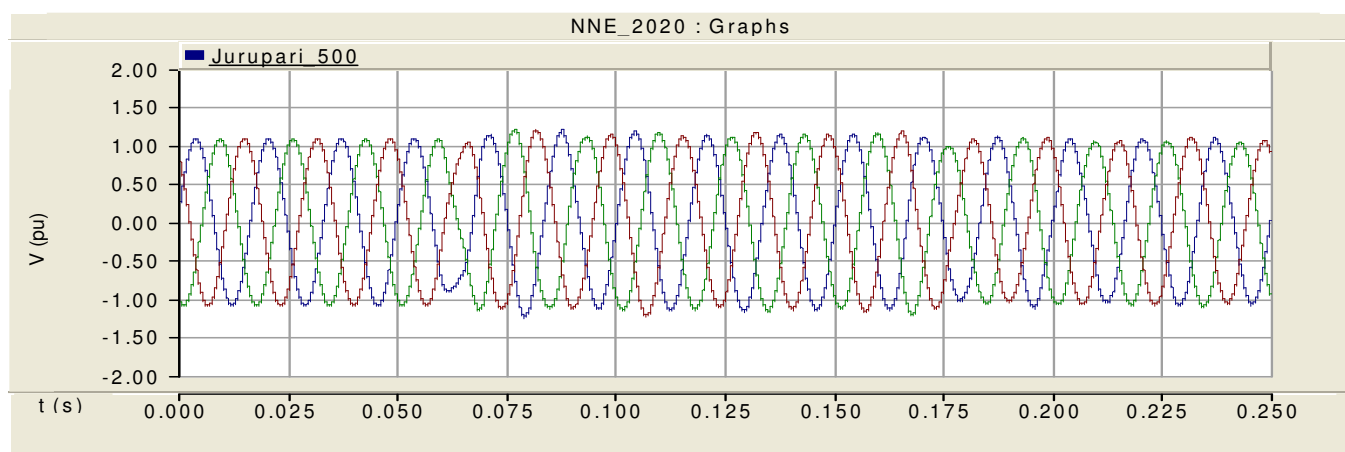


Figura V-81 Curto trifásico no T. Rio 500 kV, tensão em Jurupari 500 kV – 7P

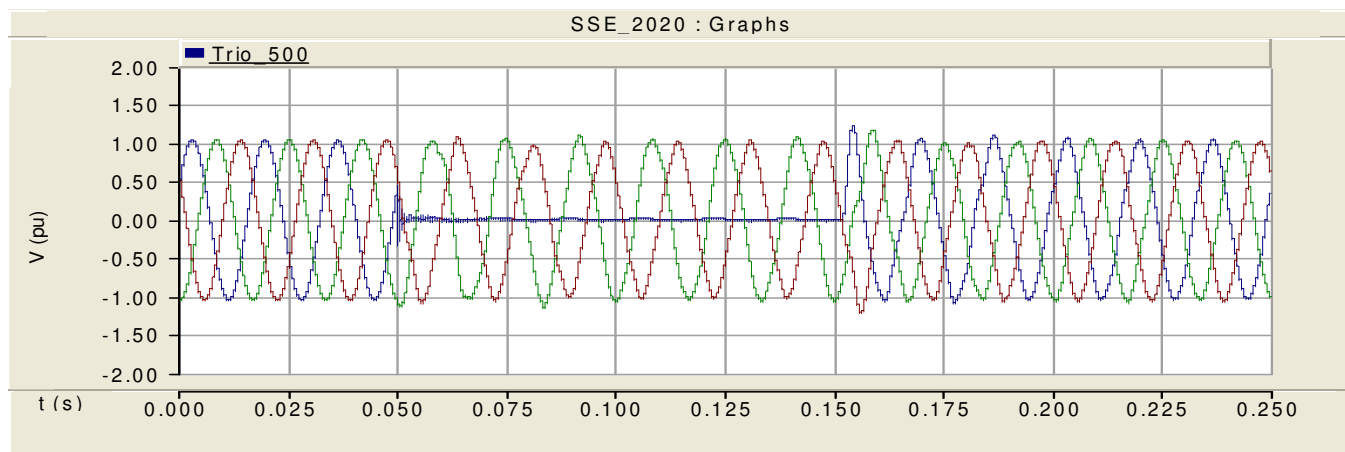


Figura V-82 Curto monofásico no T. Rio 500 kV, tensão em T. Rio 500 kV – 7P

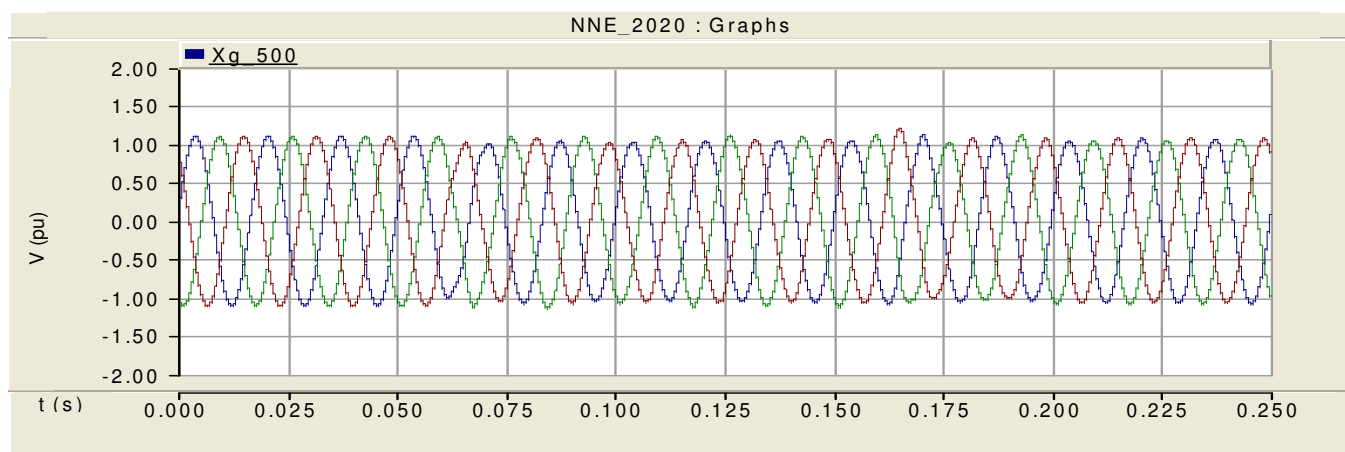


Figura V-83 Curto monofásico no T. Rio 500 kV, tensão em Xingu 500 kV – 7P

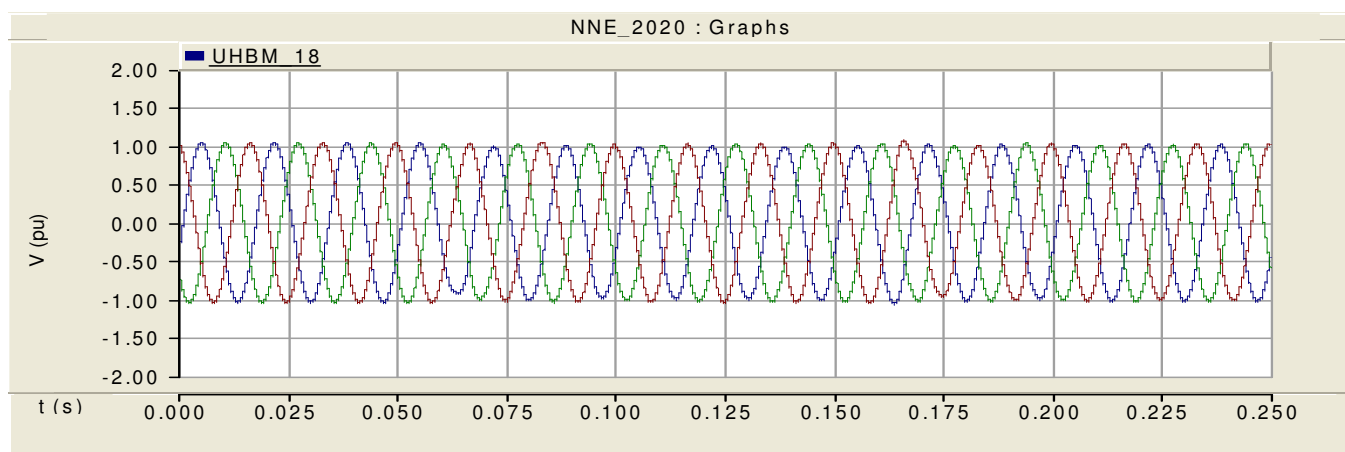


Figura V-84 Curto monofásico no T. Rio 500 kV, tensão em Belo Monte 18 kV – 7P

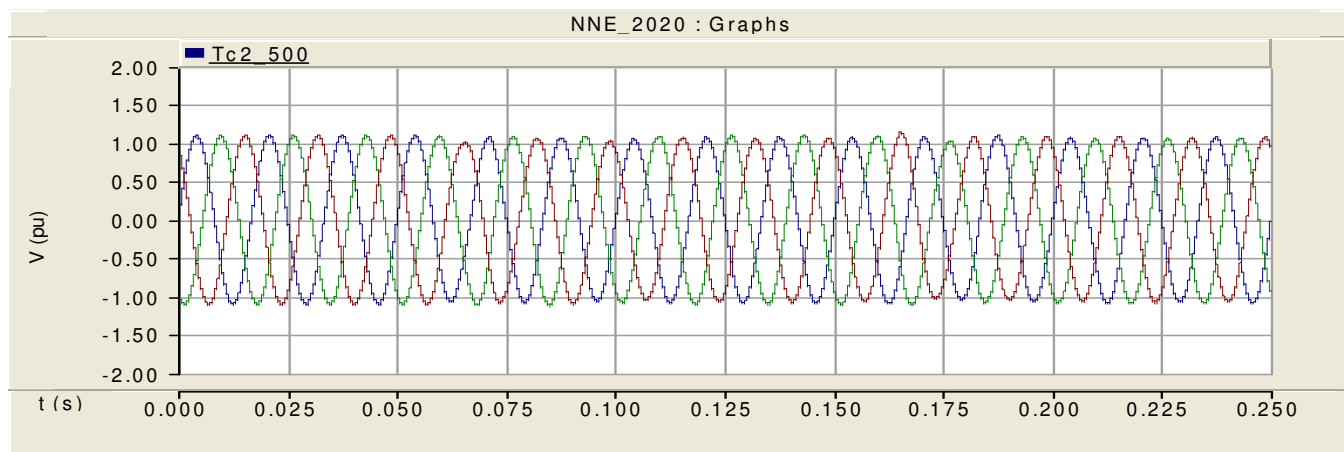


Figura V-85 Curto monofásico no T. Rio 500 kV, tensão em Tucuruí 2 500 kV – 7P

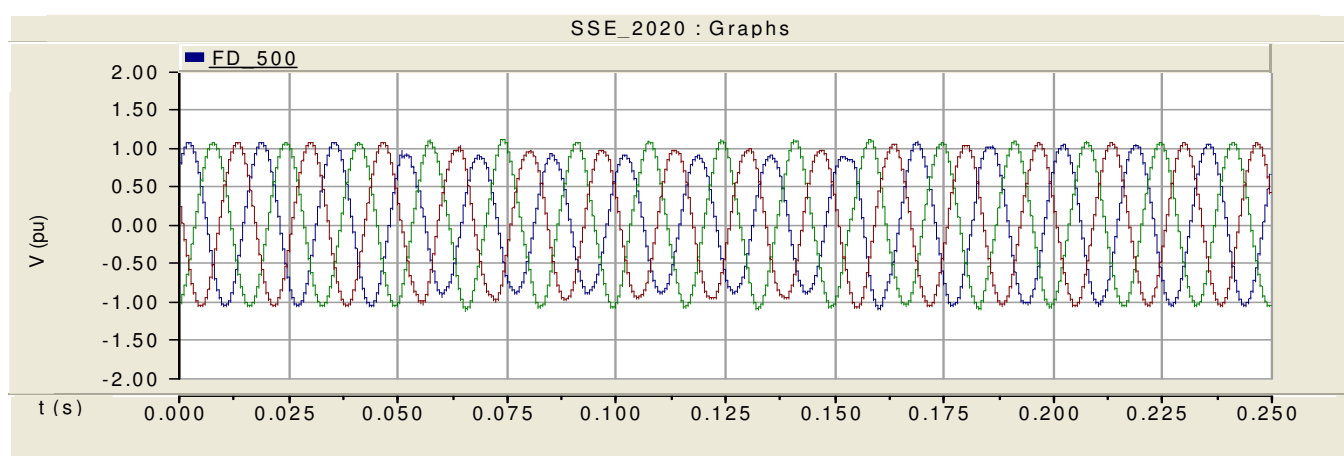


Figura V-86 Curto monofásico no T. Rio 500 kV, tensão em Fernão Dias 500 kV – 7P

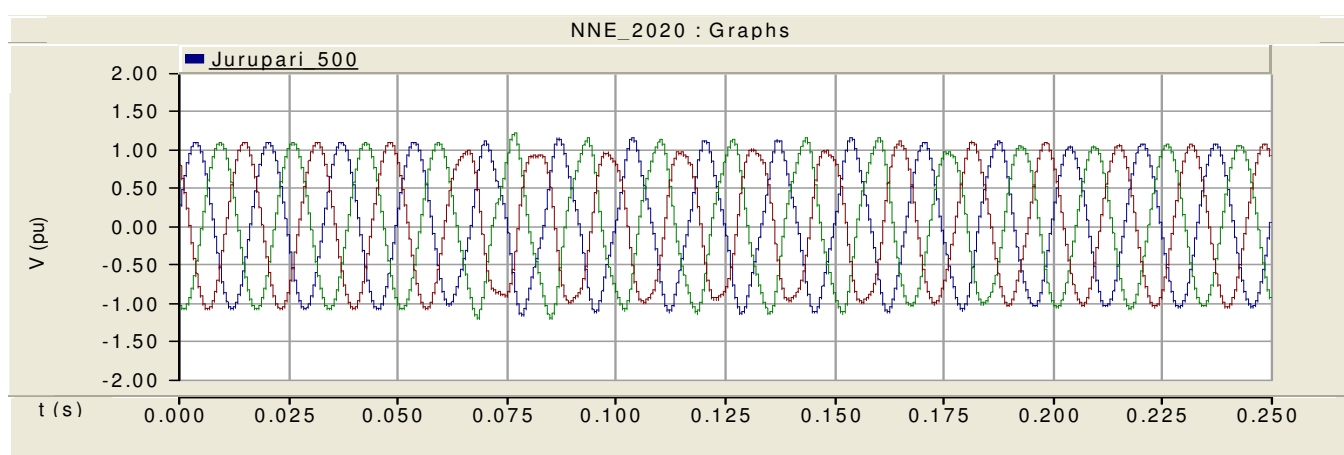


Figura V-87 Curto monofásico no T. Rio 500 kV, tensão em Jurupari 500 kV – 7P

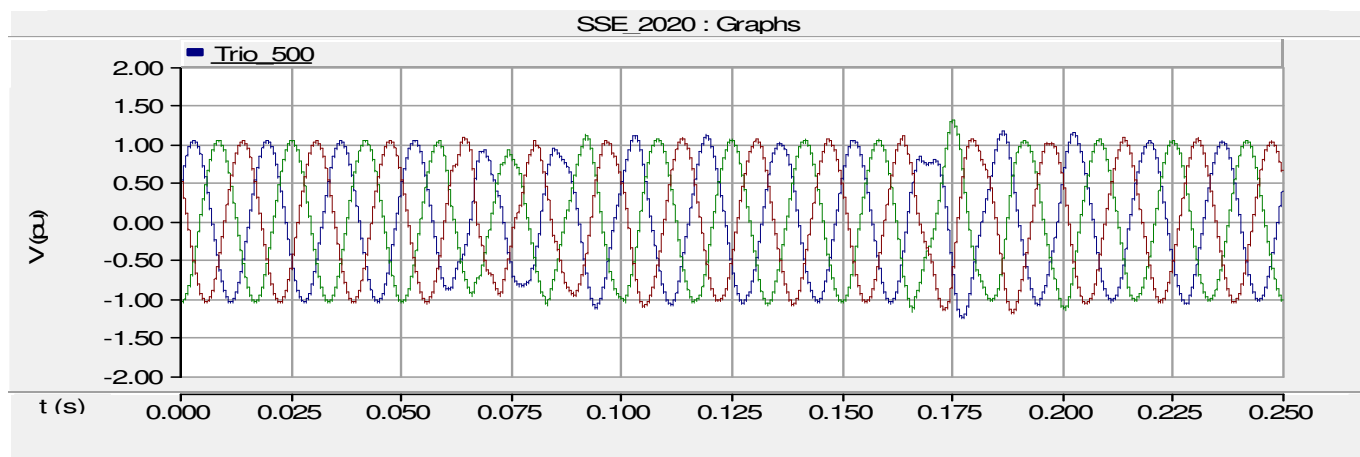


Figura V-88 Curto trifásico em Xingu 500 kV, tensão em T. Rio 500 kV – 7P

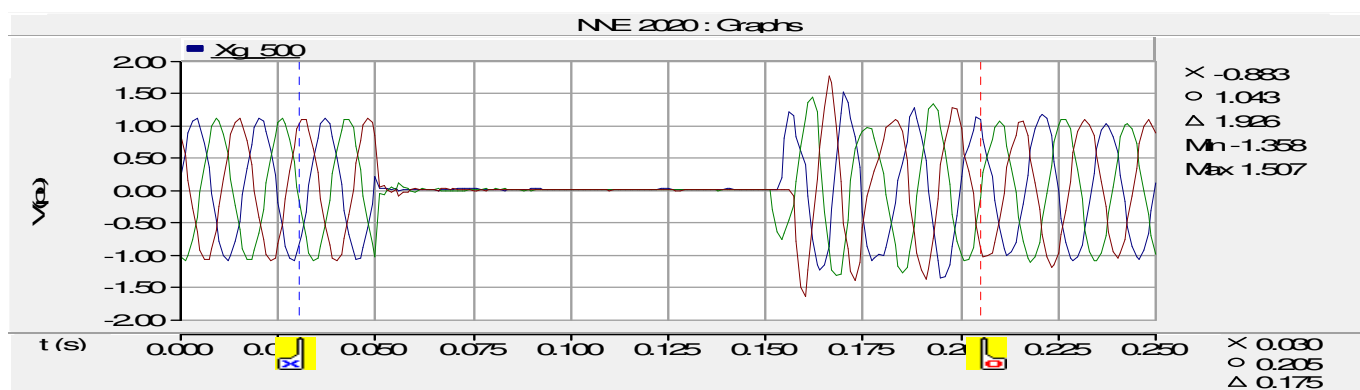


Figura V-89 Curto trifásico em Xingu 500 kV, tensão em Xingu 500 kV – 7P

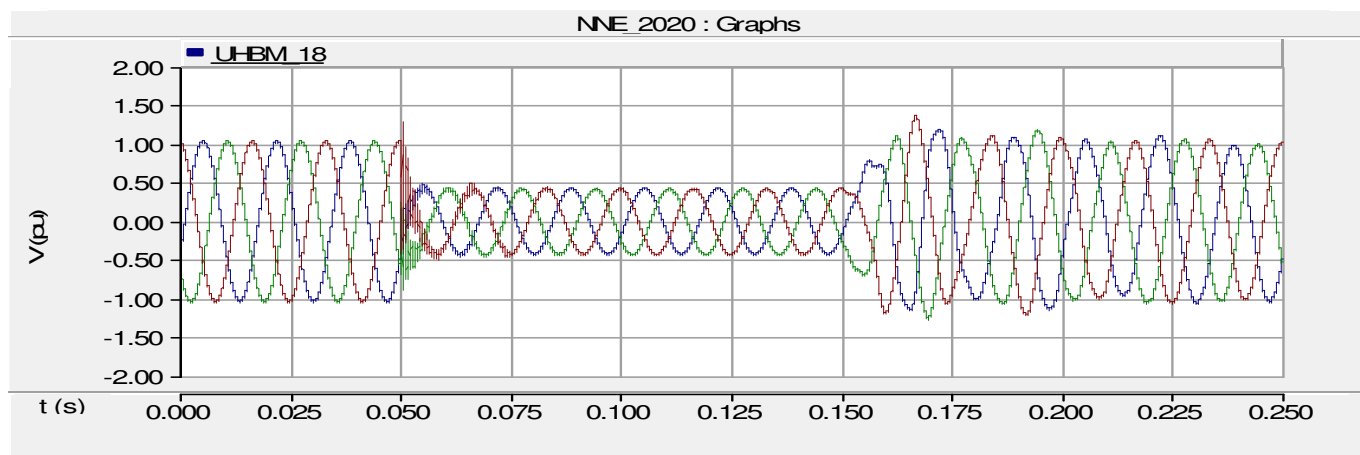


Figura V-90 Curto trifásico em Xingu 500 kV, tensão em Belo Monte 18 kV – 7P

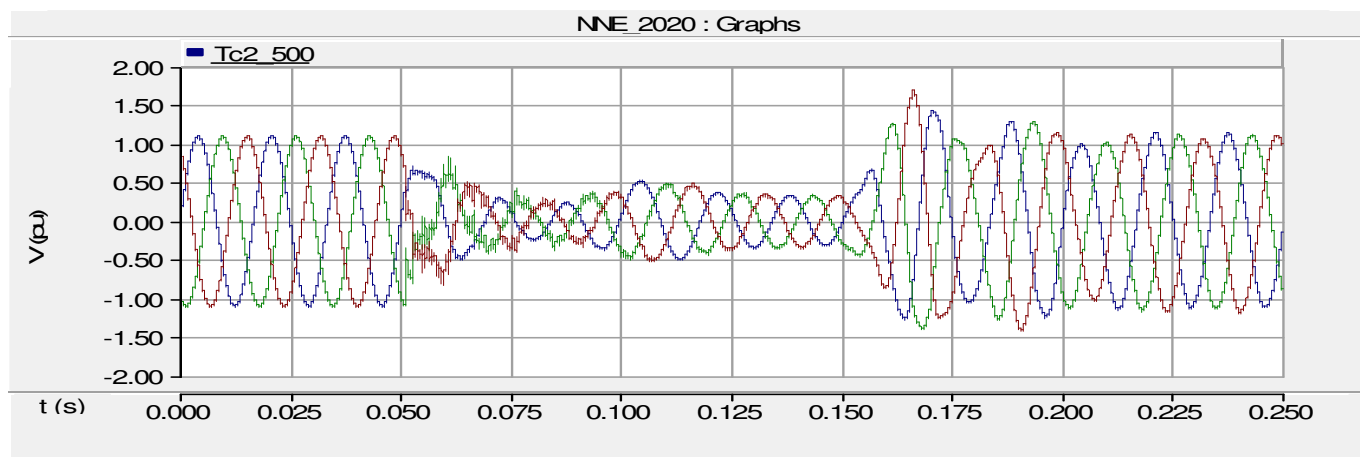


Figura V-91 Curto trifásico em Xingu 500 kV, tensão em Tucuruí 2 500 kV – 7P

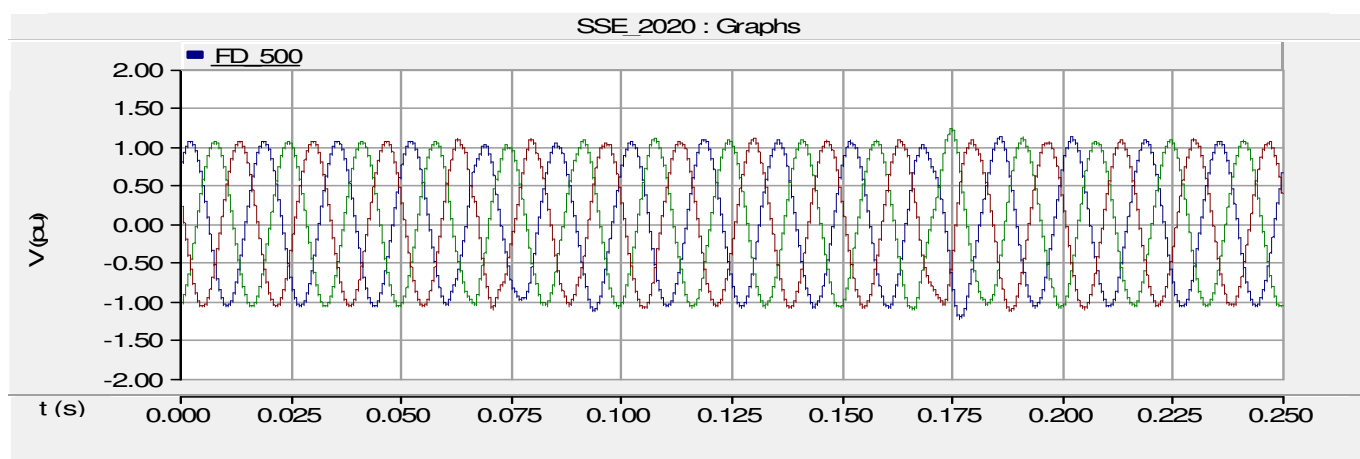


Figura V-92 Curto trifásico em Xingu 500 kV, tensão em Fernão Dias 500 kV – 7P

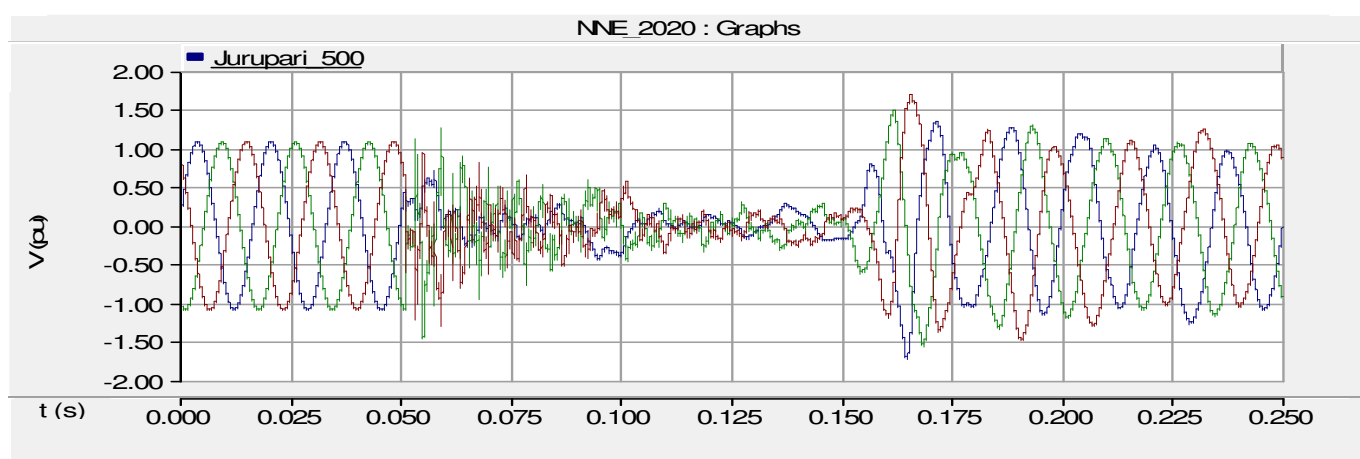


Figura V-93 Curto trifásico em Xingu 500 kV, tensão em Jurupari 500 kV – 7P

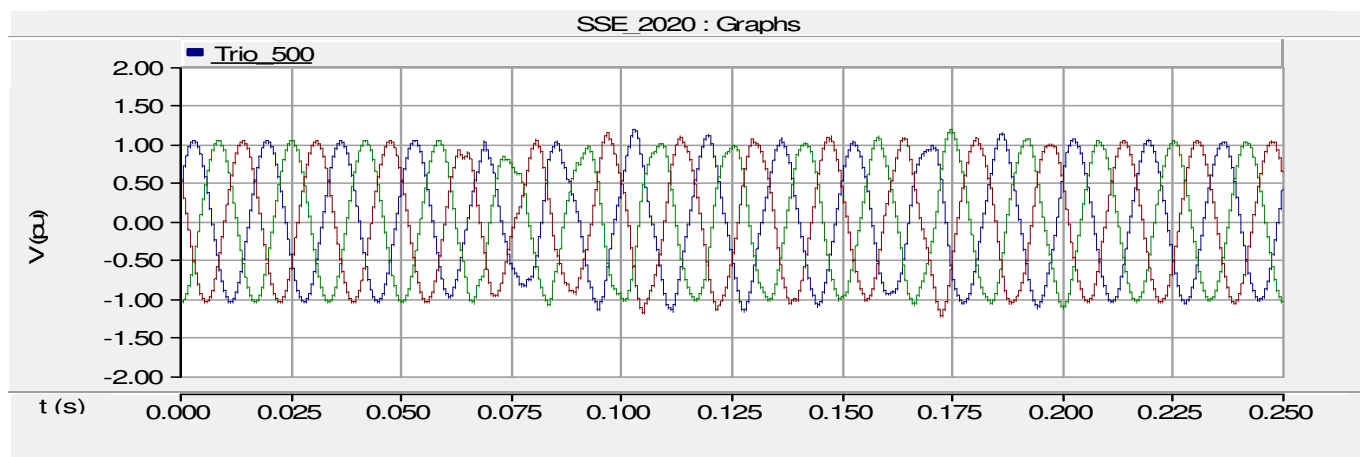


Figura V-94 Curto monofásico em Xingu 500 kV, tensão em T. Rio 500 kV – 7P

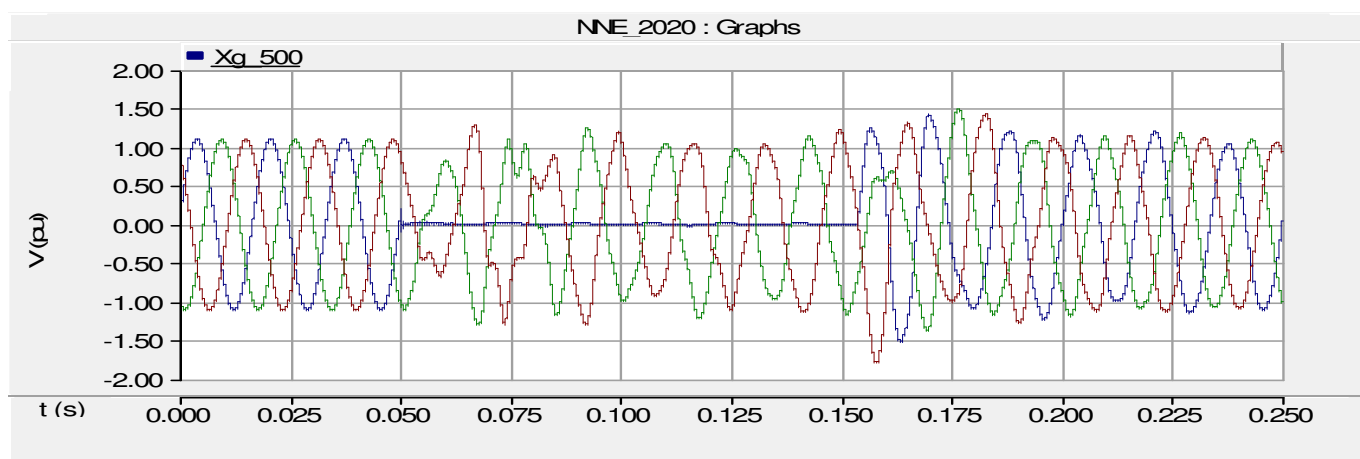


Figura V-95 Curto monofásico em Xingu 500 kV, tensão em Xingu 500 kV – 7P

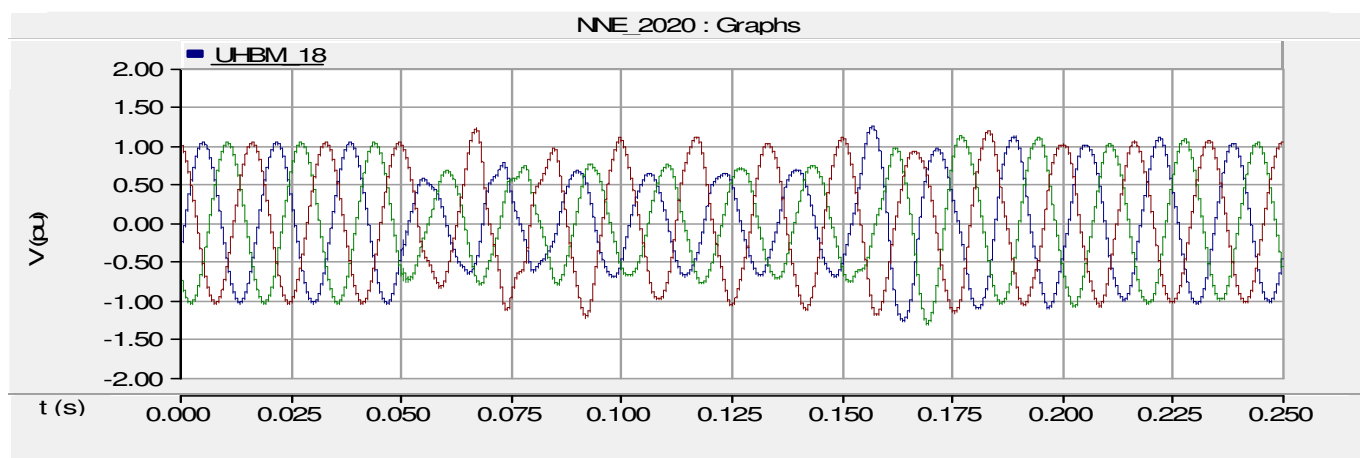


Figura V-96 Curto monofásico em Xingu 500 kV, tensão em Belo Monte 18 kV – 7P

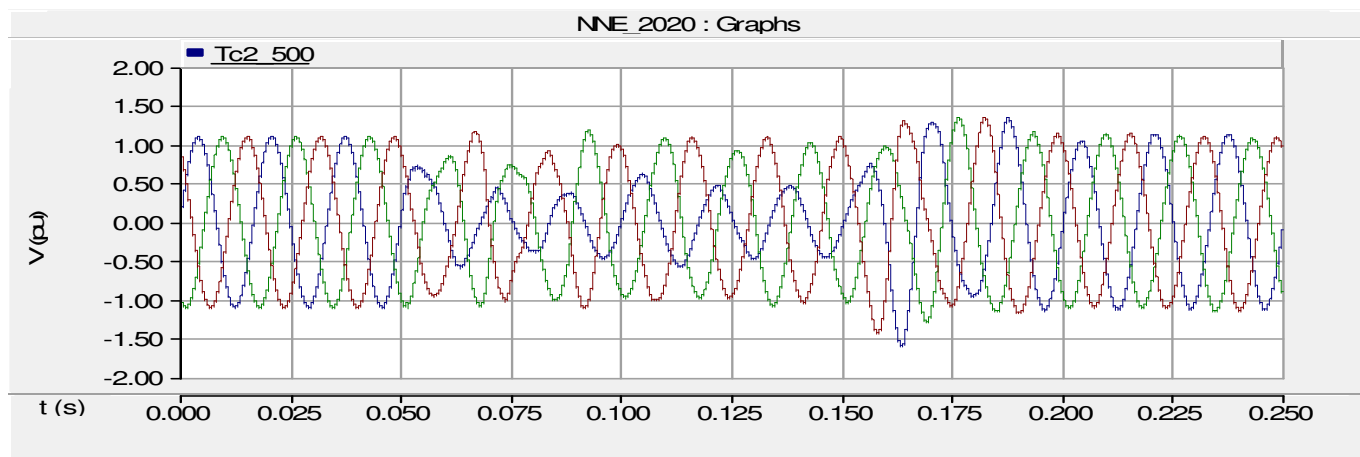


Figura V-97 Curto monofásico em Xingu 500 kV, tensão em Tucuruí 2 500 kV – 7P

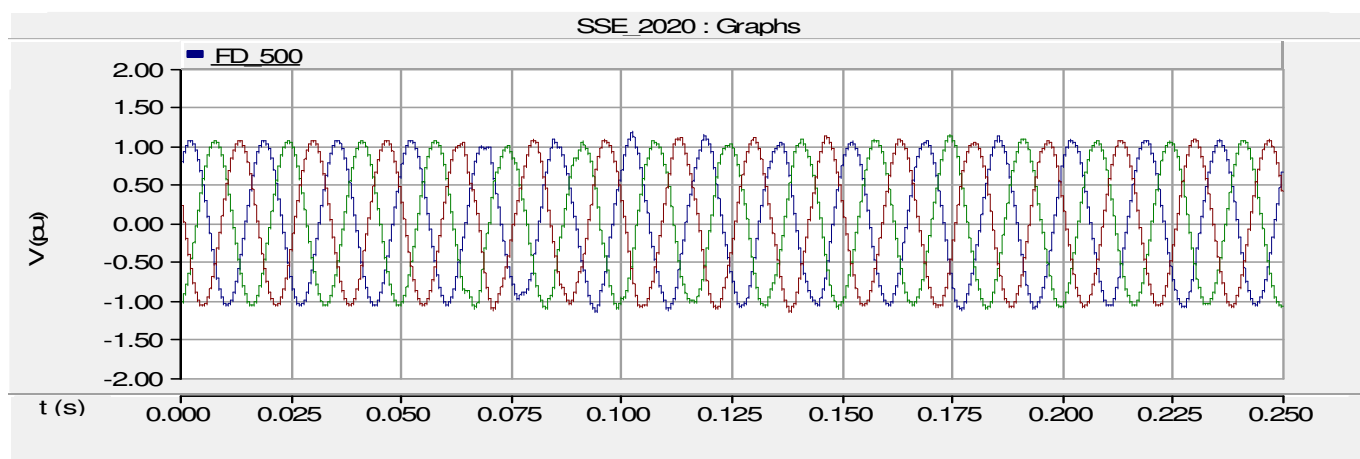


Figura V-98 Curto monofásico em Xingu 500 kV, tensão em Fernão Dias 500 kV – 7P

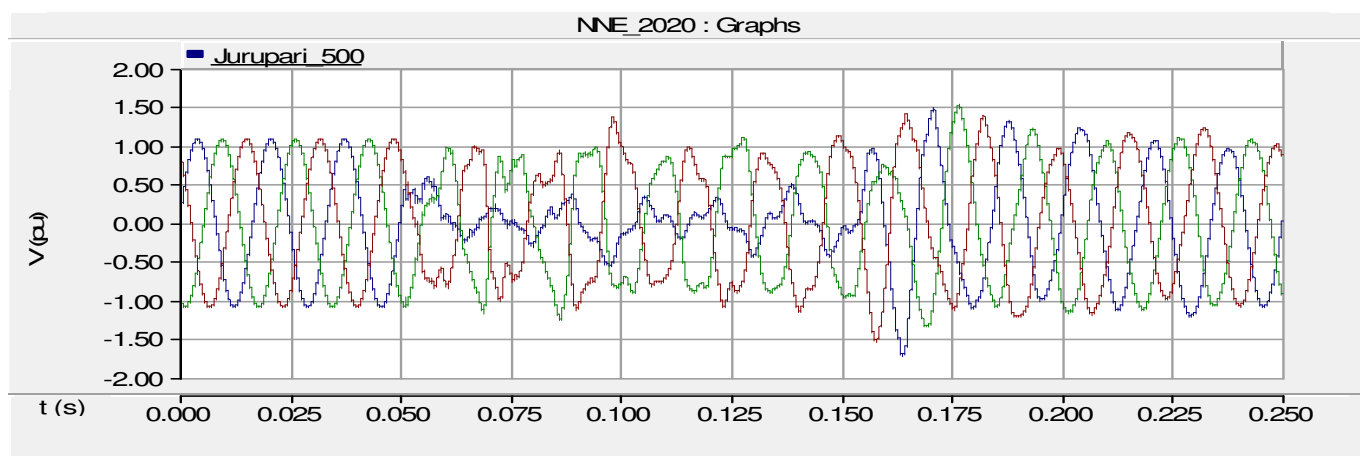


Figura V-99 Curto monofásico em Xingu 500 kV, tensão em Angra 500 kV – 7P

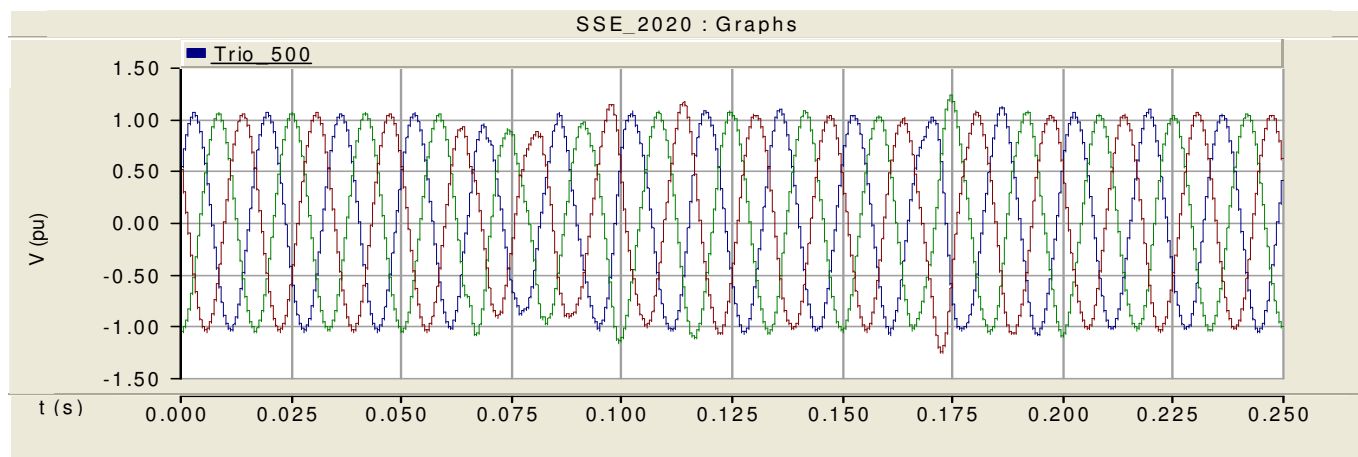


Figura V-100 Curto trifásico em Tucuruí 2 500 kV, tensão em T. Rio 500 kV – 7P

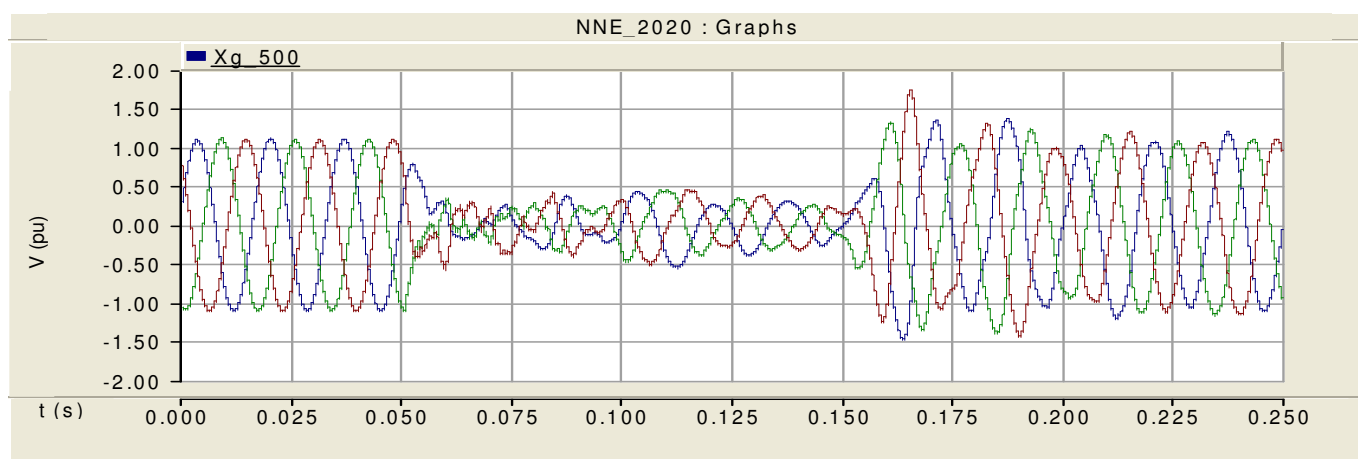


Figura V-101 Curto trifásico em Tucuruí 2 500 kV, tensão em Xingu 500 kV – 7P

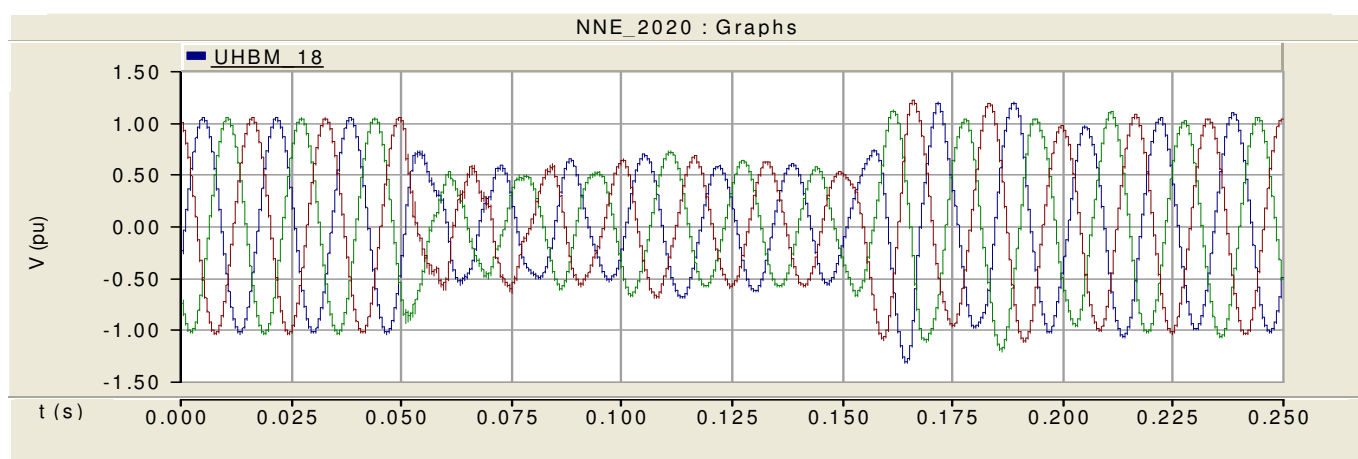


Figura V-102 Curto trifásico em Tucuruí 2 500 kV, tensão em Belo Monte 18 kV – 7P

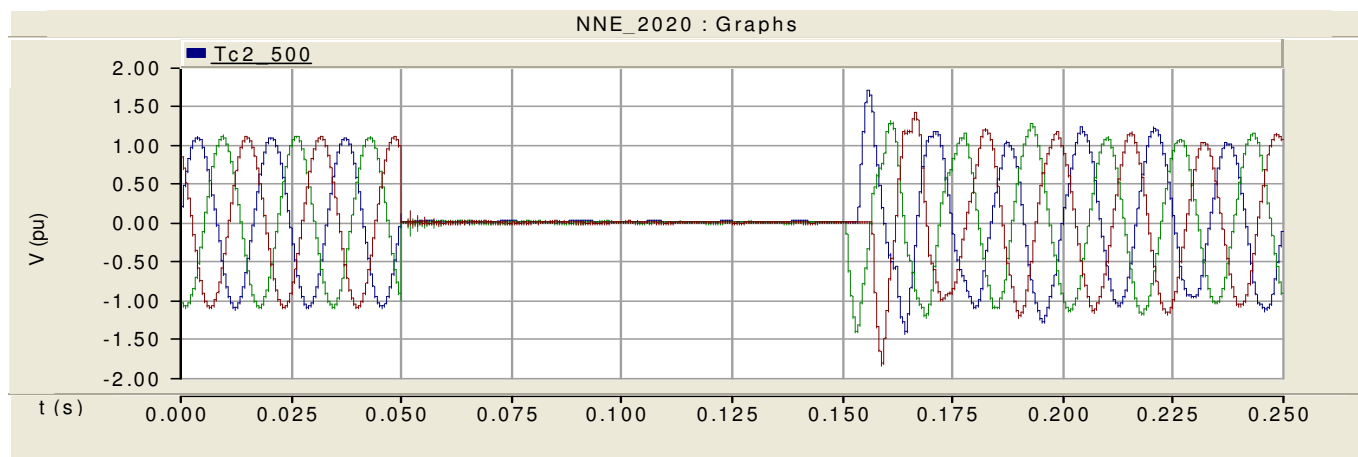


Figura V-103 Curto trifásico em Tucuruí 2 500 kV, tensão em Tucuruí 2 500 kV – 7P

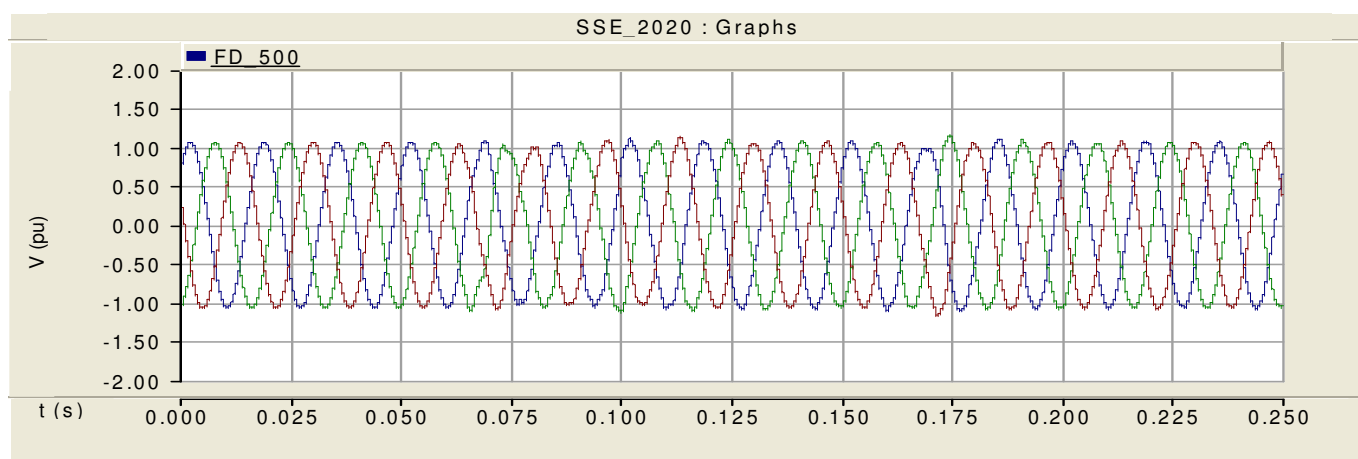


Figura V-104 Curto trifásico em Tucuruí 2 500 kV, tensão em Fernão Dias 500 kV – 7P

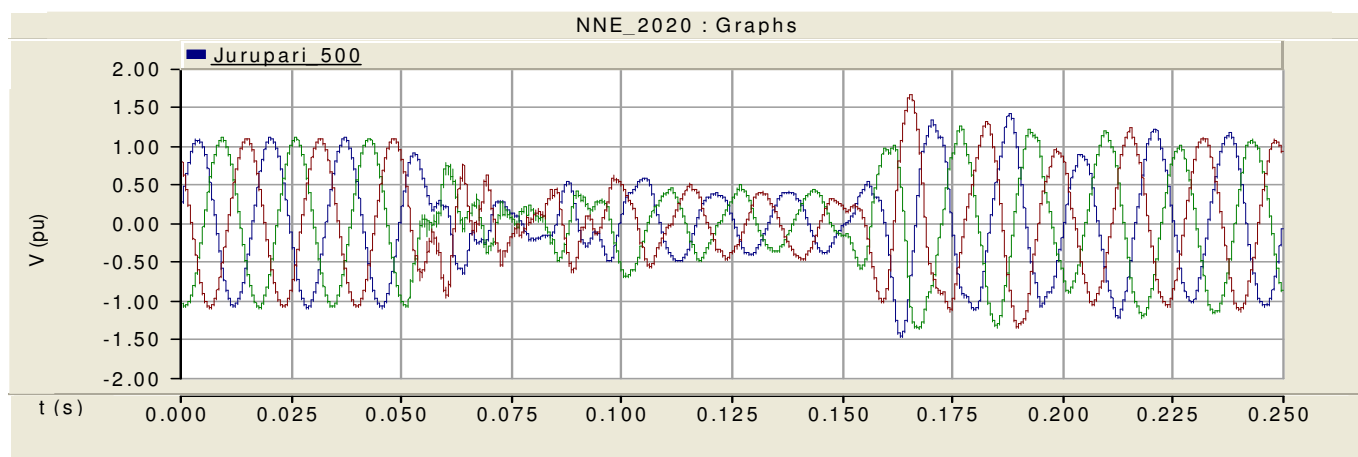


Figura V-105 Curto trifásico em Tucuruí 2 500 kV, tensão em Jurupari 500 kV – 7P

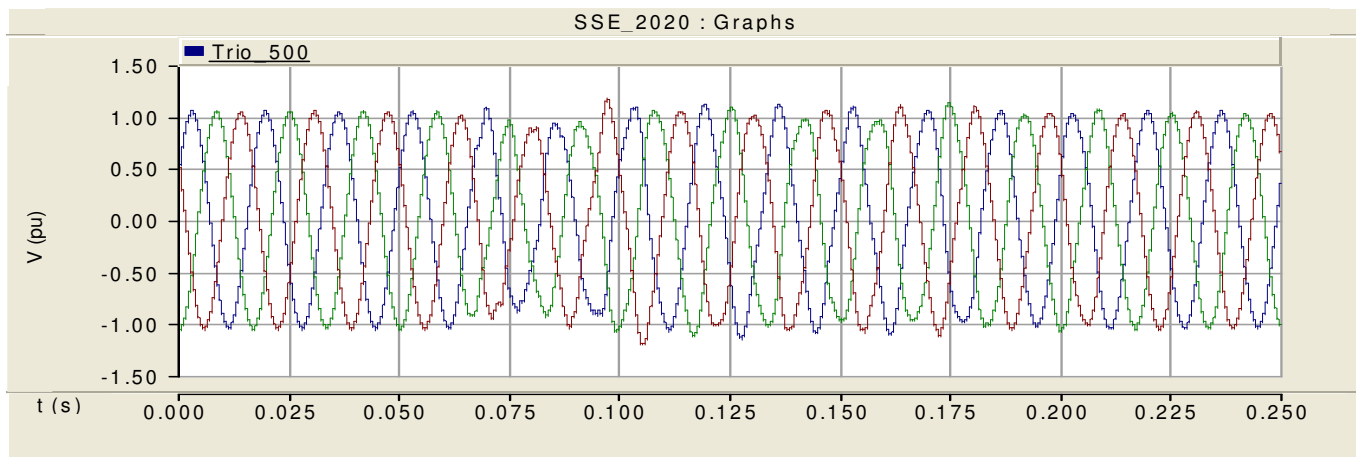


Figura V-106 Curto monofásico em Tucuruí 2 500 kV, tensão em T. Rio 500 kV – 7P

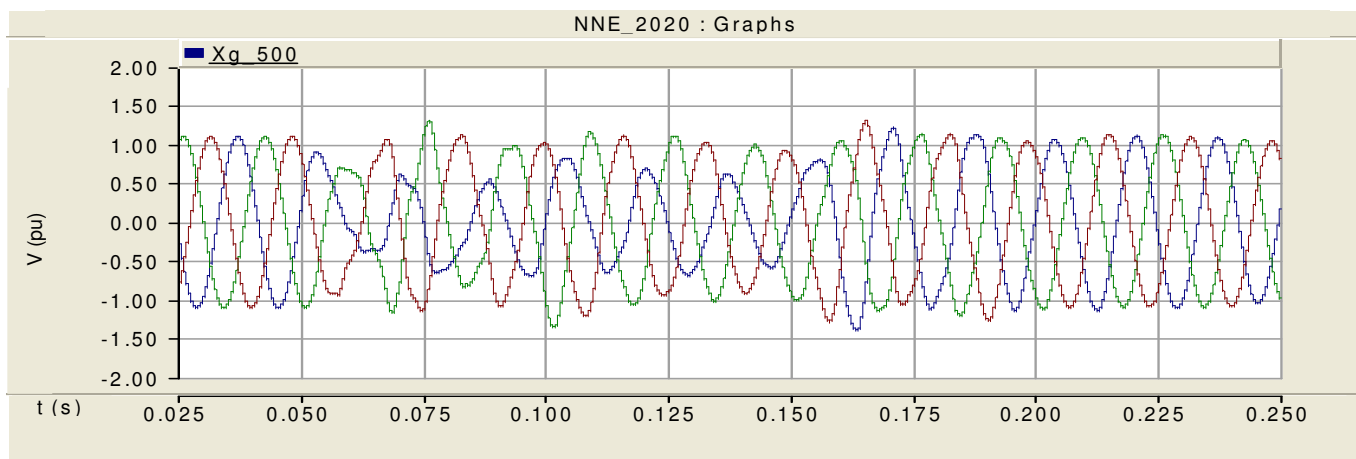


Figura V-107 Curto monofásico em Tucuruí 2 500 kV, tensão em Xingu 500 kV – 7P

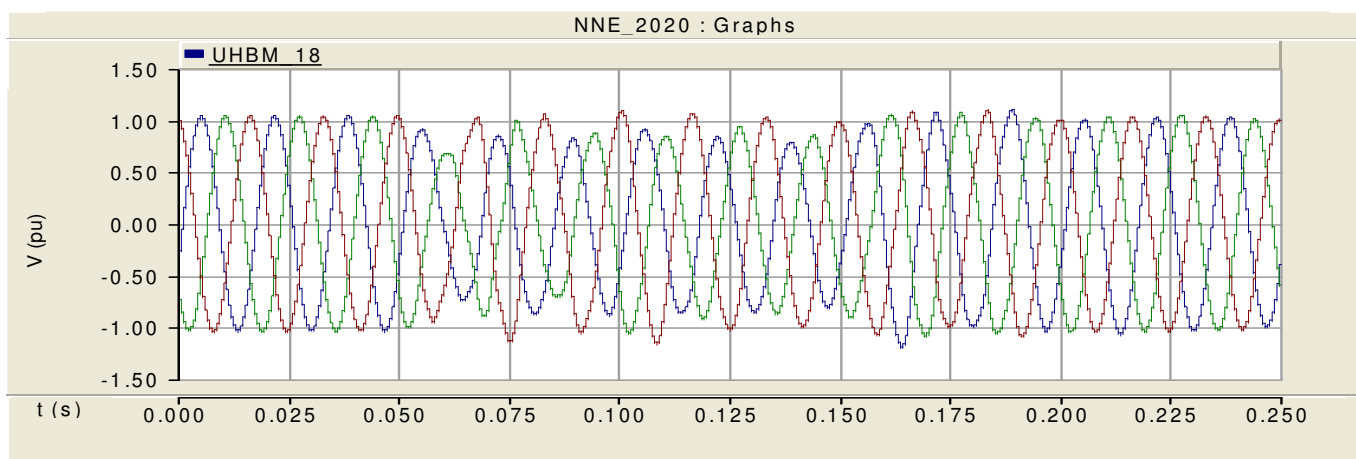


Figura V-108 Curto monofásico em Tucuruí 2 500 kV, tensão em Belo Monte 18 kV – 7P

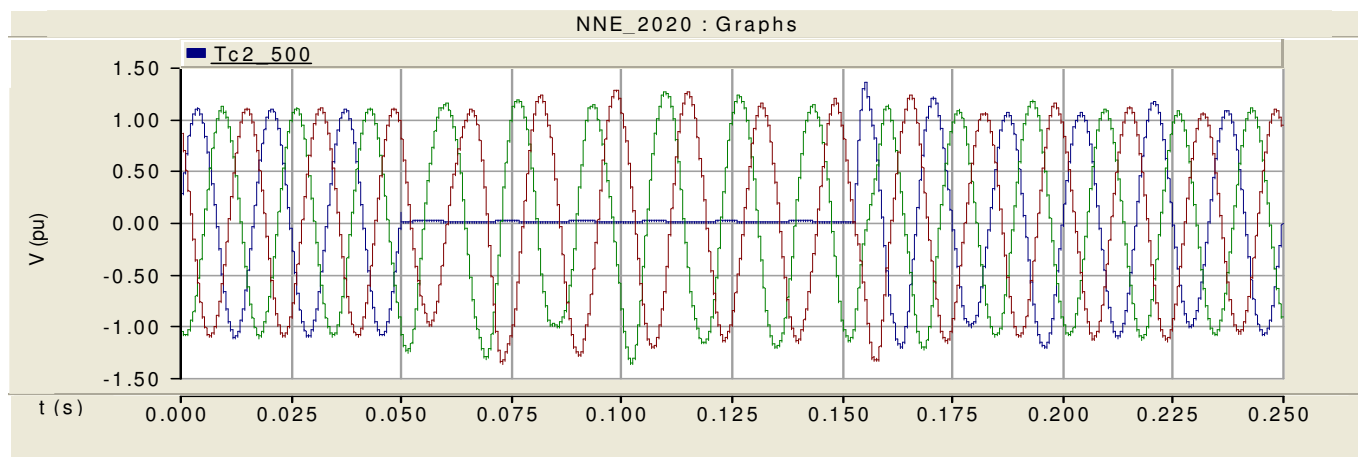


Figura V-109 Curto monofásico em Tucuruí 2 500 kV, tensão em Tucuruí 2 500 kV – 7P

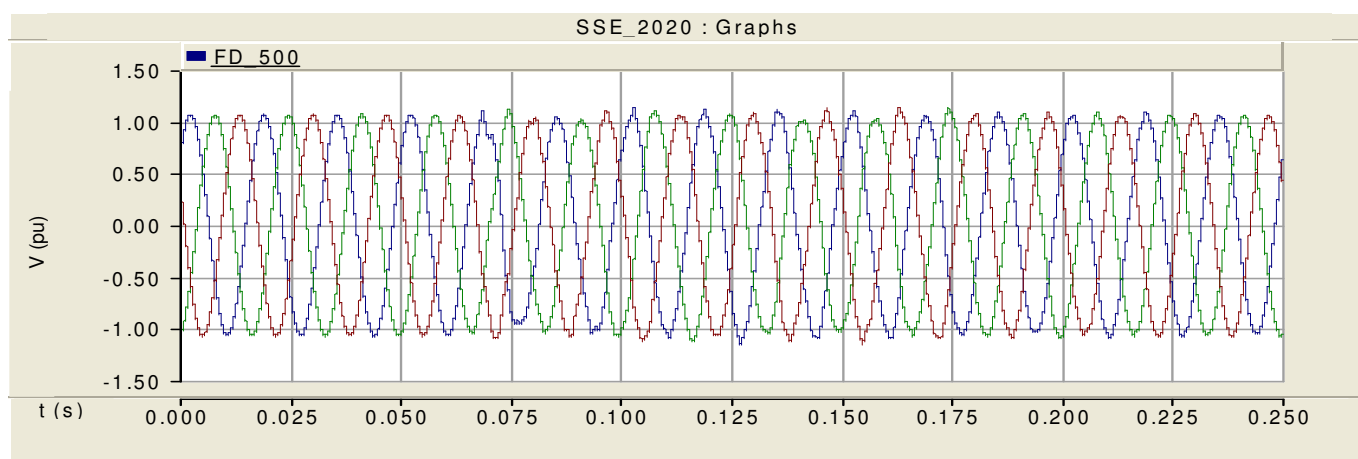


Figura V-110 Curto monofásico em Tucuruí 2 500 kV, tensão em Fernão Dias 500 kV – 7P

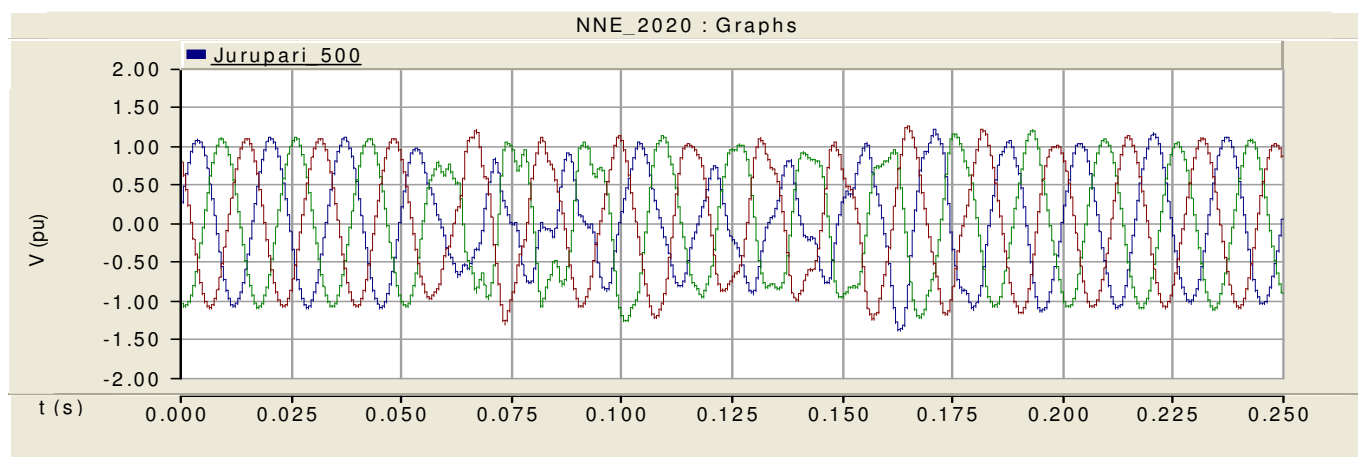


Figura V-111 Curto monofásico em Tucuruí 2 500 kV, tensão em Jurupari 500 kV – 7P

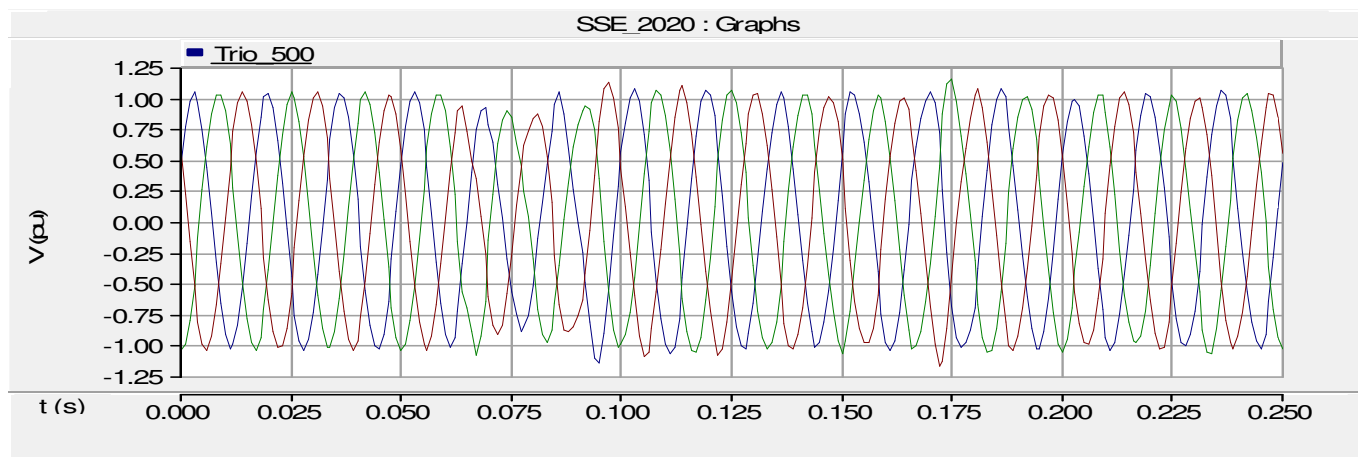


Figura V-112 Curto trifásico em Jurupari 500 kV, tensão em T. Rio 500 kV – 7P

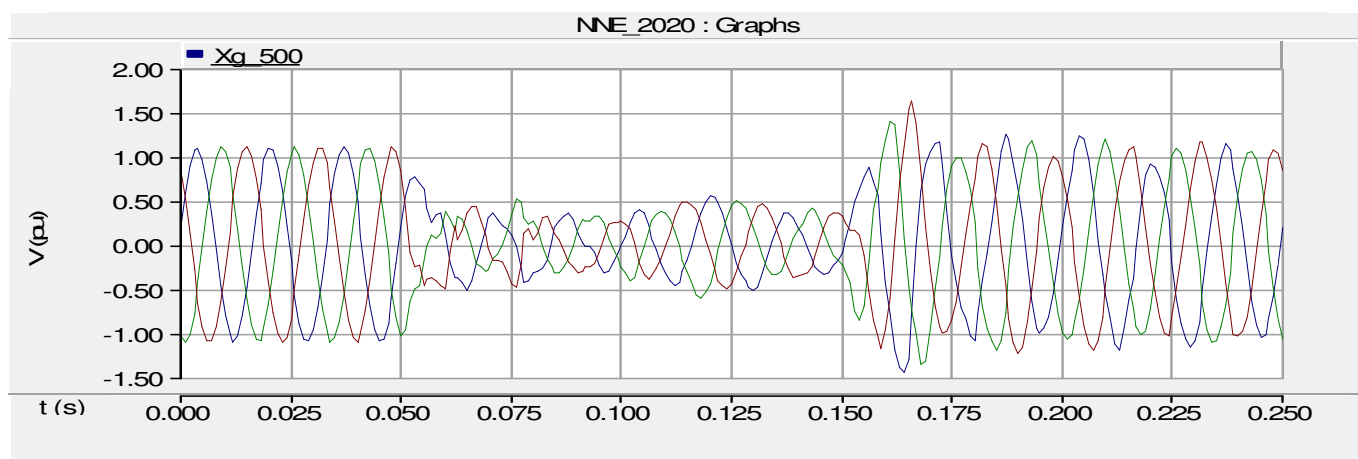


Figura V-113 Curto trifásico em Jurupari 500 kV, tensão em Xingu 500 kV – 7P

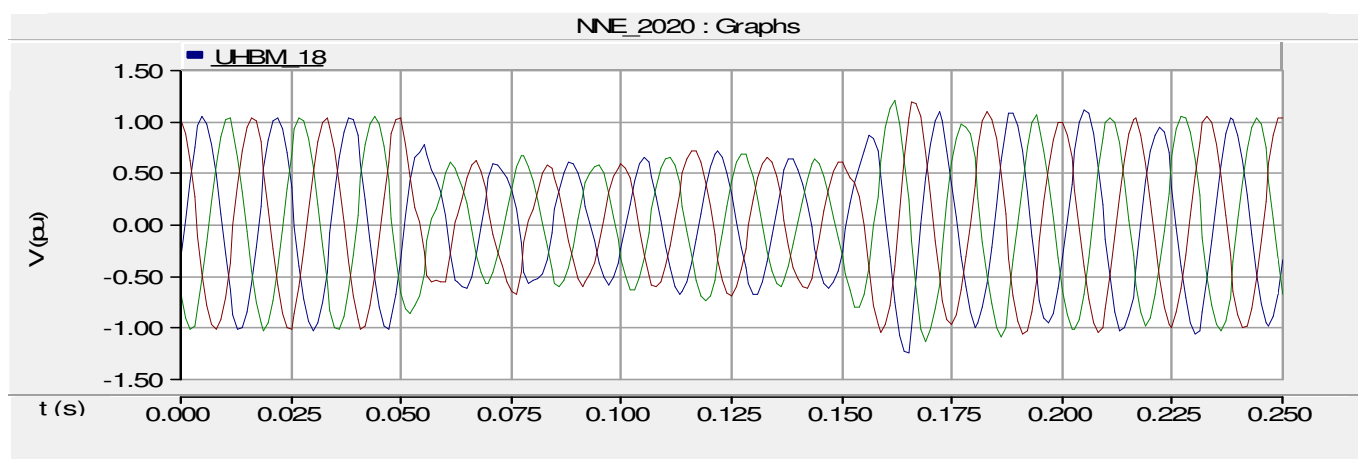


Figura V-114 Curto trifásico em Jurupari 500 kV, tensão em Belo Monte 18 kV – 7P

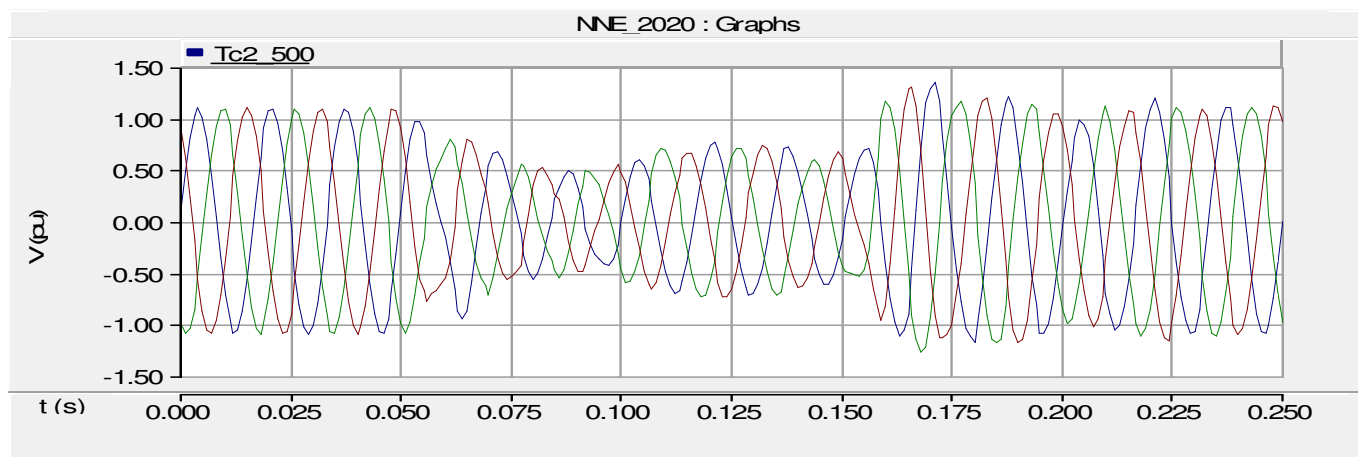


Figura V-115 Curto trifásico em Jurupari 500 kV, tensão em Tucuruí 2 500 kV – 7P

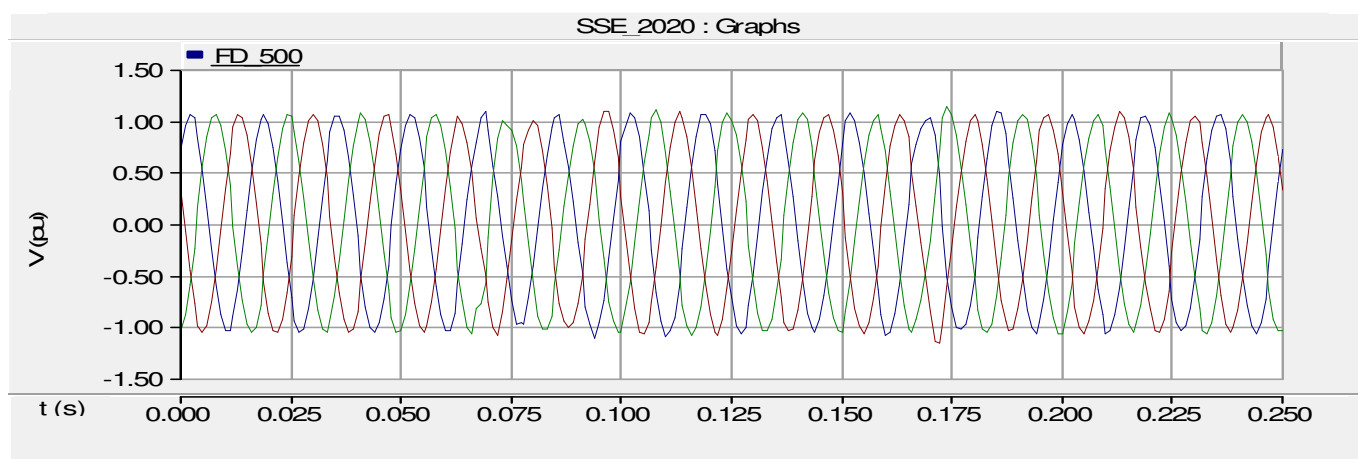


Figura V-116 Curto trifásico em Jurupari 500 kV, tensão em Fernão Dias 500 kV – 7P

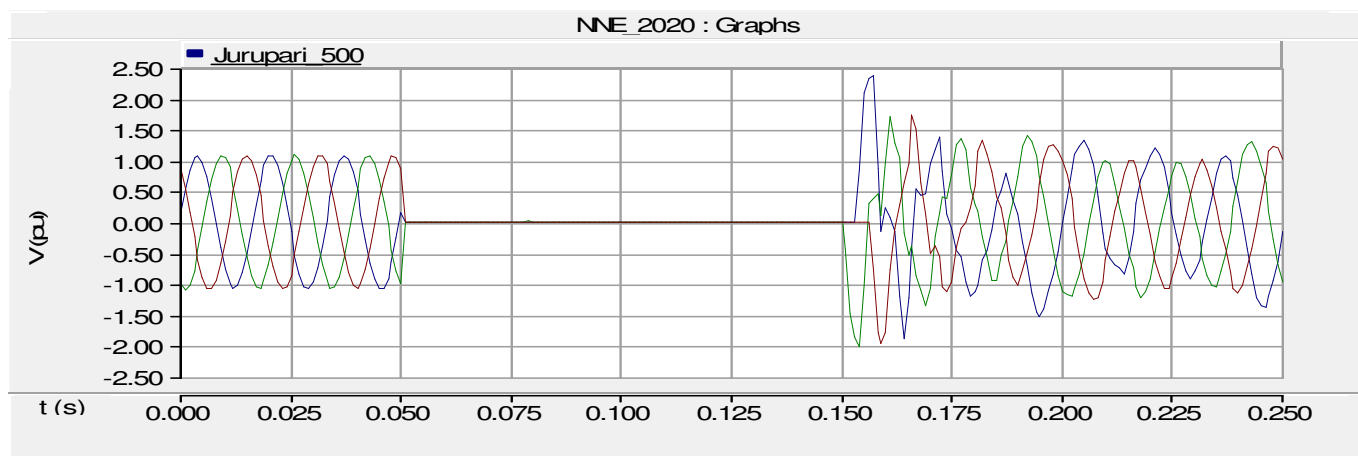


Figura V-117 Curto trifásico em Jurupari 500 kV, tensão em Jurupari 500 kV – 7P

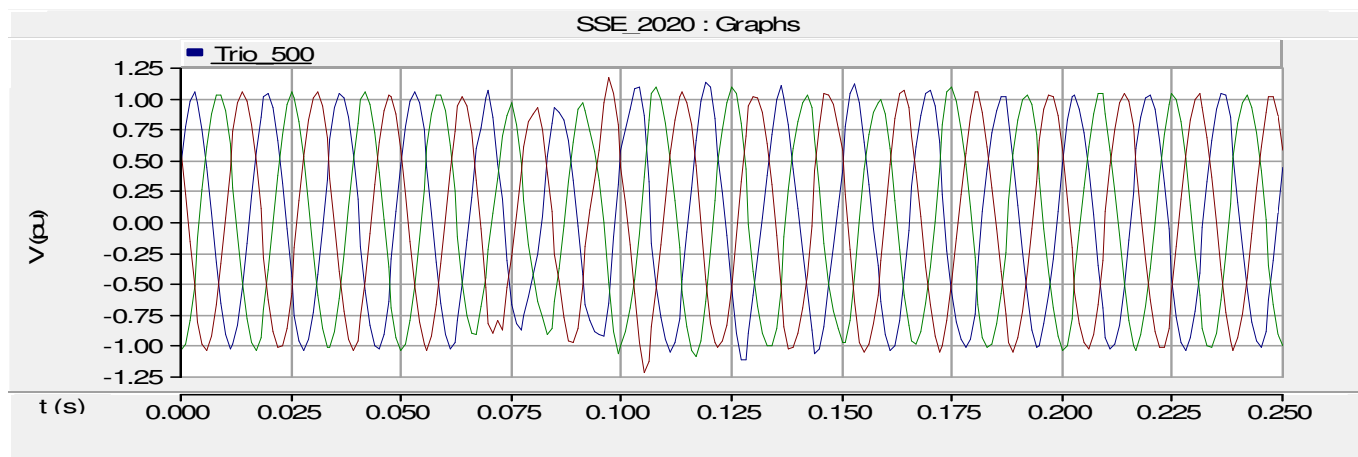


Figura V-118 Curto monofásico em Jurupari 500 kV, tensão em T. Rio 500 kV – 7P

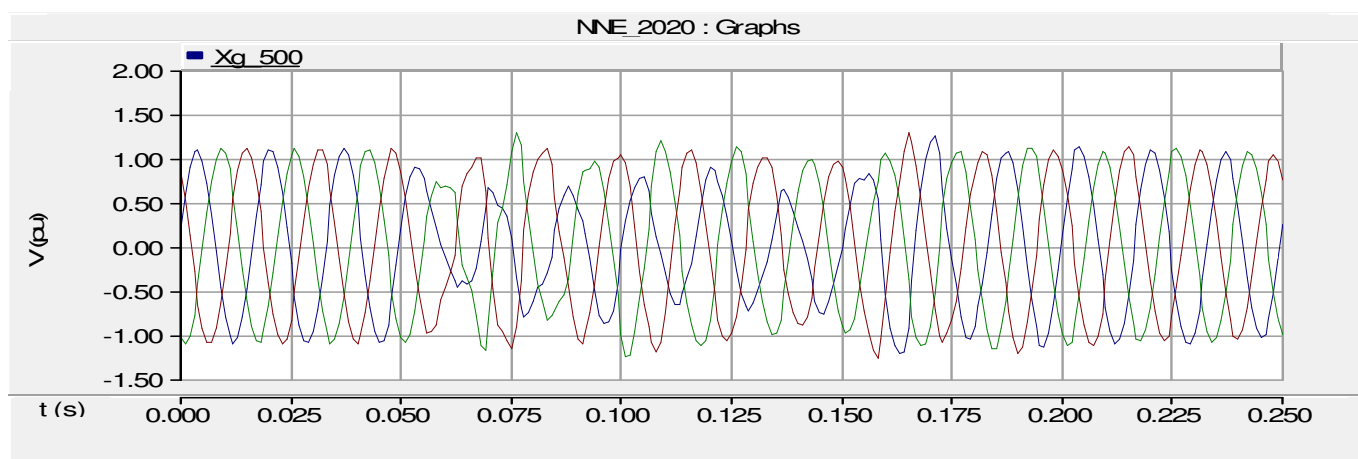


Figura V-119 Curto monofásico em Jurupari 500 kV, tensão em Xingu 500 kV – 7P

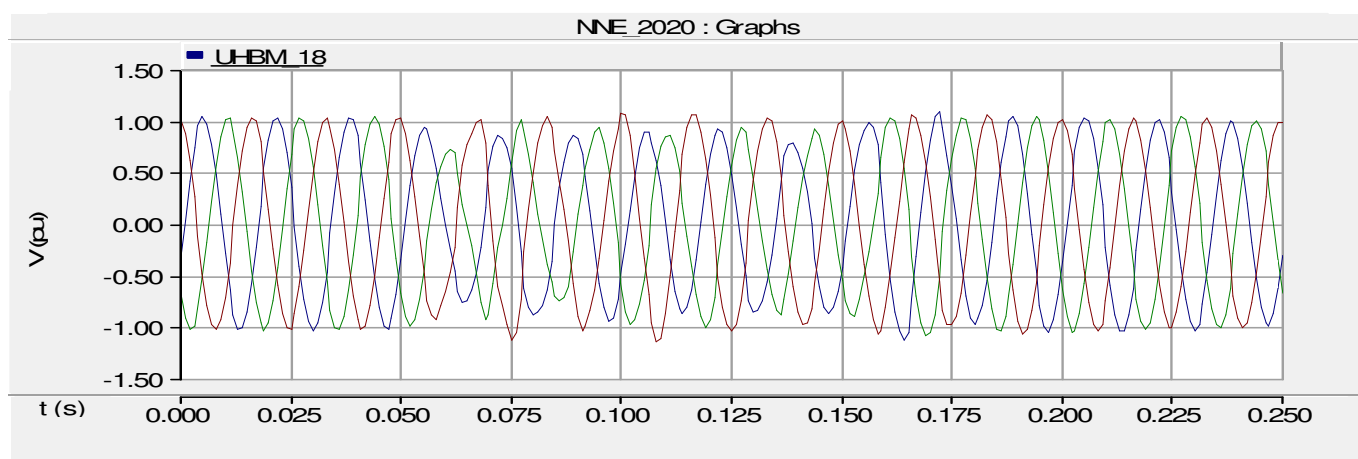


Figura V-120 Curto monofásico em Jurupari 500 kV, tensão em Belo Monte 18 kV – 7P

