



ESTUDOS PARA A EXPANSÃO DA TRANSMISSÃO

Nota Técnica:

*Desempenho Dinâmico do Sistema de SP no
Horizonte de Médio/Longo Prazo*

Janeiro de 2021

MINISTÉRIO DE
MINAS E ENERGIA



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



GOVERNO FEDERAL
MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA

Ministério de Minas e Energia

Ministro

Bento Albuquerque

Secretário-Executivo do MME

Marisete Fátima Dadald Pereira

Secretário de Planejamento e Desenvolvimento Energético

Paulo César Magalhães Domingues

Secretário de Energia Elétrica

Rodrigo Limp Nascimento

Secretário de Petróleo, Gás Natural e Combustíveis Renováveis

José Mauro Ferreira Coelho

Secretário de Geologia, Mineração e Transformação Mineral

Alexandre Vidigal de Oliveira

ESTUDOS PARA A LICITAÇÃO DA EXPANSÃO DA TRANSMISSÃO

Nota Técnica:

Desempenho Dinâmico do Sistema de SP no Horizonte de Médio/Longo Prazo



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

Erik Eduardo Rego

Diretor de Estudos de Petróleo, Gás e Biocombustíveis

Heloisa Borges Bastos Esteves

Diretor de Gestão Corporativa

Angela Livino

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

Erik Eduardo Rego

Coordenação Executiva

José Marcos Bressane

Coordenação Técnica

Thaís Pacheco Teixeira

Equipe Técnica

Rodrigo Rodrigues Cabral
Tiago Campos Rizzotto

Nº EPE-DEE-NT-005/2021-rev0

Data: 15/01/2021

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

| | | |
|--|---|---|
|  | <p><i>Contrato</i> _____</p> <p><i>Data de assinatura</i> _____</p> | |
| <p><i>Projeto</i></p> <p align="center">ESTUDOS PARA A LICITAÇÃO DA EXPANSÃO DA TRANSMISSÃO</p> | | |
| <p><i>Área de estudo</i></p> <p align="center">Estudos do Sistema de Transmissão</p> | | |
| <p><i>Sub-área de estudo</i></p> <p align="center">Nota Técnica</p> | | |
| <p><i>Produto (Nota Técnica ou Relatório)</i></p> <p>EPE-DEE-NT-005/2021-rev0 Desempenho Dinâmico do Sistema de SP no Horizonte de Médio/Longo Prazo</p> | | |
| <p><i>Revisões</i></p> <p>rev0</p> | <p><i>Data</i></p> <p>15/01/2021</p> | <p><i>Descrição sucinta</i></p> <p>Emissão Original</p> |

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

APRESENTAÇÃO

Esta nota técnica tem como objetivo analisar os benefícios da recomendação de reforços que garantam maior confiabilidade e flexibilidade operativa em cenários críticos de elevada importação de energia pela região Sudeste, bem como garantir o controle de tensão no Sistema de São Paulo em cenários de elevada injeção de potência pelos elos em corrente contínua, no horizonte de médio e longo Prazo.

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| Apresentação | 7 |
| Sumário | 8 |
| Lista de Figuras | 10 |
| Lista de Tabelas | 12 |
| 1 Introdução | 13 |
| 2 Conclusão | 16 |
| 3 Recomendações | 18 |
| 4 Dispensa do relatório R2 | 19 |
| 5 Dispensa do relatório R3 | 20 |
| 6 Premissas e Critérios | 21 |
| 6.1 Premissas Gerais | 21 |
| 6.2 Critérios de desempenho do sistema | 21 |
| 7 Cenários Analisados | 23 |
| 7.1 Cenário 1 – Norte/Nordeste exportador no patamar de carga média | 23 |
| 7.2 Cenário 2 – Carga Média Sudeste Importador | 25 |
| 7.3 Cenário 3 – Norte/Nordeste exportador na carga mínima | 26 |
| 8 Diagnóstico | 27 |
| 9 Dimensionamento da Compensação Reativa | 35 |
| 10 Descrição das Alternativas | 38 |
| 11 Análise do Desempenho Dinâmico | 47 |
| 11.1 Recuperação mais rápida da potência transmitida após perturbação | 47 |
| 11.2 Melhor aproveitamento da capacidade de sobrecarga dinâmica | 49 |
| 11.3 Aumento da capacidade de exportação do Norte e Nordeste para o Sudeste/Centro-Oeste | 52 |
| 11.4 Menor afundamento de tensão na região Sudeste | 53 |
| 11.5 Redução de sobretensões dinâmicas na SE Estreito | 54 |
| 11.6 Melhor desempenho dos bipolos vizinhos | 56 |
| 11.7 Amortecimento mais rápido das oscilações de tensão nas interligações CA | 58 |
| 11.8 Operação da conversora de Estreito em condições mais seguras | 59 |
| 11.9 Menor frequência de comutação de tapes | 61 |
| 12 Análise do Desempenho do sistema em ambiente PSCAD | 62 |
| 12.1 Caso de trabalho e Premissas | 62 |
| 12.2 Cenários Simulados | 63 |
| 12.3 Medições de interesse e sinais monitorados durante as simulações | 63 |
| 12.4 Eventos simulados no PSCAD e Comparação dos Índices de Desempenho | 63 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 13 | Análise de Curto-circuito | 66 |
| 14 | Referências | 68 |
| 15 | Fichas PET/PELP | 69 |
| 16 | Anexo 1 – Consultas de Viabilidade de Expansão | 70 |
| 16.1 | SE Estreito – MG LTT – Linhas de Transmissão Triângulo S.A. | 70 |
| 17 | Anexo 2 – Plano de Obras e Estimativa de Custos | 78 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1-1 - Conexão de bipolos em corrente contínua no sistema São Paulo e vizinhança..... | 13 |
| Figura 1-2 – Malha de transmissão de SP e localização das usinas térmicas e hidrelétricas de grande porte | 15 |
| Figura 2-1 – Diagrama unifilar da SE Estreito com os compensadores síncronos recomendados | 17 |
| Figura 7-1 – Cenário 1 – ano 2024 | 23 |
| Figura 7-2 – Cenário 1a – ano 2029 | 24 |
| Figura 7-3 – Cenário 1b – ano 2029 | 24 |
| Figura 7-4 – Cenário 1c – ano 2029..... | 25 |
| Figura 7-5 – Cenário 2 – ano 2024. | 26 |
| Figura 7-6 – Cenário 3 - ano 2024..... | 27 |
| Figura 8-1 – Tensão [pu] nas barras de 500 kV do sistema São Paulo após curto-circuito na SE 500 kV Campinas com abertura dupla dos circuitos da LT 500 kV Campinas-Itatiba. (Cenário 2 – ano 2024) | 28 |
| Figura 8-2-Potência [MW] por polo no elo CCAT Xingu-Estreito após aplicação de curto-circuito na SE Estreito com abertura da LT 500 kV Estreito-F. Dias. (Cenário 1 – 2029) | 29 |
| Figura 8-3-Potência [MW] por polo no elo CCAT Xingu-Estreito após bloqueio do bipolo Xingu - T.Rio. (Cenário 2 – 2024) | 30 |
| Figura 8-4-Tensão [pu] na SE 500 kV Estreito após bloqueio do bipolo Xingu - T.Rio. (Cenário 2 – ano 2024) . | 31 |
| Figura 8-5-Modo de Controle da Conversora de Estreito. Bloqueio bipolo Terminal Rio. (Cenário 2 – ano 2024) | 32 |
| Figura 8-6- Ângulo de Extinção da conversora Estreito. Bloqueio bipolo Terminal Rio. (Cenário 2 – ano 2024) . | 32 |
| Figura 8-7-Tensão [pu] nas barras de 500 kV do sistema São Paulo após bloqueio do bipolo Xingu- T.Rio. (Cenário 2 – ano 2024) | 33 |
| Figura 8-8-Tensão [pu] na SE 500 kV Estreito após bloqueio do bipolo Xingu-Estreito. (Cenário 3 - ano 2024) | 34 |
| Figura 9-1-Potência [MW] por polo no elo CCAT Xingu-Estreito após bloqueio do bipolo Xingu-T.Rio. (Cenário 1 – ano 2024)..... | 35 |
| Figura 9-2-Potência [MW] por polo no elo CCAT Xingu-Estreito após curto-circuito na SE Estreito com abertura da LT 500 kV Estreito-F. Dias. (Cenário 1 - ano 2029) | 36 |
| Figura 10-1-Potência reativa [Mvar] com Compensação Síncrona em e Compensação Síncrona em Campinas, após curto-circuito na SE Estreito e abertura da LT 500 kV Estreito-F. Dias. (Cenário 1 – ano 2029) | 39 |
| Figura 10-2-Potência [MW] por polo no elo CCAT Xingu-Estreito após curto-circuito na SE Estreito e abertura da LT 500 kV Estreito-F. Dias. (Cenário 1 - ano 2029) | 39 |
| Figura 10-3-Potência reativa [Mvar] com inserção de compensação síncrona e estática na SE Estreito após curto-circuito na SE Estreito e abertura da LT 500 kV Estreito-F. Dias. (Cenário 1 - ano 2029)..... | 41 |
| Figura 10-4-Potência [MW] polo elo CCAT Xingu-Estreito. Curto-circuito SE Estreito com abertura LT 500 kV Estreito-F. Dias. (Cenário 1 - ano 2029)..... | 42 |
| Figura 10-5-Potência reativa [Mvar] injetada na rede pelo compensador síncrono e pelo compensador estático na SE Estreito após bloqueio bipolo Xingu - T.Rio. (Cenário 1 - ano 2024) | 43 |
| Figura 10-6-Potência [MW] por polo no elo CCAT Xingu-Estreito após bloqueio do bipolo Xingu - T.Rio. (Cenário 1 ano 2024)..... | 43 |
| Figura 11-1-Potência [MW] por polo do elo CCAT Xingu-Estreito após curto-circuito na SE Estreito com abertura dupla da LT 500 kV Estreito-F. Dias. (Cenário 1 - ano 2029) | 48 |
| Figura 11-2-Potência reativa [Mvar] injetada pelo CS de Estreito após curto-circuito na SE Estreito com abertura dupla da LT 500 kV Estreito-F. Dias. (Cenário 1 - ano 2029) | 49 |
| Figura 11-3-Potência [MW] por polo do elo CCAT Xingu-Estreito após bloqueio do bipolo Xingu - T.Rio. (Cenário 1 - ano 2029)..... | 51 |

Figura 11-4-Potência reativa [Mvar] injetada pelo CS de Estreito após bloqueio do bipolo Xingu - T.Rio. (Cenário 1 - ano 2029)..... 51

Figura 11-5-Tensão [pu] na SE 500 kV Serra da Mesa 2 após bloqueio do bipolo Xingu - T.Rio. (Cenário 2 - ano 2024) 52

Figura 11-6-Tensão [pu] na SE 500 kV Estreito após bloqueio do bipolo Xingu - T. Rio. (Cenário 1 - ano 2024)53

Figura 11-7-Potência Reativa [Mvar] injetada pelo CS de Estreito após bloqueio do bipolo Xingu - T. Rio. (Cenário 1 - ano 2024) 54

Figura 11-8-Tensão [pu] na SE 500 kV Estreito após bloqueio do bipolo Xingu - Estreito. (Cenário 3)..... 55

Figura 11-9-Potência reativa [Mvar] absorvida pelo CS Estreito após bloqueio do bipolo Xingu - Estreito. (Cenário 3) 55

Figura 11-10-Potência [MW] por elo CCAT Itaipu após perda dupla da LT 500 kV Estreito-C. Paulista. (Cenário 1c - ano 2029) 56

Figura 11-11-Tensão [pu] na SE 345 kV Ibiúna após perda dupla da LT 500 kV Estreito-C. Paulista. (Cenário 1c - ano 2029) 57

Figura 11-12-Tensão [pu] na SE 500 kV Araraquara2 após bloqueio do bipolo Xingu - T. Rio. (Cenário 1c - ano 2029) 58

Figura 11-13-Tensão [pu] na SE 500 kV Serra da Mesa 2 após perda dupla da LT 500 kV Estreito-C. Paulista. (Cenário 1 - ano 2029) 59

Figura 11-14-Controle da Conversora Estreito após bloqueio do bipolo Xingu - Terminal Rio. (Cenário 2 - ano 2024) 60

Figura 11-15-Ângulo de Extinção da conversora Estreito após bloqueio do bipolo Xingu - Terminal Rio. (Cenário 2 - ano 2024)..... 60

Figura 11-16-Relação de transformação na conversora de Estreito após bloqueio do bipolo Xingu - Terminal Rio. (Cenário 2 - ano 2024) 61

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 3-1 - Obras Propostas..... | 18 |
| Tabela 6-1 – Limites de tensão em regime permanente..... | 22 |
| Tabela 10-1 – Índices MIIF para alternativa com compensação síncrona e estática, ano 2029, carga média. ... | 45 |
| Tabela 10-2 – Potência de curto-circuito com compensação síncrona e estática, ano 2029, carga média. | 45 |
| Tabela 10-3 – SCR com compensação síncrona e estática, ano 2029, carga média..... | 46 |
| Tabela 12-1 – Tempo de duração total da Interrupção de potência (ms) | 65 |
| Tabela 12-2 - Tempos de Recuperação de Potência (ms)..... | 65 |
| Tabela 13-1 - Níveis de Curto-circuito verificados no ano 2024..... | 66 |
| Tabela 13-2 - Níveis de Curto-circuito verificados no ano 2029..... | 66 |
| Tabela 13-3 – Relação entre corrente de curto-circuito e capacidade de interrupção de corrente simétrica (Icc/Ics) no ano 2024..... | 67 |
| Tabela 13-4 - Relação entre corrente de curto-circuito e capacidade de interrupção de corrente simétrica (Icc/Ics) no ano 2029..... | 67 |

1 INTRODUÇÃO

O Sistema Interligado Nacional (SIN) tem evoluído consideravelmente nos últimos anos, com grande concentração da oferta de geração nos submercados Norte e Nordeste. Em contrapartida, o maior centro de carga do sistema continua sendo a região Sudeste/Centro-Oeste, em especial, o estado de São Paulo (SP). Assim, surge, naturalmente, a necessidade de transferência de grandes blocos de energia dos polos de geração para os centros de carga.

A usina Hidrelétrica de Belo Monte, por exemplo, construída na bacia do Rio Xingu, no estado do Pará, tem capacidade de geração de 11.233 MW. O escoamento da potência dessa usina é provido diretamente pelo sistema em corrente alternada que se conecta à subestação Xingu, no Pará, e por dois elos de corrente contínua em alta tensão (CCAT), os quais interligam o sistema Norte às subestações de Estreito e Terminal Rio, localizadas na divisa entre os estados de Minas Gerais e São Paulo e no estado do Rio de Janeiro, respectivamente.

Esses dois elos de corrente contínua, junto aos dois outros elos CCAT existentes no SIN, conectados às subestações de Ibiúna e Araraquara, tornam a malha elétrica de São Paulo e vizinhança, um ponto de concentração de sistemas receptores de elos CCAT no SIN, configuração conhecida como *Multi-infeed*, conforme ilustrado na Figura 1-1.



Figura 1-1 - Conexão de bipolos em corrente contínua no sistema São Paulo e vizinhança

Por questões inerentes à tecnologia empregada nos bipolos CCAT do SIN (tecnologia LCC¹), é necessário que a rede receptora desses bipolos seja robusta o suficiente para prover o controle rápido de tensão após a ocorrência de eventos críticos, como curto-circuito ou outros que provoquem desequilíbrios ou afundamento de tensão na rede CA, a fim de prover condições de desempenho adequado para a operação das válvulas conversoras do sistema em corrente contínua e a recuperação da potência originalmente transmitida, após a ocorrência de falhas de comutação.

Box 1-1 - Falhas de comutação

A ocorrência de falha de comutação é um evento previsto desde a etapa de concepção dos sistemas em corrente contínua, nos estudos de planejamento, uma vez que ela é inerente ao processo de comutação das válvulas conversoras compostas por tiristores, quando ocorrem desequilíbrios ou variações elevadas na tensão da rede CA à qual estão conectadas, podendo resultar de curto-circuitos, aberturas de linhas, dentre outros eventos.

O fenômeno ocorre quando, no processo de comutação, uma válvula da ponte conversora que deveria ser bloqueada volta a conduzir, levando a tensão CC a zero, podendo causar interrupção transitória da potência transmitida pelos bipolos.

Na etapa de planejamento dos sistemas em corrente contínua, o requisito que define a adequabilidade de seu desempenho é o tempo de recuperação da potência pelo bipolo, após a extinção do defeito causador da interrupção de potência.

Dessa forma, considera-se o desempenho dos sistemas em corrente contínua satisfatório quando, após a ocorrência de falhas de comutação, ocorre recuperação da potência transmitida pelos bipolos dentro de um intervalo de tempo especificado (tipicamente, da ordem de 200 milissegundos).

A rede elétrica do estado de São Paulo é composta por um número elevado de linhas de transmissão, formando uma malha que agrega grande robustez ao sistema elétrico receptor dos bipolos. Conforme ilustrado na Figura 1-2, essa malha de transmissão provê a aproximação elétrica entre as conversoras de frequência e as usinas térmicas e hidráulicas disponíveis na região, as quais contribuem com a elevação da potência de curto-circuito nos pontos de conexão das conversoras, favorecendo o controle de tensão e o desempenho adequado dos sistemas em corrente contínua, após a ocorrência de eventos de elevada severidade, conforme indicado pelas simulações elétricas que serão apresentadas ao longo do documento.

¹ A tecnologia LCC (*line commutated current-sourced converters*) é baseada na conversão CA/CC através do processo de comutação de válvulas tiristoras. A condução e bloqueio desses dispositivos de eletrônica de potência possui forte dependência com o módulo e equilíbrio entre fases da tensão de entrada do sistema CA.

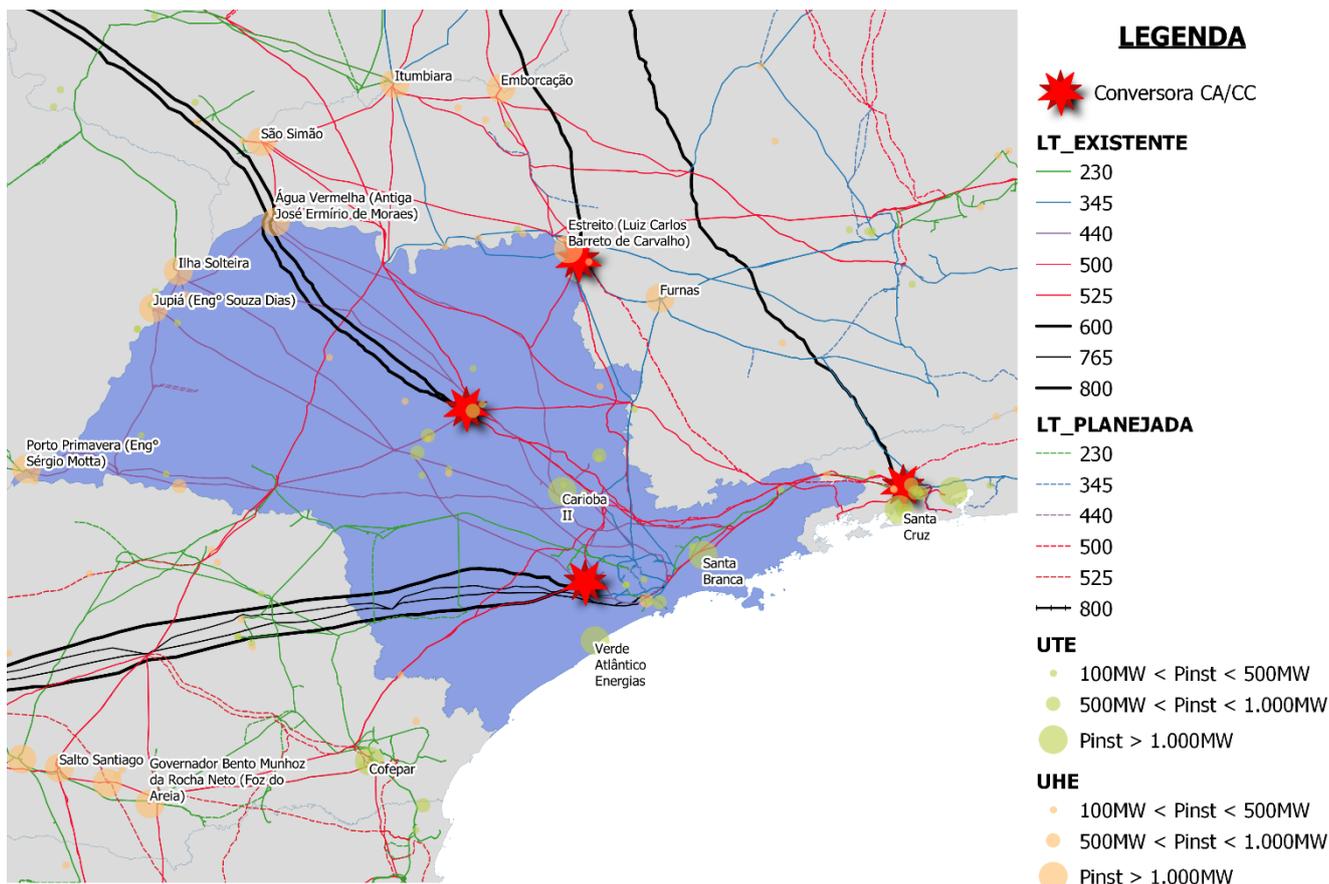


Figura 1-2 – Malha de transmissão de SP e localização das usinas térmicas e hidrelétricas de grande porte

Um ponto a ser observado é que devido à aproximação elétrica entre as subestações conversoras, podem ocorrer falhas de comutação simultâneas em múltiplos elos em corrente contínua, quando ocorre variação de tensão na rede CA, o que pode culminar na interrupção transitória de grandes blocos de potência.

