



Empresa de Pesquisa Energética

ESTUDOS PARA LICITAÇÃO DA EXPANSÃO DA TRANSMISSÃO

DETALHAMENTO DA ALTERNATIVA DE REFERÊNCIA: RELATÓRIO R2

*Elo de Corrente Contínua \pm 800 kV Graça Aranha – Silvânia
– Parte II: Transitórios Eletromagnéticos*

Janeiro de 2023

(Esta página foi intencionalmente deixada em branco para o adequado alinhamento de páginas na impressão com sigla opção frente e verso)



GOVERNO FEDERAL
MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA

Ministério de Minas e Energia

Ministro

Alexandre Silveira de Oliveira

Secretário-Executivo do MME

Secretário de Planejamento e Desenvolvimento Energético

Secretário de Energia Elétrica

Secretário de Petróleo, Gás Natural e Biombustíveis

Secretário de Geologia, Mineração e Transformação Mineral

ESTUDOS PARA A LICITAÇÃO DA EXPANSÃO DA TRANSMISSÃO

DETALHAMENTO DA ALTERNATIVA DE REFERÊNCIA: RELATÓRIO R2

*Elo de Corrente Contínua \pm 800 kV
Graça Aranha – Silvânia – Parte II:
Transitórios Eletromagnéticos*



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

Thiago Vasconcellos Barral Ferreira

Diretor de Estudos Econômico-Energéticos e Ambientais

Giovani Vitória Machado

Diretor de Estudos de Energia Elétrica

Thiago Vasconcellos Barral Ferreira (interino)

Diretor de Estudos de Petróleo, Gás e Biocombustíveis

Heloisa Borges Bastos Esteves

Diretor de Gestão Corporativa

Ângela Regina Livino de Carvalho

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

Sede

Esplanada dos Ministérios, Bloco "U", sala 744
70065-900 - Brasília - DF

Escritório Central

Praça Pio X, nº 54
20091-040 - Rio de Janeiro - RJ

Coordenação Geral

Thiago Vasconcellos Barral Ferreira

Coordenação Executiva

Thiago de Faria Rocha Dourado Martins

Coordenação Técnica

Daniel José Tavares de Souza

Equipe Técnica

Bruno Scarpa Alves da Silveira
Dourival de Souza Carvalho Junior
Fabiano Schmidt
Rodrigo Rodrigues Cabral
Tiago Campos Rizzotto
Thais Pacheco Teixeira

Nº EPE-DEE-RE-002/2023-rev0

Data: 12/01/2023

(Esta página foi intencionalmente deixada em branco para o adequado alinhamento de páginas na impressão com a opção frente e verso)



Empresa de Pesquisa Energética

Contrato

Data de assinatura

Projeto

ESTUDOS PARA EXPANSÃO DA TRANSMISSÃO

Área de estudo

Estudos do Sistema de Transmissão

Subárea de estudo

Detalhamento da Alternativa de Referência – Relatório R2

Produto (Nota Técnica ou Relatório)

EPE-DEE-RE-002/2023-rev0

**Elo de Corrente Contínua \pm 800 kV Graça Aranha –
Silvânia – Parte II: Transitórios Eletromagnéticos**

Revisões

Data

Descrição sucinta

rev0

12/01/2023

Emissão Original

(Esta página foi intencionalmente deixada em branco para o adequado alinhamento de páginas na impressão com a opção frente e verso)

APRESENTAÇÃO

Este Relatório apresenta os resultados da análise de desempenho do bipolo de Corrente Contínua em Alta Tensão (CCAT) em ± 800 kV Graça Aranha – Silvânia, Nordeste I, e da rede em Corrente Alternada (CA) do Sistema Interligado Nacional (SIN), em Transitórios Eletromagnéticos de Manobra (TEM), decorrente de curtos-circuitos na rede CA.

Essa análise de detalhamento complementa as apresentadas no Relatório R2, EPE-DEE-092/2022-rev1 – Parte I, em conformidade com as Diretrizes para Elaboração dos Relatórios Rs [1].

(Esta página foi intencionalmente deixada em branco para o adequado alinhamento de páginas na impressão com a opção frente e verso)

SUMÁRIO

SUMÁRIO	7
ÍNDICE DE FIGURAS	8
ÍNDICE DE TABELAS	9
1 INTRODUÇÃO	10
1.1 Contextualização	10
1.2 Objetivo principal	12
2 CONCLUSÕES	13
3 RECOMENDAÇÕES	15
4 MODELAGEM DA REDE	16
4.1 Rede equivalente.....	16
4.2 Cenários	17
4.2.1 Descrição dos cenários	17
5 ELOS DE CORRENTE CONTÍNUA	19
5.1 Modelagem do elo em estudo.....	19
5.2 Modelagem dos demais elos do SIN	20
6 TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS	21
6.1 Bipolo CCAT transmitindo em cenário carga leve	21
6.1.1 Curto-circuito em Silvânia	21
6.1.2 Curto-circuito em Graça Aranha.....	24
6.2 Bipolo CCAT transmitindo em cenário carga média	27
6.2.1 Curto-circuito em Silvânia	27
6.2.2 Curto-circuito em Graça Aranha.....	29
7 REFERÊNCIAS	33
8 EQUIPE TÉCNICA	34
ANEXO A. Tensões transitórias – carga leve - complemento	35
ANEXO B. Tensões transitórias – carga média - complemento	37

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 – Inserção do bipolo ± 800 kV Graça Aranha – Silvânia (Nordeste I) no SIN	10
Figura 4-1 - Diagrama esquemático do equivalente de redes	16
Figura 6-1 - Curto 1 \emptyset em Silvânia 500 kV, tensão em Silvânia 500 kV – carga leve.....	22
Figura 6-2 – Curto 1 \emptyset em Silvânia 500 kV, tensão em Luziânia 500 kV – carga leve	23
Figura 6-3 - Curto 1 \emptyset em Silvânia 500 kV, tensão em Serra da Mesa 500 kV – carga leve.....	23
Figura 6-4 - Curto 3 \emptyset em Silvânia 500 kV, tensão em Silvânia 500 kV – carga leve.....	24
Figura 6-5 - Potência CC nos sistemas CCAT do SIN, com aplicação de curto monofásico em Silvânia 500 kV – carga leve.	24
Figura 6-6 - Curto 3 \emptyset em Graça Aranha 500 kV, tensão em Graça Aranha 500 kV – carga leve	25
Figura 6-7 – Curto 3 \emptyset em Graça Aranha 500 kV, tensão em P. Dutra 500 kV – carga leve	26
Figura 6-8 - Curto 3 \emptyset em Graça Aranha 500 kV, tensão em Teresina 500 kV – carga leve.....	26
Figura 6-9 - Curto 1 \emptyset em Graça Aranha 500 kV, tensão em Graça Aranha 500 kV – carga leve	26
Figura 6-10 - Curto 1 \emptyset em Silvânia 500 kV, tensão em Silvânia 500 kV – carga média.....	28
Figura 6-11 – Curto 1 \emptyset em Silvânia 500 kV, tensão em Luziânia 500 kV – carga média	28
Figura 6-12 - Curto 1 \emptyset em Silvânia 500 kV, tensão em Serra da Mesa 500 kV – carga média	28
Figura 6-13 - Curto 3 \emptyset em Silvânia 500 kV, tensão em Silvânia 500 kV – carga média.....	29
Figura 6-14 - Potência CC nos sistemas CCAT do SIN, com aplicação de curto monofásico em Silvânia 500 kV – carga média.	29
Figura 6-15 - Curto 3 \emptyset em Graça Aranha 500 kV, tensão em Graça Aranha 500 kV – carga média...	30
Figura 6-16 – Curto 3 \emptyset em Graça Aranha 500 kV, tensão em P. Dutra 500 kV – carga média.....	31
Figura 6-17 - Curto 3 \emptyset em Graça Aranha 500 kV, tensão em Teresina 500 kV – carga média.....	31
Figura 6-18 - Curto 1 \emptyset em Graça Aranha 500 kV, tensão em Graça Aranha 500 kV – carga média...	31
Figura A-1 - Curto 3 \emptyset em Silvânia 500 kV, tensão em Luziânia 500 kV – carga leve.....	35
Figura A-2 - Curto 3 \emptyset em Silvânia 500 kV, tensão em Serra da Mesa 500 kV – carga leve.....	35
Figura A-3 - Curto 3 \emptyset em Silvânia 500 kV, potência nos elos CCAT – carga leve.....	35
Figura A-4 - Curto 1 \emptyset em Graça Aranha 500 kV, tensão em P. Dutra 500 kV – carga leve.....	36
Figura A-5 - Curto 1 \emptyset em Graça Aranha 500 kV, tensão em Teresina 500 kV – carga leve	36
Figura A-6 - Curto 1 \emptyset em Graça Aranha 500 kV, potência nos elos CCAT – carga leve.....	36
Figura B-1 - Curto 3 \emptyset em Silvânia 500 kV, tensão em Luziânia 500 kV – carga média.....	37
Figura B-2 - Curto 3 \emptyset em Silvânia 500 kV, tensão em Serra da Mesa 500 kV – carga média.....	37
Figura B-3 - Curto 3 \emptyset em Silvânia 500 kV, potência nos elos CCAT – carga média.....	37
Figura B-4 - Curto 1 \emptyset em Graça Aranha 500 kV, tensão em P. Dutra 500 kV – carga média	38
Figura B-5 - Curto 1 \emptyset em Graça Aranha 500 kV, tensão em Teresina 500 kV – carga média	38
Figura B-6 - Curto 1 \emptyset em Graça Aranha 500 kV, potência nos elos CCAT – carga média	38

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 5-1 – Características nominais básicas das conversoras do bipolo Nordeste I	19
Tabela 6-1 - Sobretensões máximas resultantes de curto-circuito na rede CA, em Silvânia, carga leve	22
Tabela 6-2 - Sobretensões máximas resultantes de curto-circuito na rede CA, em Graça Aranha, carga leve	25
Tabela 6-3 - Sobretensões máximas resultantes de curto-circuito na rede CA, em Silvânia, carga média	27
Tabela 6-4 - Sobretensões máximas resultantes de curto-circuito na rede CA, em Graça Aranha, carga média	30

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Os estudos desenvolvidos pela EPE para expansão das interligações regionais, com ênfase na expansão da capacidade de exportação da região Norte/Nordeste do Brasil, decorrente da larga expansão da Geração Variável Renovável (GVR), eólica e solar, dessa região, além da necessidade de reforçar a interligação de transmissão Norte-Sudeste em Corrente Alternada (CA), recomendaram a implantação de um bipolo de corrente contínua em ± 800 kV, potência nominal de 5 GW, entre a nova subestação Graça Aranha (MA) e a subestação Silvânia (GO), distantes cerca de 1450 km, denominado bipolo Nordeste I. A Figura 1-1 ilustra a inserção do bipolo Nordeste I no Sistema Interligado Nacional (SIN).

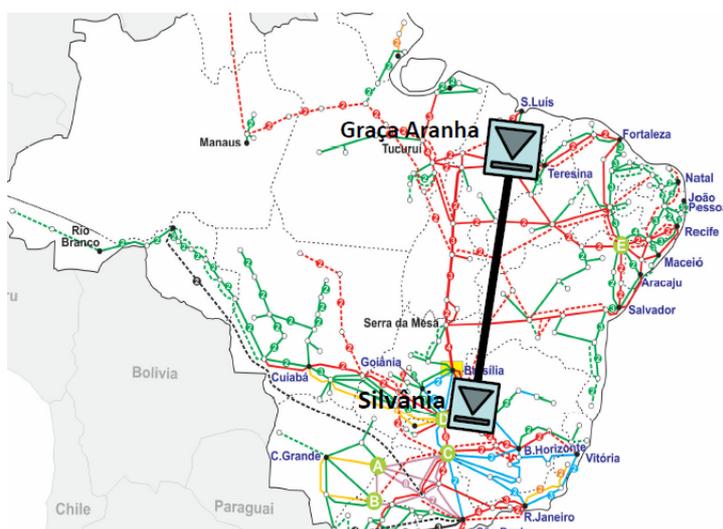


Figura 1-1 – Inserção do bipolo ± 800 kV Graça Aranha – Silvânia (Nordeste I) no SIN

A solução recomendada para essa transmissão em Corrente Contínua em Alta Tensão (CCAT) prevê a utilização da tecnologia *Line Commutated Converter* (LCC), já utilizada nos demais bipolos CCAT em operação no Brasil.