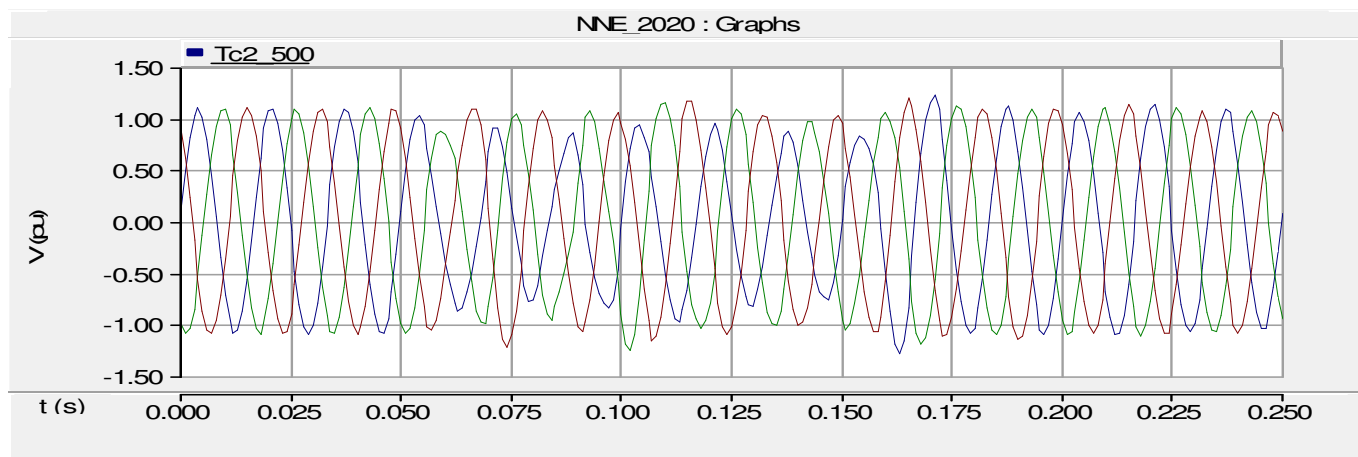


Figura V-121 Curto monofásico em Jurupari 500 kV, tensão em Tucuruí 2 500 kV – 7P

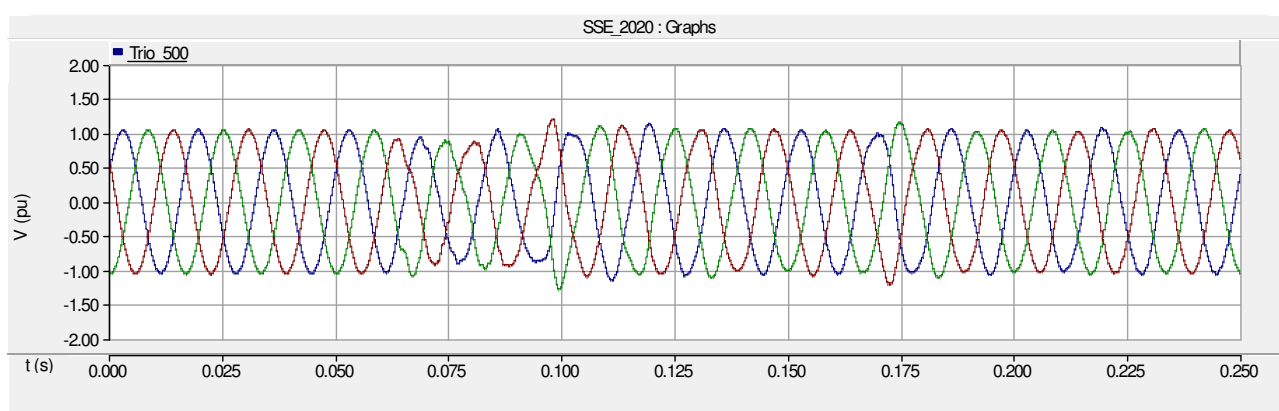


Figura V-122 Curto trifásico em Parauapebas 500 kV, tensão em T. Rio 500 kV – 7P

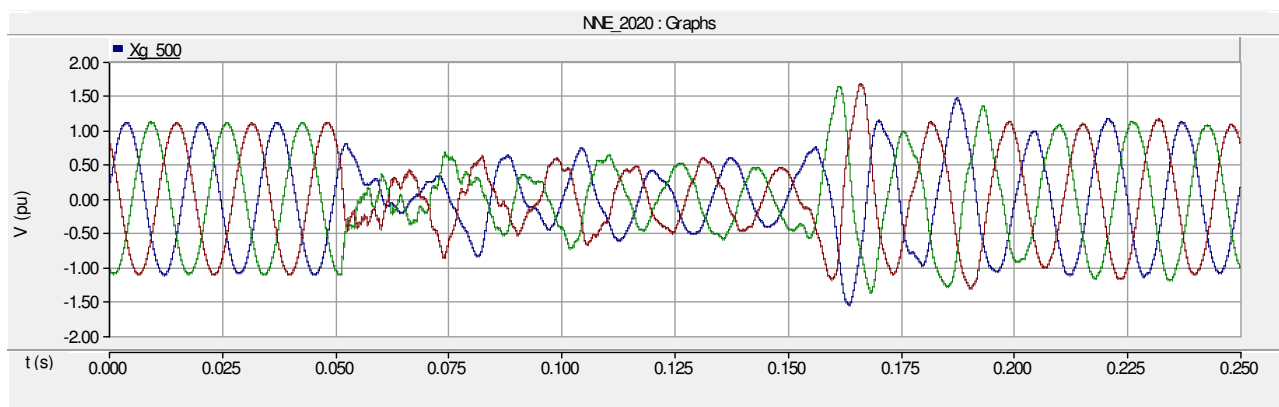


Figura V-123 Curto trifásico em Parauapebas 500 kV, tensão em Xingu 500 kV – 7P

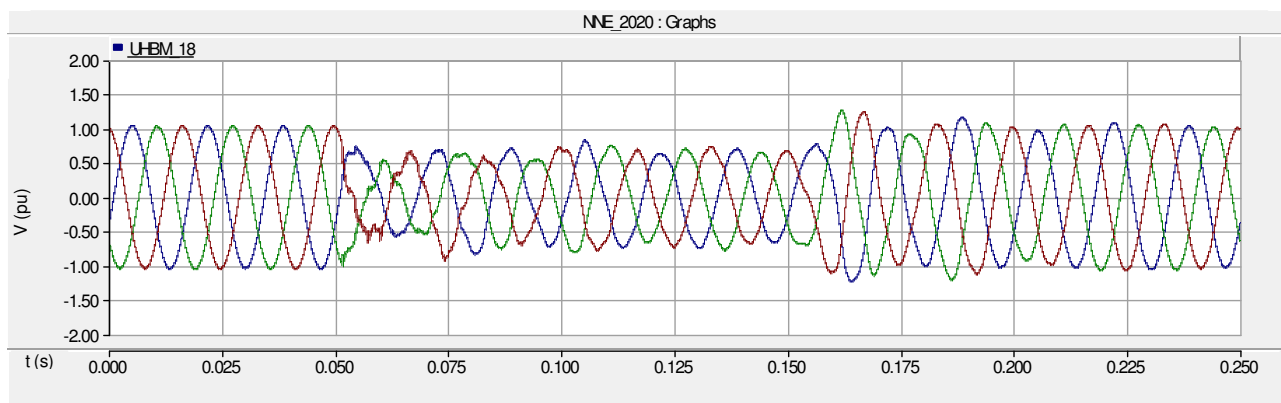


Figura V-124 Curto trifásico em Parauapebas 500 kV, tensão em Belo Monte 18 kV – 7P

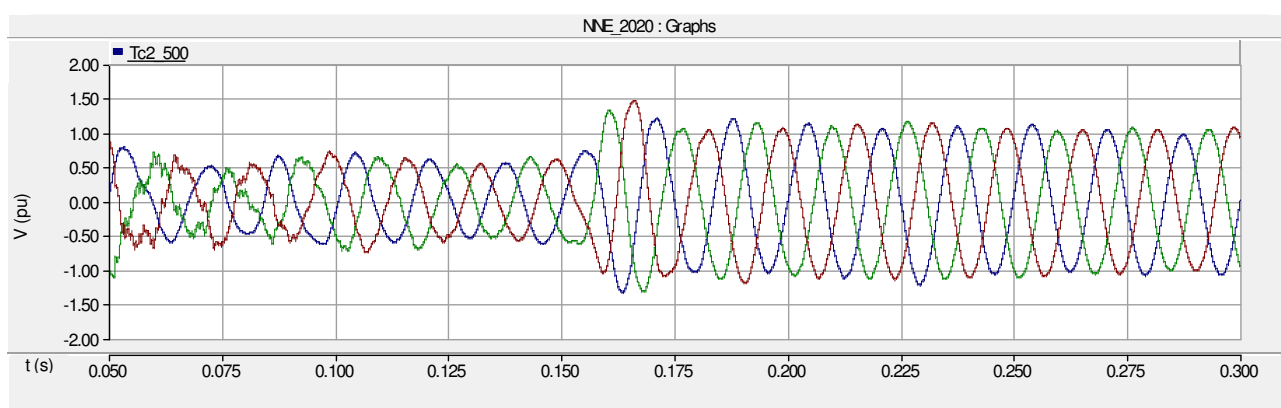


Figura V-125 Curto trifásico em Parauapebas 500 kV, tensão em Tucuruí 2 500 kV – 7P

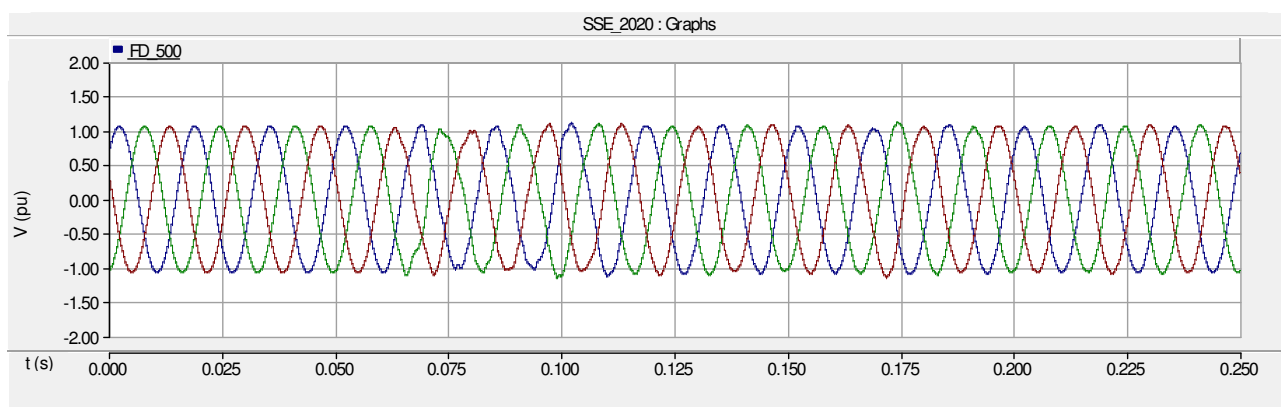


Figura V-126 Curto trifásico em Parauapebas 500 kV, tensão em Fernão Dias 500 kV – 7P

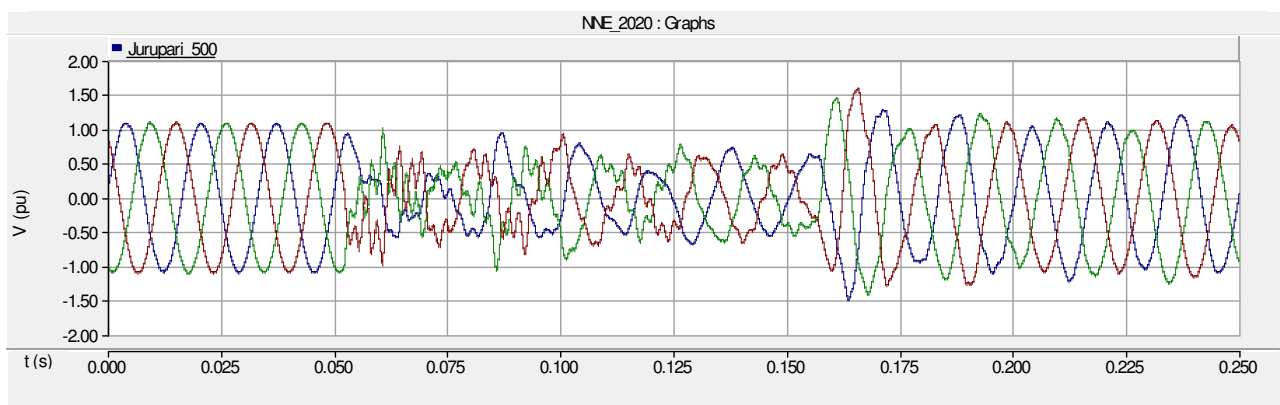


Figura V-127 Curto trifásico em Parauapebas 500 kV, tensão em Jurupari 500 kV – 7P

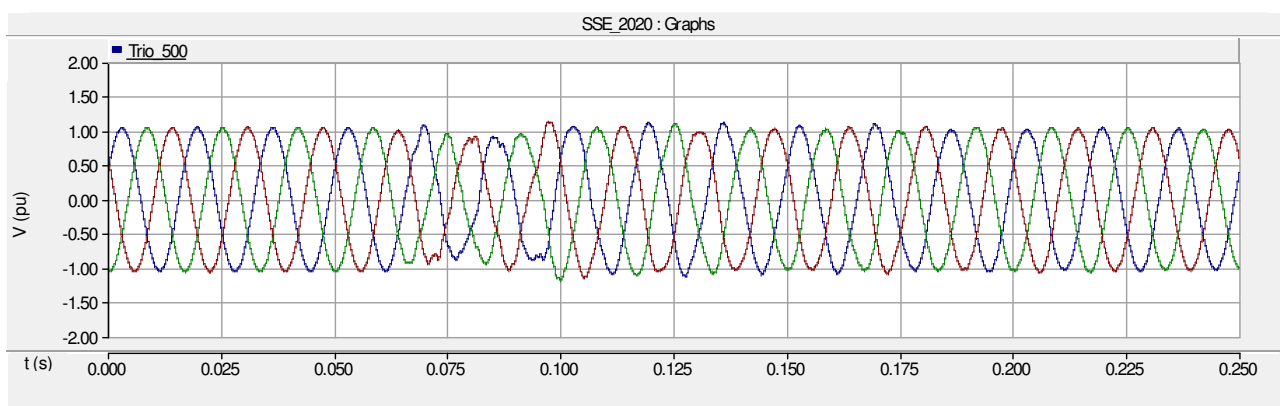


Figura V-128 Curto monofásico em Parauapebas 500 kV, tensão em T. Rio 500 kV – 7P

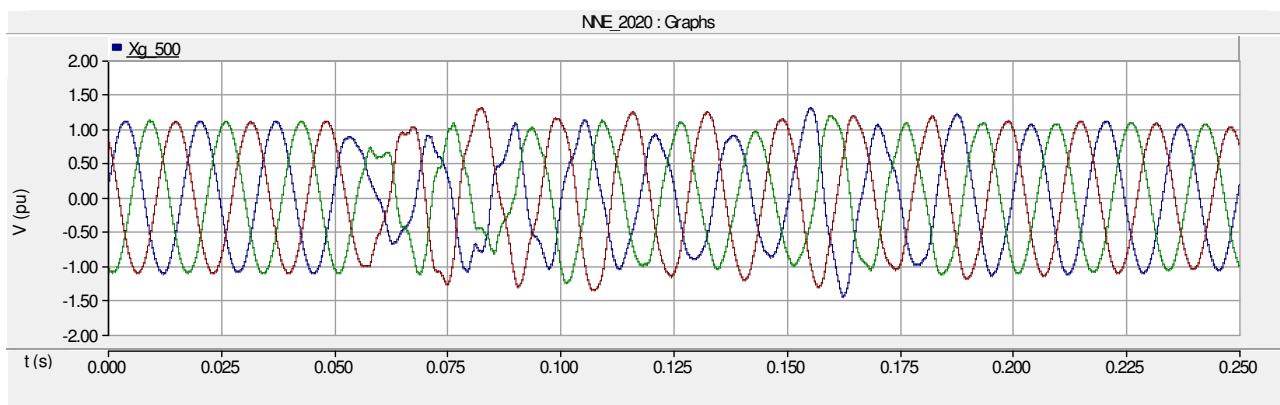


Figura V-129 Curto monofásico em Parauapebas 500 kV, tensão em Xingu 500 kV – 7P

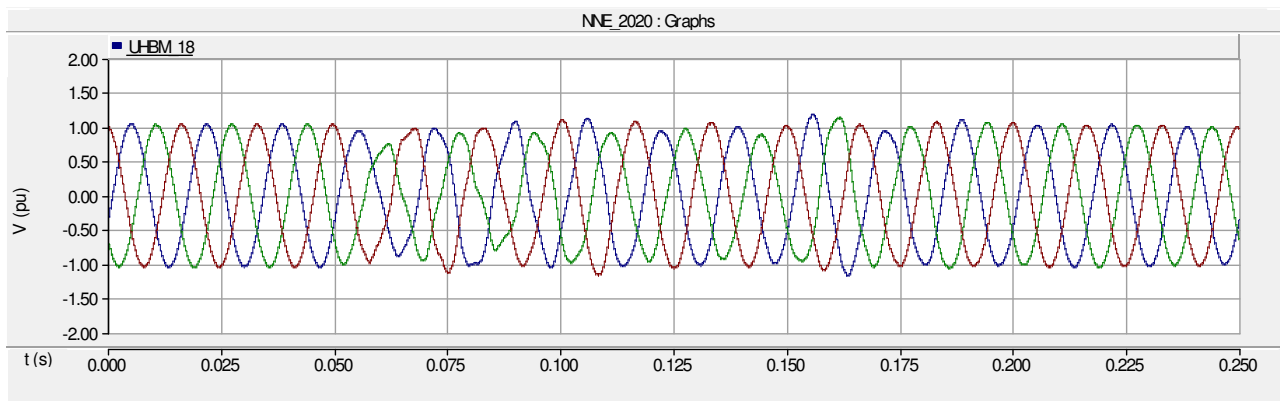


Figura V-130 Curto monofásico em Parauapebas 500 kV, tensão em Belo Monte 18 kV – 7P

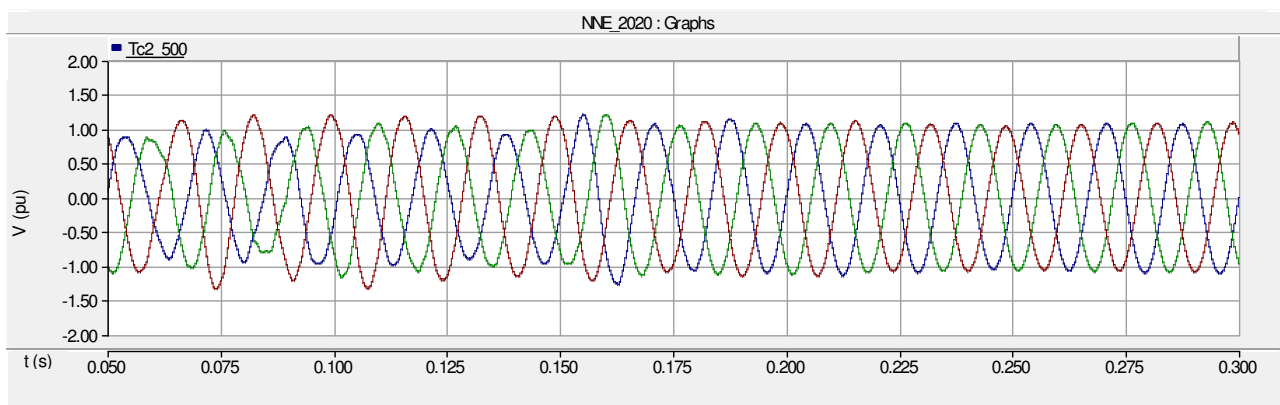


Figura V-131 Curto monofásico em Parauapebas 500 kV, tensão em Tucuruí 2 500 kV – 7P

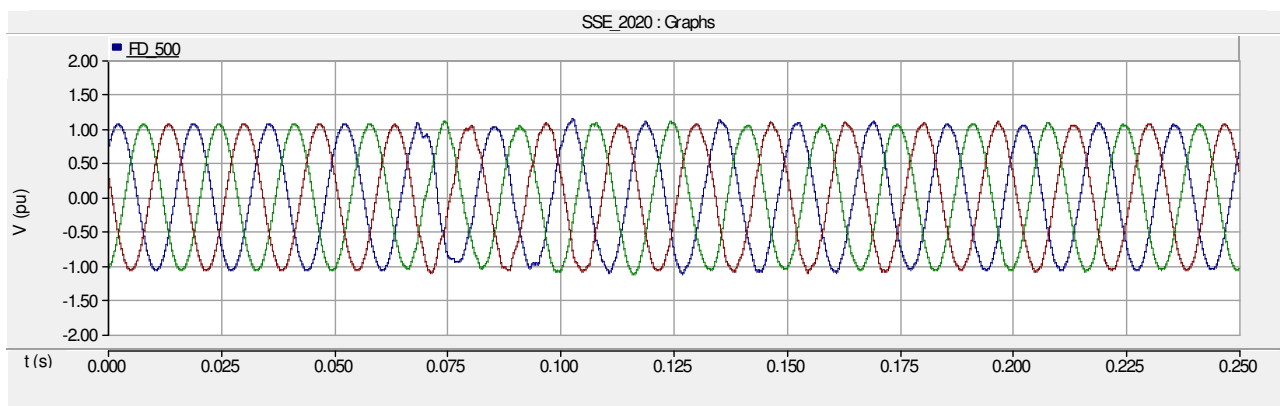


Figura V-132 Curto monofásico em Parauapebas 500 kV, tensão em Fernão Dias 500 kV – 7P

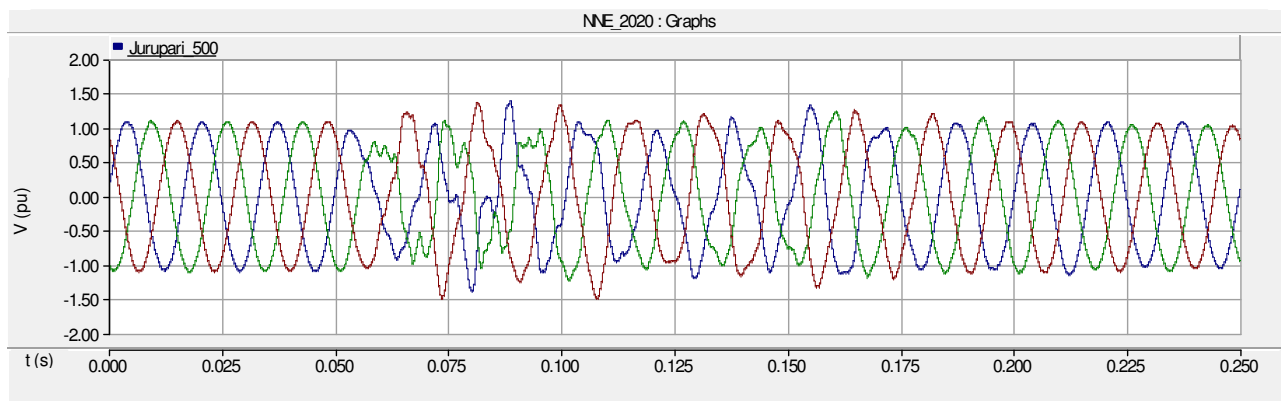


Figura V-133 Curto monofásico em Parauapebas 500 kV, tensão em Jurupari 500 kV – 7P

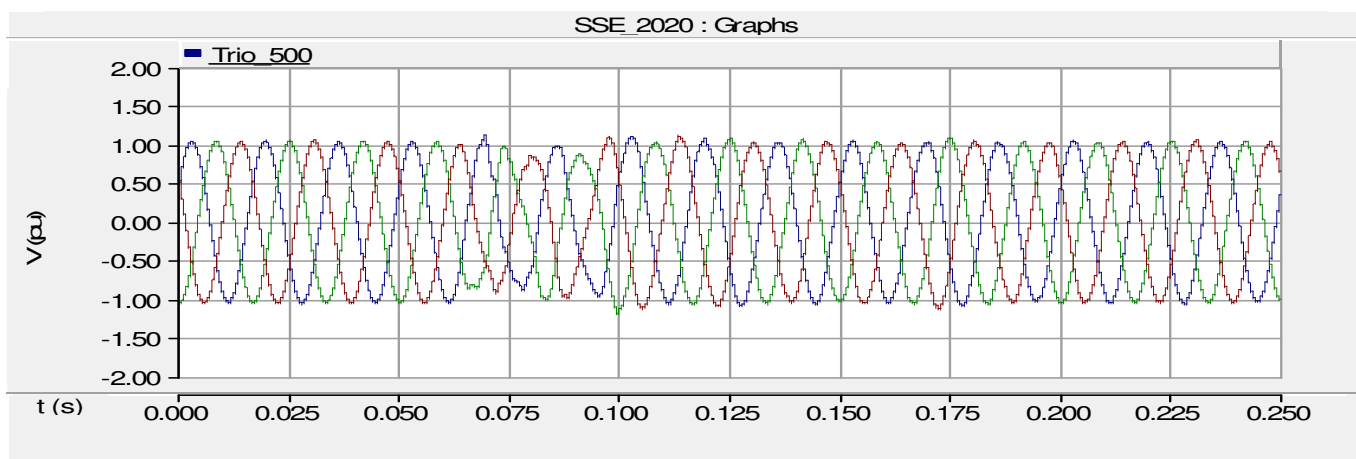


Figura V-134 Curto trifásico em Miracema 500 kV, tensão em T. Rio 500 kV – 7P

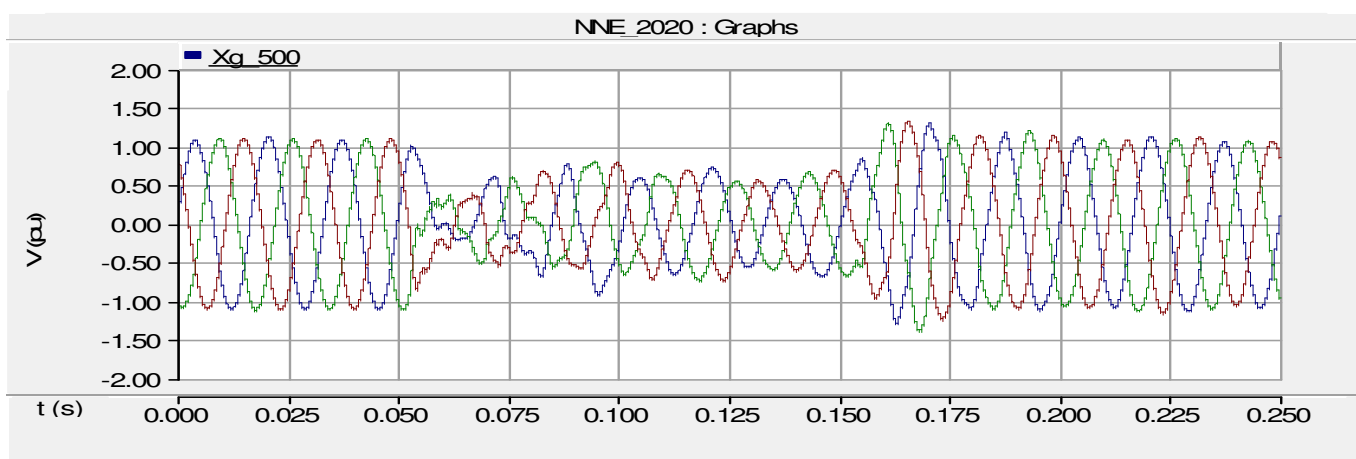


Figura V-135 Curto trifásico em Miracema 500 kV, tensão em Xingu 500 kV – 7P

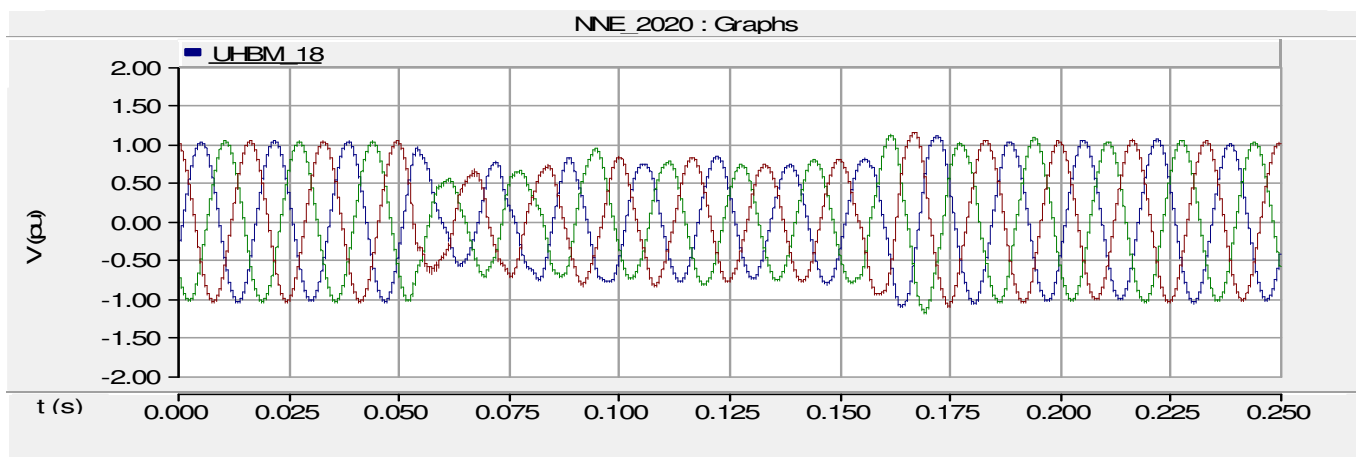


Figura V-136 Curto trífase em Miracema 500 kV, tensão em Belo Monte 18 kV – 7P

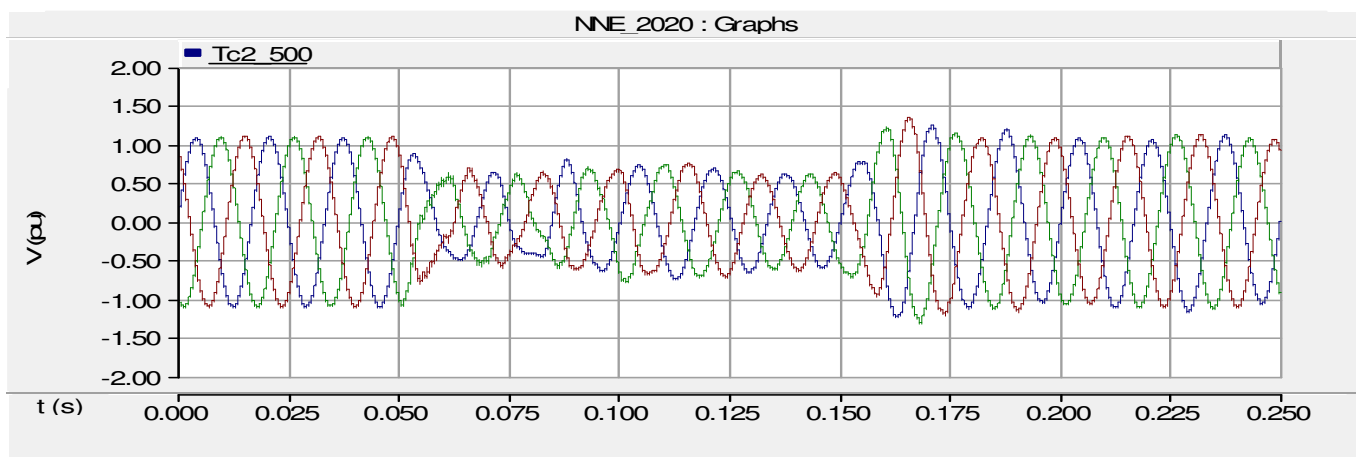


Figura V-137 Curto trífase em Miracema 500 kV, tensão em Tucuruí 2 500 kV – 7P

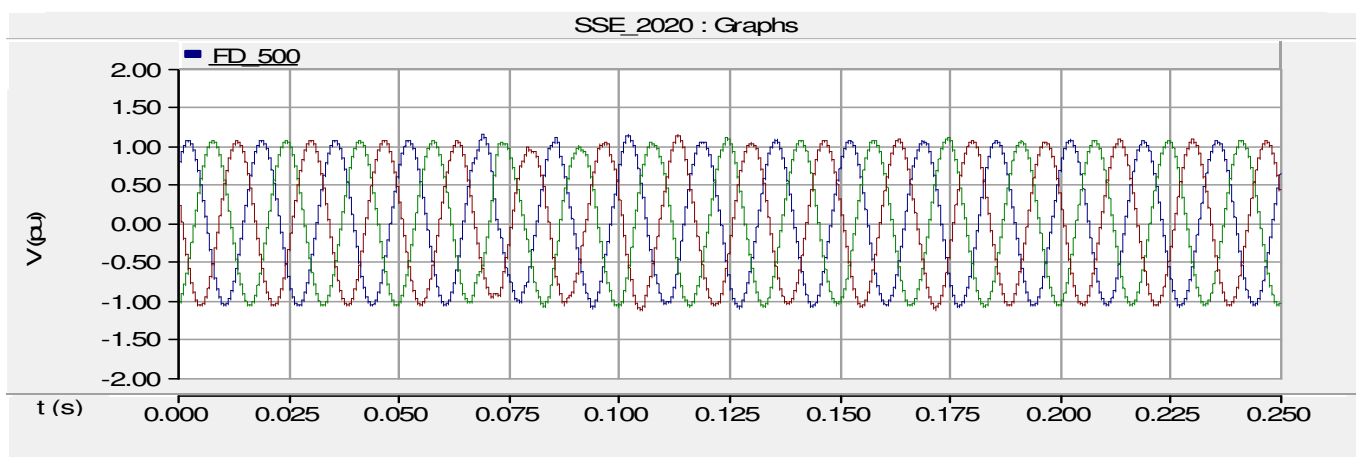


Figura V-138 Curto trífase em Miracema 500 kV, tensão em Fernão Dias 500 kV – 7P

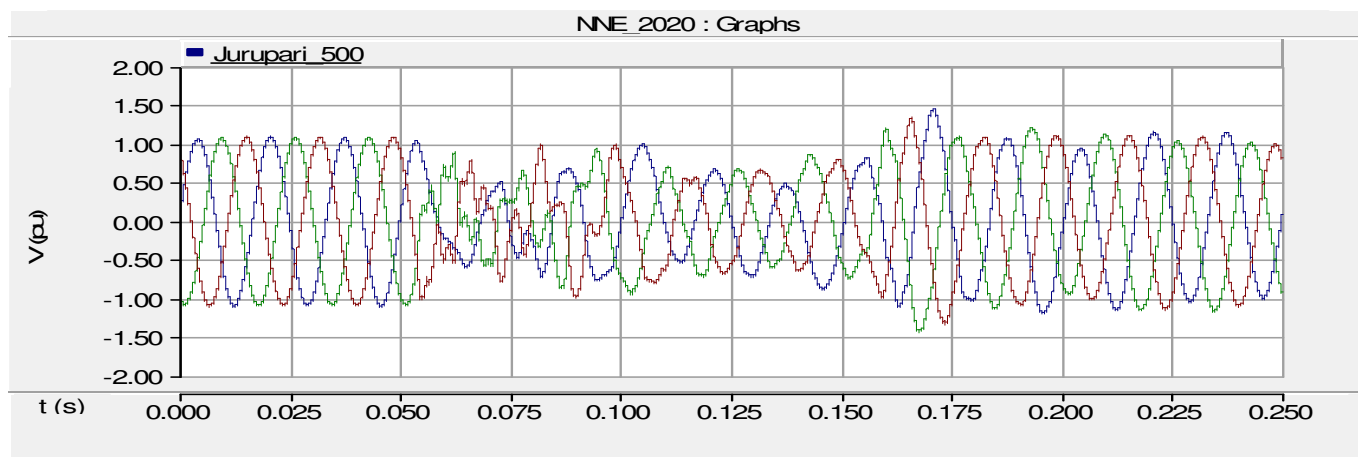


Figura V-139 Curto trifásico em Miracema 500 kV, tensão em Jurupari 500 kV – 7P

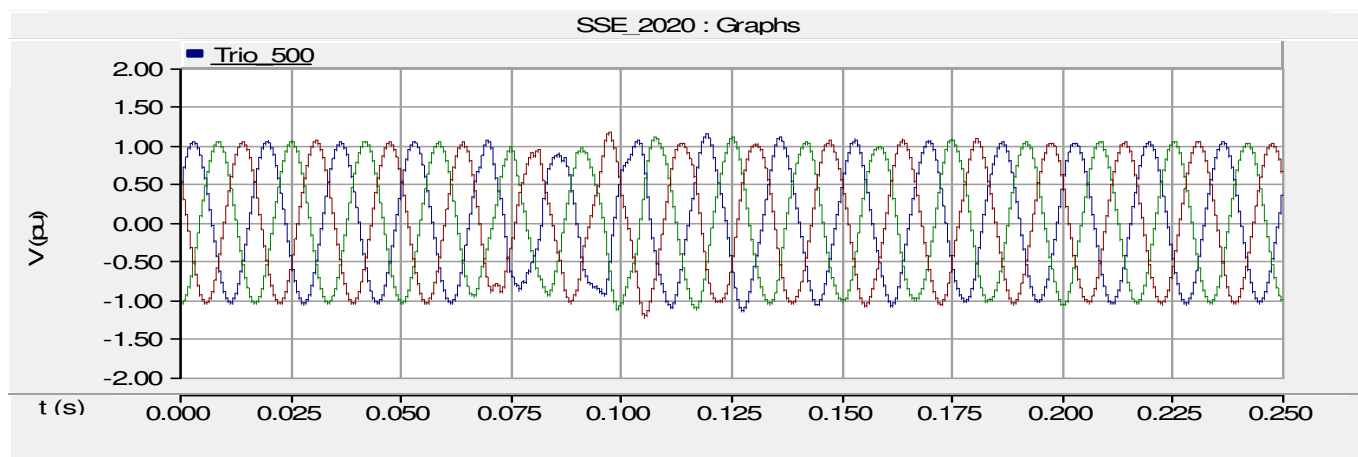


Figura V-140 Curto monofásico em Miracema 500 kV, tensão em T. Rio 500 kV – 7P

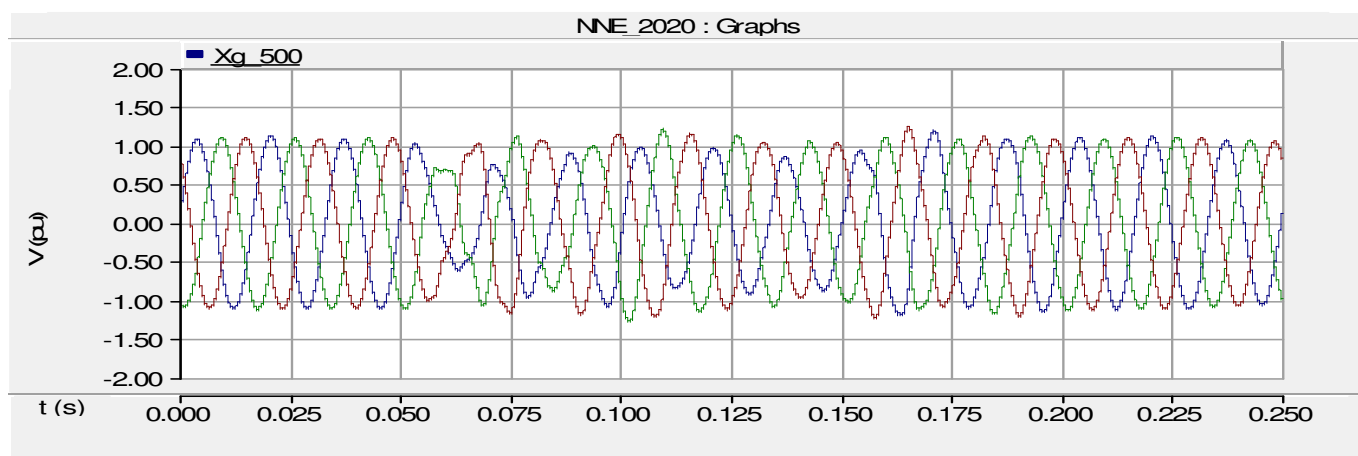


Figura V-141 Curto monofásico em Miracema 500 kV, tensão em Xingu 500 kV – 7P

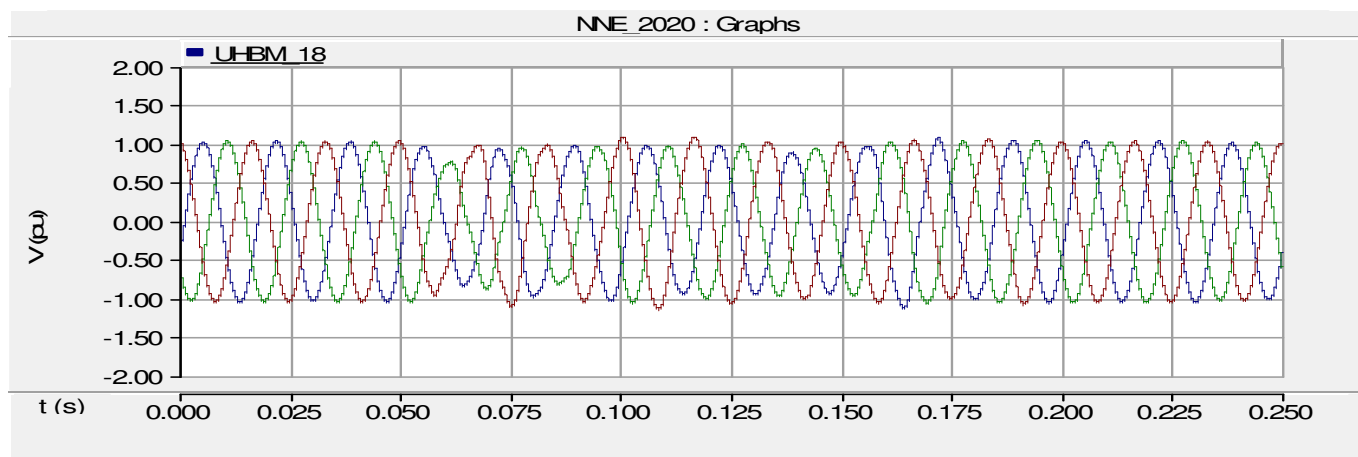


Figura V-142 Curto monofásico em Miracema 500 kV, tensão em Belo Monte 18 kV – 7P

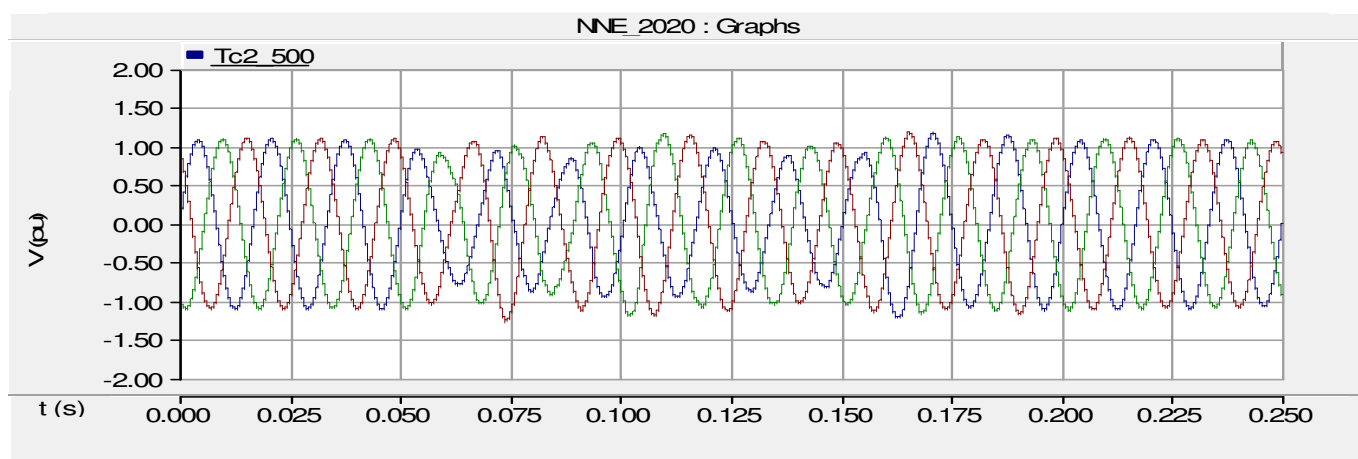


Figura V-143 Curto monofásico em Miracema 500 kV, tensão em Tucuruí 2 500 kV – 7P

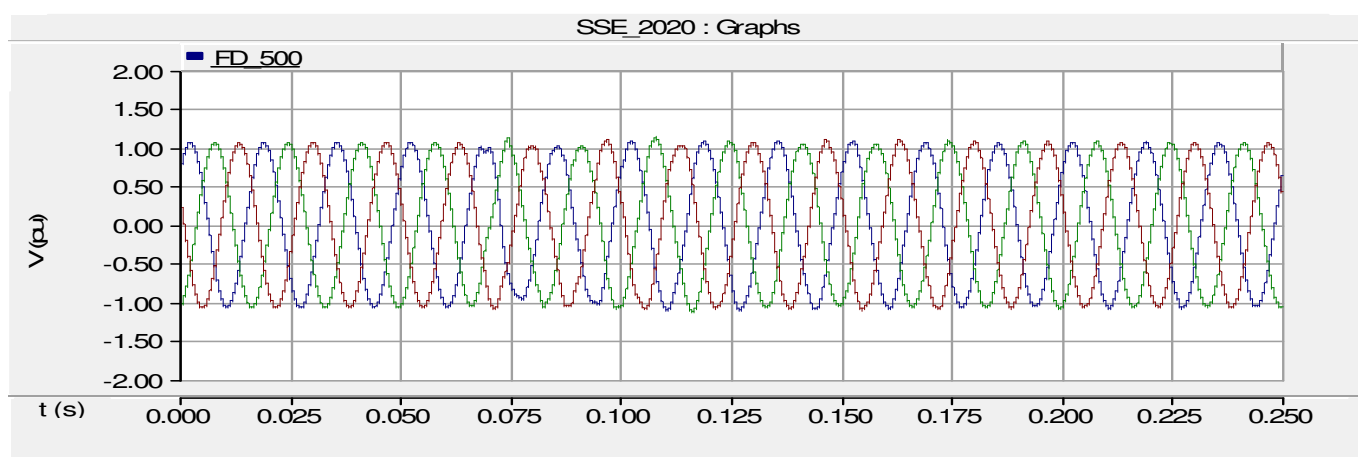


Figura V-144 Curto monofásico em Miracema 500 kV, tensão em Fernão Dias 500 kV – 7P

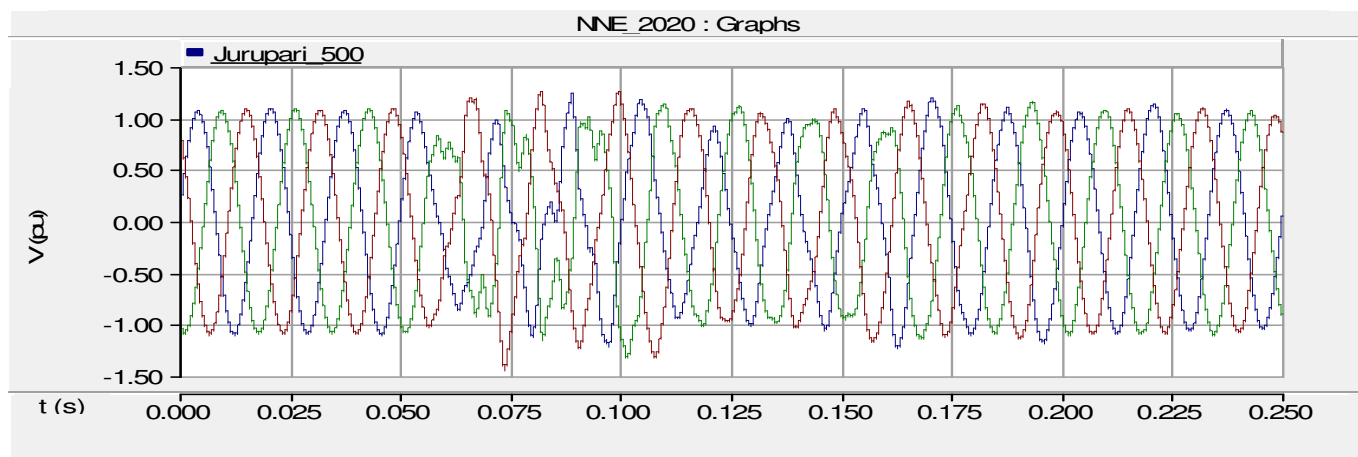


Figura V-145 Curto monofásico em Miracema 500 kV, tensão em Jurupari 500 kV – 7P

V.2.2 Recuperação da potência do bipolo

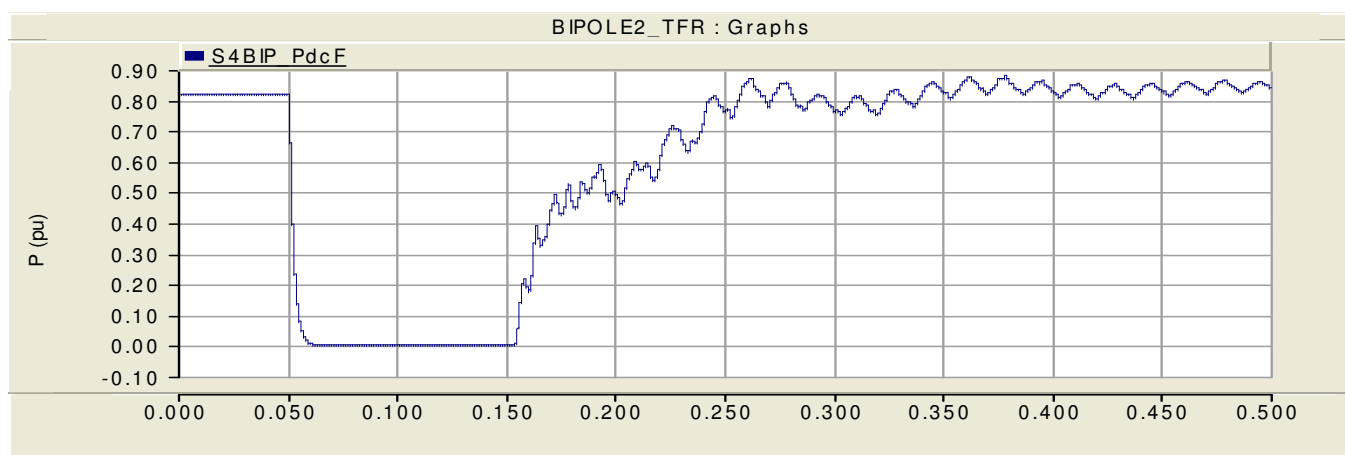


Figura V-146 Curto trifásico no T. Rio 500 kV, potência CC em T. Rio – 7P

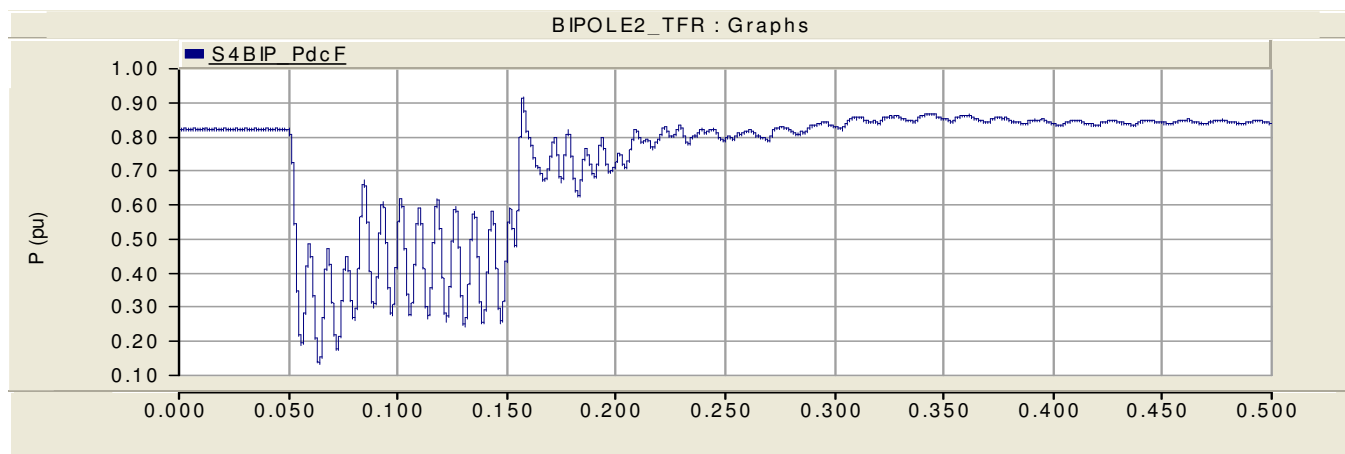


Figura V-147 Curto monofásico no T. Rio 500 kV, potência CC em T. Rio – 7P

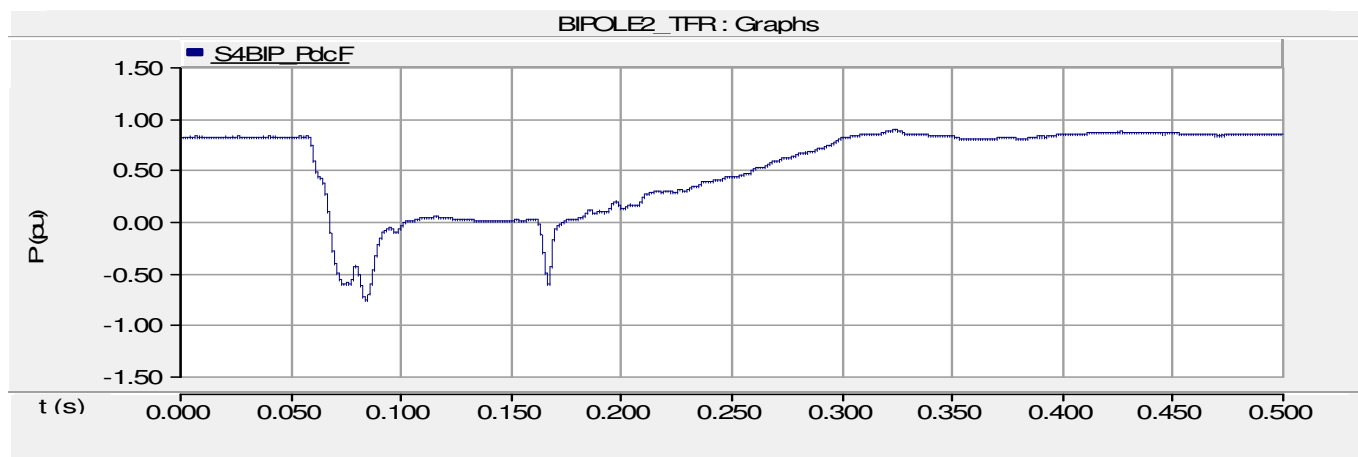


Figura V-148 Curto trifásico em Xingu 500 kV, potência CC em Xingu – 7P

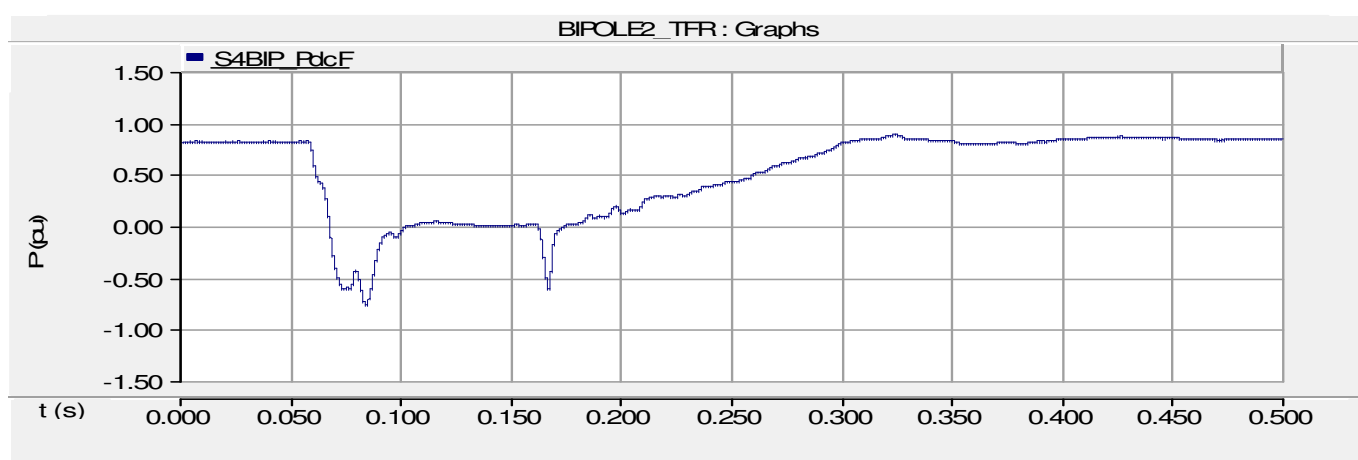


Figura V-149 Curto monofásico em Xingu 500 kV, potência CC em Xingu – 7P

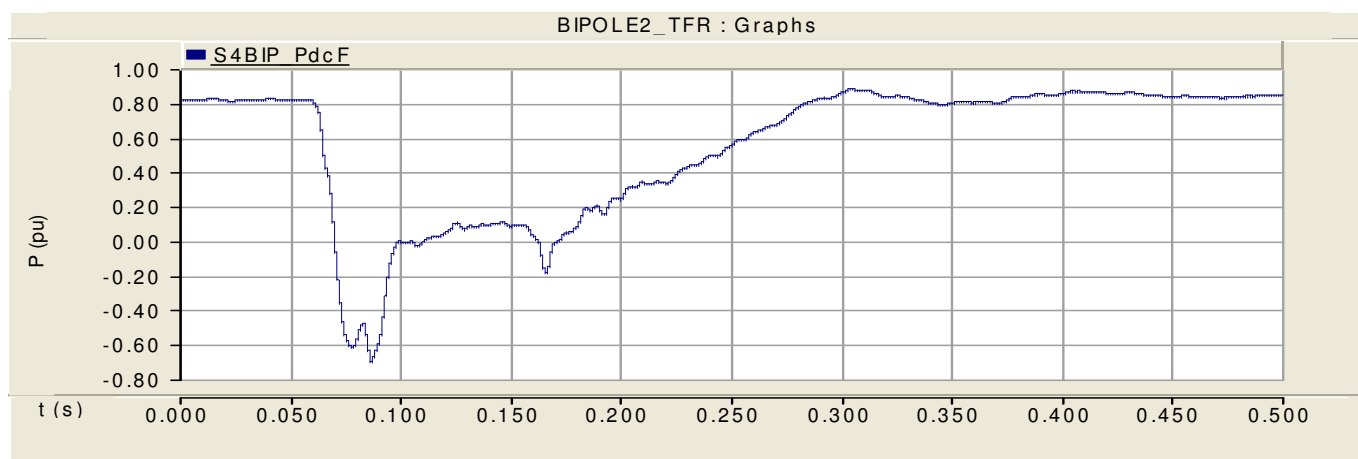


Figura V-150 Curto trifásico em Tucuruí 2 500 kV, potência CC em Xingu – 7P

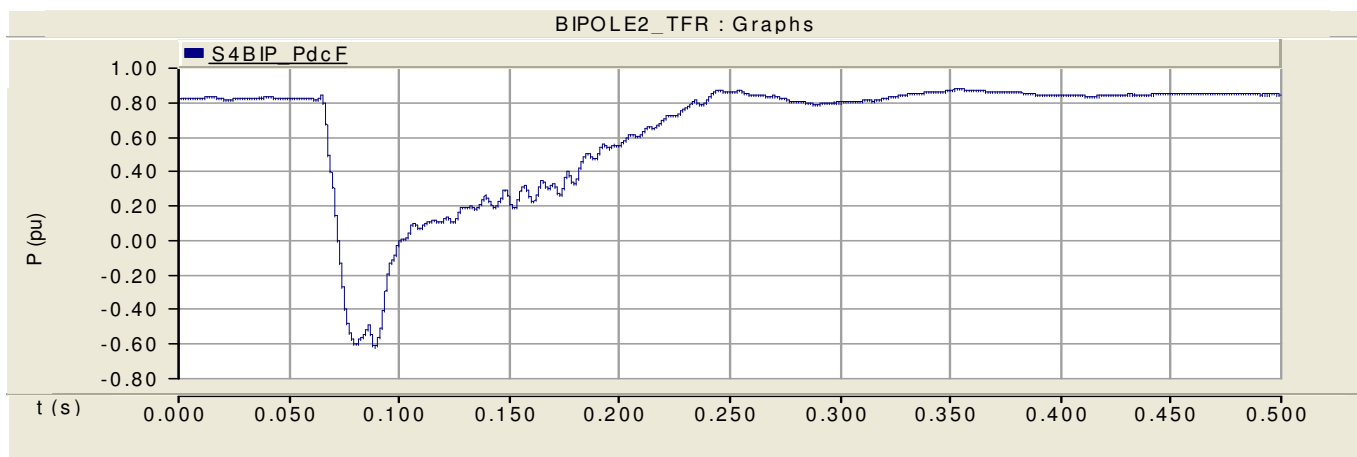


Figura V-151 Curto monofásico em Tucuruí 2 500 kV, potência CC em Xingu – 7P

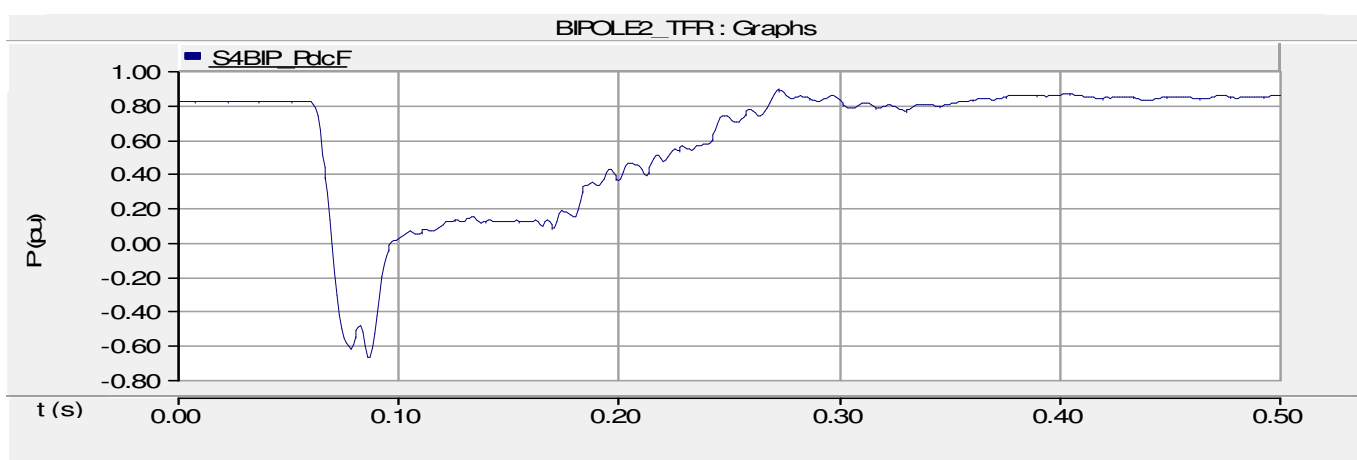


Figura V-152 Curto trifásico em Jurupari 500 kV, potência CC em T. Rio – 7P

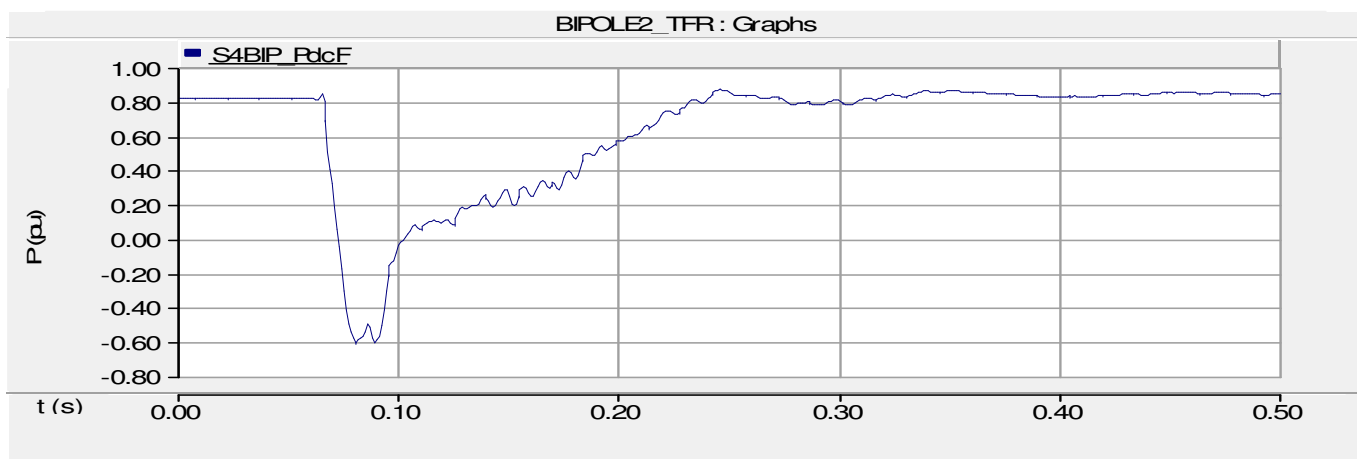


Figura V-153 Curto monofásico em Jurupari 500 kV, potência CC em T. Rio – 7P

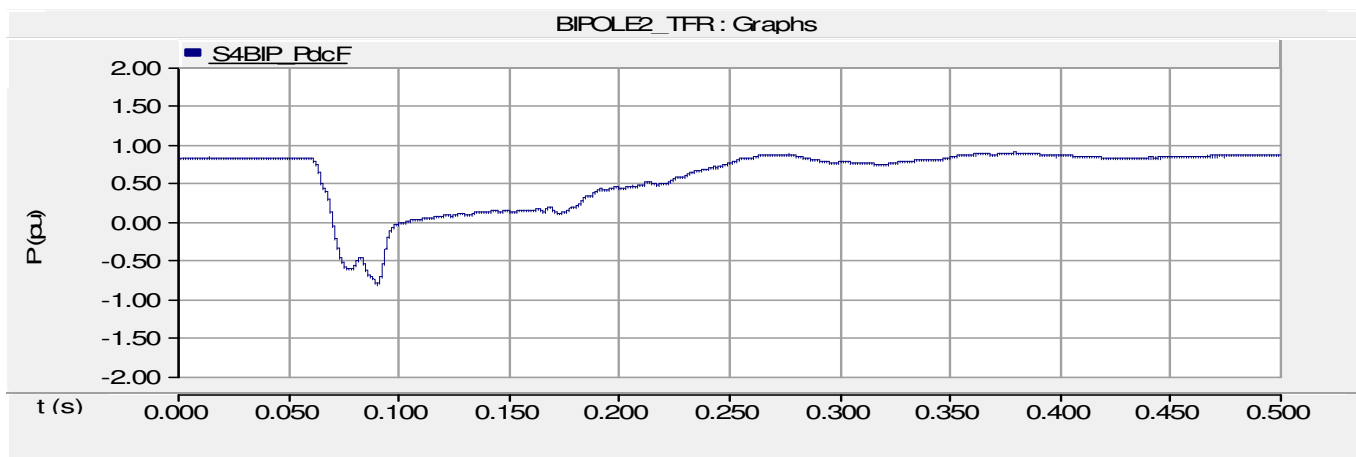


Figura V-154 Curto trifásico em Parauapebas 500 kV,, potência CC em T. Rio – 7P (169 ms)

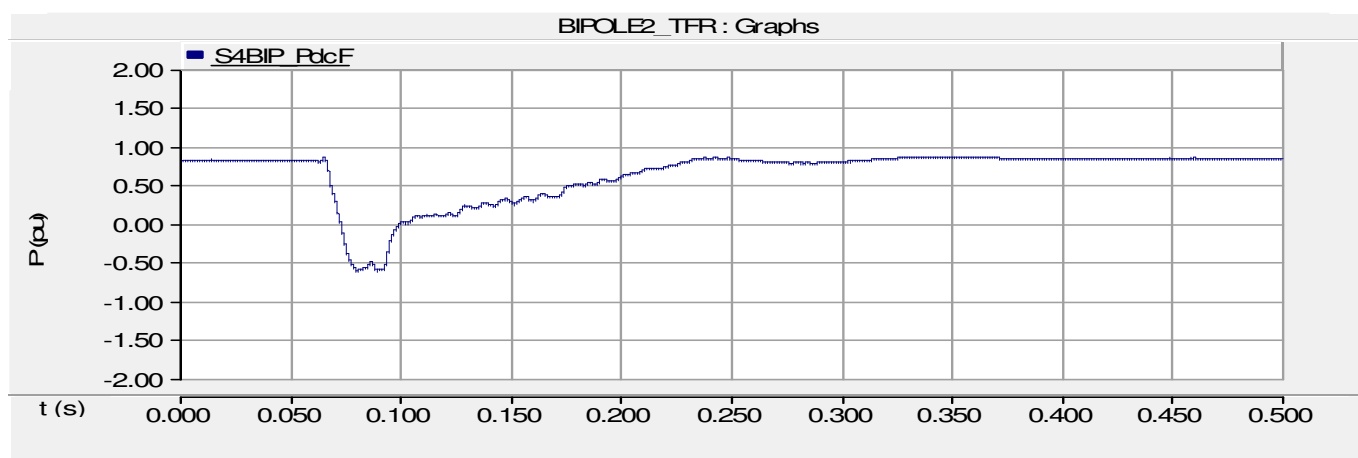


Figura V-155 Curto monofásico em Parauapebas 500 kV,, potência CC em T. Rio – 7P (70 ms)

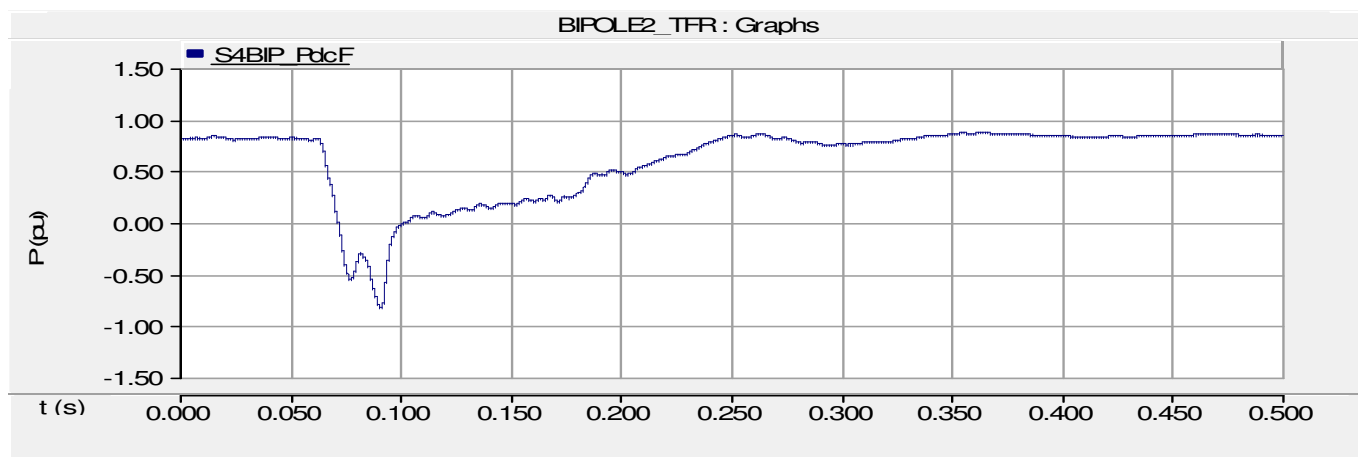


Figura V-156 Curto trifásico em Miracema 500 kV, potência CC em T. Rio – 7P

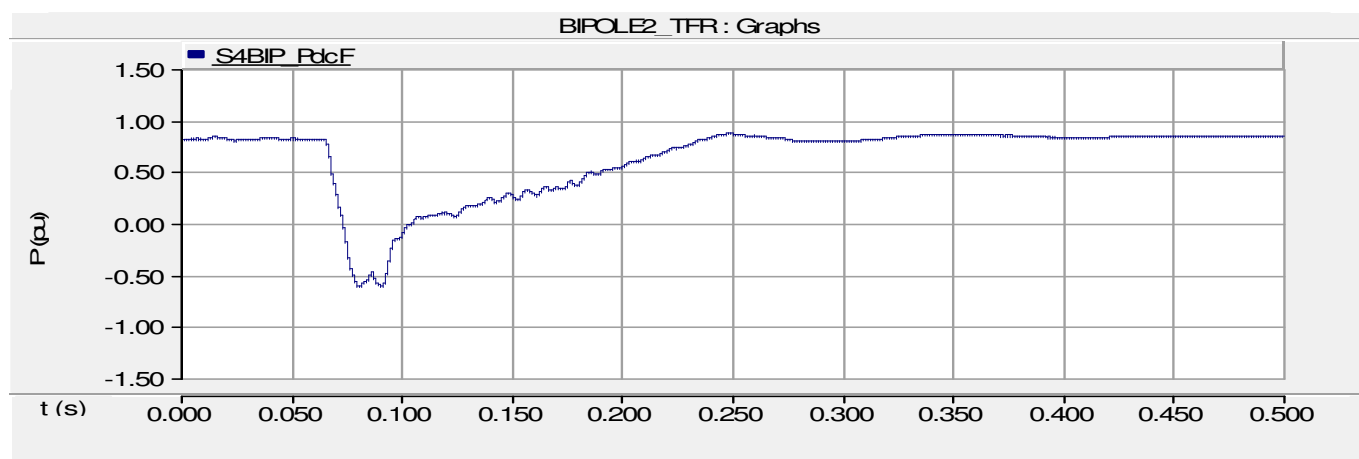


Figura V-157 Curto monofásico em Miracema 500 kV, potência CC em T. Rio – 7P

V.2.3 Bloqueio de bipolo – 7P

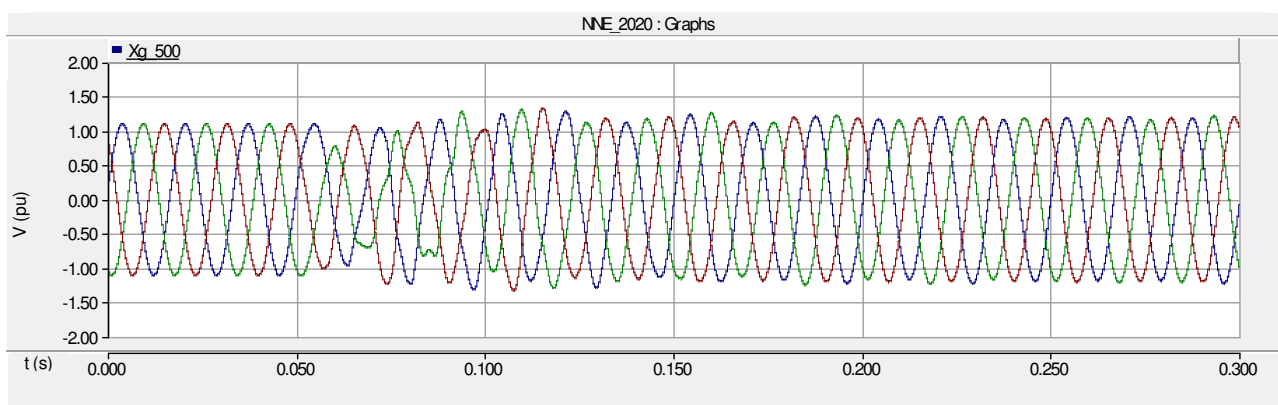


Figura V-158 Bloqueio de bipolo em Xingu 500 kV – tensão em Xingu 500 kV - 7P

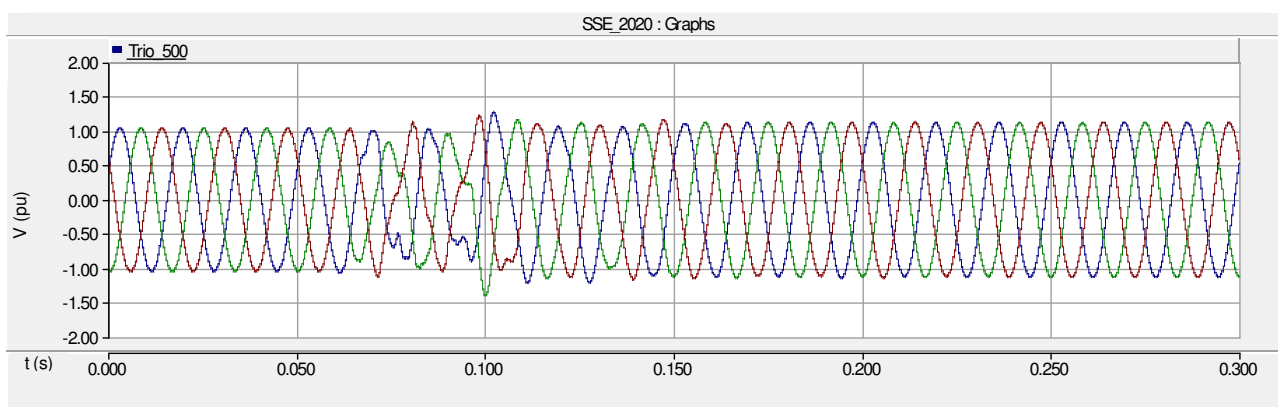


Figura V-159 Bloqueio de bipolo em Xingu 500 kV – tensão em T. Rio 500 kV - 7P

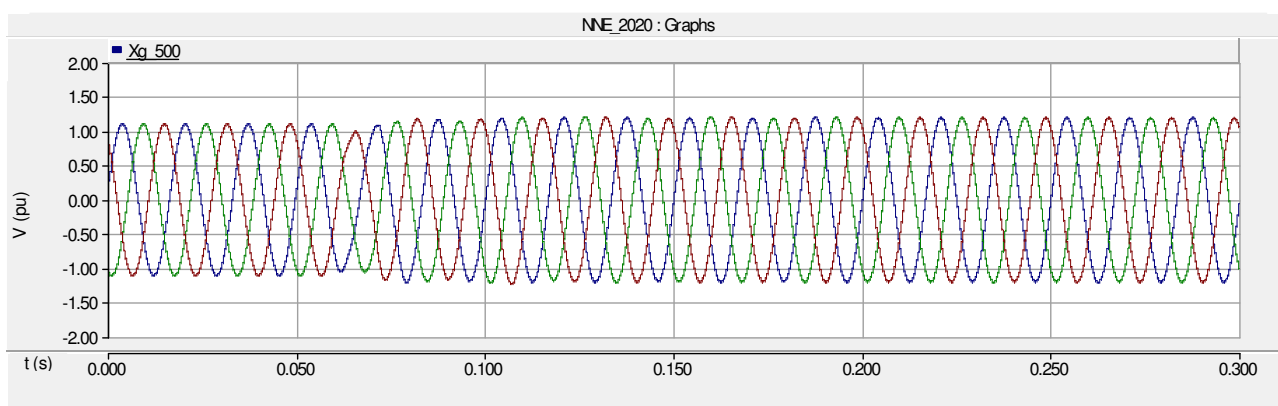


Figura V-160 Bloqueio de bipolo em T. Rio 500 kV – tensão em Xingu 500 kV - 7P

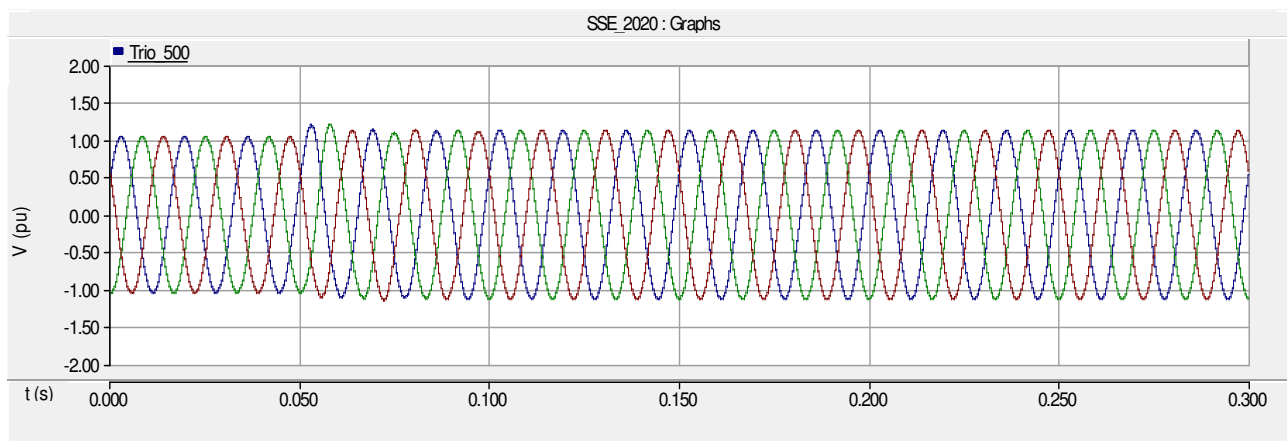


Figura V-161 Bloqueio de bipolo em T. Rio 500 kV – tensão em T. Rio 500 kV - 7P

V.2.4 Curto-circuito na linha CC – 7P

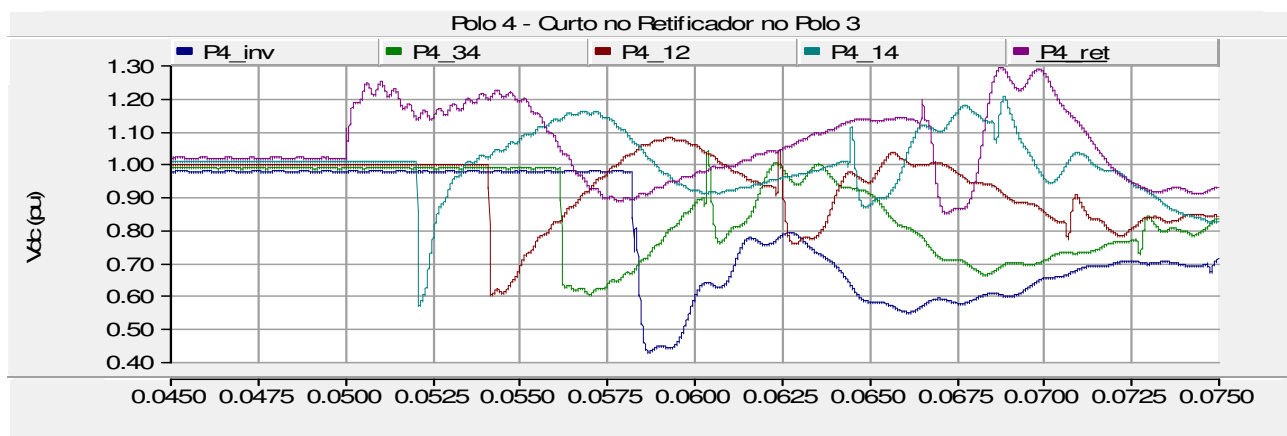


Figura V-162 Sobretensões no polo são ao longo da linha cc, curto a 0 km (retificadora) da linha - 7P