Nesse contexto, a presença de equipamentos que contribuem especificamente com compensação reativa variável é fundamental para que após a ocorrência de defeitos na rede CA que provoquem afundamentos de tensão e por consequência, falhas de comutação, ocorra injeção rápida de reativos no sistema, viabilizando o controle da tensão em níveis aceitáveis para a operação das válvulas conversoras e a recuperação rápida da potência transmitida pelos bipolos.

Dessa forma, é sempre importante avaliar reforços que garantam o melhor desempenho dinâmico do sistema, fornecendo maior confiabilidade e flexibilidade em diferentes cenários operativos.

A presente nota técnica se concentra em avaliar reforços que garantam melhor desempenho do sistema, buscando aumentar a confiabilidade e flexibilidade operativa, bem como garantir o controle de tensão no sistema São Paulo, em situações de operação críticas que tendem a ocorrer em cenários de elevada importação de energia pela região Sudeste.

2 CONCLUSÃO

Este estudo avaliou o desempenho do Sistema Interligado Nacional face a eventos de natureza dinâmica, como curto-circuito, perdas duplas de linhas de transmissão CA e CC e falhas de comutação.

Dentre as alternativas avaliadas que melhoram o desempenho do sistema, a que apresentou os maiores ganhos de confiabilidade e flexibilidade operativa foi a alternativa com 3 unidades de compensadores síncronos, de -180/300Mvar, por unidade, na SE 500kV Estreito. A alternativa baseada em compensação estática apresentou ganhos de desempenho dinâmico para as perturbações simuladas, no que concerne ao controle de tensão, contudo, com ela, não foi observado aumento na robustez elétrica, no tocante à capacidade de curto-circuito e às interações entre as múltiplas conversoras de elo CCAT na região Sudeste, avaliada a partir dos índices de *Multi-infeed*.

As análises de desempenho em regime dinâmico demonstraram que a implantação dos compensadores síncronos na SE 500kV Estreito não só resulta em aprimoramento no desempenho da malha elétrica da região São Paulo, como também traz benefícios para o sistema elétrico interligado, como um todo.

De modo específico, tais equipamentos proporcionam:

- Recuperação mais rápida da potência transmitida pelo bipolo em 800 kV Xingu-Estreito após ocorrência de falhas de comutação.
- Aproveitamento otimizado da capacidade de sobrecarga dinâmica do bipolo em 800 kV Xingu – Estreito.
- Aumento da capacidade de exportação do submercado Norte/Nordeste para o submercado Sudeste/Centro-Oeste.
- Redução de afundamentos de tensão no sistema São Paulo, durante perturbações do sistema.
- Redução de sobretensões dinâmicas na subestação de Estreito após bloqueio de bipolo.
- Melhor desempenho de todos os elos CCAT conectados na região Sudeste.
- Melhor amortecimento de tensão das barras de interligação CA durante perturbações.
- Operação da conversora de Estreito em condições mais seguras (menos susceptíveis à ocorrência de falhas de comutação).
- Menor frequência de comutação de tapes dos transformadores conversores de Estreito.

As análises em transitórios eletromagnéticos cancelam os resultados encontrados nas análises de transitórios eletromecânicos, principalmente no tocante aos ganhos de desempenho local.

O programa de obras, detalhado no Anexo 2 – Plano de Obras e Estimativa de Custos, exigirá investimentos totais da ordem de 488 milhões de reais, integralmente em Rede Básica.

A Figura 2-1 apresenta o diagrama unifilar simplificado da subestação de Estreito com os Compensadores Síncronos (CS) recomendados.

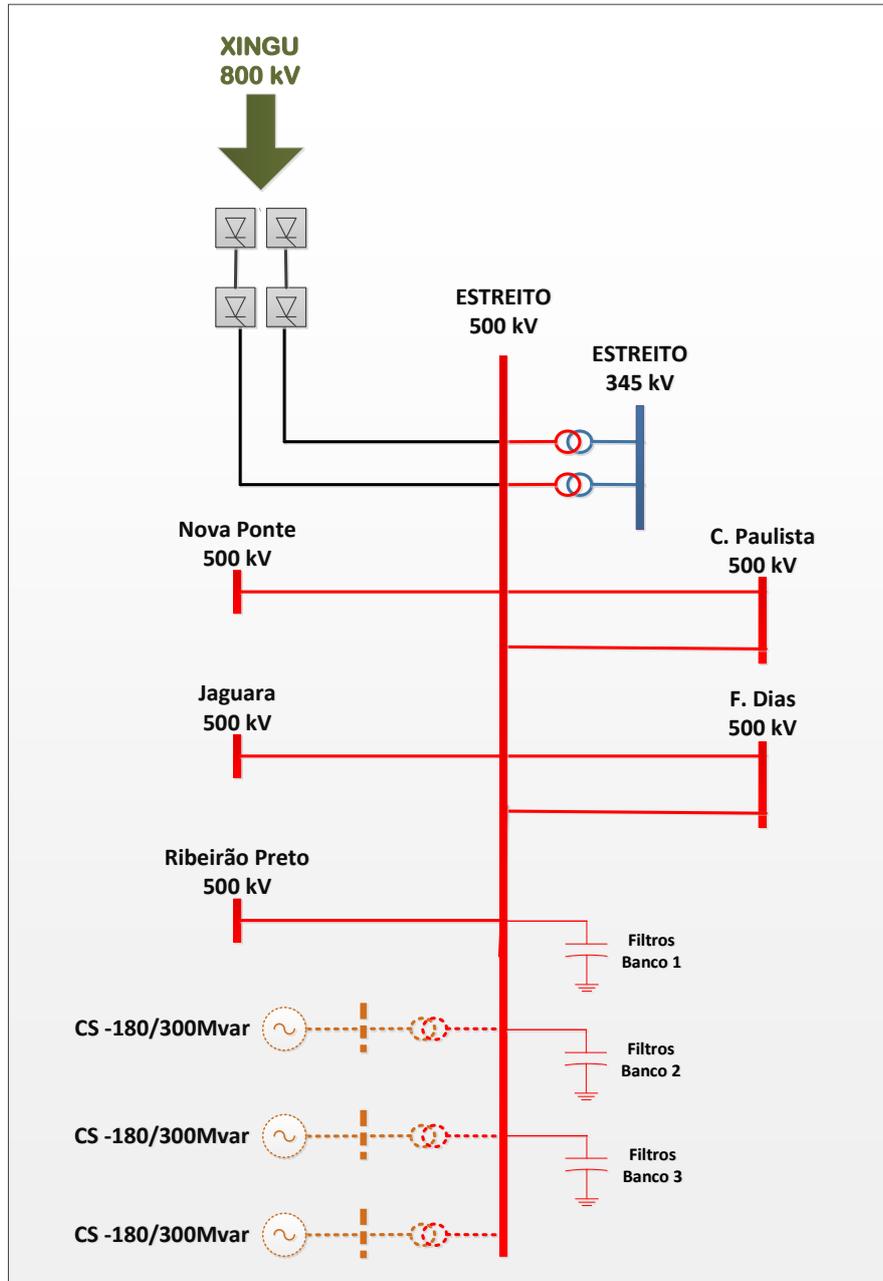


Figura 2-1 – Diagrama unifilar da SE Estreito com os compensadores síncronos recomendados

3 RECOMENDAÇÕES

A Tabela 3-1 exibe o conjunto de obras recomendadas para a Rede Básica. Em função dos ganhos de confiabilidade proporcionados ao sistema elétrico após a entrada em operação dos equipamentos, recomenda-se sua implantação imediata, considerando-se o cronograma previsto para licitação e realização de obras.

Tabela 3-1 - Obras Propostas.

| Nome | Tensão (kV) | Arranjo de Barras | Equipamentos Principais | | Ano |
|----------|-------------|-------------------|-------------------------|---|------|
| | | | Quantidade | Descrição | |
| Estreito | 500 | DJM | 3 | Módulo de Conexão de Compensador Síncrono | 2024 |
| | | DJM | 1 | Interligação de Barra | 2024 |
| | | -- | 3 | Compensadores Síncronos -180/300 Mvar | 2024 |

4 DISPENSA DO RELATÓRIO R2

Considera-se a elaboração do Relatório R2 dispensável nesta etapa de planejamento, pela motivação abaixo:

- A subestação de Estreito e sua vizinhança constituem um sistema malhado e de elevada robustez elétrica, não tendo sido identificados, nessa região, elementos capazes de suscitar problemas adversos para a inserção dos compensadores síncronos, no que se refere a transitórios de manobra;
- A potência dos compensadores síncronos e transformadores elevadores, que constituem módulos de conexão independentes (3 TRFs 500/13.8/13.8kV), não é considerada elevada o suficiente para a requisição de estudos complementares, baseando-se na experiência do planejamento em estudo de detalhamento de equipamentos similares, igualmente conectados a barramento conversor, em 500 kV, na SE Araraquara 2.

Entretanto, caso sejam identificados, em estudos a serem desenvolvidos em etapa posterior, elevadas sobretensões, correntes ou energia em para-raios de óxido de zinco, bem como, algum fenômeno de interação relevante entre os compensadores síncronos, seus transformadores e equipamentos associados e a rede elétrica adjacente, sugere-se que seja considerada a adoção de medidas mitigatórias para redução dos impactos dos transitórios eletromagnéticos de manobra, dentre as quais a utilização de resistores de pré-inserção.

5 DISPENSA DO RELATÓRIO R3

A instalação dos três compensadores síncronos recomendados nesta nota técnica tem impacto predominantemente local, do ponto de vista sócio-ambiental, sendo as obras necessárias para a adequação do pátio de 500kV descritas, pelo agente proprietário, em resposta à consulta de viabilidade, disponível no Anexo 1.

Uma vez que o escopo de reforços estruturais recomendados é composto essencialmente por obras na subestação existente, não considera-se necessária a análise socioambiental, visto que a área considerada para a instalação dos compensadores síncronos foi definida em função do arranjo elétrico e do espaço físico disponível na área já utilizada pela subestação existente.

6 PREMISSAS E CRITÉRIOS

Para a realização das simulações foram considerados as seguintes premissas e critérios, em conformidade com as diretrizes e critérios adotados para o planejamento [1] e operação [2] do sistema elétrico brasileiro.

6.1 Premissas Gerais

- 1) Foram utilizados os casos de trabalho do PDE 2029 [3] e [4];
- 2) Foi avaliado o desempenho do sistema no horizonte do item 1, com enfoque nos anos 2024 e 2029;
- 3) Para possibilitar a avaliação de cenários de maior importação de potência pela região Sudeste, no final do horizonte de estudo, mais críticos para o desempenho dinâmico do sistema, considerou-se a entrada em operação do bipolo em corrente contínua Graça Aranha – Silvânia em 2027, configuração da rede compatível com um cenário otimista de retomada econômica pós-pandemia do Covid-19²;
- 4) Considerou-se, como referência de preços para os reforços, os custos Modulares da ANEEL - Junho de 2020 [5]. Para o Compensador Síncrono, foi considerado o custo apresentado nos cálculos de RAP do lote 6, do leilão 05/2016 (referente ao Compensador Síncrono de Araraquara), aplicando-se a correção do IPCA até 12/2020 [6].

6.2 Critérios de desempenho do sistema

- 1) Atendimento ao critério N-1, sem atuação de sistema especial de proteção (SEP), para indisponibilidade de circuito simples CA ou de um polo CC;
- 2) Foi simulada ocorrência de falhas de comutação nos bipolos CC, com duração entre 16 e 100 ms, após aplicação de defeitos na rede CA, conforme severidade da perturbação. Para defeitos locais, considerou-se a duração das falhas de comutação igual à duração da própria falta na rede CA (100ms no sistema de 500 kV);

² Cabe destacar que a previsão de entrada em operação desse empreendimento foi atualizada para 2030, no cenário de referência do PDE2030 [11] e será reavaliada no âmbito do estudo de alternativas de expansão das interligações, previsto para o ano 2021.

- 3) Para os sistemas CA, foi adotado o critério de tensão máxima transitória de até 140% dos valores nominais, no instante t^{0+} ;
- 4) São consideradas aceitáveis, em regime permanente, tensões dentro das faixas operativas exibidas na Tabela 6-1:

Tabela 6-1 – Limites de tensão em regime permanente

| Tensão nominal de operação (kV) | Condição operativa normal (p.u.) | Condição operativa de emergência (p.u.) |
|---------------------------------|----------------------------------|---|
| <230 | 0.95 a 1.05 | 0.90 a 1.05 |
| 230 | 0.95 a 1.05 | 0.90 a 1.05 |
| 345 | 0.95 a 1.05 | 0.90 a 1.05 |
| 440 | 0.95 a 1.046 | 0.90 a 1.046 |
| 500 | 1.00 a 1.10 | 0.95 a 1.10 |
| 525 | 0.95 a 1.05 | 0.90 a 1.05 |
| 765 | 0.90 a 1.046 | 0.90 a 1.046 |

- 5) Quanto ao critério de 1º *swing* de tensão, admitiu-se valores mínimos de 80% dos valores nominais, na primeira oscilação de tensão após extinção de defeitos na rede CA;
- 6) No caso de simulação de grandes perturbações, que provoquem desvios de frequência no sistema, considera-se aceitável um desvio máximo até 59Hz, na primeira oscilação de frequência do sistema, para evitar sensibilização de sistemas de alívio de carga;
- 7) A representação adotada para a carga foi de 100% de corrente constante na parte ativa e 100% de impedância constante na parte reativa;
- 8) Quanto à avaliação de desempenho do sistema após ocorrência de contingências múltiplas de elementos de transmissão, como perda de Bipolo, admite-se atuação de SEP de corte de geração, quando necessário;
- 9) O tempo de recuperação³ dos bipolos em corrente contínua, após qualquer falta no sistema CA, deve ocorrer entre 150 e 400ms, devendo ser compatível com o valor estipulado no ato da licitação (200ms no caso dos bipolos conectados ao complexo do Rio Madeira e 220ms no caso dos bipolos Xingu-Estreito e Xingu-Terminal Rio);

³ Tempo de recuperação é o tempo necessário para que o elo atinja 90% do valor da potência originalmente transmitida, sem posterior redução, após a extinção da falta causadora da interrupção de potência.

7 CENÁRIOS ANALISADOS

Nesta nota técnica foram avaliados diversos cenários de geração e carga, sendo selecionados 3 cenários críticos para apresentação de resultados.

7.1 Cenário 1 – Norte/Nordeste exportador no patamar de carga média

Este cenário consiste no máximo intercâmbio de energia entre os submercados Norte/Nordeste e Sudeste/Centro Oeste no patamar de carga média.

O detalhamento dos casos de estudo para esse cenário é exibido na Figura 7-1, para o ano 2024 e na Figura 7-2 e Figura 7-3, para o ano 2029, após a adoção das premissas de despacho abaixo:

- Patamar de carga Média;
- Anos de análise: 2024 e 2029;
- Elevada disponibilidade hídrica da região Norte;
- Elevado fator de capacidade nas usinas solares, devido à coincidência com período diurno;
- Fator de capacidade das usinas eólicas no Nordeste igual a 60%, baseado em curvas de permanência de geração eólica no período úmido da região Norte;
- Exportação total do Norte/Nordeste igual a 16.460MW em 2024 e 22.800MW em 2029.

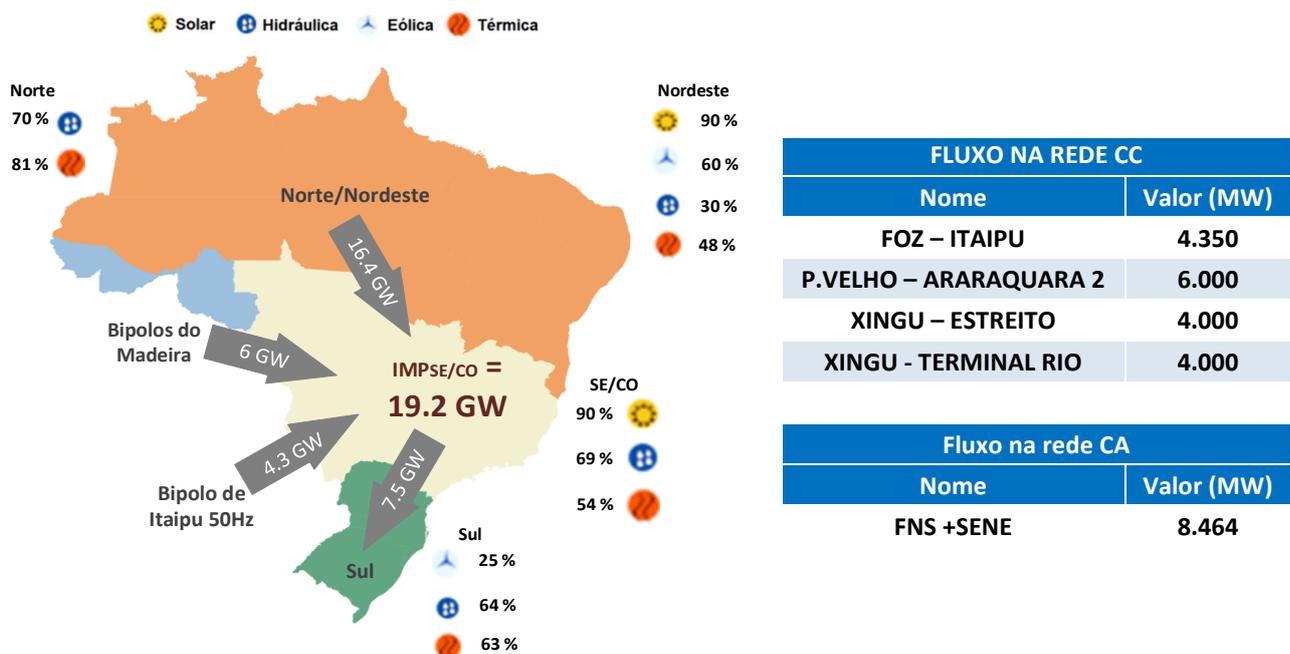


Figura 7-1 – Cenário 1 – ano 2024

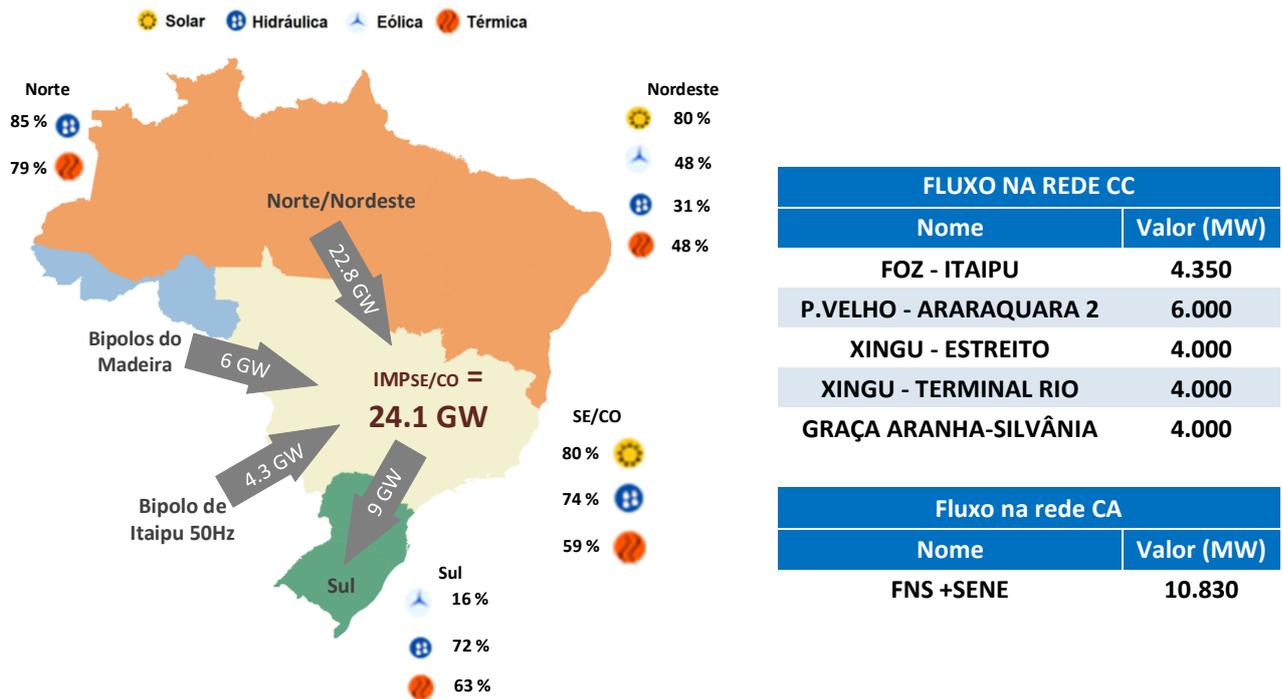


Figura 7-2 – Cenário 1a – ano 2029

Foi criado um novo cenário com base no cenário 1a – ano 2029, no qual foi reduzido em 1.800 MW o despacho das usinas hidrelétricas da bacia do Grande e Paranaíba, próximas as subestações conversoras da região Sudeste. Observa-se na Figura 7-3 que o intercâmbio entre os submercados Norte/Nordeste e Sudeste/Centro-Oeste foi preservado, sendo que a energia reduzida na região Sudeste foi compensada pelo aumento de geração na região Sul.