Como parte integrante dos estudos de planejamento da expansão da transmissão, no âmbito do Relatório R2, são realizadas análises de detalhamento da solução indicada pelo Relatório R1.

Quando dos estudos de planejamento dos dois primeiros bipolos CCAT em 800 kV do SIN, associados à usina hidrelétrica de Belo Monte, o escopo do R2, incluiu a otimização técnico econômica da linha de transmissão em Corrente Contínua (CC). Para o empreendimento em questão, a exemplo de como atualmente é realizado para os demais estudos de planejamento da expansão, essa análise da linha de transmissão foi realizada no Relatório R1[2].

De forma similar, os estudos de desempenho dinâmico e de *multi-infeed* com ferramental tipo EMT (Electromagnetic Transients), que para os últimos bipolos foram realizados no Relatório R2, para o bipolo atual, Nordeste I, foram realizados no escopo do Relatório R1. Isto porque, os resultados dessas análises, agora para um sistema CCAT inserido em região do SIN com proximidade elétrica de outros sistemas CCAT, são determinantes na concepção inicial da nova solução, podendo impactar, inclusive, na determinação da alternativa vencedora.

Os elementos para especificação básica, por reunirem um conjunto de informações ampla que caracterizam a solução recomendada foram igualmente incluídos no Relatório R1 [2].

Por essas razões, o escopo do Relatório R2 do novo bipolo consistiu dos estudos de representação da impedância harmônica da rede (apresentados na Parte I do Relatório R2) [3], e dos estudos de Transitórios Eletromagnéticos de Manobra (TEM) apresentados no presente documento.

1.2 Objetivo principal

Este relatório corresponde à segunda parte do Relatório R2 e tem como objetivo principal apresentar os resultados dos estudos de desempenho em Transitórios Eletromagnéticos de Manobra (TEM) do novo bipolo em 800 kV, Nordeste I, e da rede CA onde está inserido.

A primeira parte está documentada no relatório [3] Elo de Corrente Contínua \pm 800 kV Graça Aranha – Silvânia – Parte I: representação da impedância da rede, Relatório R2, nº EPE-DEE-RE-092/2022-rev1, dezembro 2022.

2 CONCLUSÕES

Em continuidade aos estudos para expansão da transmissão, este relatório apresenta os resultados dos estudos de detalhamento da alternativa de referência (R2), no que se refere ao desempenho em Transitórios Eletromagnéticos de Manobra (TEM), correspondente ao bipolo CCAT em ± 800 kV, 5000 MW que interligará as subestações Graça Aranha 500 kV e Silvânia 500 kV.

O escopo desses estudos foi ajustado em função da experiência pregressa do planejamento, sobretudo as realizadas em dois estudos de detalhamento, correspondentes aos bipolos ± 800 kV Xingu – Estreito [4] e Xingu – Terminal Rio [5]. De tal sorte que não foram aqui abordados curtos-circuitos na linha CC nem situações resultantes de bloqueios nas conversoras.

Os cenários selecionados consideraram o bipolo em transmissão direta, ou seja, no sentido do Nordeste para o Sudeste. O modo de transmissão reverso, no sentido do Sudeste para o Nordeste, não se justificou considerar, nesta fase de estudo de detalhamento, com base, tanto nessa experiência pregressa, como na baixa probabilidade de ocorrência prevista para esse modo de operação.

Na fase do Projeto Básico, com a concepção do bipolo Nordeste I definida pelo fabricante, as avaliações do empreendedor deverão considerar os dois sentidos de transmissão, tanto no sentido direto como no sentido reverso, e outros eventos de interesse necessários para a comprovação de efetividade da solução implantada, tais como a aplicação de curto-circuito na linha CC, bloqueio nas conversoras e outros que estejam contemplados nos critérios preconizados pelo ONS.

Os resultados dos estudos atuais indicaram, no que diz respeito aos TEM, que não se verificaram restrições à implantação do bipolo com os cenários considerados. Como já indicado nos estudos do Relatório R1[2], os tempos de recuperação da potência ativa no elo, após essas faltas na rede CA, igualmente ficaram dentro de limites aceitáveis.

Adicionalmente, o estudo atual não aborda situações limites para o dimensionamento da coordenação de isolamento das conversoras, tendo partido do pressuposto que as ações protetivas e de controle do elo atuarão na forma devida durante os eventos de aplicação e recuperação de faltas no sistema CA.

Trata-se de uma premissa aceitável para a etapa de planejamento, uma vez que não se trata de um estudo de dimensionamento do elo CC, mas de interação com a rede CA, sob o ponto de vista de desempenho sob condições de manobra. Cabe ressaltar que os resultados serão fortemente afetados

pelo projeto definitivo dos filtros CA e CC, que somente serão conhecidos durante a etapa de Projeto Básico, podendo ser significativamente diferente da hipótese adotada no presente relatório.

Sob esta ótica, as sobretensões registradas na rede CA em decorrência de curtos-circuitos simulados nas barras em 500 kV das conversoras não foram elevadas, portanto, sem restrições operativas associadas.

3 RECOMENDAÇÕES

Os resultados dos estudos com os cenários, topologia da rede CA e concepção do elo CCAT em referência, no que diz respeito aos transitórios eletromagnéticos de manobra (TEM), não verificaram restrições à implantação do elo CCAT.

Entretanto, caso essas condições sistêmicas venham a ser alteradas, ou sejam identificados novos condicionantes ou cenários de avaliação não previstos neste relatório da etapa de planejamento, deverão ser investigadas na fase de Projeto Básico, o desempenho do novo elo CCAT em TEM e, caso necessário, adotadas no projeto as medidas mitigatórias que se façam necessárias para manutenção das sobretensões de manobra dentro dos limites aceitáveis.

Ressaltamos que a resposta harmônica da rede CA é fortemente influenciada pelo projeto dos filtros CA do empreendedor, que poderá não ser o mesmo daquele considerado nessas avaliações de TEM. Da mesma forma, filtros CC e reatores de alisamento diferentes daqueles utilizados nestas avaliações influenciarão os resultados no lado CC. Portanto, uma análise mais detalhada por parte do empreendedor será necessária, na fase de Projeto Básico do empreendimento, para comprovação da conformidade do projeto do HVDC (CCAT) como um todo.

Dessa forma, poderão ser solicitados, na fase de Projeto Básico, outros estudos de desempenho em TEM, além dos aqui apresentados, tais como curtos-circuitos na linha CC e bloqueio de conversoras.

4 MODELAGEM DA REDE

4.1 Rede equivalente

Para simulações em ambiente EMT foi modelada com o programa PSCAD uma rede equivalente, em diferentes etapas, como detalhada no Relatório R1 [2], sendo que a etapa final (etapa 3) incorporou a representação de todos os elos CCAT existentes no SIN além do novo bipolo em estudo.

Com base na experiência pregressa dos estudos dos sistemas CCAT de Belo Monte, considerando a grande extensão do SIN e dos comprimentos das linhas de transmissão desses sistemas CCAT, a representação resultou em quatro redes retidas, interligadas entre si, via elos CCAT e impedâncias de transferência, conforme ilustrado no diagrama esquemático da Figura 4-1, reproduzido do Relatório R1 [2].

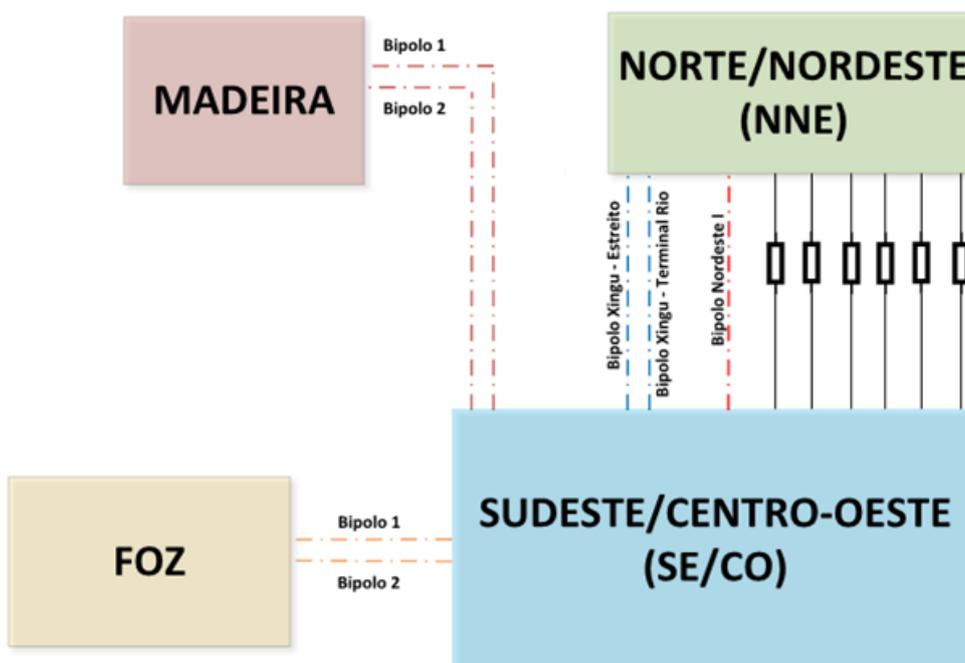


Figura 4-1 - Diagrama esquemático do equivalente de redes

Como detalhado nesse relatório aqui reproduzido, na rede retida Norte/Nordeste (NNE) estão contempladas as modelagens das retificadoras de Xingu e Graça Aranha em conjunto com os elementos circunvizinhos. De forma semelhante, na rede retida Sudeste/Centro-Oeste (SE/CO) estão modeladas as inversoras das subestações de Estreito, Terminal Rio, Araraquara, Ibiúna e Silvânia. As retificadoras dos elos do Madeira e de Itaipu foram representadas em redes retidas separadas por estarem mais afastadas entre si e das demais.

A representação das redes retidas resultou em 364 barras, 394 linhas de transmissão, 224 transformadores e 42 máquinas.

4.2 Cenários

Dentre os cenários representados nos estudos do Relatório R1[2], foram selecionados para as análises de desempenho em TEM os cenários a seguir, ambos para transmissão em fluxo direto, ou seja, de Graça Aranha para Silvânia:

- (i) máxima exportação do Norte/Nordeste na carga leve; e
- (ii) máxima exportação do Norte/Nordeste na carga média.

Com base na experiência pregressa do planejamento, sobretudo as decorrente dos estudos dos bipolos ± 800 kV Xingu – Estreito [4] e Xingu – Terminal Rio [5], optou-se por não considerar nesta fase de estudo de detalhamento o modo de transmissão reverso, no sentido de Silvânia para Graça Aranha, sendo reforçado pela baixa probabilidade de ocorrência prevista para esse modo de operação.

Não obstante a ausência de avaliações desse cenário no presente estudo, entende-se que na fase do Projeto Básico, com a concepção do bipolo Nordeste I definida pelo fabricante, as avaliações do empreendedor deverão considerar os dois sentidos de transmissão, tanto no sentido direto como no sentido reverso.

4.2.1 Descrição dos cenários

Cenário 1A - Máxima exportação do Norte/Nordeste, na carga média

O objetivo deste cenário, como indicado no Relatório R1[2], é a avaliação de uma condição de elevada exportação de potência pelo Norte-Nordeste, prioritariamente pela região Norte. Para tal, foram definidas as seguintes metas de despacho:

- geração hidráulica elevada nas usinas da região Norte, na ordem de 90 %;
- geração média nas usinas hidráulicas da região Sudeste, na ordem de 50 %;
- geração térmica reduzida, em função da elevada disponibilidade de recurso hidráulico.

Geração na região Nordeste:

- usinas hidráulicas da bacia do São Francisco com geração média de 5800 MW (aproximadamente 50 % da capacidade instalada);
- usinas solares com fator de capacidade de 90 %;
- usinas eólicas com fator de capacidade de 50 %.