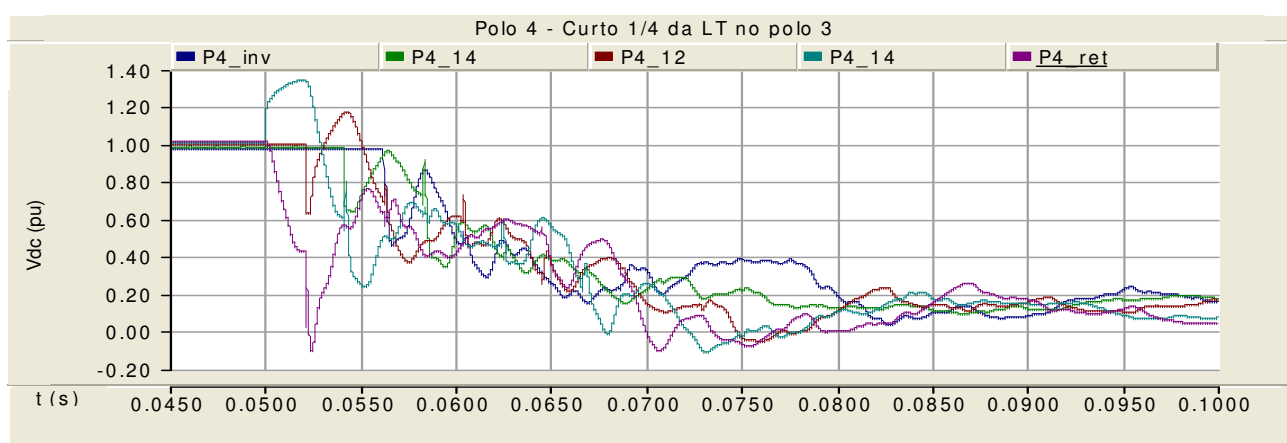


Figura V-163 Sobretensões no polo são ao longo da linha cc, curto a 1/4 do comprimento da linha - 7P

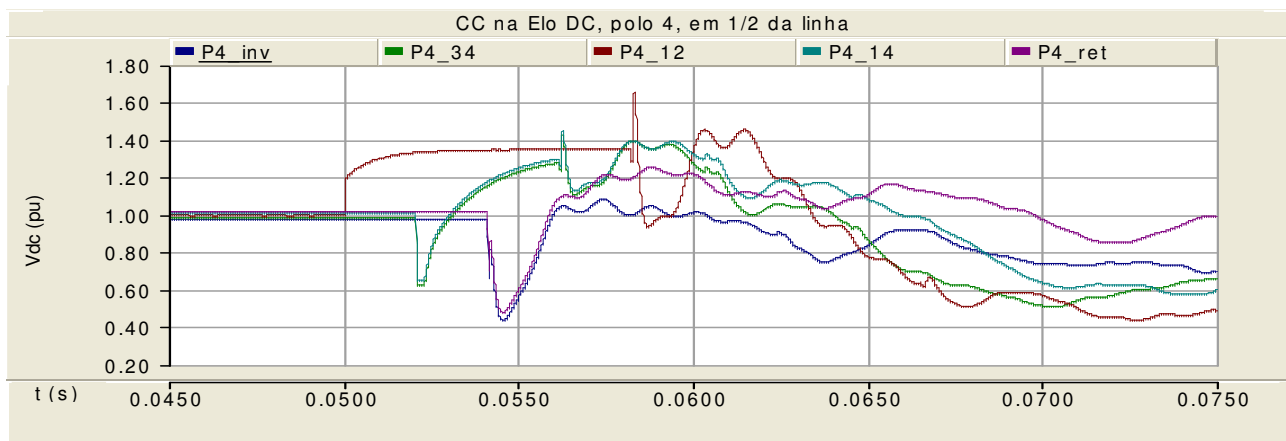


Figura V-164 Sobretensões no polo são ao longo da linha cc, curto a 1/2 do comprimento da linha - 7P

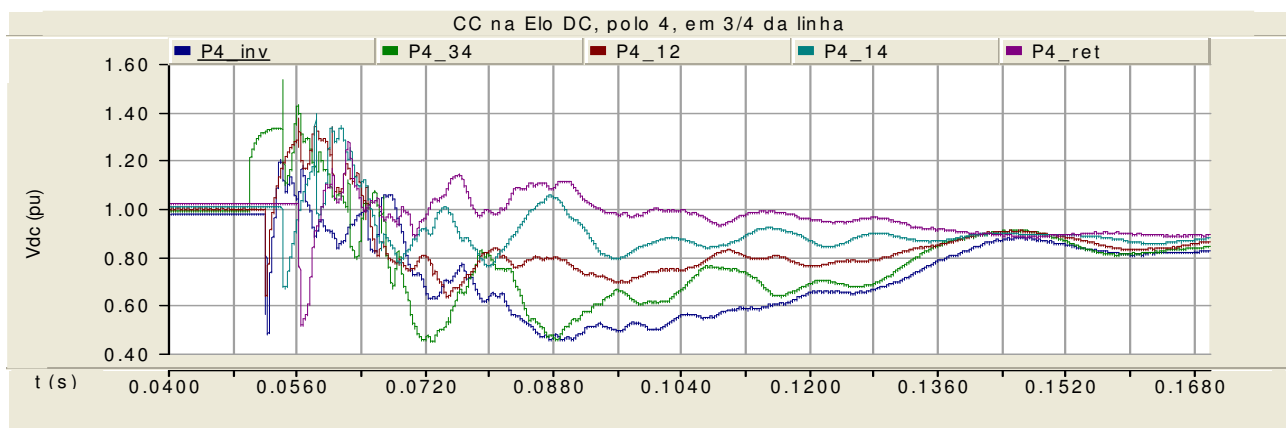


Figura V-165 Sobretensões no polo são ao longo da linha cc, curto a 3/4 do comprimento da linha - 7P

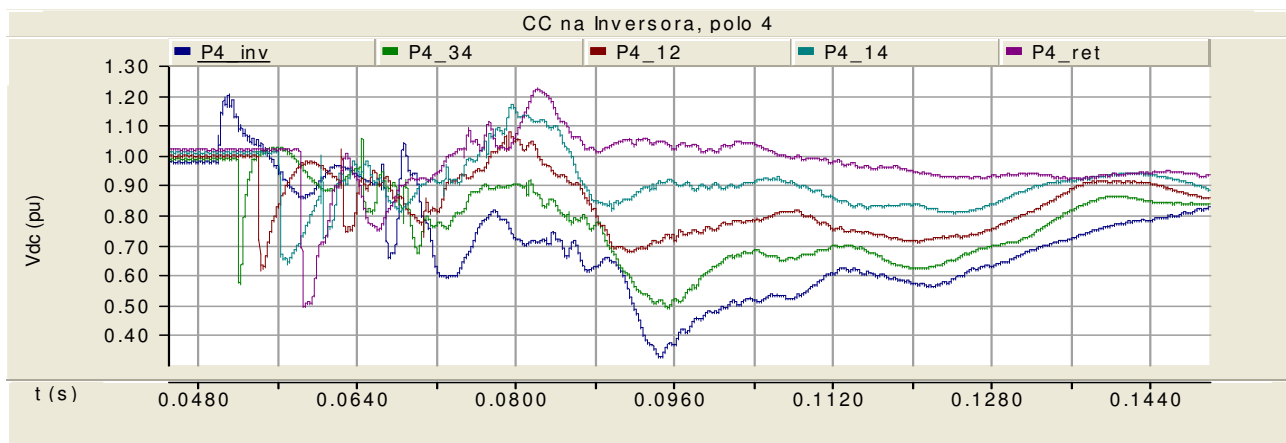


Figura V-166 Sobretensões no polo são ao longo da linha cc, curto final (inversora) da linha - 7P

ANEXO VI – CURVA DE SATURAÇÃO DAS MÁQUINAS_ANATEM E PSCAD

Curva de saturação das máquinas síncronas consideradas nos programas ANATEM e PSCAD

O ANATEM utiliza o modelo MD02 para representação da máquina síncrona de polos salientes com um enrolamento de campo e dois enrolamentos amortecedores sendo um de eixo direto e outro no eixo em quadratura.

O diagrama de blocos do modelo MD02 é apresentado a seguir:

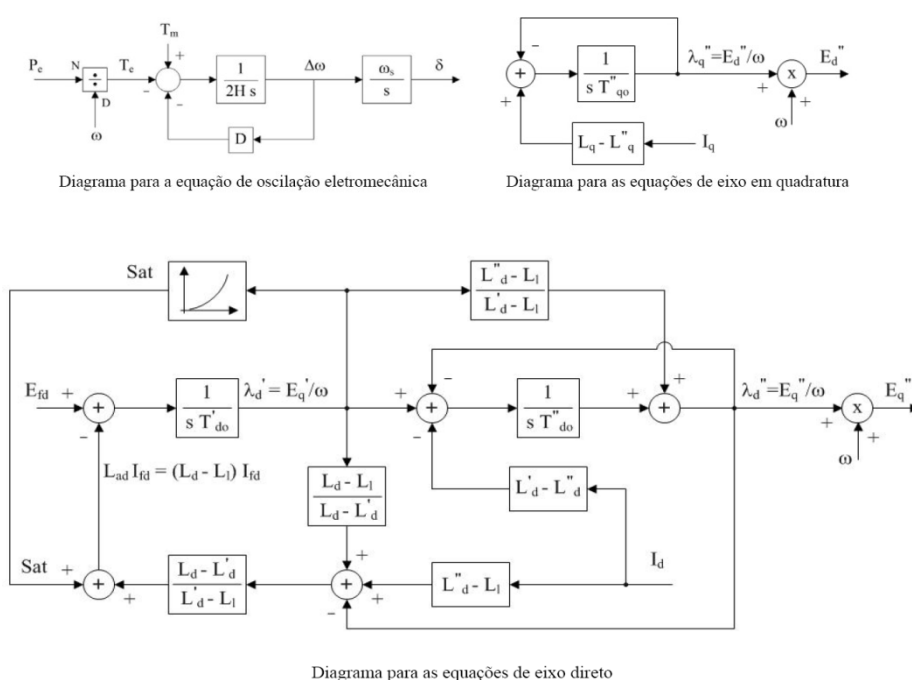


Figura VI.1: Diagrama de blocos do modelo de máquina síncrona no Anatem

Neste modelo a curva de saturação da máquina síncrona é representada pelos seguintes parâmetros:

Tabela VI.1: Parâmetros da curva de saturação no Anatem

Parâmetros	Valores
Ag	0.0193
Bg	8.322
C	0.8

Em regime permanente com máquina em vazio, a tensão terminal (V_t) é igual a tensão transitória do eixo em quadratura

$$E'q = V_t$$

A saturação (sat) é calculada em função dos parâmetros da tabela acima:

$$\text{sat} = A_g \cdot e^{B_g(E'q - C)}$$

A tensão de campo (Efd) é obtida pela soma da saturação e da tensão transitória do eixo em quadratura (E'q):

$$E_{fd} = \text{sat} + E'q$$

A corrente de campo (ifd) por sua vez é obtida a partir da tensão de campo (Efd) e da reatância (Xad):

$$i_{fd} = E_{fd} / X_{ad}$$

$$\text{Onde } X_{ad} = X_d - X_l = 0.82$$

O ANATEM utiliza o sistema de base recíproca no qual para tensão terminal de 1 pu em vazio na linha de entreferro a corrente de campo em pu é igual a $1/X_{ad}$.

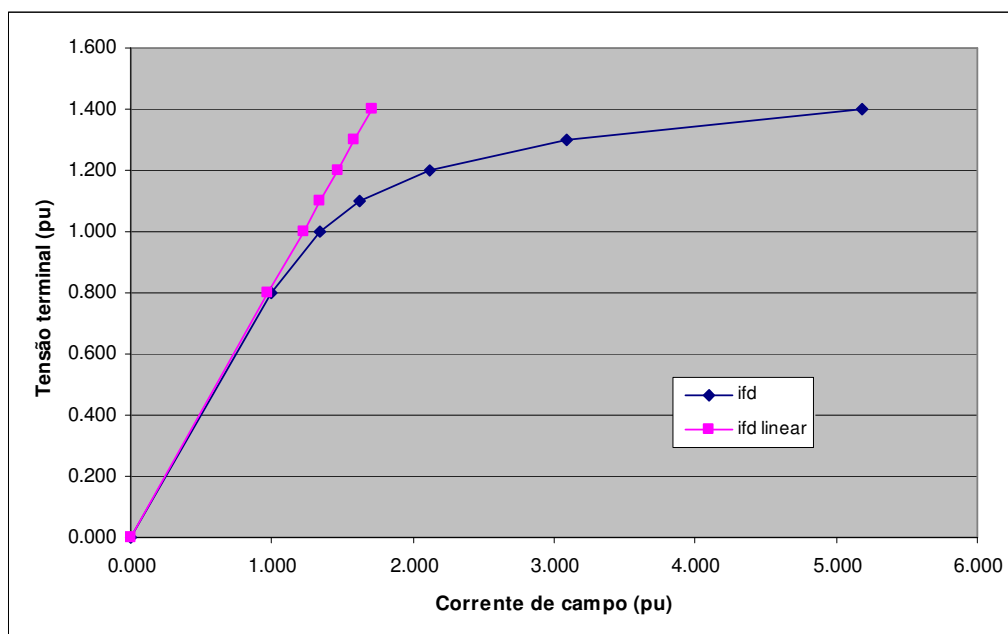


Figura VI.2: Curva de saturação no Anatem (base recíproca)

▪ Curva de Saturação do Fabricante

O fabricante do gerador fornece uma curva tensão terminal (V_t) x corrente de campo (IFD) utilizando o sistema de base não-recíproca, na qual a tensão terminal de 1 pu na linha de entreferro corresponde a 1 pu de corrente de campo.

A seguir a curva de saturação fornecida pela Alstom no documento Graphic Data Sheets Project: Belo Monte (6/3/2012).

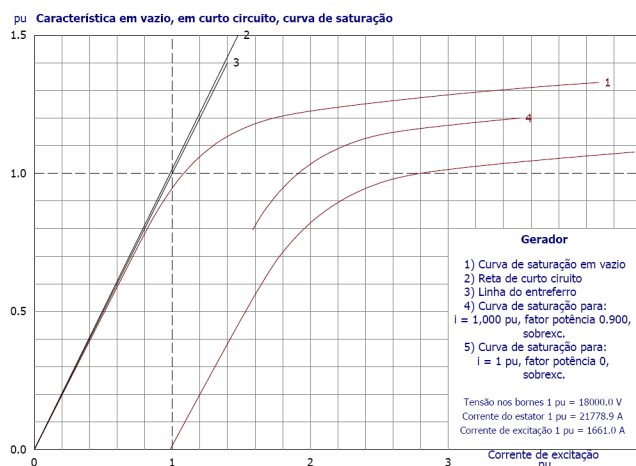


Figura VI.3: Curva de saturação fornecida pela Alstom (base não-recíproca)

Tabela VI.2: Tabela de pontos da curva de saturação fornecida pela Alstom (base não-recíproca)

Tensão terminal (pu)	Corrente de campo (pu)
0	0
0.5	0.5
0.78	0.8
0.95	1
1.05	1.1
1.18	1.2
1.22	1.3
1.29	1.4

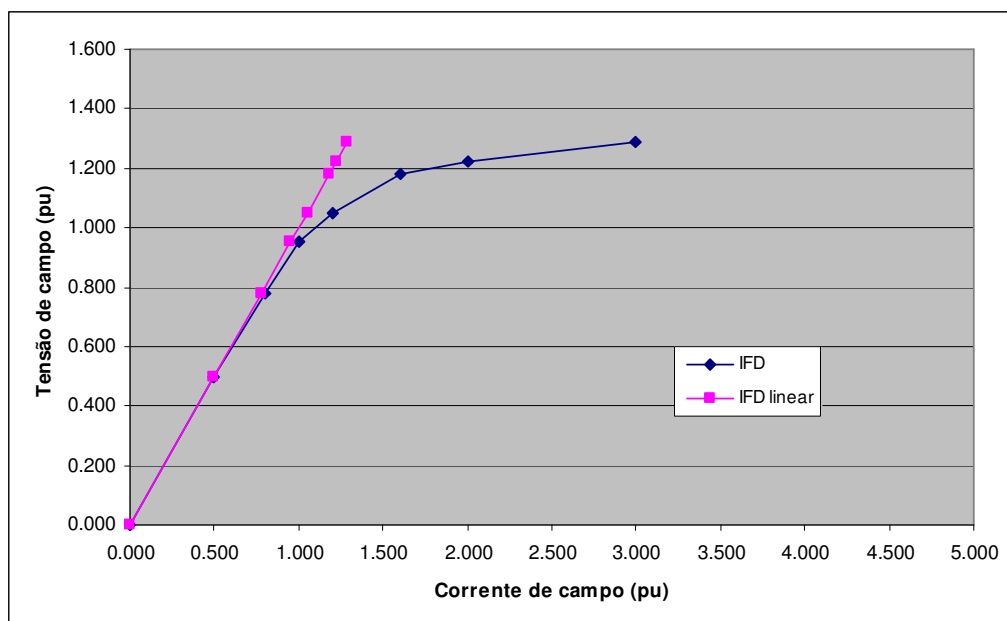


Figura VI.4: Curva de saturação do fabricante (base não-recíproca)

As curvas de saturação no Anatem e do fabricante podem ser comparadas passando a curva de saturação do Anatem para a base não-recíproca, fazendo:

$$IFD = X_{ad} \cdot ifd$$

As curvas obtidas com os dados do Anatem e fornecida pelo fabricante são bastante semelhantes na faixa linear e joelho, diferindo apenas na faixa saturada.

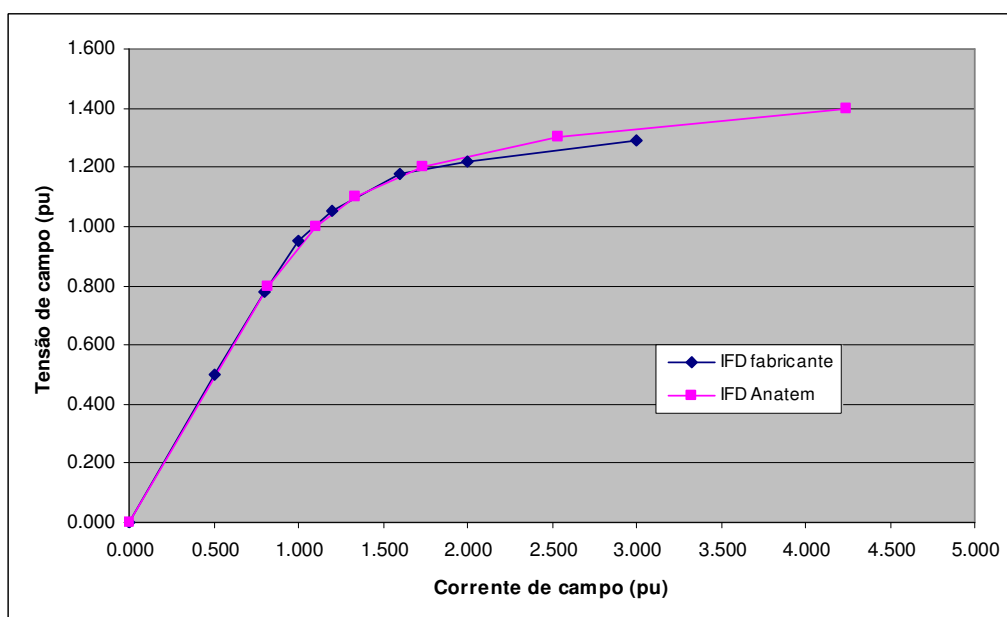


Figura VI.5: Comparação entre a curva de saturação do Anatem e do fabricante (base não-recíproca)

▪ **CURVA DE SATURAÇÃO NO PSCAD**

As curvas de saturação do Anatem na base recíproca (ifd) e não recíproca (IFD) foram comparadas com os resultados do PSCAD, de maneira a identificar qual o sistema de base é adotado por este na representação da saturação.

1) PSCAD sem saturação

Através da análise da curva tensão terminal (V_t) x corrente de campo (IFD) sem saturação verificou-se que o PSCAD utiliza o sistema de base não-recíproca.

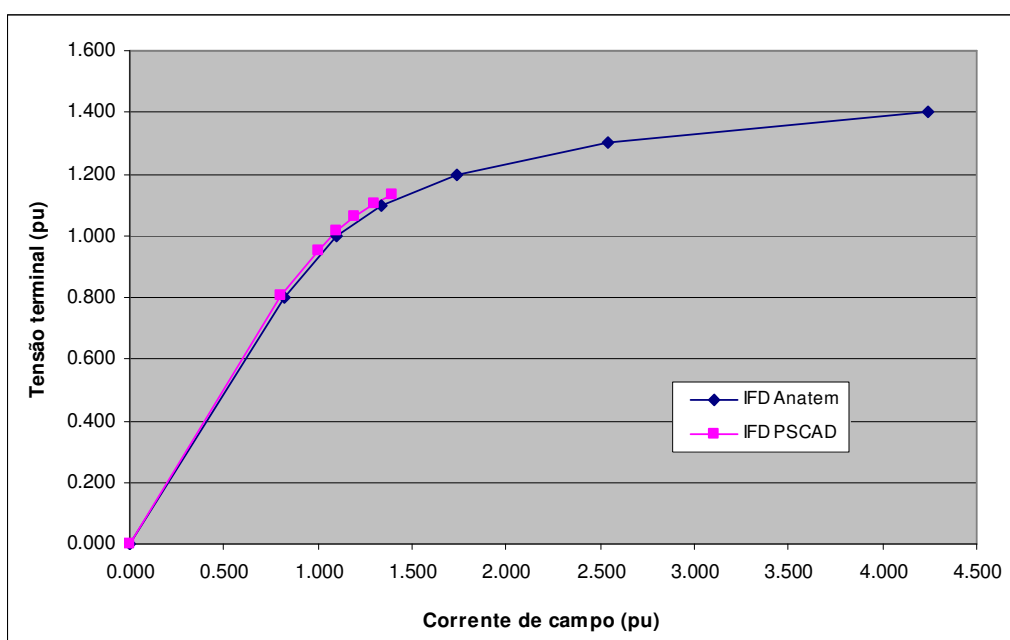


Figura VI.6: Comparação entre a curva de saturação do Anatem e do PSCAD na faixa não saturada

2) PSCAD com saturação

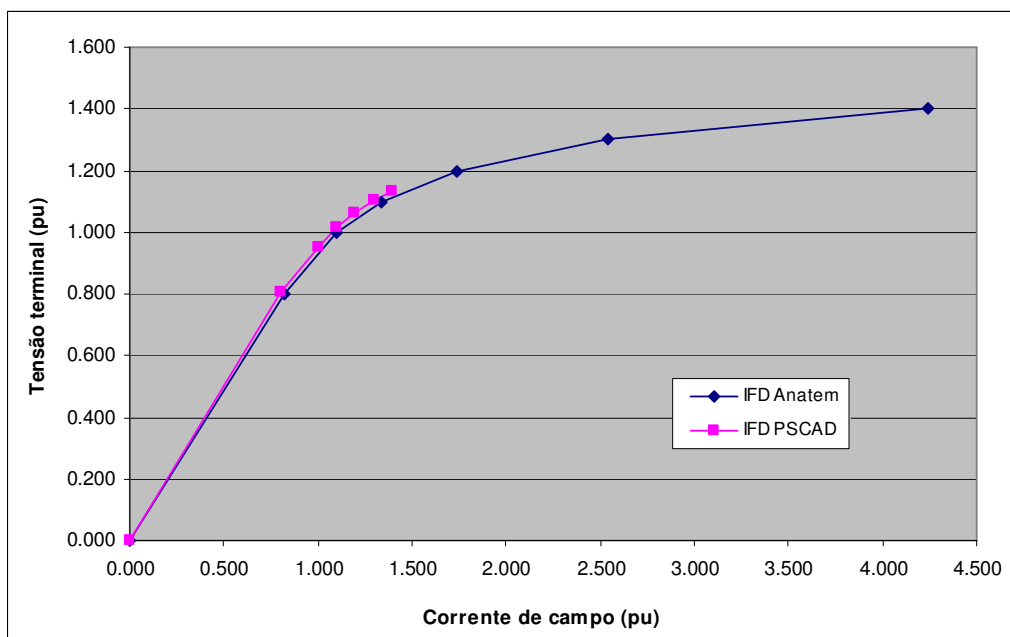


Figura VI.7: Comparação entre a curva de saturação do Anatem e do PSCAD (base não-recíproca)

O programa PSCAD utiliza o sistema de base não-recíproca para representação na saturação magnética das máquinas síncronas. Logo os dados da curva de saturação fornecidos ao programa PSCAD devem estar na base não-recíproca. Em decorrência deste fato, se os dados dos reguladores de tensão forem utilizados diretamente do diagrama de bloco do Anatem a corrente de campo de saída do PSCAD deve ser dividida por X_{ad} para retornar a base recíproca utilizada no Anatem.

ANEXO VII – TESTES NOS REGULADORES DAS MÁQUINAS DE BELO MONTE

O objetivo deste trabalho é preparar e validar as modelagens de gerador, regulador de tensão e PSS da UHE Belo Monte, incluindo a comparação de resultados dos testes de modelos de gerador e regulador de tensão entre os programas ANAREDE/ANATEM e PSCAD.

O valor de corrente de campo calculado pelo PSCAD é ligeiramente inferior ao calculado pelo ANATEM, mesmo depois de converter para a base não-recíproca do ANATEM e sem saturação. Então todos os gráficos vão estar ligeiramente “deslocados” em relação aos gráficos do ANATEM.

As variáveis V_t , P_{ele} , Q_{ele} e V_{500} foram comparadas usando filtros de medição de 20ms em ambos programas.

1. Levantamento da Curva de Saturação em Vazio

As correntes de campo estão em pu na base não-recíproca. Os resultados estão bem próximos, mostrando que os parâmetros de entrada nos dois programas (A_g e B_g no ANATEM e os pontos no PSCAD) são equivalentes.

Em carga os modelos de saturação no ANATEM e PSCAD são diferentes e, portanto, há diferenças nos resultados.

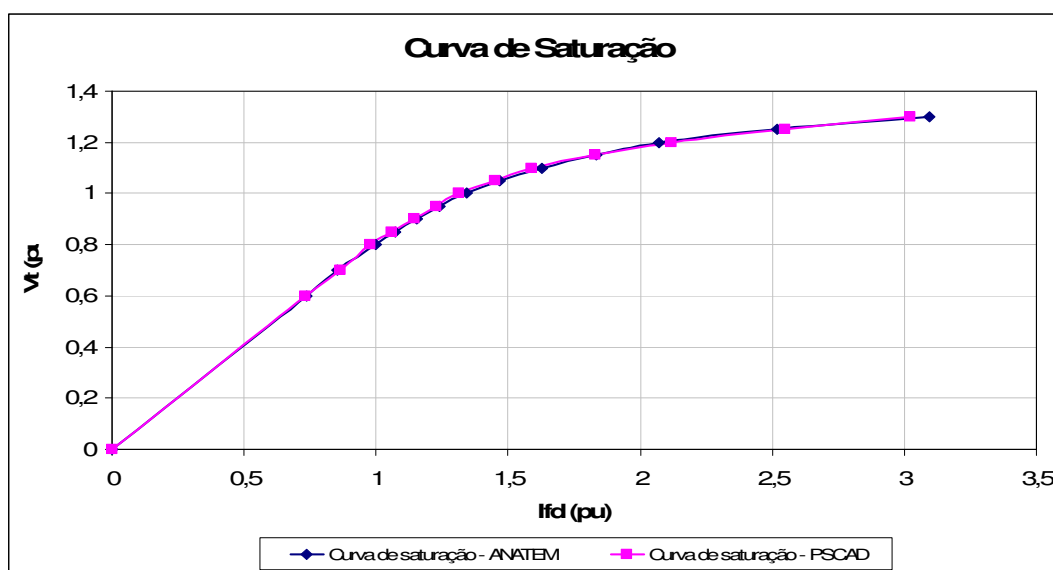


Figura VII - 1 – Comparação da curva de saturação de Belo Monte no ANATEM e PSCAD

Comparações ANATEM x PSCAD

O sistema teste foi representado por uma unidade geradora com seu transformador elevador ligado a uma impedância e uma barra infinita.

1.1. Gerador em Vazio – Com Saturação - Degrau de $\pm 5\%$ em VREF

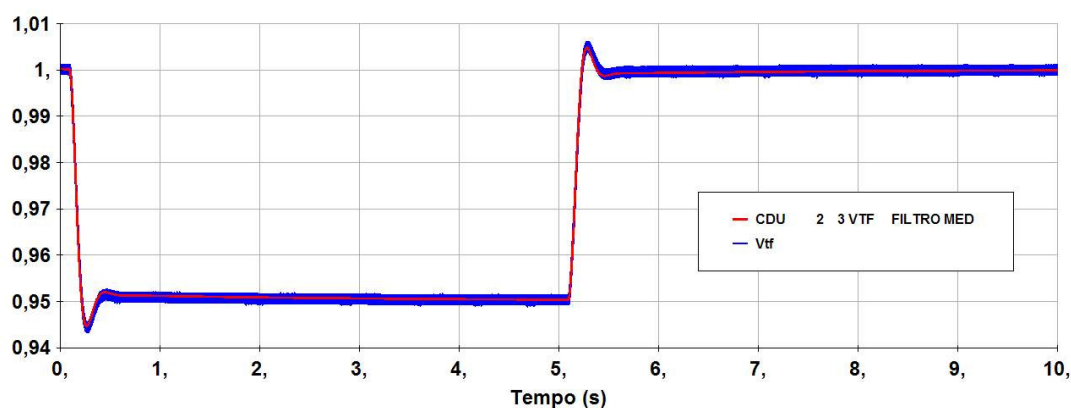


Figura VII - 1 – Comparação da Tensão terminal (Vt)

1.2. Gerador em Vazio – Com Saturação - Degrau de +10% em VREF

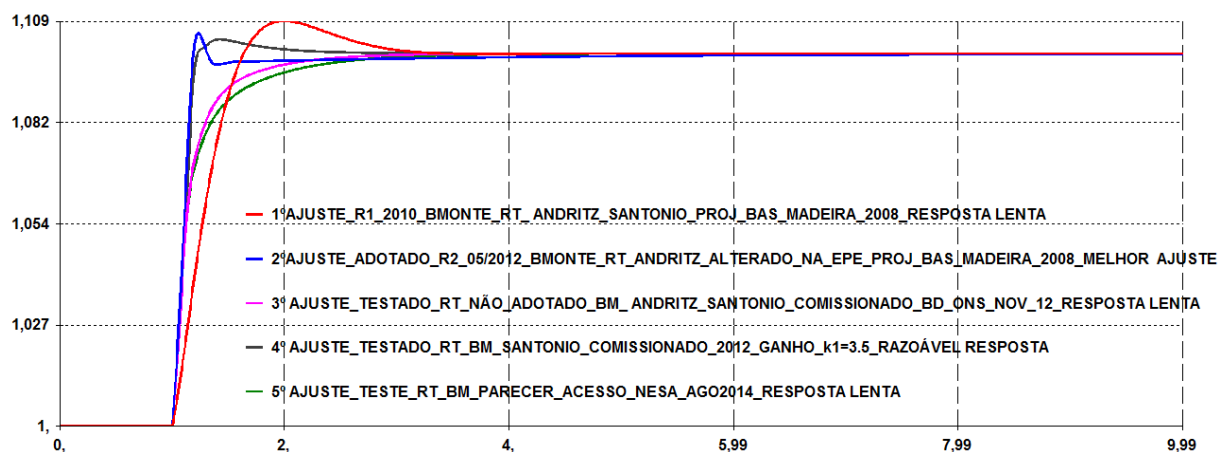


Figura VII - 2 – Comparação da tensão terminal (Vt) para diversos ajustes e adaptações do modelo Andritz

Foi realizado o Teste de resposta ao Degrau de 10% na referência do RT de forma a aferir o seu tempo de resposta e desempenho frente à estabilidade transitória.

Em agosto/2010, quando do início dos trabalhos do R1, como os dados do consórcio da usina de Belo Monte ainda não havia sido informado pela NESA, foi utilizado o próprio modelo do RT da usina de Santo Antônio do projeto básico de 2008. Foram adaptados os parâmetros dos geradores e reguladores para a usina de Belo Monte em virtude de seus dados característicos disponíveis no momento e de dados similares obtidos do sistema elétrico brasileiro. Com esse **1º ajuste (curva vermelha)** da figura 2), foi encontrado um tempo de resposta muito lento, mas ainda sem dados do consórcio, este modelo foi utilizado nas simulações do R1 do bipolo 1 até o final de 2011.

Para atender o desempenho esperado nas simulações, foram feitas exaustivas alterações no modelo e parâmetros do RT da Andritz. No início de 2012, conseguiu-se um **2º ajuste** com uma resposta no tempo bem melhor que o 1º ajuste (curva vermelha), sob o enfoque da estabilidade transitória do sistema, que pode ser visualizada na **curva azul** da figura 2. Em conjunto com este 2º ajuste foram também atualizados os dados dos geradores, em Janeiro de 2012, fornecidos pelo consórcio NESA da usina de Belo Monte. Este 2º ajuste, com melhor desempenho, foi adotado nas simulações para os estudos de R2 do 1º bipolo de Belo Monte a partir de Maio de 2012.

Em meados de 2012, após o comissionamento de geradores da usina de Santo Antônio no Madeira, o ONS disponibilizou o novo modelo do RT da Andritz já comissionado e aprovado. Este novo modelo do RT Andritz da usina de Santo Antônio foi parametrizado para ser usado em Belo Monte com **3º ajuste**, e sua resposta no tempo pode ser vista na curva de **cor rosa** da figura 2. Este 3º ajuste ainda se apresenta com resposta lenta em relação ao 2º ajuste (cor azul).

Resumindo, ao comparar o 2º ajuste (melhor ajuste obtido), curva de cor Azul, com o 3º ajuste (ajuste do modelo comissionado de Santo Antônio), curva de cor rosa, podemos perceber que a resposta no tempo do RT da Andritz de Santo Antônio já comissionado ainda é mais lento que o ajuste considerado nas simulações dos estudos de R2 do Bipolo 1 de Belo Monte (cor azul da figura 2).

Em busca de otimizar o 3º ajuste que é o modelo do RT da Andritz de Santo Antônio já comissionado, foi feito um **4º ajuste** aumentando o ganho K1, de 2 para 3.5, conforme curva **cor preta** da figura 2. Novamente verificamos que a resposta no tempo ainda é

mais lenta que o 2º ajuste considerado nos estudos de R2 do Bipolo 1 de Belo Monte (cor azul da figura 2).

Durante os estudos de R2 do bipolo 2, em agosto/2014, foi informado pela NESAs novos ajustes do RT do fabricante Andritz para Belo Monte através do Parecer de Acesso do ONS (**curva verde**). Entretanto, a resposta se mostrou ainda mais lenta que o 2º ajuste, não atendendo a necessidade dos estudos R2 realizados sob enfoque da estabilidade transitória.

No âmbito dos estudos R2, para atender aos critérios impostos pela estabilidade transitória frente a diversas simulações realizadas com os programas ANATEM e PSCAD, envolvendo o bipolo 1, a usina de Belo Monte e o SIN, foi utilizado o 2º ajuste (**cor azul** da Figura 1) do modelo do RT Andritz adaptado, considerado o melhor ajuste alcançado para o modelo Andritz do RT de Belo Monte.

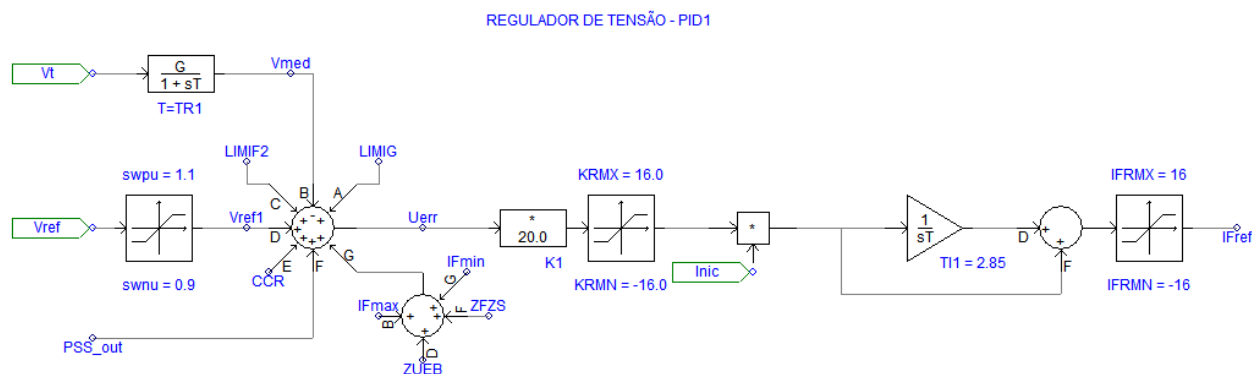


Figura VII - 1 – Regulador de tensão de Belo Monte (malha principal)

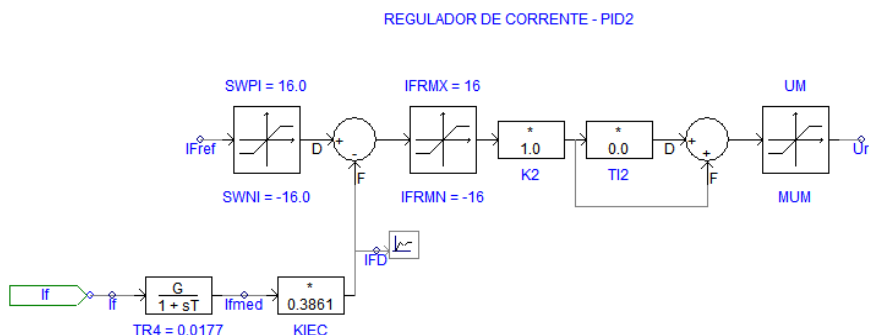


Figura VII - 1 – Regulador de tensão de Belo Monte (regulador de corrente)

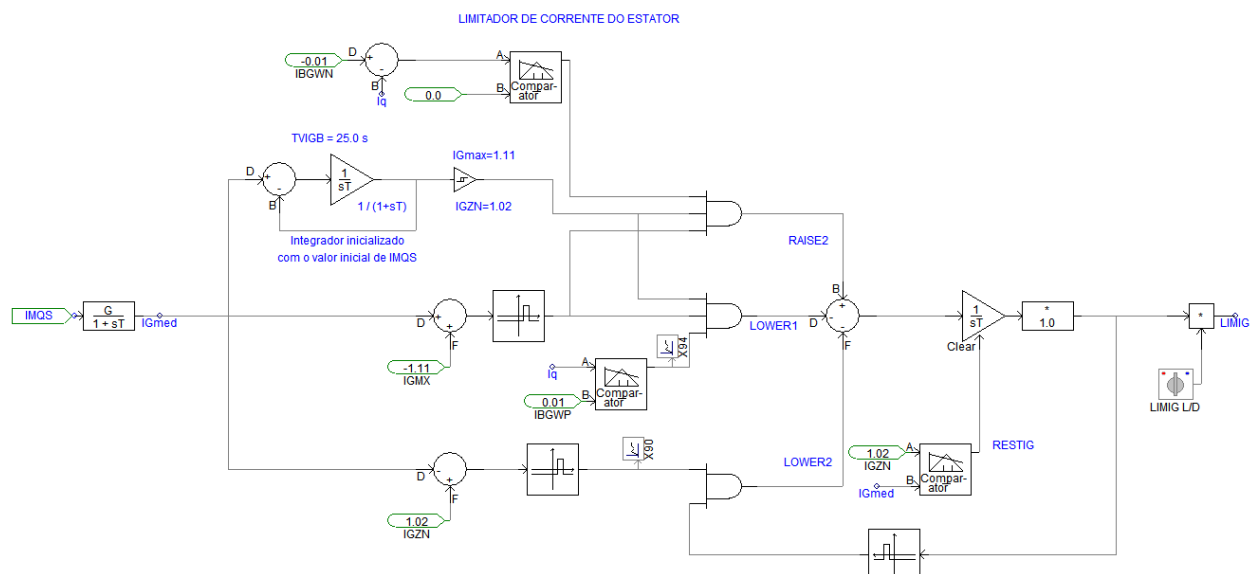


Figura VII - 1 – Regulador de tensão de Belo Monte (Limitador da corrente do estator)

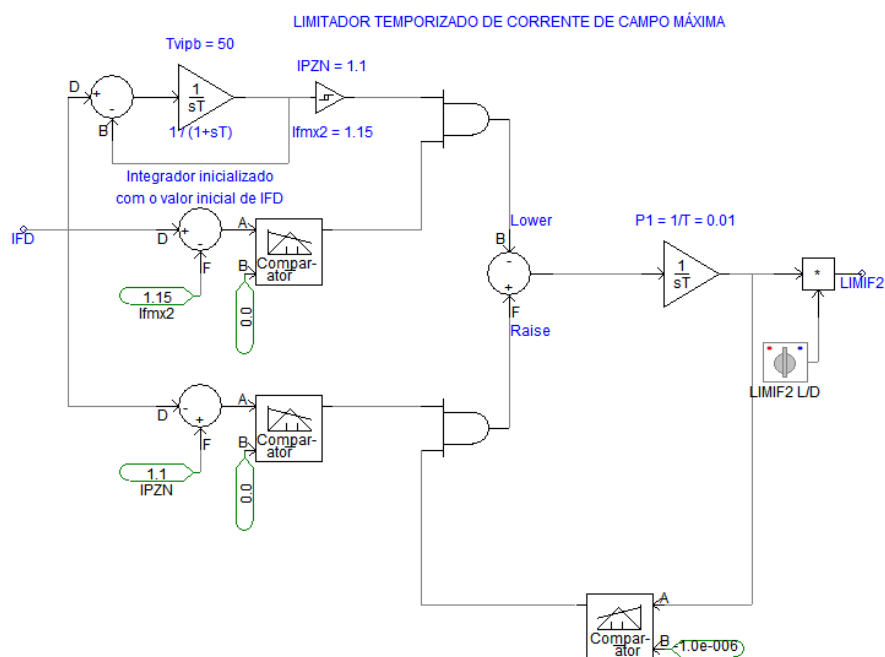


Figura VII - 1 – Regulador de tensão de Belo Monte (Limitador temporizado de corrente máxima)

1.3. Gerador em Carga – Com Saturação - Degrau de $\pm 5\%$ em VREF

Em carga, os modelos de saturação do ANATEM e PSCAD são diferentes. No entanto, as diferenças só podem ser observadas para valores mais elevados de tensão terminal (VT maior ou igual a 1.1pu). Mas para um degrau de +5% já é possível ver alguma diferença, conforme mostrado na Figura VII - 3.

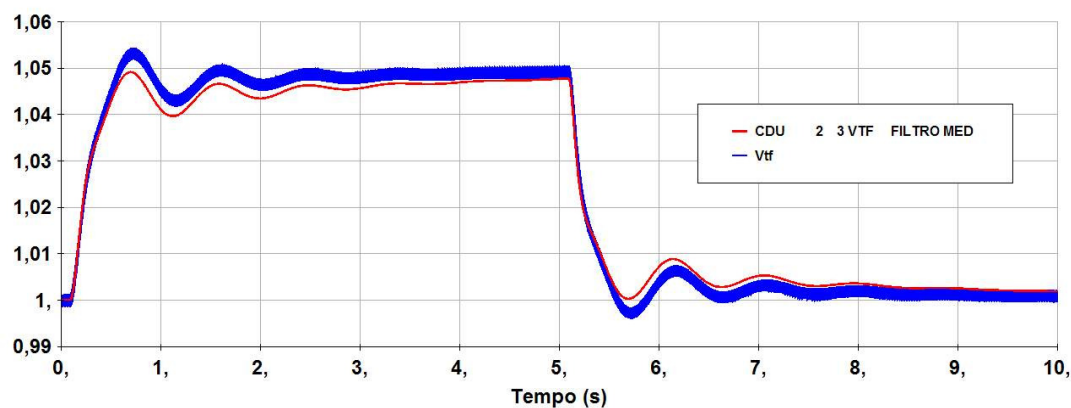


Figura VII - 3 – Comparação da Tensão terminal (Vt)

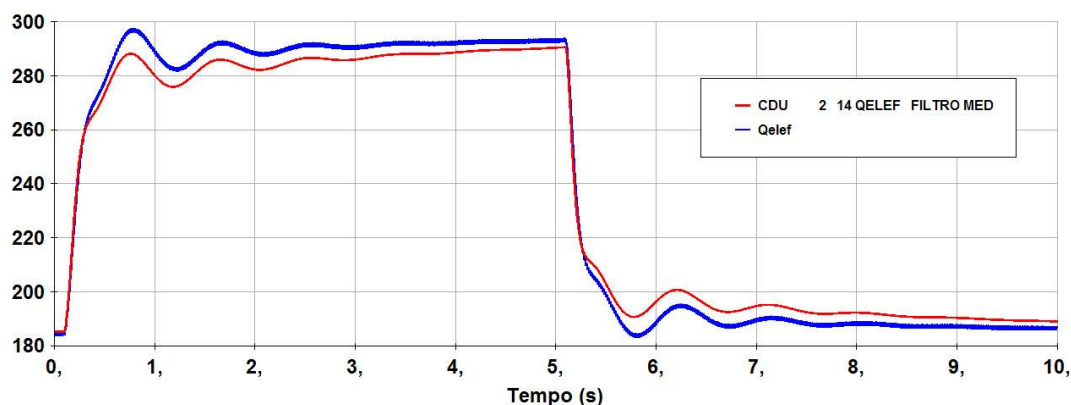


Figura VII - 4 – Comparação da Potência Reativa (Q)

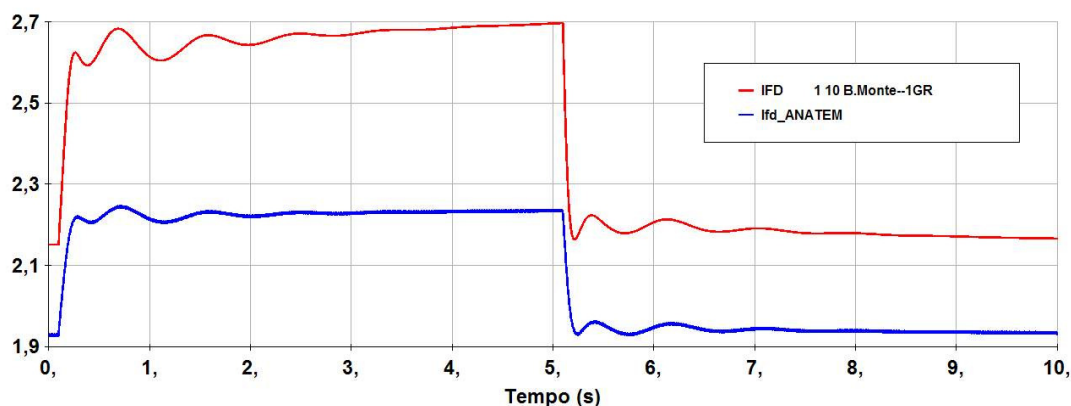


Figura VII - 5 – Comparação da Corrente de Campo (Ifd)

1.4. Gerador em Carga – Sem Saturação - Degrau de +10% em VREF - Atuação do limitador V/Hz

Neste teste o limitador foi ajustado para atuar com 1,05 pu (ajuste de teste, pois o ajuste nominal é de 1,09 pu) => degrau de 10%.

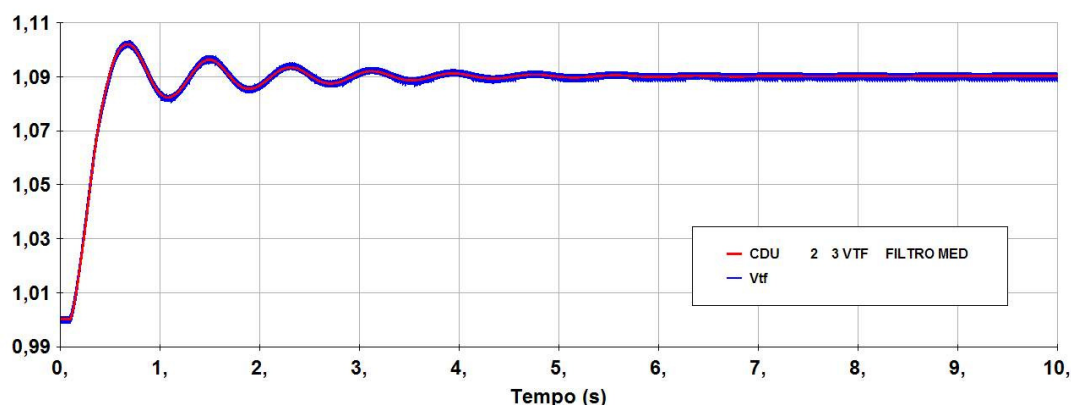


Figura VII - 6 – Comparação da Tensão terminal (Vt)

1.5. Gerador em Carga – Sem Saturação – Rejeição de 100% de carga

Para esta simulação, o parâmetro CorrFreq do modelo de máquina no ANATEM foi alterado para 'S', então os parâmetros da máquina passam a variar com a frequência. Nos demais casos, o parâmetro é feito igual a 'N'.

A pequena diferença no desvio máximo de frequência ocorre porque o PSCAD trabalha com Tmec na equação de swing enquanto o ANATEM trabalha com Pmec.

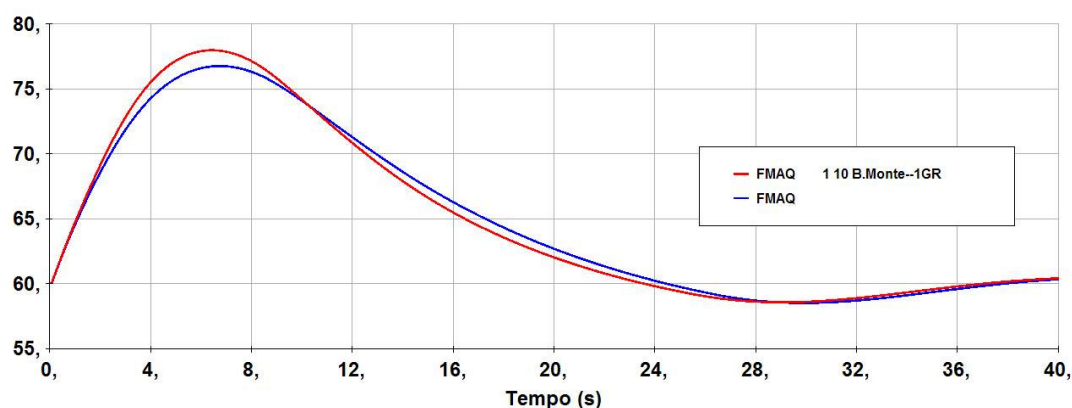


Figura VII - 7 – Comparação da Frequência (Hz)

ANEXO VIII – TESTES REGULADORES_ MÁQUINAS DE TUCURUÍ

No equivalente com a representação detalhada da rede do Norte, será necessária a representação das máquinas de Tucuruí (12 máquinas de Tucuruí I e 11 máquinas de Tucuruí II) foram modeladas no PSCAD considerando os parâmetros do grupo 5 (Tucuruí II).

O objetivo deste trabalho é preparar e validar as modelagens de gerador, regulador de tensão e PSS da UHE Tucuruí, incluindo a comparação de resultados dos testes de modelos de gerador e regulador de tensão entre os programas ANAREDE/ANATEM e PSCAD, para ser usado na representação da rede para o estudo do R2 do bipolo 2 do sistema de transmissão CCAT de Belo Monte (Xingu e Terminal Rio).

2. Dados das Unidades Geradoras

A Figura 1 mostra o sistema de conexão da usina hidrelétrica Tucuruí.

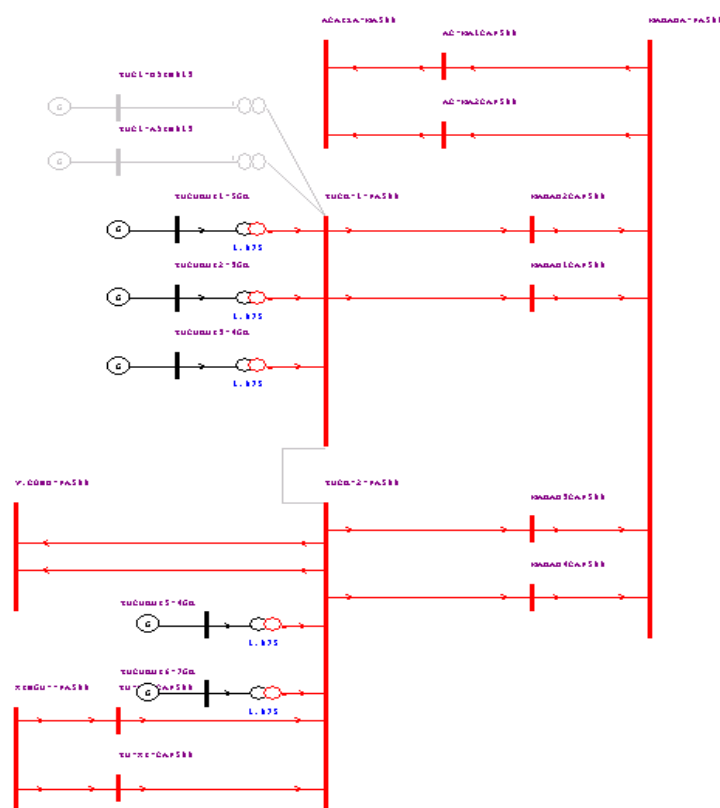


Figura VIII - 1 – Sistema de conexão da Usina Hidrelétrica Tucuruí

Os dados básicos da usina são mostrados na Tabela 1:

Tabela VIII - 1 – Dados básicos da UHE Tucuruí I e Tucuruí II

Unidade	Quantidade	Potência Nominal (MW)	Potência Reativa mínima - Mvar	Potência Reativa máxima - Mvar
Grupo 1	5	350	-105,0	105,0
Grupo 2	3	350	-105,0	105,0
Grupo 2	2		-280,0	175,0
Grupo 3	4	350	-105,0	105,0
Grupo 3	2		-280,0	175,0
Grupo 5	4	370	-118,0	118,0
Grupo 6	7	370	-118,0	118,0
Total	23	8.270		

3. Dados de comparação entre os programas ANATEM – PSCAD

O sistema teste foi representado por uma unidade geradora com seu transformador elevador ligado a uma impedância e uma barra infinita.

Para efeito de simplificação na representação com o programa PSCAD, foi modelada a máquina, regulador de tensão e PSS do grupo 5 (390 MVA).

O PSS e a curva de saturação da unidade geradora foram modelados no programa PSCAD e considerados nos testes de validação.

3.1. Dados do programa ANAREDE/ANATEM

Dados do programa ANAREDE/ANATEM, seguem na figura 2 (a) e (b). No Anexo 1 é apresentado o modelo do regulador de tensão e PSS do gerador em formato CDU/ANATEM.

```
(
(..... UHE Tucuruí 2 Grupo 5 (maqs 13, 15, 16, 18, 19, 21, 22, 23)
(No) (CS) (Xd ) (Xq ) (X'd) (X''d) (Xl ) (T'd) (T''d) (T''q)
1304 1304 120.0 70.0 30.0 20.0 12.0 5.00 0.10 0.20
(1304 120.0 70.0 30.0 20.0 12.0 5.00 0.10 0.20
(No) (Ra ) ( H ) ( D ) (MVA) Fr C
1304 4.000 390.0 N
```

(a)

```
(..... UHE Tucuruí 2 Grupo 5
(No) T ( Y1 ) ( Y2 ) ( X1 )
1304 2 .0320445 7.582406 0.8
```

(b)

Figura VIII - 2 – Dados dos programas Anarede / Anatem (a) dados de gerador; (b) dados de curva de saturação

3.2. Dados do programa PSCAD

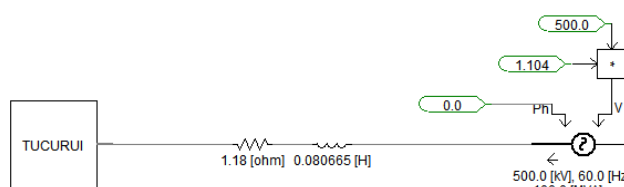
Os dados de gerador e rede para programa PSCAD são os mesmos adotados para o programa ANAREDE/ANATEM, que são ilustrados na figura 3 (a), (b) e (c). Os dados de curva de saturação magnética do gerador para o PSCAD são calculados na base não-recíproca. Em decorrência deste fato, se os dados dos reguladores de tensão forem utilizados diretamente do diagrama de bloco do ANATEM a corrente de campo de saída do PSCAD deve ser dividida por X_{ad} para retornar a base recíproca utilizada no ANATEM, como descrito no relatório EPE-DEE-RE-062-2013_Rev1 Anexo VI – R2 do Bipolo 1 do CCAT Belo Monte.

(a)

(b)

(c)

(d)



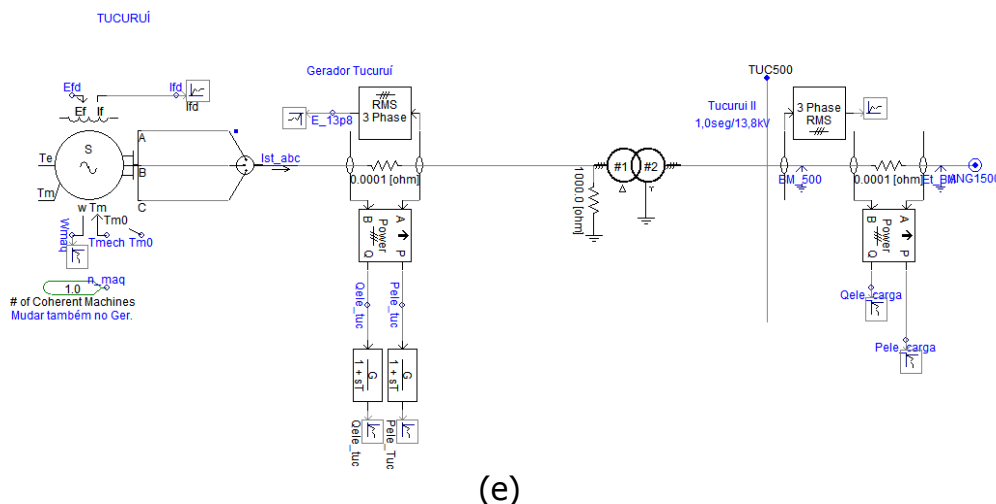


Figura VIII - 3 – Dados de Gerador (a e b), Curva de Saturação (c), transformador elevador (d) e rede (e) – UHE Tucuruí – Programa PSCAD.

4. Comparações Anatem x PSCAD

Os testes realizados foram:

- Gerador em Vazio – Degrau de + e – 5% na Tensão de Referência (Vref)
- Gerador em Vazio – Degrau de +15% da Vref – Limitador Volts/Hz
- Gerador com carga – Degrau de + e - 5% da Vref
- Gerador em Carga - Limitador de Corrente de Armadura (Ia)
- Gerador com carga - Limitador de corrente de sobreexcitação
- Gerador Com Carga - Limite de corrente de subexcitação

Observações:

- O valor de corrente de campo (Ifd) calculado pelo PSCAD é ligeiramente inferior ao calculado pelo ANATEM, mesmo depois de converter para a base não-recíproca do ANATEM e sem saturação. Então todos os gráficos vão estar ligeiramente “deslocados” em relação aos gráficos do ANATEM.
- As variáveis V_t , P_{efe} e Q_{efe} foram comparadas usando filtros de medição de 10ms nos dois programas.

4.1. Testes nos Reguladores de Tucuruí II - Degrau RT +- 5% - À vazio

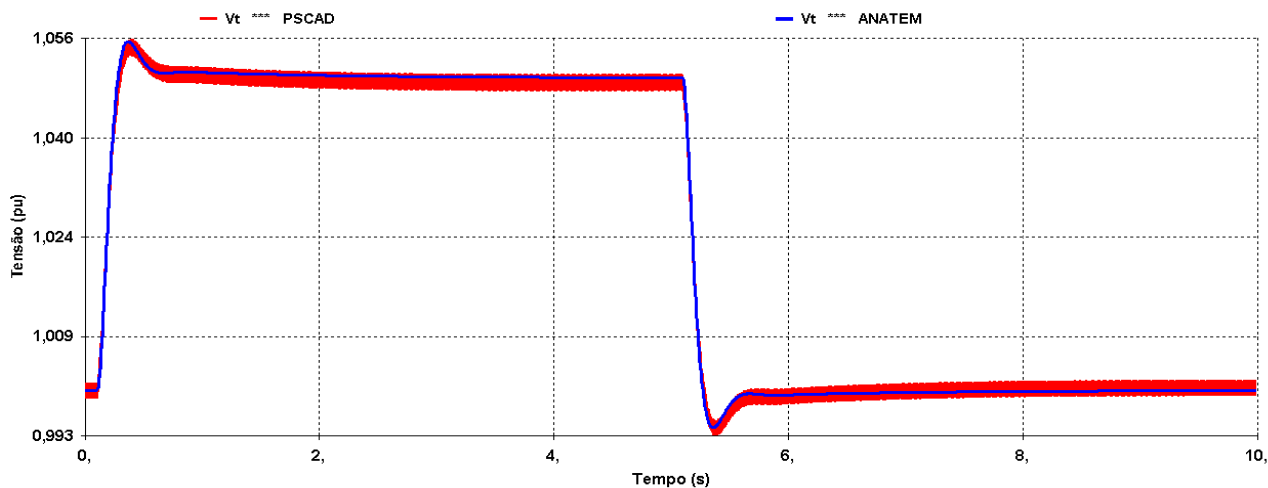


Figura VIII - 4 – Comparação da Tensão terminal (Vt)

4.2. Limitador Volts/Hz: Gerador em Vazio, degrau de +15% na Tensão de Referência (Vref)

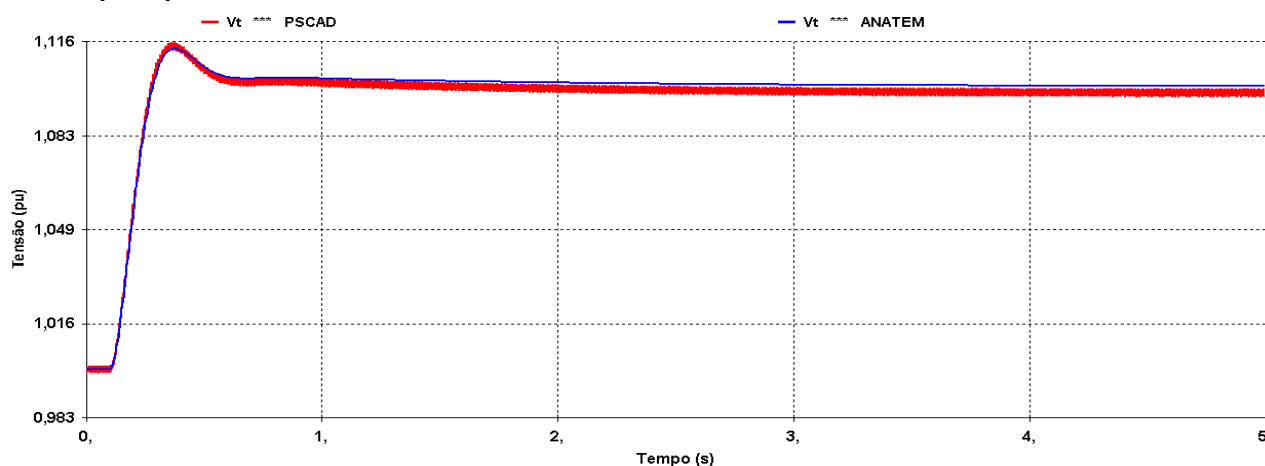


Figura VIII - 5 – Comparação da Tensão terminal (Vt)

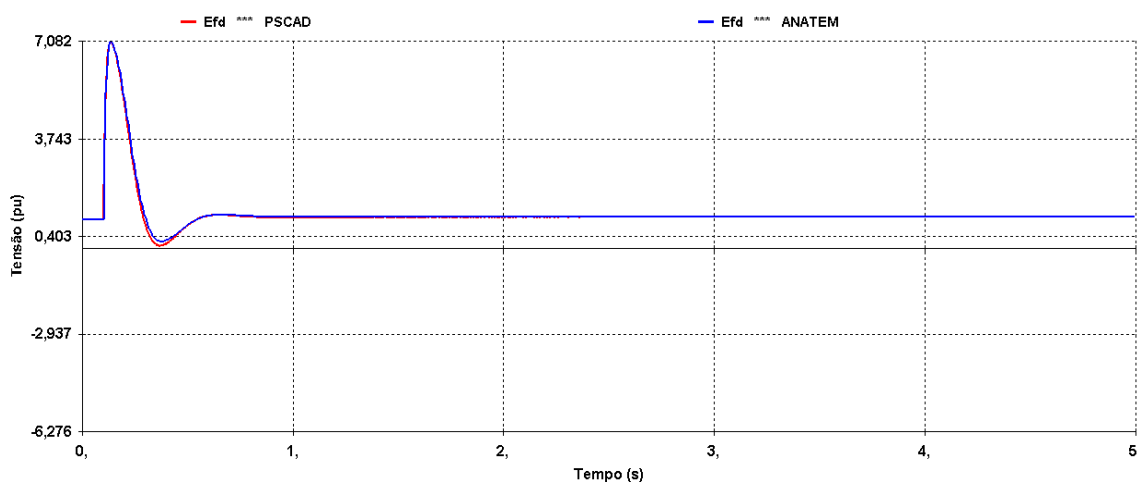


Figura VIII - 6 – Comparação da Tensão de Campo (Efd)

4.3. Gerador com carga: Degrau de +5% e - 5% em Vref

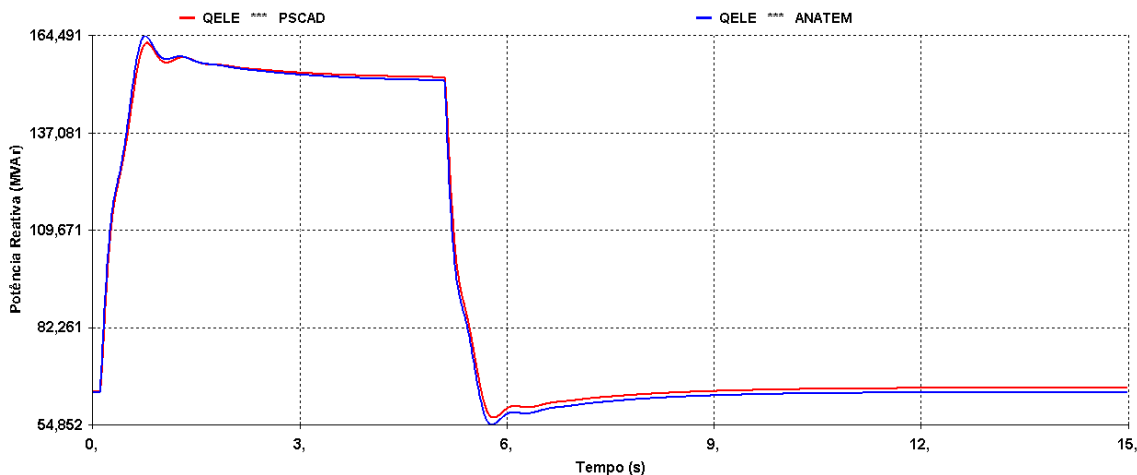


Figura VIII - 7 – Comparação da Potência Reativa (Qe)

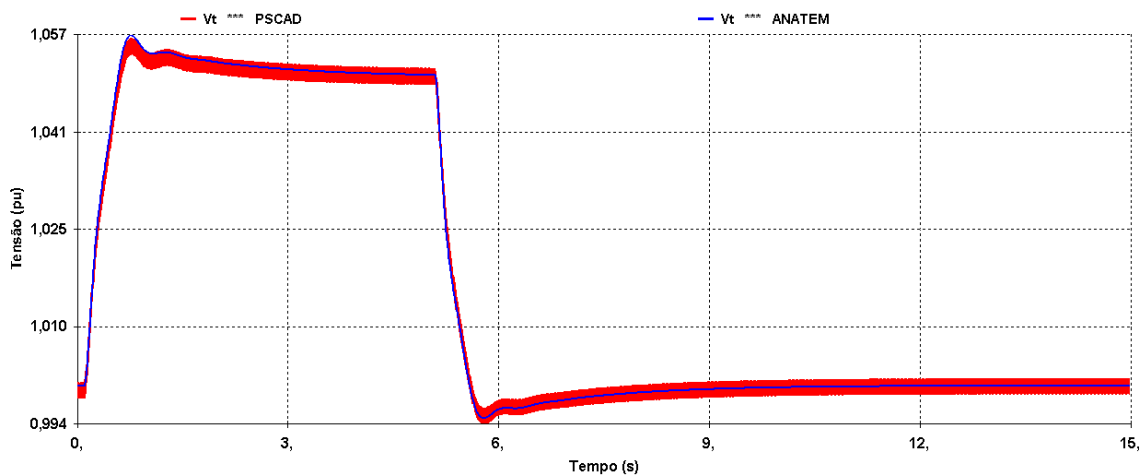


Figura VIII - 8 – Comparação da Tensão terminal (Vt)

4.4. Gerador em Carga - Limitador de Corrente de Armadura (Ia)

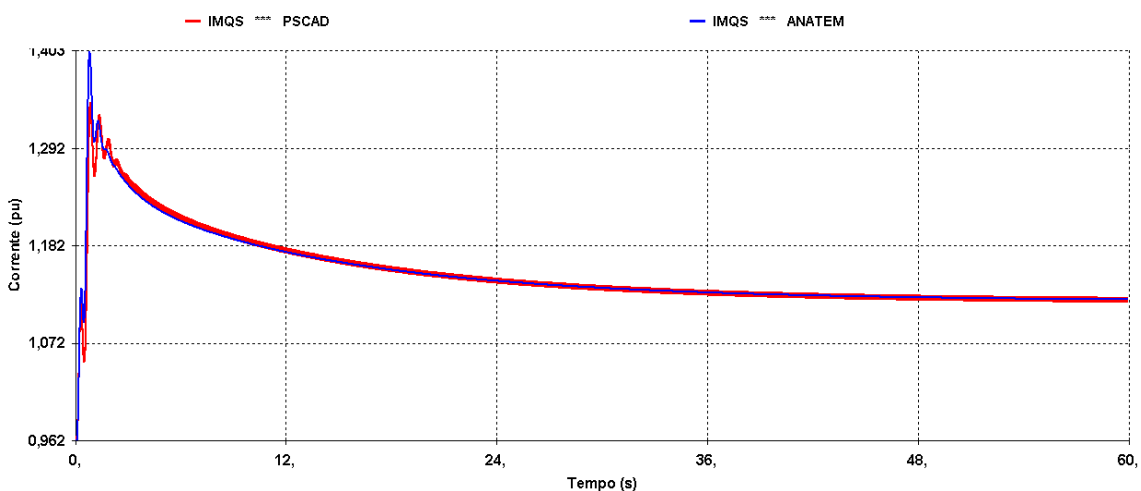


Figura VIII - 9 – Comparação da corrente do Estator (IMQS)

4.5. Limitador de corrente de sobreexcitação: gerador com carga, degrau de +10% na Tensão de Referência (V_{ref})

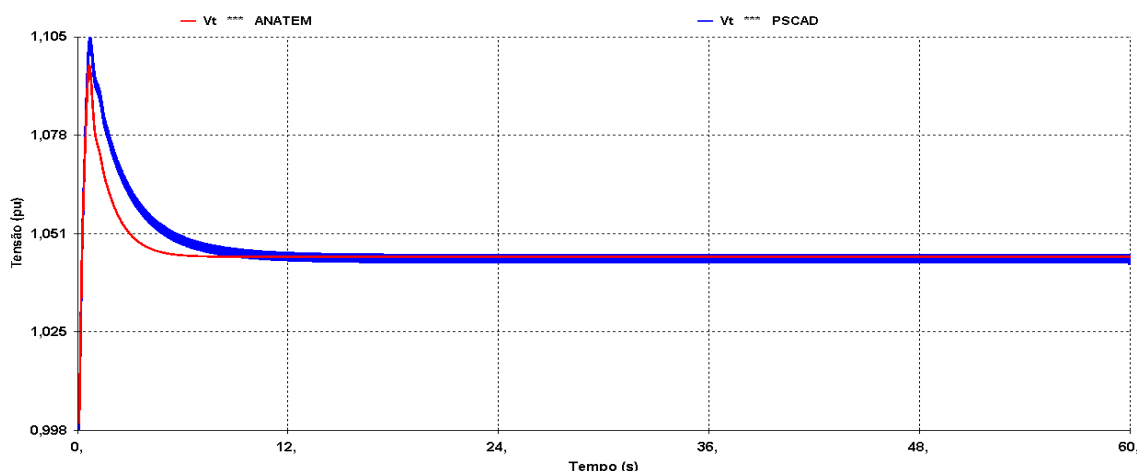


Figura VIII - 10 – Comparação da Tensão terminal (V_t)

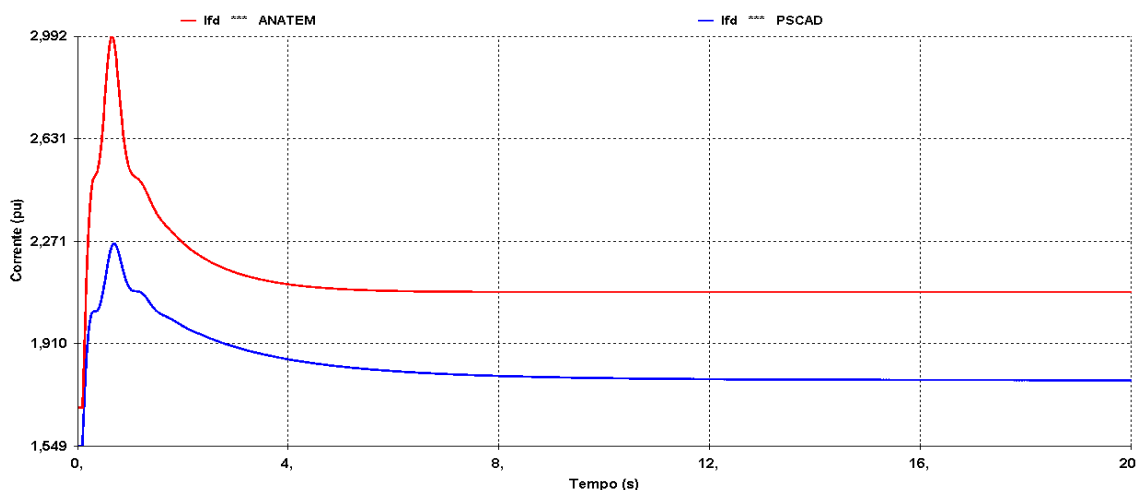


Figura VIII - 11 – Comparação da Corrente de Campo (I_{fd})

4.6. Limitador de corrente de subexcitação: gerador com carga, degrau de -10% na Tensão de Referência (V_{ref})

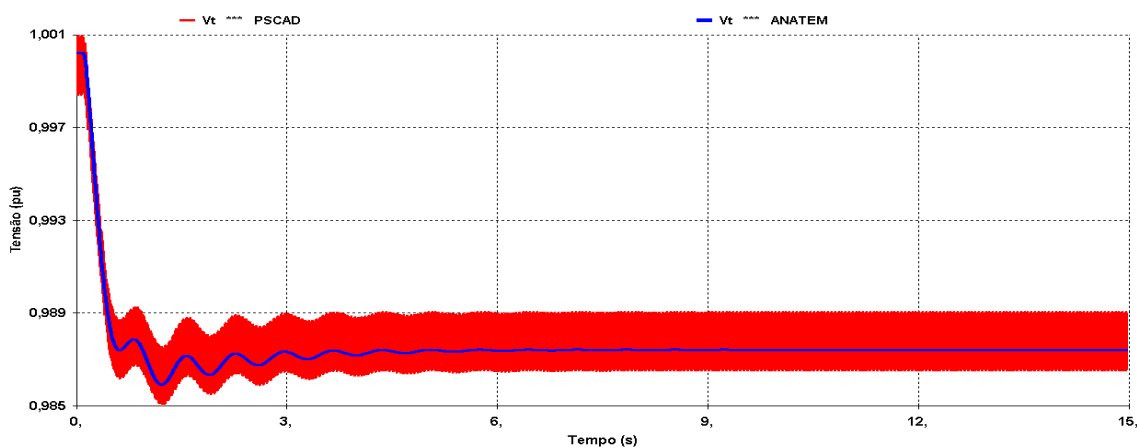


Figura VIII - 12 – Comparação da Tensão terminal (V_t)

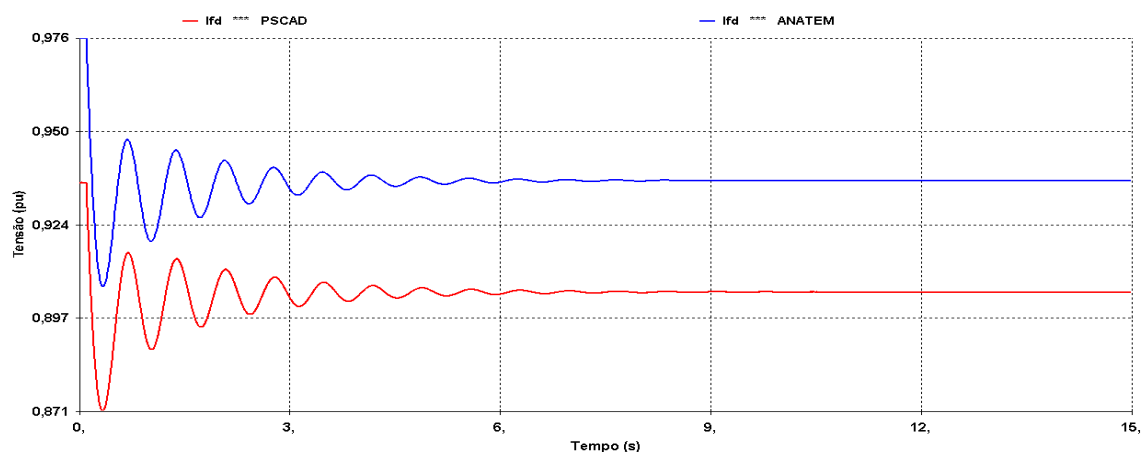


Figura VIII - 13 – Comparação da Corrente de Campo (I_{fd})

ANEXO IX – TESTES DE MAIS MÁQUINAS - ANATEM X PSCAD

O modelo CDU ANATEM modelado no programa PSCAD/EMTDC e este documento apresenta os resultados dos testes (em vazio e sob carga) da validação do modelo PSCAD com o modelo do ANATEM.