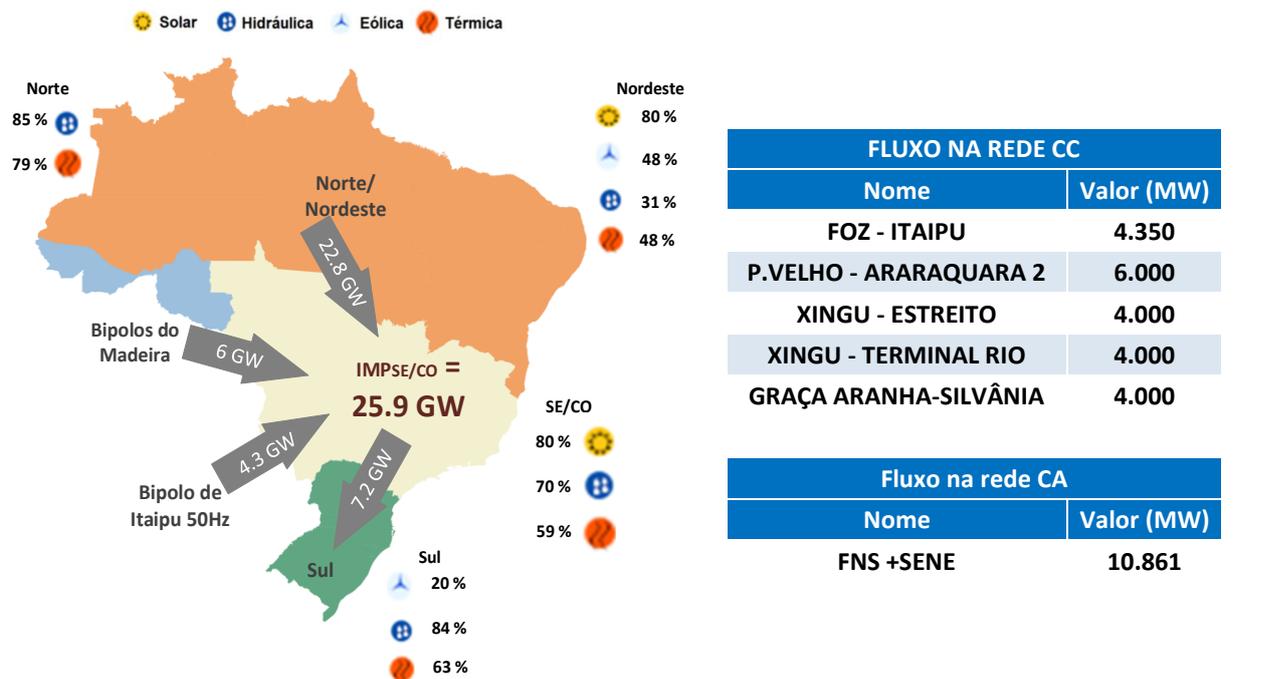


Figura 7-3 – Cenário 1b – ano 2029

Foi criada uma segunda variação do cenário Norte/Nordeste exportador para o ano 2029 (cenário 1c – ano 2029), apresentado na Figura 7-4. A principal modificação neste cenário foi a redução de aproximadamente 1.000 MW de geração nas hidrelétricas da bacia do Paranapanema (SP e PR) e aumento de geração nas hidrelétricas das bacias do Paraná, Grande e Paranaíba. Esta alteração reduziu a inércia no estado de São Paulo e aumentou o fluxo de energia na interligação Sudeste-Sul.

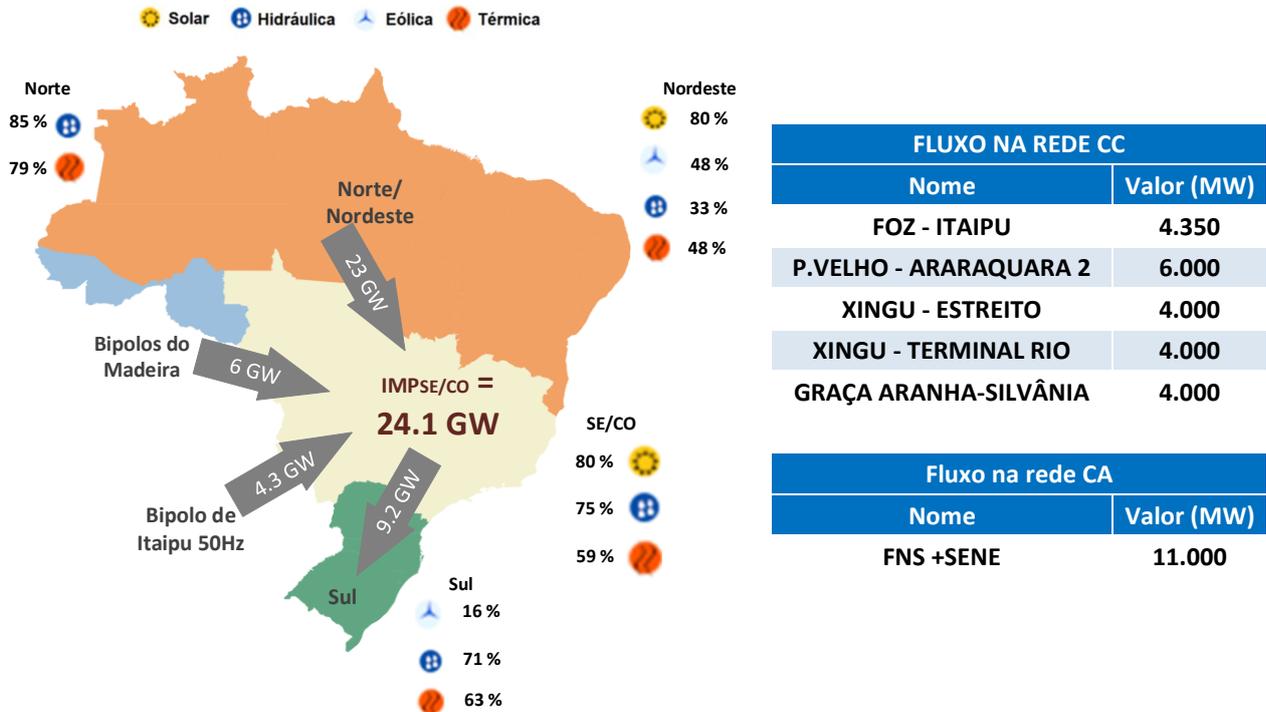


Figura 7-4 – Cenário 1c – ano 2029

7.2 Cenário 2 – Carga Média Sudeste Importador

Este cenário consiste na máxima importação simultânea de potência da região Sudeste/Centro-oeste, pelos demais subsistemas, no patamar de carga média:

- Patamar de carga Média;
- Ano de análise:2024;
- Despacho elevado das usinas solares;
- Despacho mediano das usinas eólicas (40%);
- Despacho mediano das usinas hidráulicas no Sudeste/Centro-Oeste;
- Despacho elevado das usinas hidráulicas do Sul;
- Importação do SE/CO de 33.000 MW em 2024.

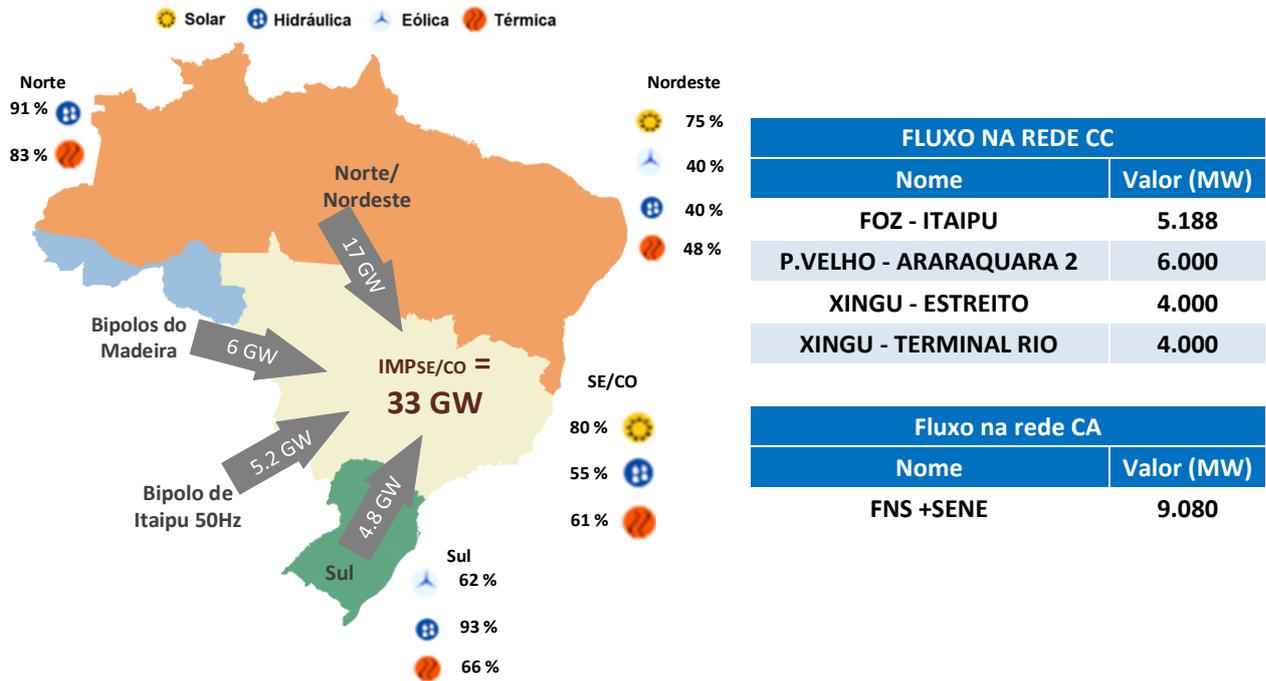


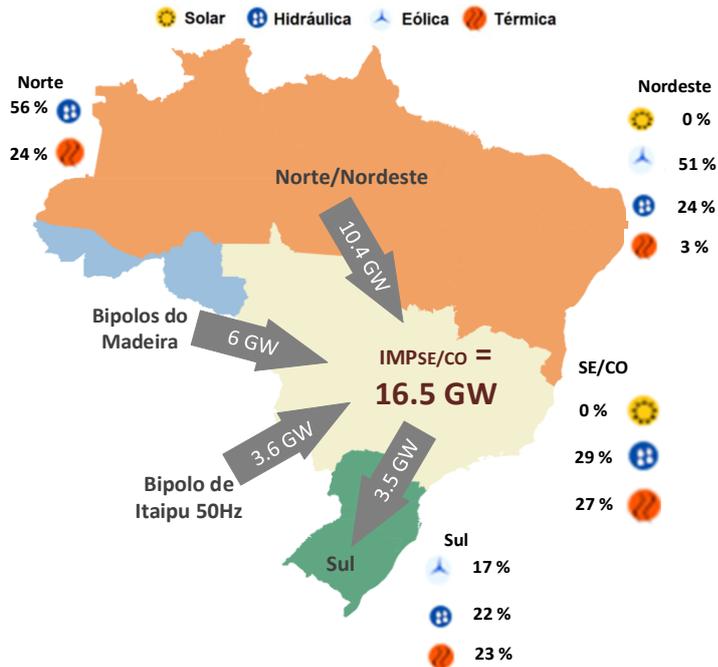
Figura 7-5 – Cenário 2 – ano 2024.

7.3 Cenário 3 – Norte/Nordeste exportador na carga mínima

Este cenário consiste em elevado intercâmbio entre os submercados Norte/Nordeste e Sudeste/Centro Oeste no patamar de carga mínima.

O detalhamento do caso de estudo para este cenário é exibido na Figura 7-6, para o ano 2024, após a adoção das premissas de despacho abaixo:

- Patamar de carga Mínima;
- Ano de análise:2024;
- Despacho nulo das usinas solares;
- Despacho mínimo das usinas térmicas, devido à disponibilidade de fontes de menor custo para atendimento da demanda reduzida;
- Despacho mediano (51%) nas usinas eólicas do Nordeste;
- Despacho reduzido das usinas hidráulicas no Sudeste/Centro-Oeste e Sul;
- Exportação total do Norte/Nordeste igual a 10.400MW.



| FLUXO NA REDE CC | |
|------------------------|------------|
| Nome | Valor (MW) |
| FOZ - ITAIPU | 3.638 |
| P.VELHO - ARARAQUARA 2 | 6.000 |
| XINGU - ESTREITO | 4.000 |
| XINGU - TERMINAL RIO | 4.000 |

| Fluxo na rede CA | |
|------------------|------------|
| Nome | Valor (MW) |
| FNS +SENE | 2.437 |

Figura 7-6 – Cenário 3 - ano 2024

8 DIAGNÓSTICO

O diagnóstico da rede de transmissão da região Sudeste, com foco no estado de São Paulo, considerou os cenários elencados na seção 7, perfazendo uma análise detalhada do desempenho em regime dinâmico, para fins de identificação de perturbações críticas, cujo efeito possa ser mitigado através da recomendação de reforços, permitindo com isso uma operação mais segura e confiável do sistema elétrico. Tais análises envolveram, inclusive, perturbações nos elos de corrente contínua, uma vez que sua conexão no sistema São Paulo e vizinhança pode provocar interferência sobre o desempenho da rede CA local bem como sobre a capacidade de transmissão das interligações regionais.

Resultados das simulações demonstram que o desempenho dinâmico do sistema São Paulo após a ocorrência de eventos de elevada severidade é satisfatório, do ponto de vista da estabilidade de tensão, respeitando os critérios de desempenho preconizados em Procedimentos de Rede e outros critérios mais conservadores utilizados como premissa para este estudo, descritos na seção 4.

A Figura 8-1 apresenta o perfil de tensão de barramentos em 500 kV de subestações do estado de São Paulo após aplicação de curto-circuito na SE 500 kV Campinas seguido de abertura dupla da LT 500 kV Campinas-Itatiba. O evento simulado é considerado de alta severidade, em virtude da localização central da SE Campinas no sistema São Paulo e de sua conexão com diversas outras subestações de

extrema importância para o atendimento da demanda local. Nota-se que mesmo após a ocorrência de perturbação de tal severidade, o perfil de tensões no sistema São Paulo permanece íntegro, sem necessidade de atuação de Sistema Especial de Proteção, sinalizando robustez e alta confiabilidade da malha de transmissão.

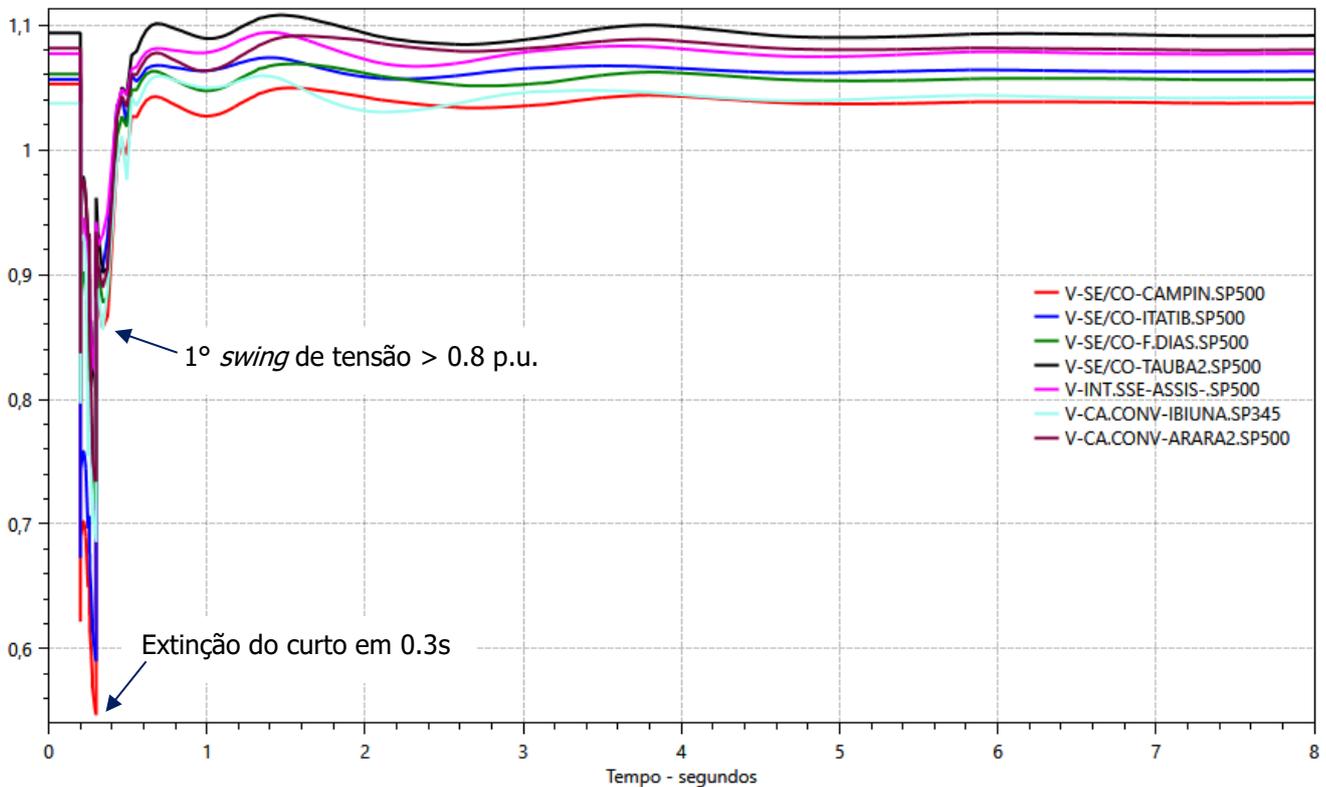


Figura 8-1 – Tensão [pu] nas barras de 500 kV do sistema São Paulo após curto-circuito na SE 500 kV Campinas com abertura dupla dos circuitos da LT 500 kV Campinas-Itatiba. (Cenário 2 – ano 2024)

Um ponto de destaque, avaliado ao longo do estudo, refere-se à possibilidade de otimização da capacidade de transmissão do elo CCAT Xingu-Estreito, visto que foram identificados eventos em que não foi possível a exploração plena da capacidade de sobrecarga dinâmica deste equipamento, em função da elevada demanda por absorção de potência reativa pela rede CC, após a execução de comandos de *Run-up*, ou seja, aumento da potência originalmente transmitida pelo bipolo, para garantir estabilidade do sistema após perda de outros elementos de transmissão de grande porte.

O tempo de recuperação da potência do bipolo Xingu-Estreito após falhas de comutação e a sua capacidade de transmissão durante sobrecarga de curta e longa duração após o bloqueio do bipolo Xingu-Terminal Rio, foram os indicadores de que a subestação de Estreito seria um ponto de alocação eficaz para o incremento ao suporte de potência reativa local, beneficiando não só o desempenho regional, como também, o desempenho das interligações regionais.

A Figura 8-2 apresenta a potência de um polo do elo CCAT Xingu-Estreito durante um curto-circuito na SE Estreito com abertura da LT 500kV Estreito - Fernão Dias, no cenário 1, com Norte/Nordeste exportador, no ano 2029, no patamar de carga média.

Observa-se que o tempo de recuperação da potência após a falha de comutação deste bipolo poderia ter sido menor caso a potência ultrapassasse e não retrocedesse abaixo da linha tracejada azul, que representa 90% da potência pré-falta. O tempo de recuperação medido para este evento foi de 231 ms, que é 11 ms superior ao critério de desempenho adotado, de 220ms.