Carregamentos dos elos CCAT em fluxo direto, medido nas retificadoras:

- Graça Aranha - Silvânia: 5000 MW
- Belo Monte: Xingu-Estreito e Xingu-T. Rio: 4000 MW
- Madeira I e II: 5768 MW
- Itaipu: 4500 MW

Cenário 1B - Máxima exportação do Norte/Nordeste no patamar de carga leve

O objetivo deste cenário, como indicado no Relatório R1, é a avaliação de uma condição de elevada exportação de potência pelo Norte-Nordeste, prioritariamente pela região Norte no patamar de carga leve. Para tal, foram definidas as seguintes metas de despacho:

- geração hidráulica nas usinas da região Norte, na ordem de 60 %;
- geração nas usinas hidráulicas da região Sudeste, na ordem de 20 %;
- geração nas usinas hidráulicas da região Sul, na ordem de 25 %
- geração térmica nacional despachada somente por inflexibilidade.

Geração na região Nordeste:

- usinas hidráulicas da bacia do São Francisco com geração média de 3000 MW (aproximadamente 30 % da capacidade instalada);
- usinas solares não despachadas;
- usinas eólicas com fator de capacidade de 60 %.

Carregamento dos elos CCAT, em fluxo direto, medido nas retificadoras:

- Graça Aranha - Silvânia: 3600 MW
- Belo Monte: Xingu – Estreito e Xingu - T. Rio: 3200 MW
- Madeira: 5372 MW
- Itaipu: 3600 MW

5 ELOS DE CORRENTE CONTÍNUA

5.1 Modelagem do elo em estudo

Os estudos apresentados neste relatório, com modelagem tipo EMT, como indicado na modelagem detalhada no Relatório R1 [2], utilizaram na representação do novo elo CCAT, Nordeste I, a concepção de modelo "genérico" já utilizada nos estudos do Relatório R2 dos bipolos I e II associados ao projeto de Belo Monte, com bons resultados.

Durante os estudos do primeiro bipolo CCAT em ± 800 kV do SIN, associado a Belo Monte, um modelo genérico detalhado foi desenvolvido para o PSCAD, através de renomado consultor internacional da área de CCAT contratada pela EPE [5]. O modelo foi baseado na topologia de controle encontrada nos atuais projetos de CCAT, com todos os componentes utilizados abertos para exame e modificação por parte dos usuários.

A descrição desse modelo, com conceitos de controle utilizados estão apresentados nos estudos do Relatório R2 do bipolo II associado a Belo Monte[5].

A Tabela 5-1 sumariza as características básicas das conversoras do bipolo Nordeste I.

Tabela 5-1 – Características nominais básicas das conversoras do bipolo Nordeste I

Sentido da transmissão	Retificadora	Inversora
Graça Aranha – Silvânia (transmissão direta)	<u>Graça Aranha</u>	<u>Silvânia</u>
Potência CC (MW)	5.000	4.840
Tensão CC (kV)	800	~770
Corrente (kA)	3,125	3,125
Silvânia – Graça Aranha (transmissão reversa)	<u>Silvânia</u>	<u>Graça Aranha</u>
Potência CC (MW)	4.100	3.990
Tensão CC (kV)	800	~775
Corrente (kA)	2,56	2,56

5.2 Modelagem dos demais elos do SIN

A modelagem final (etapa 3) da rede equivalente, detalhada no Relatório R1[2], incluiu os sistemas de corrente contínua Xingu – Estreito e Xingu – Terminal Rio, através do modelo genérico indicado no item 5.1 deste relatório, além dos modelos genéricos específicos dos sistemas de Itaipu e Madeira, como adotado nos estudos de R2 do bipolo Xingu – Terminal Rio.

6 TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS

A análise de desempenho em TEM do novo bipolo em ± 800 kV e da rede CA onde está inserido, decorrente de curto-circuito nessa rede CA, teve em conta a experiência pregressa do planejamento, sobretudo as realizadas em dois estudos de detalhamento, correspondentes aos bipolos ± 800 kV Xingu – Estreito [4] e Xingu – Terminal Rio [5].

Essas análises indicaram o adequado desempenho desses bipolos, similares ao atualmente em estudo, inseridos em pontos de conexão da rede CA de considerável nível de curto-circuito. Nessas análises foram investigados os impactos decorrentes de curto-circuito na rede CA, curto-circuito na linha CC, e bloqueio de bipolo.

Os resultados das simulações nesses projetos anteriores mostraram que as sobretensões registradas na rede CA não foram elevadas, sem indicação de restrições operativas. Na linha CC, de comprimento superior à do bipolo atual, as simulações de curto-circuito em diferentes pontos da linha, confirmaram resultados previstos para linhas desse tipo, comprimento e classe de tensão. Quanto às sobretensões decorrentes de bloqueio de bipolo, sem abertura de filtros das conversoras, para aquelas configurações de filtros e de rede CA, os resultados indicaram valores dentro de limites aceitáveis.

Com base nesses resultados e conclusões [4] [5], a análise de desempenho do bipolo atual, em decorrência de TEM, dispensou um número de simulações, e foi realizada com simulações de curtos-circuitos aplicados na rede CA.

6.1 Bipolo CCAT transmitindo em cenário carga leve

Para a configuração da rede completa, transmissão do elo CCAT em fluxo direto, cenário de carga leve, foram simulados curtos-circuitos na rede CA, como detalhado a seguir.

6.1.1 Curto-circuito em Silvânia

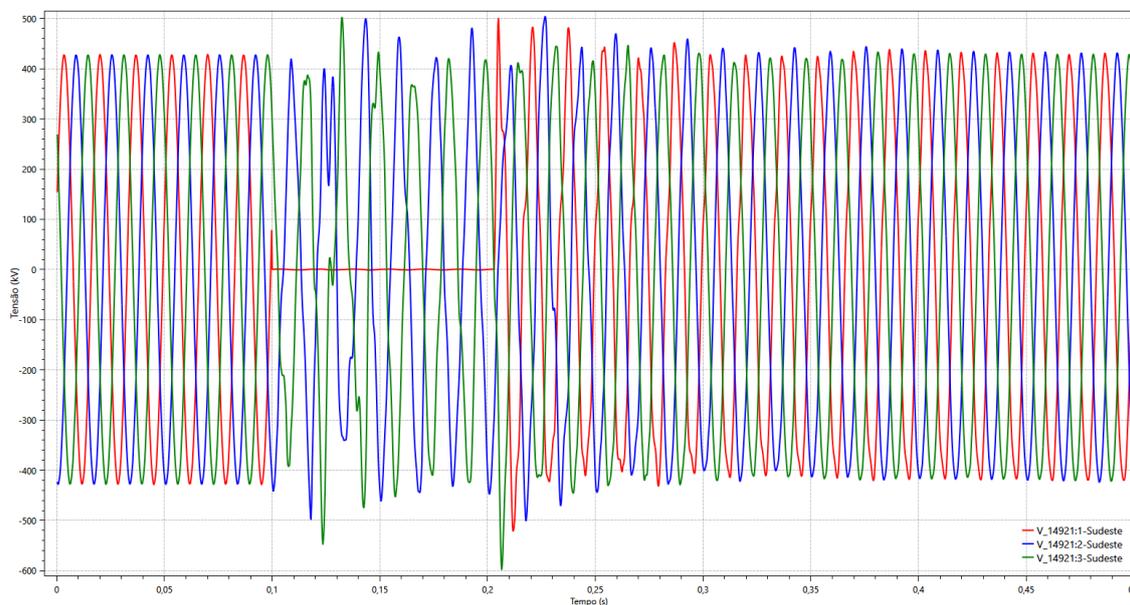
Foram simulados curtos-circuitos francos à terra, trifásicos e monofásicos, durante 100 ms, na barra em 500 kV CA da conversora em Silvânia, com os principais resultados de sobretensões máximas sumarizados na Tabela 6-1

Tabela 6-1 - Sobretensões máximas resultantes de curto-circuito na rede CA, em Silvânia, carga leve

Curto Aplicado		Silvânia 500 kV (p.u.)	Luiziânia 500 kV (p.u.)	Serra da Mesa 500 kV (p.u.)
Barra	Tipo			
Silvânia 500 kV	1Ø	1,46	1,28	1,20
Silvânia 500 kV	3Ø	1,42	1,24	1,22

Observa-se que a sobretensão máxima encontrada nas barras em 500 kV, 1,46 pu, foi registrada em Silvânia 500 kV, decorrente de curto monofásico nessa barra. Nas demais barras resultaram em sobretensões inferiores a 1,28 p.u. As sobretensões são rapidamente amortecidas, resultando em máximas sustentadas, após 200 ms da eliminação do curto, abaixo da tensão máxima operativa.

As figuras apresentadas a seguir (Figura 6-1, Figura 6-2 e Figura 6-3) , extraídas das simulações (408,25 kV igual a 1 p.u.), ilustram o comportamento das tensões transitórias decorrentes de curto circuito monofásico em Silvânia. A Figura 6-4 ilustra o comportamento da tensão em Silvânia 500 kV, decorrente de curto-circuito trifásico aplicado nessa barra. De modo geral as sobretensões não são elevadas e não devem provocar restrições operativas.