1 UHE Angra I

1.1 Gerador em Vazio – Com Saturação - Degrau de $\pm 5\%$ em VREF

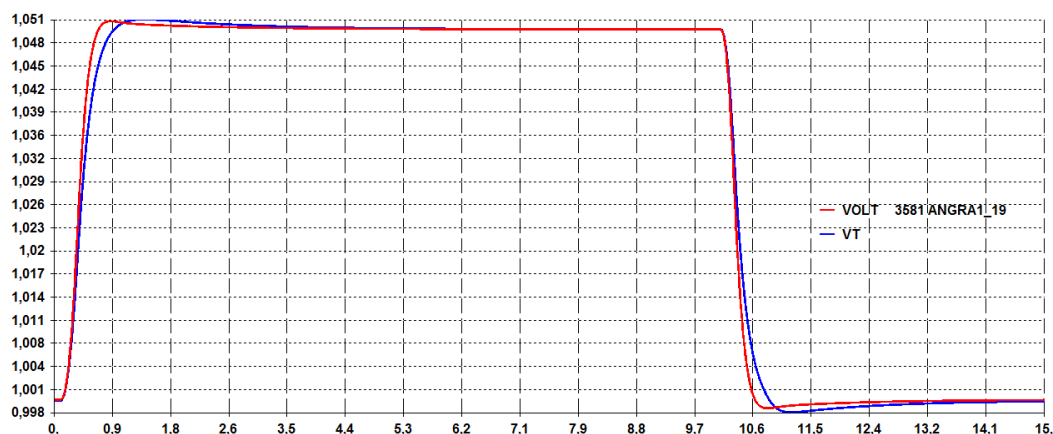


Figura IX - 1 – Comparação da Tensão terminal (Vt)

1.2 Gerador em Carga (Potência Nominal) – Sem Saturação - Degrau de $\pm 5\%$ em VREF

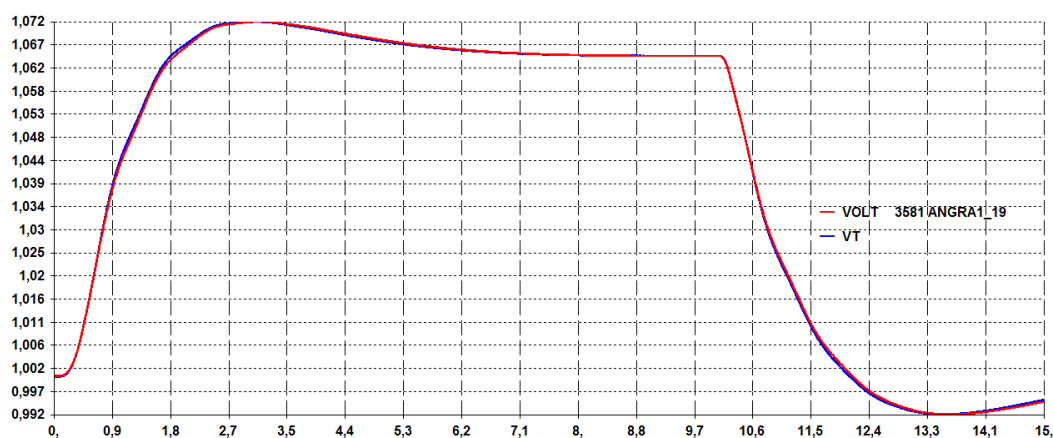


Figura IX - 2 – Comparação da Tensão terminal (Vt)

1.3 Gerador em Carga (Potência Nominal) – Sem Saturação - Degrau de - 2% em VREF

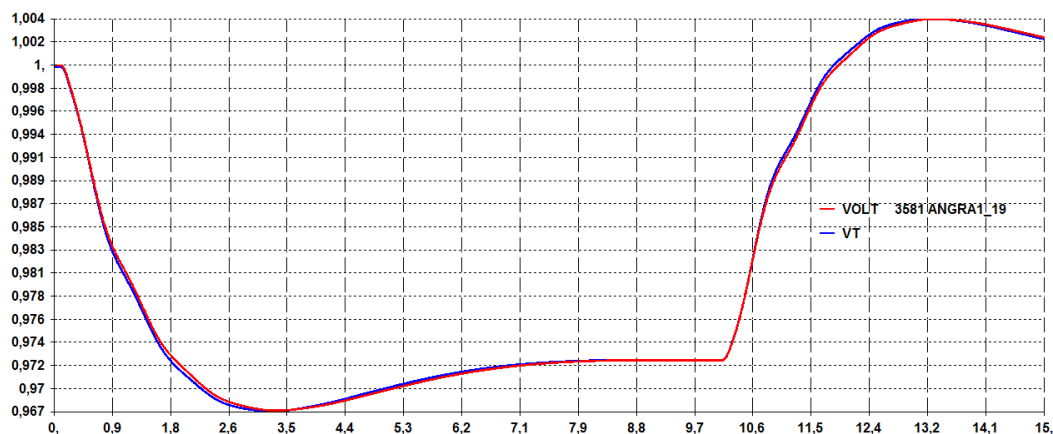


Figura IX - 3 – Comparação da Tensão terminal (Vt)

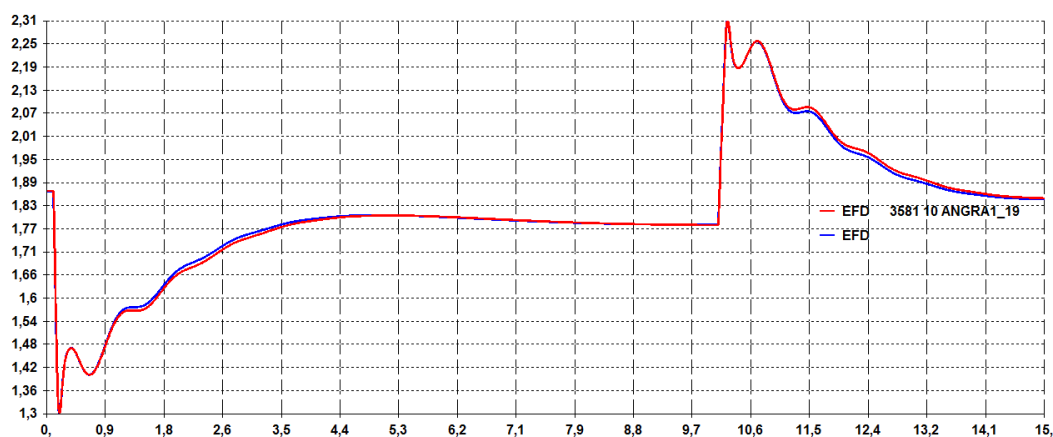


Figura 4 – Comparação da Tensão de Campo (Efd)

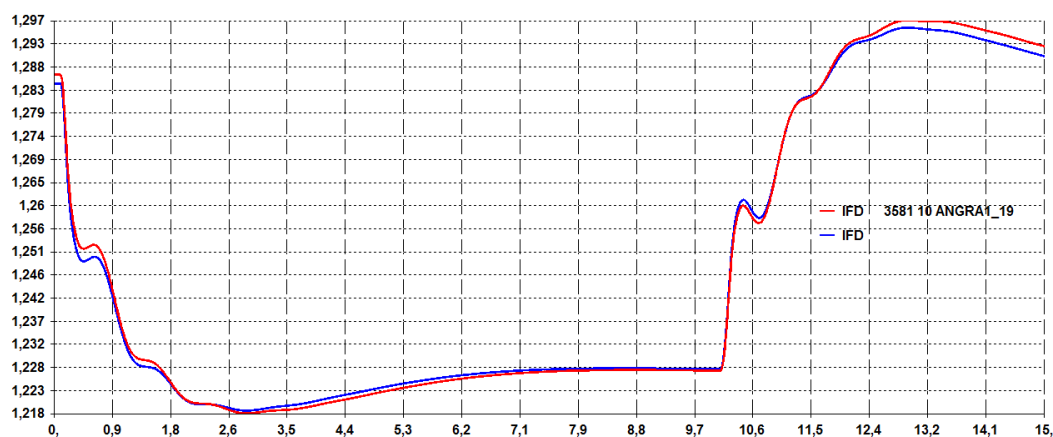


Figura IX - 5 – Comparação da Corrente de Campo (Ifd)

1.4 Teste do Limitador VOLT/HZ com degrau de 10% na referência de tensão com a máquina em plena carga (sem curva de saturação)



Figura IX - 6 – Comparação da Tensão terminal (Vt)

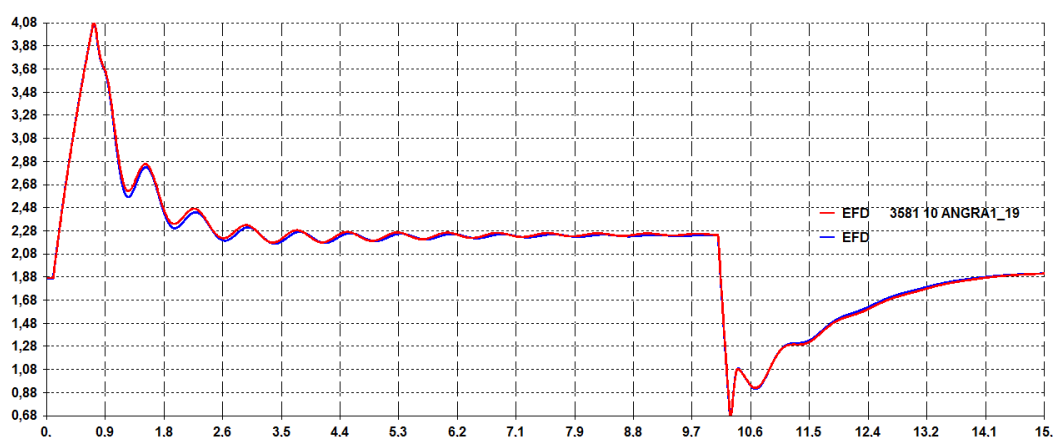


Figura IX - 7 – Comparação da Tensão de Campo (Ifd)

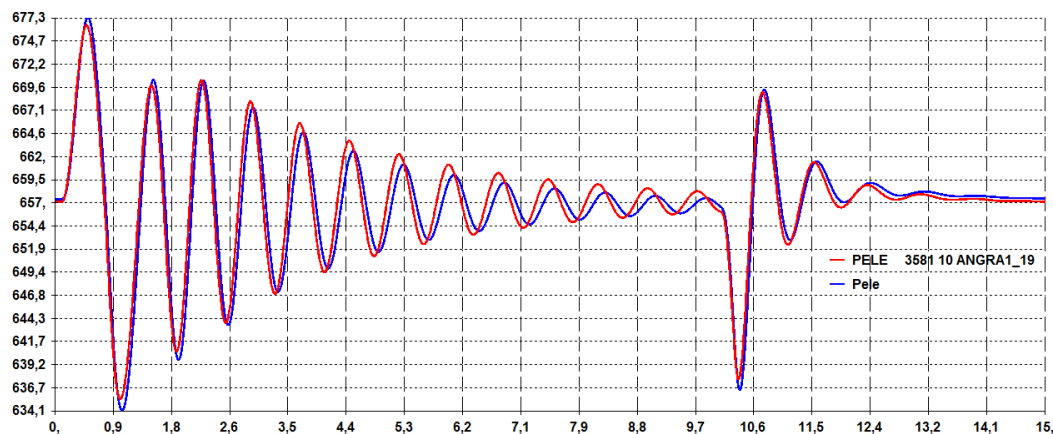


Figura IX - 8 – Comparação da Potência ativa (Pe)

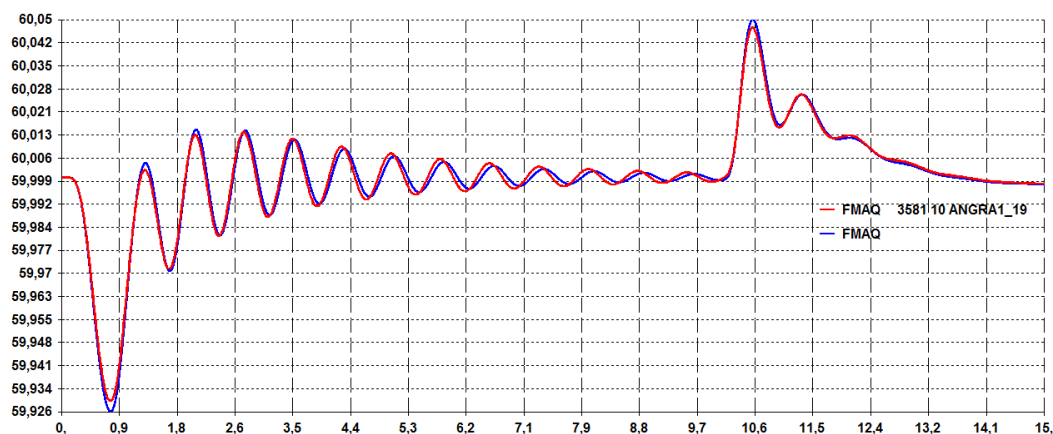


Figura IX - 9 – Comparação da Frequência (HZ)

1.5 Teste do Limitador de sobre-excitação com degrau de 25% na referência de tensão com a máquina em plena carga (sem curva de saturação).

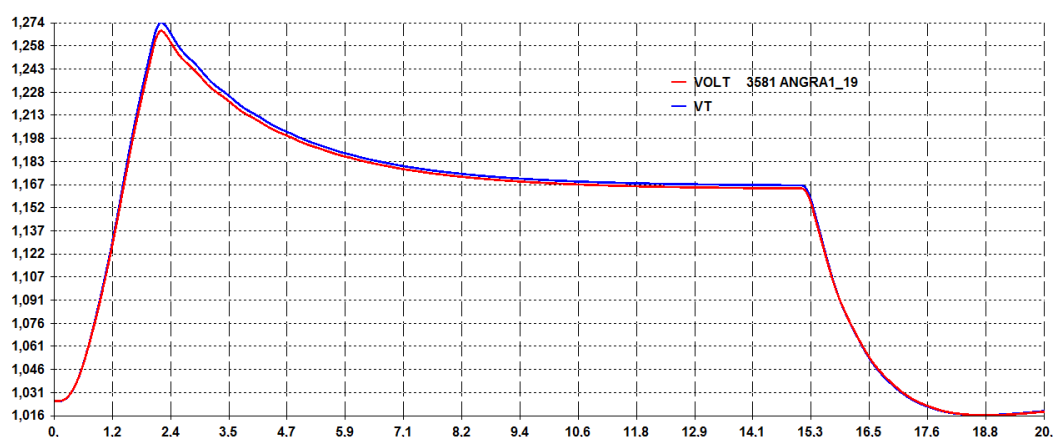


Figura IX - 10 – Comparação da Tensão terminal (Vt)

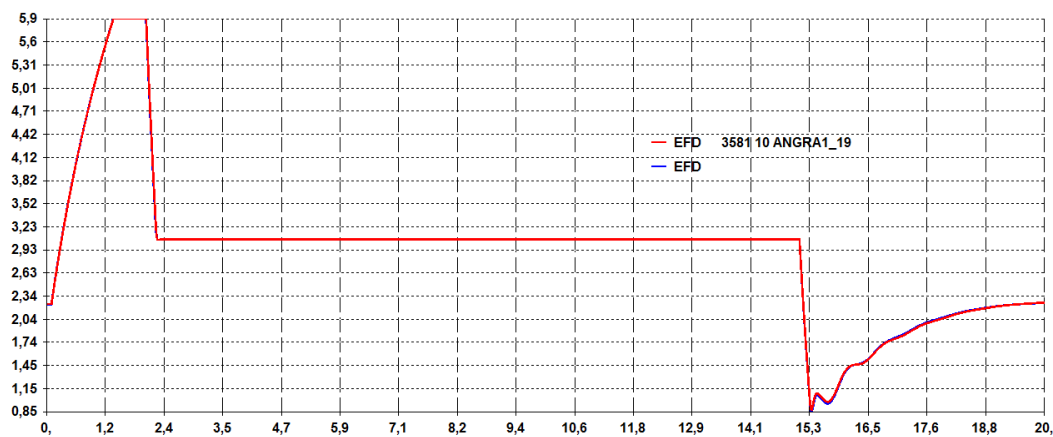


Figura IX - 11 – Comparação da Tensão de Campo (Efd)

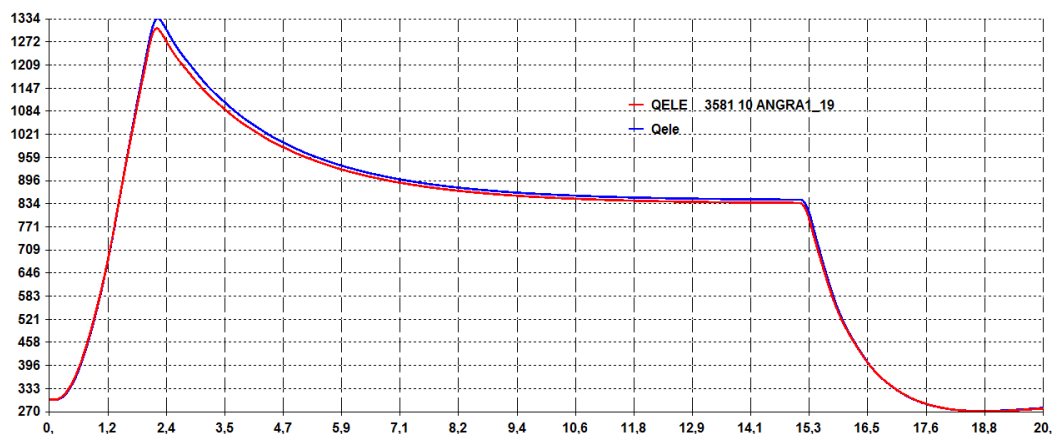


Figura IX - 12 – Comparação da Potência reativa (Q)

1.6 Teste do Limitador de sub-excitação com degrau de -10% na referência de tensão com a máquina em plena carga (sem curva de saturação).

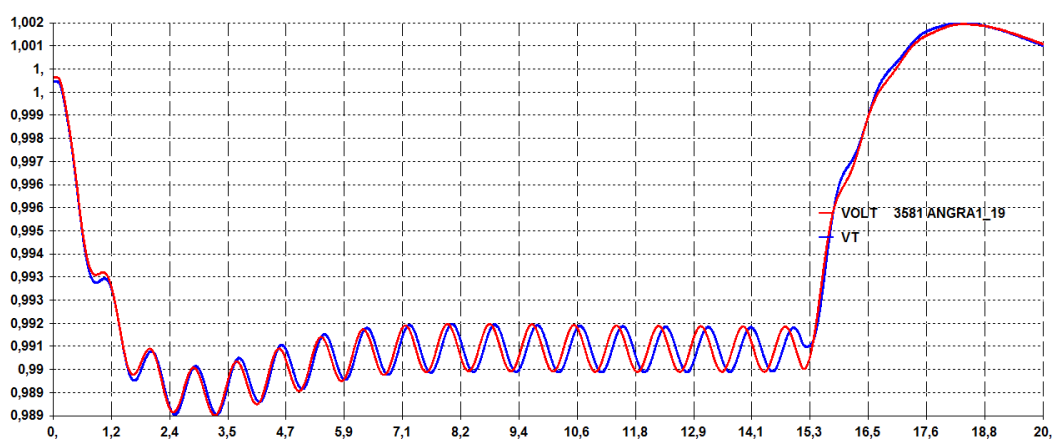


Figura IX - 13 – Comparação da Tensão terminal (Vt)

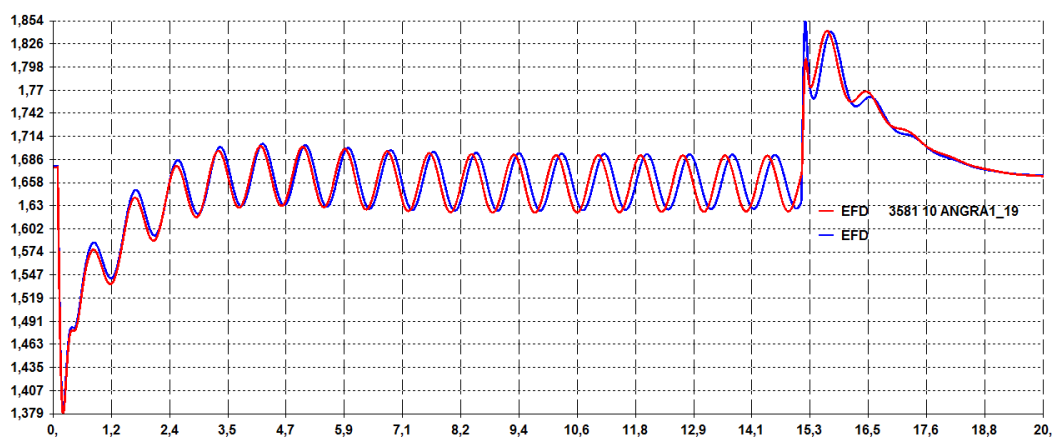


Figura IX - 14 – Comparação da Tensão de campo (Efd)

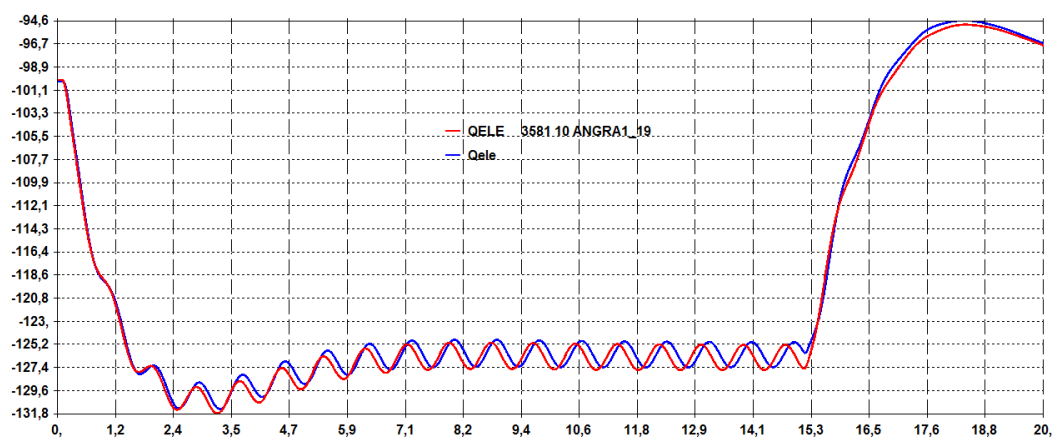


Figura IX - 15 – Comparação da Potência reativa (Q)

2 UTE Leonel Brizola (Termorio)

No teste foi considerada a constante de inércia de uma unidade geradora a vapor de 3,94 segundos. A impedância adotada entre o transformador e a barra infinita foi de 3,7% na base 100 MVA e 138 kV.

2.1 Dados das Unidades Geradoras

A Figura IX - 16 mostra a planta da usina térmica instalada no município de Duque de Caxias, no Estado do RJ e a disposição dos geradores.

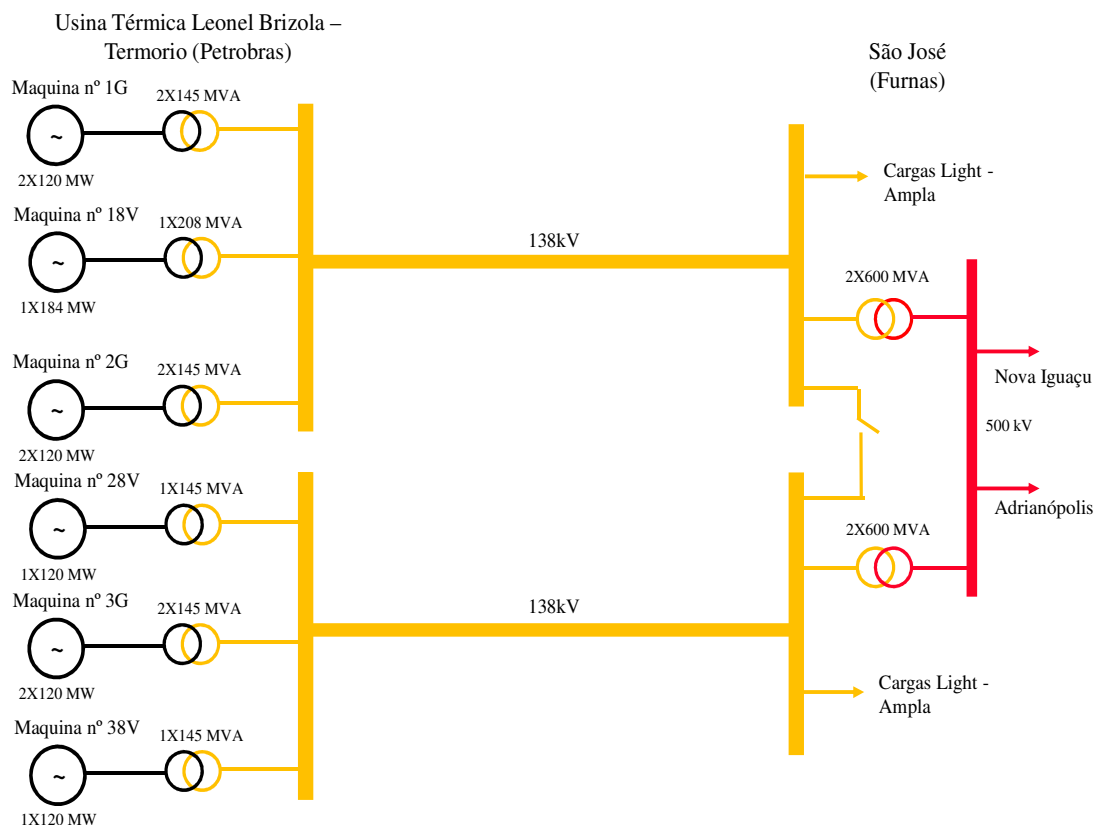


Figura IX - 16 – Diagrama Unifilar da Usina Térmica Leonel Brizola – Termorio e seu sistema de conexão

Tabela IX - 1 – Dados básicos da UTE Brizola - Termorio

Unidade	Quantidade	Potência Nominal (MW)	Potência Reativa mínima - Mvar	Potência Reativa máxima - Mvar	Reatância do Transformador (%) - Base 100 MVA	Tensão Nominal (kV)
UG 1G	2	120	-61	76,8	8	13,8
UG 18V	1	184	-79	110	6,560	13,8
UG 2G	2	120	-61	76,8	8	13,8
UG 28V	1	120	-61	76,8	8	13,8
UG 3G	2	120	-61	76,8	8	13,8
UG 38V	1	120	-61	76,8	8	13,8
Total	9	1144	-567	724,4		

2.2 Dados do programa Anarede/Anatem

Dados do programa ANAREDE/ANATEM, seguem na figura 2 (a), (b) e (c). No Anexo 1 é apresentado o modelo do regulador de tensão e PSS do gerador em formato CDU/ANATEM.

```

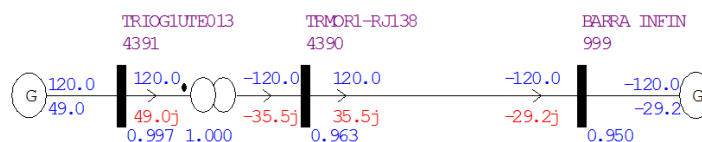
.. UTE Leonel Brizola - 145 MVA - Gas
.. Antiga UTE TermoRio
(CS) (Xd ) (Xq ) (X'd) (X'q) (X"d) (Xl ) (T'd) (T'q) (T"d) (T"q)
      199.0185.0 20.0 33.0 15.0 13.0 8.39 0.810.0190.029
(Ra ) ( H ) ( D ) (MVA) Fr C
.09123.964      145.0      N

```

(a)

```
(..... UTE Leonel Brizola - 145 MVA
..... Antiga UTE TermoRio
(No)   T ( Y1 ) ( Y2 ) ( X1 )
1900   2 .0169953 7.385287      0.8
(
```

(b)



(C)

Figura IX - 17 – Dados dos programas Anarede / Anatem: (a) dados de gerador; (b) dados de curva de saturação; (c) fluxo de potência Anarede.

2.3 Dados do programa PSCAD

Os dados de gerador e rede para programa PSCAD são os mesmos adotados para o programa ANAREDE/ANATEM, que são ilustrados na figura 3 (a), (b) e (c). Os dados de curva de saturação magnética do gerador para o PSCAD são calculados na base não-recíproca. Em decorrência deste fato, se os dados dos reguladores de tensão forem utilizados diretamente do diagrama de bloco do Anatem a corrente de campo de saída do PSCAD deve ser dividida por X_{ad} para retornar a base recíproca utilizada no Anatem, como descrito no relatório EPE-DEE-RE-062-2013_Rev1 Anexo VI – R2 do Bipolo 1 do CCAT Belo Monte.

[sync_machine] Synchronous Machine

Basic Data

Rated RMS Line-to-Neutral Voltage	7.9674 [kV]
Rated RMS Line Current	6.06636 [kA]
Base Angular Frequency	376.991118 [rad/s]
Inertia Constant	3.964 [s]
Mechanical Friction and Windage	0
Neutral Series Resistance	1.0E8 [pu]
Neutral Series Reactance	0 [pu]
Iron Loss Resistance	1e6 [pu]
Number of coherent machines	n_maq

OK Cancel Help...

(a)

[sync_machine] Synchronous Machine

Generator Data Format

Armature Resistance [Ra]	0.000912 [pu]
Armature Time Constant [Ta]	0.278 [s]
Potier Reactance [Xp]	0.13 [pu]
D: Unsaturated Reactance [Xd]	1.99 [pu]
D: Unsaturated Transient Reactance [Xd']	0.2 [pu]
D: Unsaturated Transient Time (Open) [Tdo']	8.39 [s]
D: Unsaturated Sub-Trans. Reactance [Xd'']	0.15 [pu]
D: Unsaturated Sub-Trans. Time (Open) [Tdo'']	0.019[s]
D: Real Transfer Admitt (Armat-Field)	1.0E+2 [pu]
D: Imag Transfer Admitt (Armat-Field)	0.0 [pu]
Q: Unsaturated Reactance [Xq]	1.85 [pu]
Q: Unsaturated Transient Reactance [Xq']	0.33 [pu]
Q: Unsaturated Transient Time (Open) [Tqo']	0.81 [s]
Q: Unsaturated Sub-Trans. Reactance [Xq'']	0.15 [pu]
Q: Unsaturated Sub-Trans. Time (Open) [Tqo'']	0.029 [s]
Air Gap Factor	1

OK Cancel Help...

(b)

[sync_machine] Synchronous Machine

Saturation Curve

First Point on the Saturation	0.0	0.0 [pu]
Curve must be (0.0, 0.0).	0.817	0.8[pu]
Second Point must be on the	1.074	1.0 [pu]
Unsaturated Part of the Curve.	1.256	1.1[pu]
Currents can be in any	1.526	1.2 [pu]
consistent Units.	1.982	1.3 [pu]
10 Points Maximum: If less	2.828	1.4 [pu]
points are available, enter	-1	-1
(-1.0,-1.0) for the one after	-1	-1
the last point.	-1.0	-1.0 [pu]

OK Cancel Help...

(c)

[xfmr-3p2w] 3 Phase 2 Winding Transformer

Configuration

Transformer Name	Siemens
3 Phase Transformer MVA	145.0 [MVA]
Base operation frequency	60.0 [Hz]
Winding #1 Type	Delta
Winding #2 Type	Y
Delta Lags or Leads Y	Lags
Positive sequence leakage reactance	0.116 [pu]
Ideal Transformer Model	Yes
No load losses	0.0 [pu]
Copper losses	0.0 [pu]
Tap changer on winding	#2
Graphics Display	Single line (circles)
Display Details?	No

OK Cancel Help...

(d)

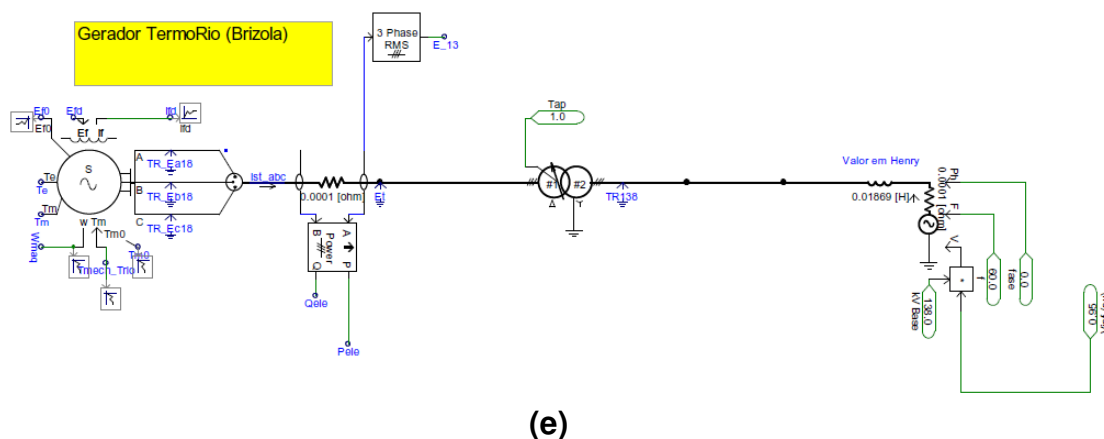


Figura IX - 18 – Dados de Gerador (a) e (b), de Saturação (c), transformador elevador (d) e rede (e)

2.4 Comparações ANATEM x PSCAD

Os testes realizados foram:

- Gerador em Vazio – Degrau de + e - 5% na Tensão de Referência (Vref)
- Gerador em Vazio – Degrau de +30% da Vref – Limitador Volts/Hz
- Gerador com carga – Degrau de + e - 5% da Vref
- Gerador em carga - Degrau de - e + 5% de Vref

- Gerador em Carga - degrau de +30% na Vref - Limitador Volts/Hz
- Gerador em Carga - Limitador de Corrente de Armadura (Ia)
- Gerador com carga - Limitador de máxima corrente de campo (IfdMax)
- Gerador Com Carga - Limitador de mínima corrente de campo (IfMin)
- Gerador Com Carga - Limitador da curva PQ
- Gerador com carga – Degrau de + e - 5% da Vref (com PSS ativado e considerando a curva de saturação)

Observações:

- Todos os testes forma feitos com o PSS fora de serviço e a não consideração da curva de saturação em ambos os programas., com exceção do último teste.
- O valor de corrente de campo (Ifd) calculado pelo PSCAD é ligeiramente inferior ao calculado pelo ANATEM, mesmo depois de converter para a base não-recíproca do ANATEM e sem saturação. Então todos os gráficos vão estar ligeiramente “deslocados” em relação aos gráficos do ANATEM.
- As variáveis Vt, Pele e Qele foram comparadas usando filtros de medição de 20ms nos dois programas.

2.5 Gerador em Vazio – Degrau de + e - 5% na Tensão de Referência (Vref)

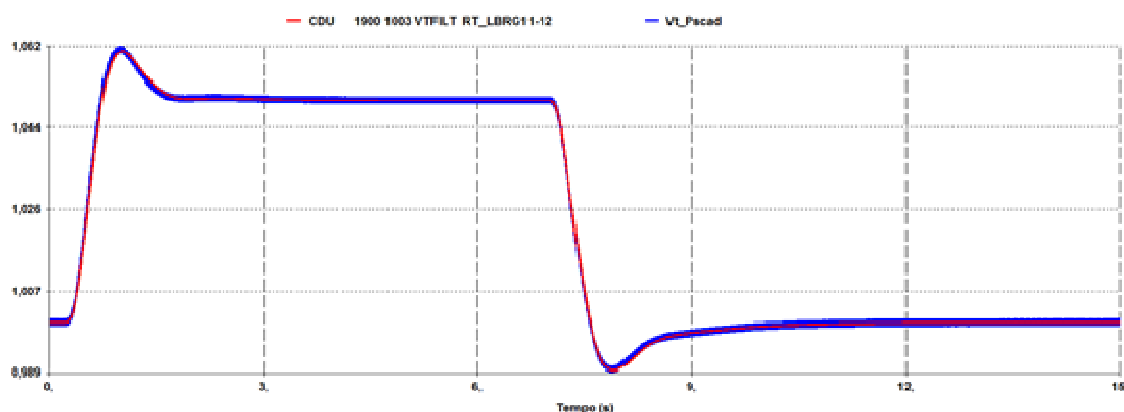


Figura IX - 19– Comparação Tensão terminal (Vt)

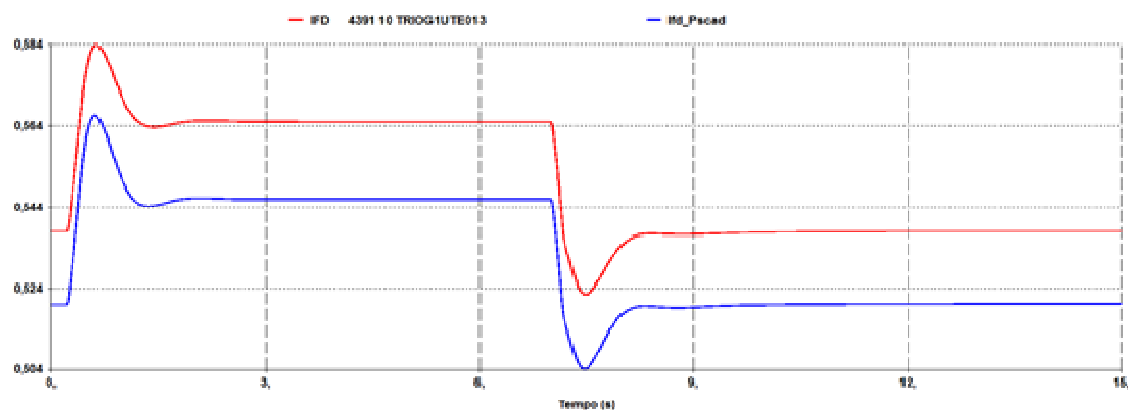


Figura IX - 20– Comparação das Correntes de campo (Ifd)

2.6 Limitador Volts/Hz - Gerador em Vazio – Degrau de +30% da Vref

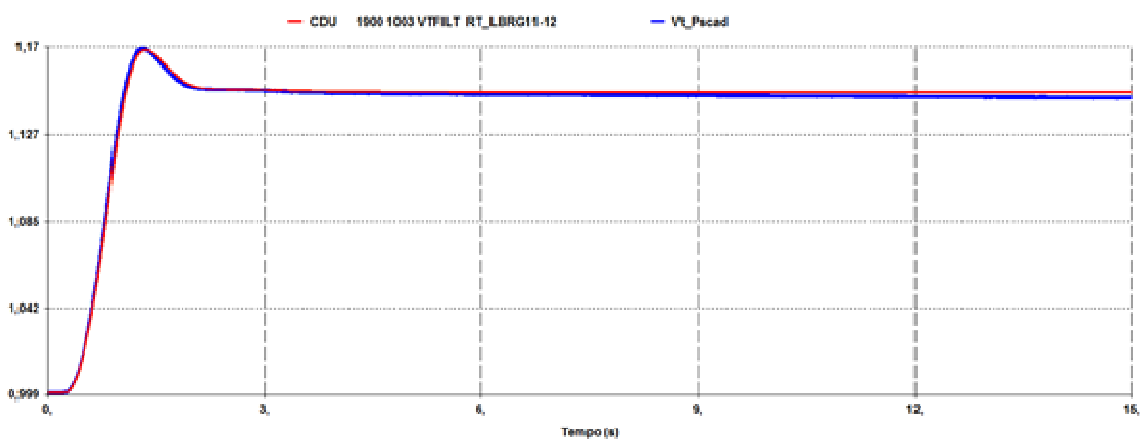


Figura IX - 21– Comparação das Tensões Terminais (Vt)

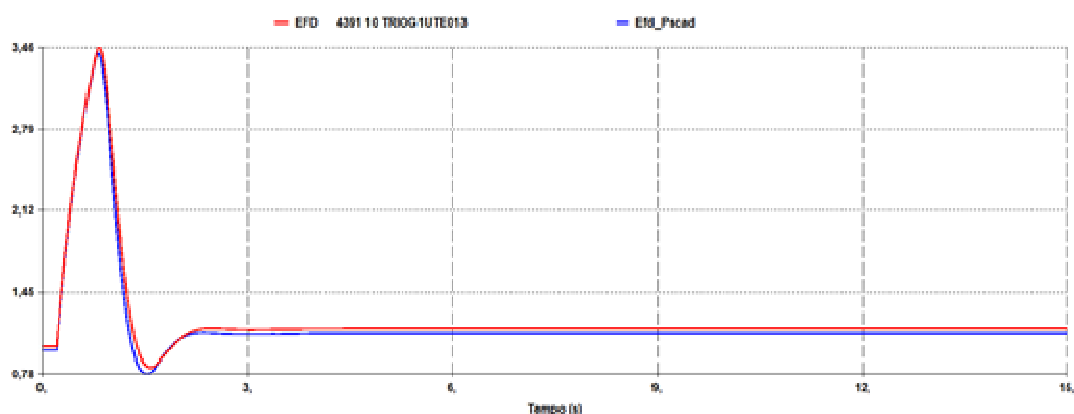


Figura IX - 22– Comparação das Tensões de campo (Efd)

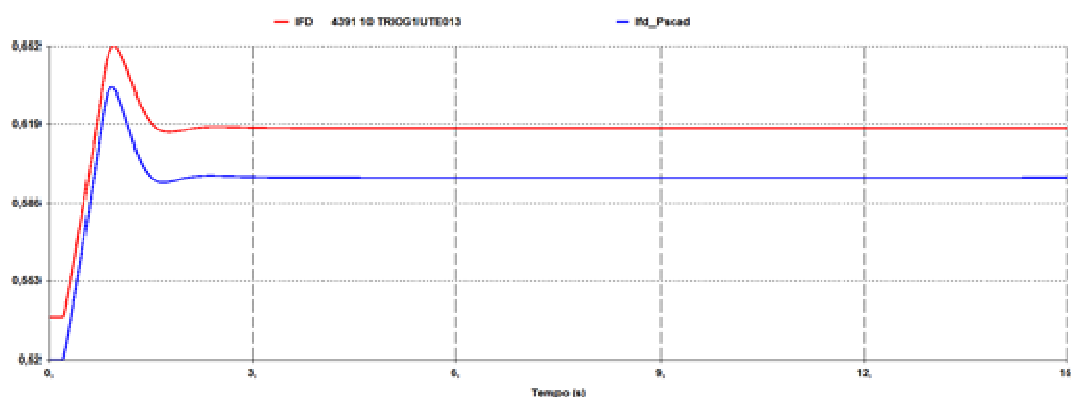


Figura IX - 23– Comparação das Correntes de campo (Efd)

2.7 Gerador com carga – Degrau de +/- 5% da Vref

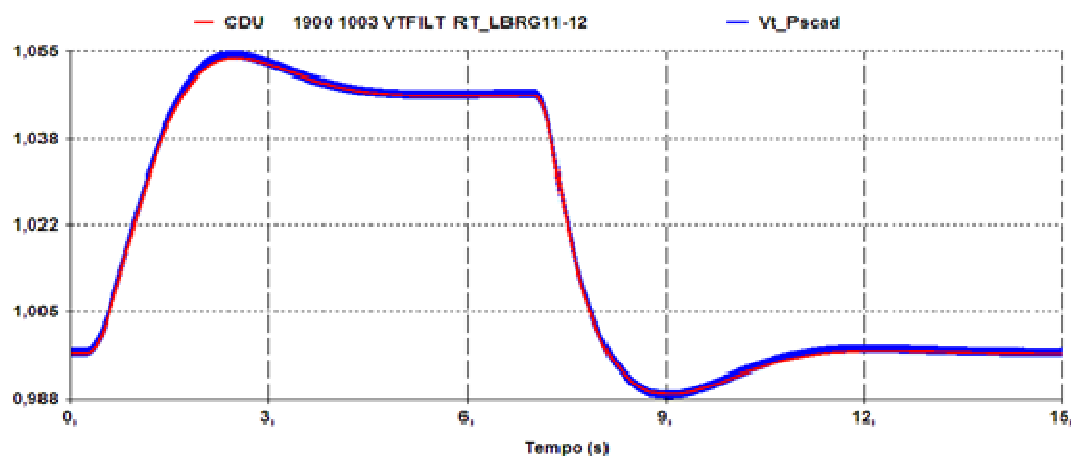


Figura IX - 24– Comparação das Tensões Terminais (Vt)

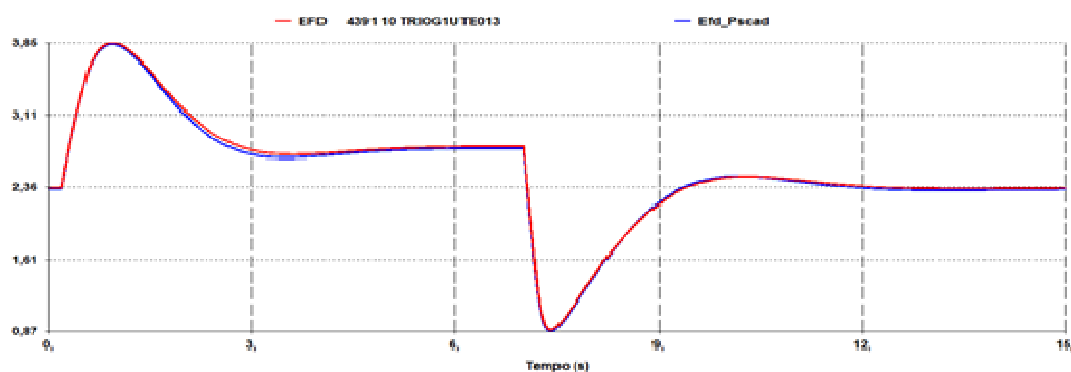


Figura IX - 25– Comparação das Tensões de campo (Efd)

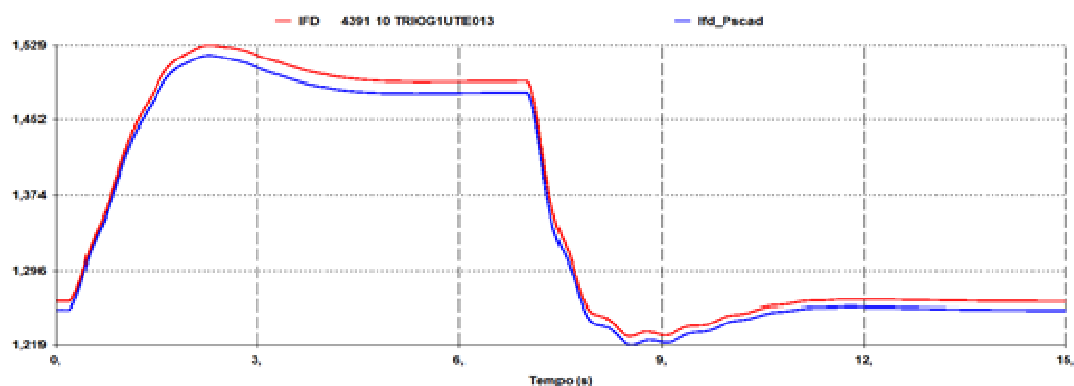


Figura IX - 26– Comparação das Correntes de campo (Ifd)

2.8 Limitador Volts/Hz - Gerador em Carga – Degrau de +30% da Vref

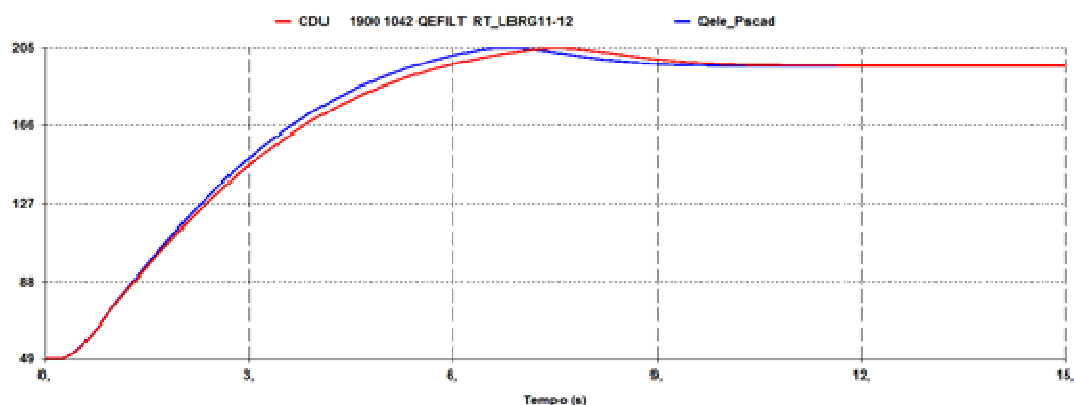


Figura IX - 27– Comparação das Potências reativa (Q)

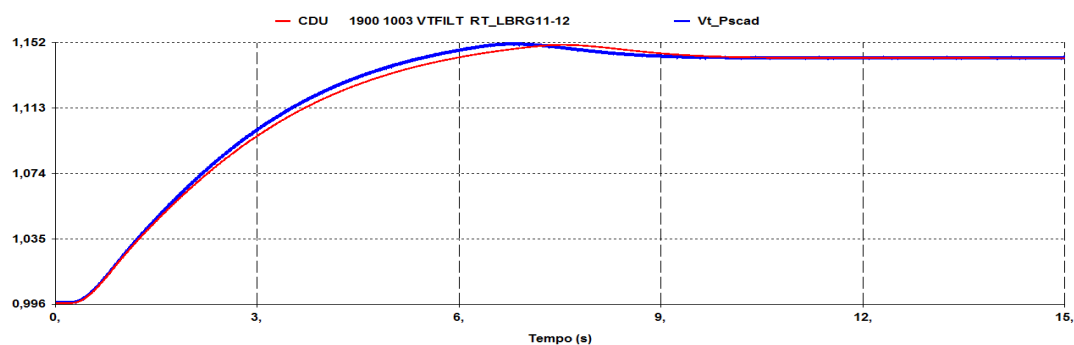


Figura IX - 28– Comparação das Tensões terminais (Vt)

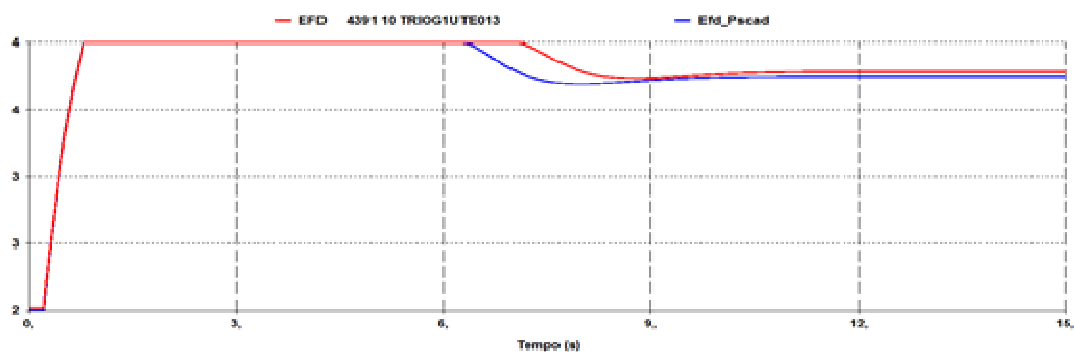


Figura IX - 29– Comparação das Tensões de campo (Efd)

2.9 Limitador de Corrente de Armadura (Ia) - Gerador em Carga

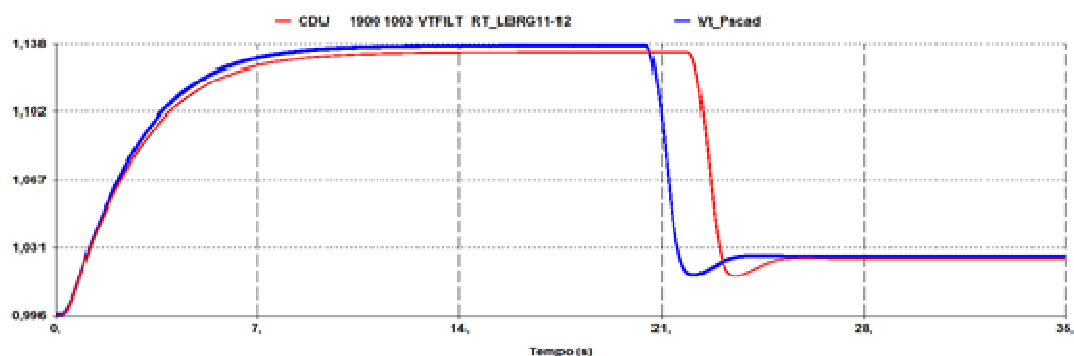


Figura IX - 30– Comparação das Tensões terminal (Vt)

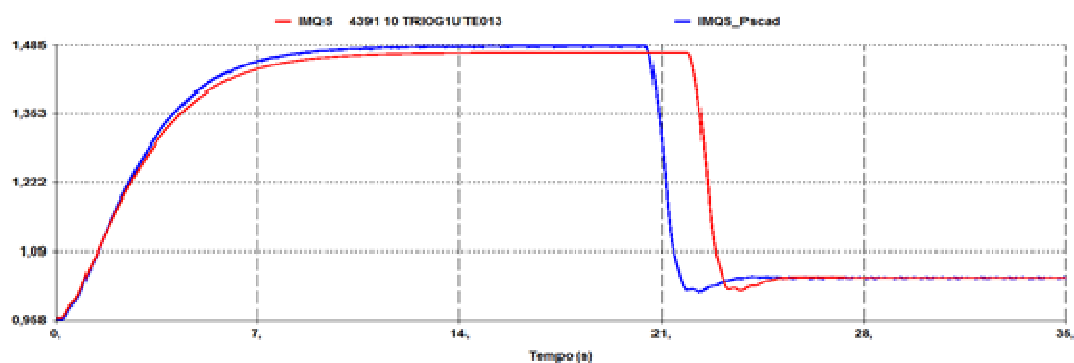


Figura IX - 31– Comparação das Correntes da armadura (Ia)

2.10 Limitador de máxima corrente de campo (IfdMax) - Gerador com carga

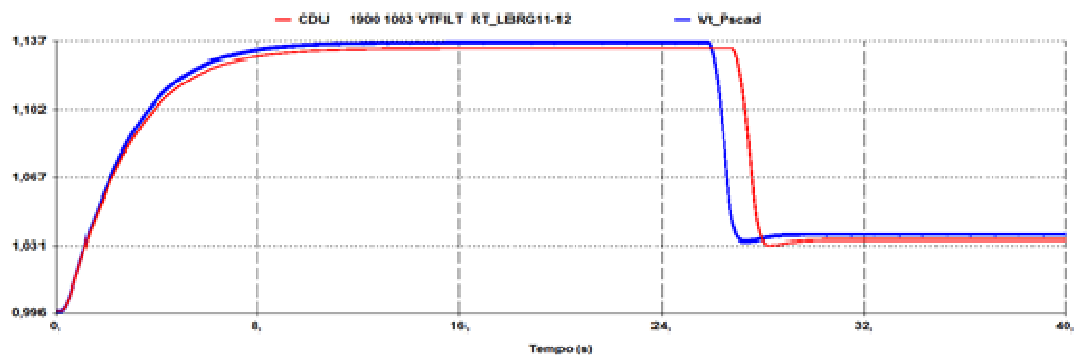


Figura IX - 32– Comparação das Tensões terminais (Vt)

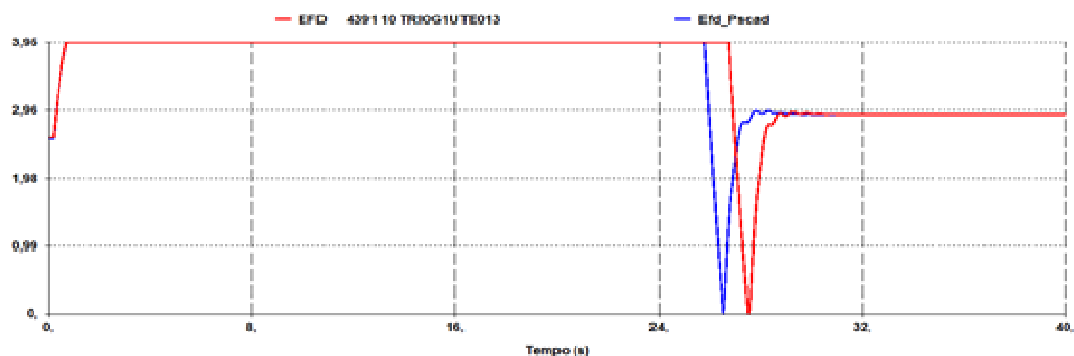


Figura IX - 33– Comparação das Tensões de campo (Efd)

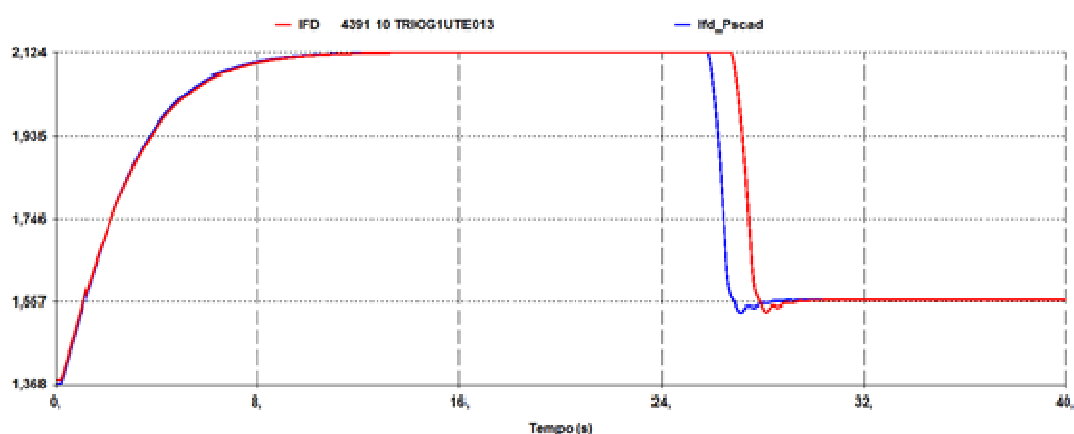


Figura IX - 34– Comparação das Correntes de campo (Ifd)

2.11 Limitador de mínima corrente de campo (IfMin) - Gerador Com Carga

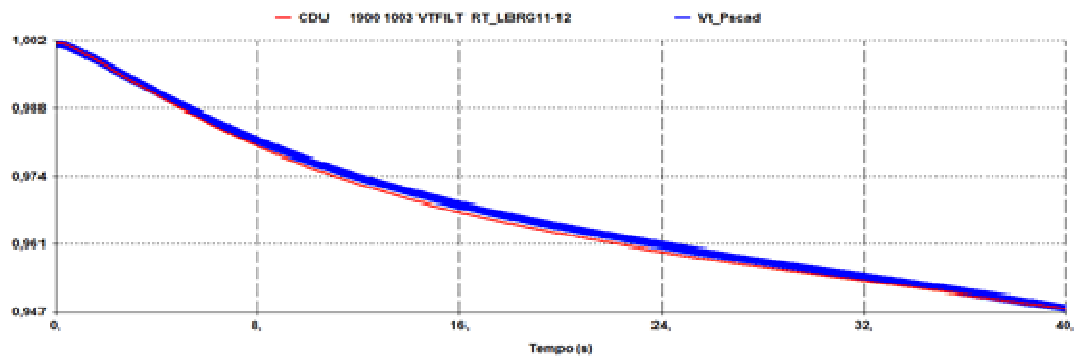


Figura IX - 35– Comparação das Tensões terminais (V_t)

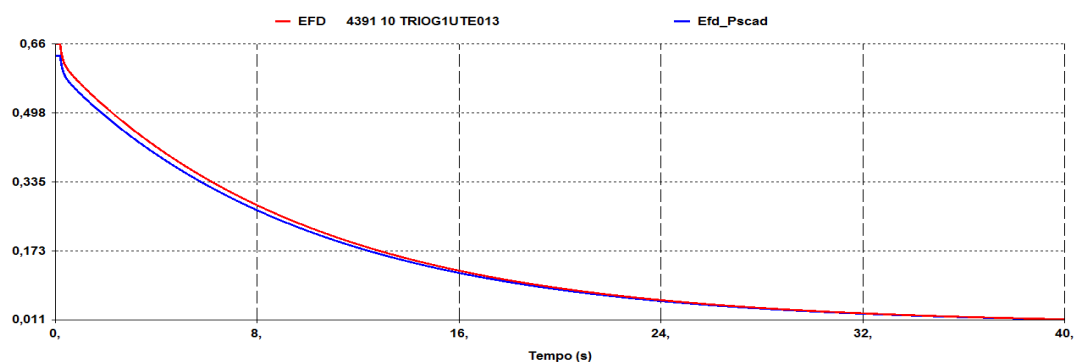
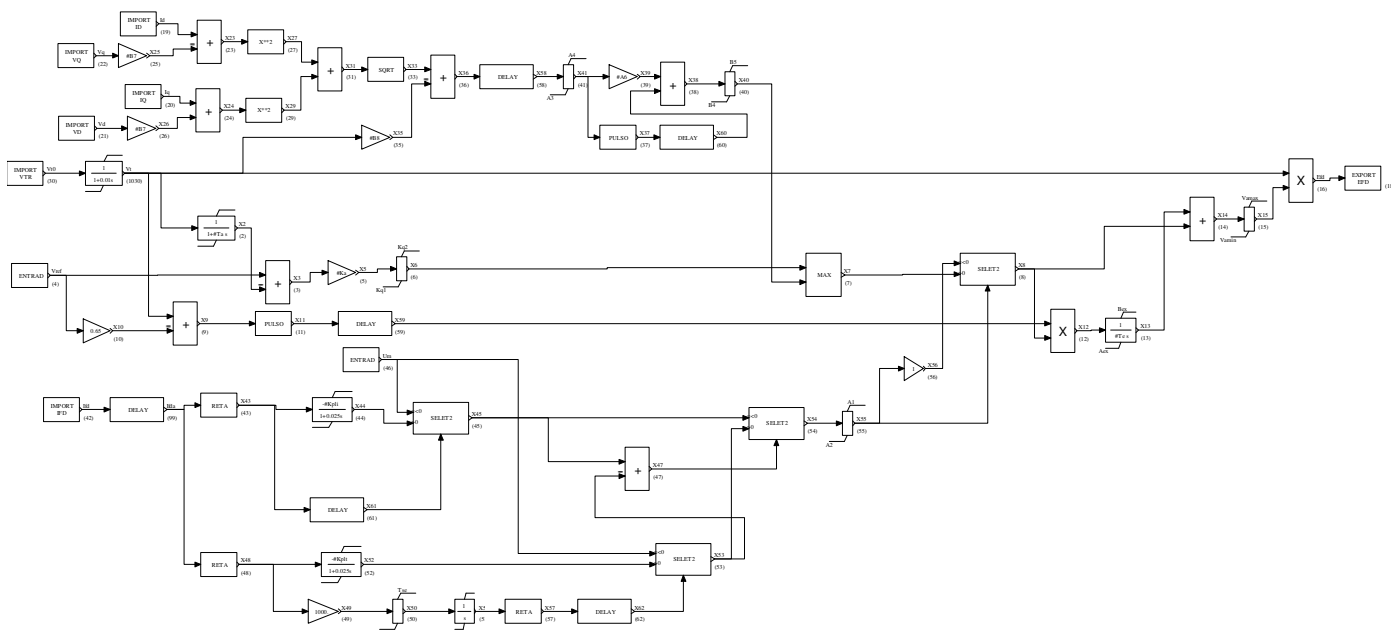


Figura IX - 36– Comparação das Tensões de campo (E_{fd})

3 Compensador síncrono de Grajaú

3.1 MODELOS ANATEM E PSCAD

Segue abaixo o modelo CDU ANATEM do regulador de tensão do síncrono de Grajaú:



A seguir temos os dados dinâmicos do gerador de Grajaú (Modelo built-in do ANATEM):

DMDG MD02

(No) (CS) (Xd) (Xq) (X'd) (X''d) (X'l) (T'd) (T''d) (T''q)

0134 0134 180.0105.0 44.0 20.0 18.0 8.00 .060 .200

(No) (Ra) (H) (D) (MVA) Fr C

0134 1.600 200.0 N

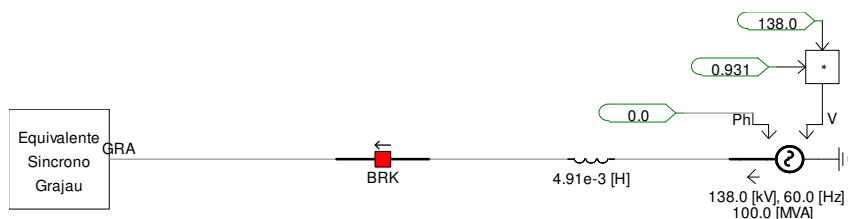
999999

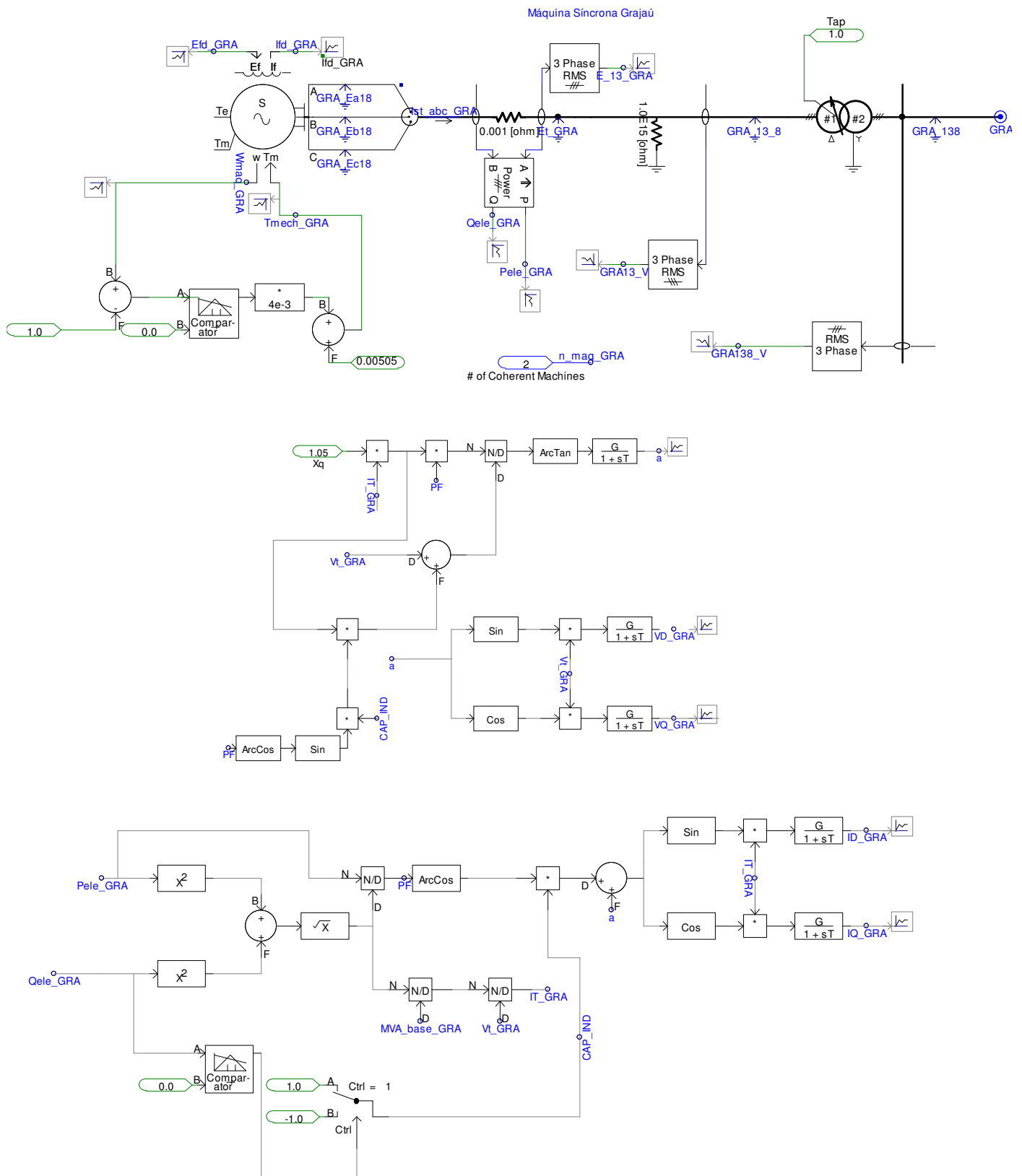
DCST

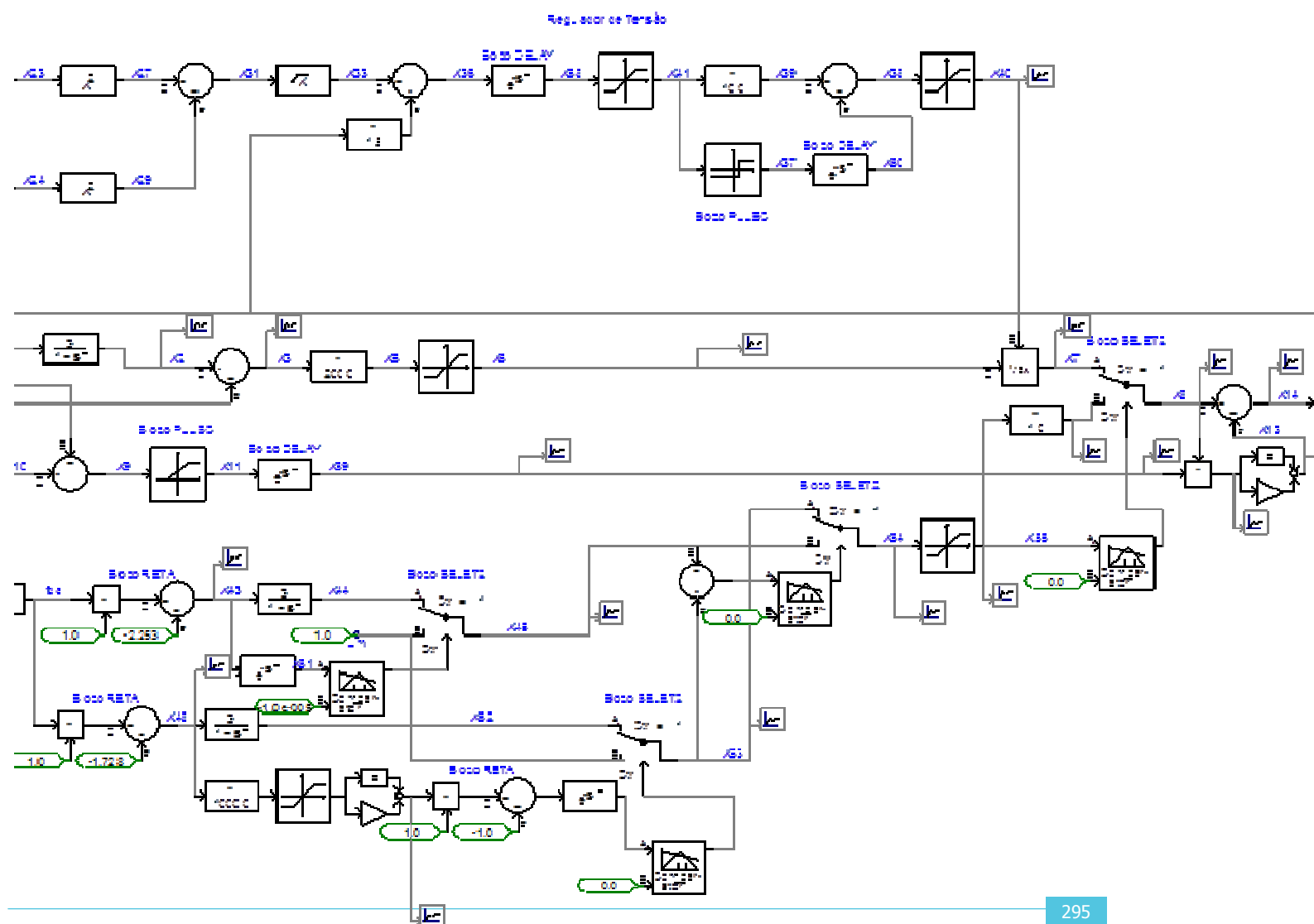
(No) T (Y1) (Y2) (x1)

0134 2 0.0212 6.473 0.8

Segue abaixo os diagramas que foram modelados no PSCAD para o síncrono de Grajaú:







3.2 Máquina com saturação, em vazio: Degrau de -5% e +5% no sinal de referência do regulador de tensão

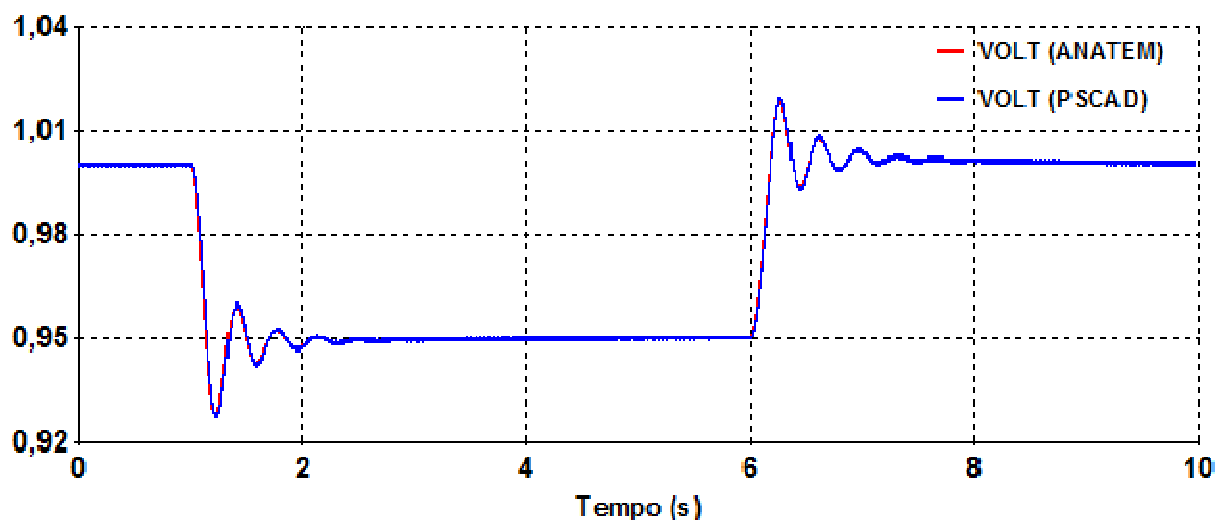


Figura IX - 33– Comparação das Tensões terminais (Vt)

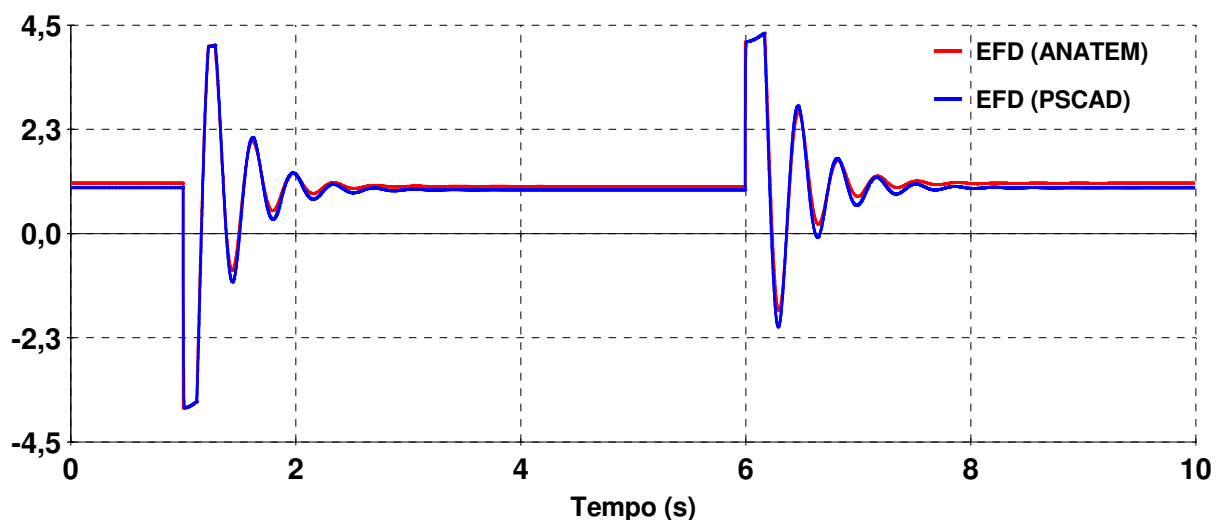


Figura IX - 34– Comparação das Tensões de campo (Efd)