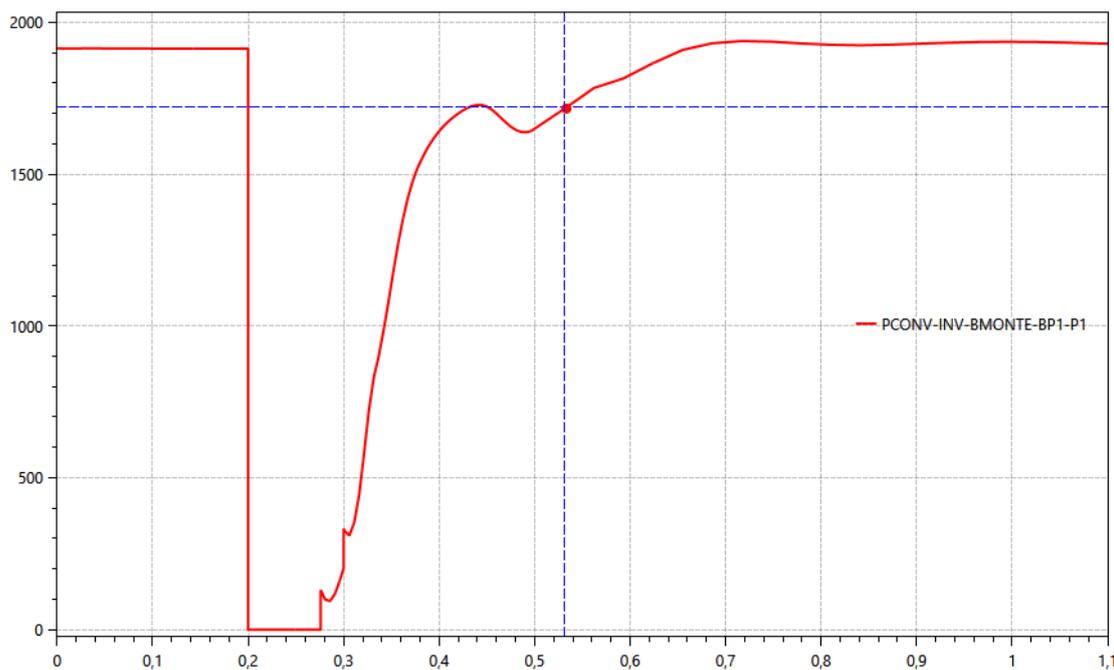


Figura 8-2-Potência [MW] por polo no elo CCAT Xingu-Estreito após aplicação de curto-circuito na SE Estreito com abertura da LT 500 kV Estreito-F. Dias. (Cenário 1 – 2029)

Outra ponto passível de aprimoramento refere-se à capacidade de transmissão do bipolo Xingu-Estreito durante sobrecarga de curta e longa duração após o bloqueio do bipolo Xingu - Terminal Rio. Nota-se, na Figura 8-3, que nos primeiros 5 segundos, a potência do bipolo não atinge sua plena capacidade de sobrecarga de curta duração, de 50%. Da mesma forma, o bipolo não consegue atingir sua plena sobrecarga de longa duração, de 33%, instantaneamente, alcançando este valor, com um atraso de aproximadamente 30 segundos.

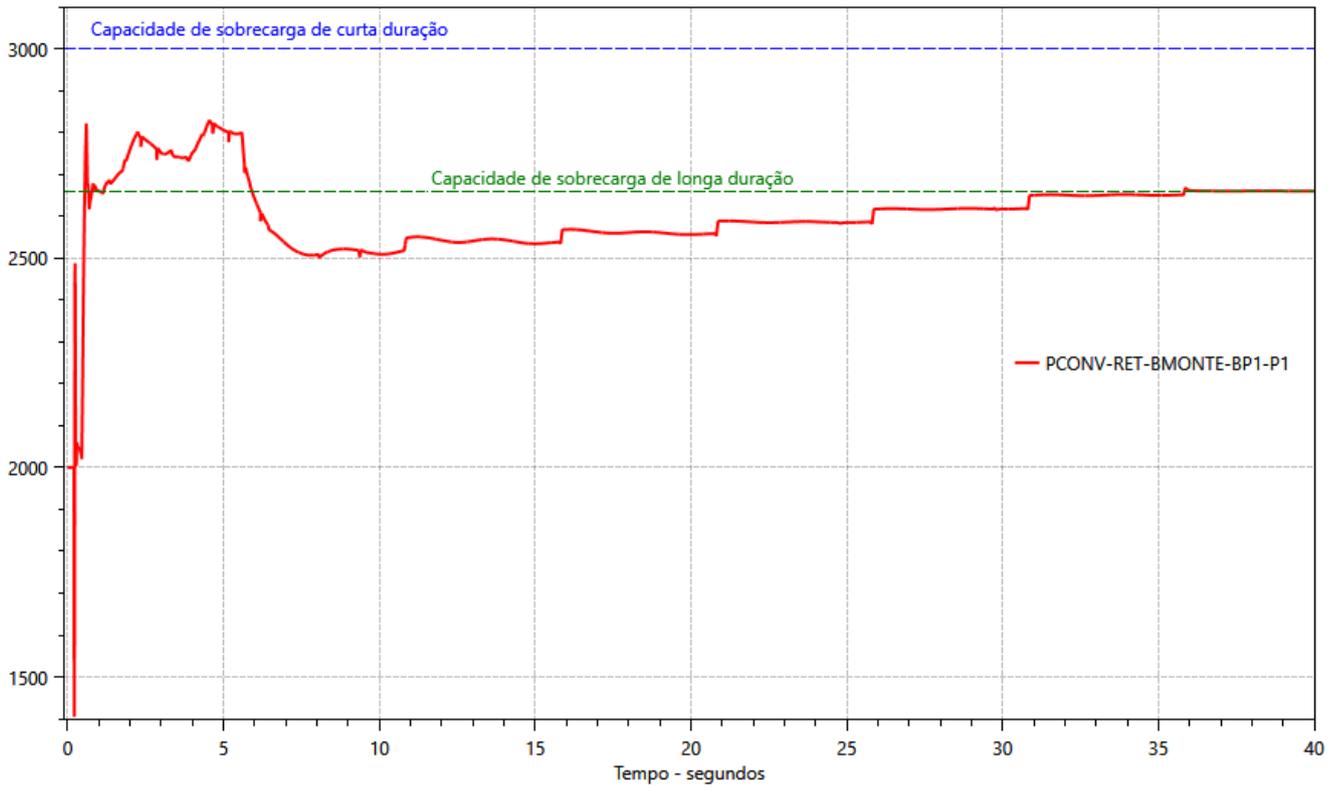


Figura 8-3-Potência [MW] por polo no elo CCAT Xingu-Estreito após bloqueio do bipolo Xingu - T.Rio. (Cenário 2 – 2024)

A Figura 8-4 apresenta o perfil de tensão da SE 500 kV Estreito durante o bloqueio do bipolo Xingu - Terminal Rio. Durante essa perturbação, o terminal inversor de Estreito, cujo modo de operação normal é em controle de tensão, objetivando o controle da tensão CC na retificadora em 1 p.u. através da variação do ângulo de extinção (gama), passa a operar em modo de controle de gama, após este parâmetro atingir seu valor mínimo de 17.5°, o que sinaliza a perda da capacidade de controle de tensão pela inversora.

Observa-se que a tensão CA da SE 500 kV Estreito, parâmetro de entrada importante para o adequado funcionamento da conversora, atingiu valores relativamente baixos durante essa perturbação, inferior a 1 p.u., indicando a necessidade de maior injeção reativa local.

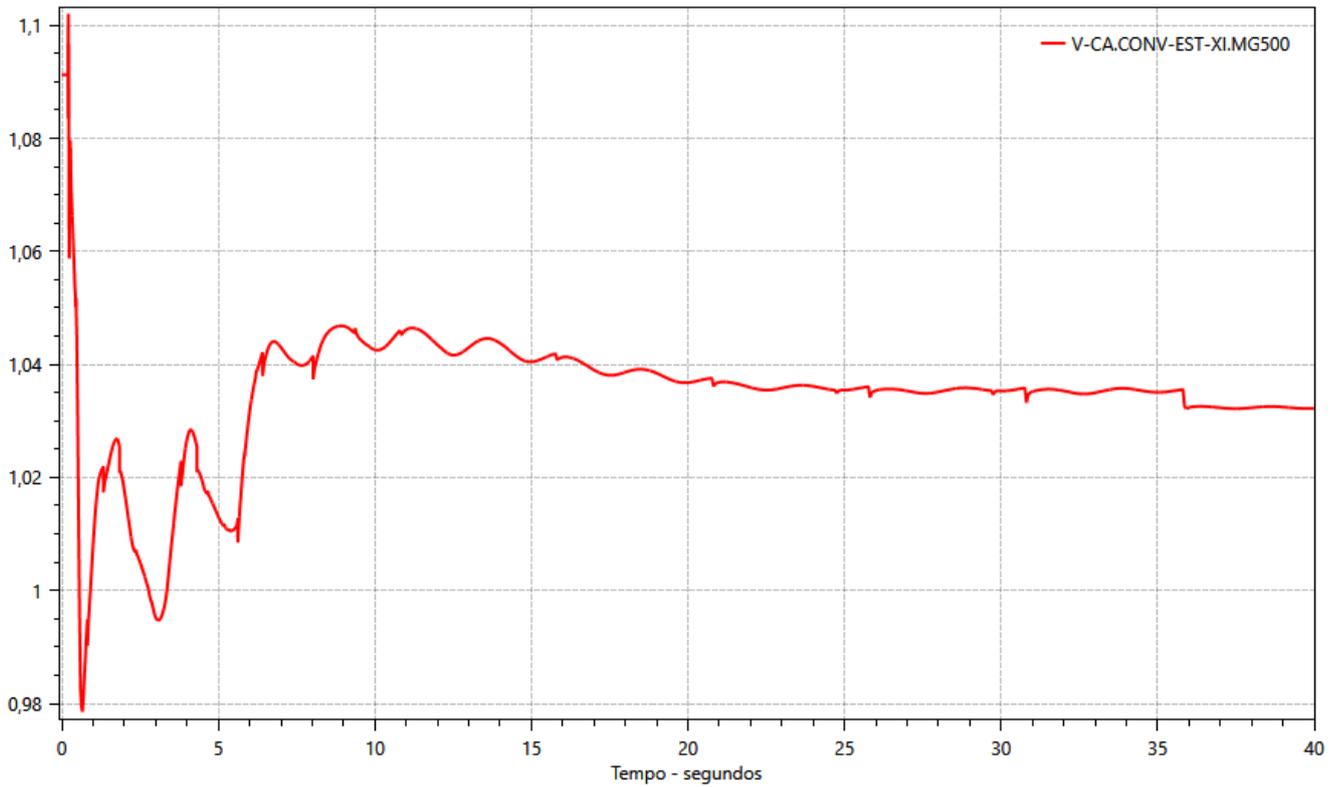


Figura 8-4-Tensão [pu] na SE 500 kV Estreito após bloqueio do bipolo Xingu - T.Rio. (Cenário 2 – ano 2024)

A Figura 8-5 apresenta o sinal indicador do modo de controle em que a inversora de Estreito está operando.

Antes da perturbação, a conversora opera no modo de controle de tensão (*UdCtrl*), sinal igual a 3. Porém, após o bloqueio do bipolo Xingu-Terminal Rio, a conversora permanece por 35 segundos em controle de gama, sinal igual 1, indicando sua incapacidade de prover o controle de tensão nesse período, quando gama é fixado no mínimo de 17.5°, conforme ilustrado na Figura 8-6. Deve-se atentar para o fato de que essa operação, em gama mínimo, deve ser evitada, a fim de mitigar a ocorrência de falhas de comutação. Finalmente, após 35 segundos, o controle da inversora retorna ao seu modo normal de operação, com controle da tensão CC no retificador em 1 p.u. e operação com gama variável.

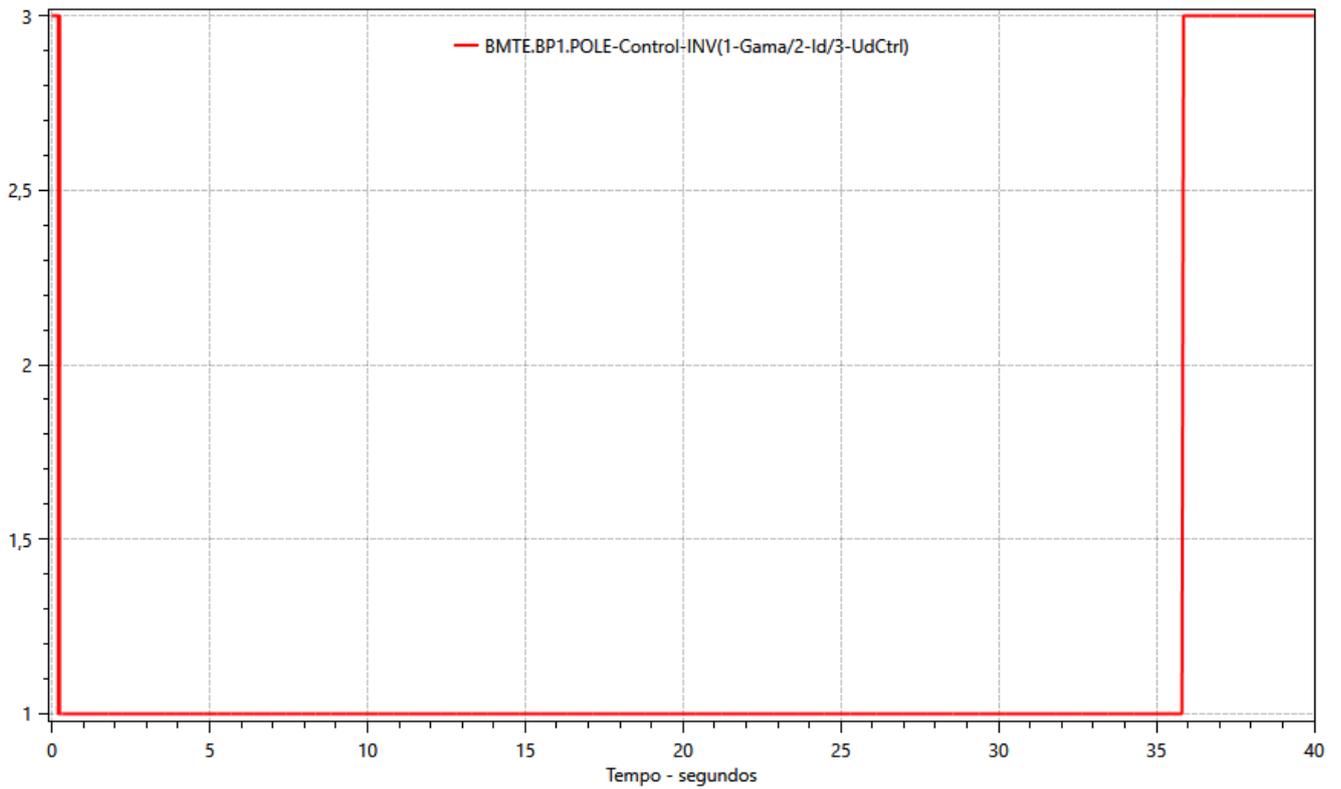


Figura 8-5-Modo de Controle da Conversora de Estreito. Bloqueio bipolo Terminal Rio. (Cenário 2 – ano 2024)

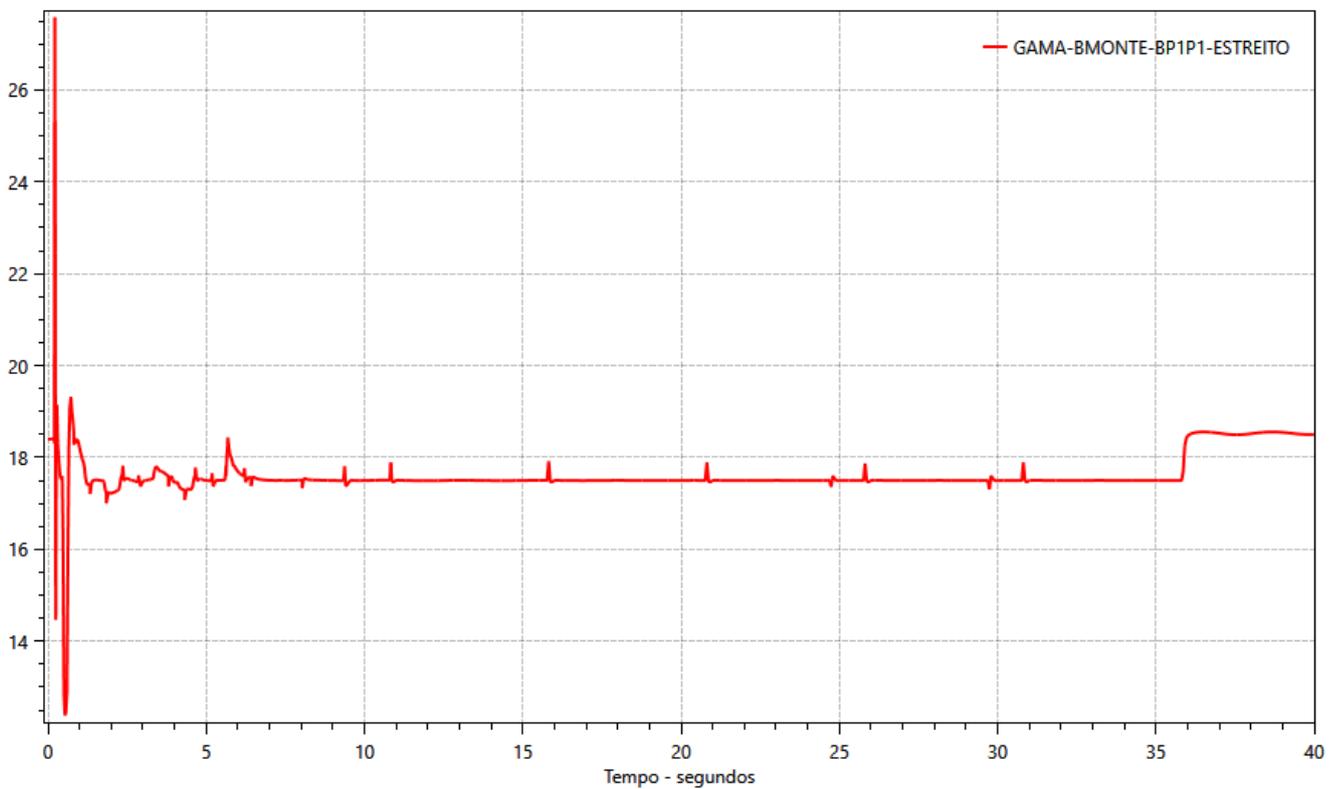


Figura 8-6- Ângulo de Extinção da conversora Estreito. Bloqueio bipolo Terminal Rio. (Cenário 2 – ano 2024)

Apesar do bipolo Xingu-Estreito não ter alcançado sua máxima capacidade de sobrecarga, devido ao perfil de tensão da SE Estreito, ressalta-se que as tensões das principais subestações do estado de São Paulo apresentaram um desempenho satisfatório, tanto no que diz respeito ao critério de primeiro *swing* de tensão, quanto no que diz respeito a nova tensão de equilíbrio em regime permanente, que se encaixa nos limites definidos na Tabela 6-1, conforme apresentado na Figura .