**Figura 6-1 - Curto 1Ø em Silvânia 500 kV, tensão em Silvânia 500 kV – carga leve**

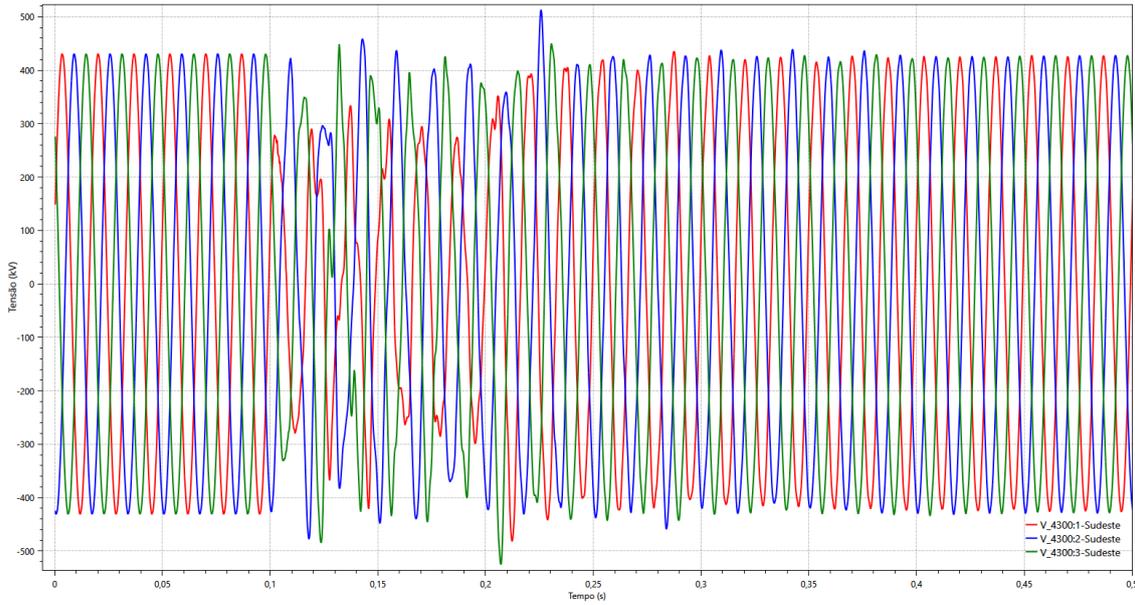


Figura 6-2 – Curto 1Ø em Silvânia 500 kV, tensão em Luziânia 500 kV – carga leve

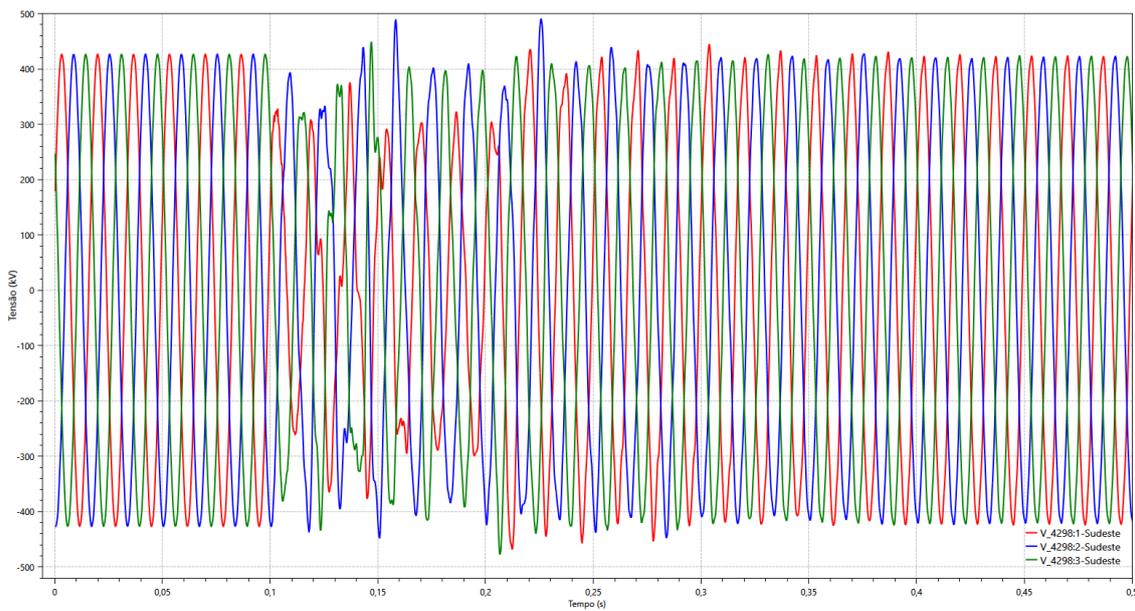


Figura 6-3 - Curto 1Ø em Silvânia 500 kV, tensão em Serra da Mesa 500 kV – carga leve

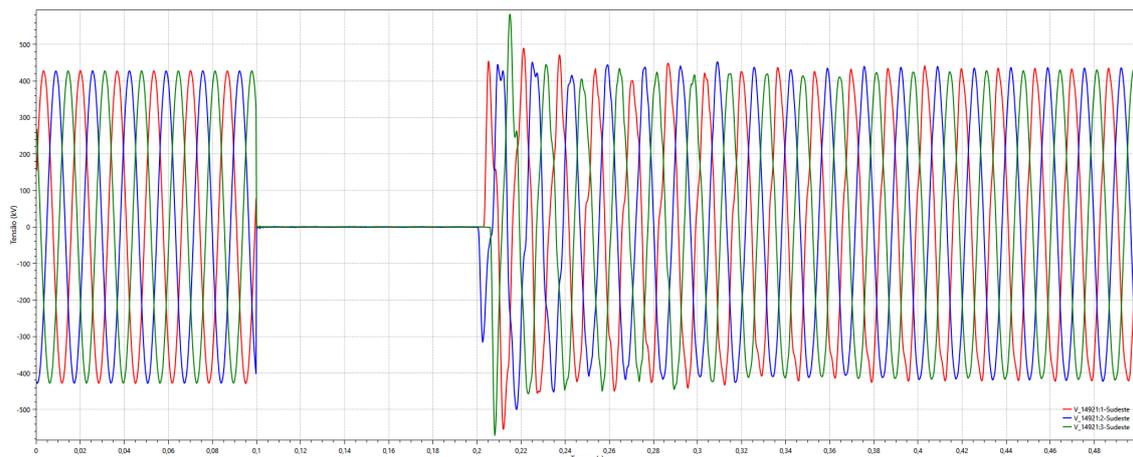


Figura 6-4 - Curto 3Ø em Silvânia 500 kV, tensão em Silvânia 500 kV – carga leve

Como mostrado no Relatório R1[2], as conversoras dos diferentes sistemas de transmissão CCAT do SIN, recuperam suas potências CC, em tempos adequados, após curto-circuito na barra conversora de Silvânia 500 kV, indicando a adequação da expansão planejada para o bipolo Nordeste I, assim como, dos modelos utilizados nesses estudos. A Figura 6-5 ilustra a recuperação dos sistemas CCAT do SIN, após curto-circuito monofásico em Silvânia 500 kV.

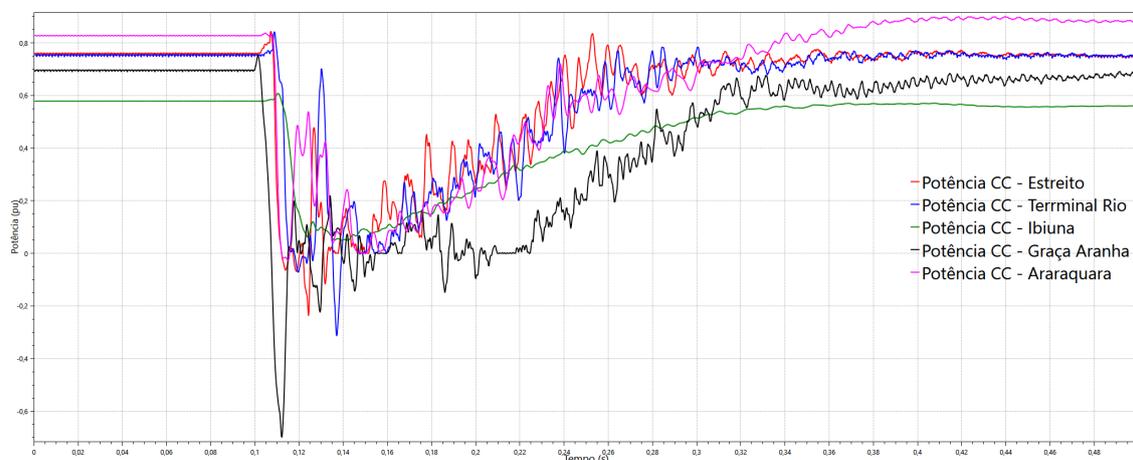


Figura 6-5 - Potência CC nos sistemas CCAT do SIN, com aplicação de curto monofásico em Silvânia 500 kV – carga leve.

6.1.2 Curto-circuito em Graça Aranha

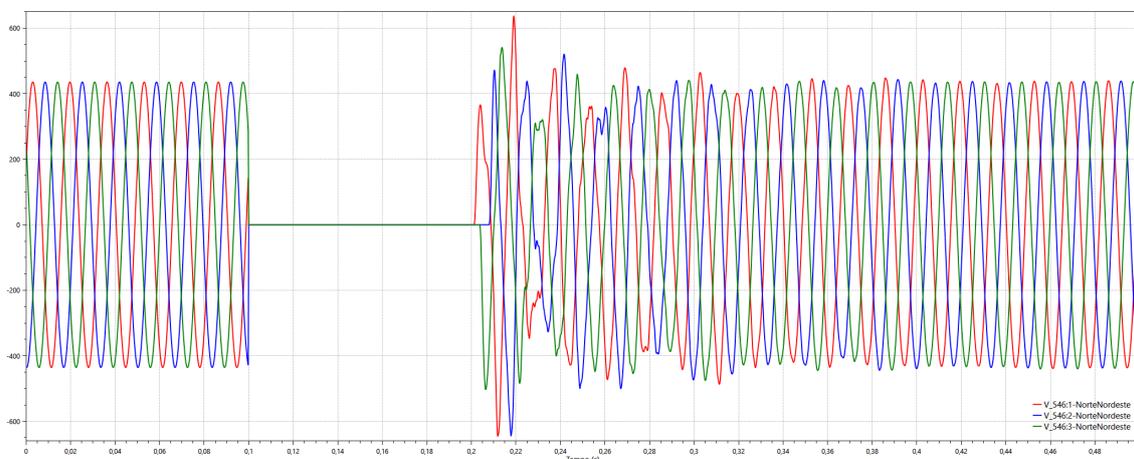
Foram simulados curtos-circuitos francos à terra, trifásicos e monofásicos, durante 100 ms, na barra em 500 kV CA da conversora em Graça Aranha, com os principais resultados de sobretensões máximas sumarizados na Tabela 6-1

Tabela 6-2 - Sobretensões máximas resultantes de curto-circuito na rede CA, em Graça Aranha, carga leve

Curto Aplicado		Graça Aranha 500 kV (p.u.)	Presidente Dutra 500 kV (p.u.)	Teresina 500 kV (p.u.)
Barra	Tipo			
Graça Aranha 500 kV	1Ø	1,43	1,42	1,45
	3Ø	1,57	1,55	1,53

Observa-se que a sobretensão máxima encontrada nas barras em 500 kV, 1,57 p.u., foi registrada em Graça Aranha 500 kV, decorrente de curto trifásico nessa barra. Nas demais barras resultaram em sobretensões inferiores a 1,55 p.u. As sobretensões são rapidamente amortecidas, resultando em máximas sustentadas, após 200 ms da eliminação do curto, abaixo da tensão máxima operativa.

As figuras apresentadas a seguir (Figura 6-1, Figura 6-2 e Figura 6-3), extraídas das simulações (408,25 kV igual a 1 p.u.), ilustram o comportamento das tensões transitórias decorrentes de curto circuito trifásico em Graça Aranha. A Figura 6-9 ilustra o comportamento da tensão em Graça Aranha 500 kV, decorrente de curto-circuito monofásico aplicado nessa barra. De modo geral as sobretensões não são elevadas e não devem provocar restrições operativas.


Figura 6-6 - Curto 3Ø em Graça Aranha 500 kV, tensão em Graça Aranha 500 kV – carga leve

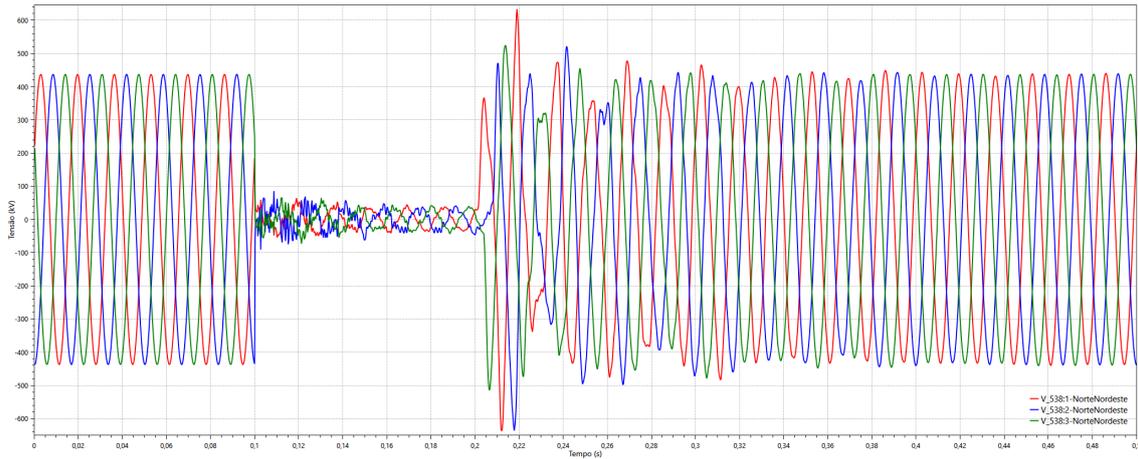


Figura 6-7 – Curto 3Ø em Graça Aranha 500 kV, tensão em P. Dutra 500 kV – carga leve