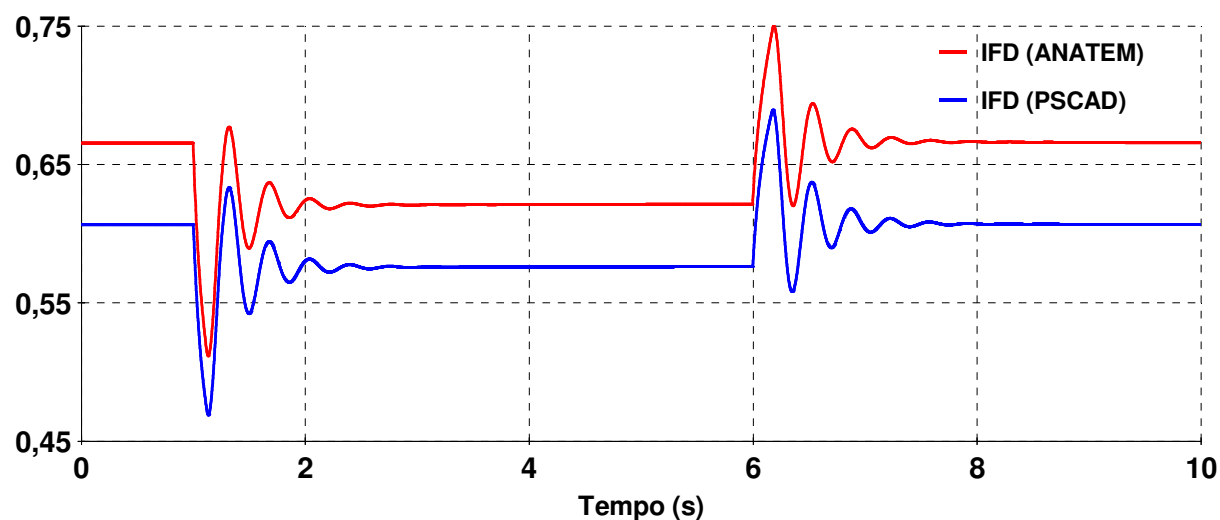


Figura IX - 35– Comparação das Correntes de campo (Ifd)

3.3 Máquina com saturação, em carga: Degrau de +35% e -6% no sinal de referência do regulador de tensão

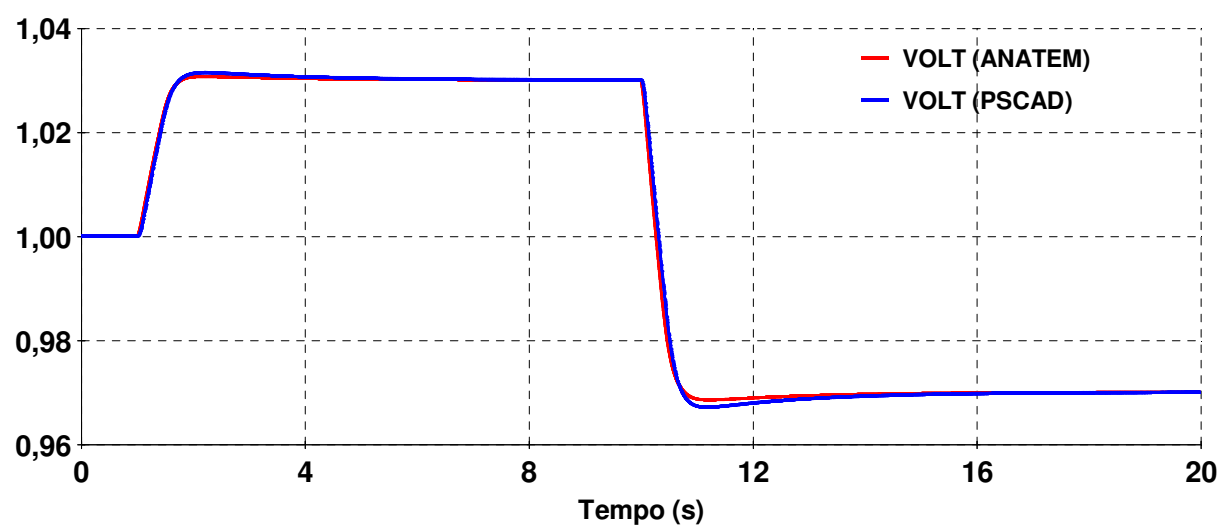


Figura IX - 36– Comparação das Tensões terminais (Vt)

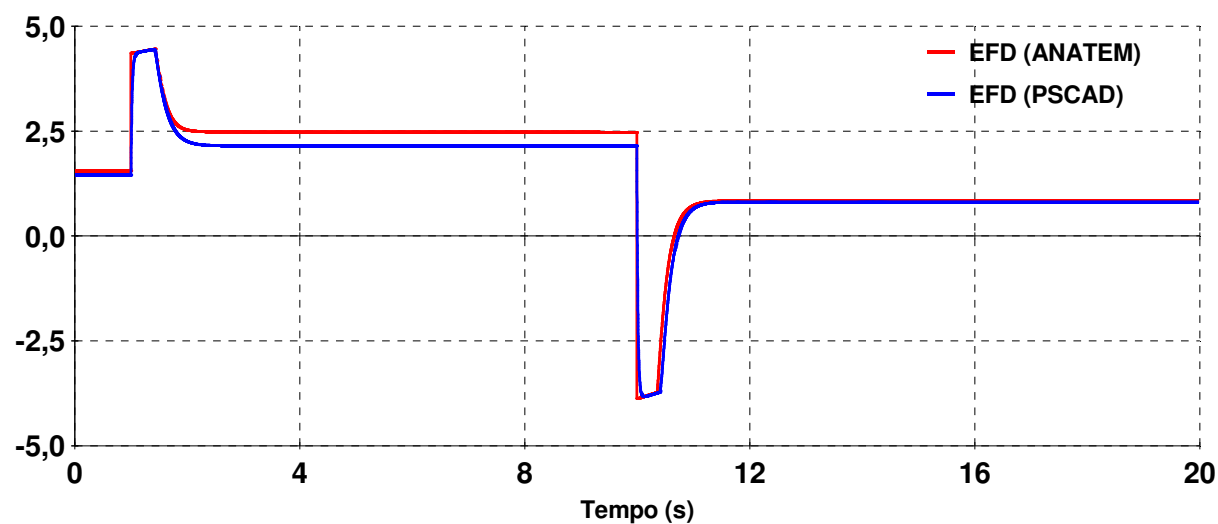


Figura IX - 37– Comparação das Tensões de campo (Efd)

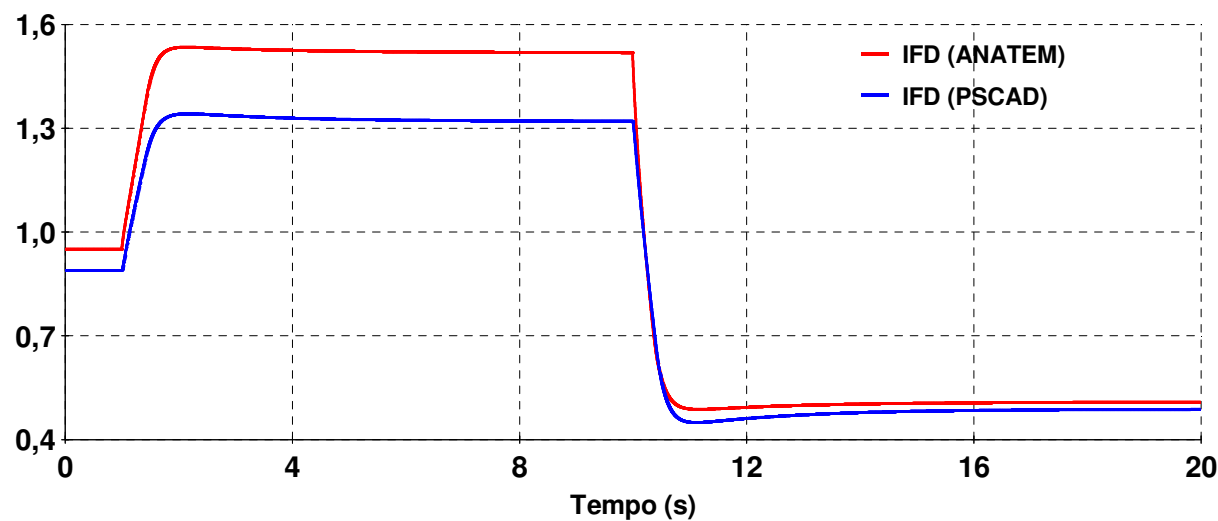
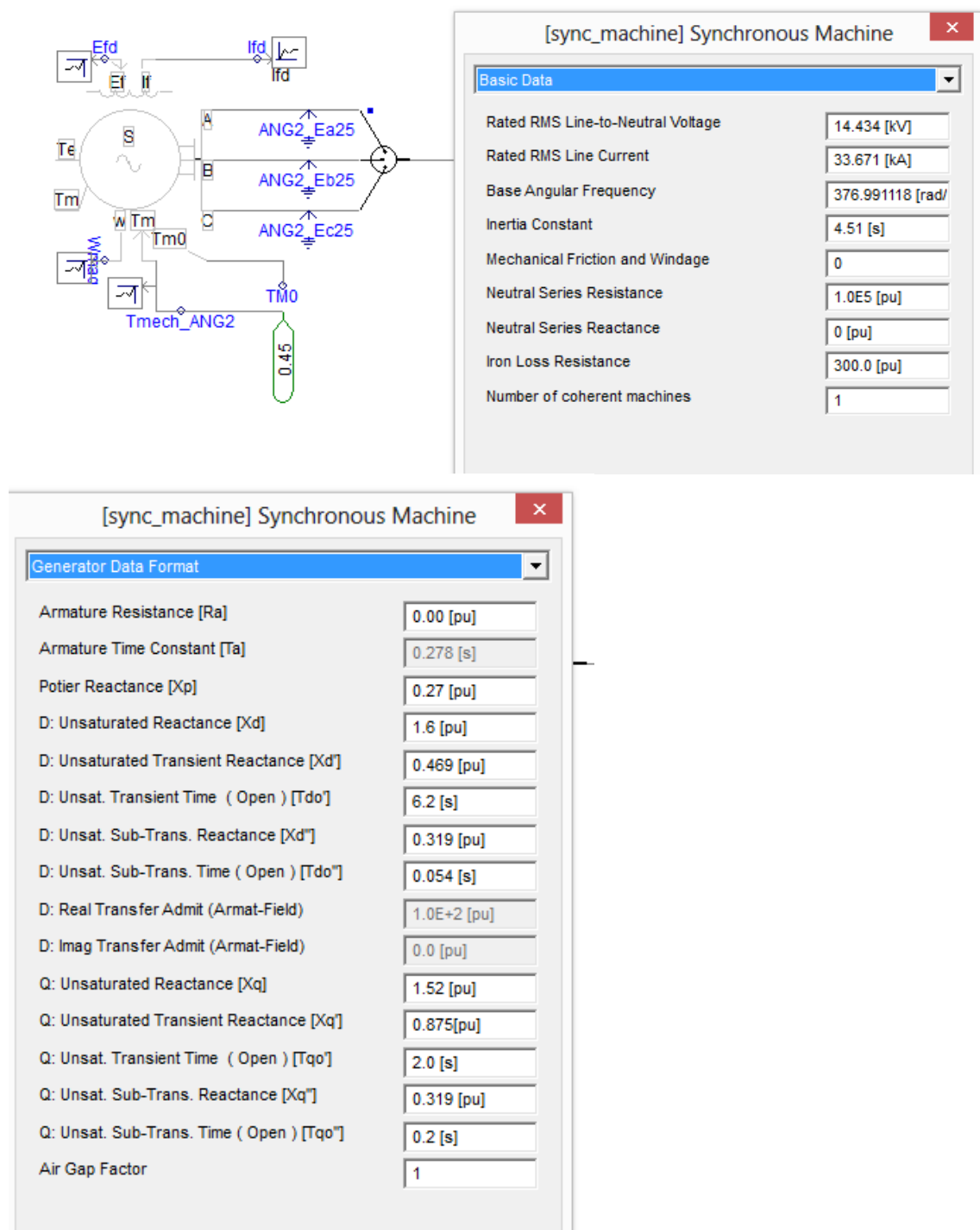


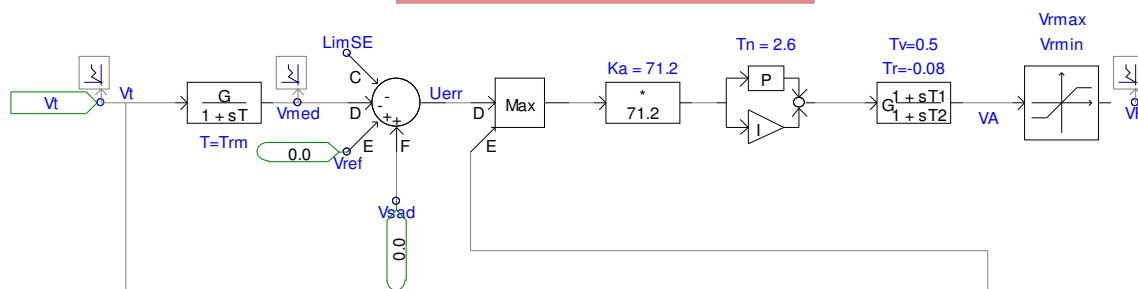
Figura IX - 38– Comparação das Correntes de campo (Ifd)

4 UTE ANGRA II & III

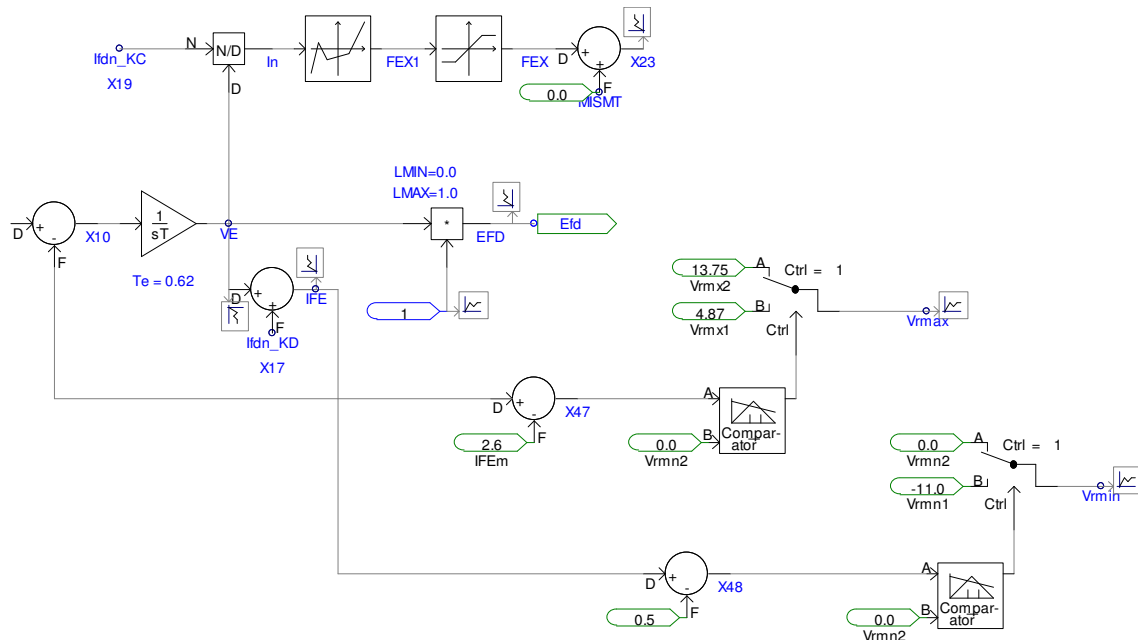
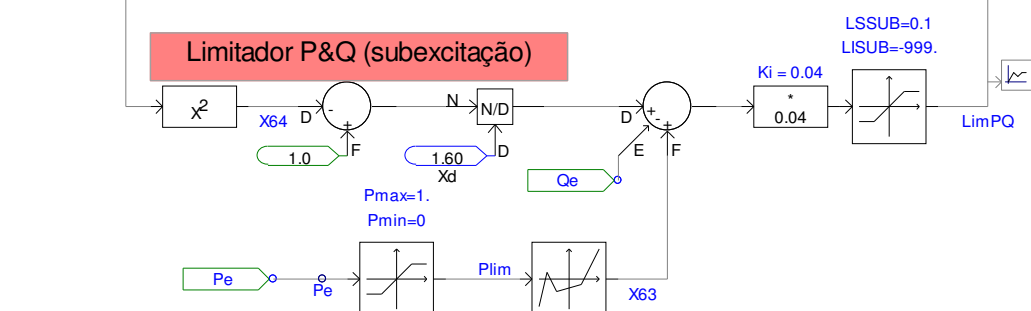
4.1 Dados da Máquina & Diagrama de blocos do Modelo no PSCAD



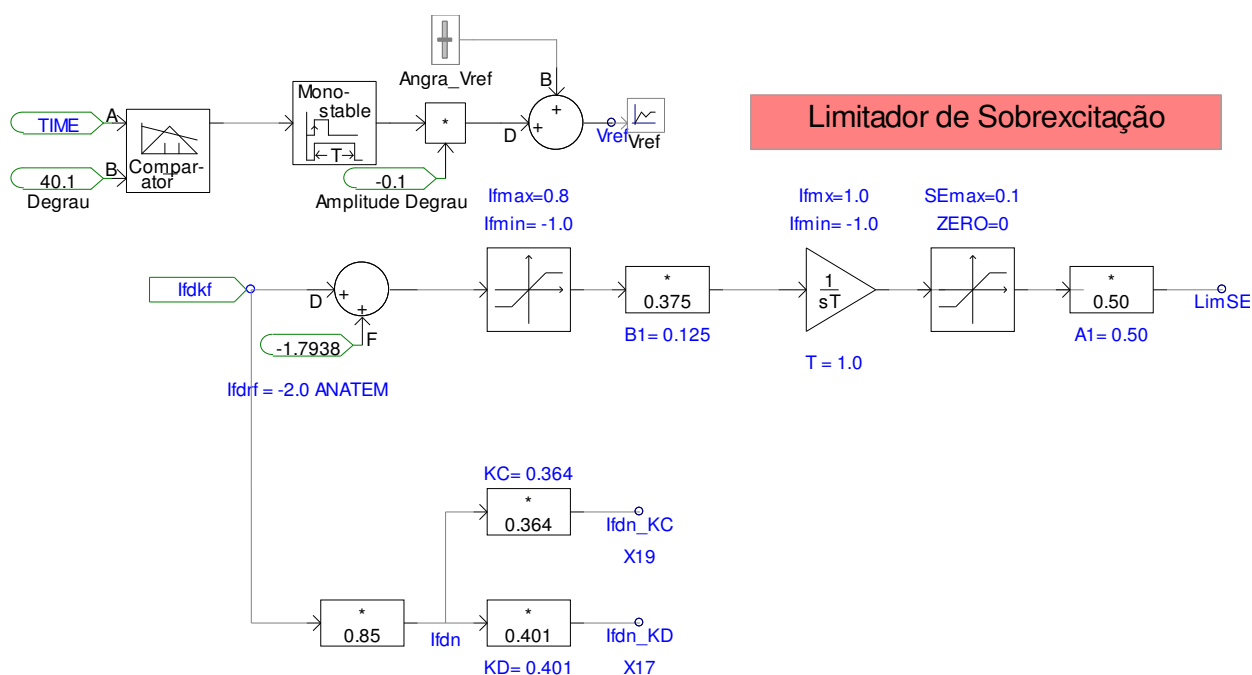
Regulador de tensão



Limitador P&Q (subexcitação)



Seleção de VRMAX E VRMIN



4.2 Máquina em vazio – com Saturação – Degrau de +5 % na referência do regulador de tensão

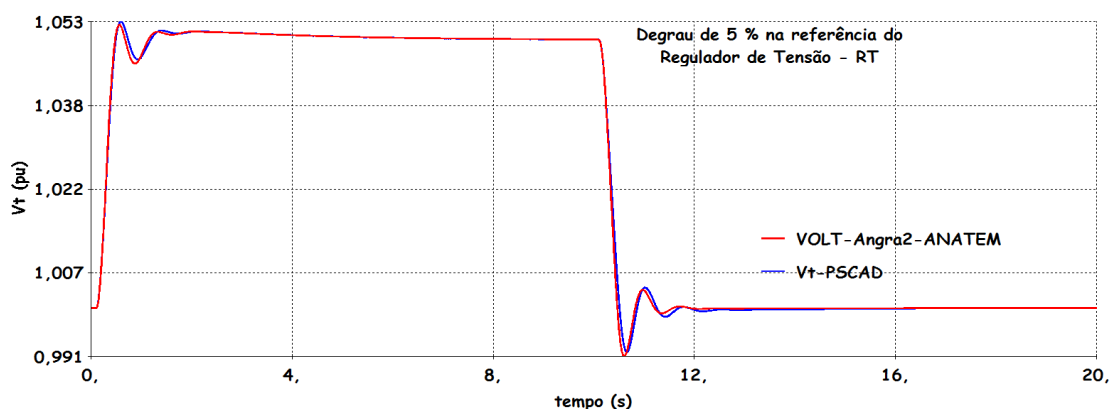


Figura IX - 39– Comparação das Tensões terminais (Vt)

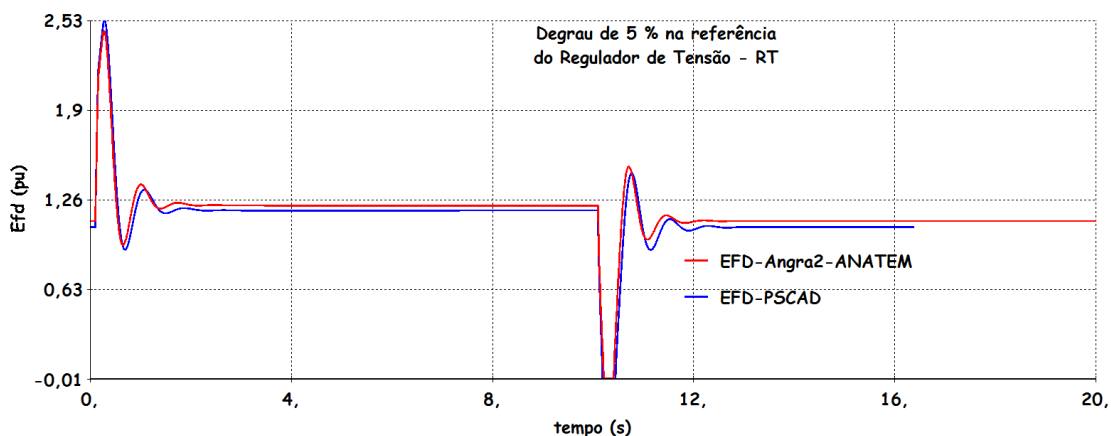


Figura IX - 40– Comparação das Tensões de campo (Efd)

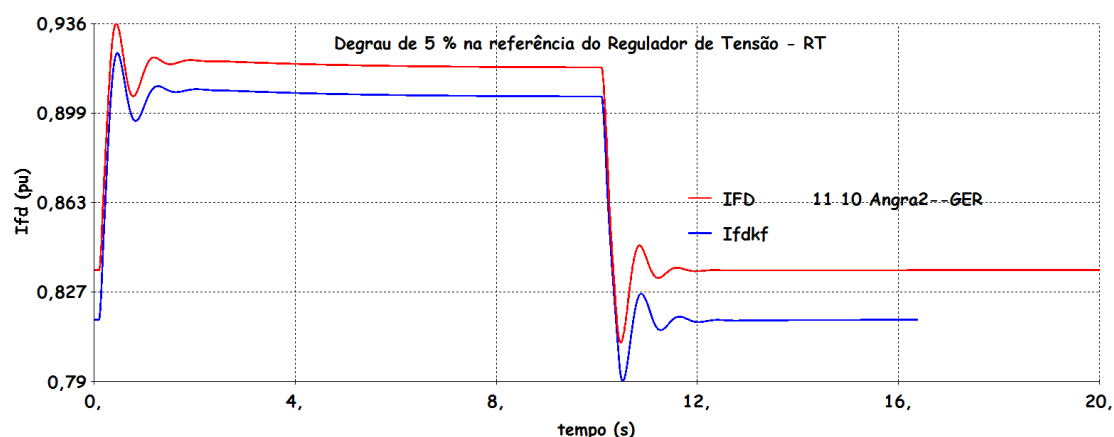


Figura IX - 41– Comparação das Corrente de campo (Ifd)

4.3 Máquina com Carga (900 MW) – com Saturação – Degrau de +5 % na referência do regulador de tensão

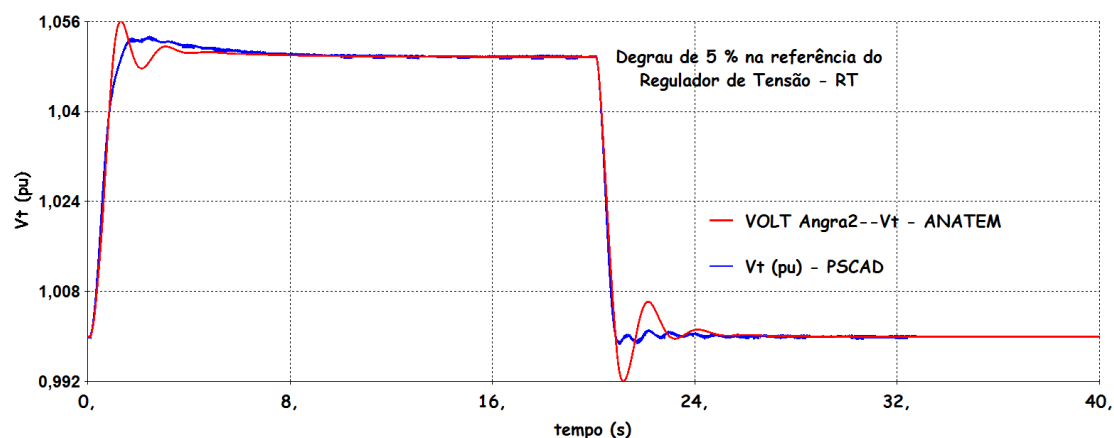


Figura IX - 42– Comparação das Tensões terminais (Vt)

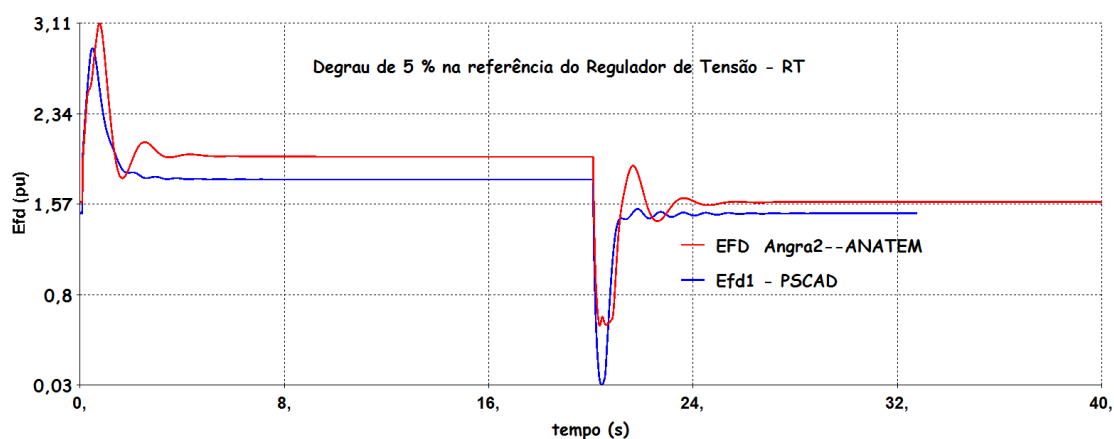


Figura IX - 43– Comparação das Tensões de campo (Efd)

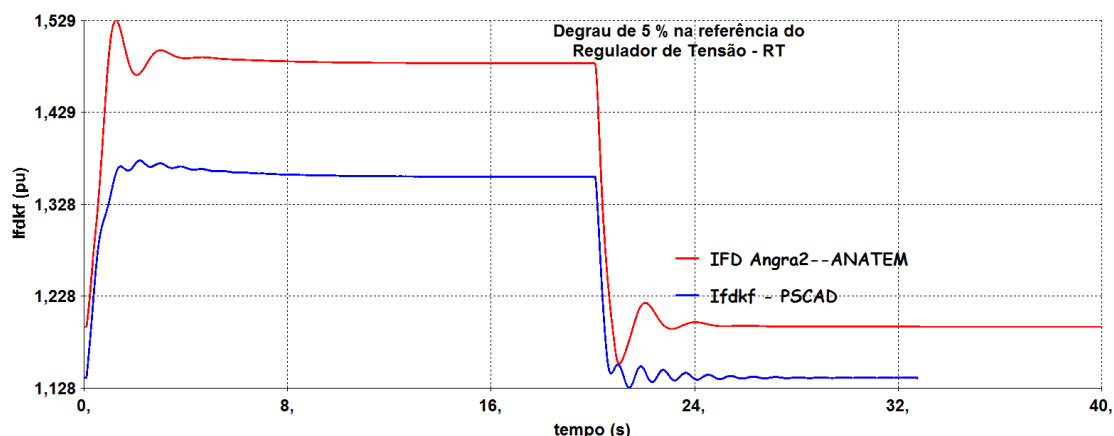


Figura IX - 43– Comparação das Corrente de campo (Ifd)

4.4 Teste do Limitador de Sobreexcitação (LimSE) - Máquina com Carga Nominal (1.350 MW) – com Saturação – Degrau de +6 % na referência do regulador de tensão

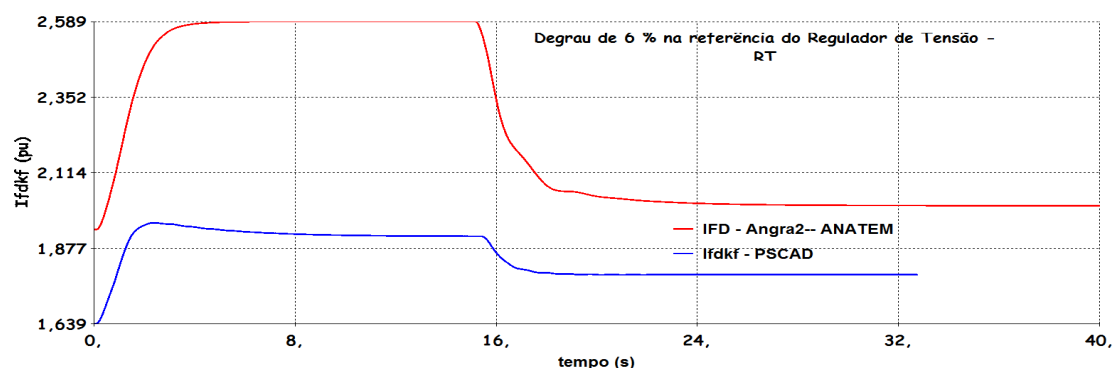


Figura IX - 44– Comparação das Corrente de campo (Ifd)

4.5 Teste do Limitador de Sub-excitação (LimPQ) - Máquina com Carga (650 MW & -480 Mvar) – com Saturação – Degrau de -10 % na referência do regulador de tensão

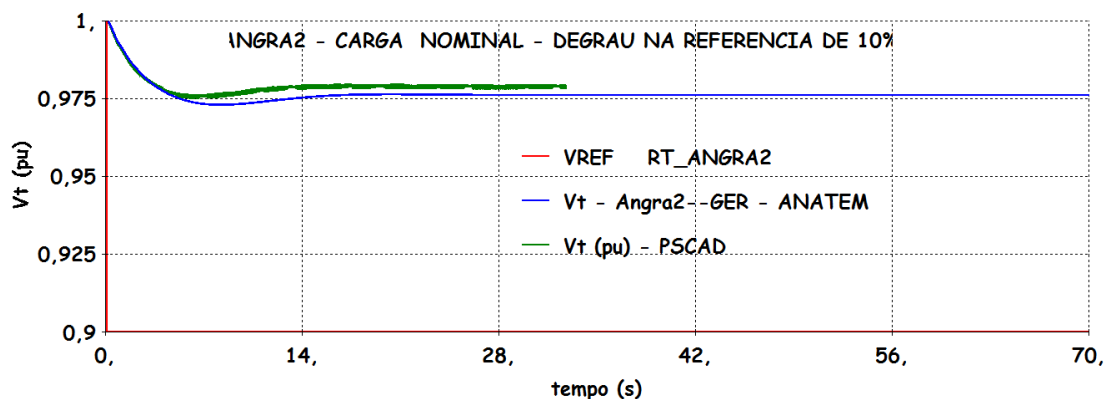


Figura IX - 45– Comparação das Tensões terminais (Vt)

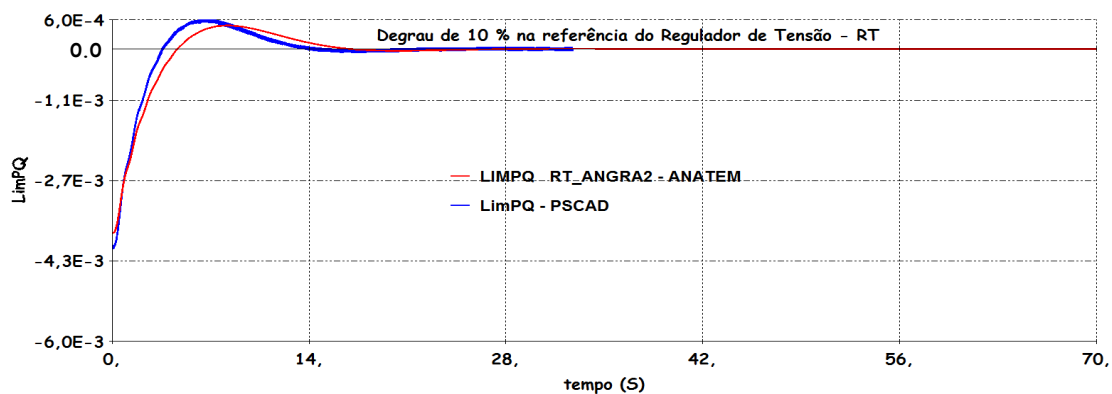


Figura IX - 46– Comparação das Corrente de campo (I_{fd})

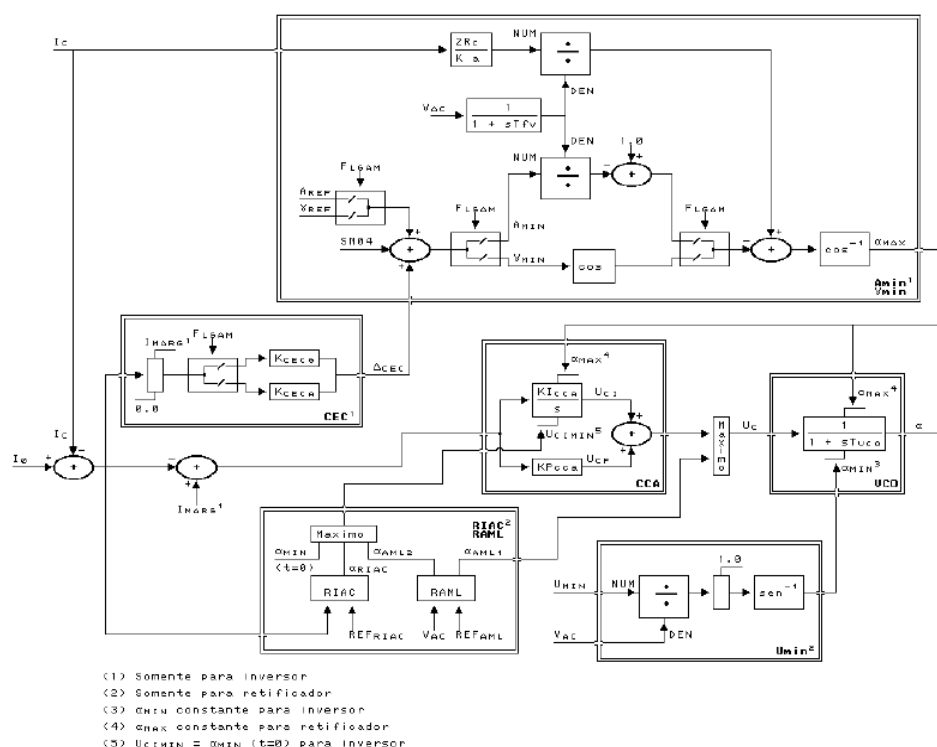


Figura X.2 – Diagrama de bloco esquemático do CCA, VCO, CEC e controle de Umin e Amin/GAMamin no ANATEM.

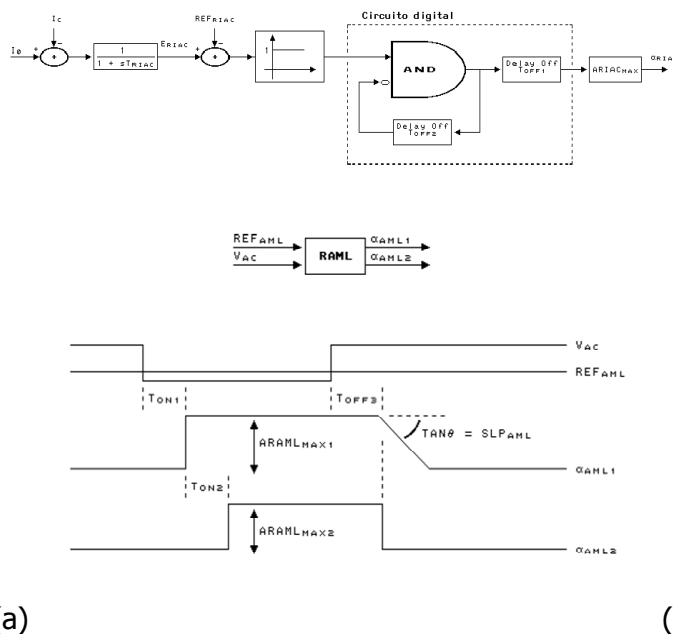


Figura X.3 – (a) Diagrama de blocos RIAC (Rectifier Integrator Alpha Clamp) e (b) descrição esquemática do comportamento do bloco RAML (Rectifier Alpha Minimum Limiter)

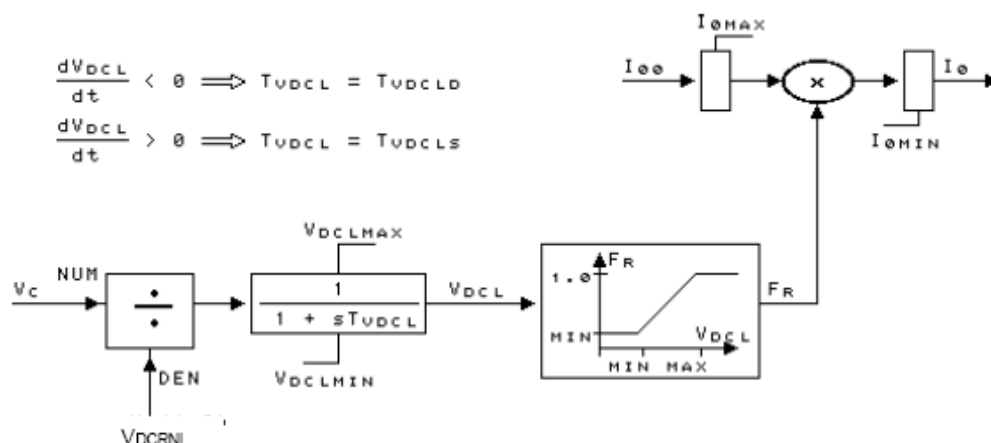


Figura X.4 – Diagrama de blocos VDCOL (Voltage Dependent Current Order Limiter)

São necessários 4 conjuntos de registros no modelo built-in CCAT apresentados na tabela a seguir.

Tabela X.1 – Comparação dos parâmetros do primeiro, segundo e terceiro conjunto de registro do modelo built-in com os valores utilizados no PSCAD do elo CCAT (retificador).

Primeiro Registro		Congelamento do sinal de tensão				Sobrecarga (STOL)				Alfa Max	
ANATEM	Vmin (pu)	Ttp (s)	Tx1 (s)	Td1 (s)	Yal (%)	Tmx (s)	Amax	Gmx	StMx (%)		
	0,45	1,00	10,00	10,00	33,00	0,80	3,00	0,05	50,00		
PSCAD	UdMinLim (pu)	P1TC	Nota (4)	<< 10 seg	SS Overload (Potência)	Delay (s)	SS Overload (Corrente)		STOL		Alfa Max S2p1_Udio (s)
	0,90	0,20			1,33	5,00	1,36		1,52		0,030

Segundo Registro		VDCOL							Ganhos CCA		Vco
ANATEM	TVd (s)	TVs (s)	Vdh (%)	Vdx (%)	Fmin	Imin (%)	Imax (%)	Img (%)	Ki	Kp	Tvco (s)
	0,01	0,05	15,00	70,00	30,00	10,00	1,50	Ver Anarede (10)	6000,00	90,00	0,0014
PSCAD	Tdh (s)	Tup (s)	UdLow (pu)	UdHigh (pu)	IOMin (pu)	IO ABS Min (pu)	IO ABS Max (pu)	Imargin (pu)	Int. Gain	Prop. Gain	Nota (1)
	0,01	0,07	0,15	0,70	0,40	0,10	2,00	0,1 - 0,2	6000,00	70,00	

Terceiro Registro		RIAC				RAML						
ANATEM	Tri (s)	Lri (%)	Tof1 (s)	Tof2 (s)	Ariac	Laml (%)	Ton1 (s)	Ton2 (s)	Tof3 (s)	Saml (graus/ms)	Am11 (Graus)	Am12 (Graus)
	300,00	2,00	0,30	5,00	15,00	89,00	300,00	0,02	0,05	1,25	32,50	27,00
PSCAD	Nota (7)					DEL_Udio (%)	Nota (5) (s)	Não se aplica		Nota (6)	REC AMAX (Graus)	REC AMAX (Graus)
						93,0 (8) e 89,0 (9)	0,004 (8) e 0,002 (9)	0,000	0,015 (8) e 0,070 (9)	0,250 (8) e 0,303 (9)	15,0	15,0

Quarto Registro			VDCOL	Telecom	L
ANATEM	VdMin (pu)	THDm (s)	TVDh (s)	Telc	L
	0,975	0,013	0,25	0,05 Nota (3)	
PSCAD	Bipole Control (pu)	Bipole control (2)	Não se aplica	Nota (2)	
	0,900	0,015	0,000	0,015	

Nota 1 - Bloco inexistente no PSCAD

Nota 2 - Valor dentro do bloco "Delay" e*(-sT)

Nota 3 - Constante de Tempo (Anatem) e tempo de telecom (PSCAD)

Nota 4 - Taxa (pu de Vdc/seg) PSCAD - Down1 - S1P1DN

Nota 5 - Tempo que leva depois da queda de tensão (de 5 para 15 graus)

Nota 6 - Valor medido do tempo que leva a tensão AC no retificador para subir (proporcional)

Nota 7 - O RIAC está dentro do CCA com outra metodologia de cálculo. Manter desabilitado no ANATEM

Nota 8 - Valores obtidos na simulação de CC Trifásico

Nota 9 - Valores obtidos na simulação de CC Monofásico

Tabela X.2 – Parâmetros do primeiro conjunto de registro do modelo built-in do elo CCAT no ANATEM do inversor.

CCAT HO ANATEM DO INVERSON													
Primeiro Registro	Congelamento do sinal de tensão				Sobrecarga (STOL)								
ANATEM	Vmin (pu)	Tvp (s)	Tx1 (s)	Td1 (s)	Yal (%)	Tmx (s)	Amax	Gmx	StMx (%)	Flag	Tfv (s)		
	0,45	1,00	10,00	10,00	33,00	0,80	3,00	0,05	50,00	Área mínima	0,02		
PSCAD	UdMinLim (pu)	P1TC	Nota (4)	<< 10 seg	SS Overload (Potência)	Delay (s)	SS Overload (Corrente)		STOL		Alfa Max S2p1_Udio (s)		
	0,90	0,20			1,33	5,00	1,36		1,50		0,030		
Segundo Registro	VDCOL								Ganhos CCA		Vco		
ANATEM	TVd (s)	TVs (s)	Vdn (%)	Vdx (%)	Fmin (%)	Imin (%)	Imax (%)	Img (%)	Ki	Kp	Tvco (s)	Kcecg nota (11)	Kceca
	0,01	0,05	15,00	70,00	30,00	10,00	1,50	10 (Ver Anarede) (10)	6000,00	90,00	0,0014	25,00	51,00
PSCAD	Tdn (s)	Tup (s)	UdLow (pu)	UdHigh (pu)	IoMin (pu)	Io ABS Min (pu)	Io ABS Max (pu)	Imargin (pu)	Int. Gain	Prop. Gain	Nota (1)		
	0,01	0,07	0,15	0,70	0,40	0,10	2,00	0,1 - 0,2	6000,00	70,00			
Terceiro Registro	RIAC					RAVL							
ANATEM	Tri (s)	Lri (%)	Tof1 (s)	Tof2 (s)	Ariac	Laml (%)	Ton1 (s)	Ton2 (s)	Tof3 (s)	Sam1 (graus/ms)	Aml1 (Graus)	Aml2 (Graus)	
	300,00	2,00	0,30	5,00	15,00	Nota (10)							
PSCAD	Nota (7)					DEL_Udio	Nota (5)	Não se aplica		Nota (6)	REC AMAX	REC AMAX	
						Nota (10)							
Quarto Registro			VDCOL	Telecom	L								
ANATEM	VdMin (pu)	THDm (s)	TVDn (s)	Telc	L								
	0,975	0,013	0,25	0,05 Nota (3)									
PSCAD	Bipole Control (pu)	Bipole control (2)	Não se aplica	Nota (2)									
	0,900	0,015	0,000	0,015									

Nota 1 - Bloco inexistente no PSCAD

Nota 2 - Valor dentro do bloco "Delay" e*(-sT)

Nota 3 - Constante de Tempo (Anatem) e tempo de telecom (PSCAD)

Nota 4 - Taxa (pu de Vdc/seg) PSCAD - Down1 - S1P1DN

Nota 5 - Tempo que leva depois da queda de tensão (de 5 para 15 graus)

Nota 6 - Valor medido do tempo que leva a tensão AC no retificador para subir (proporcional)

Nota 7 - O RIAC está dentro do CCA com outra metodologia de cálculo. Manter desabilitado no ANATEM

Nota 8 - Valores obtidos na simulação de CC Trifásico

Nota 9 - Valores obtidos na simulação de CC Monofásico

Nota 10 - Não se aplica ao Inversor

Nota 11 - Manter os valores dos ganhos no ANATEM.

ANEXO XI – DESEMPENHO DINÂMICO

X.I.3 Desempenho Cenário 2L

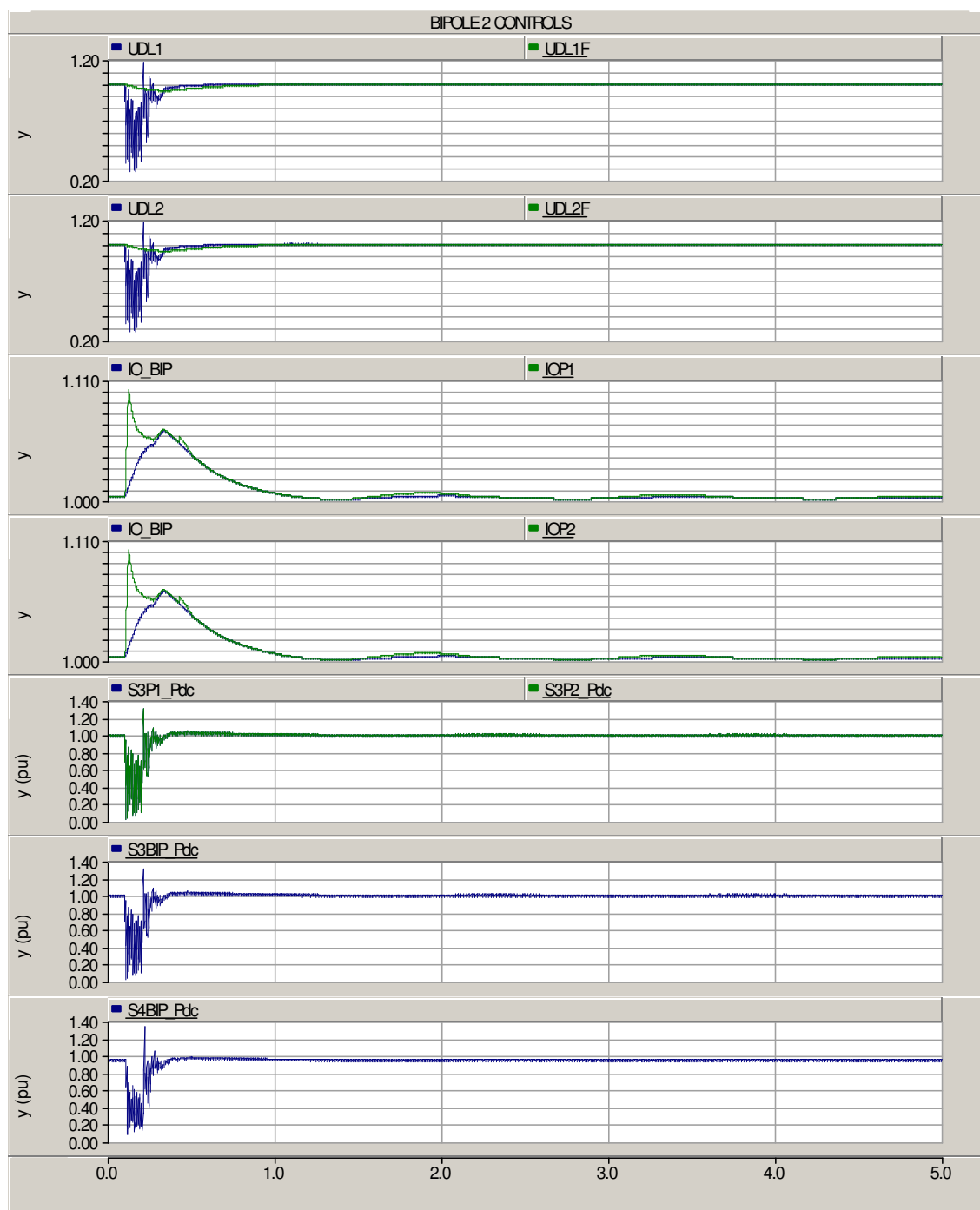


Figura XI-1 - BP2 - Falta monofásica no retificador (Xingu) com abertura da LT 500 kV Xingu-Parauapebas C1. CEN 2L.

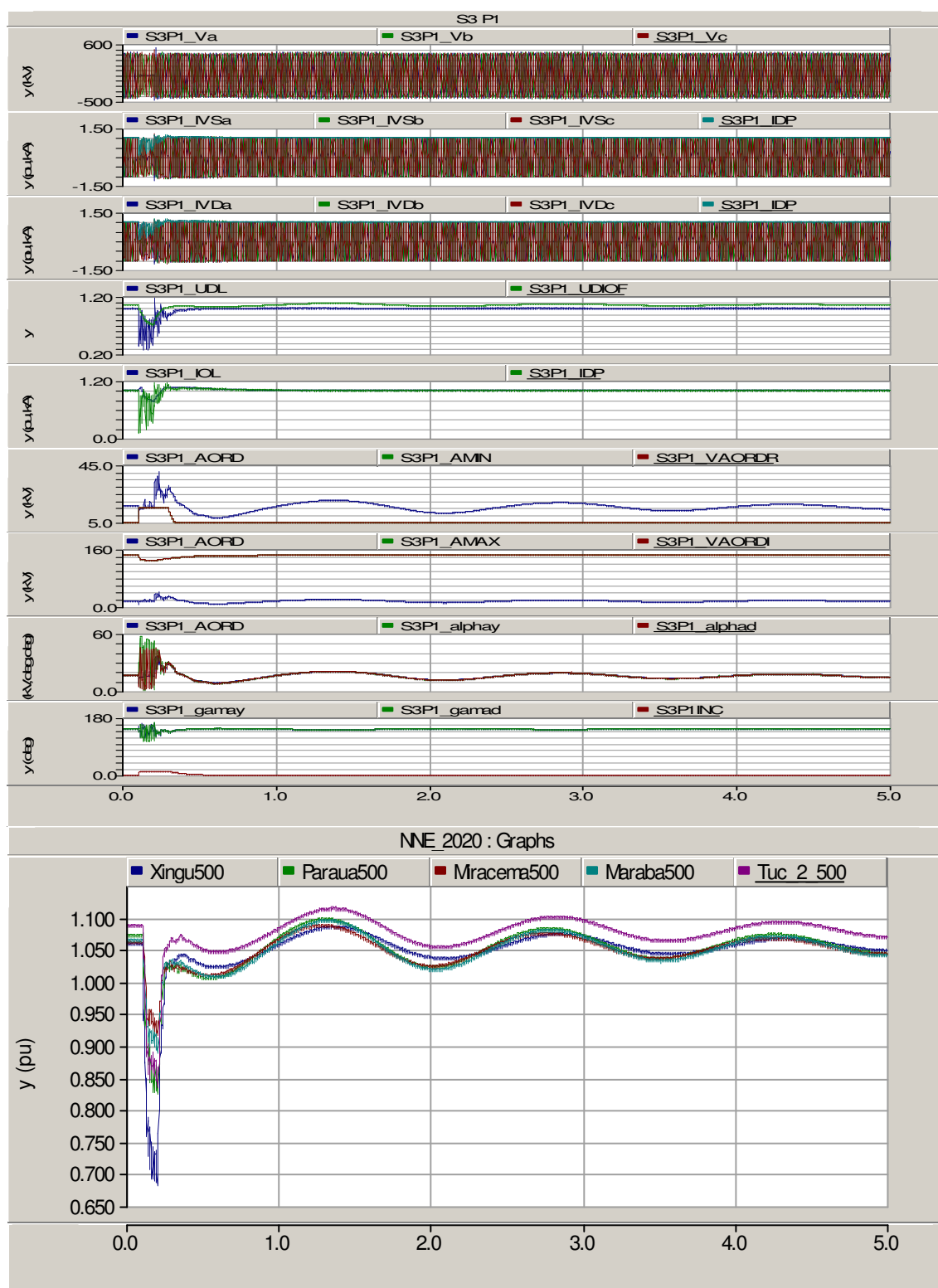


Figura XI-2 - BP2 - Falta monofásica no retificador (Xingu) com abertura da LT 500 kV Xingu-Parauapebas C1. CEN 2L.

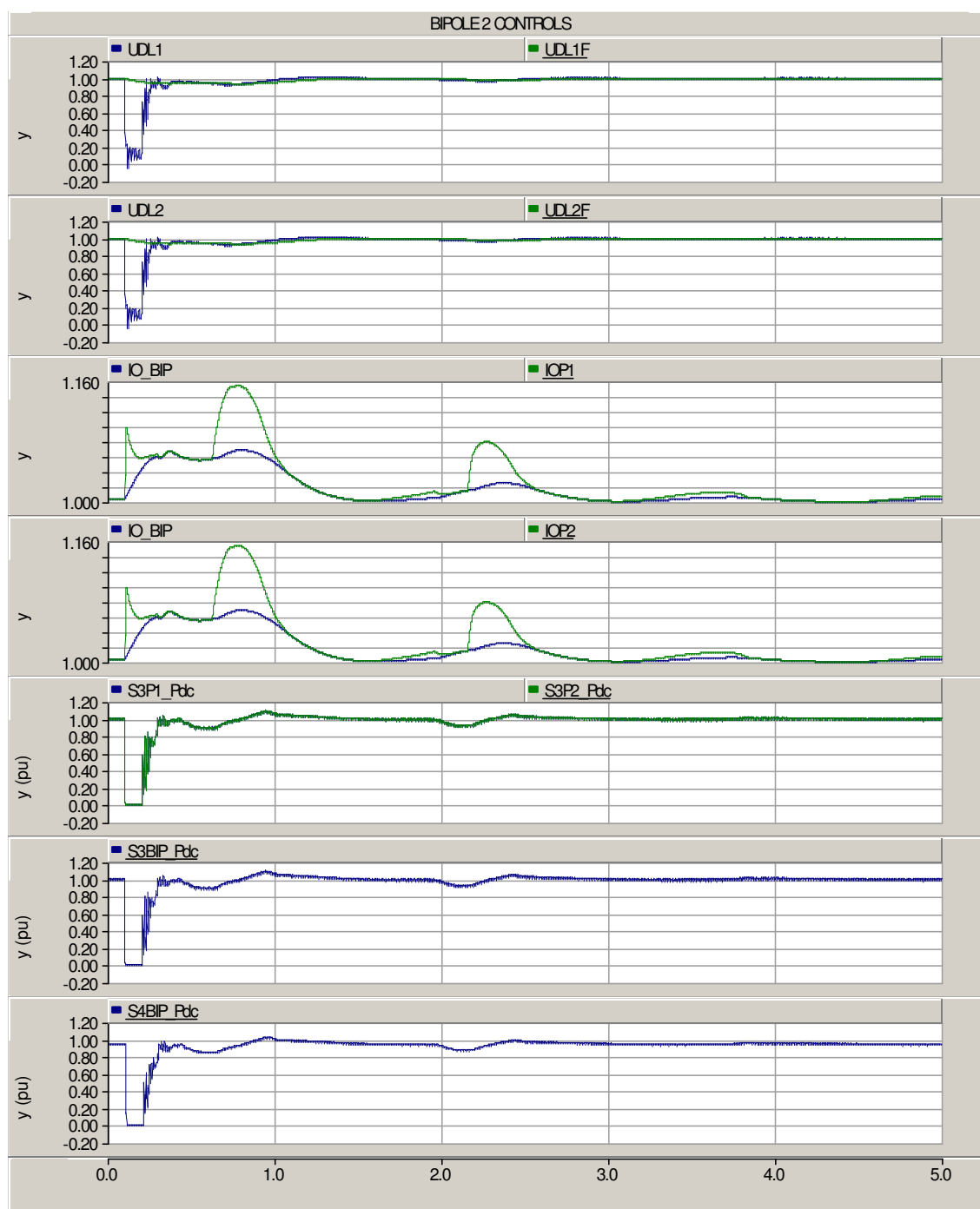


Figura XI-3 – BP2 - Falta Trifásica no retificador (Xingu), com abertura da LT 500 kV Xingu-Parauapebas C1. CEN 2L.

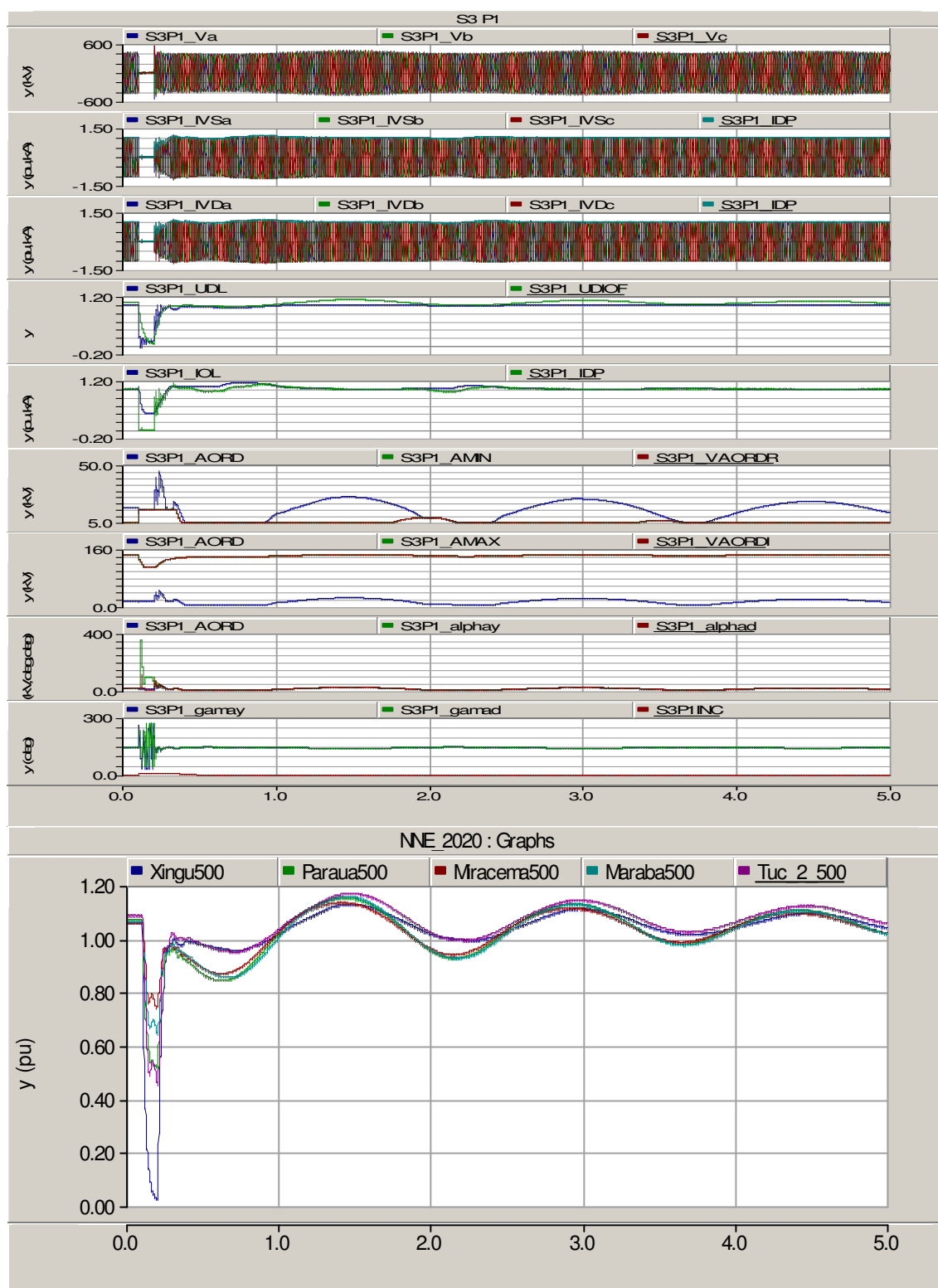


Figura XI-4 – BP2 - Falta Trifásica no retificador (Xingu), com abertura da LT 500 kV Xingu-Parauapebas C1. CEN 2L.

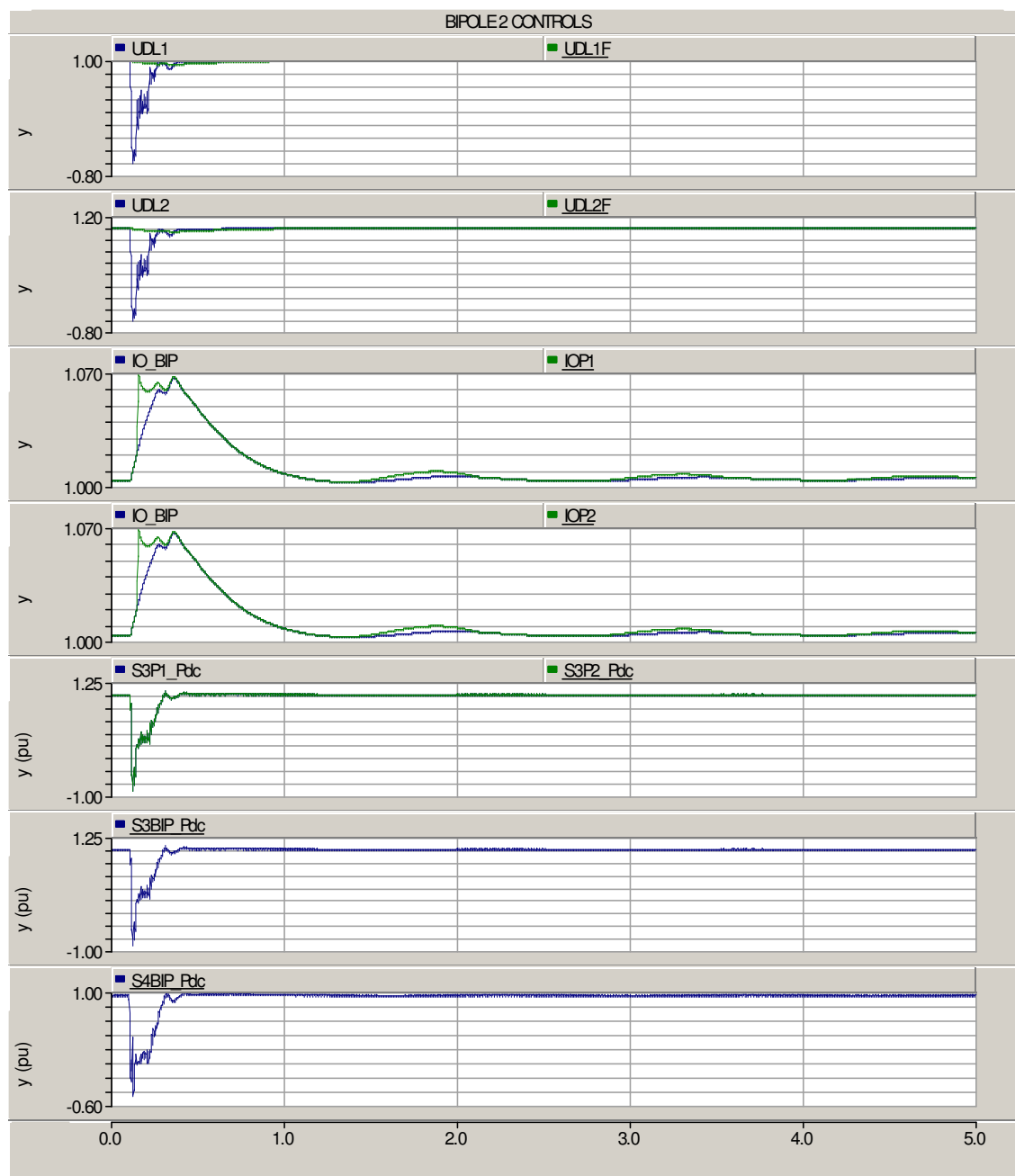


Figura XI-5– BP2 - Falta monofásica no inversor (Terminal Rio), com abertura da LT 500kV Terminal Rio – Nova Iguaçu C1. CEN 2L.

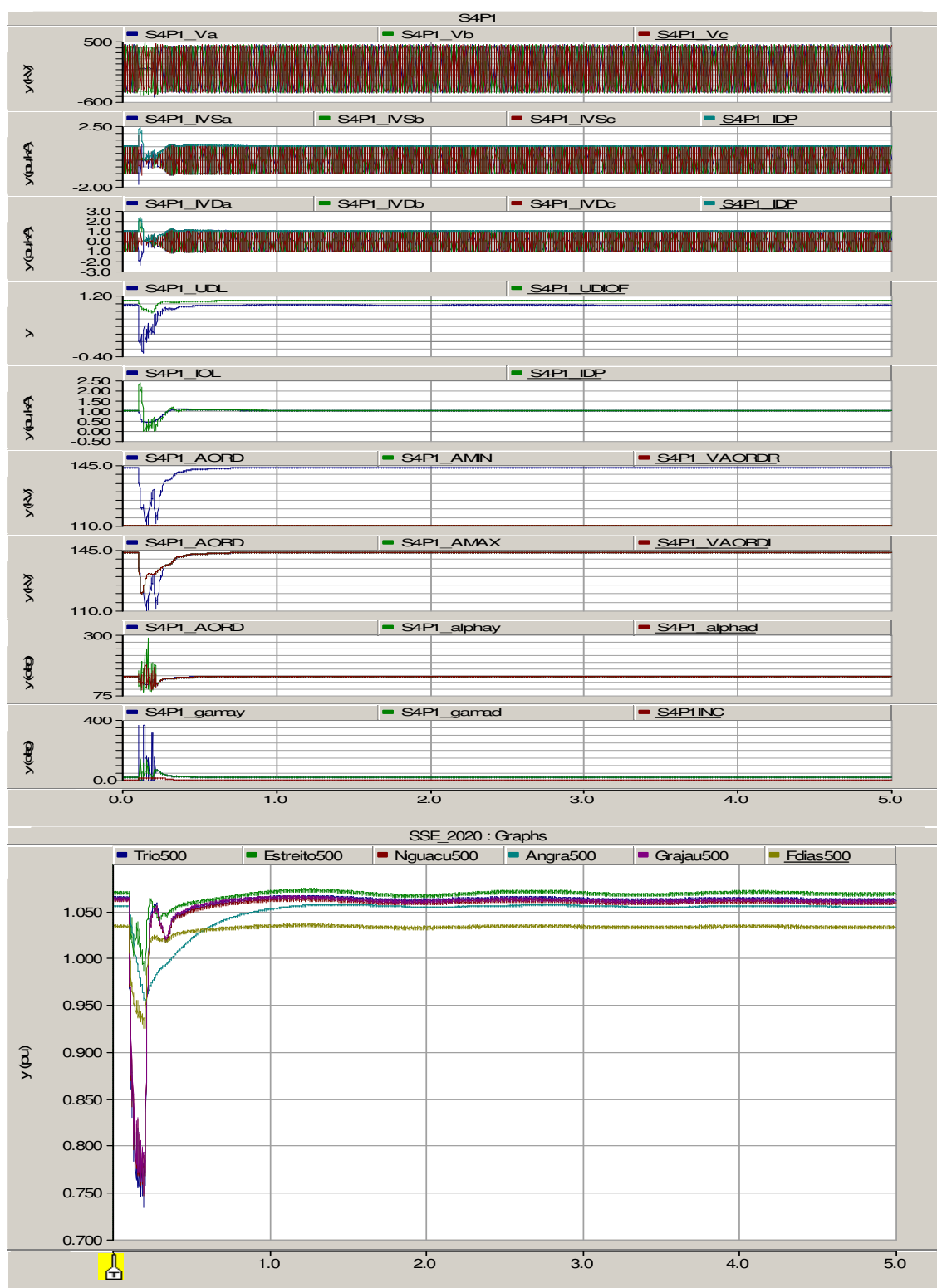


Figura XI-6– BP2 - Falta monofásica no inversor (Terminal Rio), com abertura da LT 500kV Terminal Rio – Nova Iguaçu C1. CEN 2L.

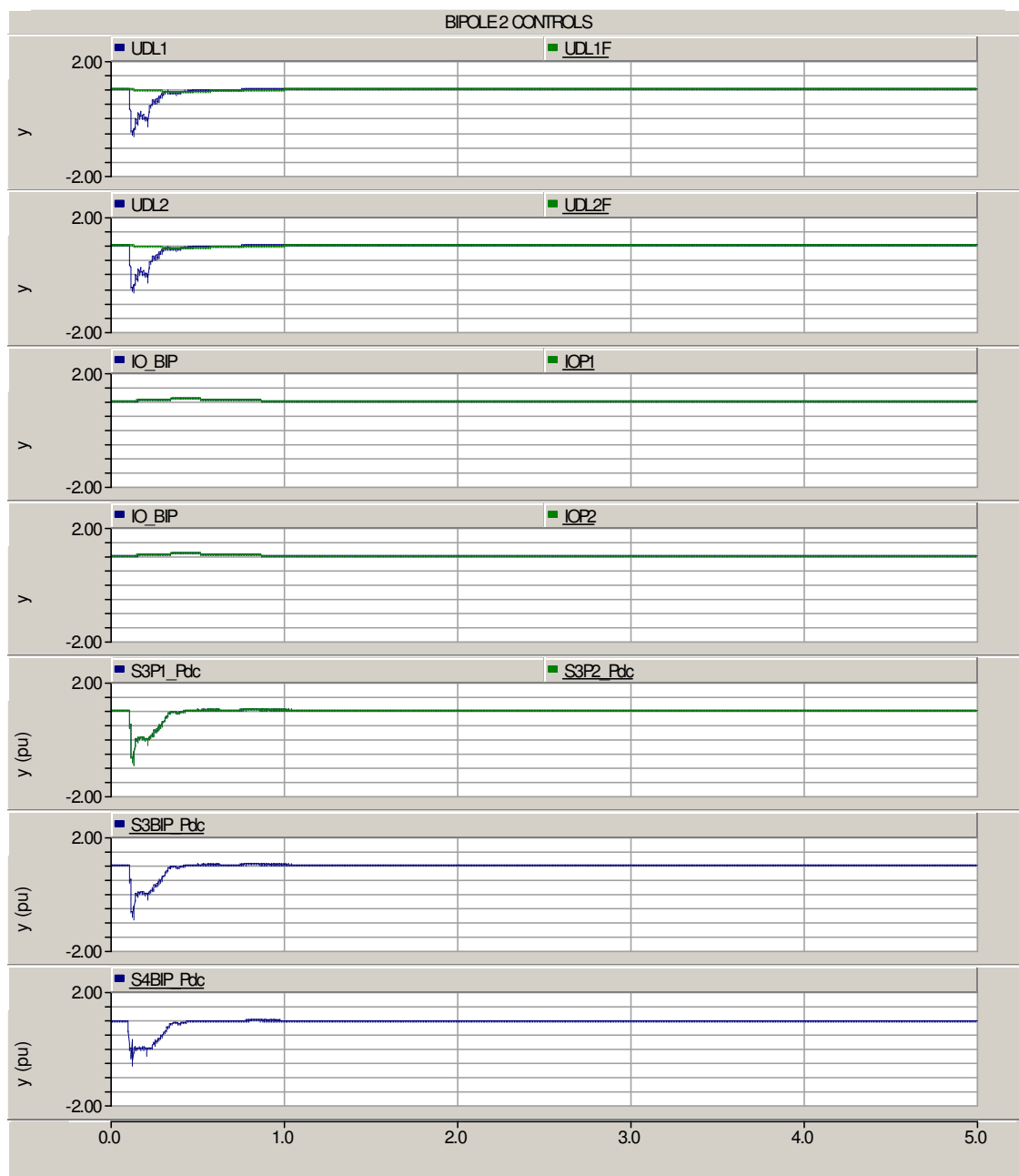


Figura XI-7– BP2 - Falta Trifásica no inversor (Terminal Rio), com abertura da LT 500kV Terminal Rio – Nova Iguaçu C1. CEN 2L.

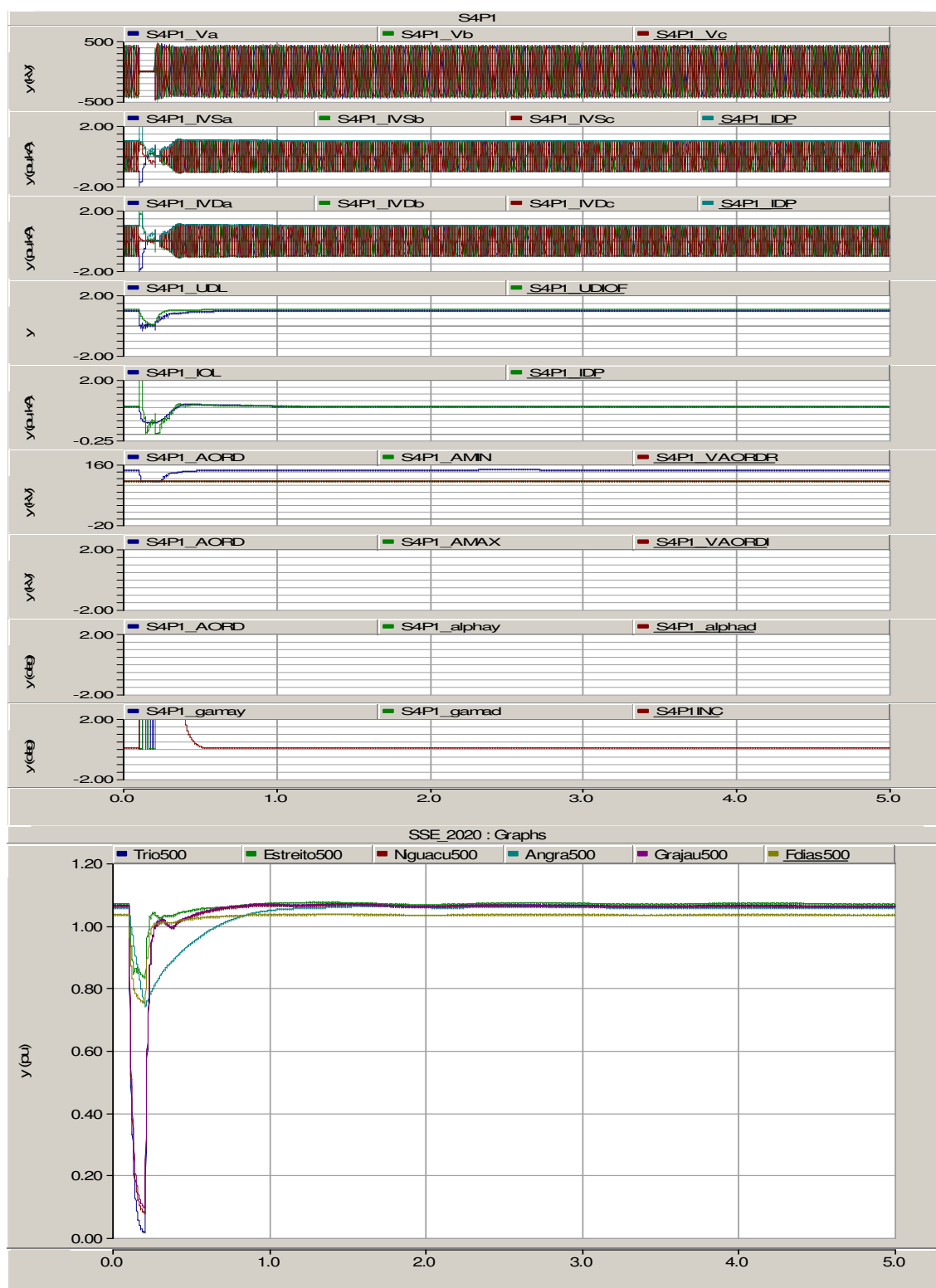


Figura XI-8– BP2 - Falta Trifásica no inversor (Terminal Rio), com abertura da LT 500kV Terminal Rio – Nova Iguaçu C1. CEN 2L.

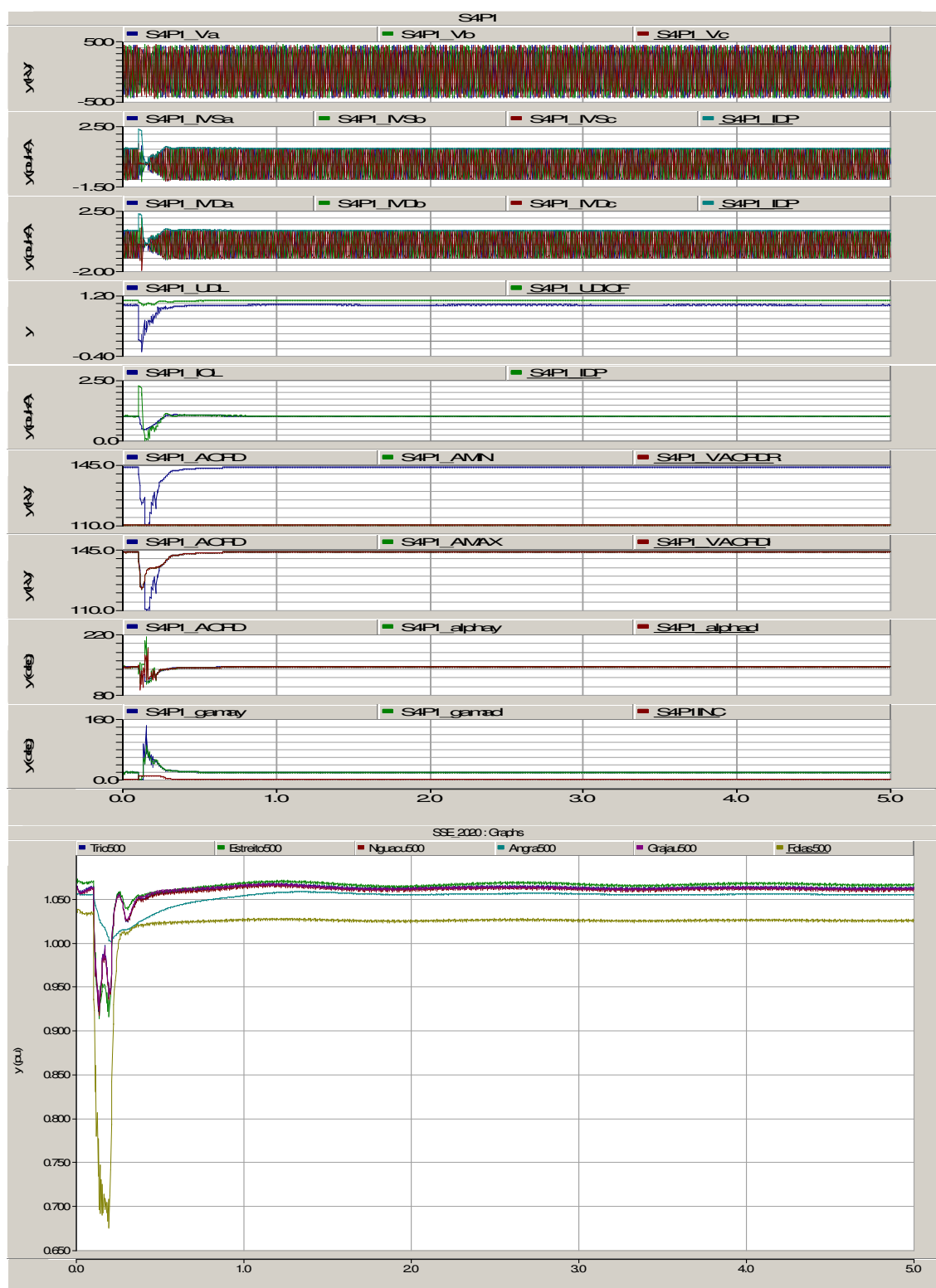


Figura XI-9 – BP2 - Falta monofásica (F. Dias), com abertura da LT 500kV Terminal Rio – Fernão Dias. CEN 2L.