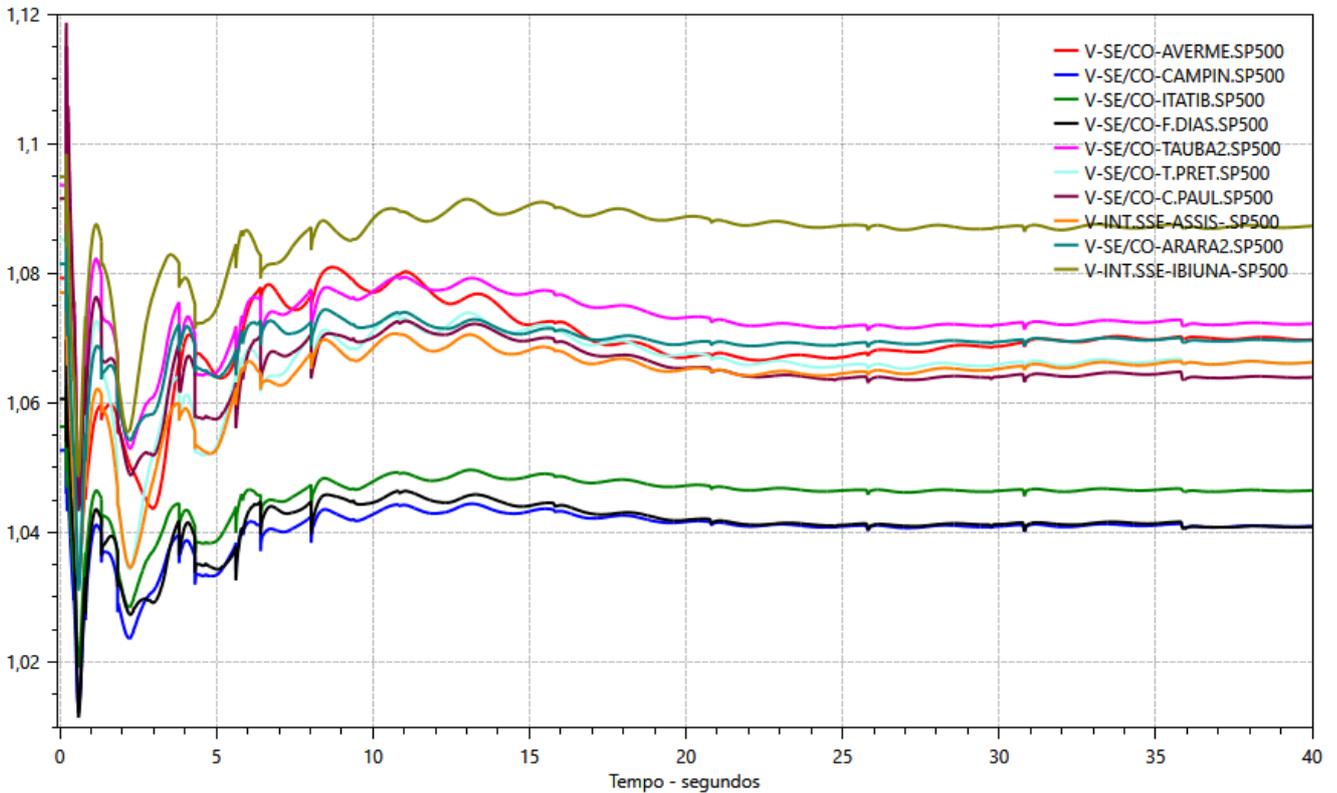


Figura 8-7-Tensão [pu] nas barras de 500 kV do sistema São Paulo após bloqueio do bipolo Xingu- T.Rio. (Cenário 2 – ano 2024)

Outro ponto que pode ser aprimorado refere-se à sobretensão dinâmica na SE 500 kV Estreito quando há o bloqueio do bipolo Xingu-Estreito. Observa-se, na Figura 8-8, sobretensão sustentada por aproximadamente 20 segundos, na SE 500 kV Estreito, após o bloqueio do Bipolo Xingu – Estreito, até o desligamento automático de parte dos filtros, que ocorre de forma escalonada no tempo, sinalizando, assim, a necessidade de maior absorção reativa local para evitar as referidas sobretensões dinâmicas.

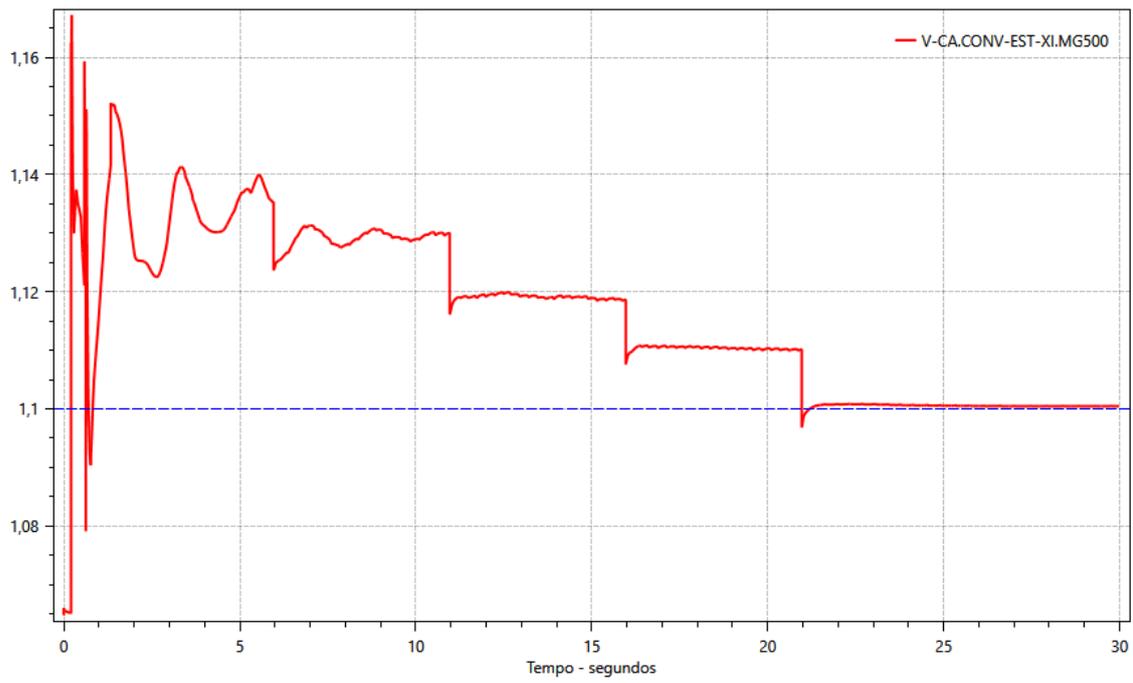


Figura 8-8-Tensão [pu] na SE 500 kV Estreito após bloqueio do bipolo Xingu-Estreito. (Cenário 3 - ano 2024)

9 DIMENSIONAMENTO DA COMPENSAÇÃO REATIVA

Tendo identificado que o desempenho do elo CCAT Xingu-Estreito pode ser aprimorado, com a inclusão de equipamentos que aprovisionem absorção e injeção de reativos, de forma variável no tempo, foi iniciado o processo de dimensionamento do montante de potência reativa necessário.

Foram analisadas, novamente, as simulações exibidas na etapa de diagnóstico, considerando, num primeiro momento, a alocação de suporte de potência reativa adicional na SE 500kV Estreito, no montante de 600 Mvar (curvas na cor azul), 900 Mvar (curvas na cor verde) e 1.200 Mvar (curvas na cor preta).

Conclui-se que o aproveitamento da capacidade de sobrecarga do bipolo Xingu-Estreito aumenta na medida em que se adiciona capacidade de compensação reativa variável na SE 500kV Estreito.

A Figura 9-1 apresenta a potência de um polo do elo CCAT Xingu-Estreito durante o bloqueio do elo CCAT Xingu - Terminal Rio. Em nenhuma das alternativas de compensação reativa foi possível atingir a capacidade nominal da sobrecarga de curta duração, que é de 3.000 MW, contudo, a configuração com 900 Mvar e 1200 Mvar aproveitaram, em praticamente todo o tempo, os 33% de sobrecarga de longa duração, sendo que a configuração com 1200 Mvar obteve desempenho ligeiramente melhor.

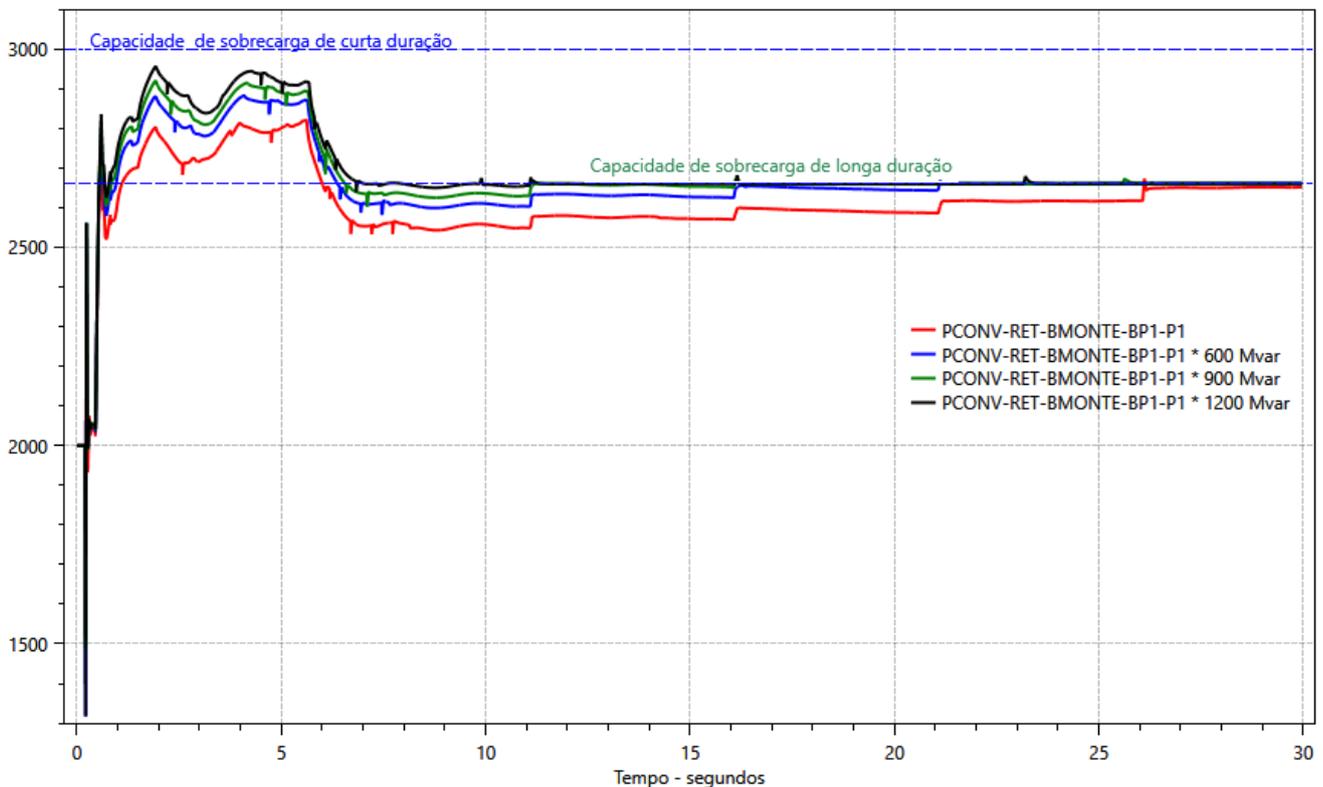


Figura 9-1-Potência [MW] por polo no elo CCAT Xingu-Estreito após bloqueio do bipolo Xingu-T.Rio. (Cenário 1 – ano 2024)

Avaliando a contribuição do suporte de potência reativa durante falha de comutação na conversora de Estreito, mais precisamente durante um curto-circuito na SE Estreito com abertura da LT 500 Estreito - Fernão Dias, observa-se que as alternativas com 900 e 1200 Mvar são as que efetivamente auxiliam na recuperação de potência, pois, com a inserção de 600 Mvar de compensação reativa, ainda houve uma queda de potência após o início da recuperação.

Enquanto o tempo de recuperação sem suporte de reativos adicional foi de 231 ms, na alternativa com 600 Mvar adicionais esse tempo reduziu para 201 ms, valor já compatível com o critério de desempenho adotado. Outra observação importante é que os tempos de recuperação da potência do bipolo de Xingu-Estreito com 900 Mvar e 1200 Mvar foram muito próximos, iguais a 103 ms e 108 ms, respectivamente.

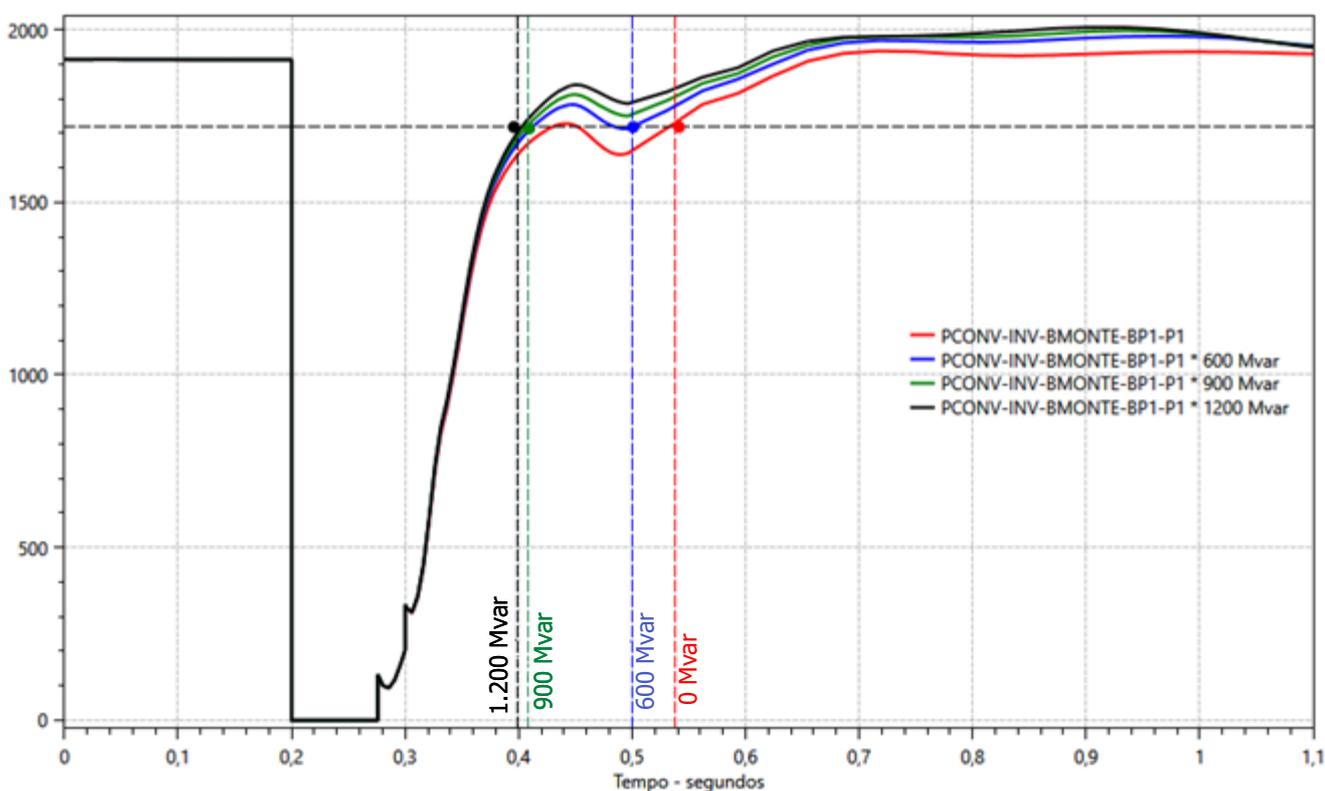


Figura 9-2-Potência [MW] por polo no elo CCAT Xingu-Estreito após curto-circuito na SE Estreito com abertura da LT 500 kV Estreito-F. Dias. (Cenário 1 - ano 2029)

A análise demonstrou que a alternativa com 600 Mvar de compensação reativa adicional apresentou ganho relevante no tempo de recuperação do bipolo Xingu – Estreito, porém não apresentou ganhos consideráveis no quesito de aproveitamento da capacidade de sobrecarga. Descartando esta alternativa e comparando as alternativas com 900 Mvar e 1200 Mvar, nota-se que ambas apresentam relevante ganho de desempenho, com redução da ordem de 125 ms no tempo de recuperação do bipolo Xingu – Estreito, para o evento simulado. Pelo fato das duas últimas alternativas apresentarem desempenho

muito similar e visando uma recomendação com a melhor relação entre custo e benefício, conclui-se por dimensionar a compensação reativa variável em 900 Mvar.

10 DESCRIÇÃO DAS ALTERNATIVAS

Neste capítulo são apresentadas as alternativas de compensação reativa no que se refere a localização e tecnologia.

Análise de sensibilidade quanto à localização da compensação reativa

A primeira análise refere-se à alocação da compensação reativa, tendo como candidatas a subestação de Estreito, em virtude do efeito de compensação reativa local desejado, e a subestação de Campinas, em função de sua posição central na malha de 500kV do sistema São Paulo. Cabe ressaltar, embora, que se o objetivo deste estudo é prover suporte para melhorar o desempenho do bipolo Xingu-Estreito, pode-se inferir, previamente, que a subestação de Estreito tende a ser o ponto ótimo de alocação, não só pela efetividade da solução, mas também por uma questão de otimização de perdas técnicas e do fator de potência nas transformações. Adotou-se, como referência inicial, três compensadores síncronos de -180/+300 Mvar, totalizando os 900 Mvar dimensionados no capítulo anterior.

O evento utilizado para comparar a alternativa de alocar a compensação reativa na SE Estreito ou na SE Campinas é o curto-circuito na SE Estreito com abertura da LT 500 kV Estreito - Fernão Dias. Como demonstrado anteriormente, esta perturbação causa falha de comutação e o indicador de melhoria no desempenho é o tempo de recuperação da potência do elo Xingu-Estreito.

A partir da Figura 10-1 conclui-se que a alocação da compensação na subestação de Estreito é a que provê maior injeção de potência reativa durante e após a eliminação do curto-circuito.

Em função da maior injeção de potência reativa próxima à conversora de Estreito, o tempo de recuperação desta, após a falha de comutação, foi menor com a alocação de compensação reativa local, conforme exibido na Figura 10-2. O tempo de recuperação da conversora de Estreito foi de 108 ms quando os compensadores síncronos estão em Estreito e igual a 231 ms quando estão alocados em Campinas, demonstrando a baixa efetividade da última alternativa, já que não houve redução do tempo de recuperação em relação ao valor original, sem compensação reativa adicional.

Conclui-se, dos resultados apresentados, que a alocação da compensação reativa variável de 900 Mvar deve ocorrer na SE 500kV Estreito, para se atingir o objetivo de melhorar o desempenho da conversora já em operação nesta subestação.

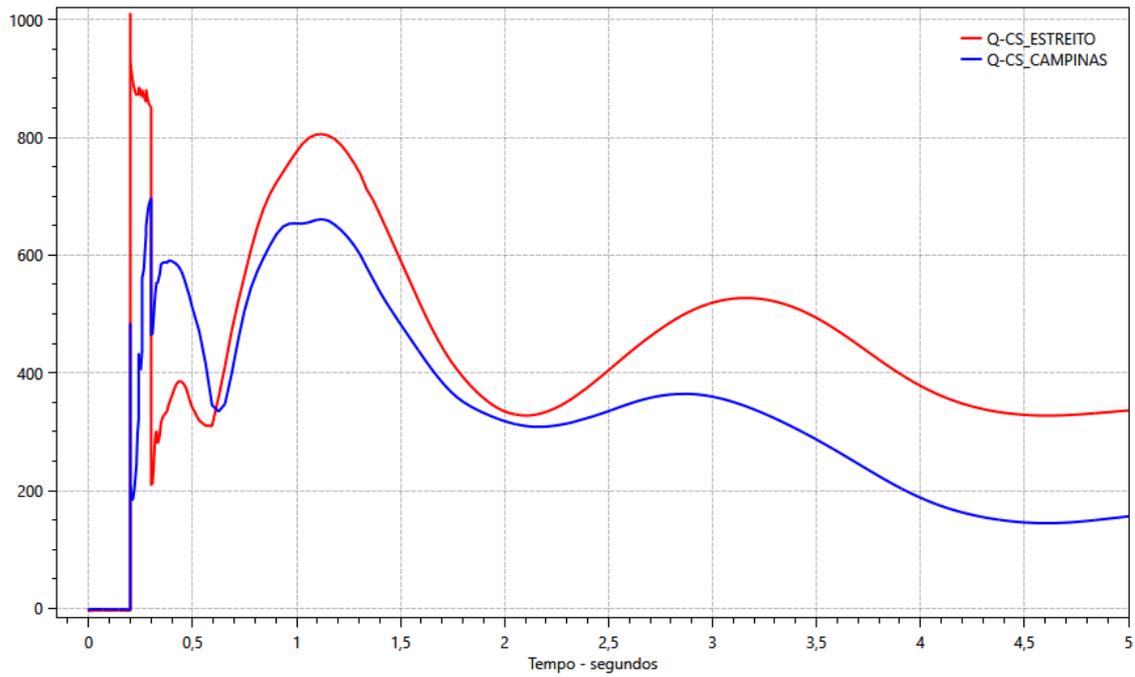


Figura 10-1-Potência reativa [Mvar] com Compensação Síncrona em e Compensação Síncrona em Campinas, após curto-circuito na SE Estreito e abertura da LT 500 kV Estreito-F. Dias. (Cenário 1 – ano 2029)

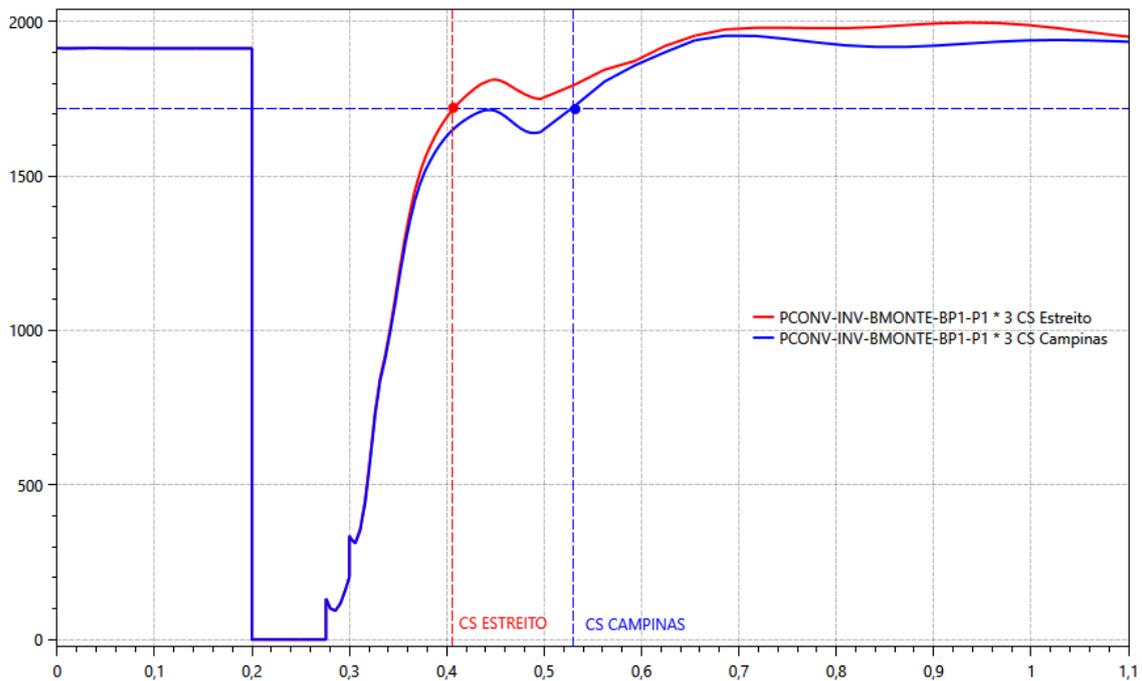


Figura 10-2-Potência [MW] por polo no elo CCAT Xingu-Estreito após curto-circuito na SE Estreito e abertura da LT 500 kV Estreito-F. Dias. (Cenário 1 - ano 2029)

Análise de sensibilidade quanto à tecnologia empregada fornecer compensação reativa

A segunda análise deste capítulo refere-se à tecnologia que será empregada para suporte de 900 Mvar de compensação reativa variável. Foram consideradas duas soluções destinadas exclusivamente para compensação reativa variável, sendo a primeira delas baseada na solução convencional por meio de máquinas rotativas, utilizando compensadores síncronos (CS), e a outra alternativa baseada em eletrônica de potência, utilizando compensadores estáticos (CER).