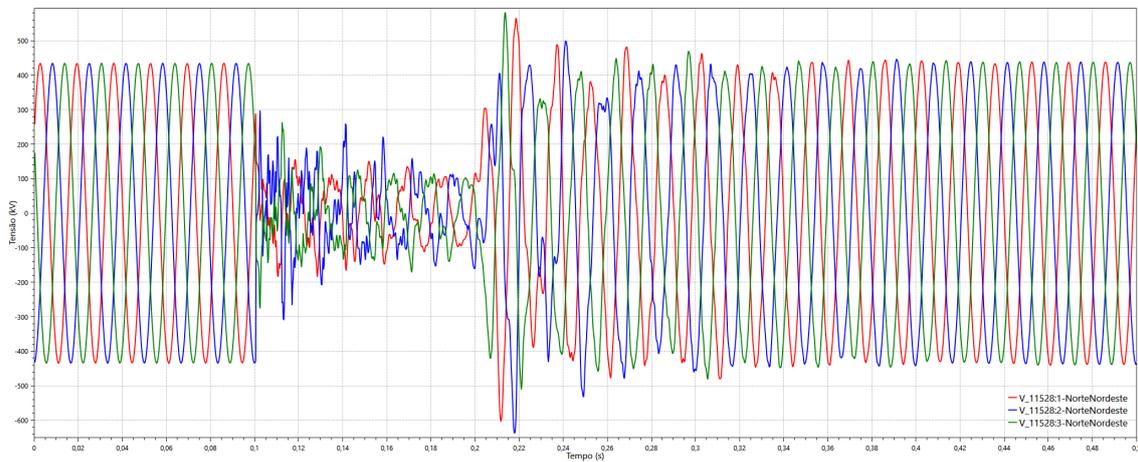


Figura 6-8 - Curto 3Ø em Graça Aranha 500 kV, tensão em Teresina 500 kV – carga leve

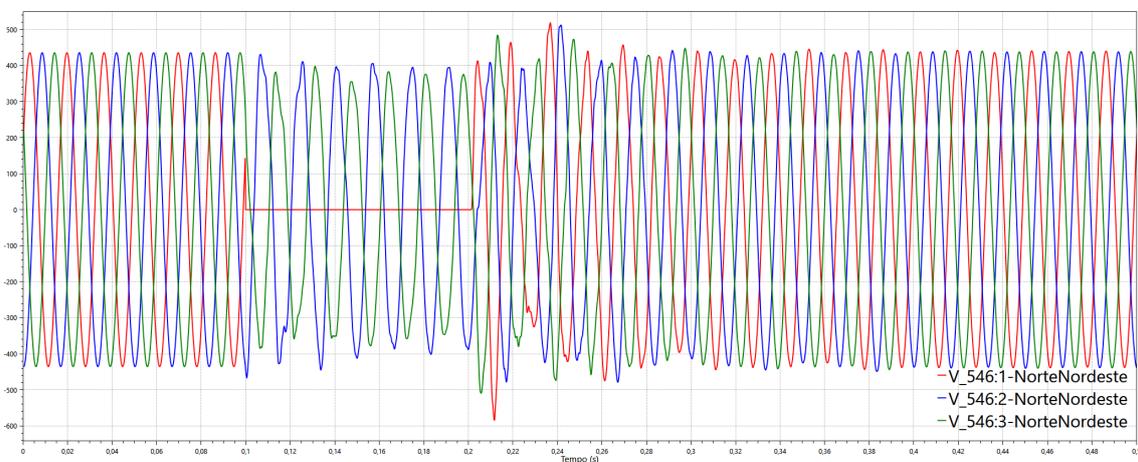


Figura 6-9 - Curto 1Ø em Graça Aranha 500 kV, tensão em Graça Aranha 500 kV – carga leve

Como mostrado no Relatório R1[2], as conversoras dos diferentes sistemas de transmissão CCAT do SIN, recuperam suas potências CC em tempos adequados após curto-circuito na barra conversora de Graça Aranha 500 kV, indicando a adequação da expansão planejada para o bipolo Nordeste I, assim como, dos modelos utilizados nesses estudos.

6.2 Bipolo CCAT transmitindo em cenário carga média

Para a configuração da rede completa, transmissão do elo CCAT em cenário de carga média, foram simulados curtos-circuitos na rede CA, como detalhado a seguir.

6.2.1 Curto-circuito em Silvânia

Foram simulados curtos-circuitos francos à terra, trifásicos e monofásicos, durante 100 ms, na barra em 500 kV CA da conversora em Silvânia, com os principais resultados de sobretensões máximas sumarizados na Tabela 6-1.

Tabela 6-3 - Sobretensões máximas resultantes de curto-circuito na rede CA, em Silvânia, carga média

Curto Aplicado		Silvânia 500 kV (p.u.)	Luziânia 500 kV (p.u.)	Serra da Mesa 500 kV (p.u.)
Barra	Tipo			
Silvânia 500 kV	1Ø	1,67	1,28	1,13
	3Ø	1,70	1,26	1,20

Observa-se que a sobretensão máxima encontrada nas barras em 500 kV, 1,70 p.u., foi registrada em Silvânia 500 kV, decorrente de curto trifásico nessa barra (monofásico praticamente igual, com 1,67 p.u. máxima). Nas demais barras resultaram sobretensões inferiores a 1,28 pu. As sobretensões são rapidamente amortecidas, resultando em máximas sustentadas, após 200 ms da eliminação do curto, abaixo da tensão máxima operativa.

As figuras apresentadas a seguir (Figura 6-10, Figura 6-2 e Figura 6-3), extraídas das simulações (408,25 kV igual a 1 p.u.), ilustram o comportamento das tensões transitórias decorrentes de curto-circuito monofásico em Silvânia. A Figura 6-14 ilustra o comportamento da tensão em Silvânia 500 kV, decorrente de curto-circuito trifásico aplicado nessa barra. Apesar do cenário de carga média resultar em sobretensões pouco mais elevadas que do cenário de carga leve, de modo geral, as sobretensões continuam não elevadas e não devem provocar restrições operativas.

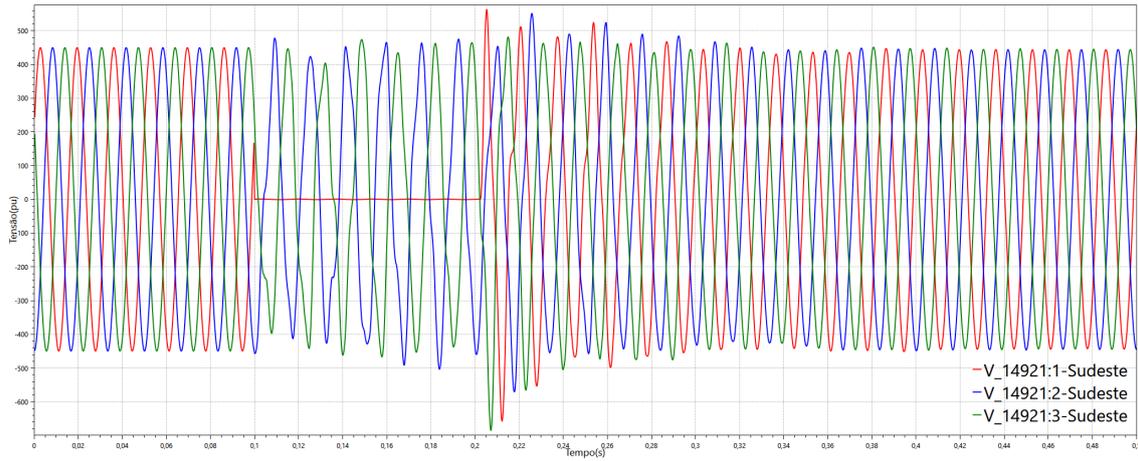


Figura 6-10 - Curto 1Ø em Silvânia 500 kV, tensão em Silvânia 500 kV – carga média

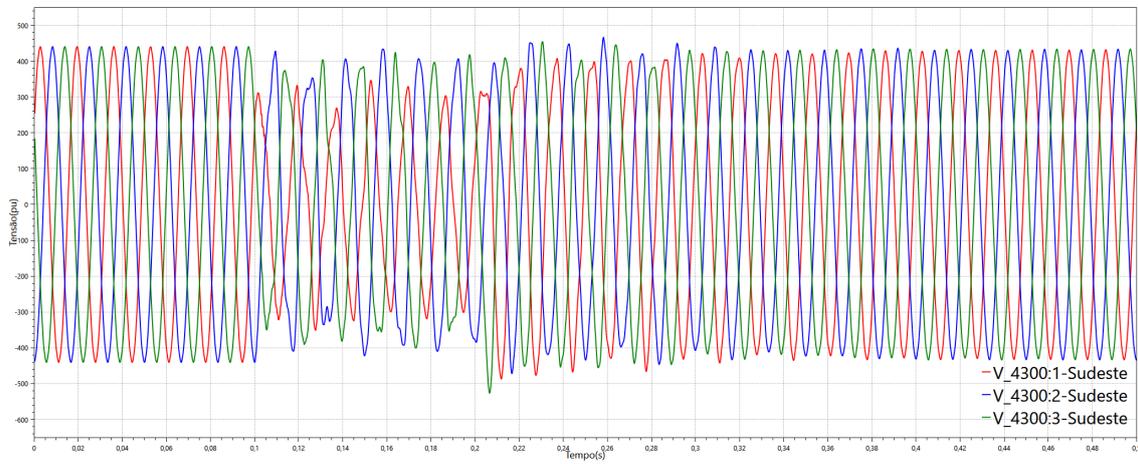


Figura 6-11 – Curto 1Ø em Silvânia 500 kV, tensão em Luziânia 500 kV – carga média

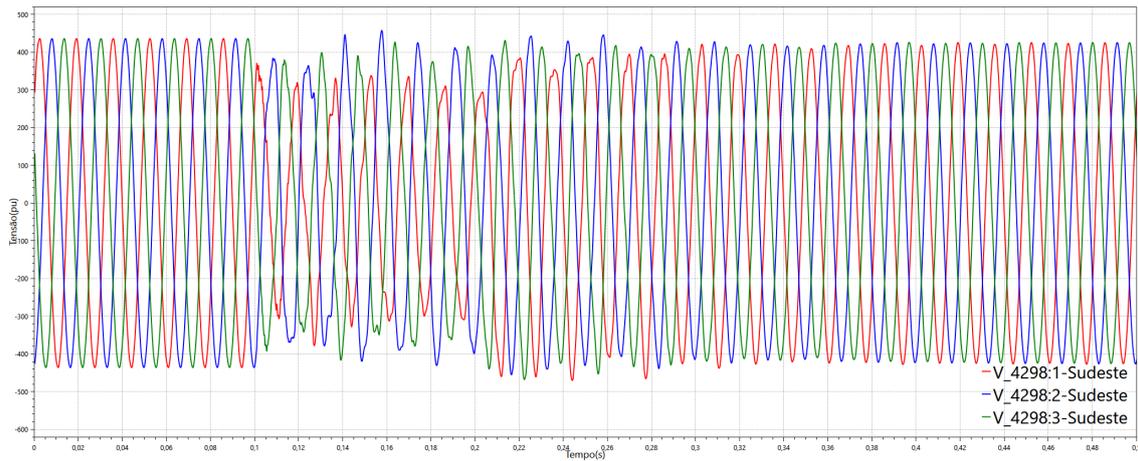


Figura 6-12 - Curto 1Ø em Silvânia 500 kV, tensão em Serra da Mesa 500 kV – carga média

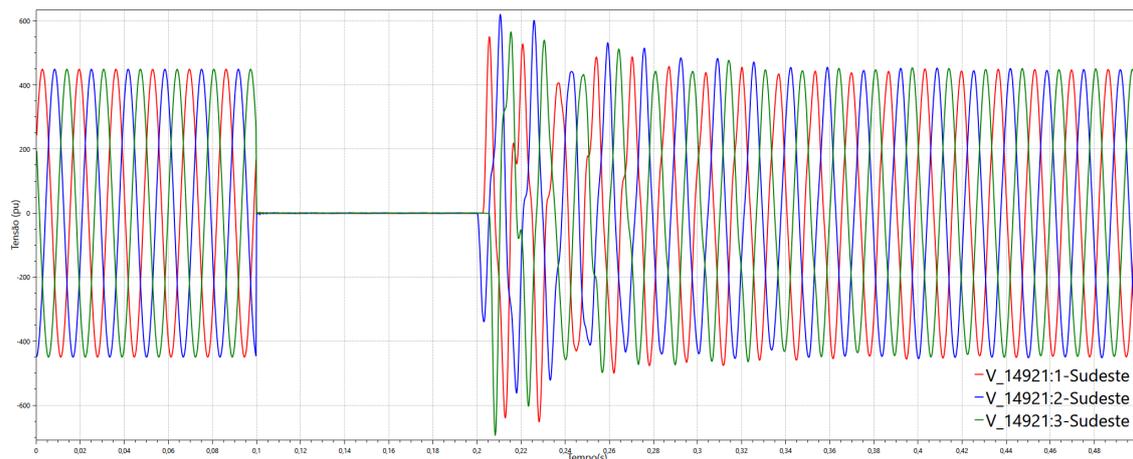


Figura 6-13 - Curto 3Ø em Silvânia 500 kV, tensão em Silvânia 500 kV – carga média

Como mostrado no Relatório R1[2], as conversoras dos diferentes sistemas de transmissão CCAT do SIN, recuperam suas potências CC, em tempos adequados, após curto-circuito na barra conversora de Silvânia 500 kV, indicando a adequação da expansão planejada para o bipolo Nordeste I, assim como dos modelos utilizados nesses estudos. A Figura 6-15 ilustra a recuperação dos sistemas CCAT do SIN, após curto-circuito monofásico em Silvânia 500 kV.