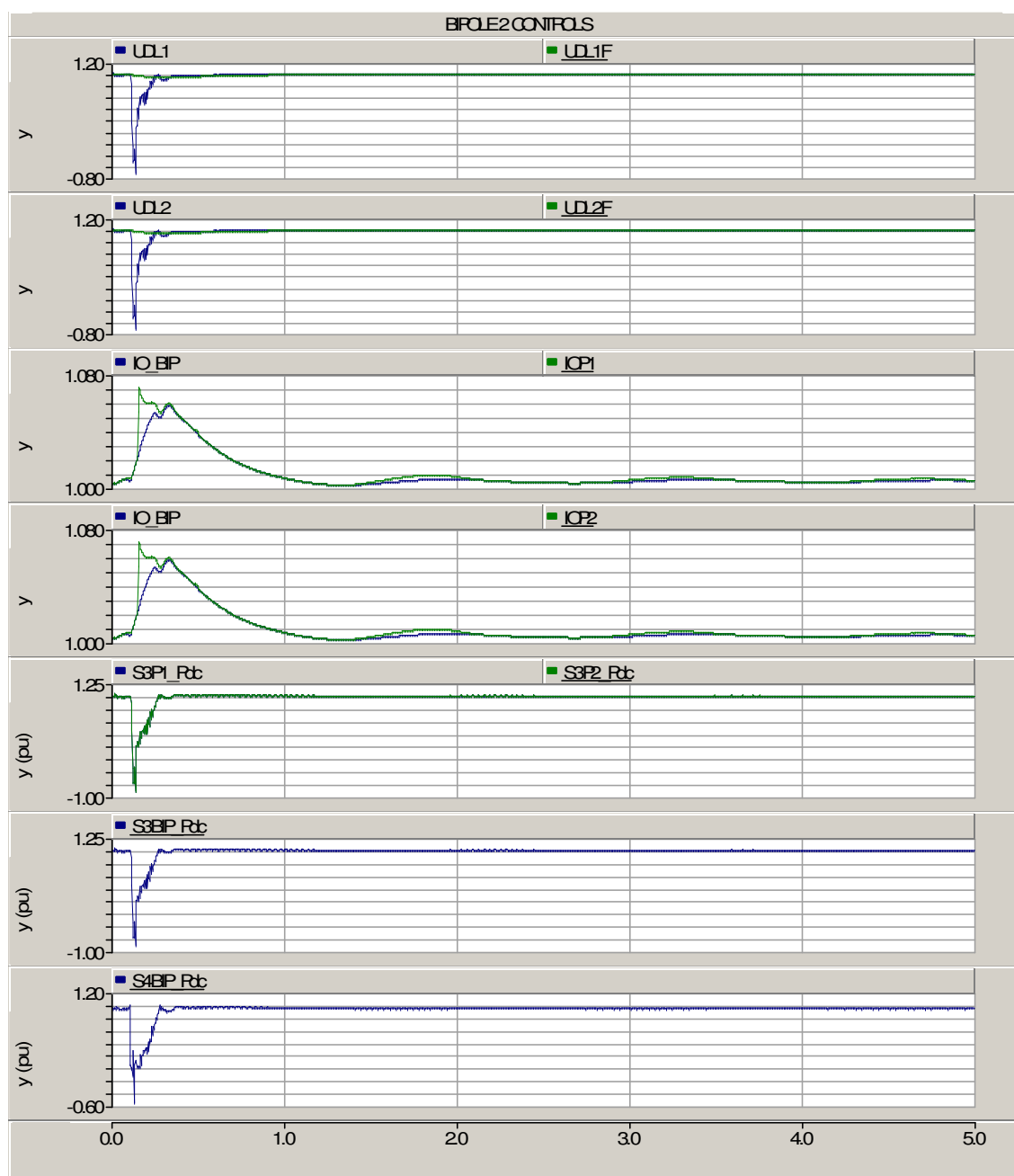


Figura XI-10 – BP2 - Falta monofásica (F. Dias), com abertura da LT 500kV Terminal Rio – Fernão Dias. CEN 2L.

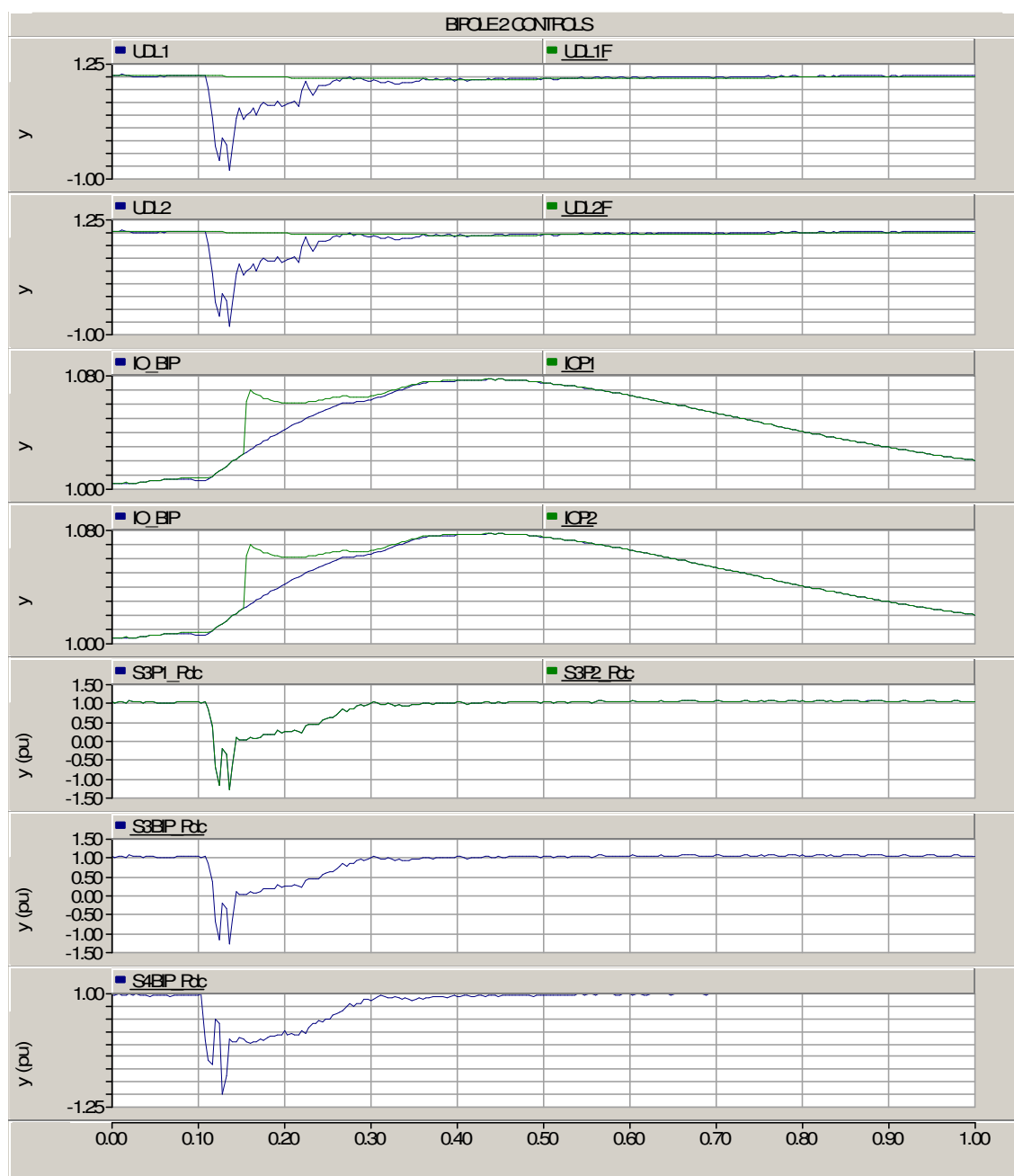


Figura XI-11 – BP2 - Falta trifásica (F. Dias), com abertura da LT 500kV Terminal Rio – Fernão Dias. CEN 2L. CEN 2L.

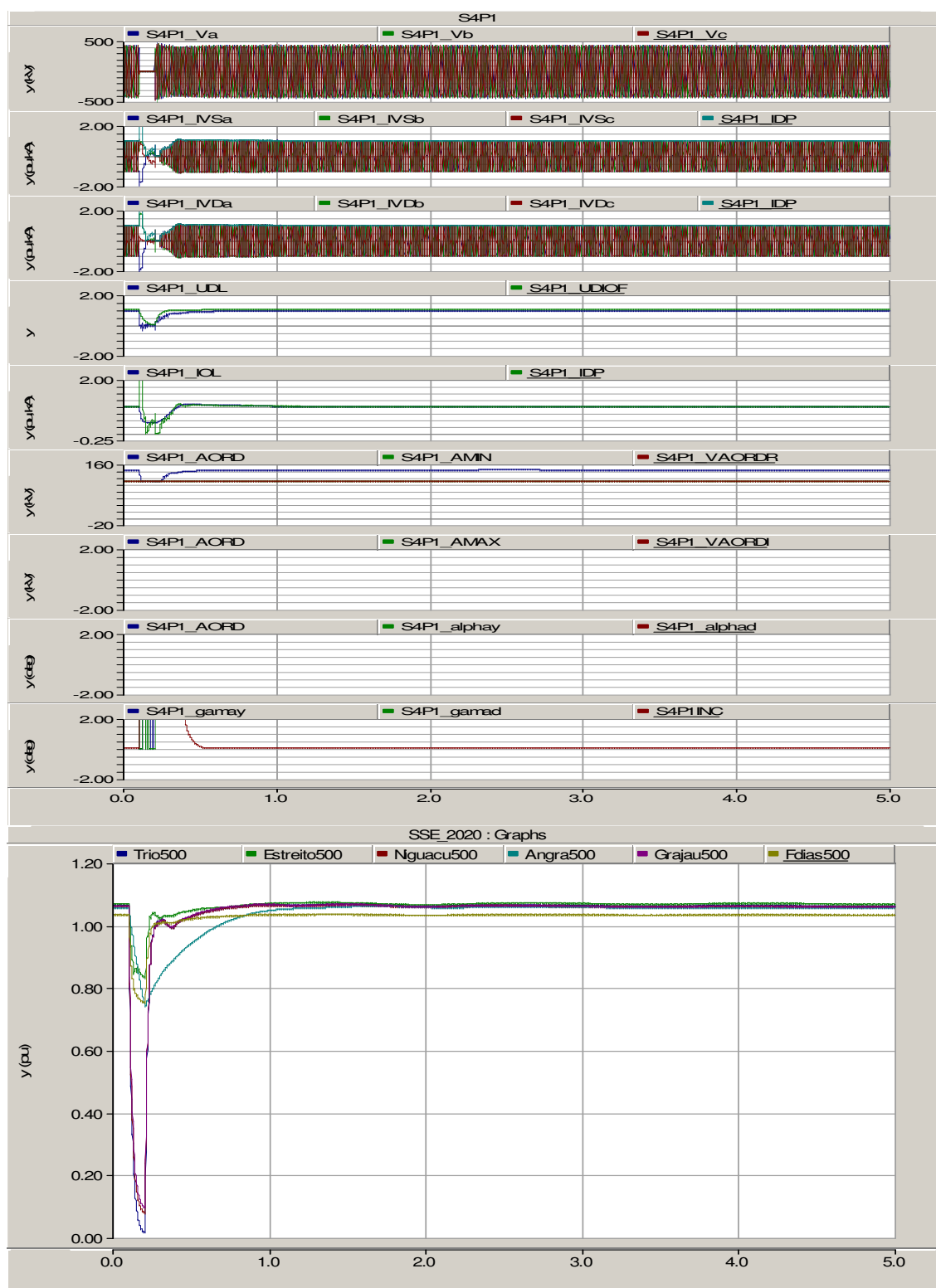


Figura XI-12 – BP2 - Falta trifásica (F. Dias), com abertura da LT 500kV Terminal Rio – Fernão Dias. CEN 2L. CEN 2L.

X.I.4 Desempenho Cenário 7P

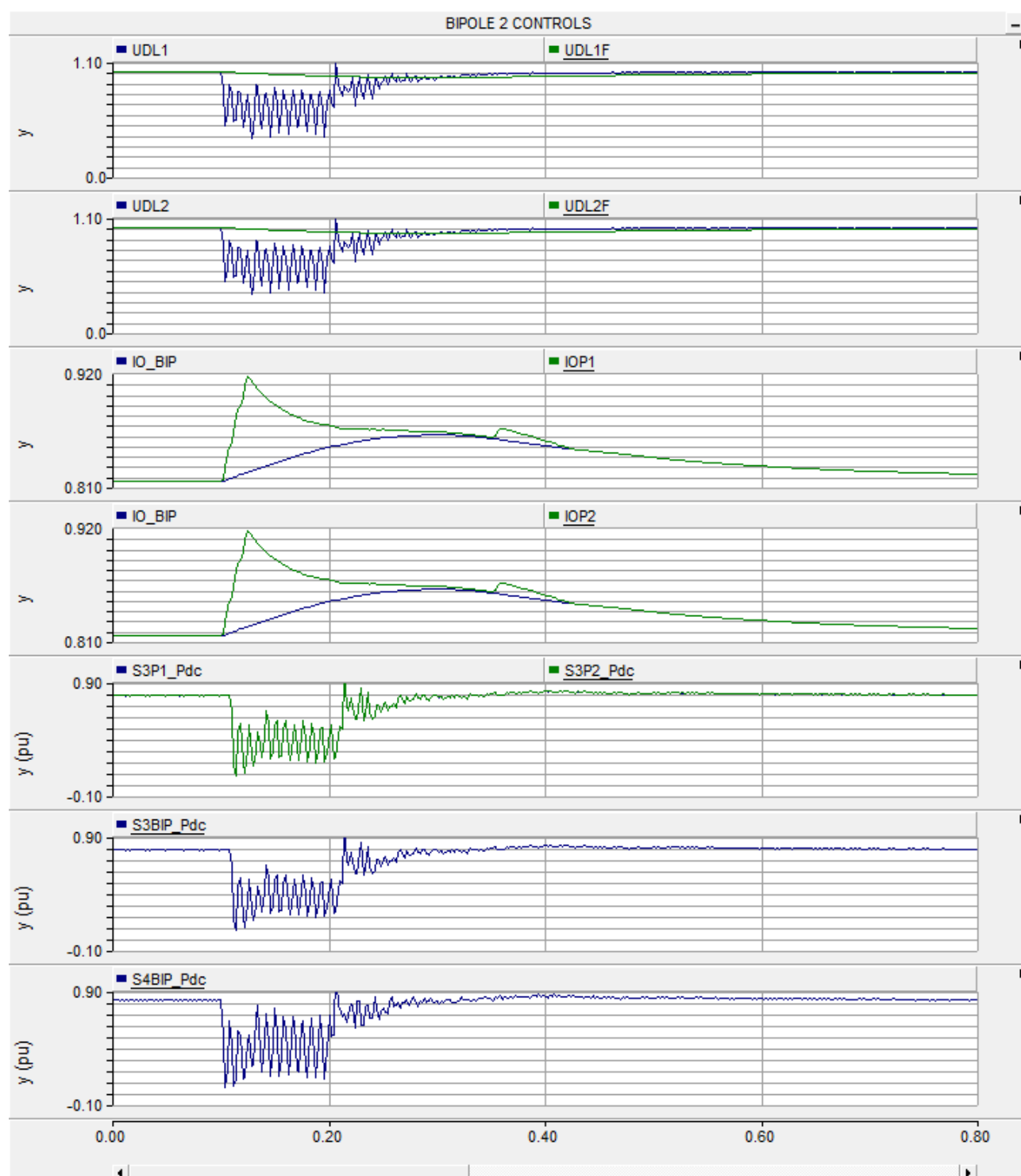


Figura XI-13 - BP2 - Falta monofásica no retificador (Terminal Rio) com abertura da LT 500 kV Terminal Rio – Fernão Dias C1. CEN 7P.

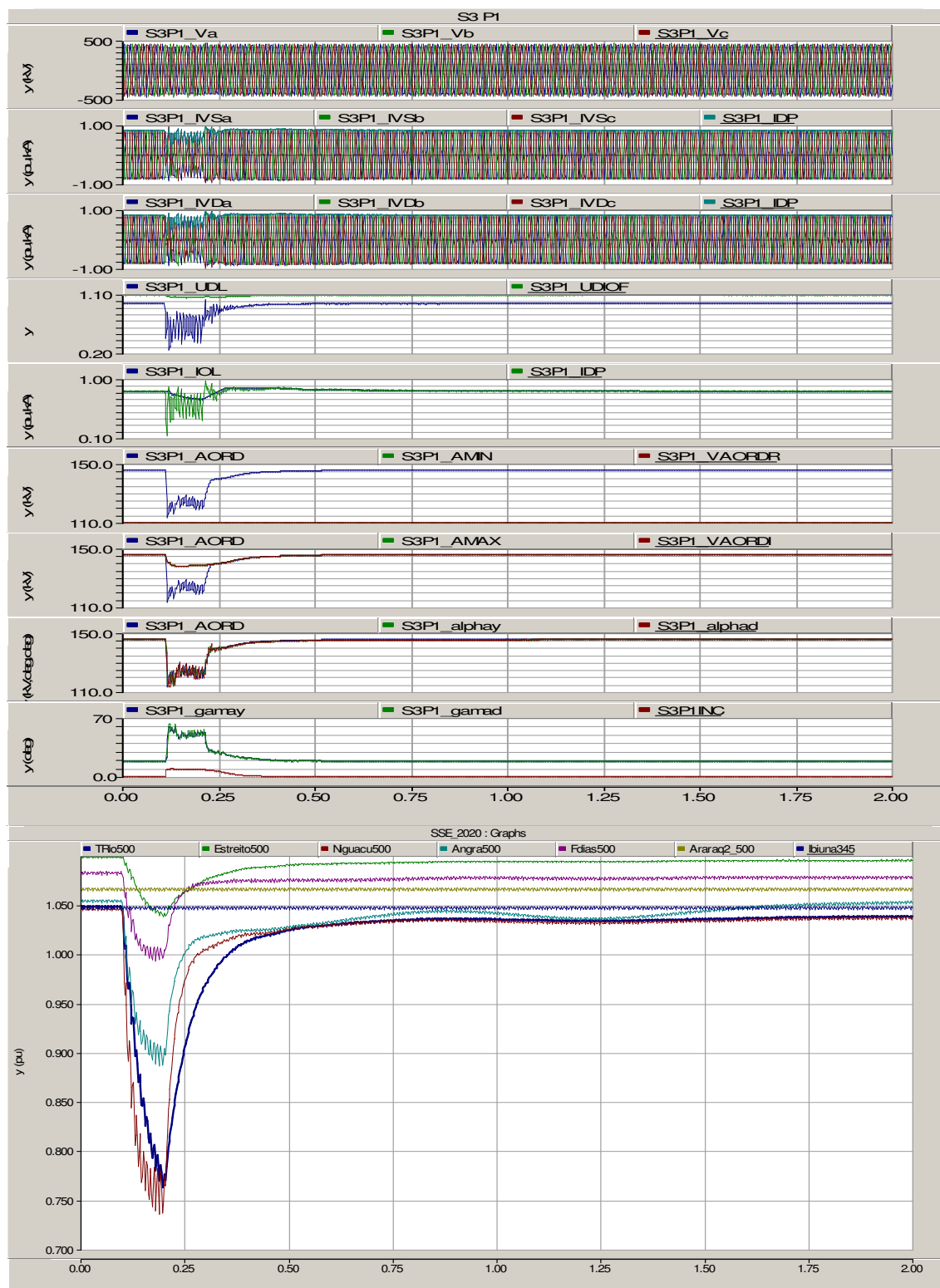


Figura XI-14 - BP2 - Falta monofásica no retificador (Terminal Rio) com abertura da LT 500 kV Terminal Rio – Fernão Dias C1. CEN 7P.

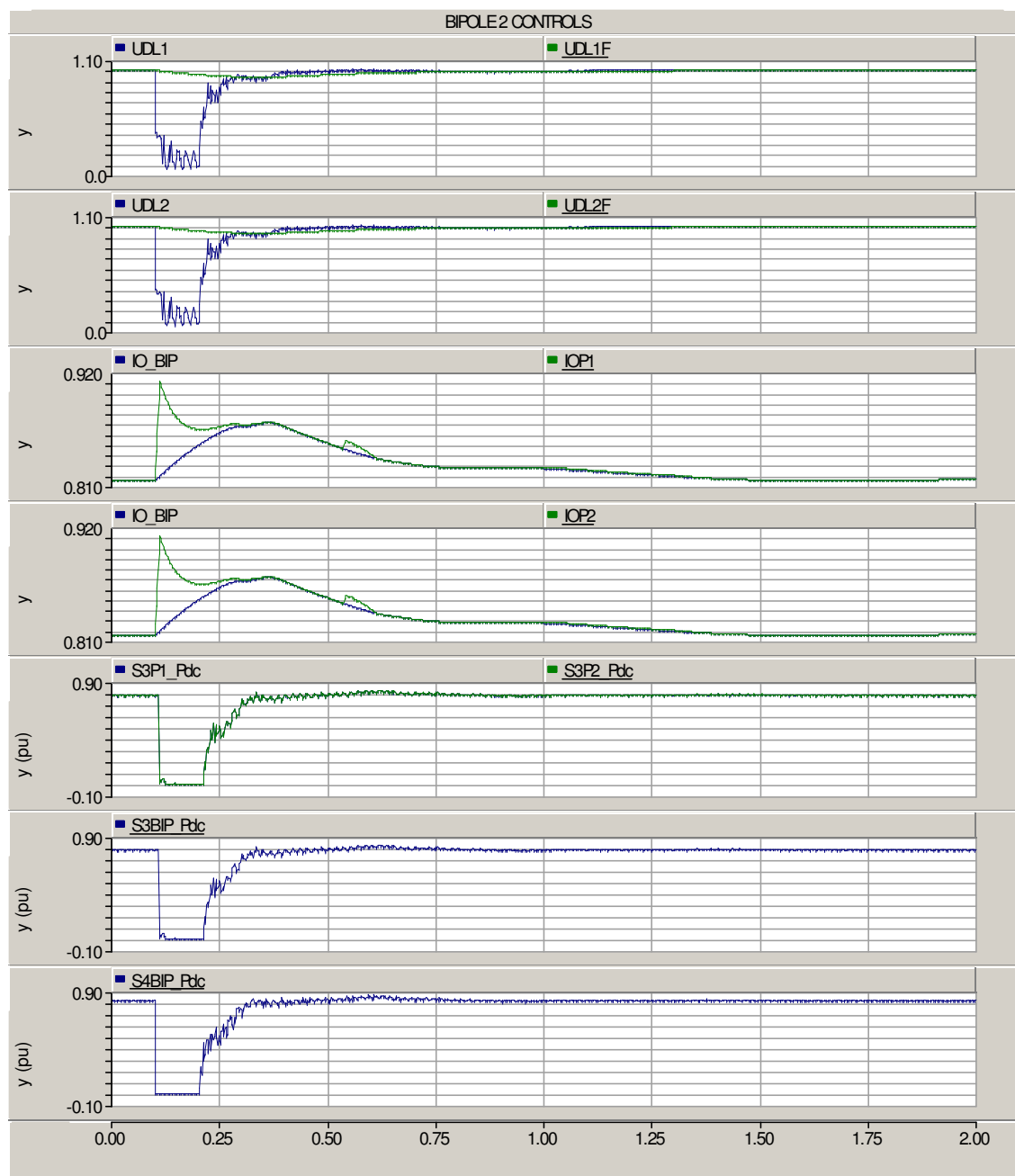


Figura XI-15 - BP2 - Falta trifásica no retificador (Terminal Rio) com abertura da LT 500 kV Terminal Rio – Fernão Dias C1. CEN 7P.

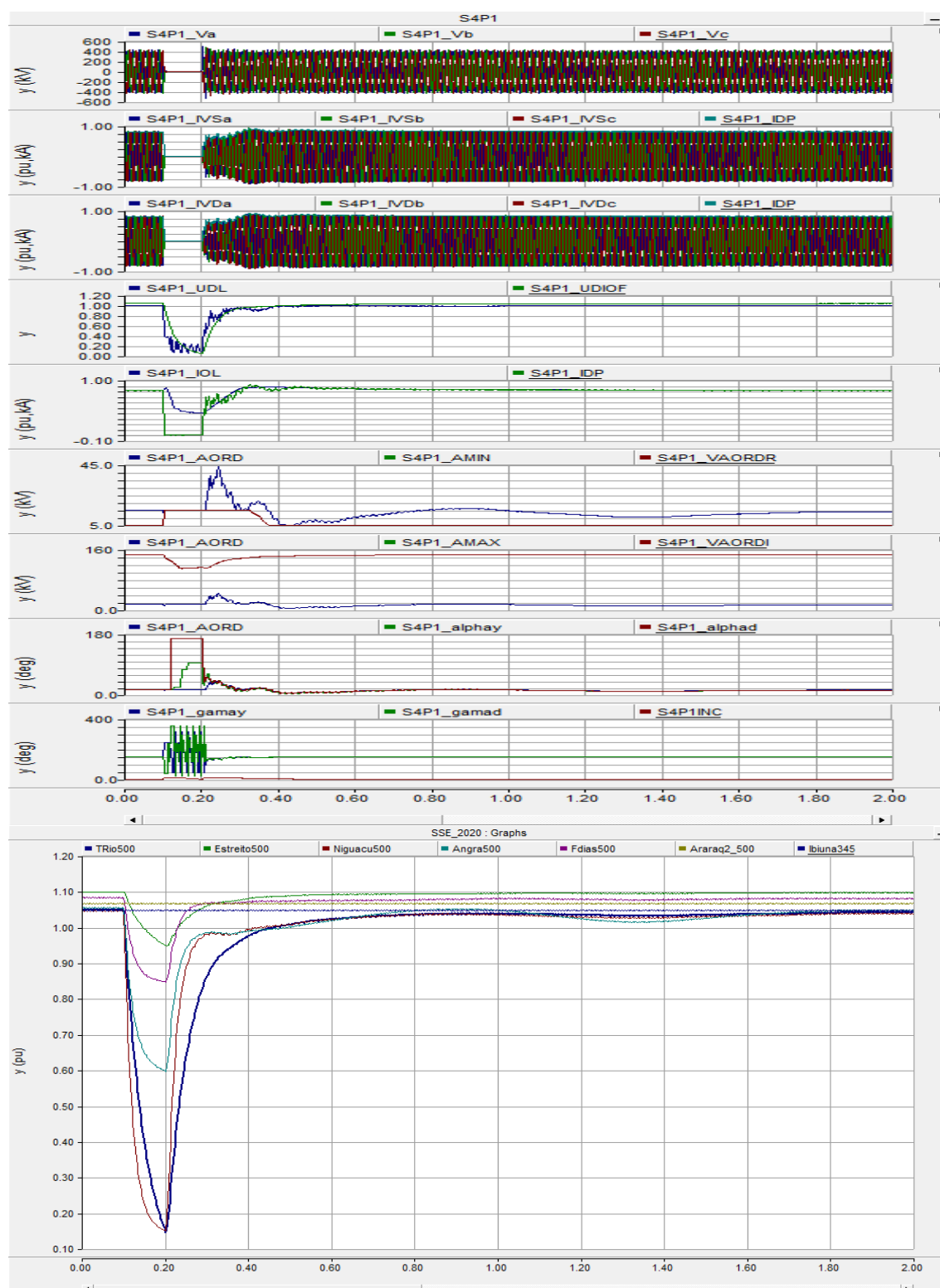


Figura XI-16 - BP2 - Falta trifásica no retificador (Terminal Rio) com abertura da LT 500 kV Terminal Rio – Fernão Dias C1. CEN 7P.

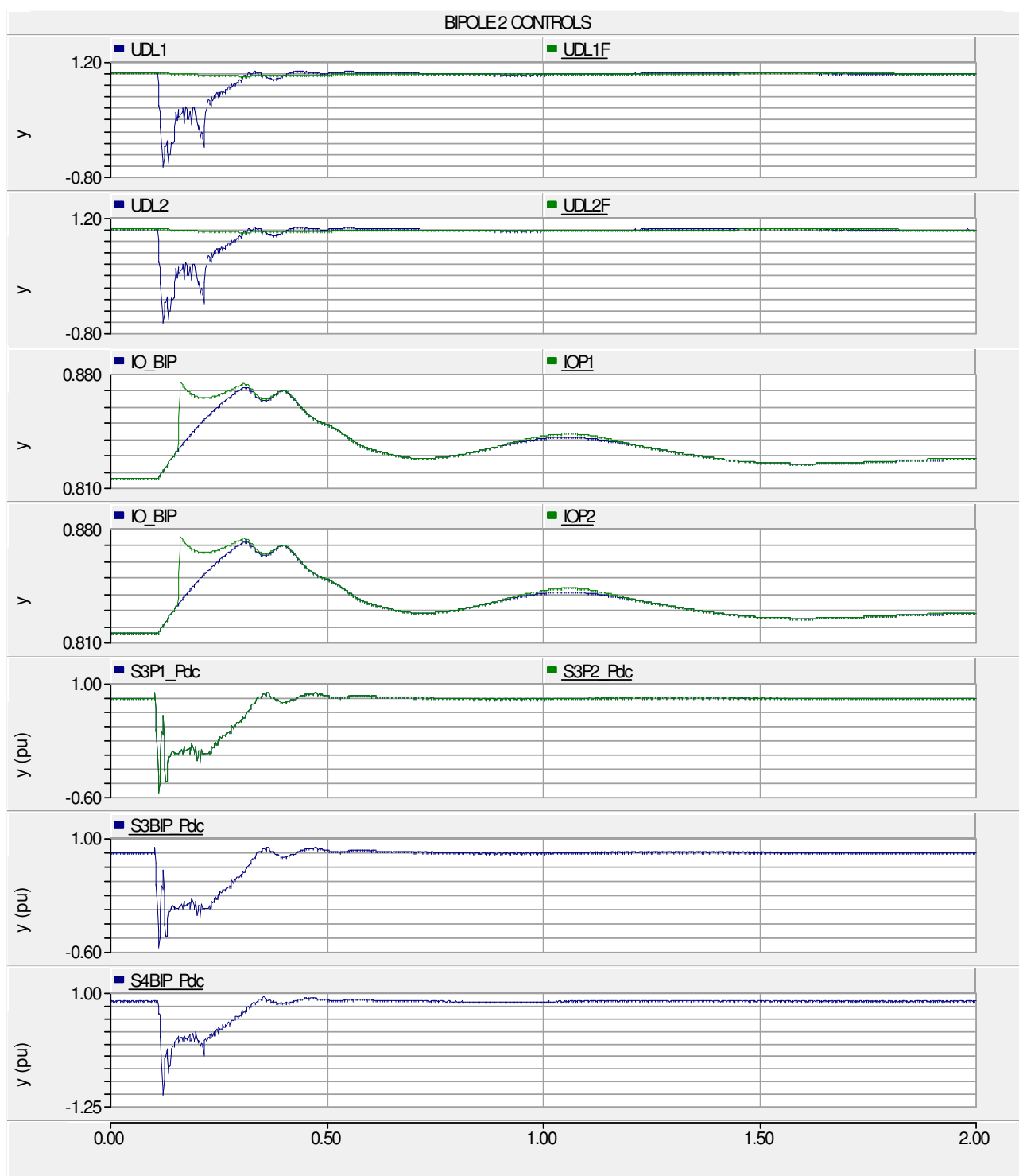


Figura XI-17 - BP2 - Falta monofásica no inversor (Xingu) com abertura da LT 500 kV Xingu-Parauapebas C1. CEN 7P.



Figura XI-18 - BP2 - Falta monofásica no inversor (Xingu) com abertura da LT 500 kV Xingu-Parauapebas C1. CEN 7P.

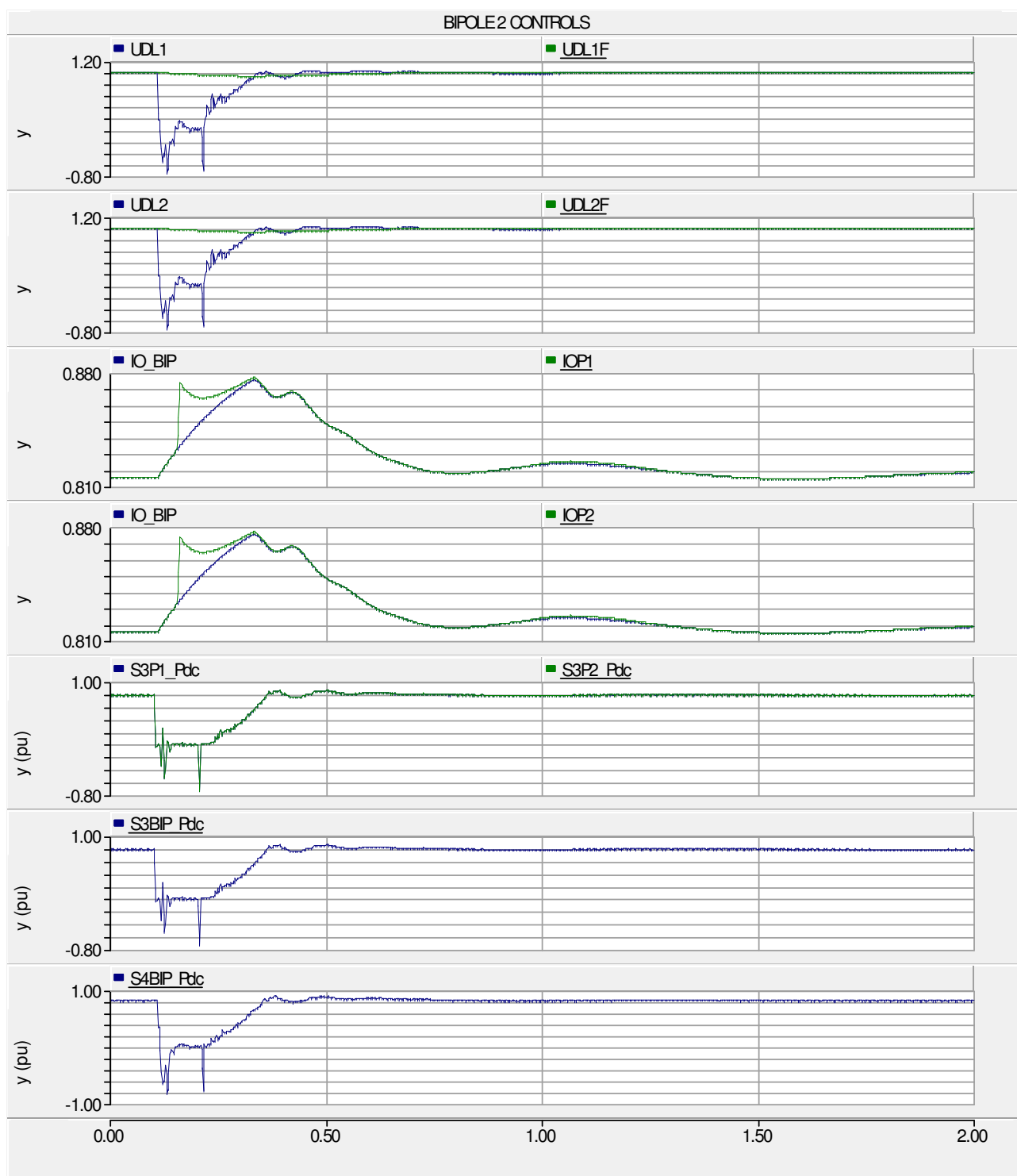


Figura XI-19 - BP2 - Falta trifásica no inversor (Xingu) com abertura da LT 500 kV Xingu-Parauapebas C1. CEN 7P.

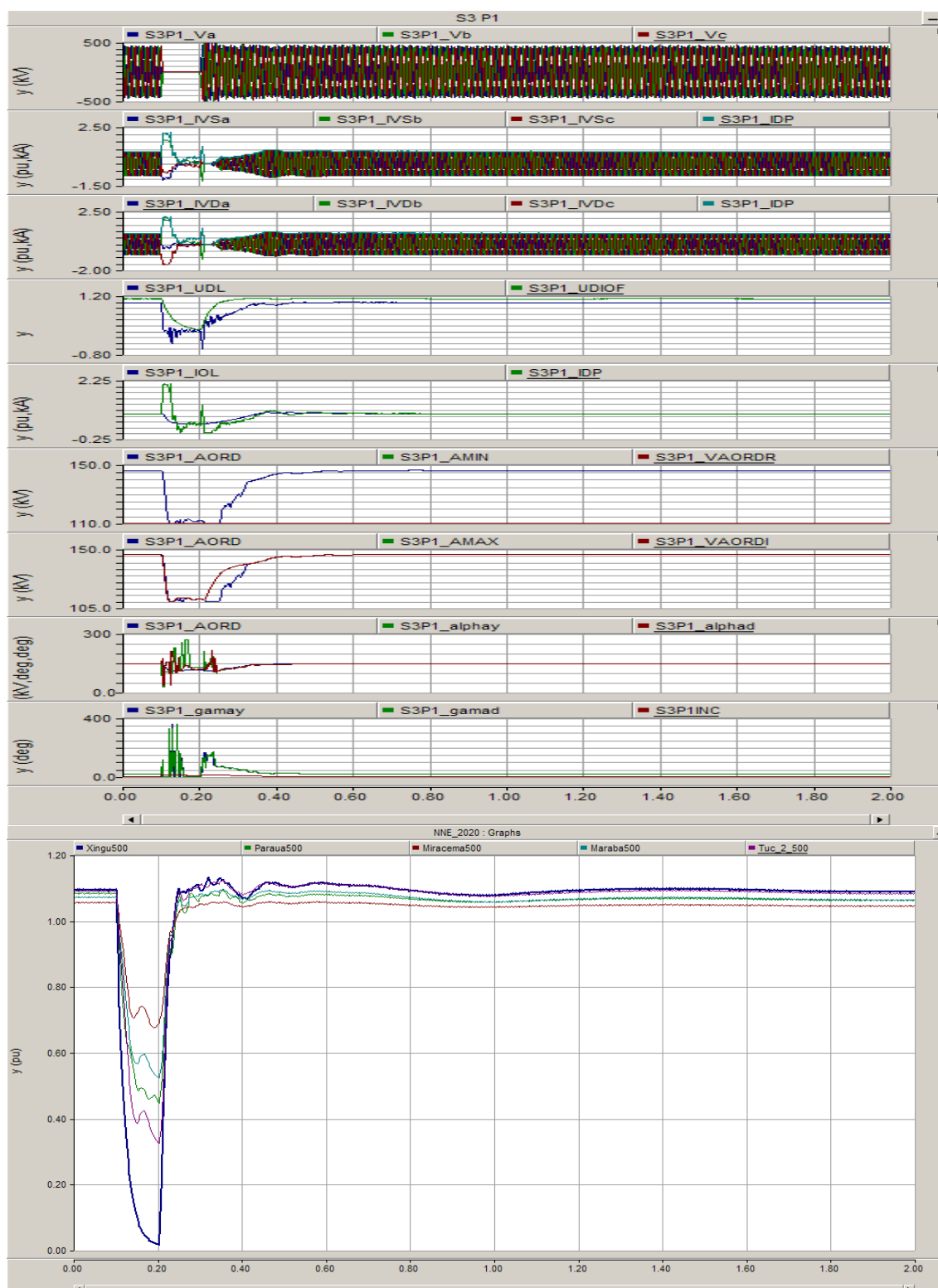


Figura XI-20 - BP2 - Falta trifásica no inversor (Xingu) com abertura da LT 500 kV Xingu-Parauapebas C1. CEN 7P.

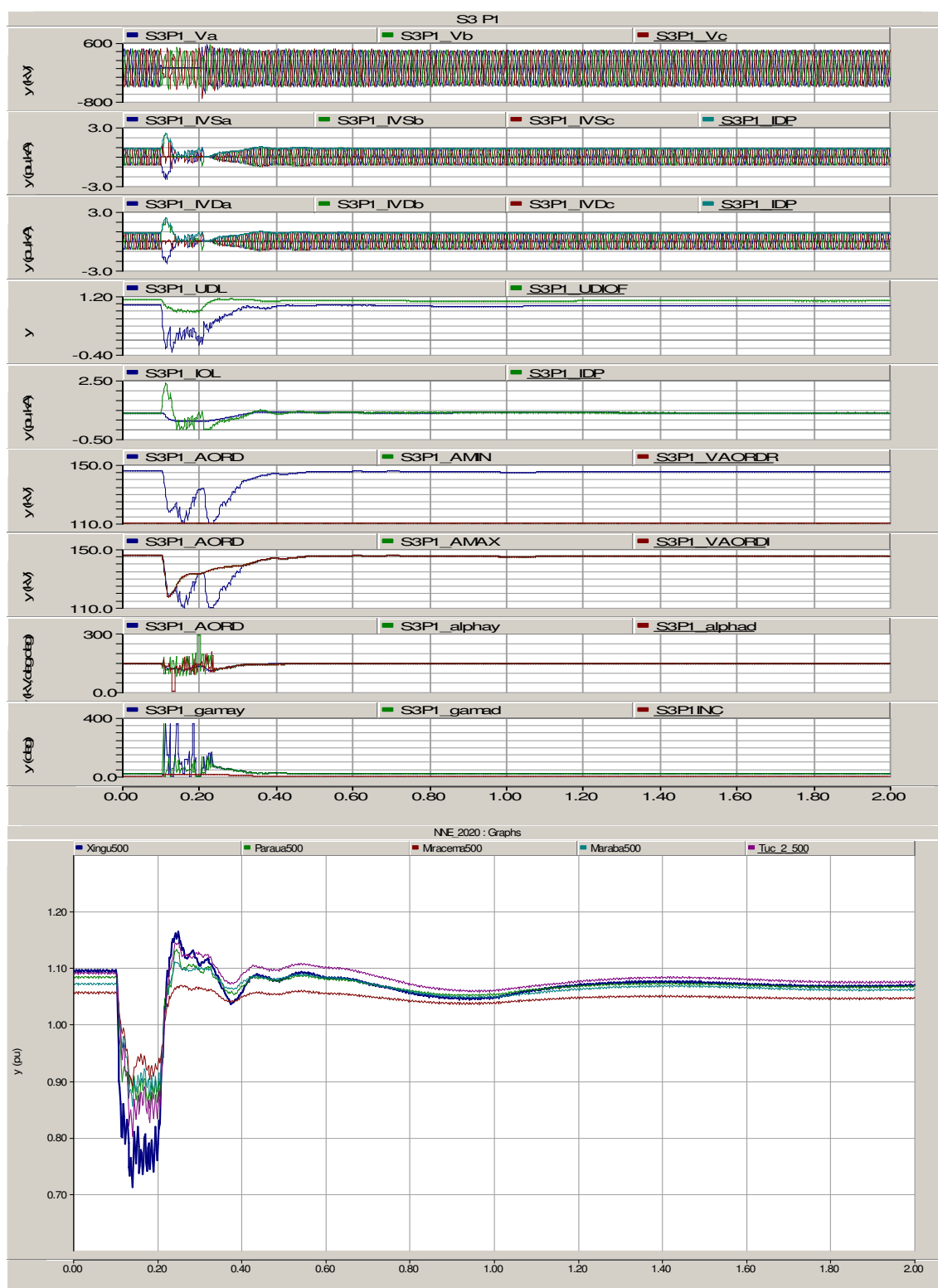


Figura XI-1 - BP2 - Falta monofásica no inversor (Xingu) com abertura da LT 500 kV Xingu – Tucuruí II C1. CEN 7P.

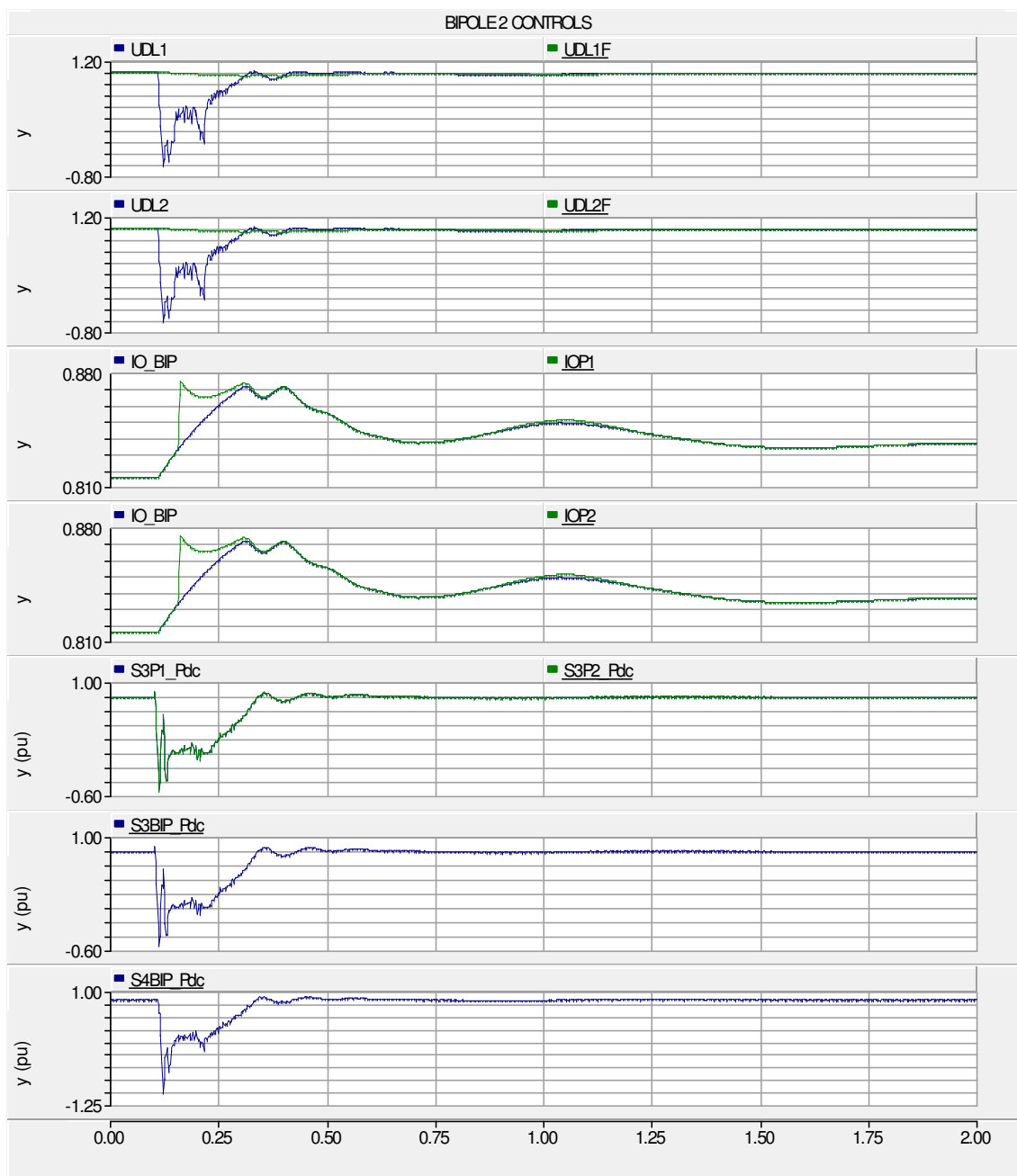


Figura XI-22 - BP2 - Falta monofásica no inversor (Xingu) com abertura da LT 500 kV Xingu – Tucuruí II C1. CEN 7P.

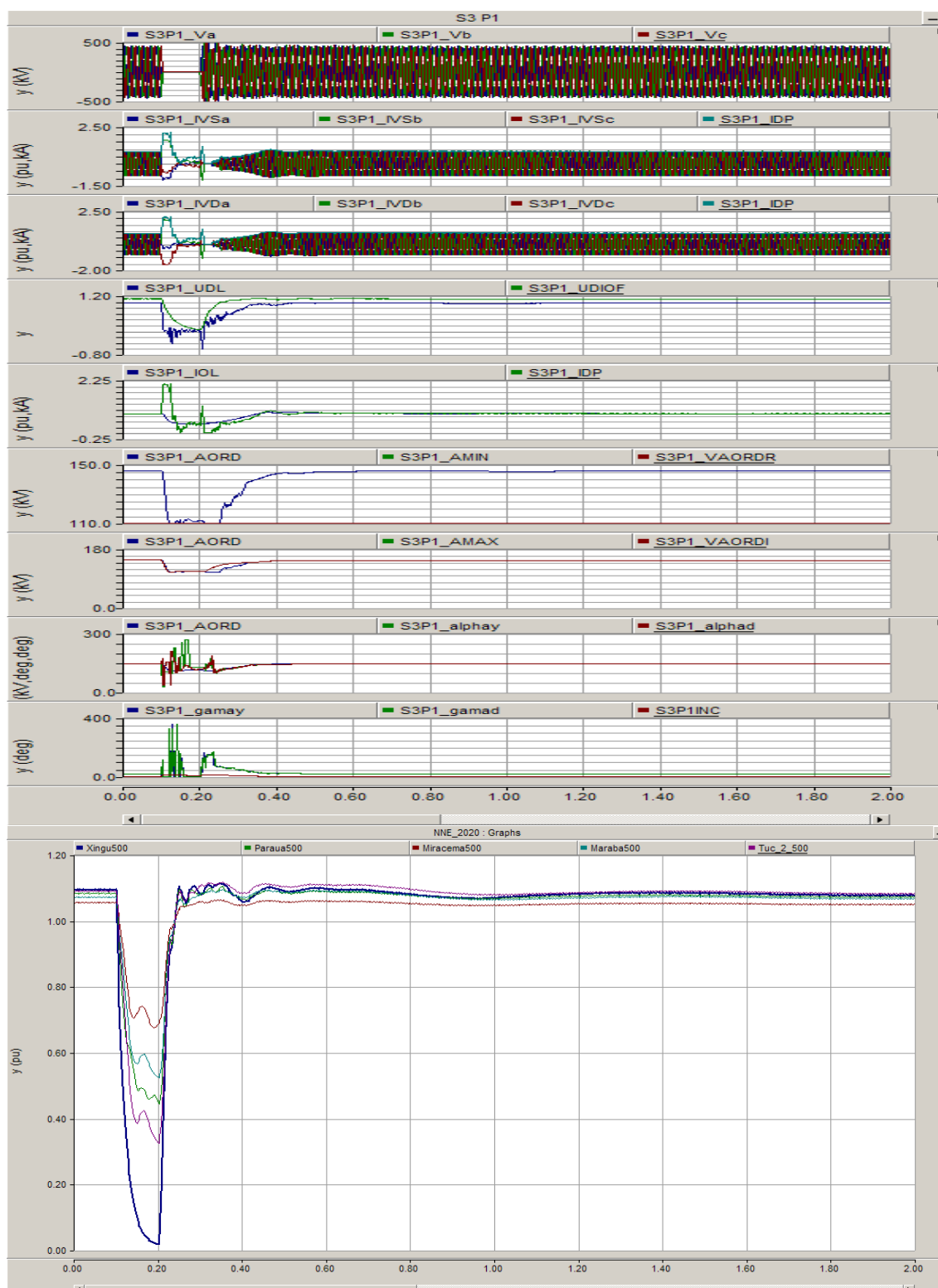


Figura XI-23 - BP2 - Falta trifásica no inversor (Xingu) com abertura da LT 500 kV Xingu – Tucuruí II C1. CEN 7P.

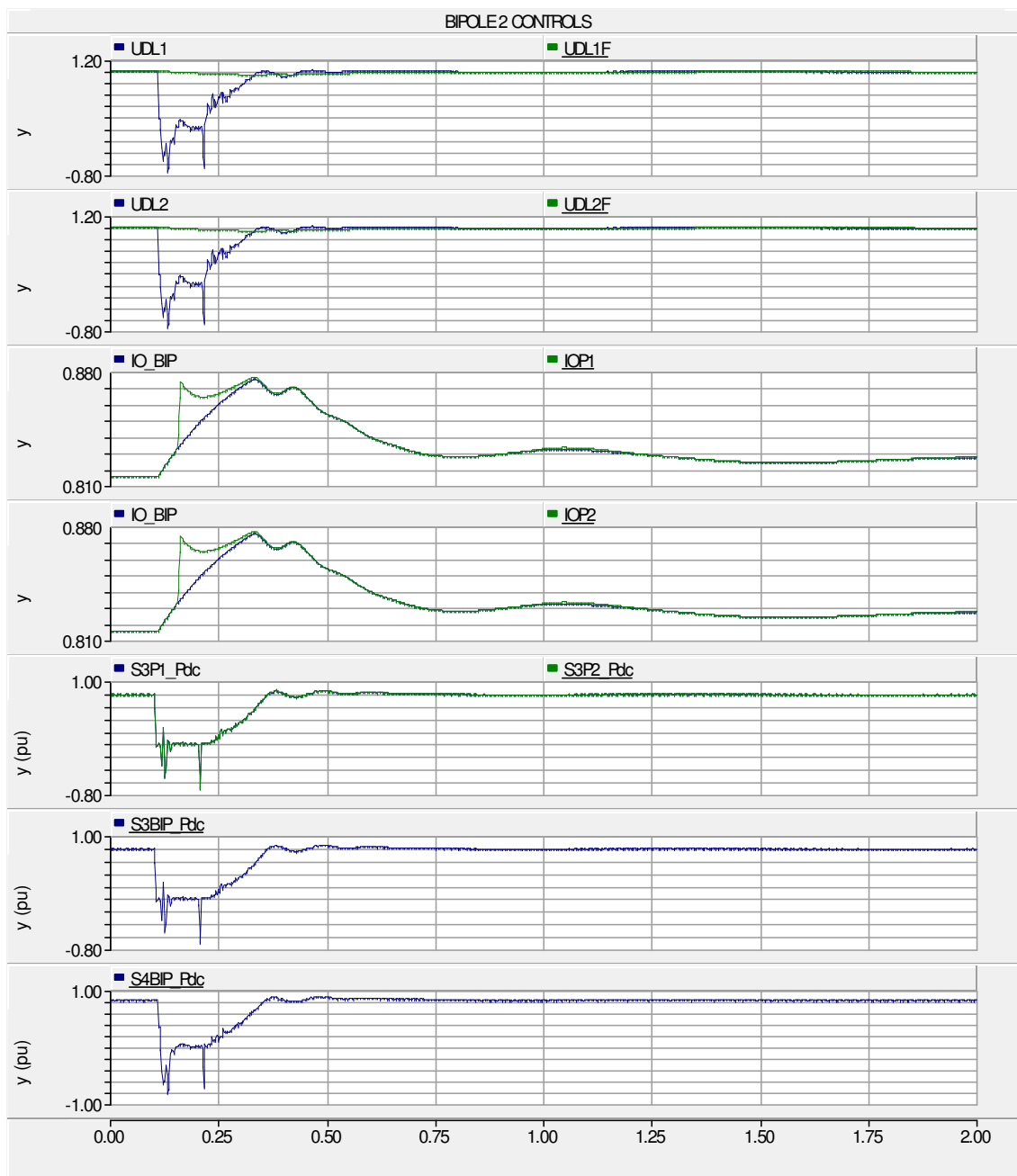
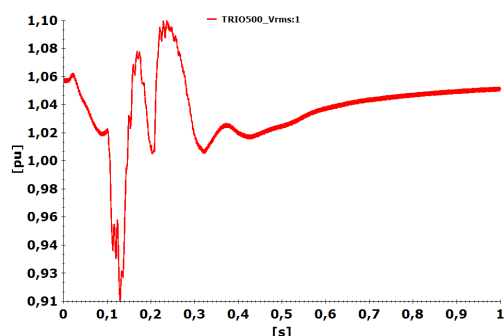


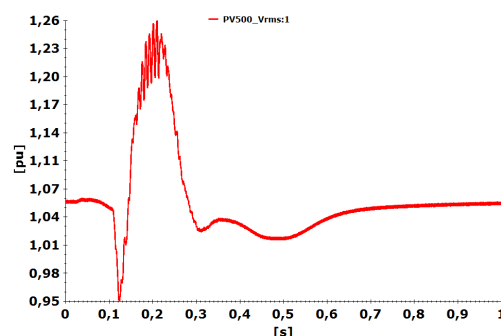
Figura XI-24 - BP2 - Falta trifásica no inversor (Xingu) com abertura da LT 500 kV Xingu – Tucuruí II C1. CEN 7P.

ANEXO XII – MULTI-INFEED

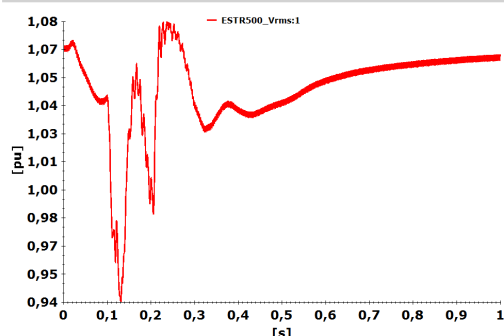
Curto-circuito monofásico em Araraquara 500 kV



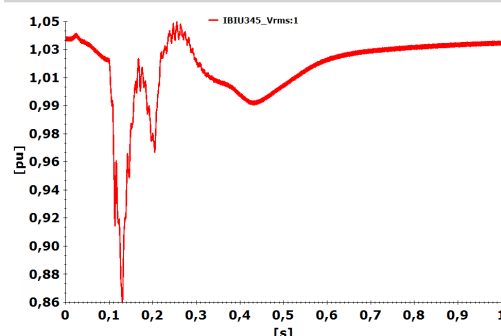
Tensão CA rms - Terminal Rio 500kV



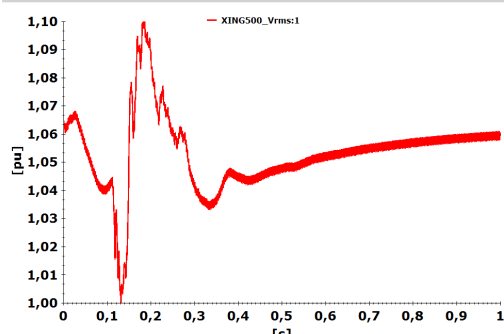
Tensão CA rms - Porto Velho 500kV



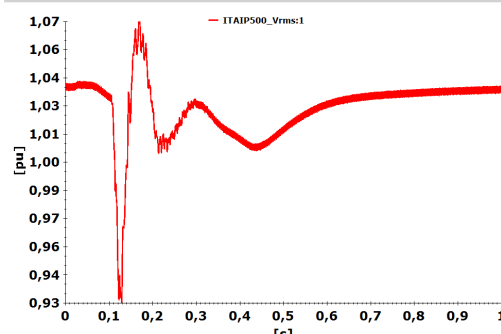
Tensão CA rms - Estreito 500kV



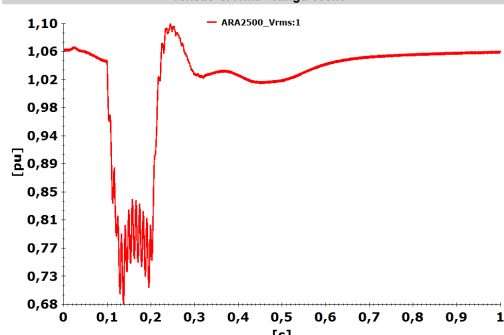
Tensão CA rms - Ibiuna 345kV



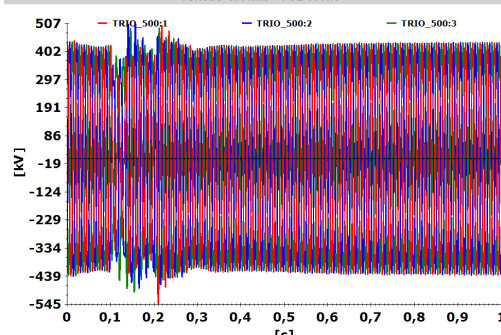
Tensão CA rms - Xingó 500kV



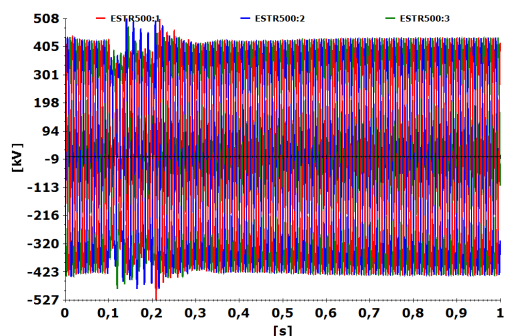
Tensão CA rms - Foz 500kV



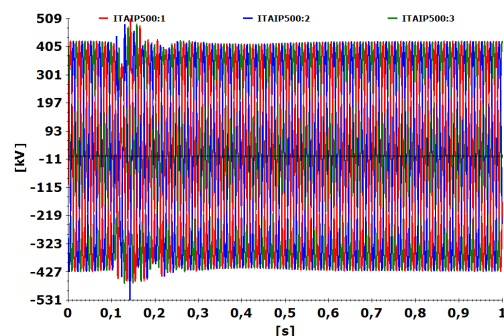
Tensão CA rms - Araraquara 500kV



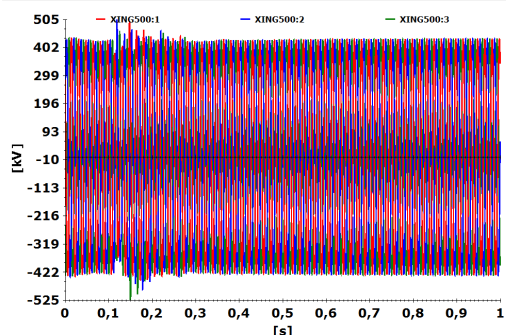
Tensão CA - Terminal Rio 500kV



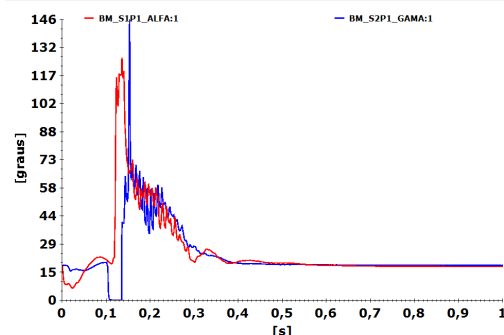
Tensão CA - Estreito 500kV



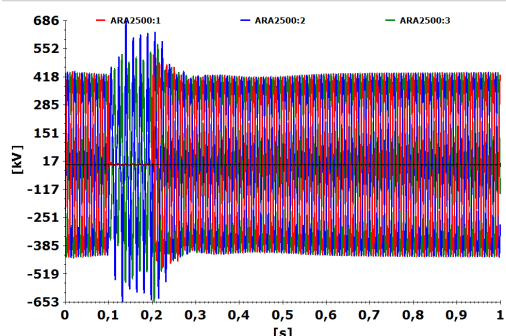
Tensão CA - Foz 500kV



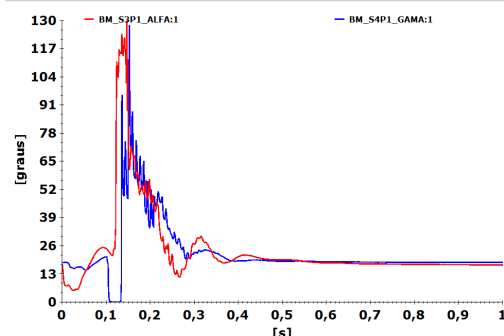
Tensão CA - Xingu 500kV



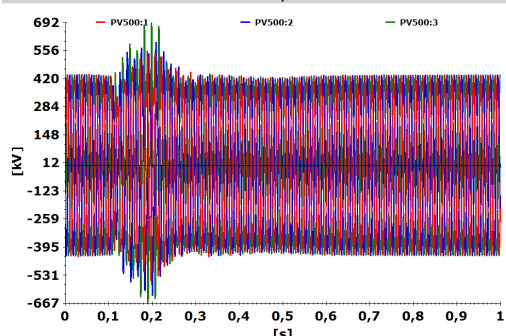
Ângulo de disparo (retificador) e extinção (inversor) - Belo Monte (Bipolo 1 XING-ESTR)



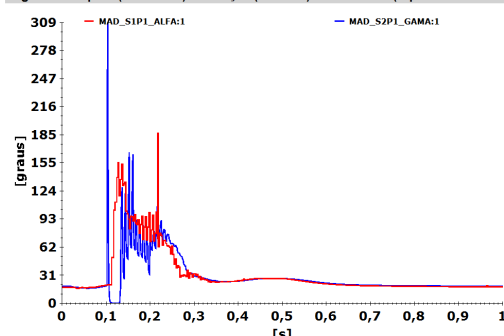
Tensão CA - Araraquara 500kV



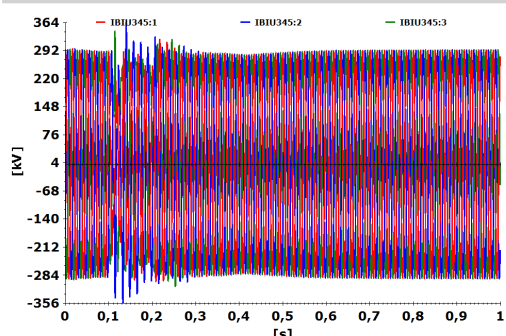
Ângulo de disparo (retificador) e extinção (inversor) - Belo Monte (Bipolo 2 XING-TRI)



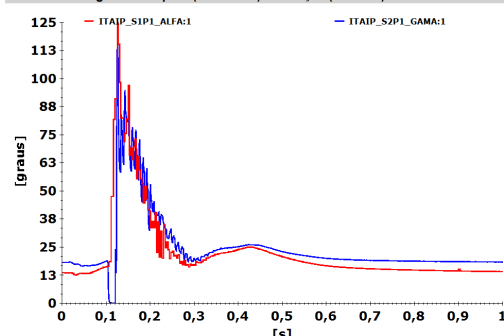
Tensão CA - Porto Velho 500kV



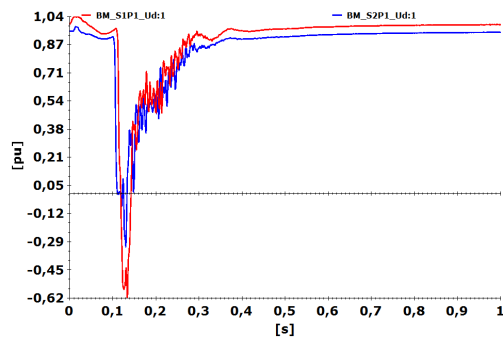
Ângulo de disparo (retificador) e extinção (inversor) - Madeira



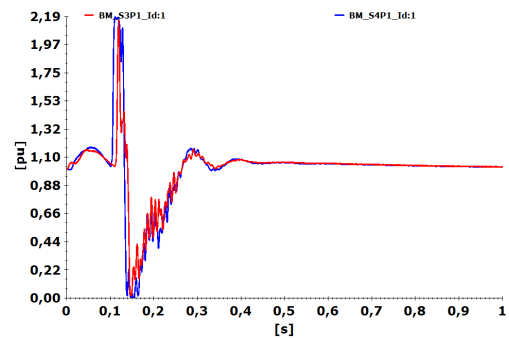
Tensão CA - Ibiuna 345kV



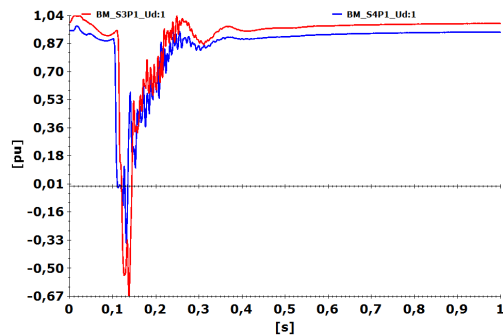
Ângulo de disparo (retificador) e extinção (inversor) - Itaipu



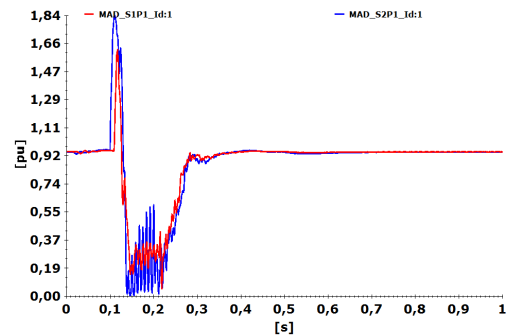
Tensão CC - Belo Monte (Bipolo 1 XING-ESTR)



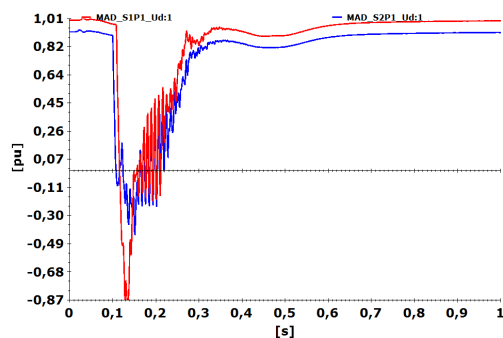
Corrente CC - Belo Monte (Bipolo 2 XING-TRIO)



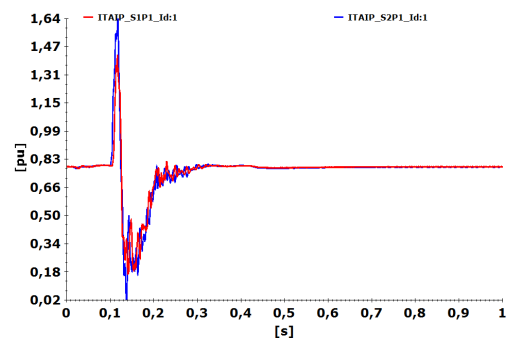
Tensão CC - Belo Monte (Bipolo 2 XING-TRIO)



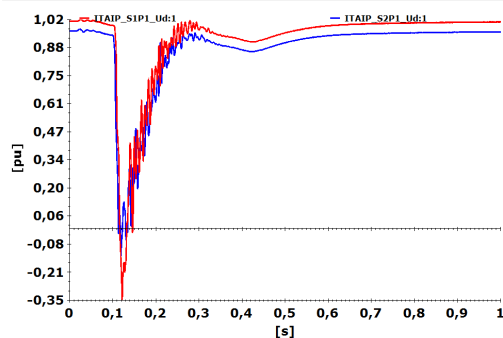
Corrente CC - Madeira



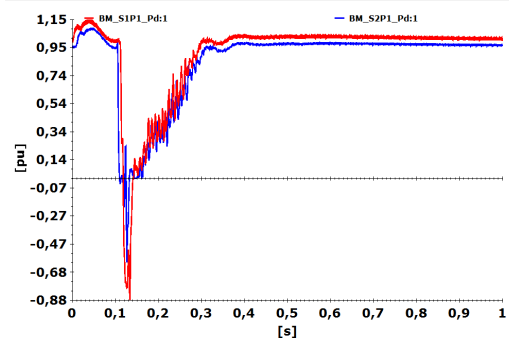
Tensão CC - Madeira



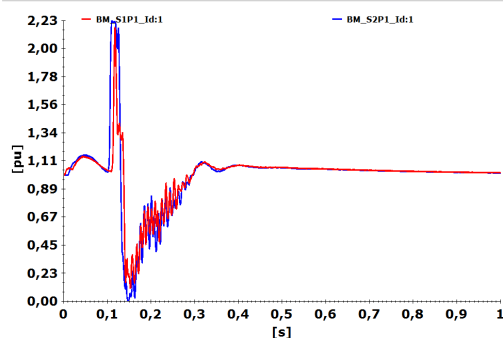
Corrente CC - Itaipu



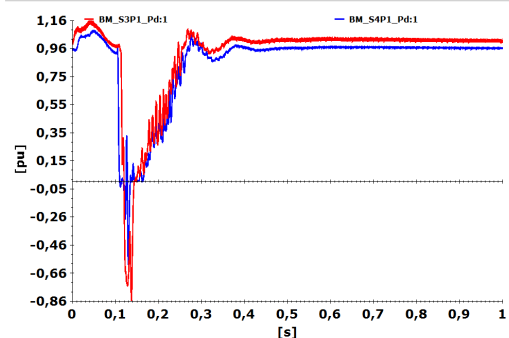
Tensão CC - Itaipu



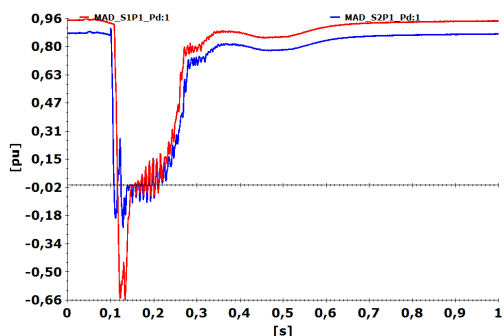
Potência CC - Belo Monte (Bipolo 1 XING-ESTR)



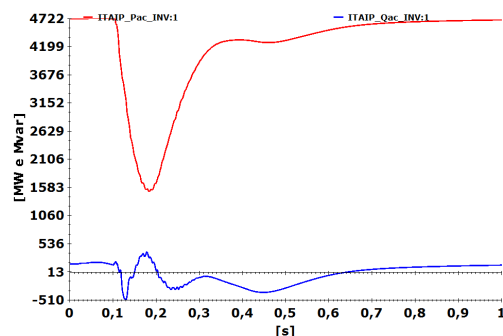
Corrente CC - Belo Monte (Bipolo 1 XING-ESTR)



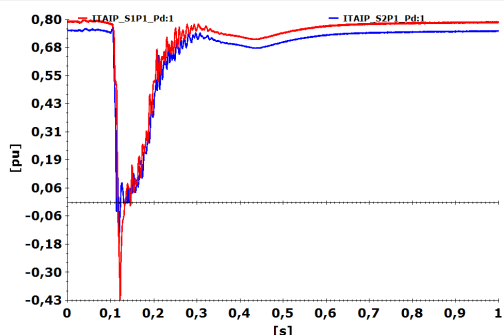
Potência CC - Belo Monte (Bipolo 2 XING-TRIO)



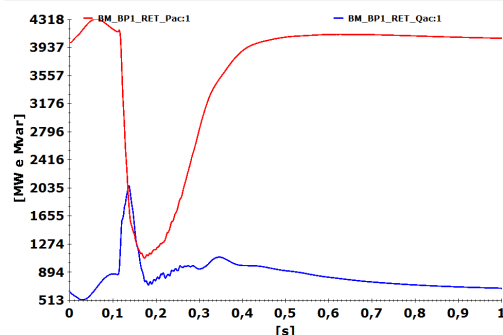
Potência CC - Madeira



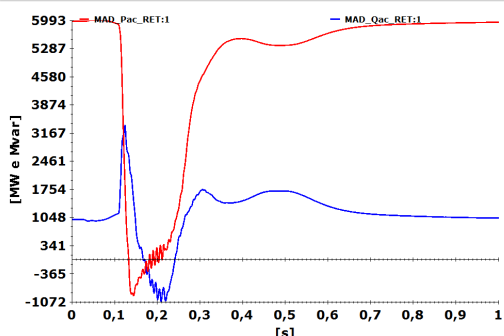
Potência CA ativa e reativa - Ibiuna 345 kV (Elo Itaipu)



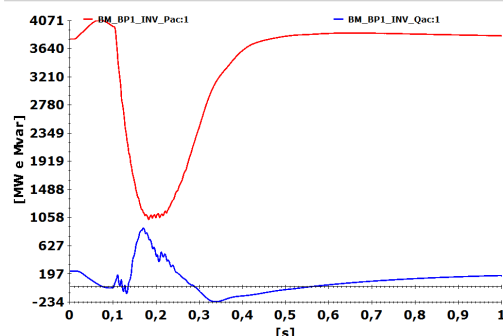
Potência CC - Itaipu



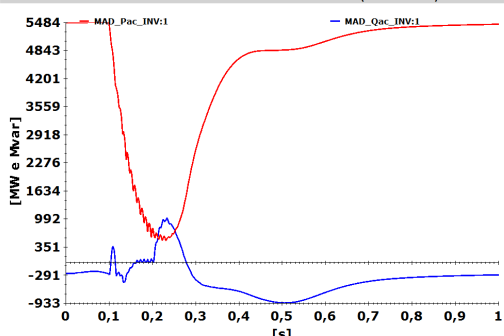
Potência CA ativa e reativa - Xingu 500 kV (Bipolo 1 - Belo Monte)



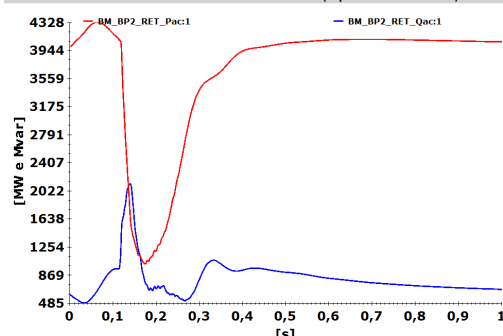
Potência CA ativa e reativa - Porto Velho 500 kV (Elo Madeira)



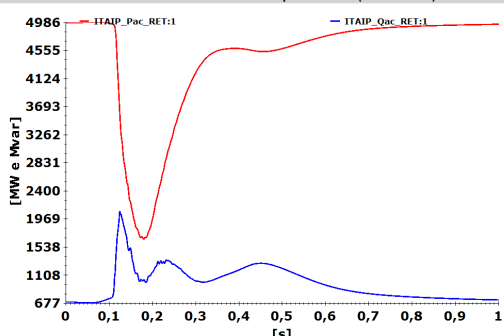
Potência CA ativa e reativa - Estreito 500 kV (Bipolo 1 - Belo Monte)



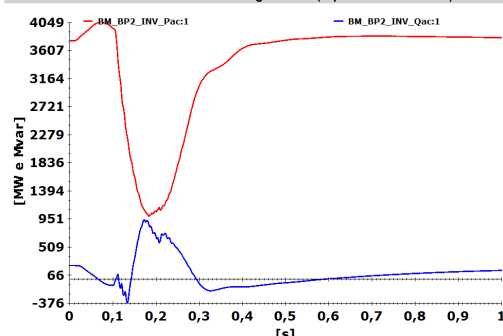
Potência CA ativa e reativa - Araraquara 500 kV (Elo Madeira)



Potência CA ativa e reativa - Xingu 500 kV (Bipolo 2 - Belo Monte)

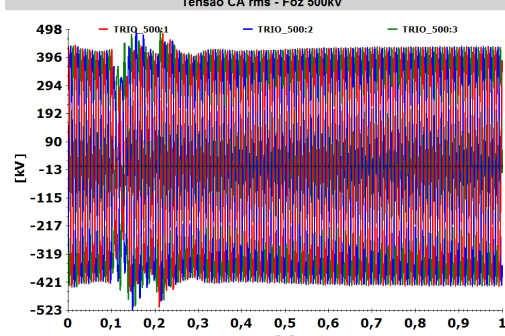
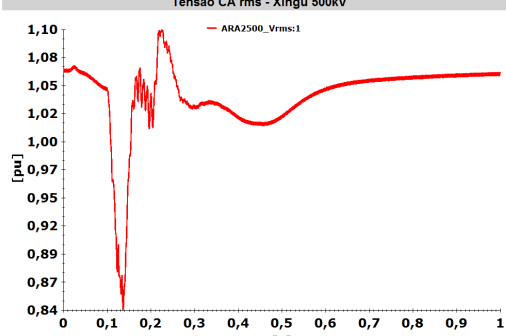
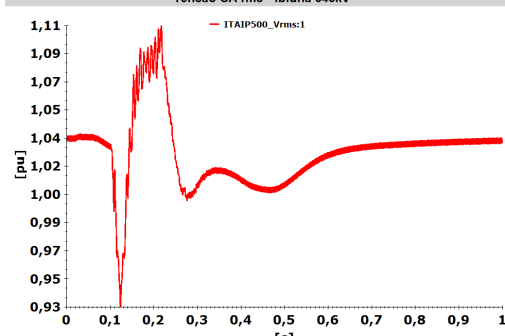
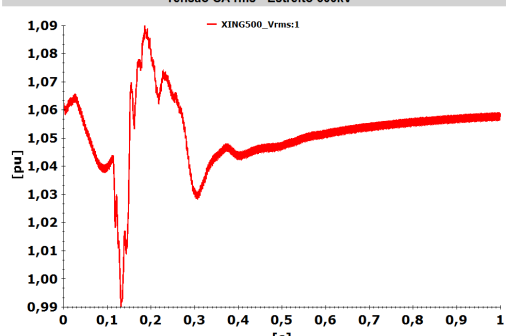
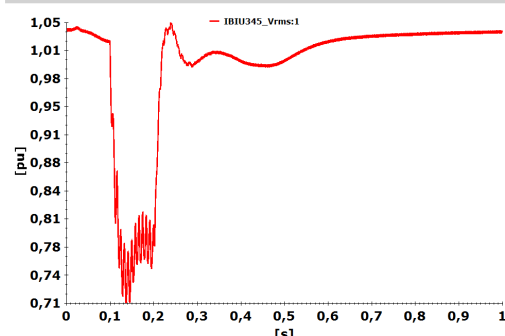
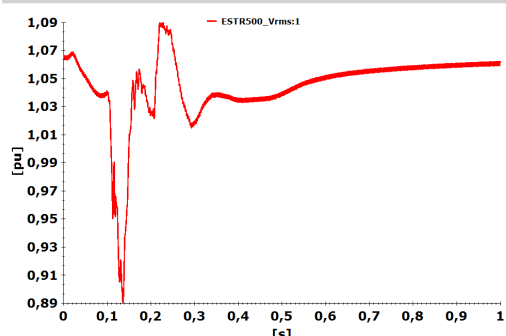
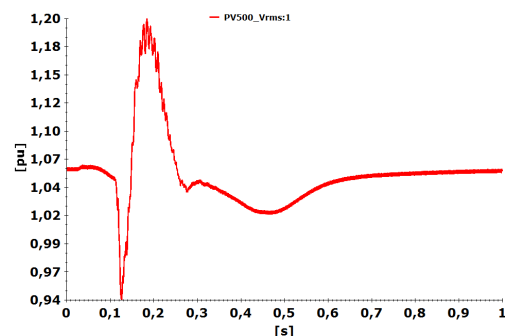
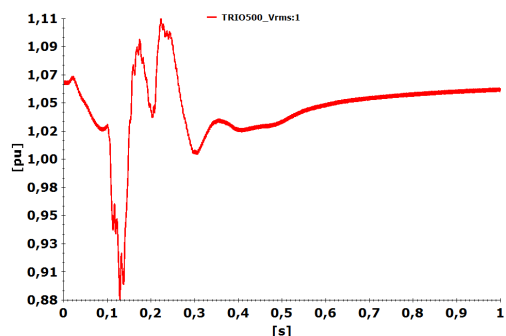