O curto-circuito na SE Estreito com abertura da LT 500 Estreito - Fernão Dias, que provoca a falha de comutação da conversora de Estreito, permite observar, com clareza, a diferença de comportamento das duas tecnologias. A Figura 10-3 apresenta a potência reativa do compensador estático (curva na cor azul) e do compensador síncrono (curva na cor vermelha), durante e após a extinção do defeito na rede CA. Durante o curto-circuito, o compensador estático anula sua injeção reativa, em função da atuação da proteção de subtensão, contudo, assim que a tensão no ponto de conexão se restabelece, sua injeção de reativos na rede atinge a potência nominal e mostra-se efetiva, como apresentado nos resultados seguintes. Por outro lado, o compensador síncrono gera o máximo de sua potência reativa durante o curto-circuito, a qual permanece na ordem de 600 Mvar por aproximadamente 6 segundos após a extinção do defeito, para depois estabilizar em 130 Mvar.

As análises apresentadas neste relatório foram simuladas com o emprego de modelos de compensadores estáticos de reativos baseados em comutação a tiristores. Estudos recentes investigam a potencialidade do emprego de STATCOMs, cuja comutação é baseada em chaveamento de IGBTs, para aprimoramento do desempenho de elos CC com tecnologia LCC [7], por sua capacidade de prover potência reativa durante ocorrência de curto-circuito na rede CA. Porém, em função do baixo número de casos práticos dessa aplicação, mesmo em contexto internacional, essa alternativa não foi avaliada no estudo.

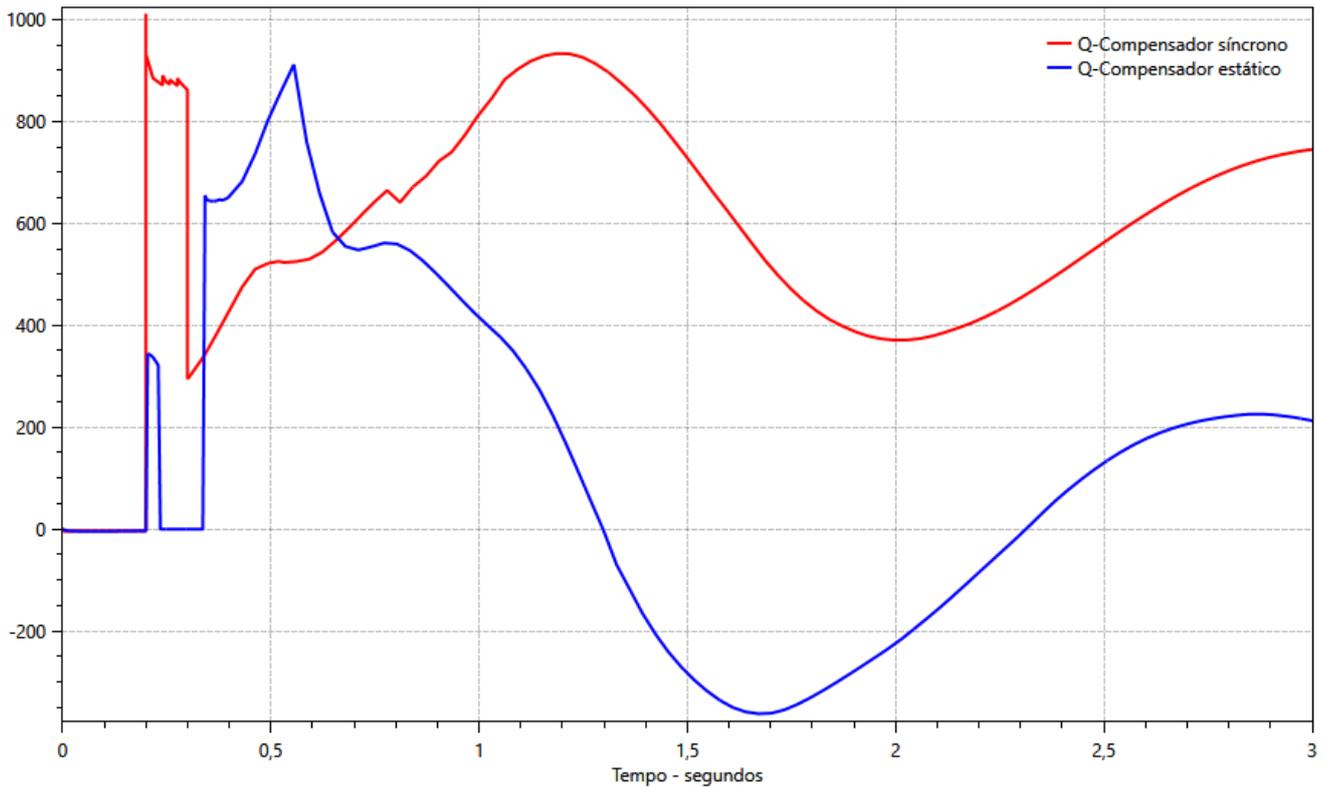


Figura 10-3-Potência reativa [Mvar] com inserção de compensação síncrona e estática na SE Estreito após curto-circuito na SE Estreito e abertura da LT 500 kV Estreito-F. Dias. (Cenário 1 - ano 2029)

A recuperação da potência do elo CCAT Xingu-Estreito foi similar para ambas as alternativas, sendo que a alternativa com compensador estático foi 10 ms mais rápida que a alternativa com compensador síncrono, conforme apresentado na Figura 10-4. Enquanto o caso sem suporte adicional de potência reativa apresentava tempo de recuperação de 231 ms, após a inserção da compensação reativa adicional de 900Mvar, com ambas as soluções tecnológicas, o tempo de recuperação reduz para aproximadamente 100 ms.

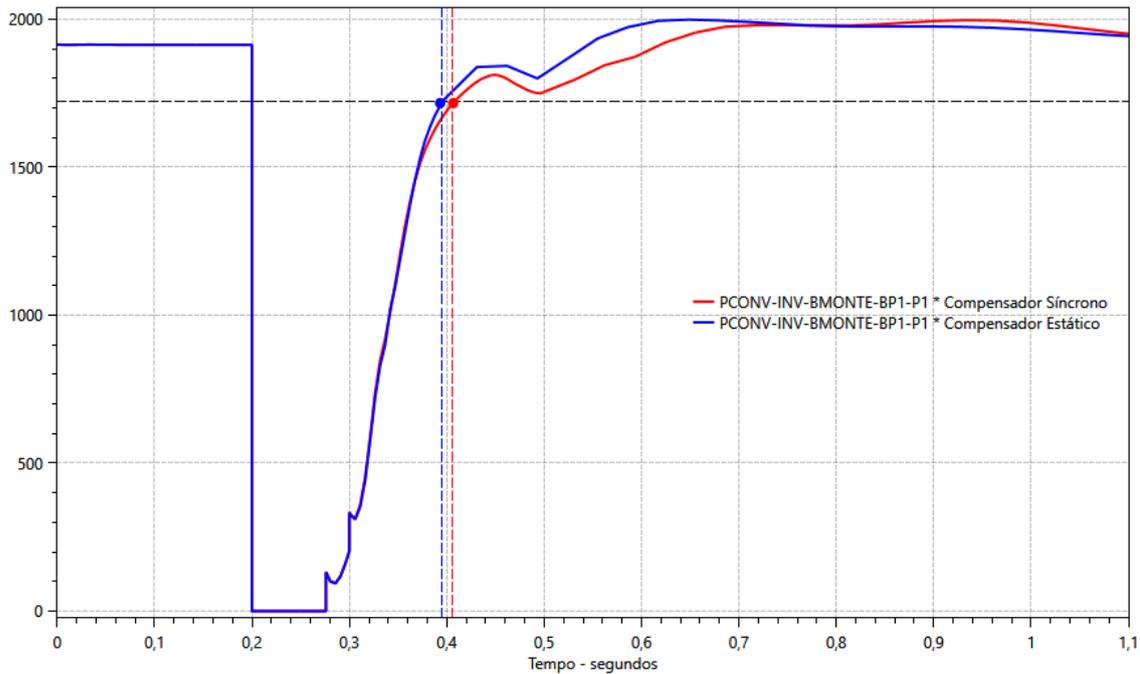


Figura 10-4-Potência [MW] pelo elo CCAT Xingu-Estreito. Curto-circuito SE Estreito com abertura LT 500 kV Estreito-F. Dias. (Cenário 1 - ano 2029)

A Figura 10-5 apresenta a injeção de potência reativa dos compensadores síncrono e estático, face ao bloqueio do bipolo Xingu-Terminal Rio. Nota-se, neste evento, que os compensadores síncronos fazem o aproveitamento de praticamente toda sua capacidade, superando a contribuição que compensadores estáticos oferecem à rede de transmissão. Nesse sentido, observa-se, a partir da Figura 10-6, que a alternativa com compensadores síncronos obteve melhor desempenho quanto ao aproveitamento da capacidade de sobrecarga de curta e longa duração do bipolo Xingu-Estreito.

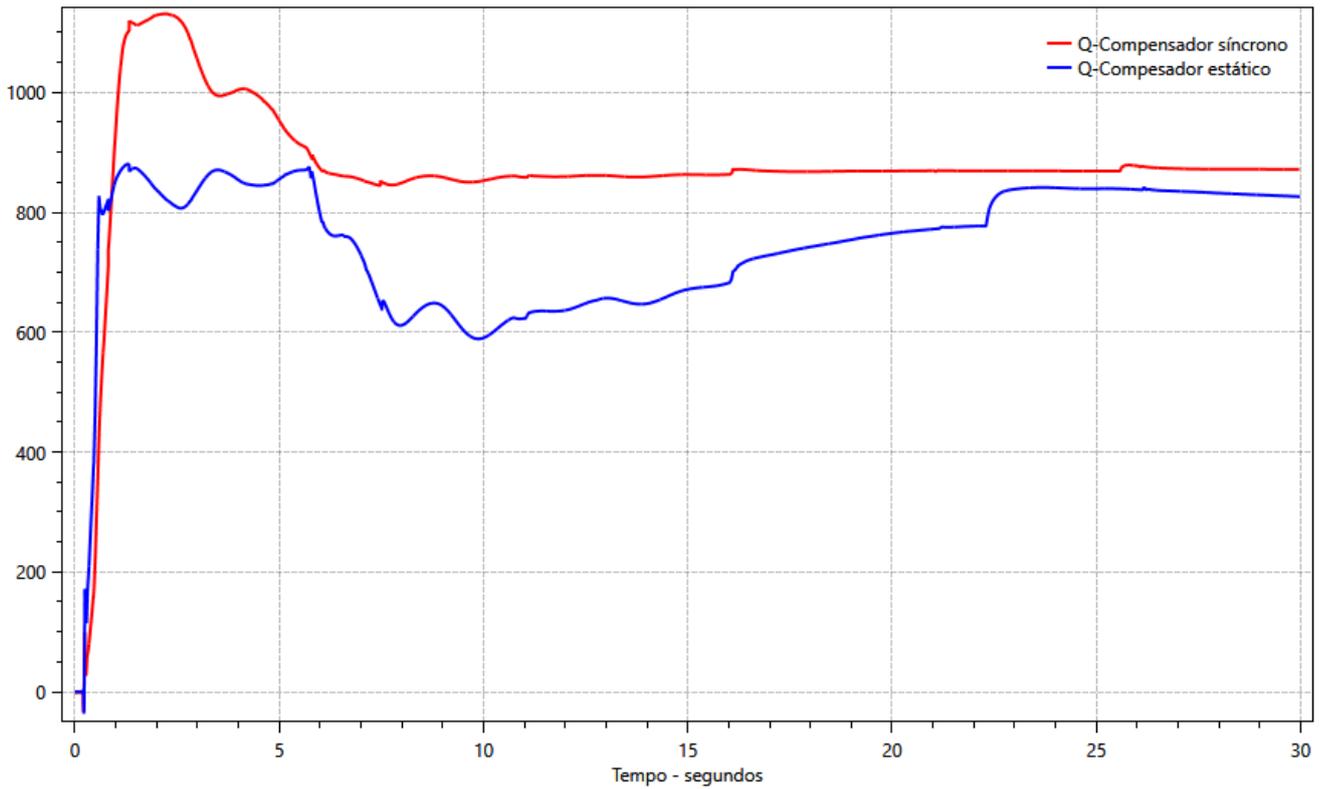


Figura 10-5-Potência reativa [Mvar] injetada na rede pelo compensador síncrono e pelo compensador estático na SE Estreito após bloqueio bipolo Xingu - T.Rio. (Cenário 1 - ano 2024)

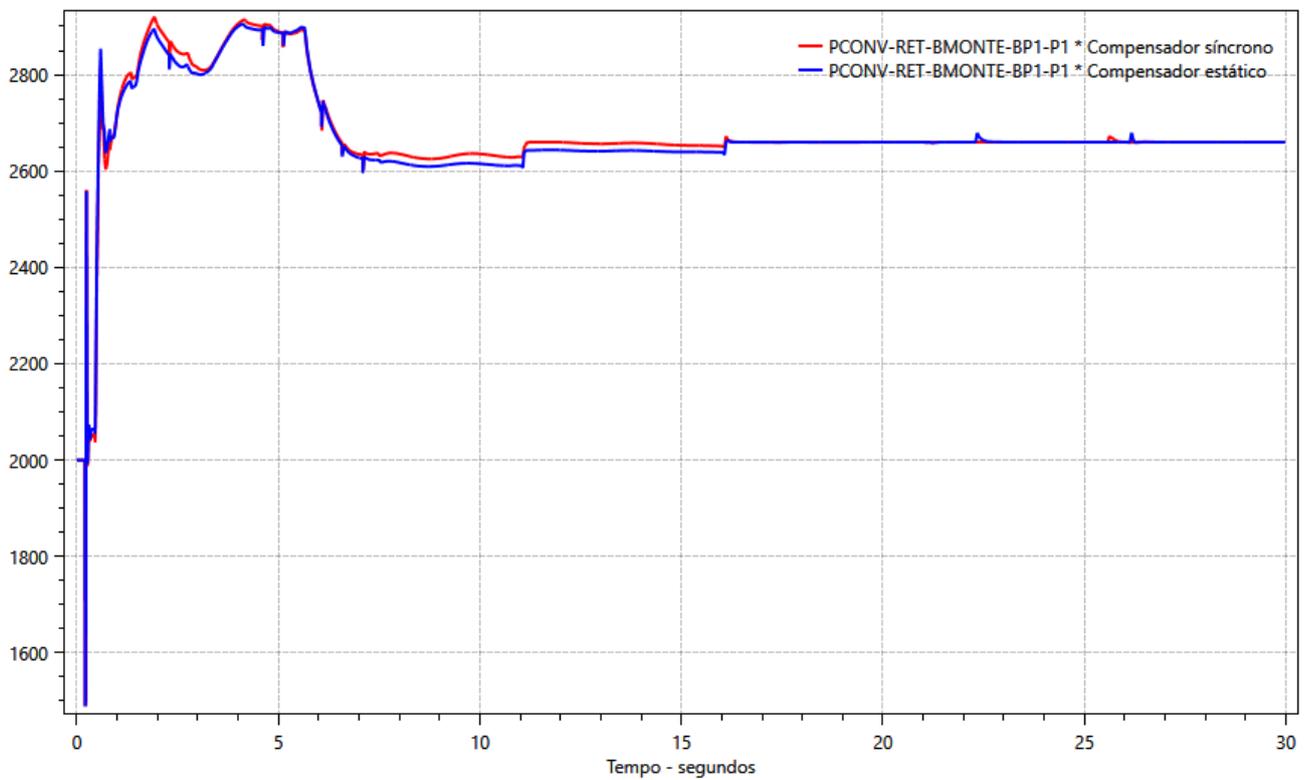


Figura 10-6-Potência [MW] por polo no elo CCAT Xingu-Estreito após bloqueio do bipolo Xingu - T.Rio. (Cenário 1 ano 2024)

Em complemento à avaliação das alternativas, no quesito tecnologia, apresentam-se, a seguir, os índices de *multi-infeed* para as duas alternativas.

Até o momento foram apresentados resultados de desempenho de caráter determinístico, isto é, foram selecionadas perturbações severas locais, na Subestação Estreito, que inevitavelmente causam falha de comutação na inversora do bipolo Xingu – Estreito e que permitiram comparações do benefício oferecido por cada alternativa de compensação reativa adicional. Contudo, podem ocorrer diversas perturbações no Sistema Interligado Nacional, em subestações remotas, que provoquem falha de comutação devido à queda da tensão na SE 500 kV Estreito ou a variação angular da tensão nesta subestação. Estas variações na tensão CA da conversora de Estreito podem ser menos severas que aquelas provocadas por curto-circuito local, mas, ainda assim, podem levar à falha de comutação nesta conversora.

Para demonstrar que os compensadores síncronos podem mitigar o risco de ocorrência de falha de comutação provocado por essa variedade de perturbações, não capturadas nas simulações até agora apresentadas, recorre-se ao índice *Multi-Infeed Interaction Factor* - MIIF, que fornece uma sensibilidade relacionando a influência que a variação da tensão de uma barra produz na tensão de outra barra do sistema.

O índice MIIF é calculado⁴ pela seguinte expressão:

$$MIIF_{j,i} = \frac{\Delta V_j}{\Delta V_i}$$

Onde, ΔV_j é a variação de tensão provocada na barra j , por uma variação ΔV_i , ocorrida na barra i .

A Tabela 10-1 permite comparar a robustez acrescentada à subestação de Estreito, após a inserção dos compensadores estáticos ou dos compensadores síncronos. O índice MIIF, apresentado nesta tabela, representa o grau de influência causado por perturbações em barras remotas (i) sobre a barra de Estreito (j), portanto, quanto menor o valor deste índice, menor a probabilidade de ocorrência de falha de comutação na inversora de Estreito, após a ocorrência de curto-circuito em barra remota.

Conclui-se que a alternativa baseada em compensação síncrona reduz em média 12,3% a influência de falhas remotas na tensão da inversora de Estreito, ao passo que a alternativa baseada em compensação estática reduz em média 0,08% dessa influência, mostrando-se menos efetiva.

⁴ O procedimento de cálculo desse índice, efetuado automaticamente pelo software Anatem, dá-se da seguinte maneira: a barra i recebe o chaveamento de um reator que provoque a queda da sua tensão em 1%, em seguida, mede-se a tensão na barra j . A divisão da variação de tensão na barra j pela variação da tensão na barra i , resulta no índice $MIIF_{j,i}$, que fornece a sensibilidade do quanto a barra j é susceptível às variações ocorridas na barra i .