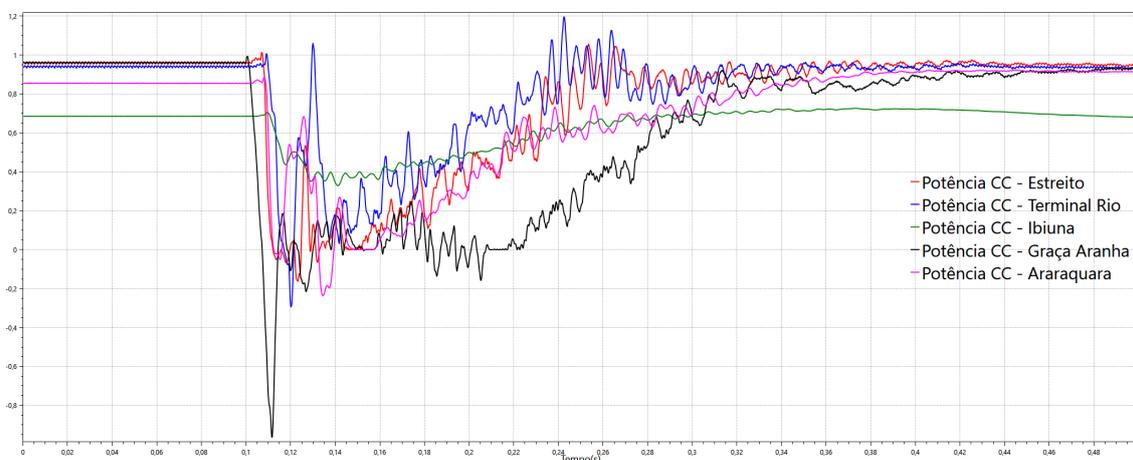


Figura 6-14 - Potência CC nos sistemas CCAT do SIN, com aplicação de curto monofásico em Silvânia 500 kV – carga média.

6.2.2 Curto-circuito em Graça Aranha

Foram simulados curtos-circuitos francos à terra, trifásicos e monofásicos, durante 100 ms, na barra em 500 kV CA da conversora em Graça Aranha, com os principais resultados de sobretensões máximas sumarizados na Tabela 6-4.

Tabela 6-4 - Sobretensões máximas resultantes de curto-circuito na rede CA, em Graça Aranha, carga média

Curto Aplicado		Graça Aranha 500 kV (p.u.)	Presidente Dutra 500 kV (p.u.)	Teresina 500 kV (p.u.)
Barra	Tipo			
Graça Aranha 500 kV	1Ø	1,57	1,58	1,50
	3Ø	1,78	1,76	1,54

Observa-se que a sobretensão máxima encontrada nas barras em 500 kV, 1,78 p.u., foi registrada em Graça Aranha 500 kV, decorrente de curto trifásico nessa barra. Nas demais barras resultaram em sobretensões inferiores a 1,76 p.u. As sobretensões são rapidamente amortecidas, resultando em máximas sustentadas, após 200 ms da eliminação do curto, abaixo da tensão máxima operativa.

As figuras apresentadas a seguir (Figura 6-15, Figura 6-2 e Figura 6-3) , extraídas das simulações (408,25 kV igual a 1 p.u.), ilustram o comportamento das tensões transitórias decorrentes de curto circuito trifásico em Graça Aranha. A Figura 6-18 ilustra o comportamento da tensão em Graça Aranha 500 kV, decorrente de curto-circuito monofásico aplicado nessa barra. A despeito do cenário de carga média resultar em sobretensões pouco mais elevadas que do cenário de carga leve, de modo geral, as sobretensões continuam não elevadas e não devem provocar restrições operativas

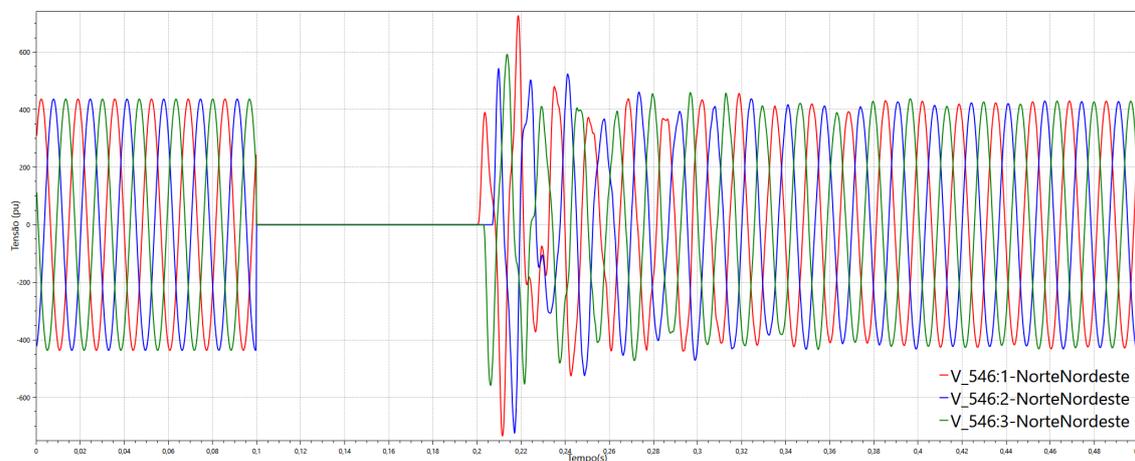


Figura 6-15 - Curto 3Ø em Graça Aranha 500 kV, tensão em Graça Aranha 500 kV – carga média

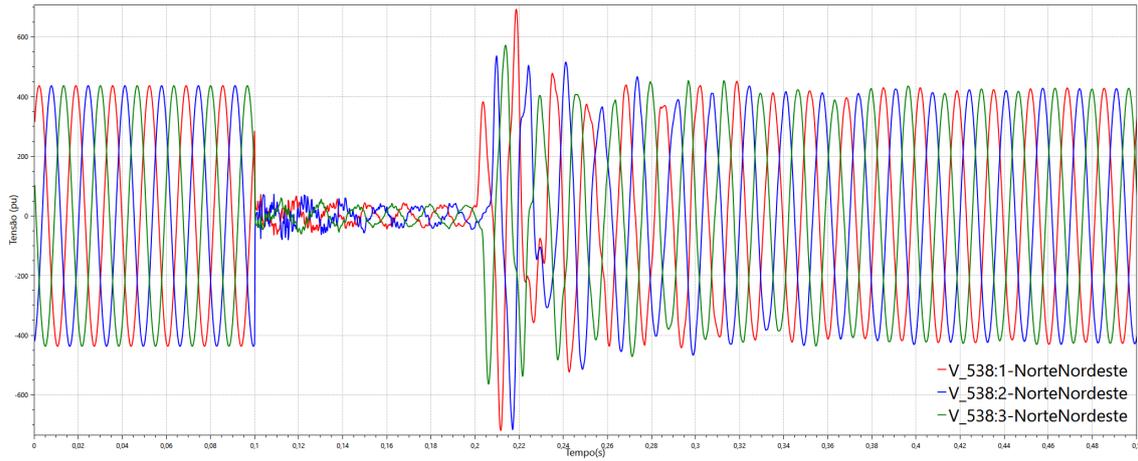


Figura 6-16 – Curto 3Ø em Graça Aranha 500 kV, tensão em P. Dutra 500 kV – carga média

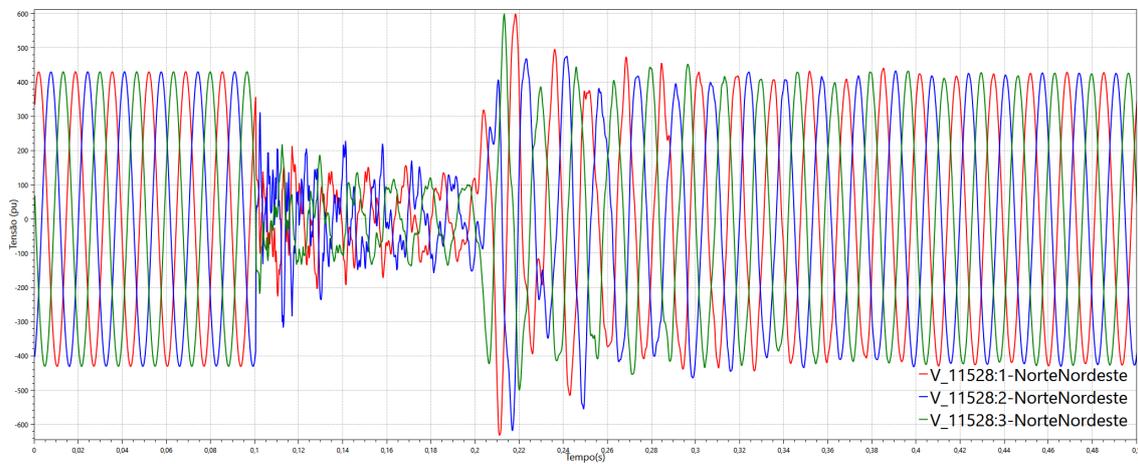


Figura 6-17 - Curto 3Ø em Graça Aranha 500 kV, tensão em Teresina 500 kV – carga média

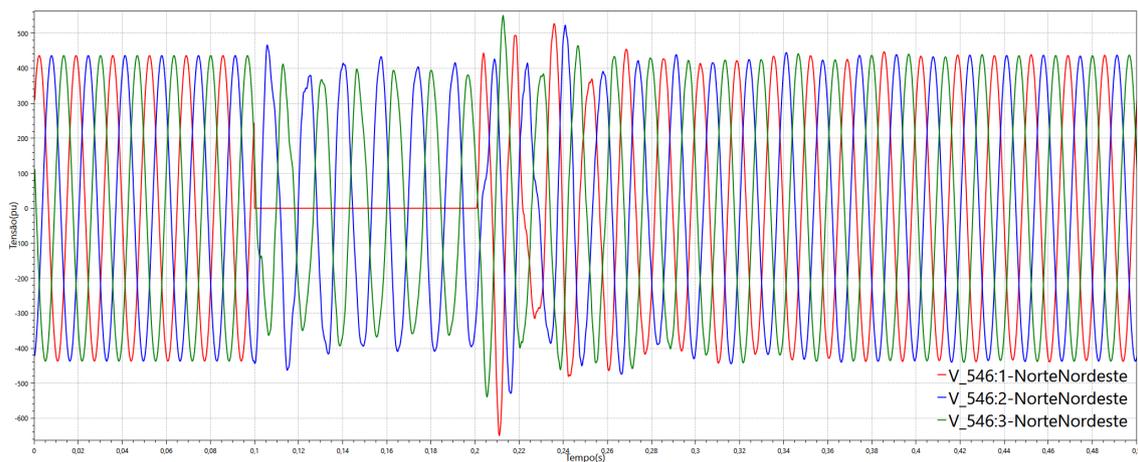


Figura 6-18 - Curto 1Ø em Graça Aranha 500 kV, tensão em Graça Aranha 500 kV – carga média

Como mostrado no Relatório R1[2], as conversoras dos diferentes sistemas de transmissão CCAT do SIN, recuperam suas potências CC, em tempos adequados, após curto-circuito na barra conversora de Graça Aranha 500 kV, indicando a adequação da expansão planejada para o bipolo Nordeste I, assim como, dos modelos utilizados nesses estudos.