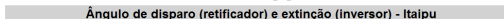
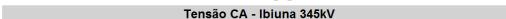
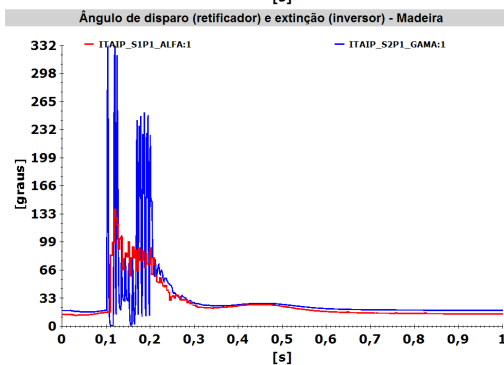
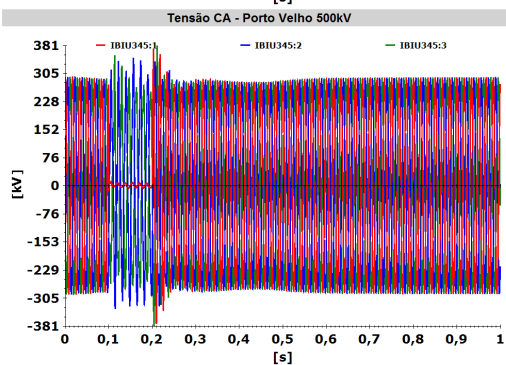
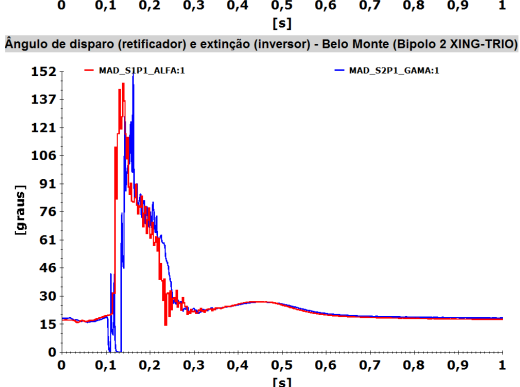
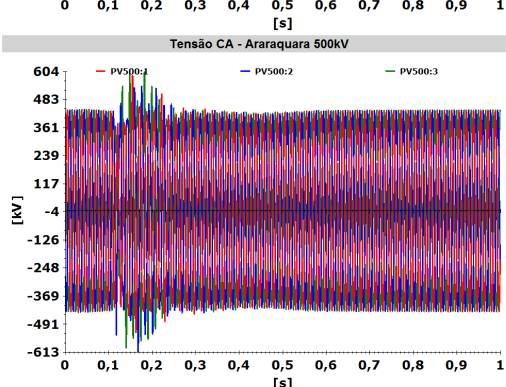
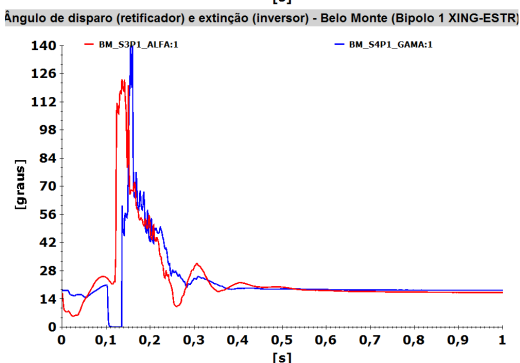
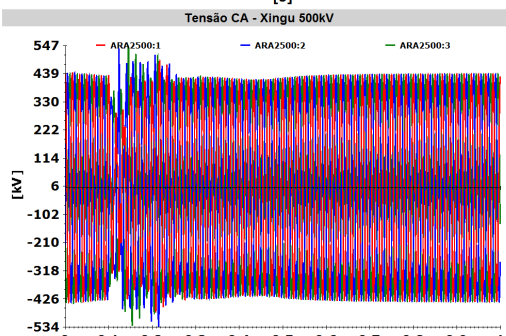
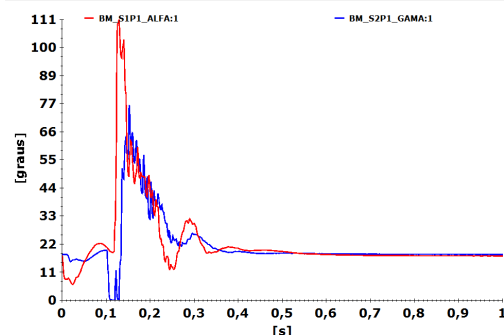
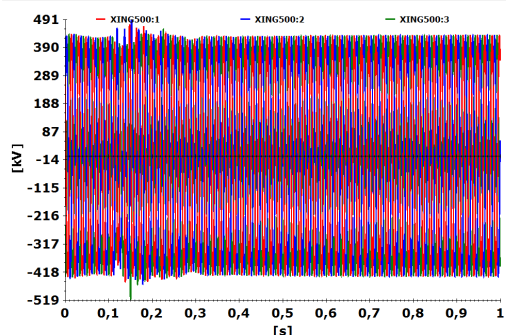
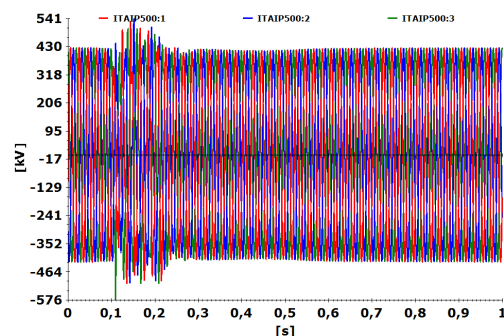
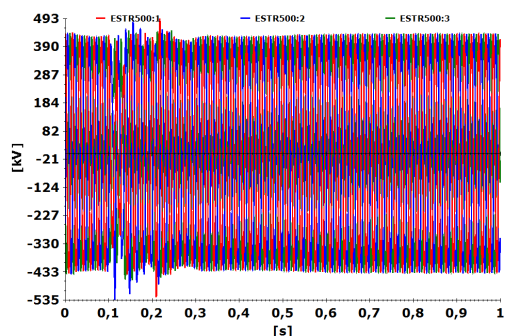
Potência CA ativa e reativa - Foz 500 kV (Elo Itaipu)

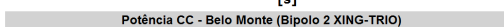
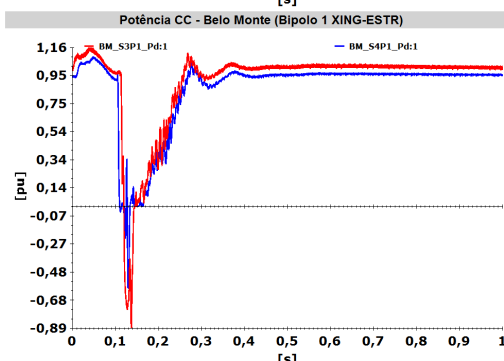
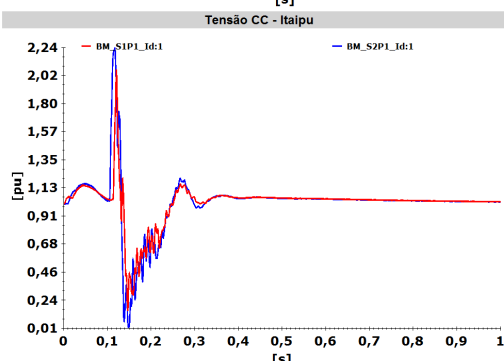
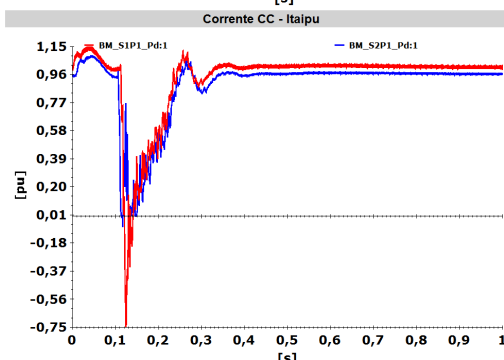
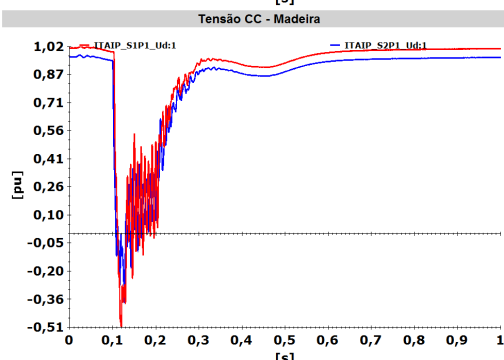
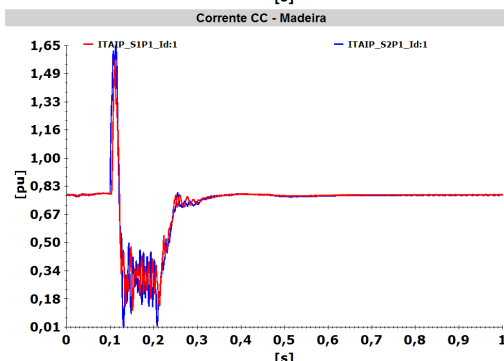
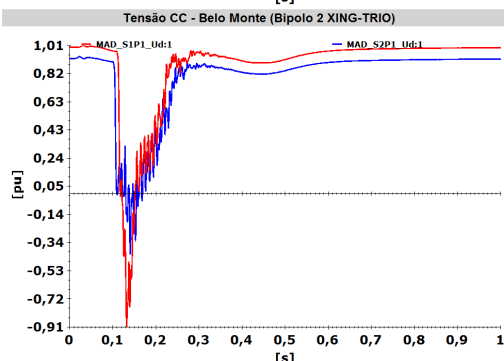
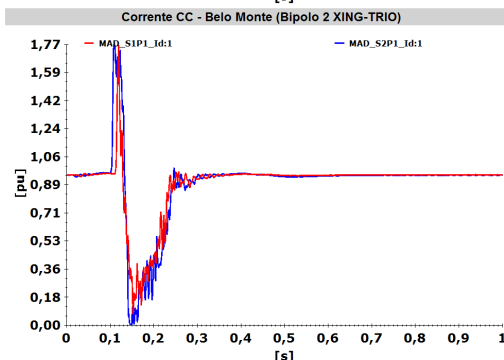
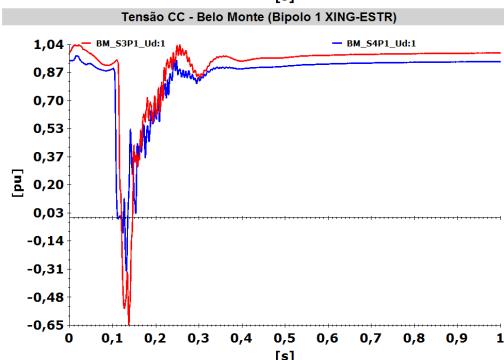
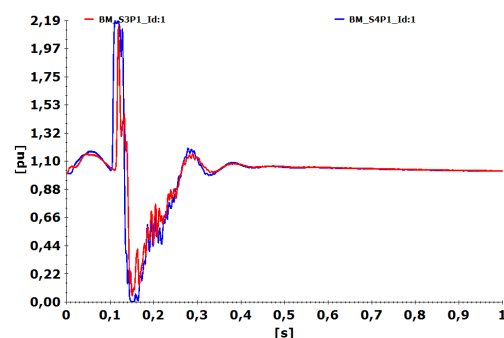
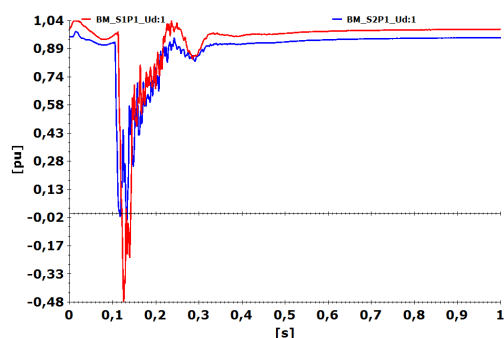


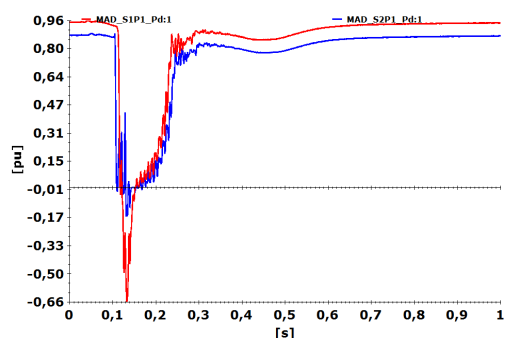
Potência CA ativa e reativa - T.Rio 500 kV (Bipolo 2 - Belo Monte)

Curto-circuito monofásico em Ibiuna 345 kV

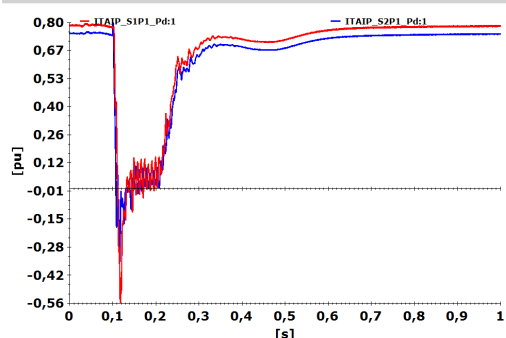




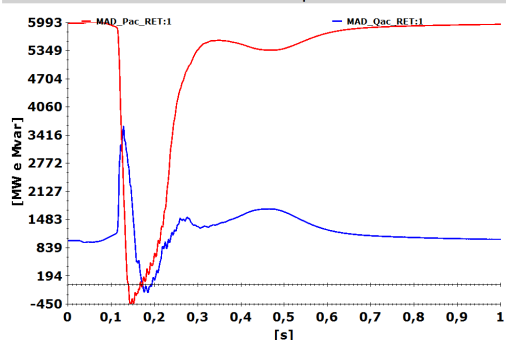




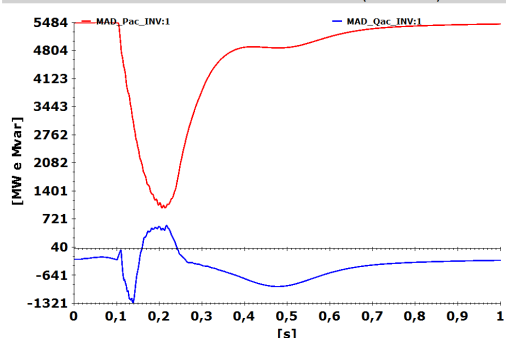
Potência CC - Madeira



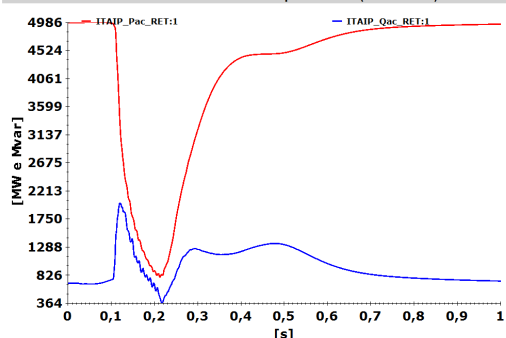
Potência CC - Itaú



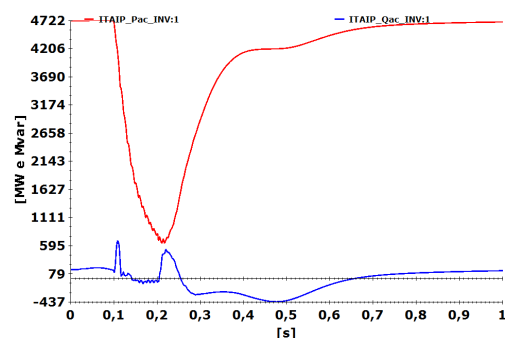
Potência CA ativa e reativa - Porto Velho 500 kV (Elo Madeira)



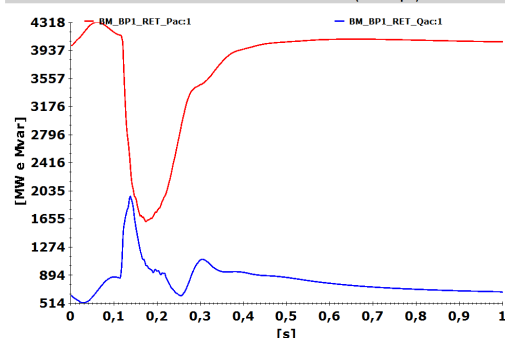
Potência CA ativa e reativa - Araraquara 500 kV (Elo Madeira)



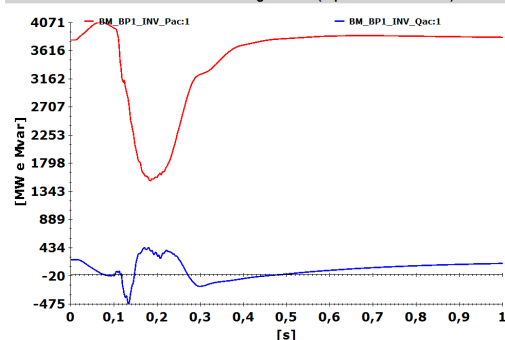
Potência CA ativa e reativa - Foz 500 kV (Elo Itaú)



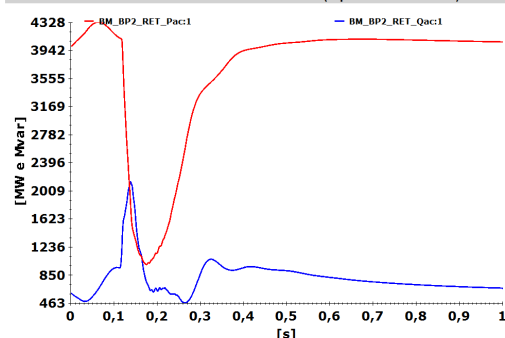
Potência CA ativa e reativa - Ibiuna 345 kV (Elo Itaú)



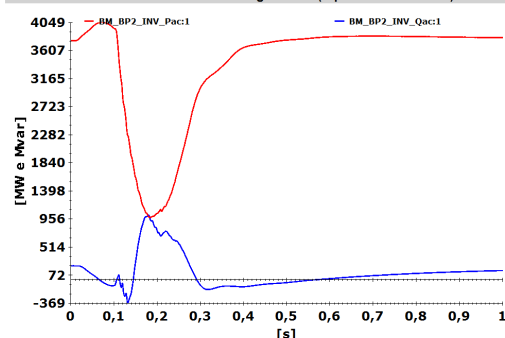
Potência CA ativa e reativa - Xingu 500 kV (Bipolo 1 - Belo Monte)



Potência CA ativa e reativa - Estreito 500 kV (Bipolo 1 - Belo Monte)

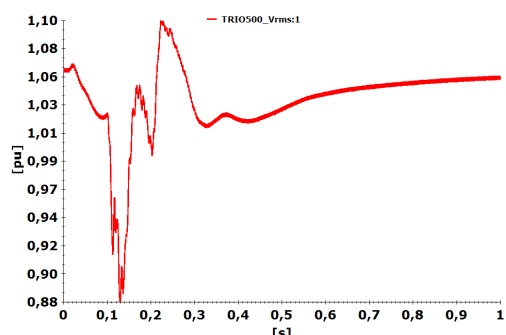


Potência CA ativa e reativa - Xingu 500 kV (Bipolo 2 - Belo Monte)

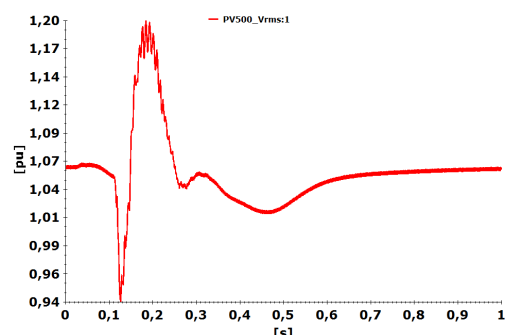


Potência CA ativa e reativa - T.Rio 500 kV (Bipolo 2 - Belo Monte)

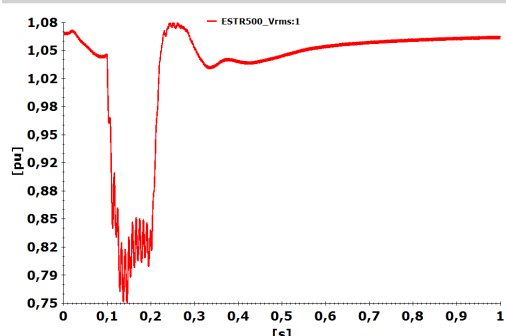
Curto-circuito monofásico em Estreito 500 kV



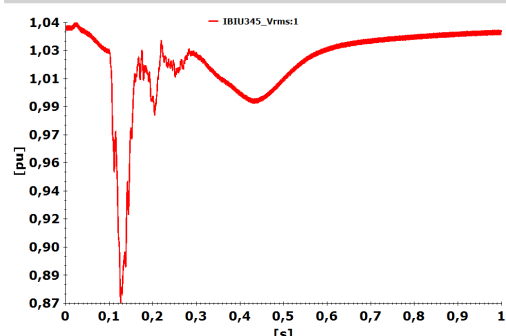
Tensão CA rms - Terminal Rio 500kV



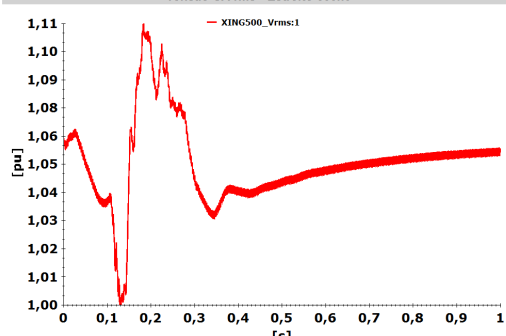
Tensão CA rms - Porto Velho 500kV



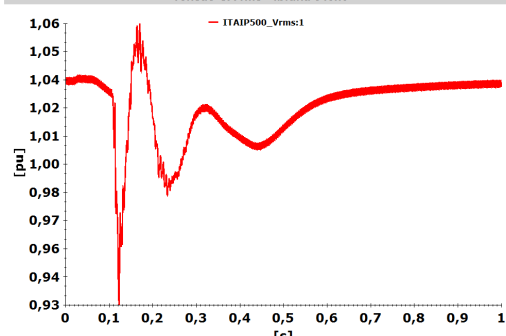
Tensão CA rms - Estreito 500kV



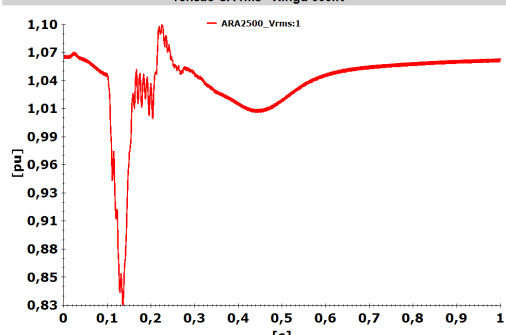
Tensão CA rms - Ibiuna 345kV



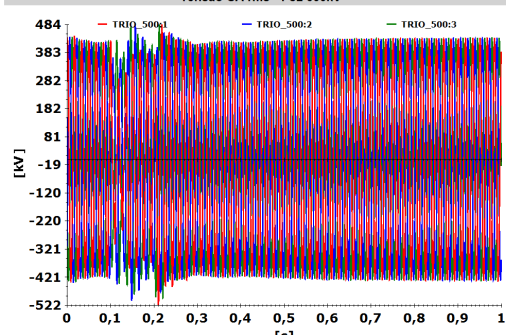
Tensão CA rms - Xingu 500kV



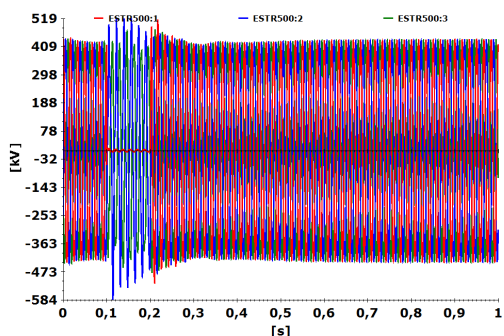
Tensão CA rms - Foz 500kV



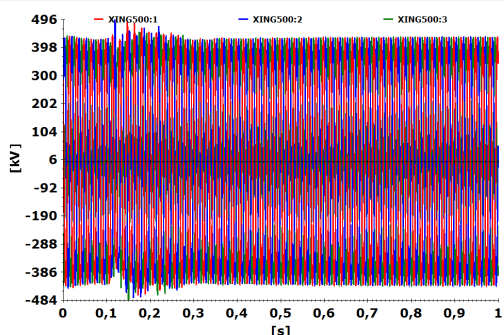
Tensão CA rms - Araraquara 500kV



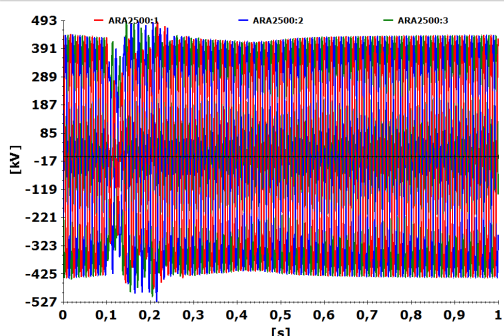
Tensão CA - Terminal Rio 500kV



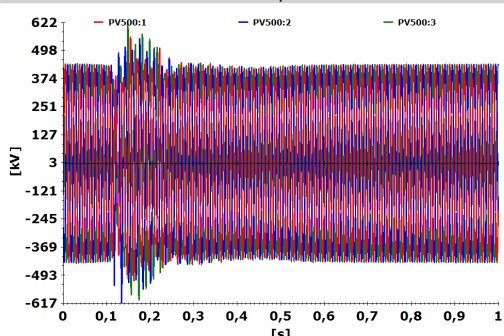
Tensão CA - Estreito 500kV



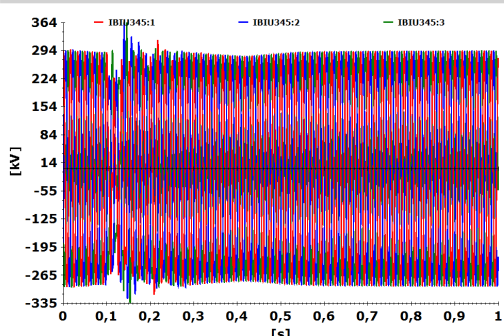
Tensão CA - Xingu 500kV



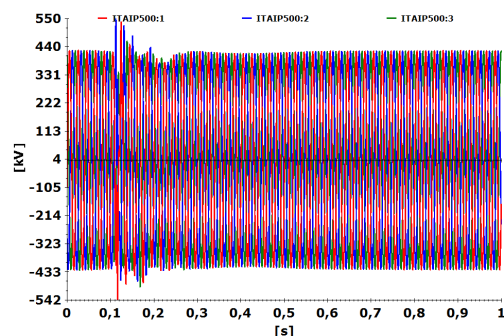
Tensão CA - Araraquara 500kV



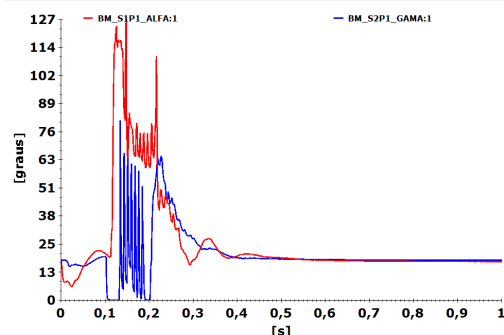
Tensão CA - Porto Velho 500kV



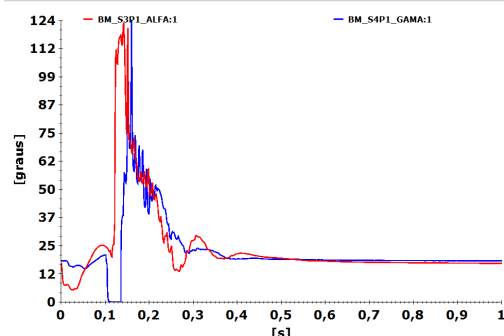
Tensão CA - Ibiuna 345kV



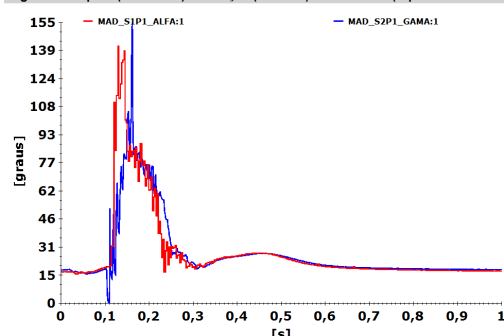
Tensão CA - Foz 500kV



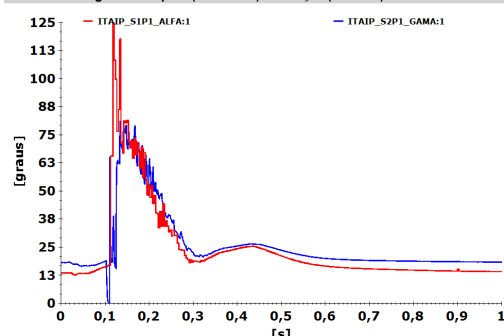
Ângulo de disparo (retificador) e extinção (inversor) - Belo Monte (Bipolo 1 XING-ESTR)



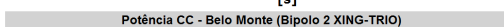
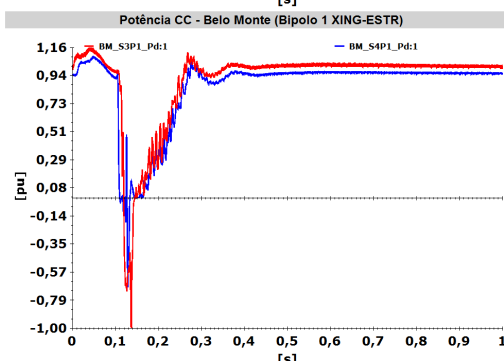
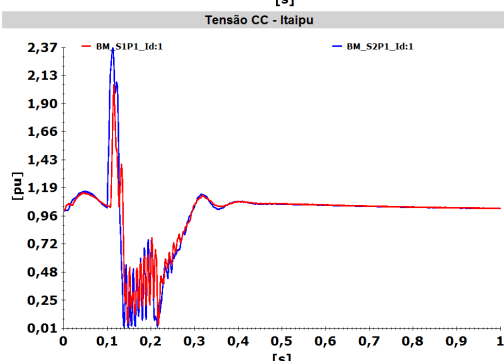
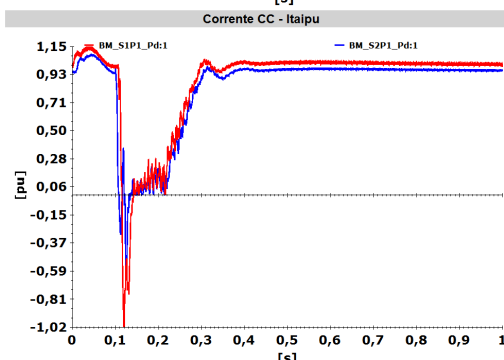
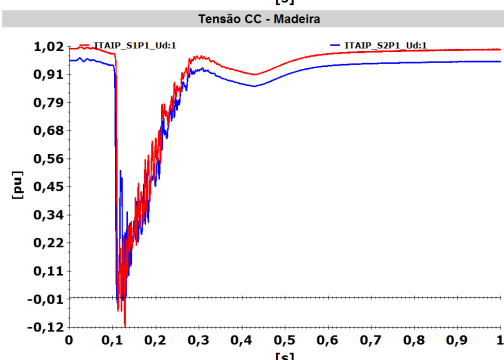
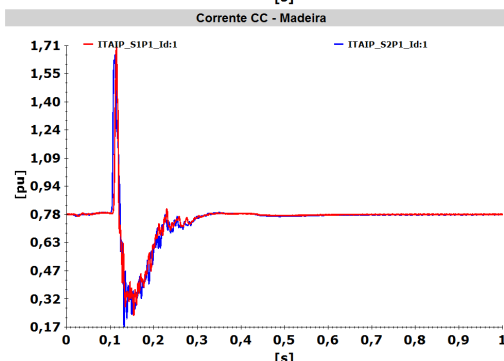
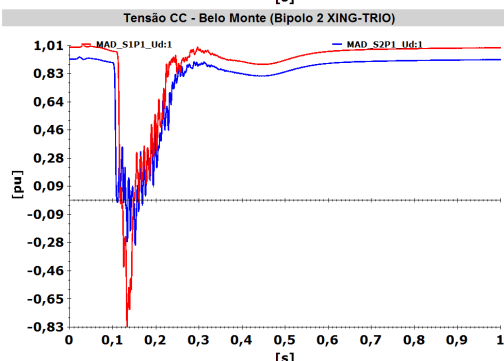
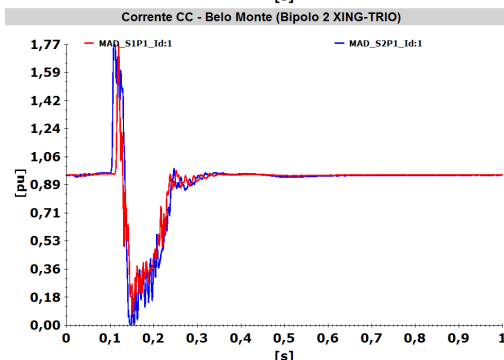
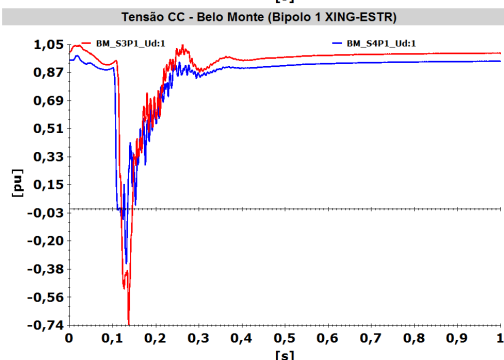
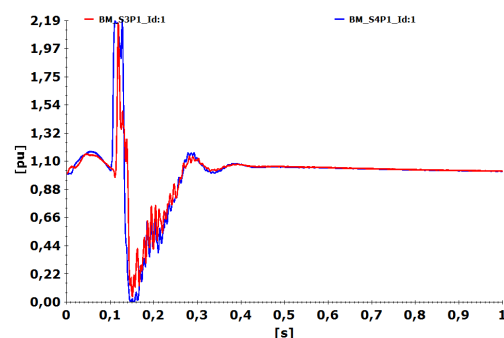
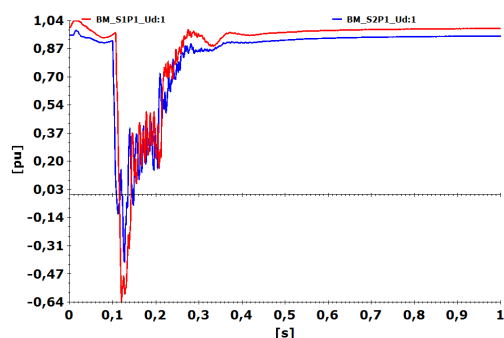
Ângulo de disparo (retificador) e extinção (inversor) - Belo Monte (Bipolo 2 XING-TRIO)

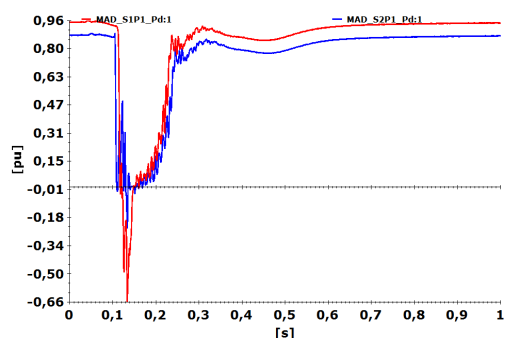


Ângulo de disparo (retificador) e extinção (inversor) - Madeira

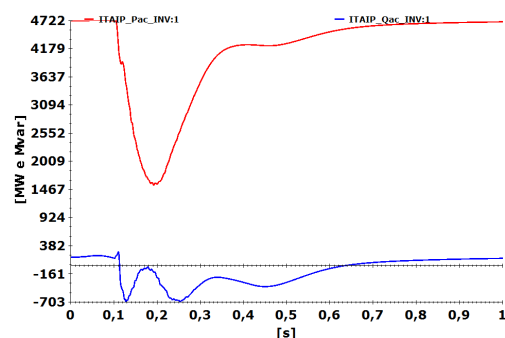


Ângulo de disparo (retificador) e extinção (inversor) - Itaipu

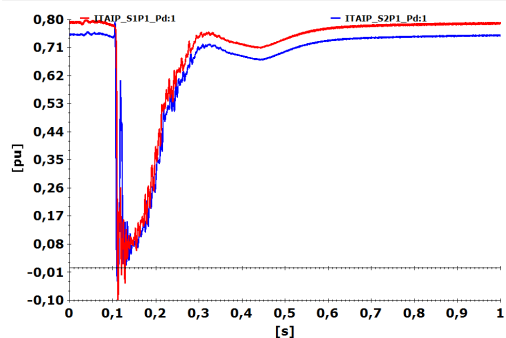




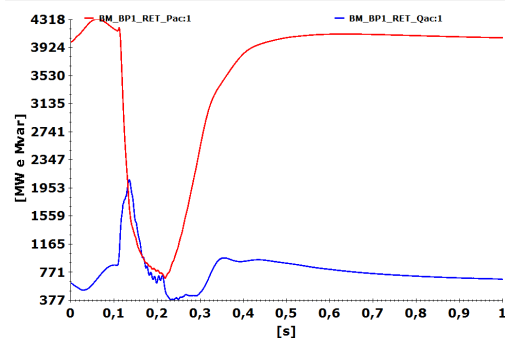
Potência CC - Madeira



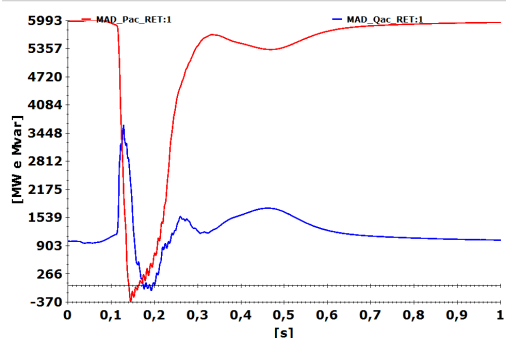
Potência CA ativa e reativa - Ibiuna 345 kV (Elo Itaipu)



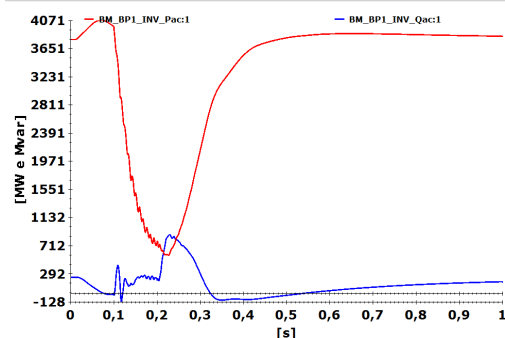
Potência CC - Itaipu



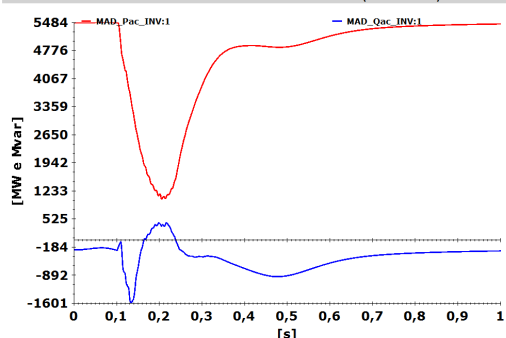
Potência CA ativa e reativa - Xingu 500 kV (Bipolo 1 - Belo Monte)



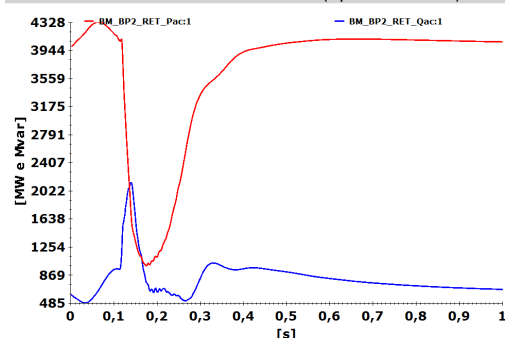
Potência CA ativa e reativa - Porto Velho 500 kV (Elo Madeira)



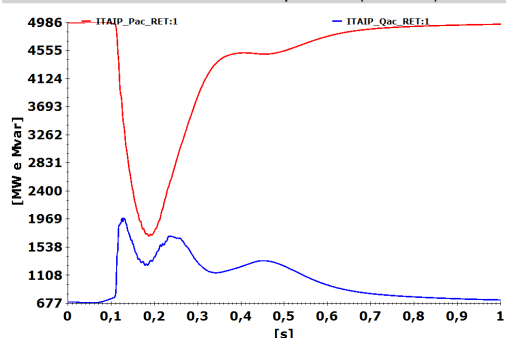
Potência CA ativa e reativa - Estreito 500 kV (Bipolo 1 - Belo Monte)



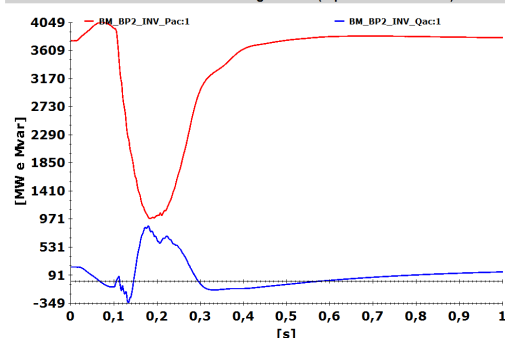
Potência CA ativa e reativa - Araraquara 500 kV (Elo Madeira)



Potência CA ativa e reativa - Xingu 500 kV (Bipolo 2 - Belo Monte)

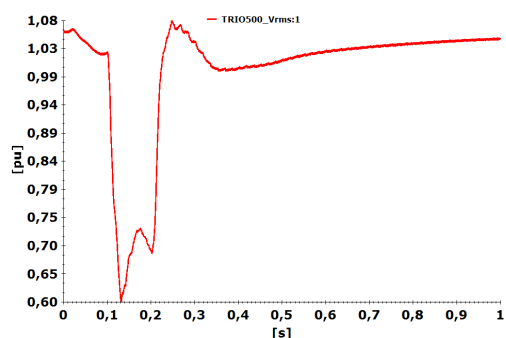


Potência CA ativa e reativa - Foz 500 kV (Elo Itaipu)

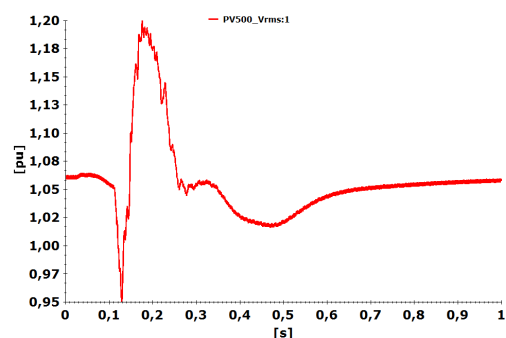


Potência CA ativa e reativa - T.Rio 500 kV (Bipolo 2 - Belo Monte)

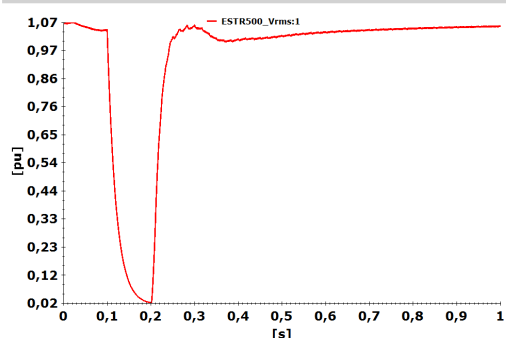
Curto-circuito trifásico em Estreito 500 kV



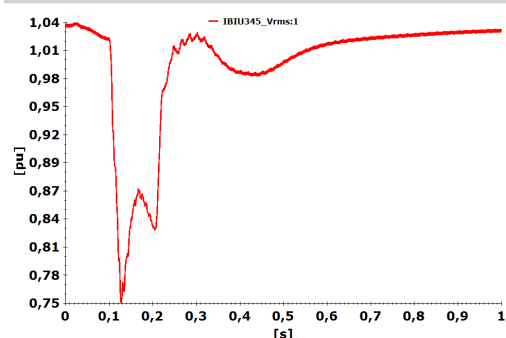
Tensão CA rms - Terminal Rio 500kV



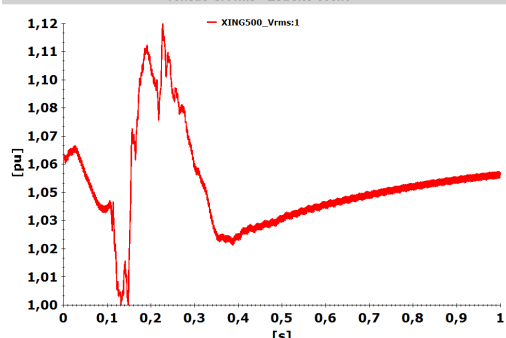
Tensão CA rms - Porto Velho 500kV



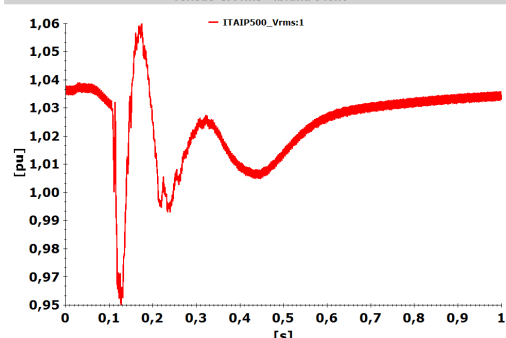
Tensão CA rms - Estreito 500kV



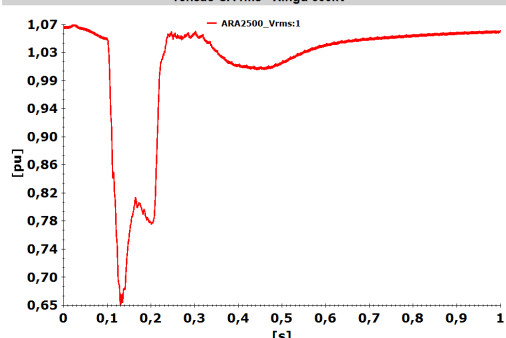
Tensão CA rms - Ibiuna 345kV



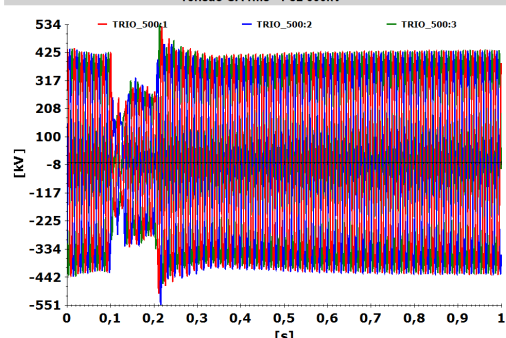
Tensão CA rms - Xingu 500kV



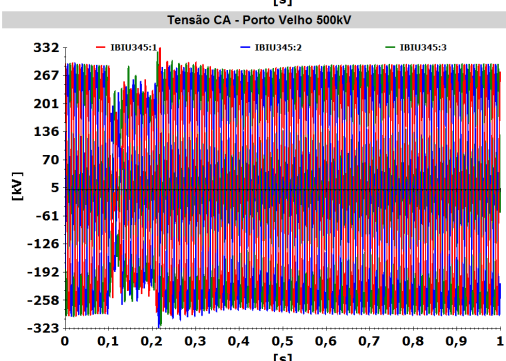
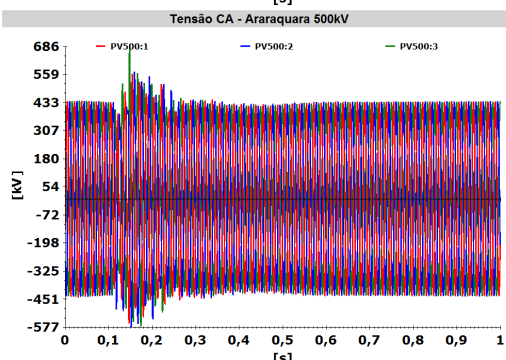
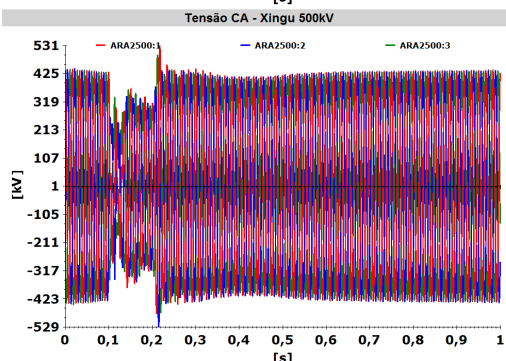
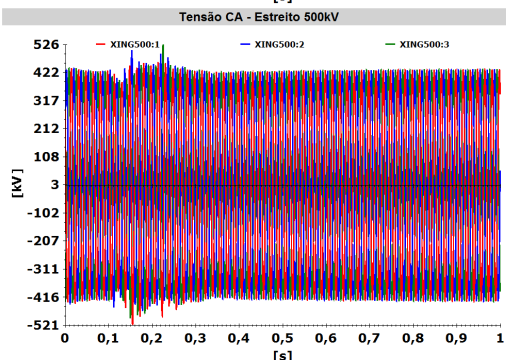
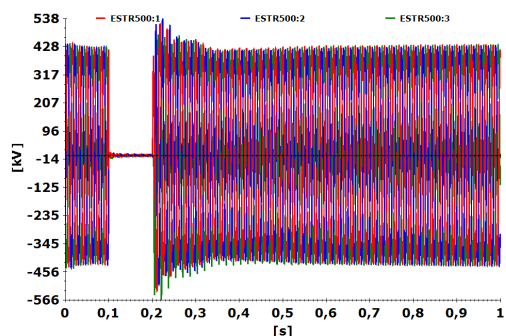
Tensão CA rms - Foz 500kV



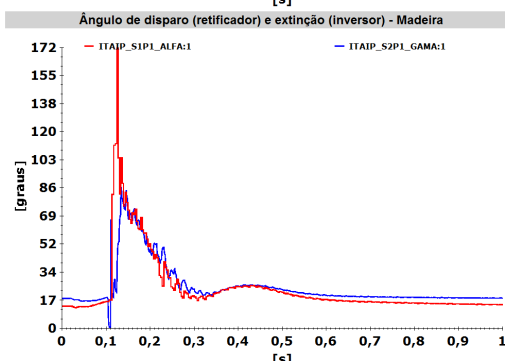
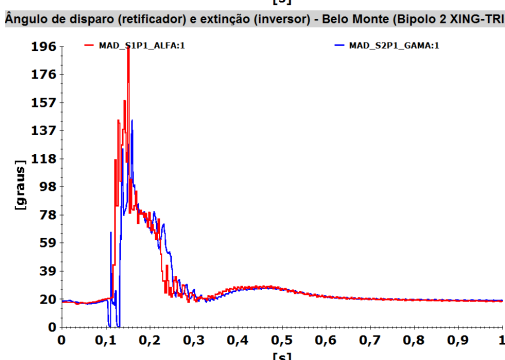
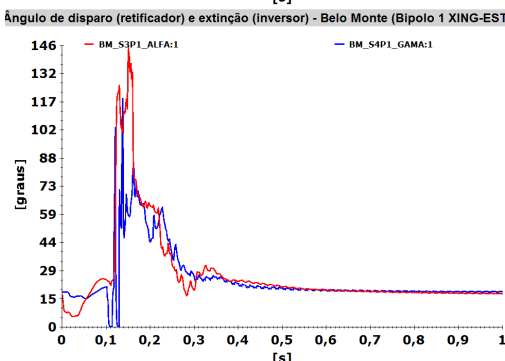
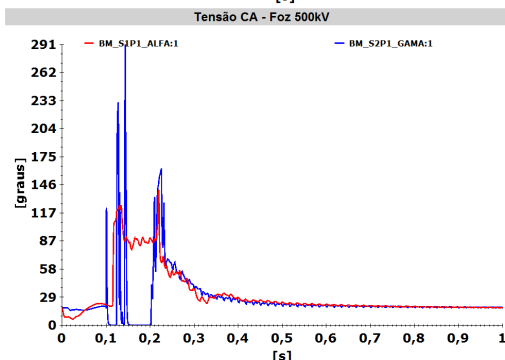
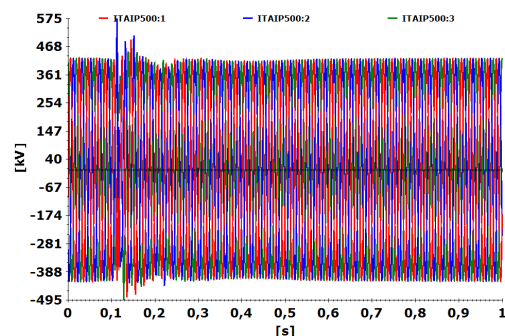
Tensão CA rms - Araraquara 500kV



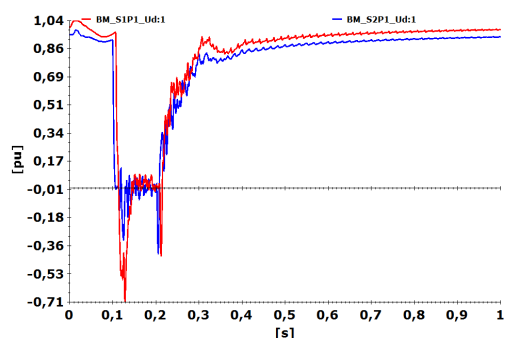
Tensão CA - Terminal Rio 500kV



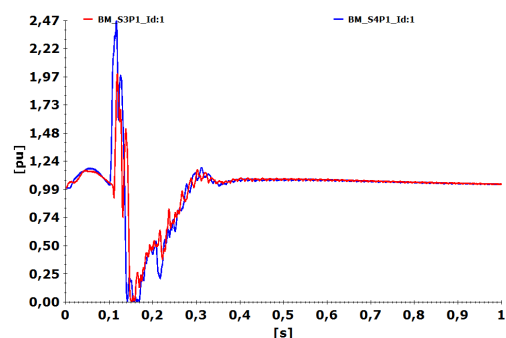
Tensão CA - Ibiuna 345kV



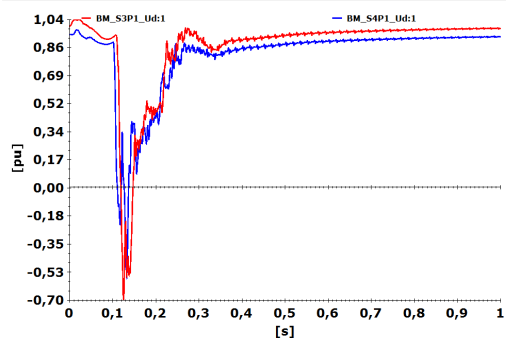
Ângulo de disparo (retificador) e extinção (inversor) - Itaipu



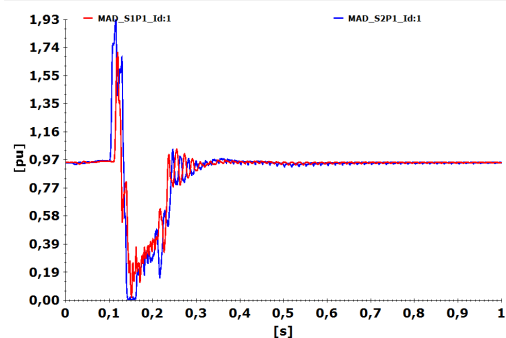
Tensão CC - Belo Monte (Bipolo 1 XING-ESTR)



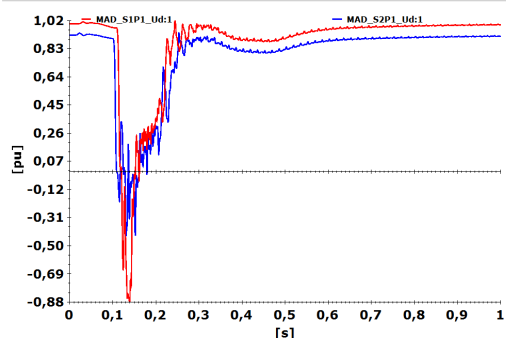
Corrente CC - Belo Monte (Bipolo 2 XING-TRIO)



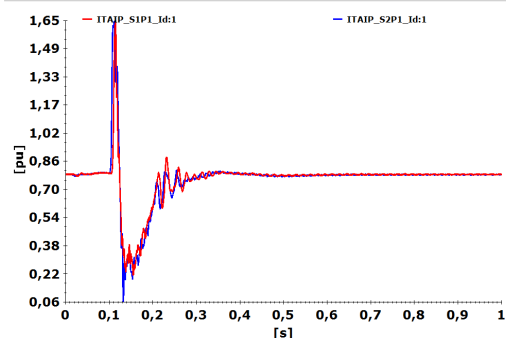
Tensão CC - Belo Monte (Bipolo 2 XING-TRIO)



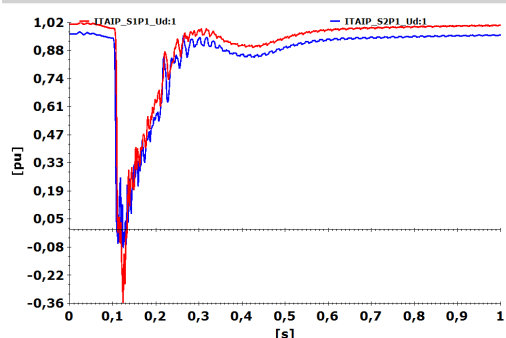
Corrente CC - Madeira



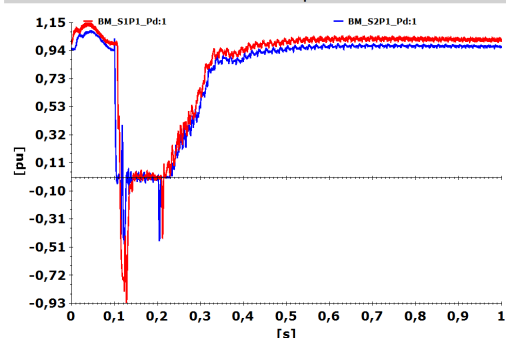
Tensão CC - Madeira



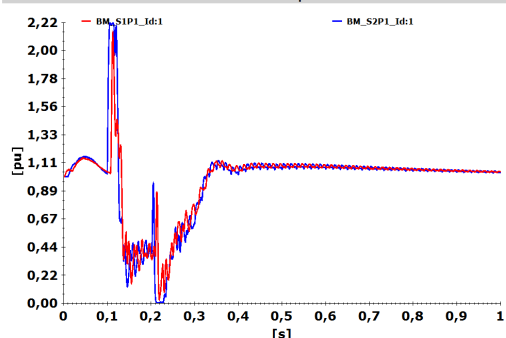
Corrente CC - Itaipu



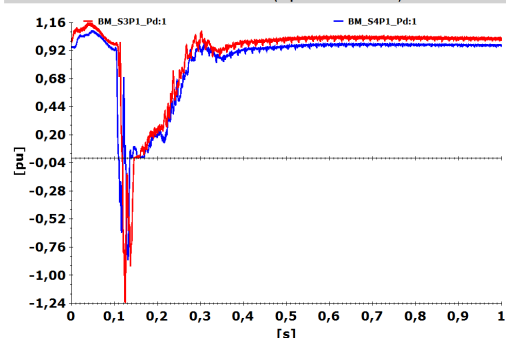
Tensão CC - Itaipu



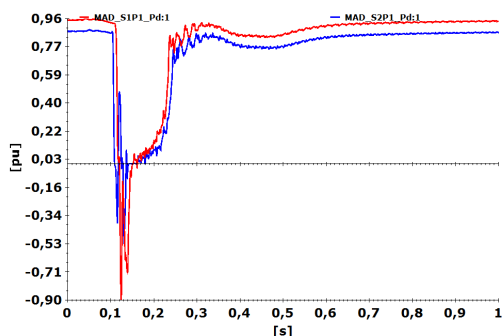
Potência CC - Belo Monte (Bipolo 1 XING-ESTR)



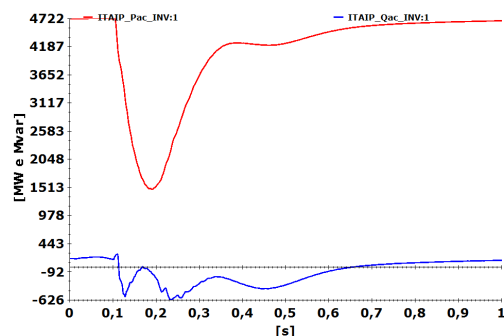
Corrente CC - Belo Monte (Bipolo 1 XING-ESTR)



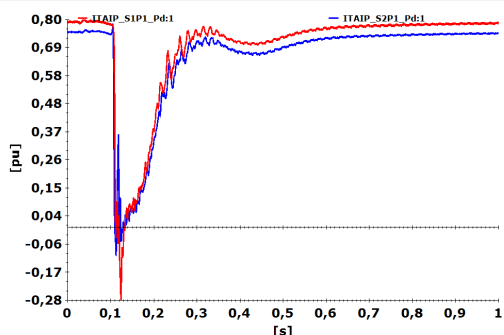
Potência CC - Belo Monte (Bipolo 2 XING-TRIO)



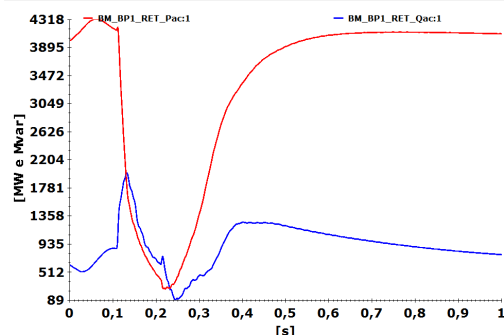
Potência CC - Madeira



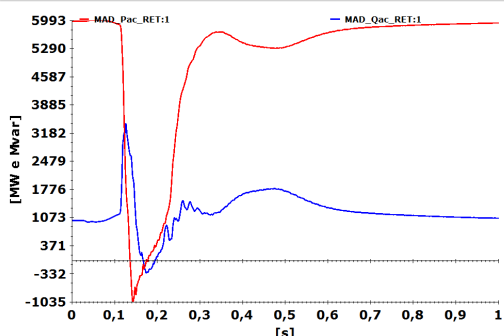
Potência CA ativa e reativa - Ibiuna 345 kV (Elo Itaipu)



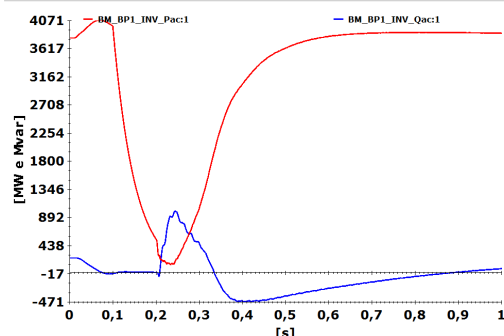
Potência CC - Itaipu



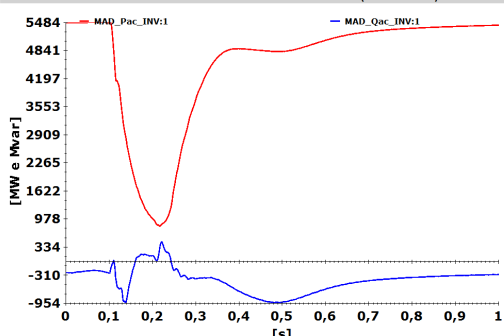
Potência CA ativa e reativa - Xingu 500 kV (Bipolo 1 - Belo Monte)



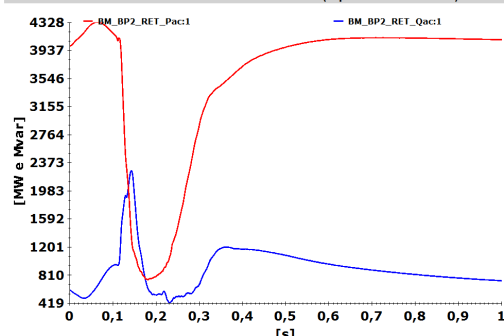
Potência CA ativa e reativa - Porto Velho 500 kV (Elo Madeira)



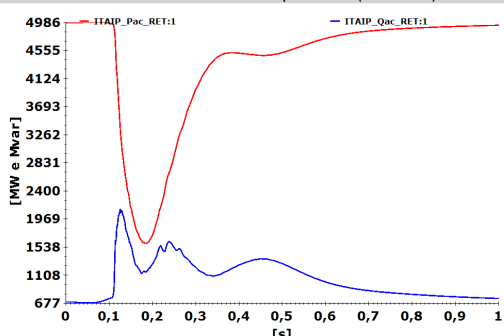
Potência CA ativa e reativa - Estreito 500 kV (Bipolo 1 - Belo Monte)



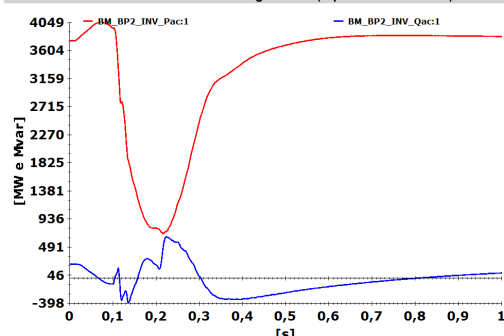
Potência CA ativa e reativa - Araraquara 500 kV (Elo Madeira)



Potência CA ativa e reativa - Xingu 500 kV (Bipolo 2 - Belo Monte)

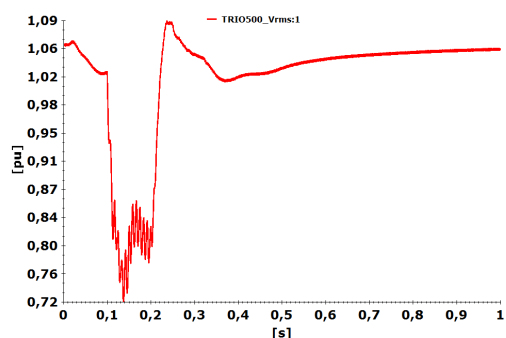


Potência CA ativa e reativa - Foz 500 kV (Elo Itaipu)

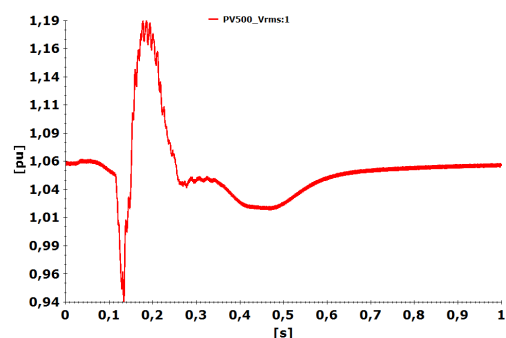


Potência CA ativa e reativa - T.Rio 500 kV (Bipolo 2 - Belo Monte)

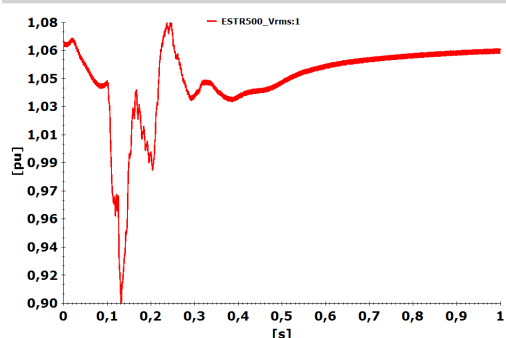
Curto-circuito monofásico em Terminal Rio 500 kV



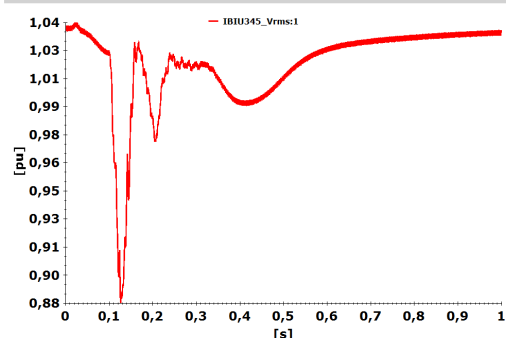
Tensão CA rms - Terminal Rio 500kV



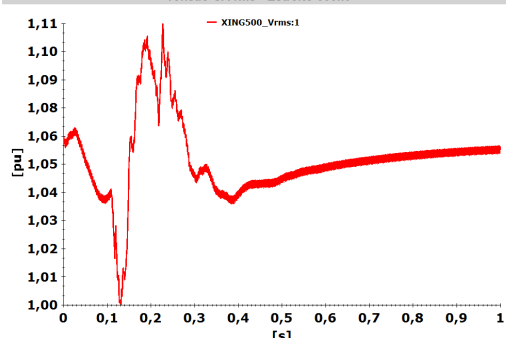
Tensão CA rms - Porto Velho 500kV



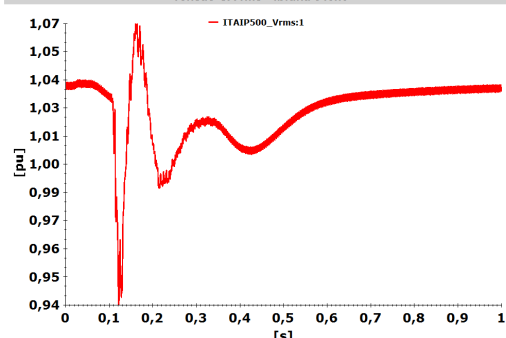
Tensão CA rms - Estreito 500kV



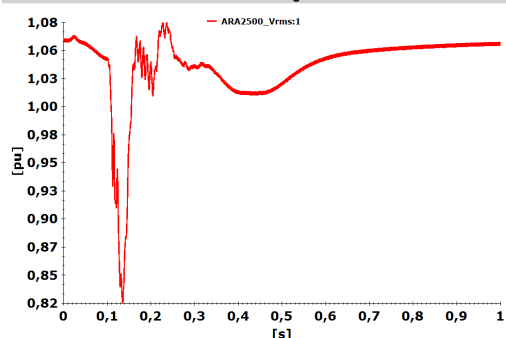
Tensão CA rms - Ibiuna 345kV



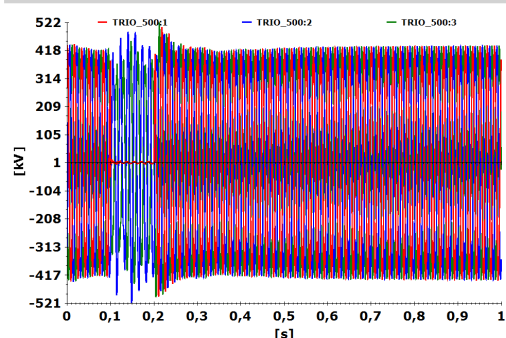
Tensão CA rms - Xingu 500kV



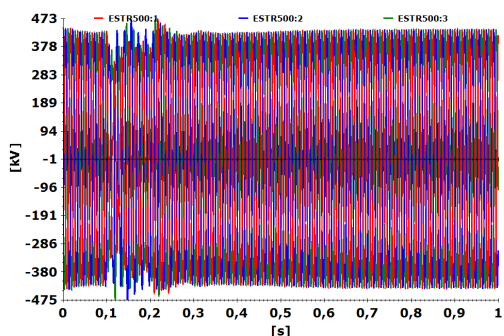
Tensão CA rms - Foz 500kV



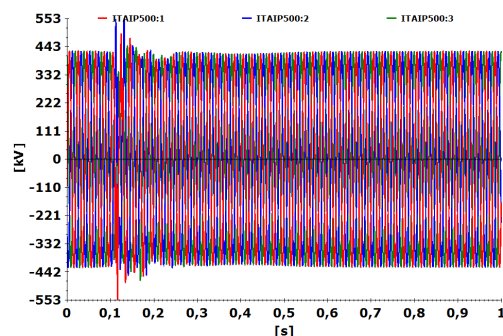
Tensão CA rms - Araraquara 500kV



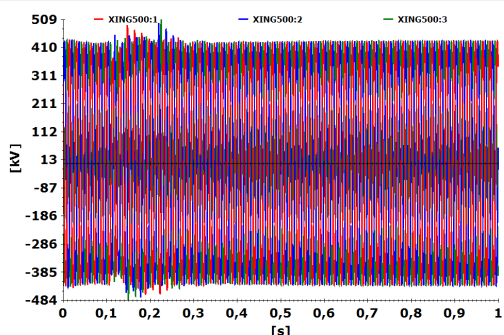
Tensão CA - Terminal Rio 500kV



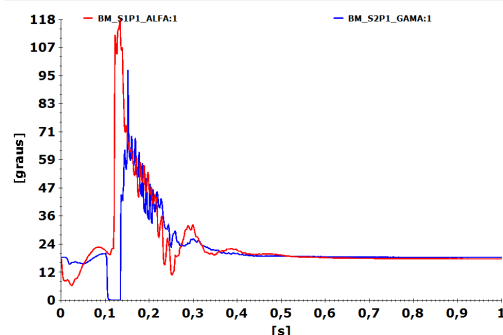
Tensão CA - Estreito 500kV



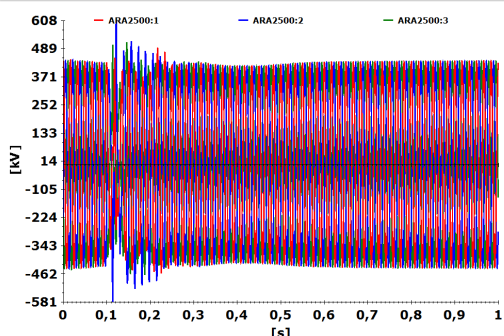
Tensão CA - Foz 500kV



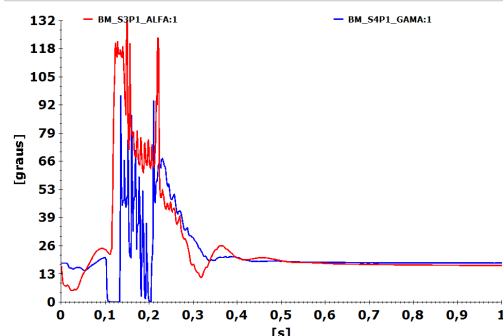
Tensão CA - Xingu 500kV



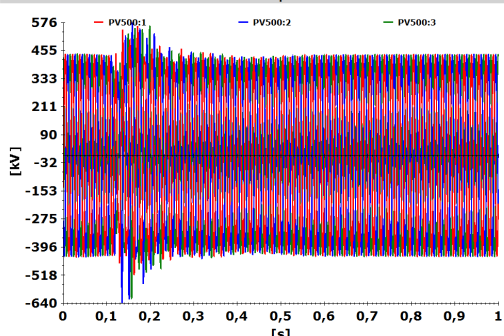
Ângulo de disparo (retificador) e extinção (inversor) - Belo Monte (Bipolo 1 XING-ESTR)



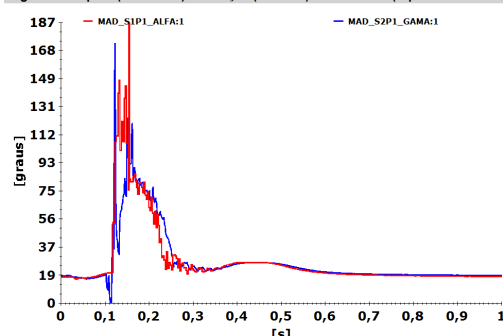
Tensão CA - Araraquara 500kV



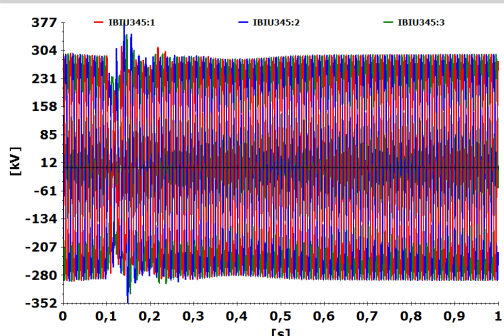
Ângulo de disparo (retificador) e extinção (inversor) - Belo Monte (Bipolo 2 XING-TRI)



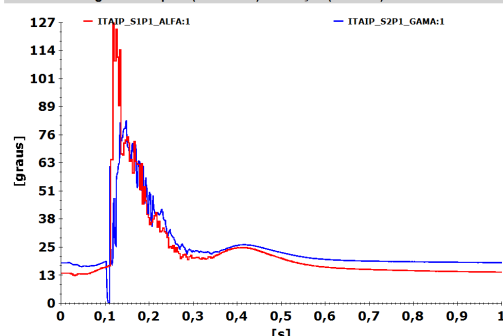
Tensão CA - Porto Velho 500kV



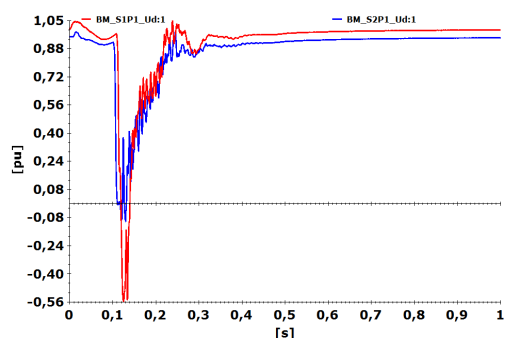
Ângulo de disparo (retificador) e extinção (inversor) - Madeira



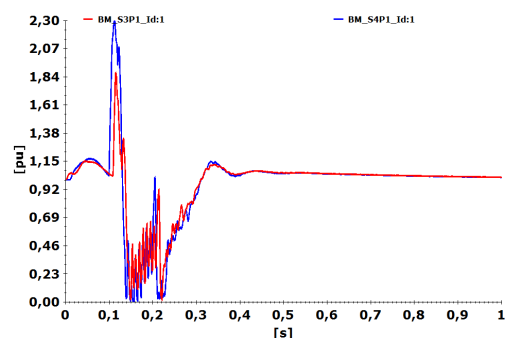
Tensão CA - Ibiuna 345kV



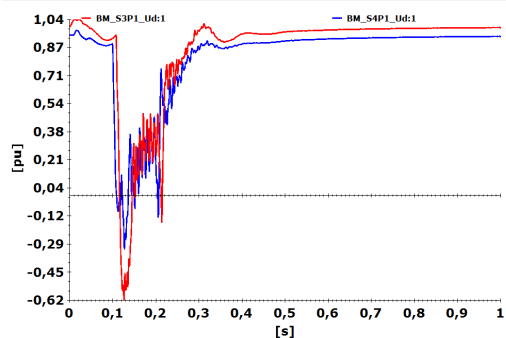
Ângulo de disparo (retificador) e extinção (inversor) - Itaipu



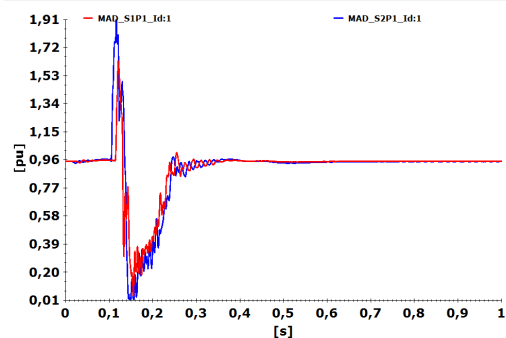
Tensão CC - Belo Monte (Bipolo 1 XING-ESTR)



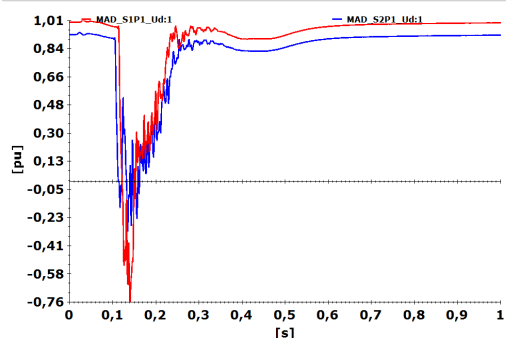
Corrente CC - Belo Monte (Bipolo 2 XING-TRIO)