Tabela 10-1 – Índices MIIF para alternativa com compensação síncrona e estática, ano 2029, carga média.

| | Barra <i>j</i> - Conversora ESTREITO-MG500 | | | | |
|---------------------------|--|----------------------------|-----------|---------------------------|-----------|
| | Sem compensação | Compensação Estática (CER) | | Compensação Síncrona (CS) | |
| Barra <i>i</i> Conversora | MIIF | MIIF | ΔMIIF (%) | MIIF | ΔMIIF (%) |
| IBIUNA-SP345 | 0.113 | 0.113 | -0.1% | 0.099 | -12.3% |
| ARARA2-SP500 | 0.263 | 0.263 | 0.0% | 0.232 | -12.0% |
| TRIO-RJ500 | 0.264 | 0.264 | -0.1% | 0.232 | -12.1% |
| SILVANIA-GO500 | 0.128 | 0.128 | -0.1% | 0.112 | -12.8% |

A Tabela 10-2 apresenta o aumento da potência de curto-circuito por barramento, após a inserção de compensação síncrona ou estática no sistema. Esta grandeza elétrica indica a robustez de determinado ponto da rede de transmissão para a conexão de bipolos em corrente contínua, uma vez que possui forte influência na recuperação da tensão da rede CA após a ocorrência de curto-circuito, mitigando o risco de colapsos de tensão, condição essencial para o funcionamento adequado de conversoras CA/CC baseadas em tecnologia LCC.

Nota-se que apenas a inclusão de compensação síncrona provocou aumento da potência de curto-circuito nas barras de conexão de bipolos, especialmente na SE Estreito, o que reforça a maior eficácia dessa tecnologia para a prevenção de falhas de comutação e para uma melhor recuperação de potência pelos bipolos, após a ocorrência de perturbações na rede CA.

Tabela 10-2 – Potência de curto-circuito com compensação síncrona e estática, ano 2029, carga média.

| Conversora | Potência de curto-circuito [MVA] | Variação % com CER | Variação % com CS |
|----------------|----------------------------------|--------------------|-------------------|
| IBIUNA-SP345 | 24.441 | 0.0% | 0.25% |
| ARARA2-SP500 | 27.027 | 0.0% | 0.48% |
| ESTREITO-MG500 | 25.904 | 0.0% | 12.07% |
| T.RIO-RJ500 | 30.815 | 0.0% | 0.42% |
| SILVAN-GO500 | 18.065 | 0.0% | 0.10% |

A Tabela 10-3 apresenta a relação da potência de curto-circuito e a potência das estações conversoras - SCR, que corrobora de outro modo na vantagem dos compensadores síncronos em relação aos compensadores estáticos quanto à robustez dos pontos de conexão das estações conversoras. Quanto maior o índice SCR, maior a robustez do ponto de conexão e, novamente, a alternativa que torna a rede mais robusta é aquela com a implementação de compensadores síncronos, que fortalece principalmente a subestação de Estreito.

Tabela 10-3 – SCR com compensação síncrona e estática, ano 2029, carga média.

| <i>Conversora</i> | Sem compensação | Compensação Estática (CER) | | Compensação Síncrona (CS) | |
|-------------------|-----------------|----------------------------|-------------------|---------------------------|-------------------|
| | SCR | SCR | Δ SCR em % | SCR | Δ SCR em % |
| IBIUNA-SP345 | 5.6142 | 5.6142 | 0.0% | 5.6284 | 0.3% |
| ARARA2-SP500 | 4.8363 | 4.8363 | 0.0% | 4.8594 | 0.5% |
| ESTREITO-MG500 | 6.7697 | 6.77 | 0.0% | 7.5867 | 12.1% |
| T.RIO-RJ500 | 8.1236 | 8.1236 | 0.0% | 8.1578 | 0.4% |
| SILVAN-GO500 | 4.6579 | 4.6579 | 0.0% | 4.6627 | 0.1% |

Na avaliação de desempenho dinâmico quanto ao tempo de recuperação e aproveitamento da capacidade de sobrecarga do bipolo Xingu-Estreito, a alternativa com compensador síncrono e a alternativa com compensador estático obtiveram desempenhos adequados e similares. Contudo, na avaliação que indica o grau de susceptibilidade da conversora de Estreito a interações com outras conversoras, a alternativa com compensadores síncronos mostrou expressiva superioridade, colocando-se em um patamar de qualidade técnica superior à outra. Dessa forma, a alternativa vencedora, em razão da efetividade técnica, é aquela com três compensadores síncronos de -180/+300 Mvar.

Apesar de não terem sido identificados problemas de estabilidade de frequência no horizonte de análise desse estudo, deve-se destacar os benefícios da compensação síncrona nesse quesito. Essa tecnologia agrega inércia para o sistema, a medida que é constituída por máquinas rotativas, com energia cinética armazenada no rotor, impedindo variações bruscas de frequência no sistema, após a ocorrência de grandes perturbações. Em situações de elevada importação de energia pelo Sudeste e número reduzido de máquinas sincronizadas, coincidentes com indisponibilidade forçada ou programada de equipamentos para manutenção, a compensação síncrona pode prover maior flexibilidade para a operação do sistema, agregando maior confiabilidade frente a incertezas.

Nos capítulos seguintes são detalhados os benefícios que estes equipamentos podem oferecer ao desempenho da conversora de Estreito e ao Sistema Interligado Nacional.

11 ANÁLISE DO DESEMPENHO DINÂMICO

Apresentam-se a seguir os principais benefícios oferecidos ao Sistema Interligado Nacional com a instalação dos compensadores síncronos na subestação de Estreito.

As avaliações de desempenho dinâmico foram realizadas com base nos cenários descritos no capítulo 7, utilizando a base de dados do PDE 2029⁵. A análise concentrou-se nos anos 2024 e 2029. Ressalta-se que a principal diferença entre a topologia do ano 2024 e a do ano 2029 é a presença do bipolo Graça Aranha-Silvânia, com potência de 4.000 MW, interligando o Nordeste ao Sudeste.

A característica comum dos cenários utilizados é a elevada exportação das regiões Norte e Nordeste para a região Sudeste, visto que essa condição é a que mais solicita suporte dos equipamentos que fornecem potência reativa para controle de tensão nas barras do sistema.

Com o intuito de sintetizar os resultados das análises em regime dinâmico, será detalhado apenas o resultado de um caso por cenário, embora os benefícios ocorram, também, nos demais casos estudados.

11.1 Recuperação mais rápida da potência transmitida após perturbação

As regiões Norte e Nordeste apresentam, em determinados períodos do ano, relevante exportação de energia para a região Sudeste. Quando o SIN está operando nestas condições, em que as interligações em corrente alternada e contínua alcançam carregamentos máximos, na ordem de 17.300 MW, em 2024, a 21.600 MW, em 2029, o tempo de interrupção de potência desses elos de corrente contínua em alta tensão - CCAT é determinante para a estabilidade do sistema.

Nesse sentido, almeja-se que na ocorrência de qualquer perturbação que provoque falha de comutação na conversora de Estreito, esta seja capaz de recuperar o mais rápido possível a transmissão de potência para o nível de operação antes da perturbação.

Um exemplo de como os compensadores síncronos em Estreito melhoram o desempenho do sistema elétrico é o tempo de recuperação após um curto-circuito na SE Estreito com abertura da LT 500 Estreito - Fernão Dias. O cenário utilizado foi o Norte e Nordeste Exportadores, ano 2029, no patamar de carga média. A presença dos compensadores síncronos em Estreito permitiu que a recuperação da potência do elo Xingu-Estreito fosse 130 ms mais rápida, satisfazendo o critério de recuperação de potência estabelecido como premissa para este estudo.

⁵ Incorporando as versões atualizadas dos modelos representativos de elos em corrente contínua e seus controles, divulgados na base de dados de transitórios eletromecânicos do ONS, versão de novembro de 2020 [4]

A Figura 11-1 apresenta a potência de um polo do elo CCAT Xingu-Estreito, com e sem os compensadores síncronos de Estreito.

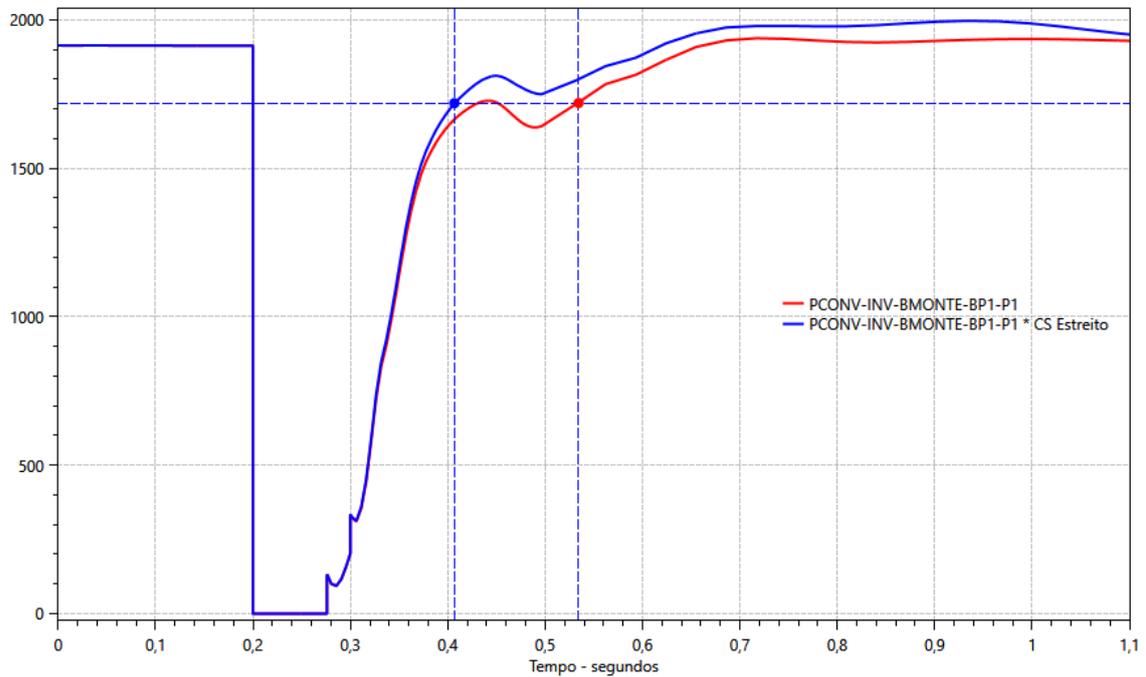


Figura 11-1-Potência [MW] por polo do elo CCAT Xingu-Estreito após curto-circuito na SE Estreito com abertura dupla da LT 500 kV Estreito-F. Dias. (Cenário 1 - ano 2029)

Observa-se, na Figura 11-2, que após a aplicação do curto-circuito, em $t=200$ ms, os compensadores síncronos de Estreito atuaram rapidamente no suporte de potência reativa. Nota-se também que mesmo após a eliminação da falta, $t=300$ ms, os CS são solicitados a injetarem potência reativa no sistema por alguns segundos, permitindo um desempenho melhor do bipolo Xingu-Estreito, conforme exposto anteriormente.

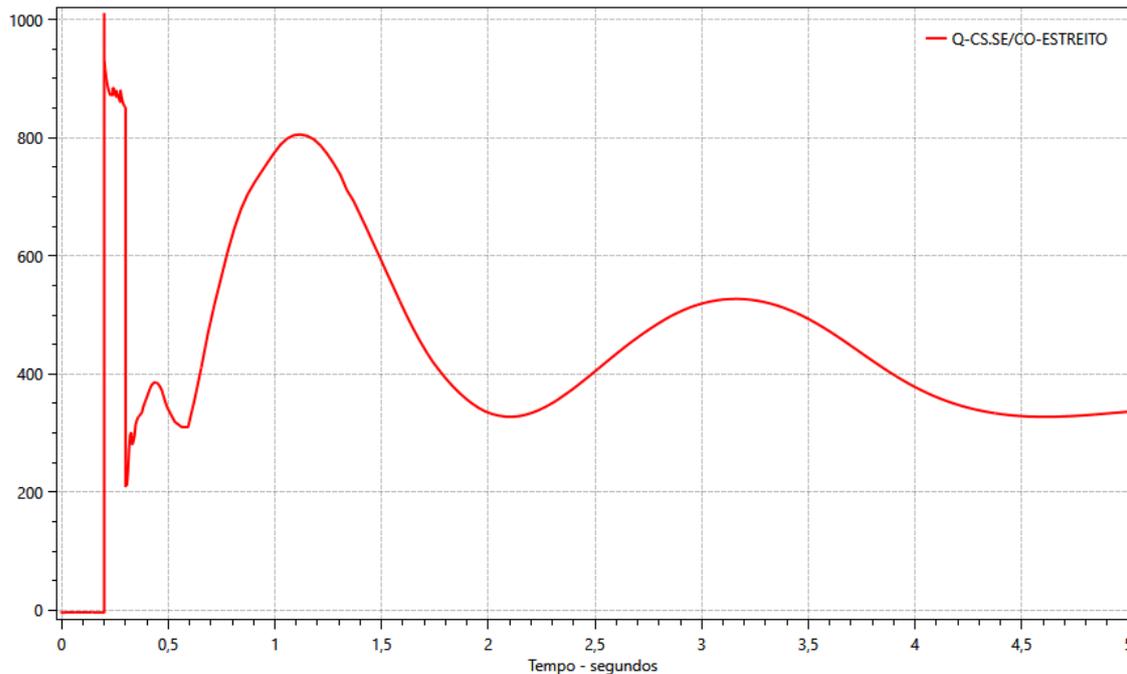


Figura 11-2-Potência reativa [Mvar] injetada pelo CS de Estreito após curto-circuito na SE Estreito com abertura dupla da LT 500 kV Estreito-F. Dias. (Cenário 1 - ano 2029)

11.2 Melhor aproveitamento da capacidade de sobrecarga dinâmica

Nos estudos que recomendaram a implantação dos bipolos Xingu-Estreito e Xingu-Terminal Rio, foi identificado como um requisito importante para a estabilidade do sistema, a capacidade de sobrecarga dinâmica de 50% por 5 segundos (sobrecarga de curta duração) e, na sequência, uma sobrecarga de 33% por 30 minutos (sobrecarga de longa duração), possibilitando a ação de *Run-up* deste bipolo, que consiste na transmissão temporária de potência adicional, após perda de outras linhas de transmissão. Contudo, para se atender esse requisito não basta somente que os equipamentos desses elos CCAT suportem essa sobrecarga, é preciso, também, que o sistema elétrico como um todo não apresente restrições a essa operação.

Devido a atrasos no cronograma de implantação de obras que culminaram até mesmo na caducidade de contratos de concessão de linhas de transmissão planejadas para reforço da rede CA na região Sudeste e na região Norte, a entrada em operação do bipolo Xingu-Estreito ocorreu em uma rede diferente da planejada em sua etapa de concepção. A rede frágil em que esse bipolo se conectava, trouxe a necessidade de ajustes em alguns parâmetros de controle, de modo a mitigar a ocorrência de falhas de comutação e aprimorar a recuperação do sistema CC, após a ocorrência de falhas na rede CA, que, naquela época, estava conjuntamente degradada.

Em [8] é citado que, na etapa de implantação do projeto, em função da operação conjuntural deste bipolo em uma rede degradada, algumas adaptações precisaram ser feitas (nas malhas *Transient Fault*

Recovery Logic, Current Error Modulation, Firing Angle Limitation e nos parâmetros de controladores PI) para evitar a ocorrência de falhas de comutação consecutivas e assegurar recuperação rápida e estável da potência CC após perturbações, tendo sido flexibilizado o atendimento ao requisito de sobrecarga dinâmica.

Nota-se que após o horizonte 2023, quando os reforços originalmente planejados para a região Norte e Sudeste estarão disponíveis no sistema, se cumpridas as datas de compromisso contratual, a rede de transmissão receptora deste bipolo passa a ser robusta e ainda provida de confiabilidade adicional, com a inserção dos compensadores síncronos recomendados com base neste estudo, o que pode permitir novo ajuste dos parâmetros de controle do bipolo a fim de prover sua operação otimizada, não só no que diz respeito a recuperação rápida de potência mas também no que tange o aproveitamento máximo da sua capacidade de sobrecarga.

Para o estudo em questão, utilizando os parâmetros de controle atuais, que constam no modelo oficial deste bipolo, a robustez do ponto de conexão da SE Estreito pode limitar ou permitir que se explore a plena capacidade de sobrecarga do bipolo Xingu-Estreito.

Nos cenários Norte e Nordeste Exportadores, no ano 2024 em patamar de carga média, tem-se o exemplo de como os compensadores síncronos da SE Estreito podem melhorar o desempenho do bipolo Xingu-Estreito. Apresenta-se, na Figura 11-3, a potência de um polo do elo CCAT Xingu-Estreito após o bloqueio do elo CCAT Xingu-Terminal Rio, com e sem a presença de compensação síncrona em Estreito.

No caso base, após a aplicação de *Run-up* de 50% no bipolo Xingu-Estreito, a máxima sobrecarga de curta duração alcançada foi de 41%, ao passo que no caso em que estão presentes os compensadores síncronos em Estreito, essa sobrecarga foi de 46% (valor mais próximo a plena capacidade).

Outra melhora significativa ocorreu na capacidade de sobrecarga de longa duração, que se inicia em sequência, devendo seguir uma rampa negativa até 133% da potência nominal. Nota-se que, no caso com os compensadores síncronos em Estreito, a potência do bipolo Xingu-Estreito apresentou o comportamento ideal, entretanto, no caso sem a compensação adicional, a potência deste bipolo caiu para 27,5% após a rampa e só atingiu 32,4% de sobrecarga após 20 segundos.

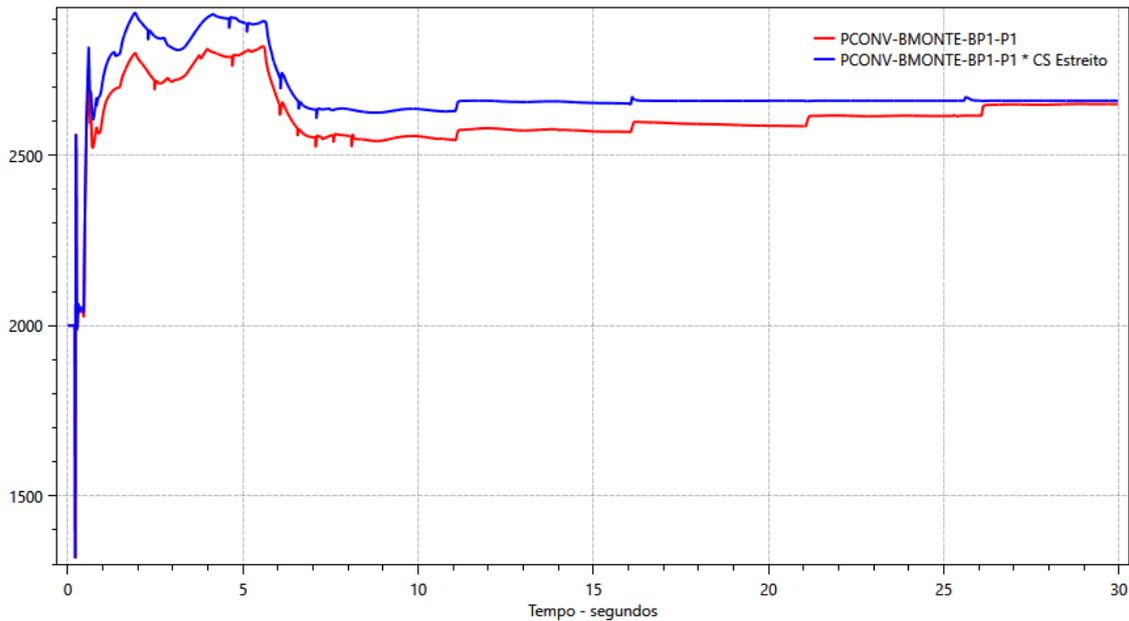


Figura 11-3-Potência [MW] por polo do elo CCAT Xingu-Estreito após bloqueio do bipolo Xingu - T.Rio. (Cenário 1 - ano 2029)

Diferentemente da perturbação causada por uma falha de comutação, o bloqueio de um bipolo com sobrecarga no bipolo remanescente exige suporte dos equipamentos da rede por mais tempo. Observa-se, na Figura 11-4, que a potência reativa dos compensadores síncronos de Estreito atingem momentaneamente 1.128 Mvar e depois permanecem com 860 Mvar, 95% da potência nominal, após o bipolo Xingu -Estreito assumir a tomada parcial da potência originalmente transmitida pelo bipolo bloqueado (Xingu – Terminal Rio).