7 REFERÊNCIAS

- [1] Diretrizes para a Elaboração dos Relatórios Técnicos para Licitação de Novas Instalações da Rede Básica - Estrutura e Conteúdo dos Relatórios R1, R2, R3, R4 e R5, nº EPE-DEE-DEA-NT-002/2022rev0, julho de 2022.
- [2] Estudo de expansão das interligações regionais – Parte II: Expansão da capacidade de exportação da região Norte/Nordeste, Relatório R1, nº EPE-DEE-RE-018/2022-rev2, dezembro 2022
- [3] Elo de Corrente Contínua \pm 800 kV Graça Aranha – Silvânia – Parte I: representação da impedância da rede, Relatório R2, nº EPE-DEE-RE-092/2022-rev1, dezembro 2022.
- [4] Expansão da Interligação entre as Regiões Norte/Nordeste e Sudeste/Centro Oeste – Elo de Corrente Contínua \pm 800 kV Xingu – Terminal Minas, Relatório R2, nº EPE-DEE-RE-062/2013-rev1, agosto 2013.
- [5] Expansão da Interligação entre as Regiões Norte/Nordeste e Sudeste/Centro Oeste – Elo de Corrente Contínua \pm 800 kV Xingu – Terminal Rio, Relatório R2, nº EPE-DEE-RE-136/2014-rev0, outubro 2014.

8 EQUIPE TÉCNICA

EPE

- Bruno Scarpa Alves da Silveira
- Daniel José Tavares de Souza
- Dourival de Souza Carvalho Junior
- Fabiano Schmidt
- Rodrigo Rodrigues Cabral
- Tiago Campos Rizzotto
- Thais Pacheco Teixeira

ONS

- Hélio Pessoa de Oliveira Junior
- Márcio Nunes Accioly Lins

ANEXO A. Tensões transitórias – carga leve - complemento

As figuras a seguir complementam os resultados das simulações de curto-circuito em cenário de carga leve.

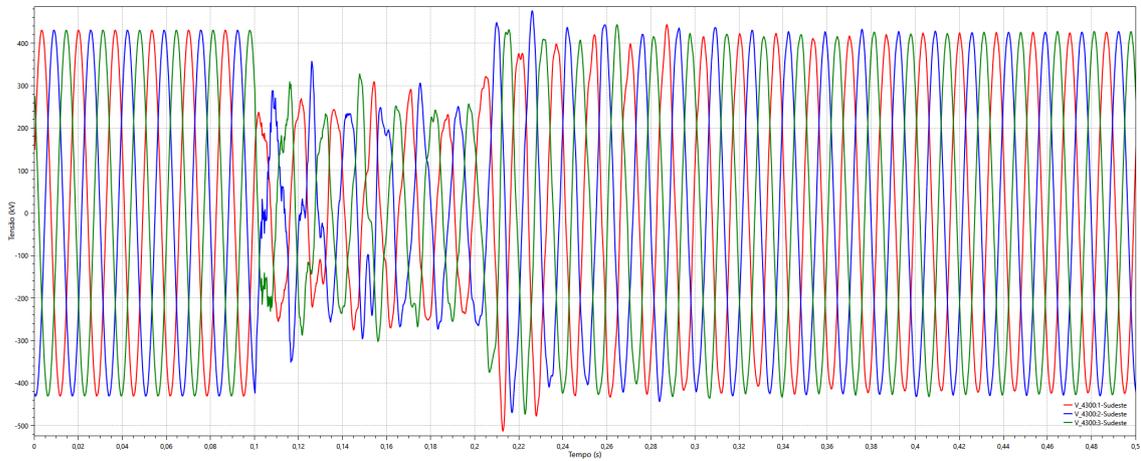


Figura A-1 - Curto 3Ø em Silvânia 500 kV, tensão em Luziânia 500 kV – carga leve

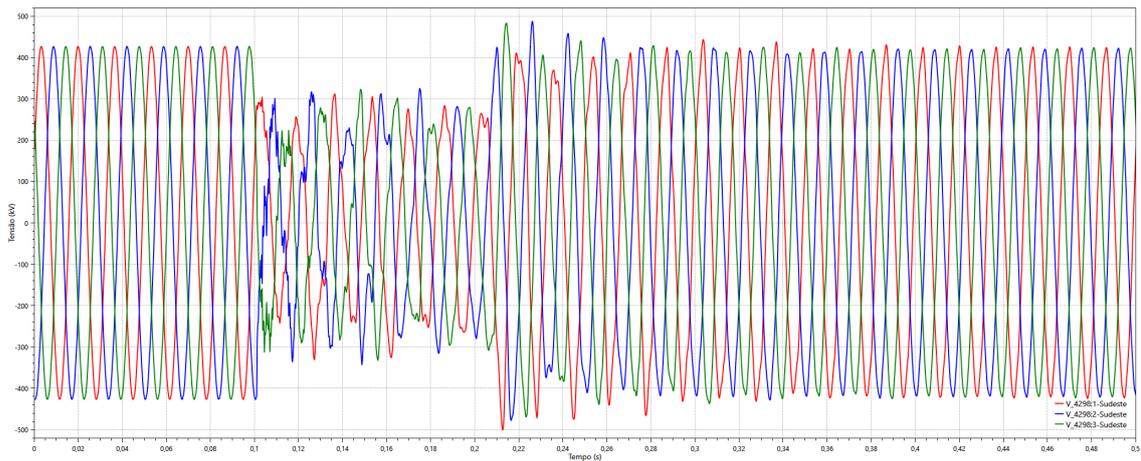


Figura A-2 - Curto 3Ø em Silvânia 500 kV, tensão em Serra da Mesa 500 kV – carga leve

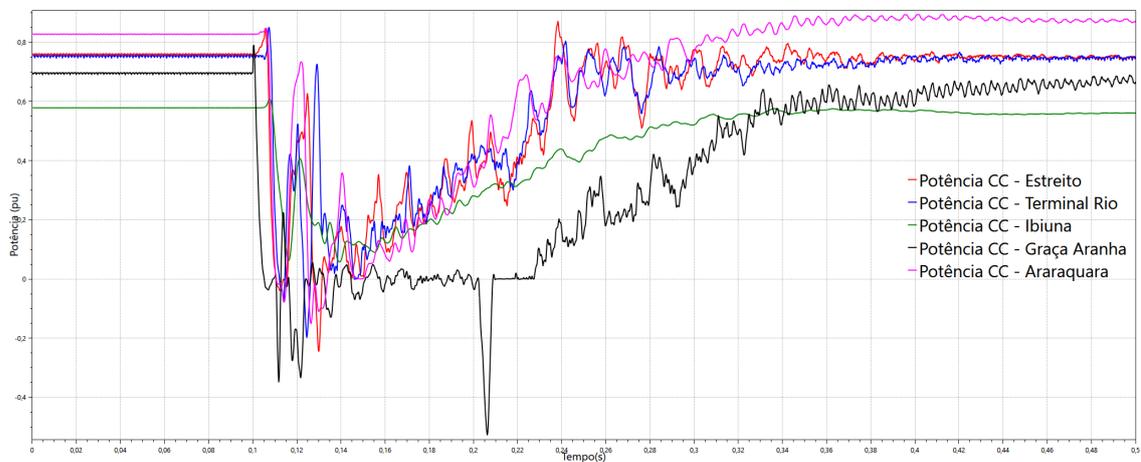


Figura A-3 - Curto 3Ø em Silvânia 500 kV, potência nos elos CCAT – carga leve

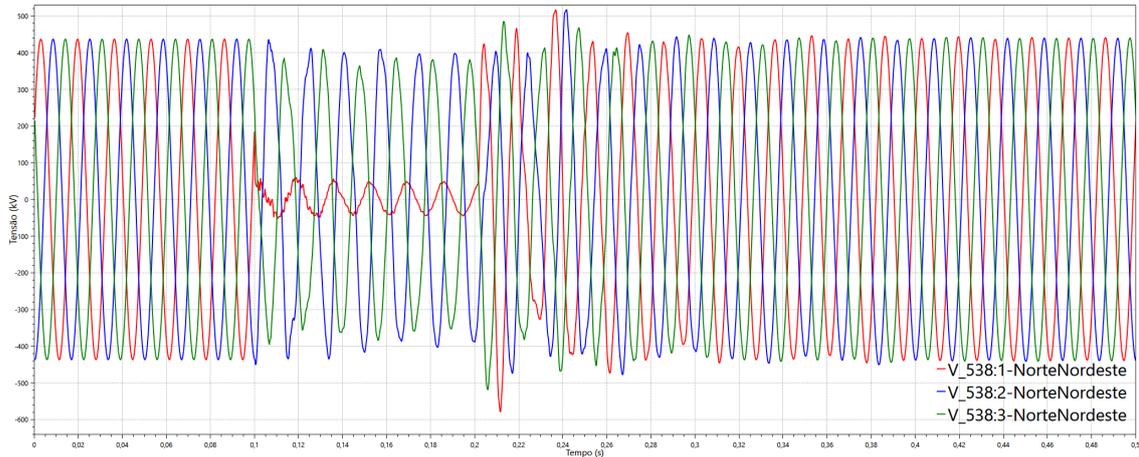


Figura A-4 - Curto 1Ø em Graça Aranha 500 kV, tensão em P. Dutra 500 kV – carga leve

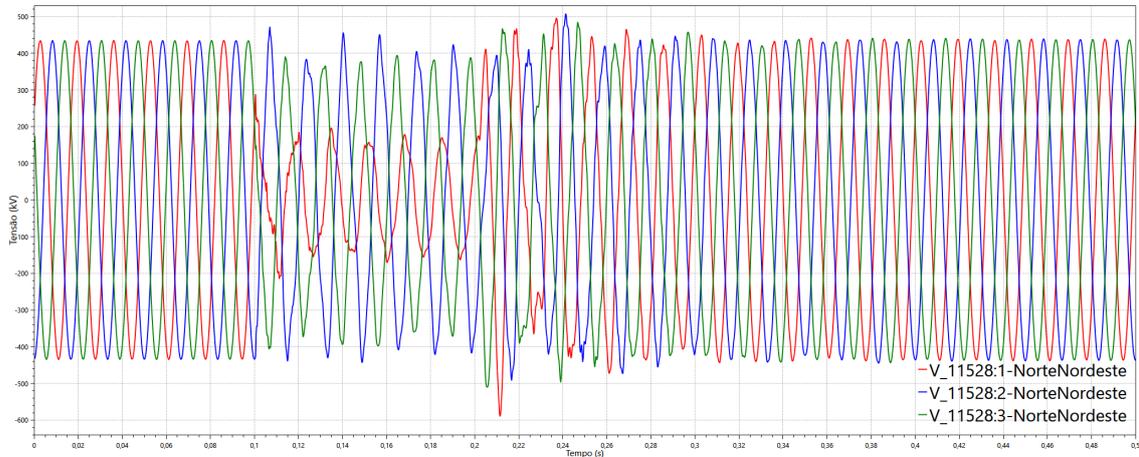


Figura A-5 - Curto 1Ø em Graça Aranha 500 kV, tensão em Teresina 500 kV – carga leve

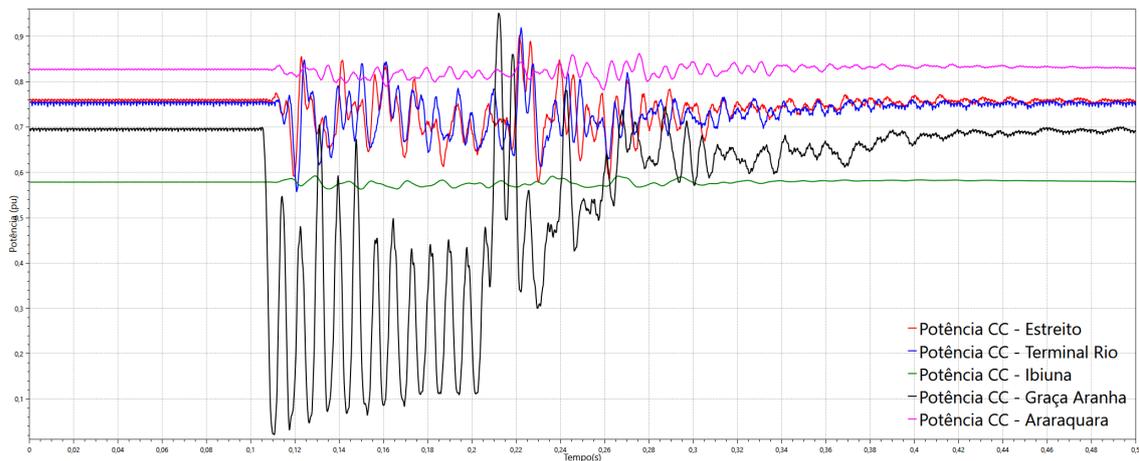


Figura A-6 - Curto 1Ø em Graça Aranha 500 kV, potência nos elos CCAT – carga leve

ANEXO B. Tensões transitórias – carga média - complemento

As figuras a seguir complementam os resultados das simulações de curto-circuito em cenário de carga média.