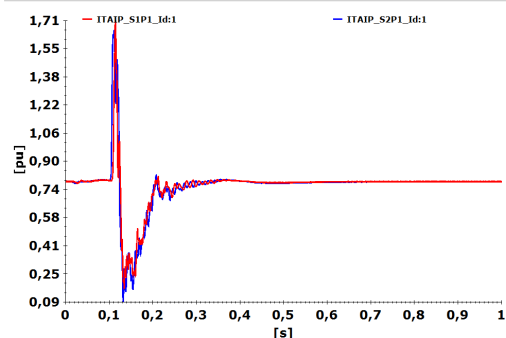
Tensão CC - Belo Monte (Bipolo 2 XING-TRIO)



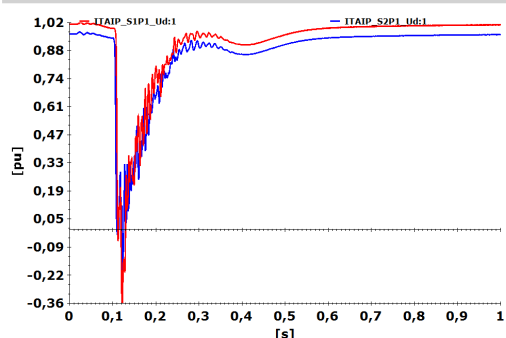
Corrente CC - Madeira



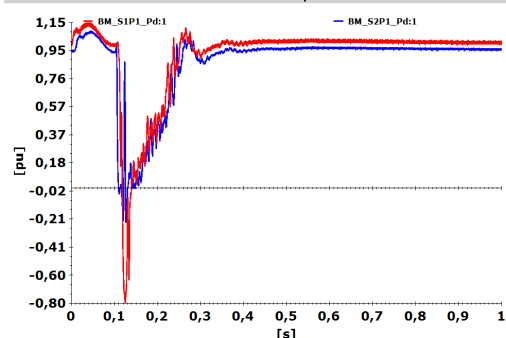
Tensão CC - Madeira



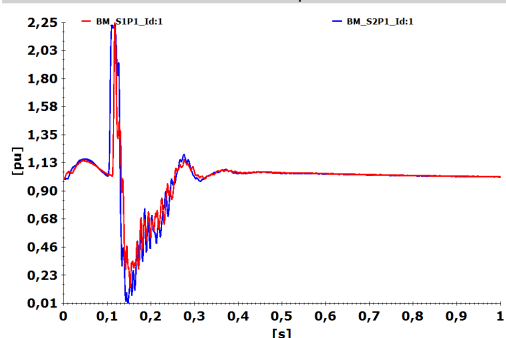
Corrente CC - Itaipu



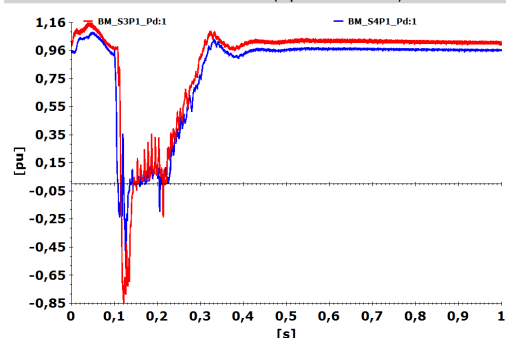
Tensão CC - Itaipu



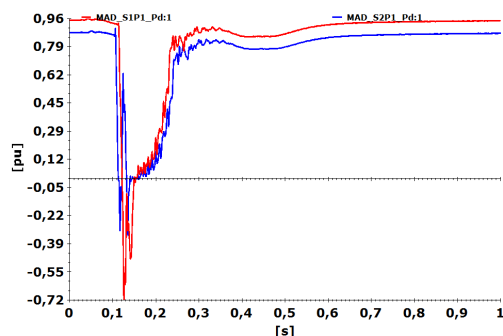
Potência CC - Belo Monte (Bipolo 1 XING-ESTR)



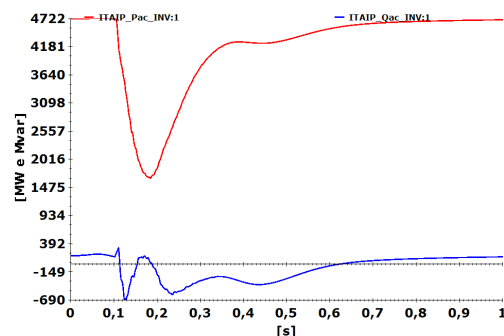
Corrente CC - Belo Monte (Bipolo 1 XING-ESTR)



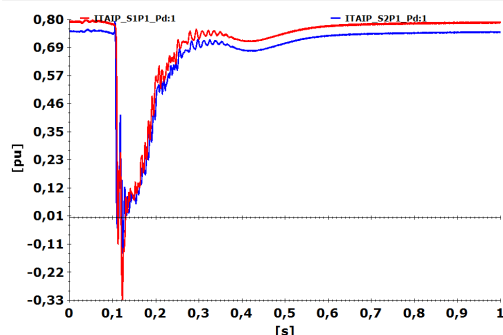
Potência CC - Belo Monte (Bipolo 2 XING-TRIO)



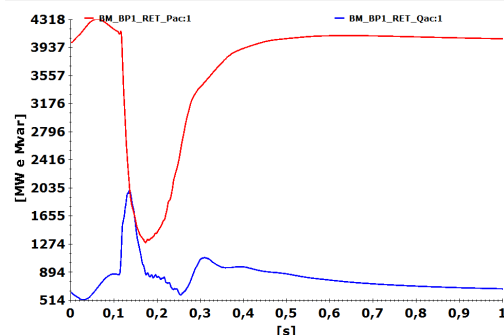
Potência CC - Madeira



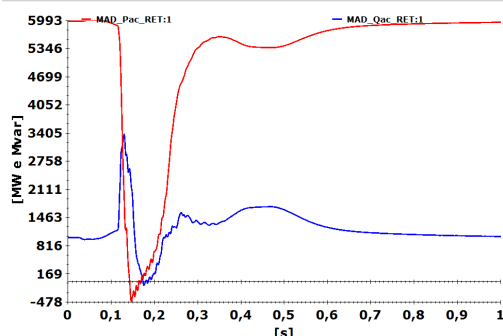
Potência CA ativa e reativa - Ibiuna 345 kV (Elo Itaipu)



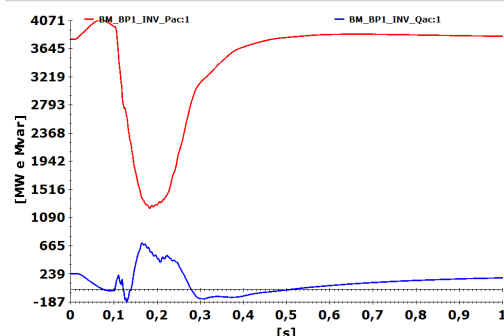
Potência CC - Itaipu



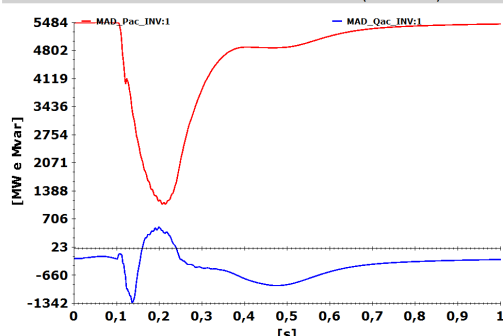
Potência CA ativa e reativa - Xingu 500 kV (Bipolo 1 - Belo Monte)



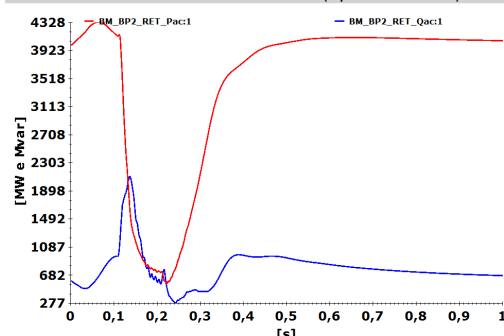
Potência CA ativa e reativa - Porto Velho 500 kV (Elo Madeira)



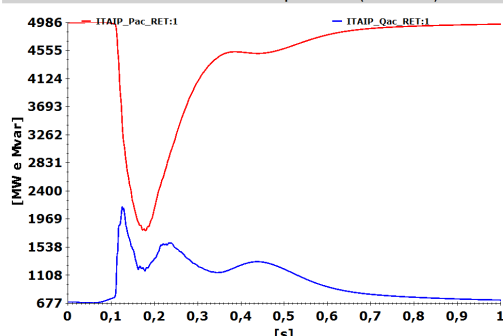
Potência CA ativa e reativa - Estreito 500 kV (Bipolo 1 - Belo Monte)



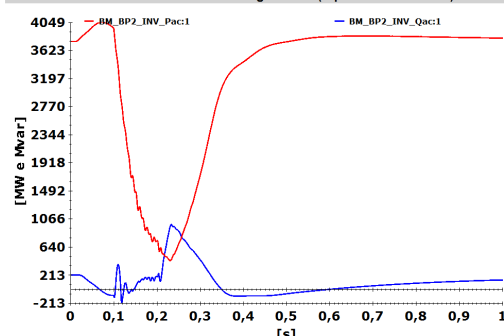
Potência CA ativa e reativa - Araraquara 500 kV (Elo Madeira)



Potência CA ativa e reativa - Xingu 500 kV (Bipolo 2 - Belo Monte)

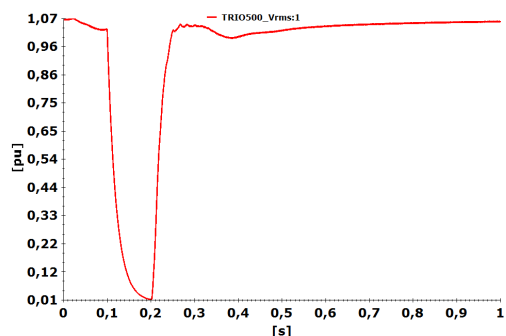


Potência CA ativa e reativa - Foz 500 kV (Elo Itaipu)

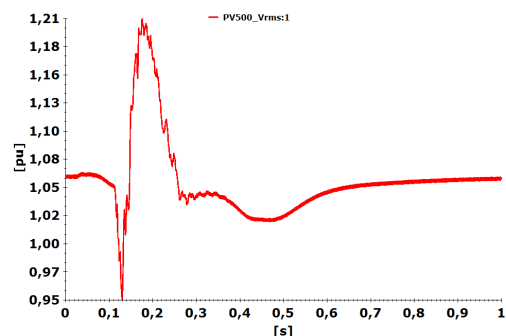


Potência CA ativa e reativa - T.Rio 500 kV (Bipolo 2 - Belo Monte)

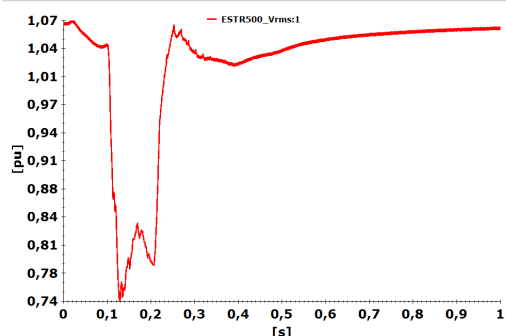
Curto-circuito trifásico em Terminal Rio 500 kV



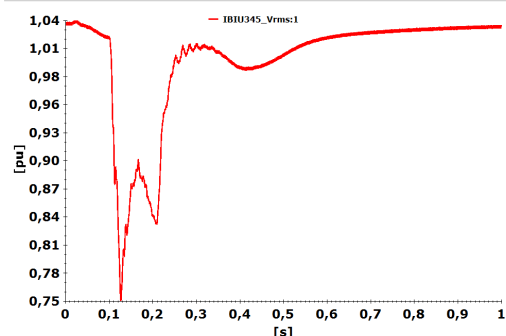
Tensão CA rms - Terminal Rio 500kV



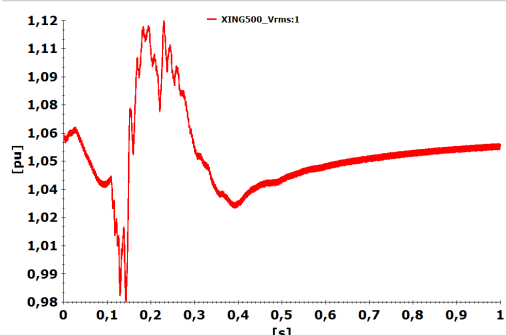
Tensão CA rms - Porto Velho 500kV



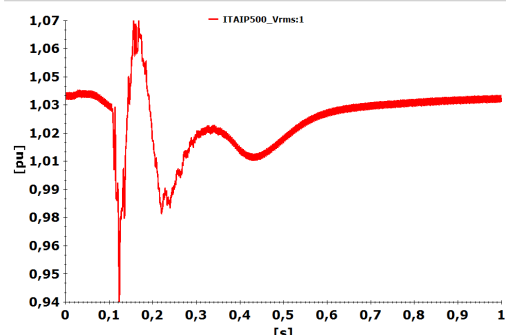
Tensão CA rms - Estreito 500kV



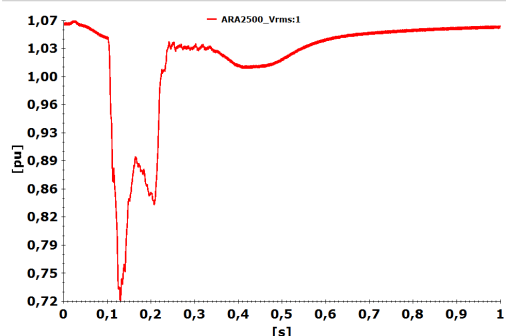
Tensão CA rms - Ibiuna 345kV



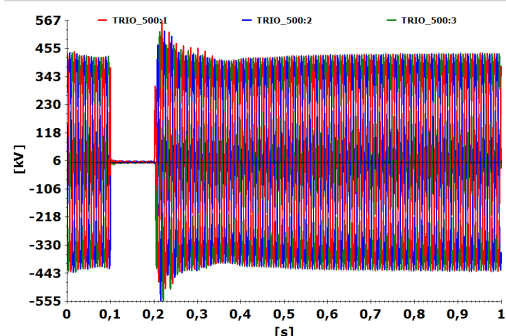
Tensão CA rms - Xingu 500kV



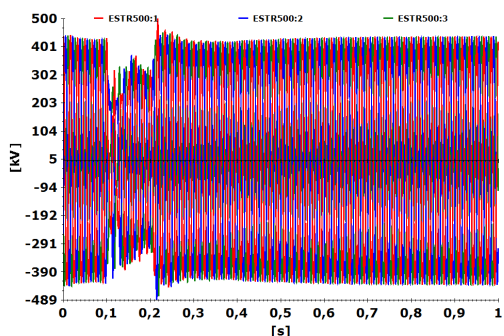
Tensão CA rms - Foz 500kV



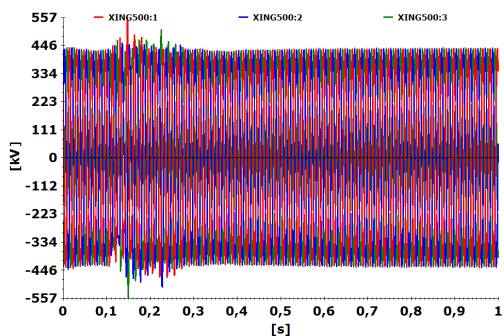
Tensão CA rms - Araraquara 500kV



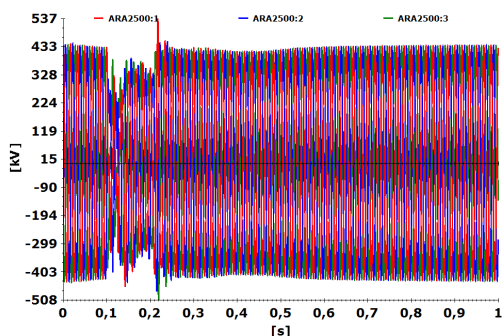
Tensão CA - Terminal Rio 500kV



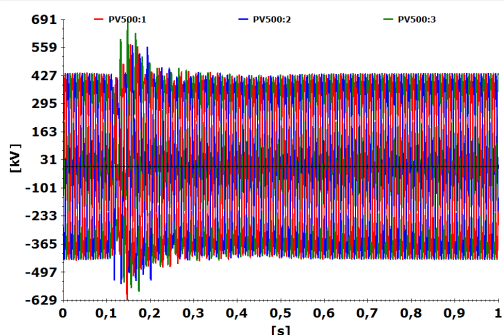
Tensão CA - Estreito 500kV



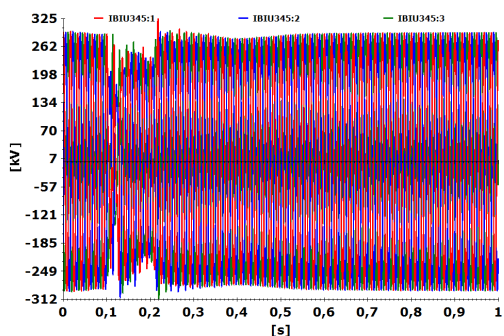
Tensão CA - Xingu 500kV



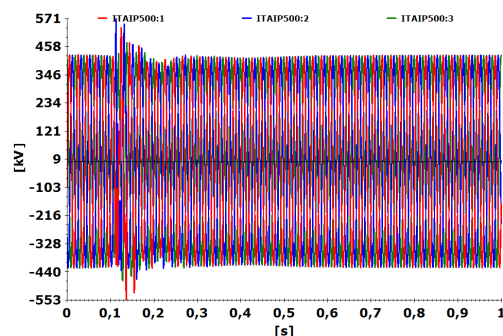
Tensão CA - Araraquara 500kV



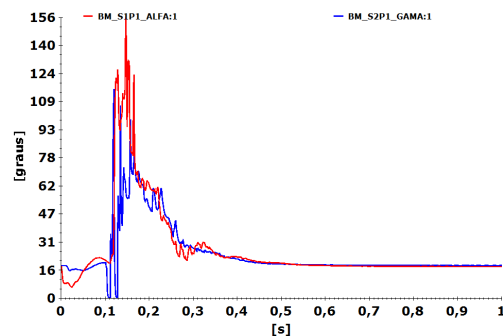
Tensão CA - Porto Velho 500kV



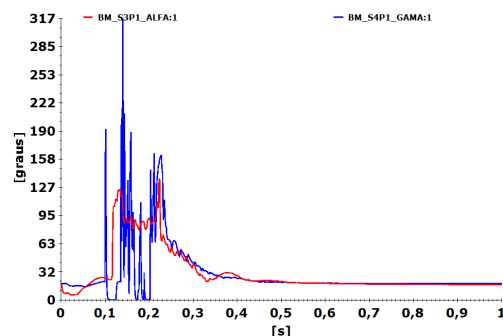
Tensão CA - Ibiuna 345kV



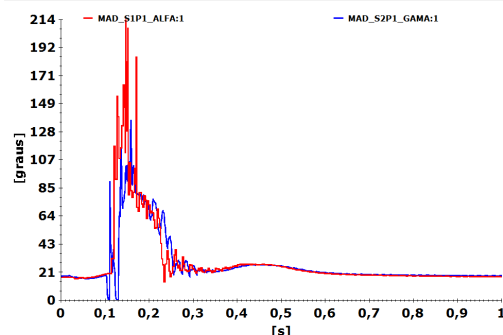
Tensão CA - Foz 500kV



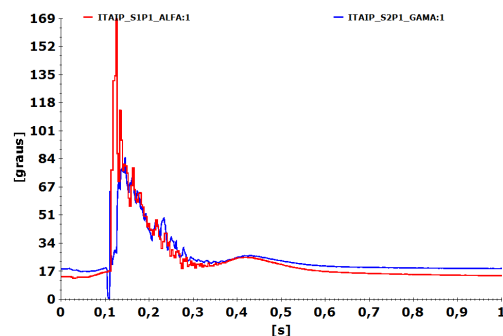
Ângulo de disparo (retificador) e extinção (inversor) - Belo Monte (Bipolo 1 XING-ESTR)



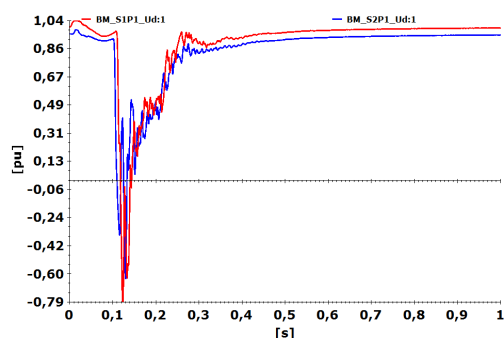
Ângulo de disparo (retificador) e extinção (inversor) - Belo Monte (Bipolo 2 XING-TRI)



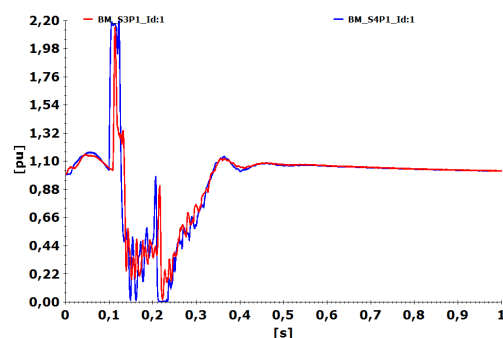
Ângulo de disparo (retificador) e extinção (inversor) - Madeira



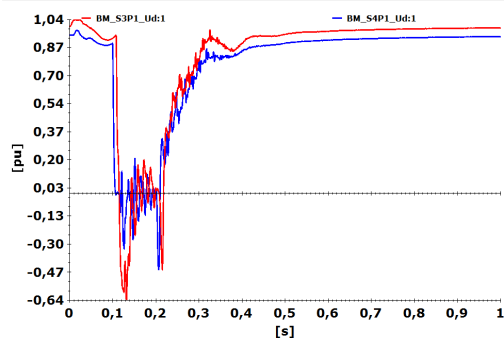
Ângulo de disparo (retificador) e extinção (inversor) - Itaipu



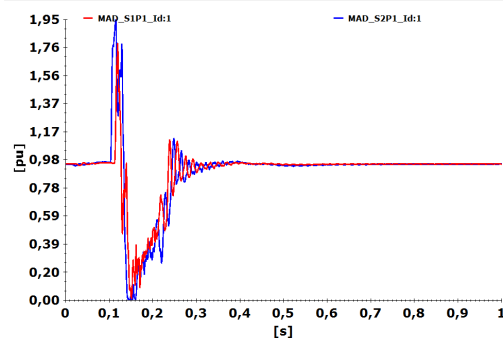
Tensão CC - Belo Monte (Bipolo 1 XING-ESTR)



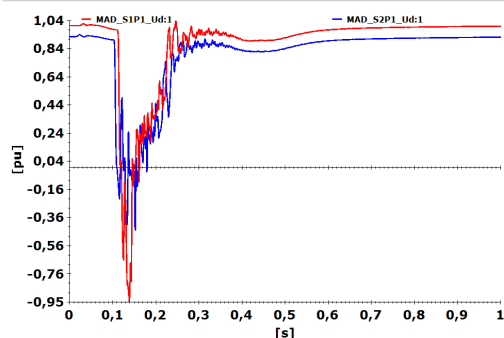
Corrente CC - Belo Monte (Bipolo 2 XING-TRIO)



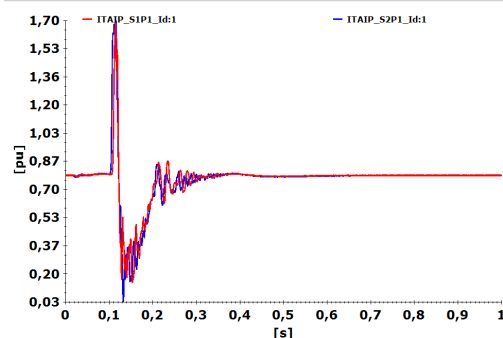
Tensão CC - Belo Monte (Bipolo 2 XING-TRIO)



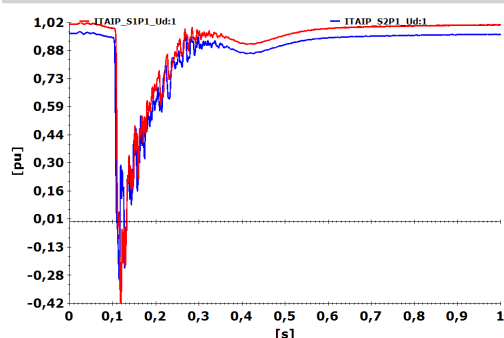
Corrente CC - Madeira



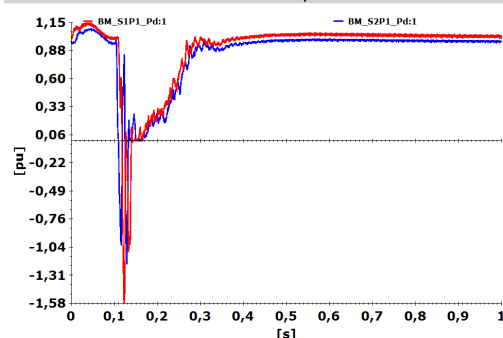
Tensão CC - Madeira



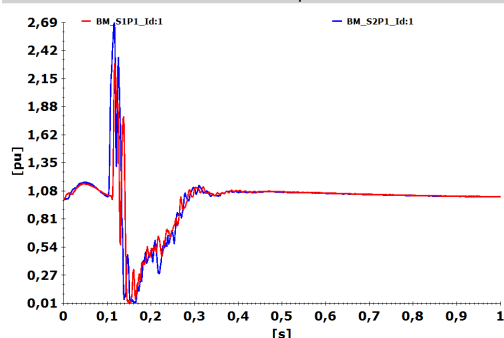
Corrente CC - Itaipu



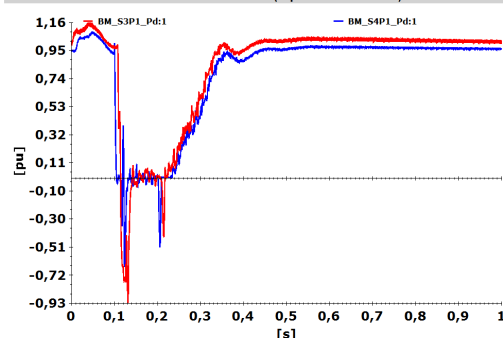
Tensão CC - Itaipu



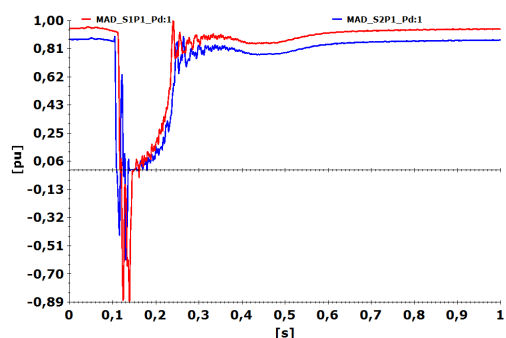
Potência CC - Belo Monte (Bipolo 1 XING-ESTR)



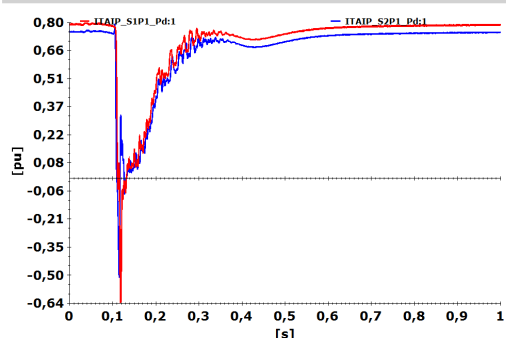
Corrente CC - Belo Monte (Bipolo 1 XING-ESTR)



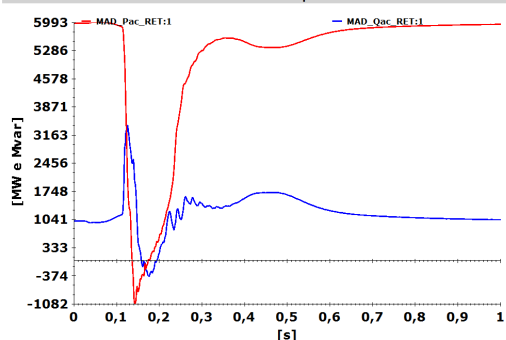
Potência CC - Belo Monte (Bipolo 2 XING-TRIO)



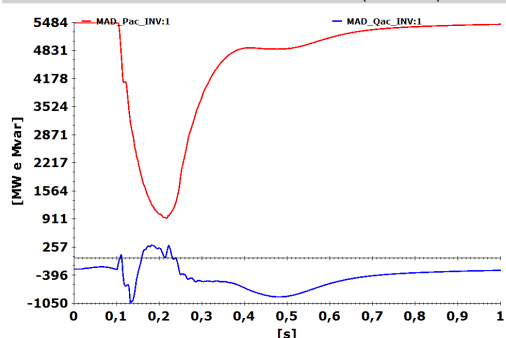
Potência CC - Madeira



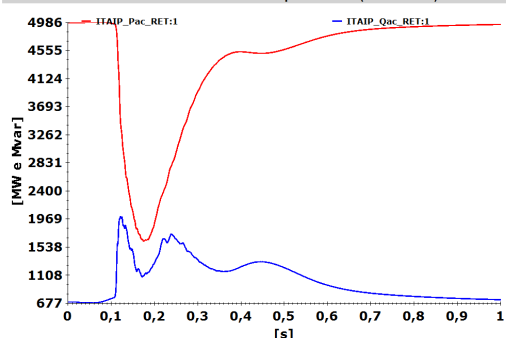
Potência CC - Itaú



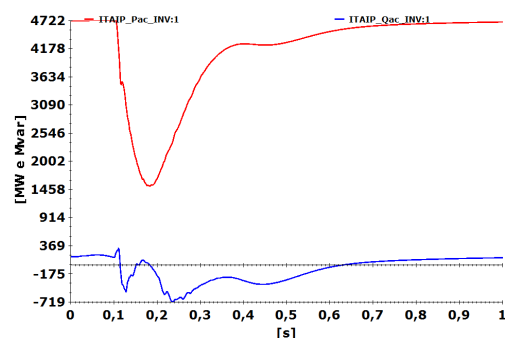
Potência CA ativa e reativa - Porto Velho 500 kV (Elo Madeira)



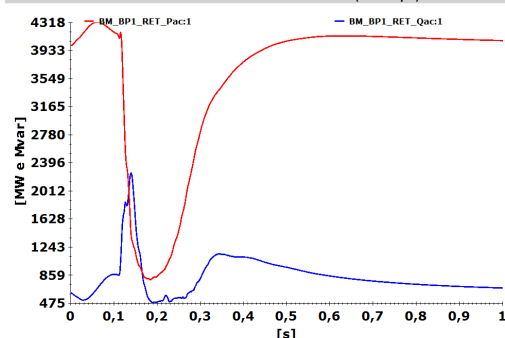
Potência CA ativa e reativa - Araraquara 500 kV (Elo Madeira)



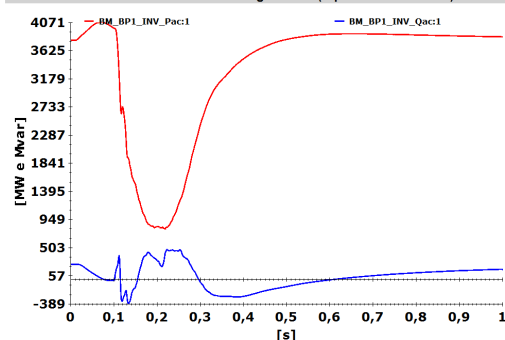
Potência CA ativa e reativa - Foz 500 kV (Elo Itaú)



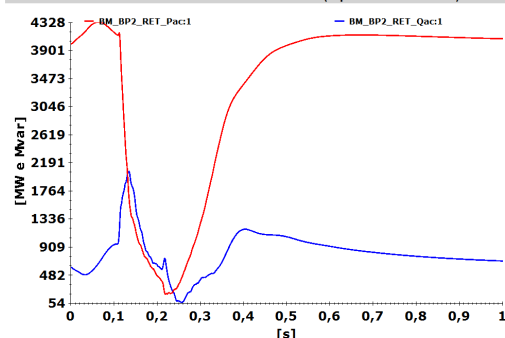
Potência CA ativa e reativa - Ibiuna 345 kV (Elo Itaú)



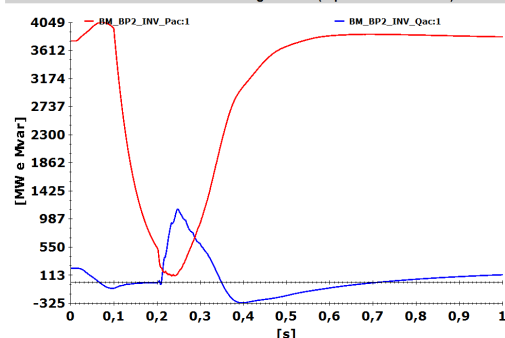
Potência CA ativa e reativa - Xingu 500 kV (Bipolo 1 - Belo Monte)



Potência CA ativa e reativa - Estreito 500 kV (Bipolo 1 - Belo Monte)

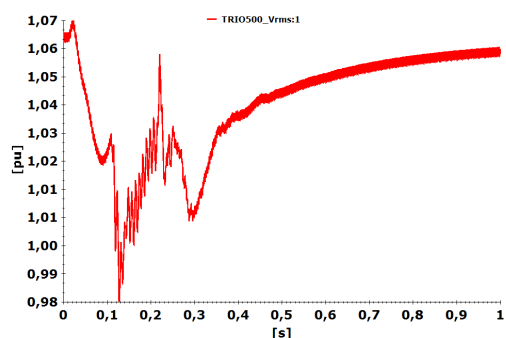


Potência CA ativa e reativa - Xingu 500 kV (Bipolo 2 - Belo Monte)

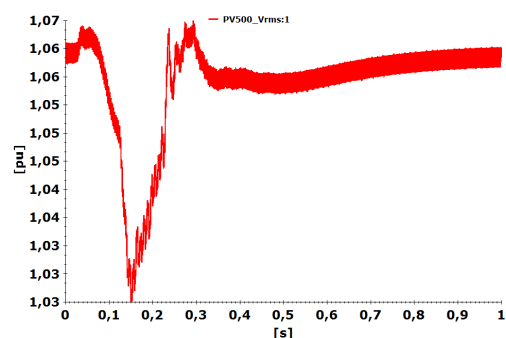


Potência CA ativa e reativa - T.Rio 500 kV (Bipolo 2 - Belo Monte)

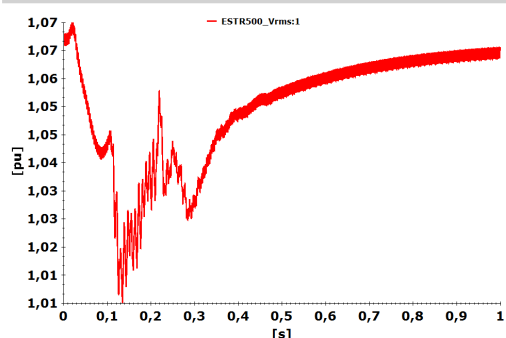
Curto-circuito monofásico em Xingu 500 kV



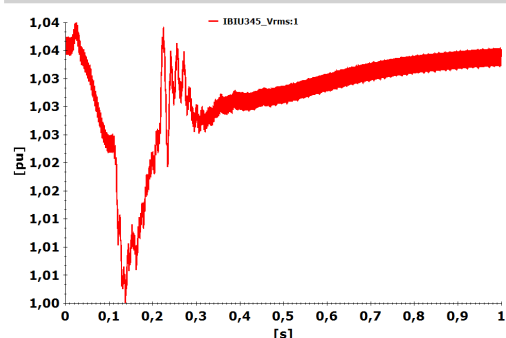
Tensão CA rms - Terminal Rio 500kV



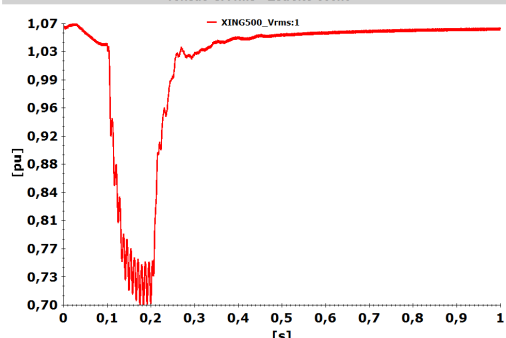
Tensão CA rms - Porto Velho 500kV



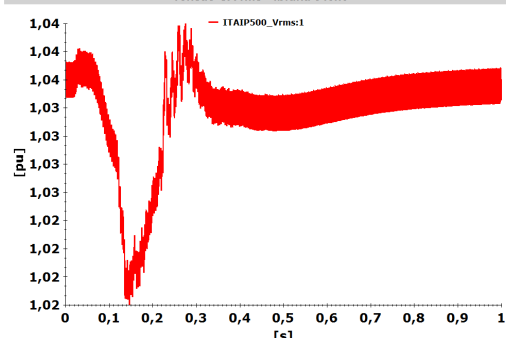
Tensão CA rms - Estreito 500kV



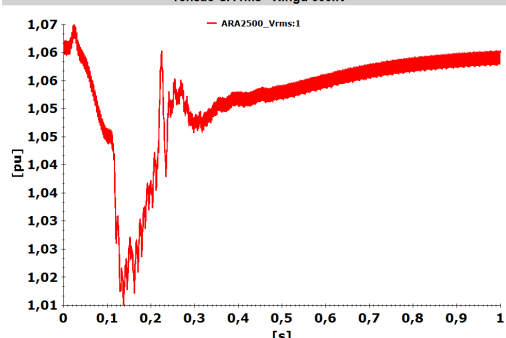
Tensão CA rms - Ibiuna 345kV



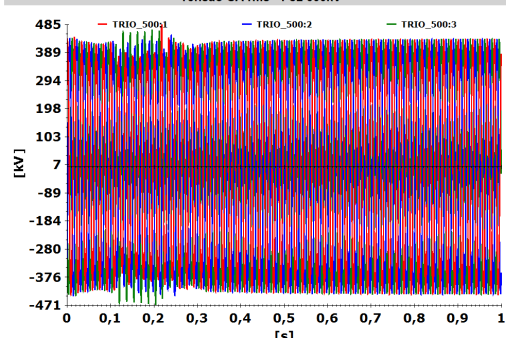
Tensão CA rms - Xingu 500kV



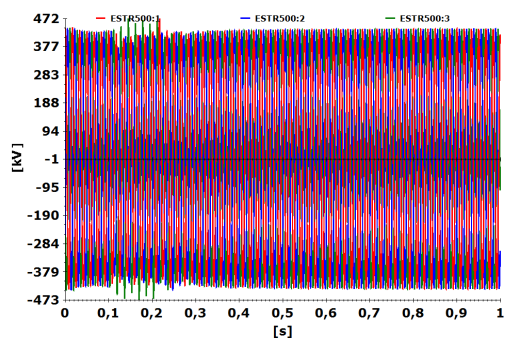
Tensão CA rms - Foz 500kV



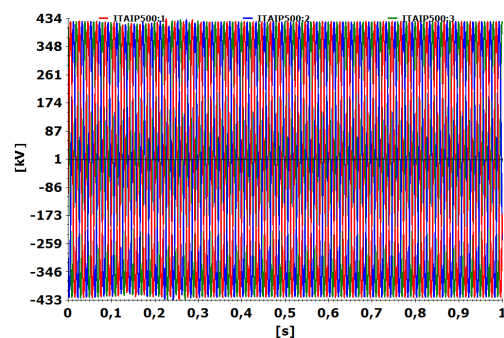
Tensão CA rms - Araraquara 500kV



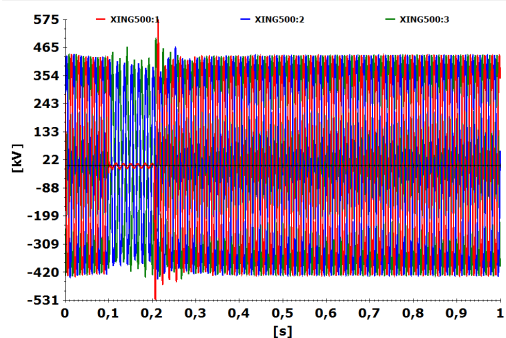
Tensão CA - Terminal Rio 500kV



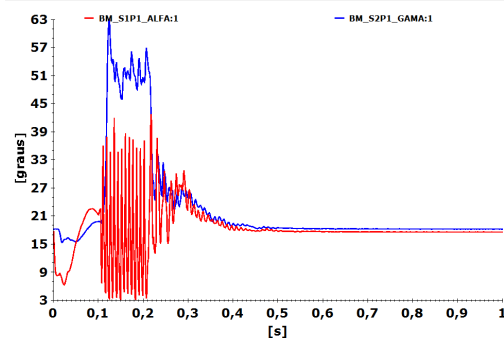
Tensão CA - Estreito 500kV



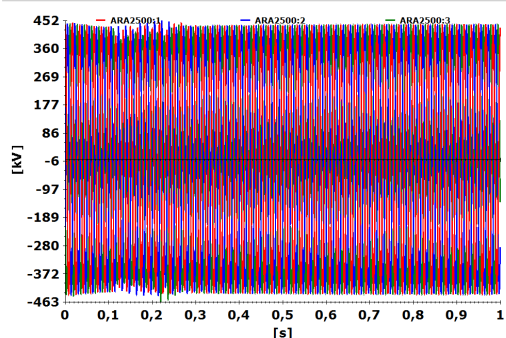
Tensão CA - Foz 500kV



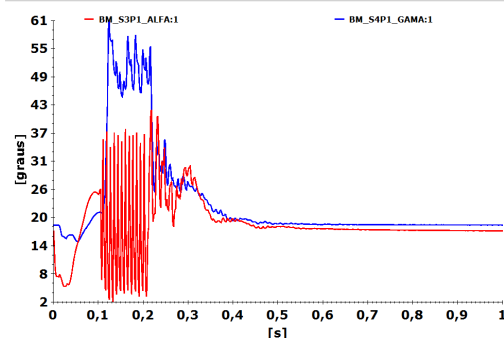
Tensão CA - Xingu 500kV



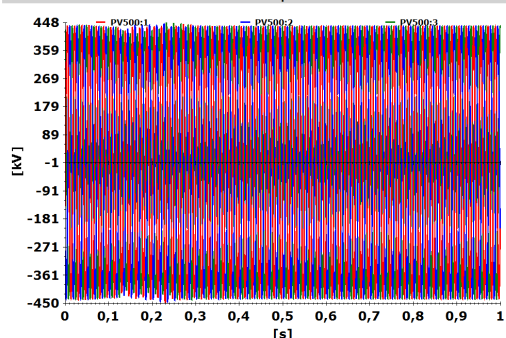
Ângulo de disparo (retificador) e extinção (inversor) - Belo Monte (Bipolo 1 XING-ESTR)



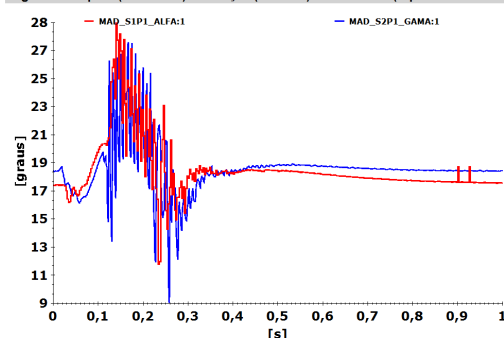
Tensão CA - Araraquara 500kV



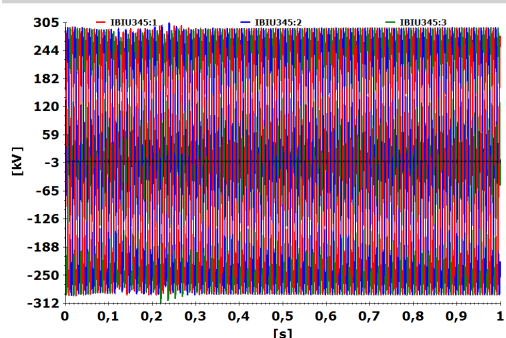
Ângulo de disparo (retificador) e extinção (inversor) - Belo Monte (Bipolo 2 XING-TRI)



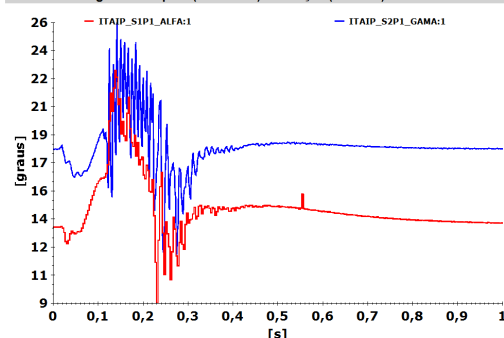
Tensão CA - Porto Velho 500kV



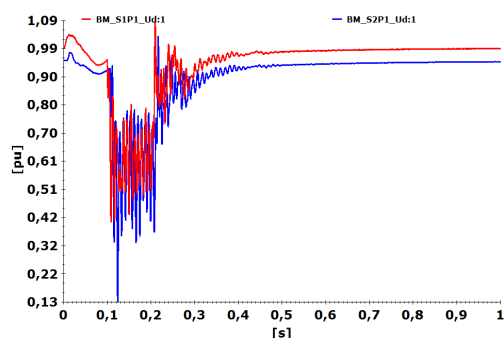
Ângulo de disparo (retificador) e extinção (inversor) - Madeira



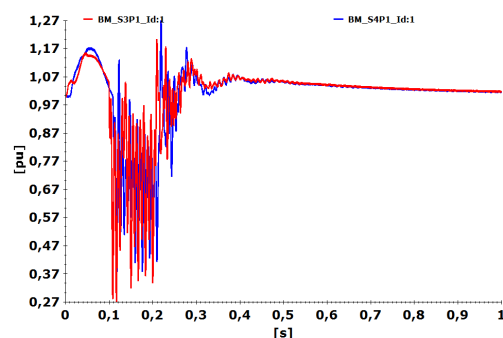
Tensão CA - Ibiuna 345kV



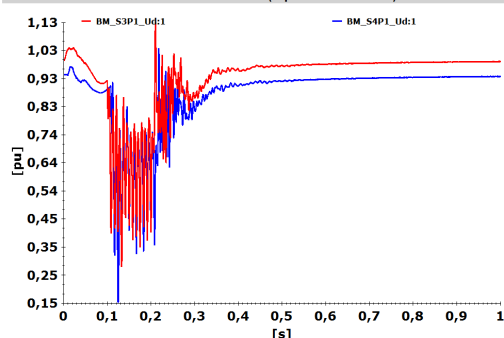
Ângulo de disparo (retificador) e extinção (inversor) - Itaipu



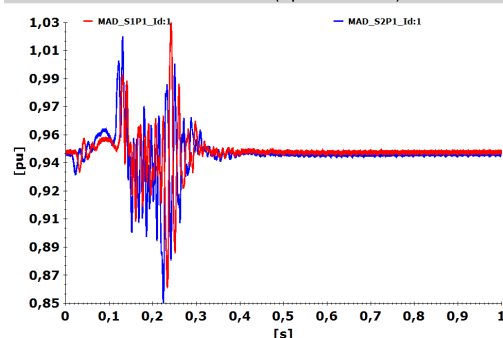
Tensão CC - Belo Monte (Bipolo 1 XING-ESTR)



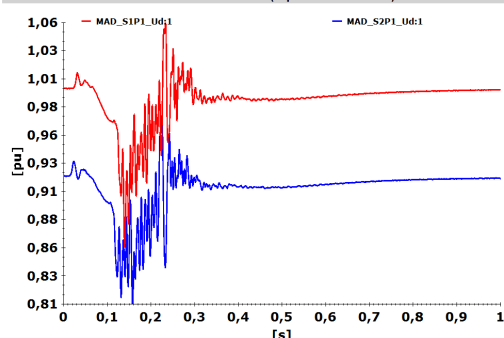
Corrente CC - Belo Monte (Bipolo 2 XING-TRIO)



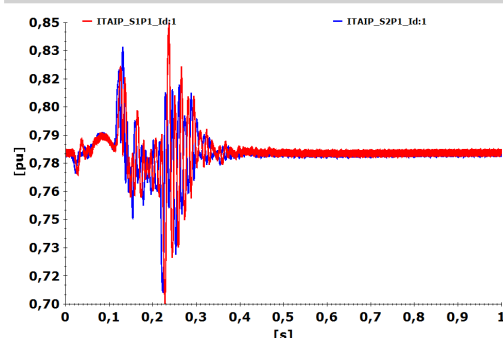
Tensão CC - Belo Monte (Bipolo 2 XING-TRIO)



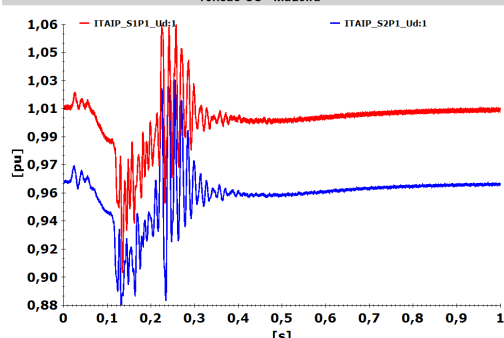
Corrente CC - Madeira



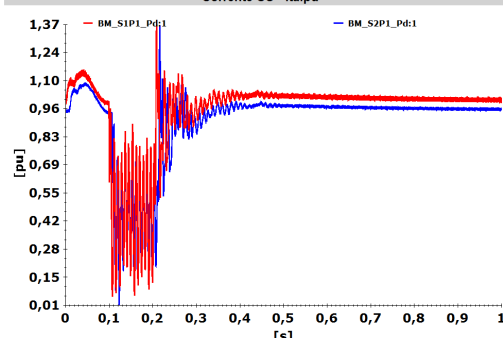
Tensão CC - Madeira



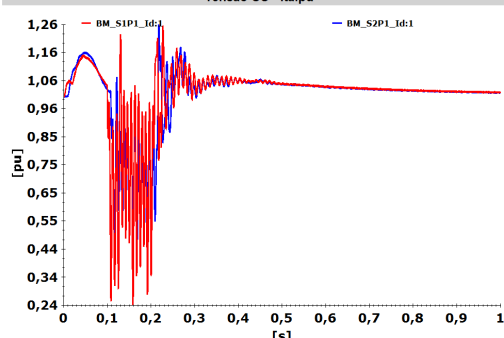
Corrente CC - Itaipu



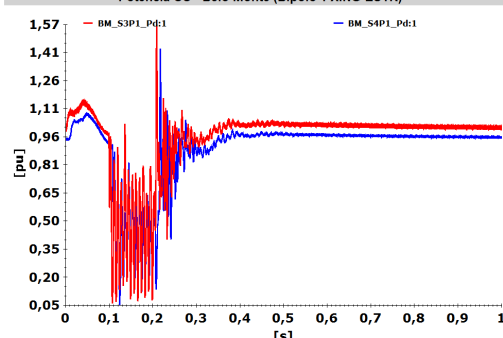
Tensão CC - Itaipu



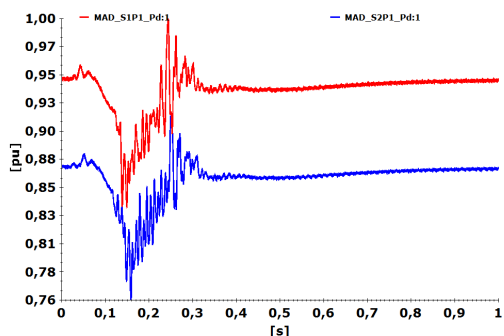
Potência CC - Belo Monte (Bipolo 1 XING-ESTR)



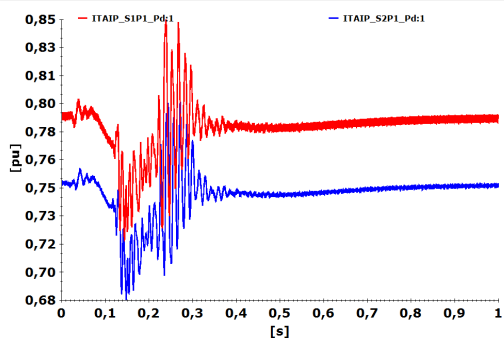
Corrente CC - Belo Monte (Bipolo 2 XING-TRIO)



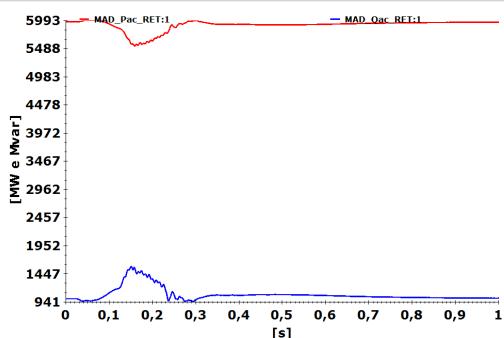
Potência CC - Belo Monte (Bipolo 2 XING-TRIO)



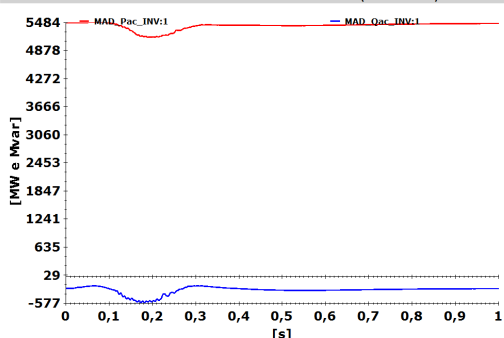
Potência CC - Madeira



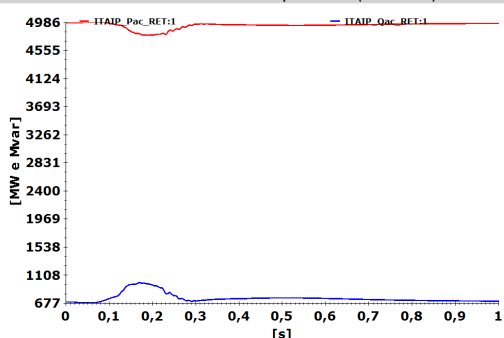
Potência CC - Itaipu



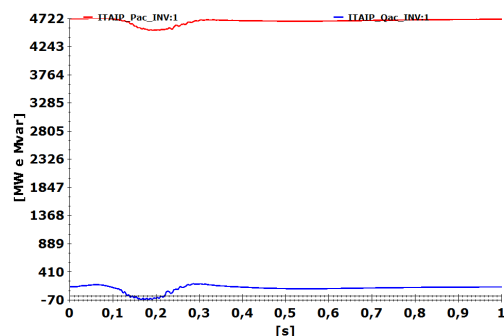
Potência CA ativa e reativa - Porto Velho 500 kV (Elo Madeira)



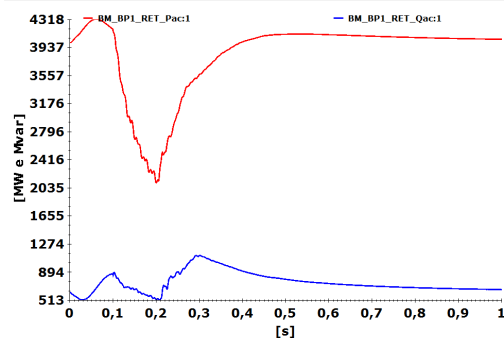
Potência CA ativa e reativa - Araraquara 500 kV (Elo Madeira)



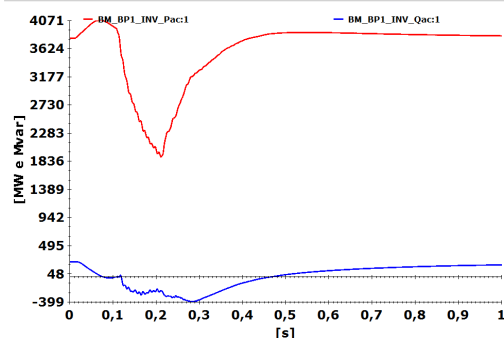
Potência CA ativa e reativa - Foz 500 kV (Elo Itaipu)



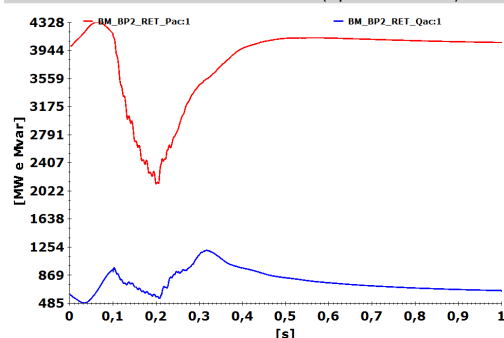
Potência CA ativa e reativa - Ibiuna 345 kV (Elo Itaipu)



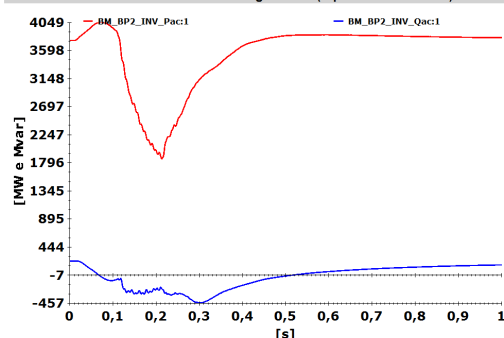
Potência CA ativa e reativa - Xingu 500 kV (Bipolo 1 - Belo Monte)



Potência CA ativa e reativa - Estreito 500 kV (Bipolo 1 - Belo Monte)

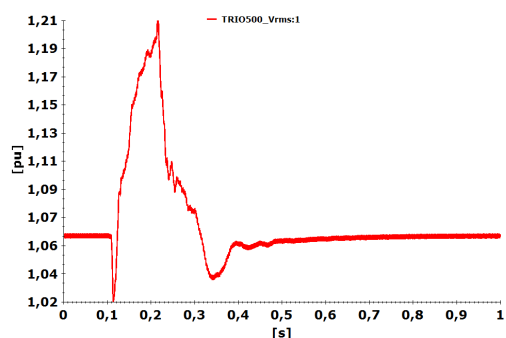


Potência CA ativa e reativa - Xingu 500 kV (Bipolo 2 - Belo Monte)

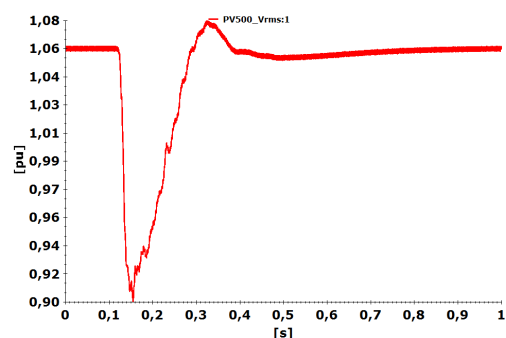


Potência CA ativa e reativa - T.Rio 500 kV (Bipolo 2 - Belo Monte)

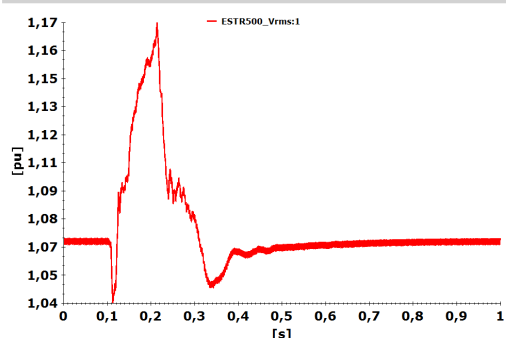
Curto-circuito trifásico em Xingu 500 kV



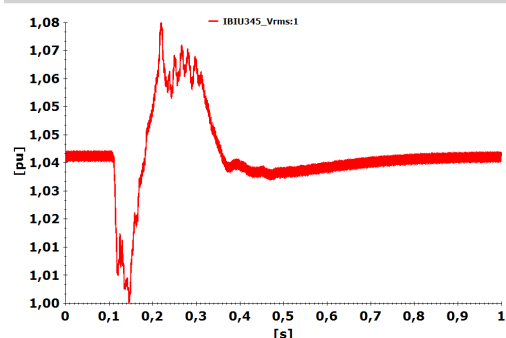
Tensão CA rms - Terminal Rio 500kV



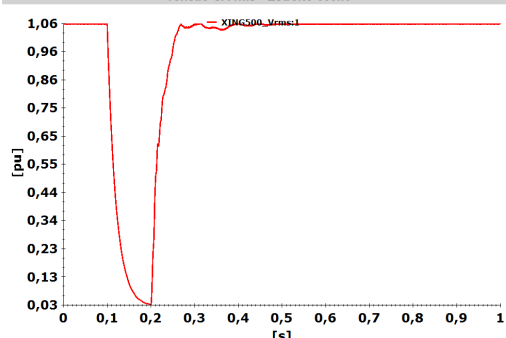
Tensão CA rms - Porto Velho 500kV



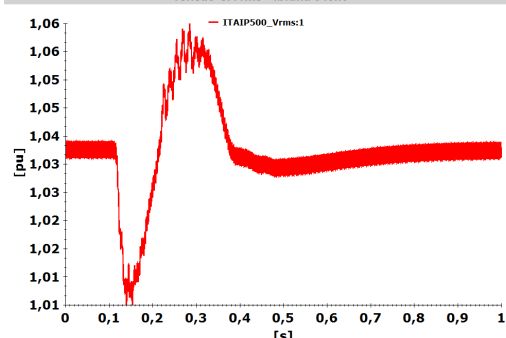
Tensão CA rms - Estreito 500kV



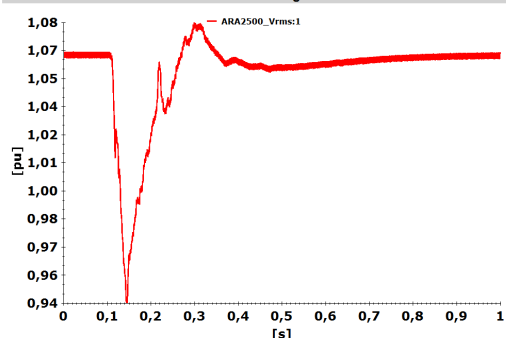
Tensão CA rms - Ibiuna 345kV



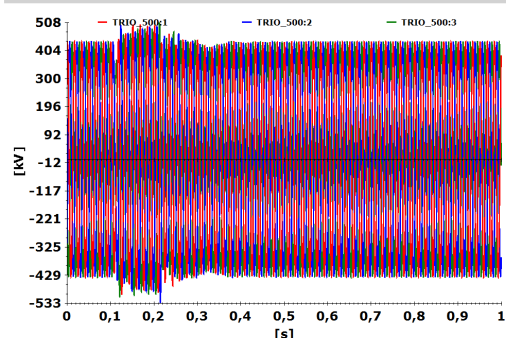
Tensão CA rms - Xingu 500kV



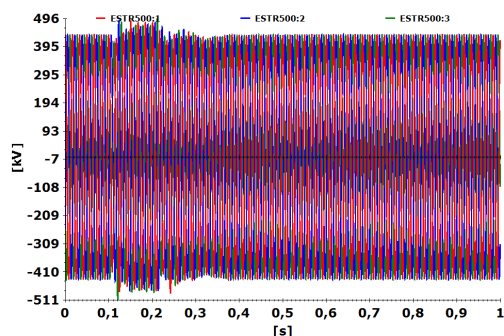
Tensão CA rms - Foz 500kV



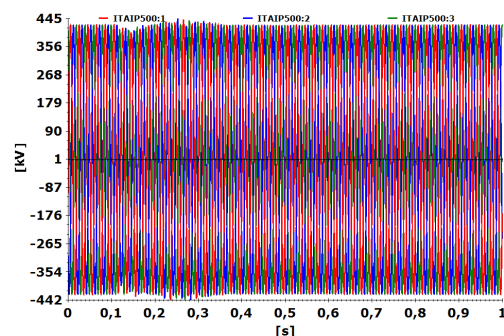
Tensão CA rms - Araraquara 500kV



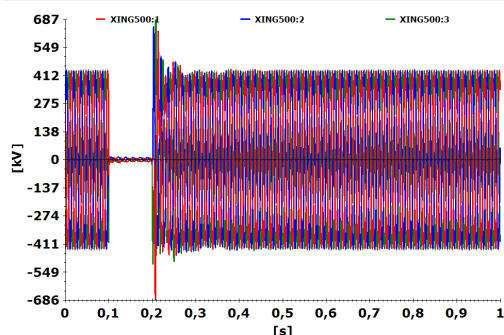
Tensão CA - Terminal Rio 500kV



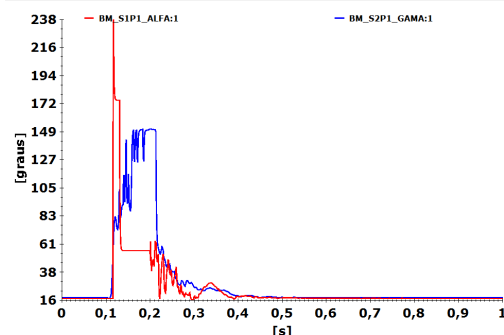
Tensão CA - Estreito 500kV



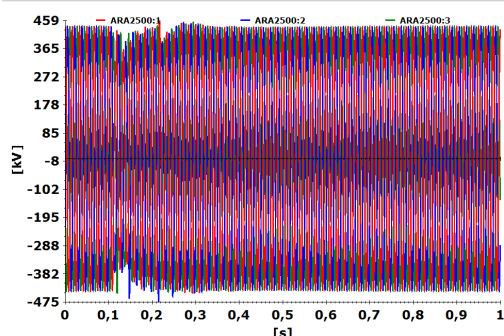
Tensão CA - Foz 500kV



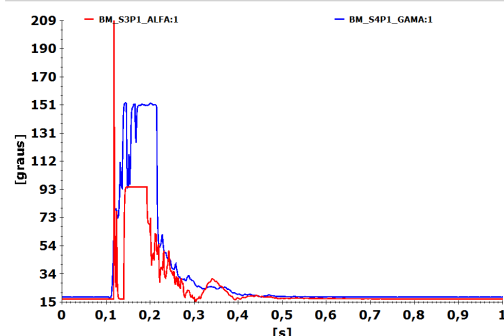
Tensão CA - Xingu 500kV



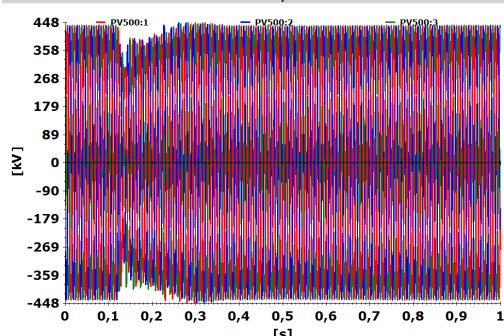
Ângulo de disparo (retificador) e extinção (inversor) - Belo Monte (Bipolo 1 XING-ESTR)



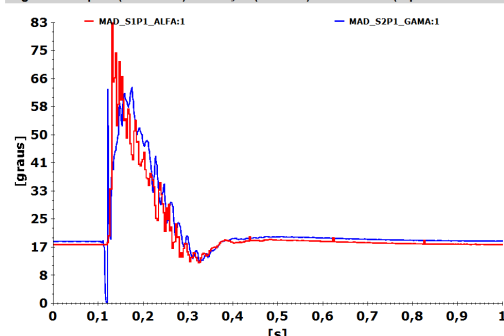
Tensão CA - Araraquara 500kV



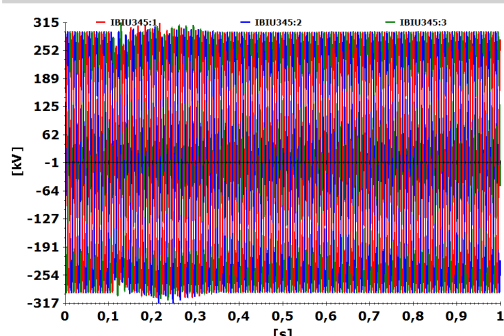
Ângulo de disparo (retificador) e extinção (inversor) - Belo Monte (Bipolo 2 XING-TRI)



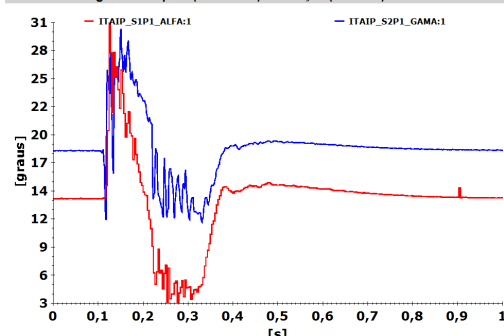
Tensão CA - Porto Velho 500kV



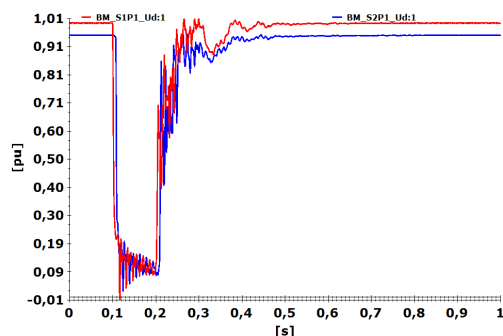
Ângulo de disparo (retificador) e extinção (inversor) - Madeira



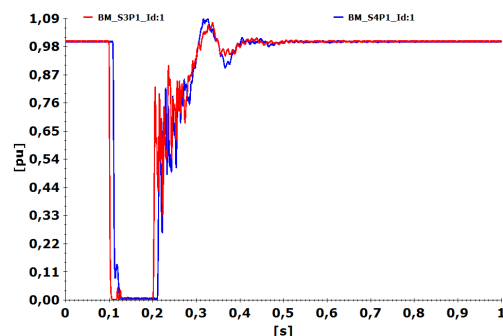
Tensão CA - Ibiuna 345kV



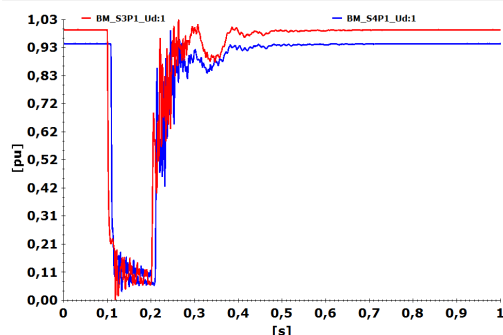
Ângulo de disparo (retificador) e extinção (inversor) - Itaipu



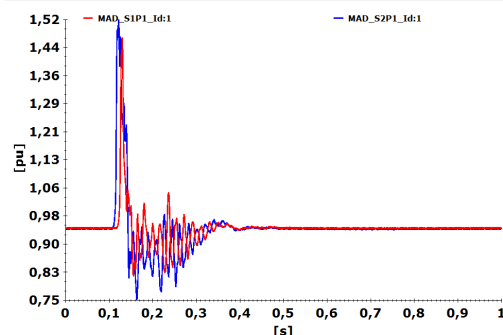
Tensão CC - Belo Monte (Bipolo 1 XING-ESTR)



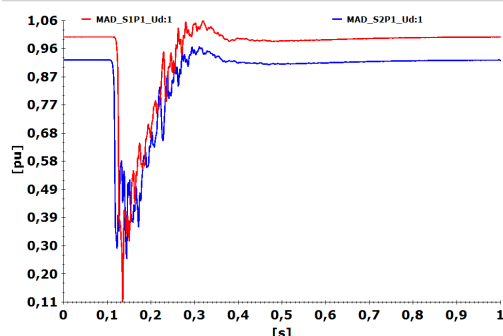
Corrente CC - Belo Monte (Bipolo 2 XING-TRIO)



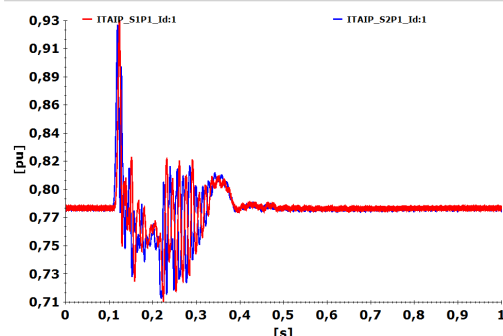
Tensão CC - Belo Monte (Bipolo 2 XING-TRIO)



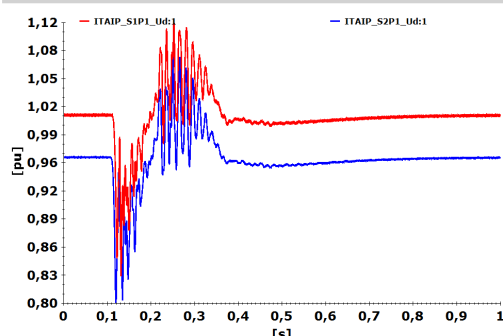
Corrente CC - Madeira



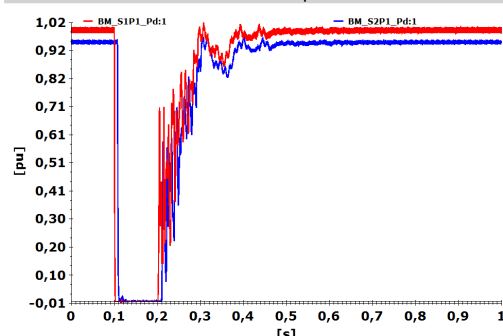
Tensão CC - Madeira



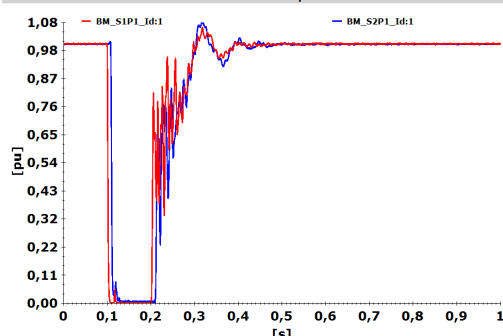
Corrente CC - Itaipu



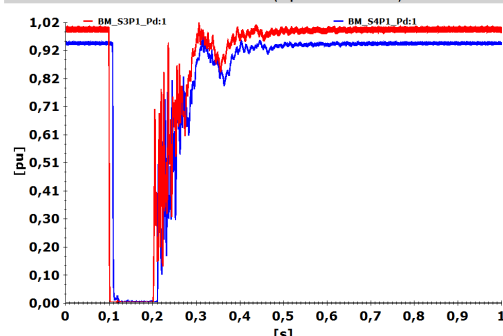
Tensão CC - Itaipu



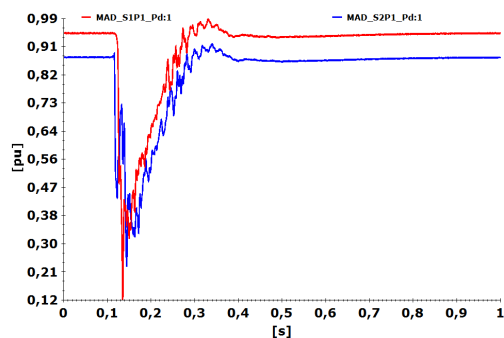
Potência CC - Belo Monte (Bipolo 1 XING-ESTR)



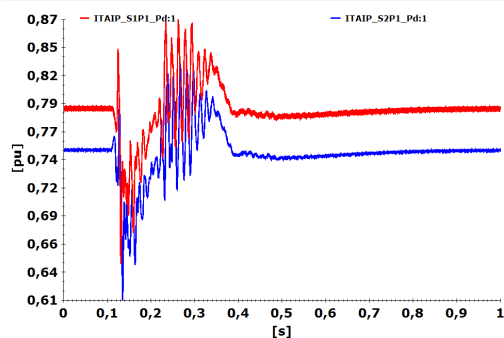
Corrente CC - Belo Monte (Bipolo 2 XING-TRIO)



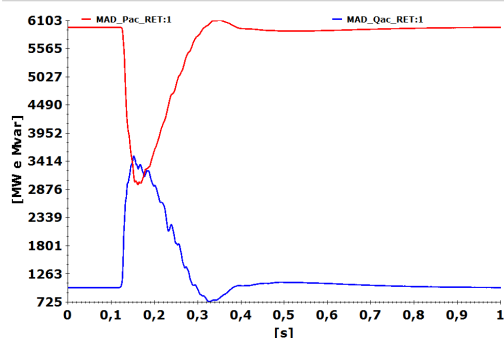
Potência CC - Belo Monte (Bipolo 2 XING-TRIO)



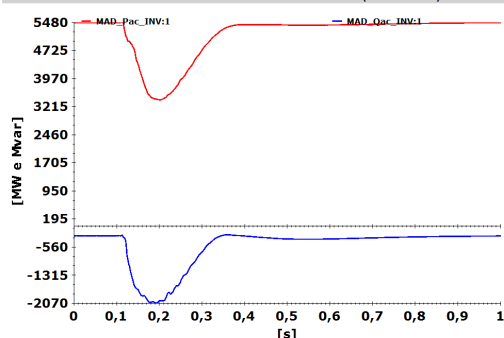
Potência CC - Madeira



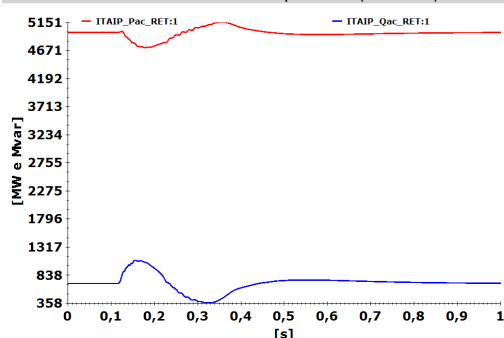
Potência CC - Itaú



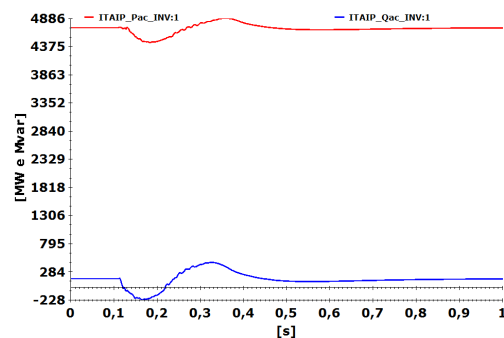
Potência CA ativa e reativa - Porto Velho 500 kV (Elo Madeira)



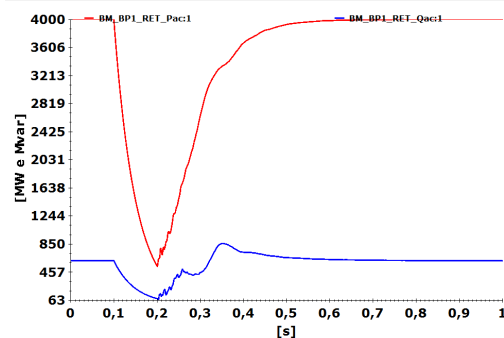
Potência CA ativa e reativa - Araraquara 500 kV (Elo Madeira)



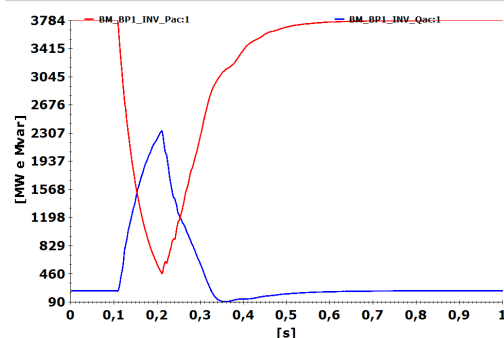
Potência CA ativa e reativa - Foz 500 kV (Elo Itaú)



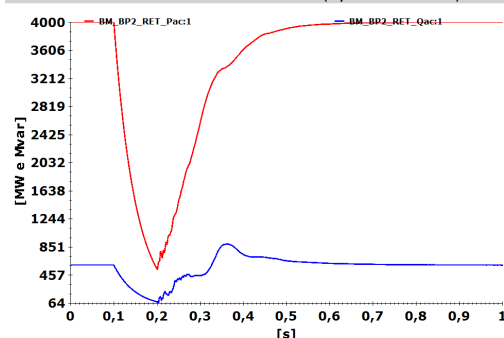
Potência CA ativa e reativa - Ibiuna 345 kV (Elo Itaú)



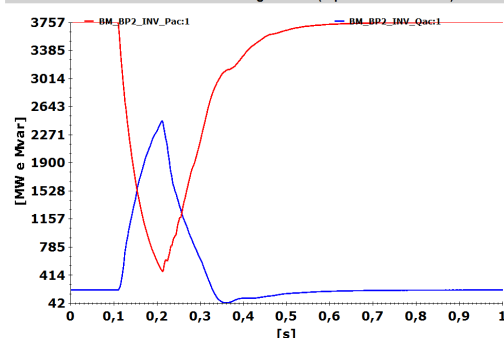
Potência CA ativa e reativa - Xingu 500 kV (Bipolo 1 - Belo Monte)



Potência CA ativa e reativa - Estreito 500 kV (Bipolo 1 - Belo Monte)



Potência CA ativa e reativa - Xingu 500 kV (Bipolo 2 - Belo Monte)



Potência CA ativa e reativa - T.Rio 500 kV (Bipolo 2 - Belo Monte)