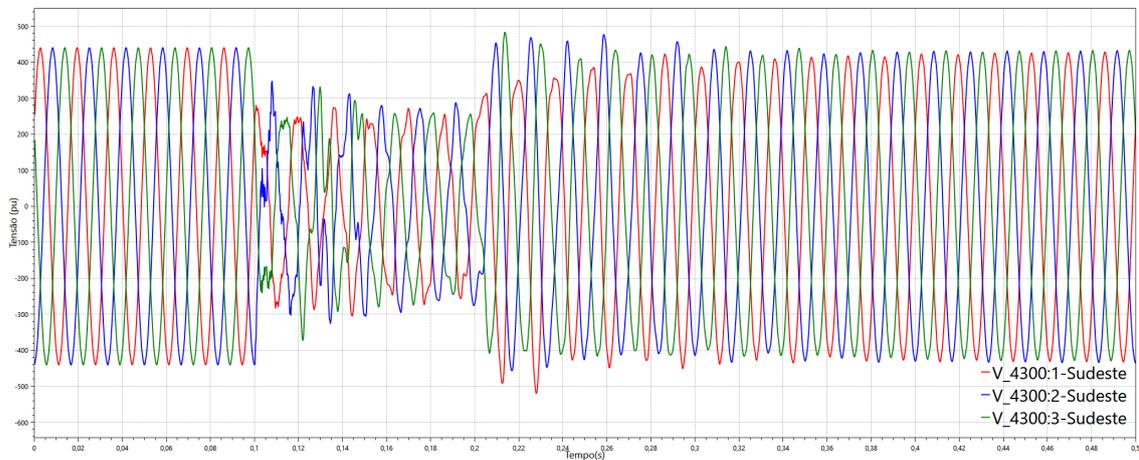


Figura B-1 - Curto 3Ø em Silvânia 500 kV, tensão em Luziânia 500 kV – carga média

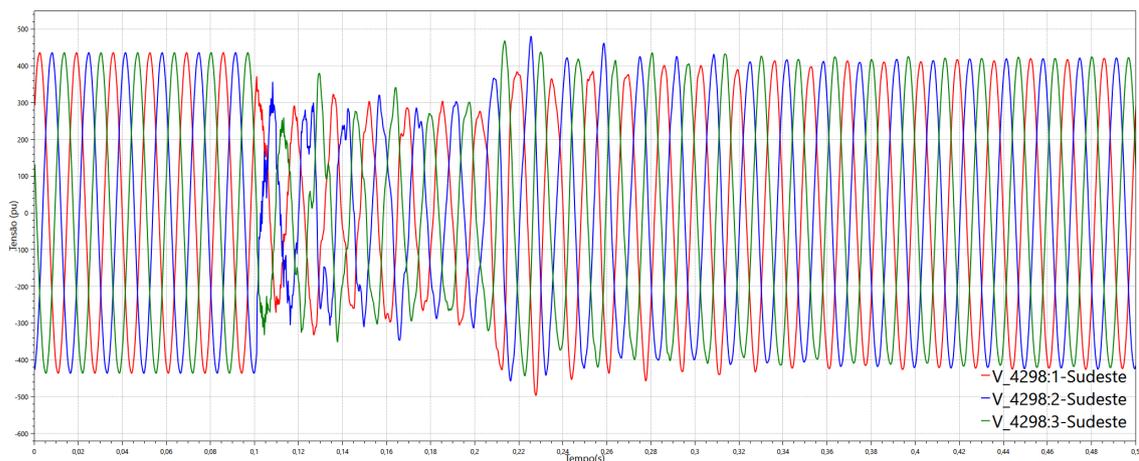


Figura B-2 - Curto 3Ø em Silvânia 500 kV, tensão em Serra da Mesa 500 kV – carga média

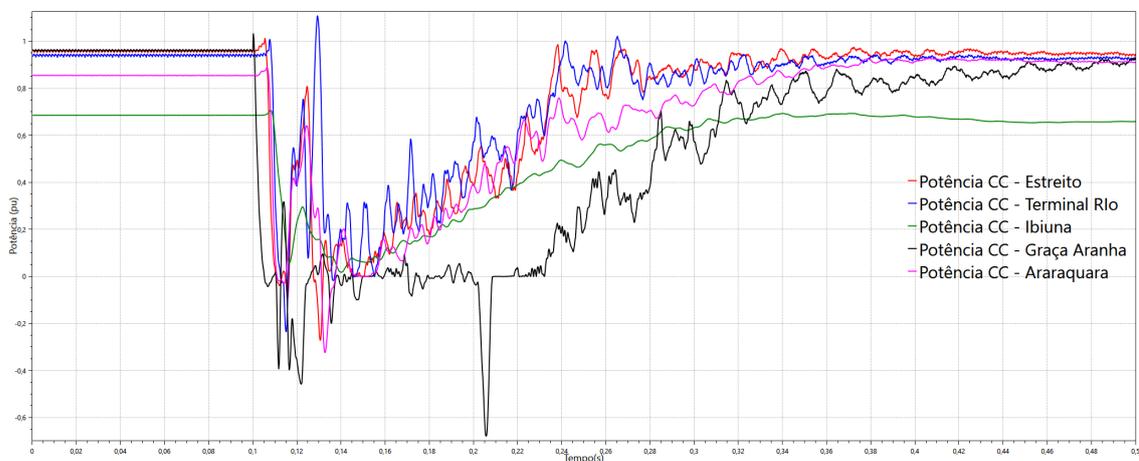


Figura B-3 - Curto 3Ø em Silvânia 500 kV, potência nos elos CCAT – carga média

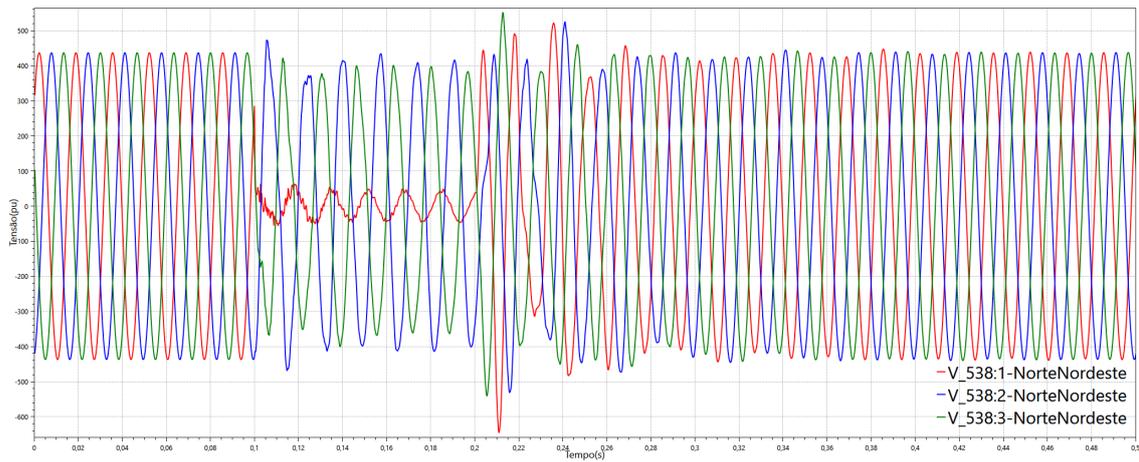


Figura B-4 - Curto 1Ø em Graça Aranha 500 kV, tensão em P. Dutra 500 kV – carga média

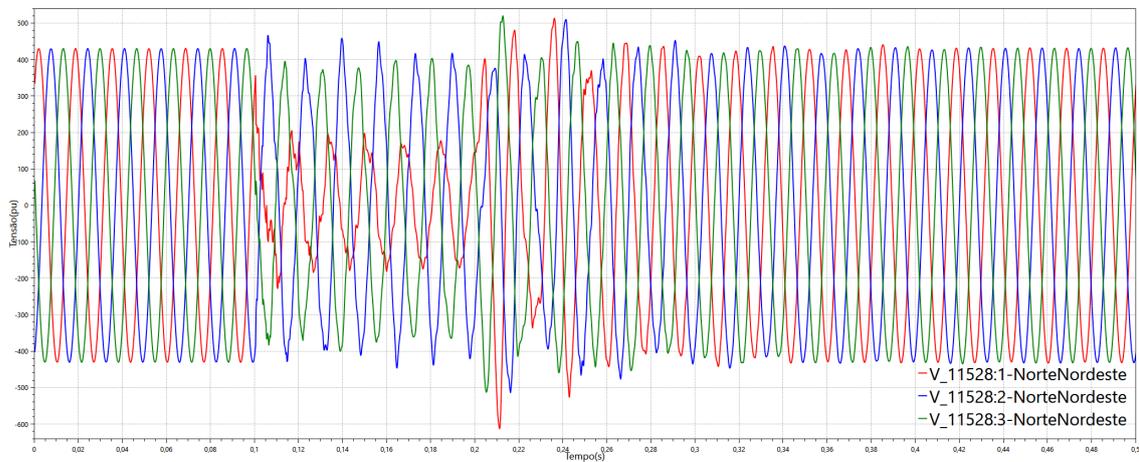


Figura B-5 - Curto 1Ø em Graça Aranha 500 kV, tensão em Teresina 500 kV – carga média

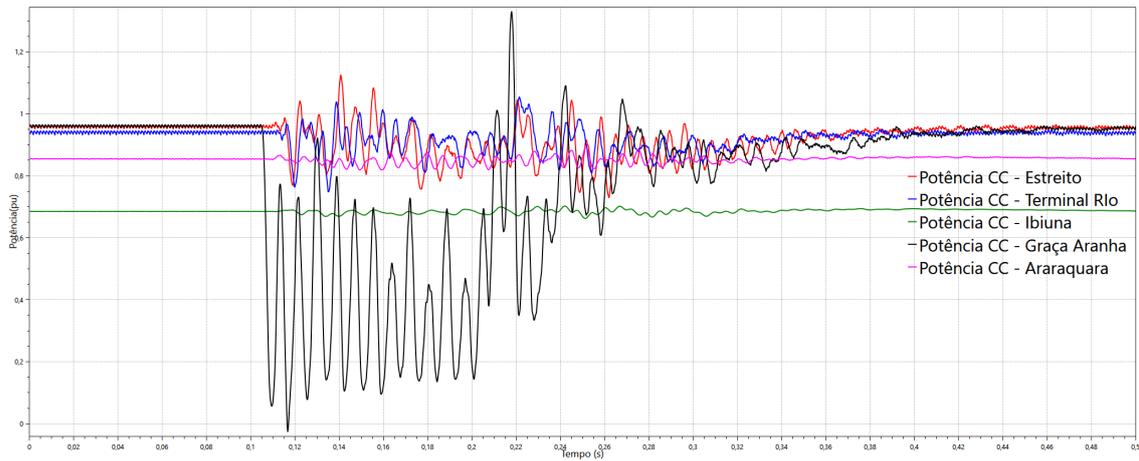


Figura B-6 - Curto 1Ø em Graça Aranha 500 kV, potência nos elos CCAT – carga média