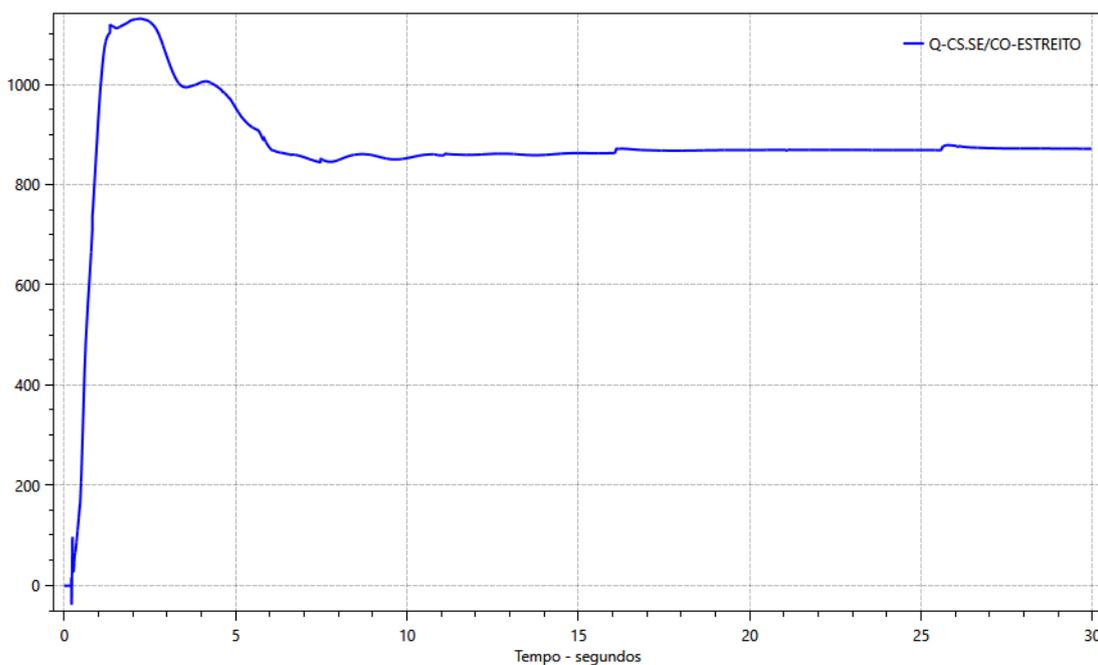


Figura 11-4-Potência reativa [Mvar] injetada pelo CS de Estreito após bloqueio do bipolo Xingu - T.Rio. (Cenário 1 - ano 2029)

11.3 Aumento da capacidade de exportação do Norte e Nordeste para o Sudeste/Centro-Oeste

Apesar dos benefícios da inclusão de compensadores síncronos no sistema elétrico estarem usualmente associados ao aumento da potência de curto-circuito na barra da estação conversora, oferecendo maior segurança para a sua operação, pode-se inferir que eles agregam, também, um ganho marginal na capacidade das interligações CA entre as regiões Norte/Nordeste e Sudeste, devido ao seu melhor desempenho durante perturbações.

Como exemplo, é apresentado o desempenho do sistema elétrico, no ano 2024, no cenário 2, caso em que a interligação NNE-SE transmite fluxo máximo. Nesta situação, o bloqueio do elo CCAT Xingu-Terminal Rio é a perturbação mais crítica para a estabilidade do sistema. Ao inserirmos os compensadores síncronos na SE Estreito, sem nenhuma alteração no caso já simulado, observa-se que a região Norte/Nordeste consegue exportar 100 MW a mais para o Sudeste, isto é, ocorre aumento de 100 MW no limite máximo atual da interligação.

Para se chegar a essa conclusão, foi monitorado o fator limitante dessa perturbação, que é o primeiro *swing* de tensão na SE 500 kV Serra Mesa 2. Observa-se, na Figura 11-5, que a mínima tensão transitória atingida pela SE 500 kV Serra da Mesa 2, durante o bloqueio do elo CCAT Xingu - Terminal Rio, é superior a 0.8 p.u., com o intercâmbio do caso base e também na condição de transmissão adicional de 100MW de potência, com a inclusão de compensação síncrona em Estreito.

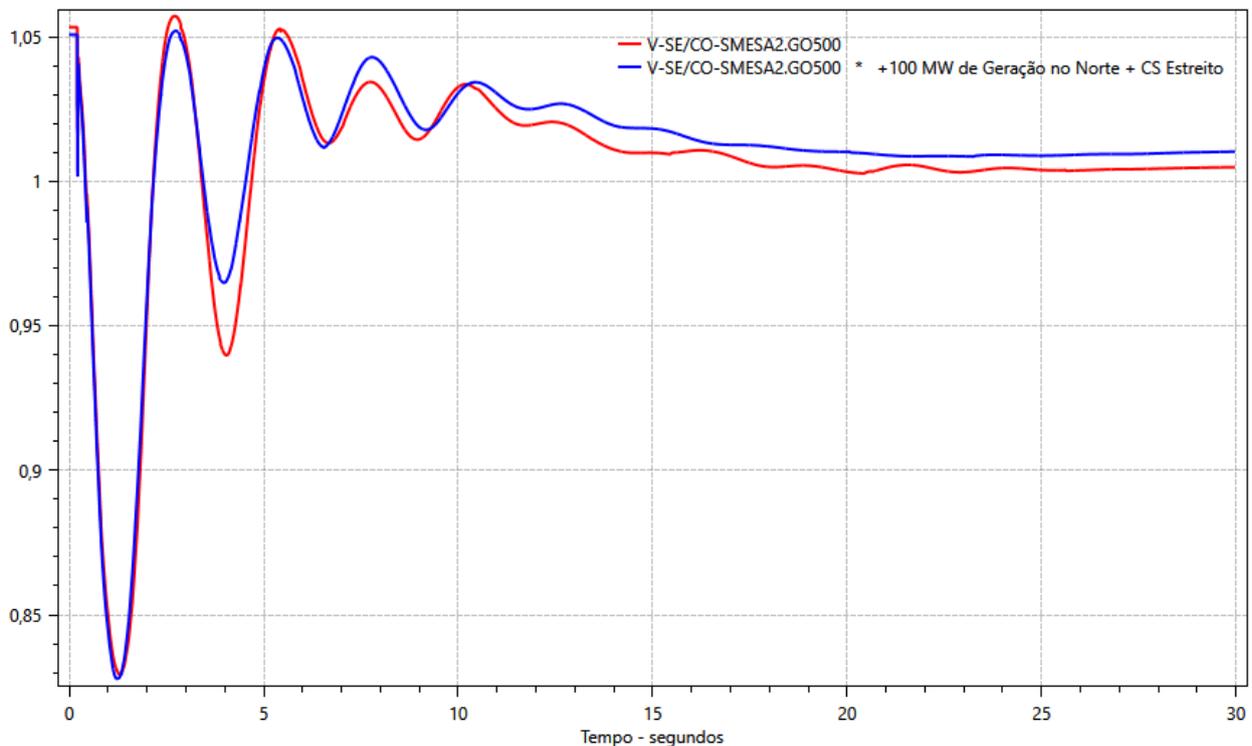


Figura 11-5-Tensão [pu] na SE 500 kV Serra da Mesa 2 após bloqueio do bipolo Xingu - T.Rio. (Cenário 2 - ano 2024)

11.4 Menor afundamento de tensão na região Sudeste

Nos cenários analisados, principalmente no patamar de carga média, as tensões na rede de transmissão da região Sudeste e das interligações CA entre N-SE e NE-SE podem sofrer acentuados afundamentos de tensão durante perturbações envolvendo os elos CCAT.

Para demonstrar esse efeito, apresenta-se, a seguir, a simulação do bloqueio do bipolo Xingu-Terminal Rio no cenário Norte/Nordeste Exportador, ano 2024, carga média.

Neste caso, nota-se menor afundamento de tensão na barra da SE 500 kV Estreito, após o bloqueio do bipolo Xingu-Terminal Rio e sobrecarga no bipolo Xingu-Estreito, considerando o suporte de reativos adicional provido pelos compensadores síncronos. Além disso, o módulo da tensão após a falta converge para um valor mais próximo à condição pré-falta.

A Figura 11-6 apresenta a diferença do perfil de tensão da SE 500 kV durante o bloqueio do bipolo Xingu-Terminal Rio, considerando um caso com e outro sem os compensadores síncronos em Estreito, representados pelas curvas azul e vermelha, respectivamente.

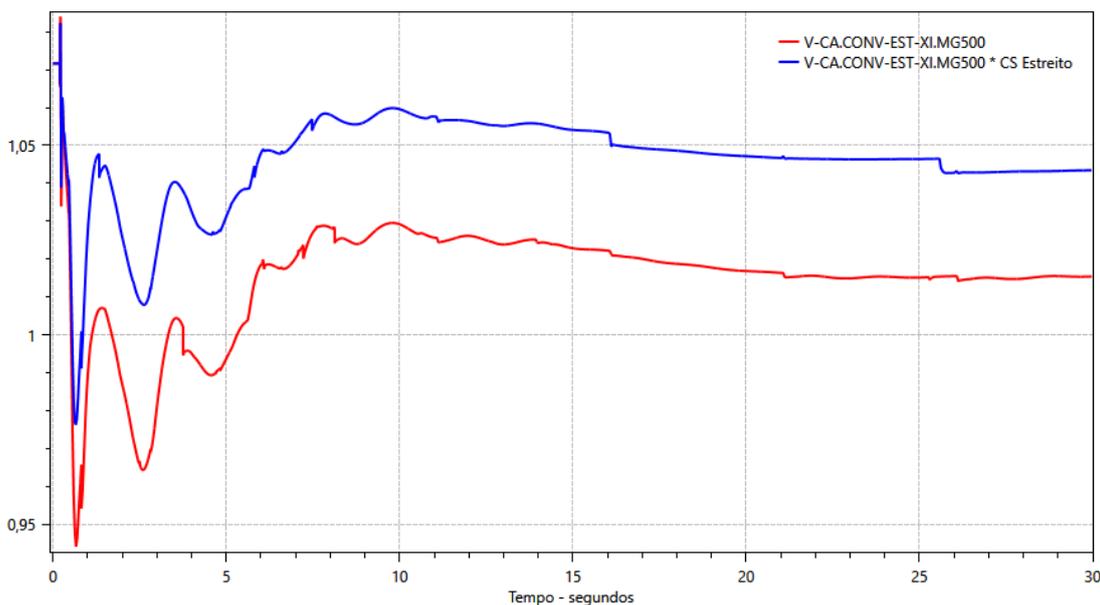


Figura 11-6-Tensão [pu] na SE 500 kV Estreito após bloqueio do bipolo Xingu - T. Rio. (Cenário 1 - ano 2024)

Observa-se, na Figura 11-7, que os compensadores síncronos injetam reativos em valor próximo da sua potência nominal no sistema, durante a ocorrência do evento, entretanto, a tensão na barra da SE 500 kV não conseguiu atingir o mesmo nível de tensão pré-falta, devido ao maior consumo de reativos pelo bipolo CC durante o *Run-up* de potência (quando assume uma sobrecarga de 1.300 MW, por 30 minutos, para compensar a perda do bipolo Xingu-Terminal Rio).

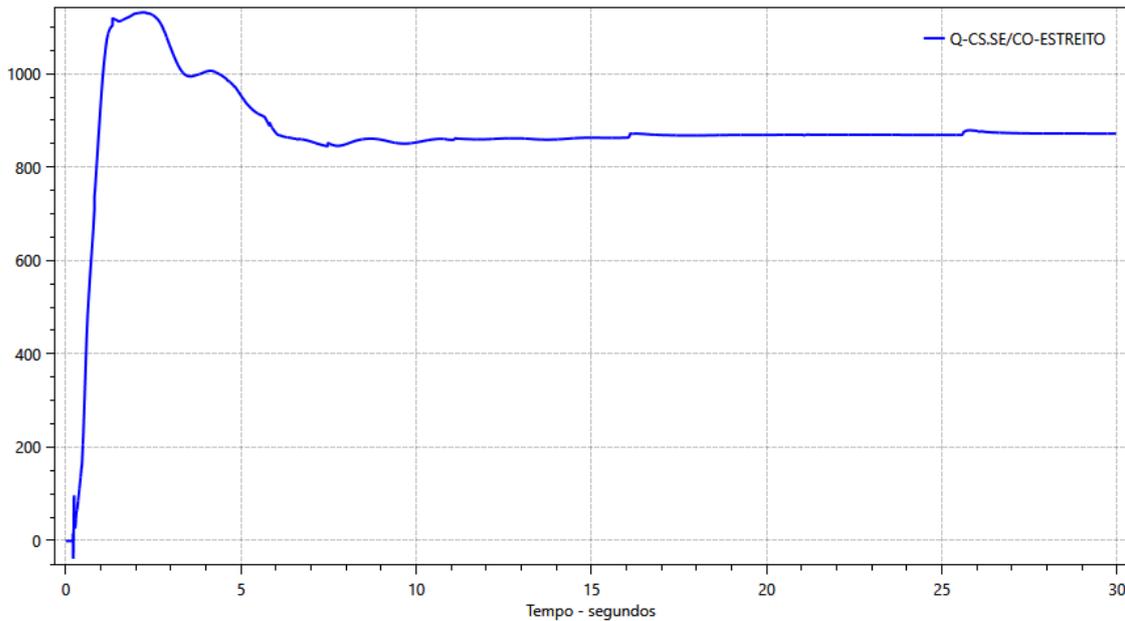


Figura 11-7-Potência Reativa [Mvar] injetada pelo CS de Estreito após bloqueio do bipolo Xingu - T. Rio. (Cenário 1 - ano 2024)

11.5 Redução de sobretensões dinâmicas na SE Estreito

Conectam-se na subestação de Estreito sete linhas de transmissão em 500 kV e outras quatro linhas de transmissão em 345 kV, que integram uma densa rede de transmissão na região Sudeste. Essa rede de transmissão, tão malhada, traz consigo a dificuldade de controle de tensão nos cenários de baixo fluxo de potência, ocorrendo principalmente nos patamares de carga leve.

Adiciona-se a esta dificuldade a possibilidade do bloqueio da potência da conversora de Estreito, seguida do desligamento parcial e escalonado dos grupos de filtros de componentes harmônicas a ela conectados, o que pode demandar suporte de absorção de potência reativa para evitar sobretensão na rede de transmissão da região Sudeste.

Os cenários de carga leve e carga mínima retratam a condição citada acima. Observa-se, na Figura 11-8, que na ocorrência do bloqueio do elo CCAT Xingu-Estreito há sobretensão de até 4% na SE 500 kV Estreito, por aproximadamente 20 segundos, no caso sem os compensadores síncronos. Por outro lado, no caso em que os compensadores síncronos de Estreito estão contribuindo com o suporte de potência reativa, a sobretensão é inferior a 2% e ocorre por apenas 12 segundos.

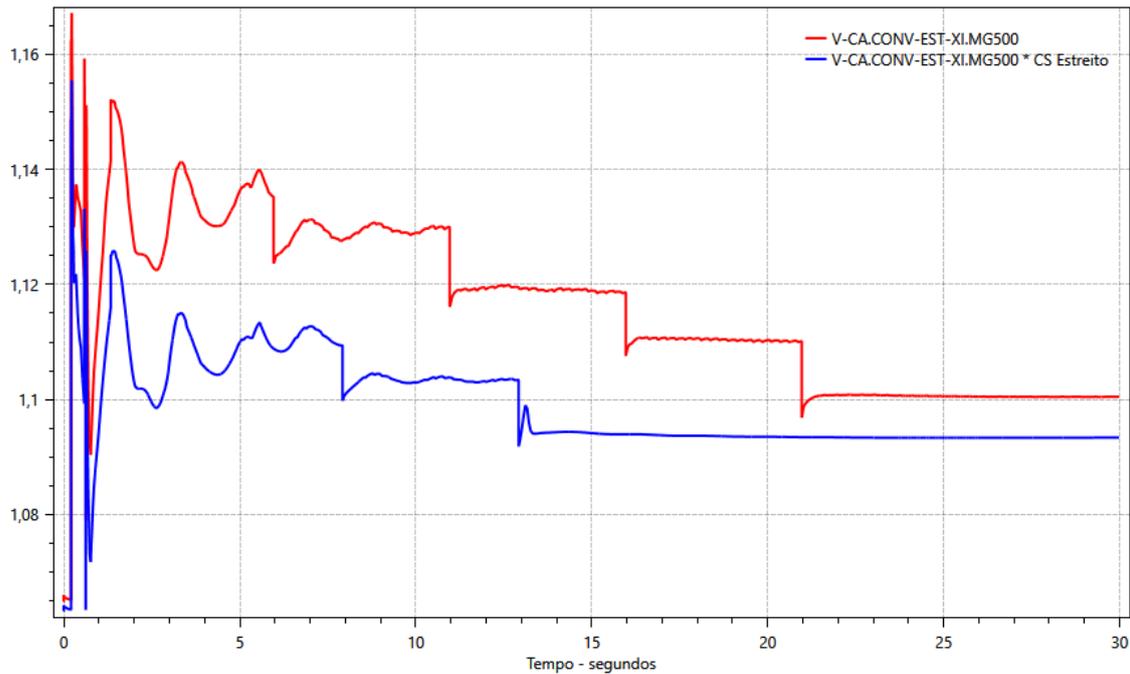


Figura 11-8-Tensão [pu] na SE 500 kV Estreito após bloqueio do bipolo Xingu - Estreito. (Cenário 3)

Para o controle da tensão na SE 500 kV Estreito, nota-se, a partir da Figura 11-9, o elevado montante de potência reativa que deve ser absorvida pelos compensadores síncronos. Demonstra-se, com isso, que a capacidade indutiva deste equipamento também é importante para melhorar o desempenho do sistema.

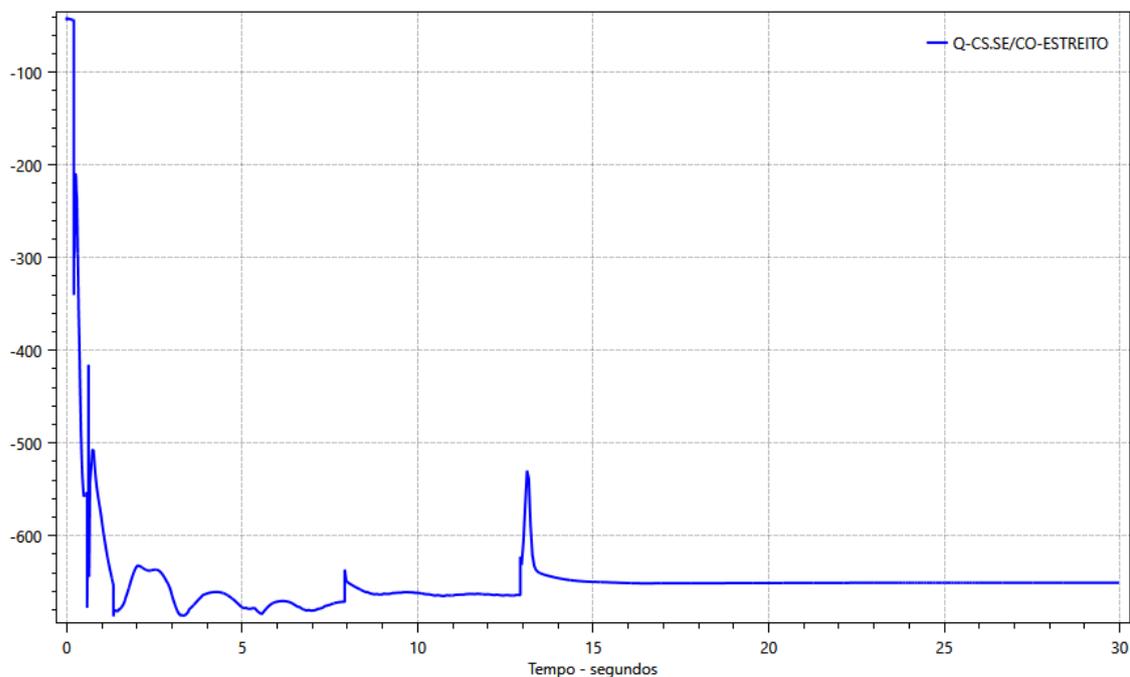


Figura 11-9-Potência reativa [Mvar] absorvida pelo CS Estreito após bloqueio do bipolo Xingu - Estreito. (Cenário 3)

11.6 Melhor desempenho dos bipolos vizinhos

Uma perturbação que torna fácil a percepção do suporte prestado pelos compensadores síncronos em Estreito a outras conversoras conectadas em pontos eletricamente próximos, na região Sudeste, é a aplicação de curto-circuito seguida de abertura dupla da LT 500 kV Estreito-Cachoeira Paulista.

No cenário Norte/Nordeste Exportador, no ano 2029 e patamar de carga média, foi simulada uma aplicação do curto-circuito monofásico na SE 500 kV Estreito e forçada a falha de comutação em todos os bipolos, inclusive no bipolo Graça Aranha-Silvânia, que consta no horizonte indicativo de planejamento. Após a falha de comutação do elo CCAT de Itaipu, observa-se uma recuperação 7.15 segundos mais rápida da conversora de Ibiúna em relação ao caso sem compensadores síncronos em Estreito.

Na Figura 11-10, apresenta-se a potência ativa de um polo do elo CCAT de Itaipu face a perda dupla da LT 500 kV Estreito-Cachoeira Paulista, considerando um caso com e outro sem os compensadores síncronos de Estreito. As linhas tracejadas representam o ponto em que a potência transmitida ultrapassa 90% da potência pré-falta, sem decaimento posterior.

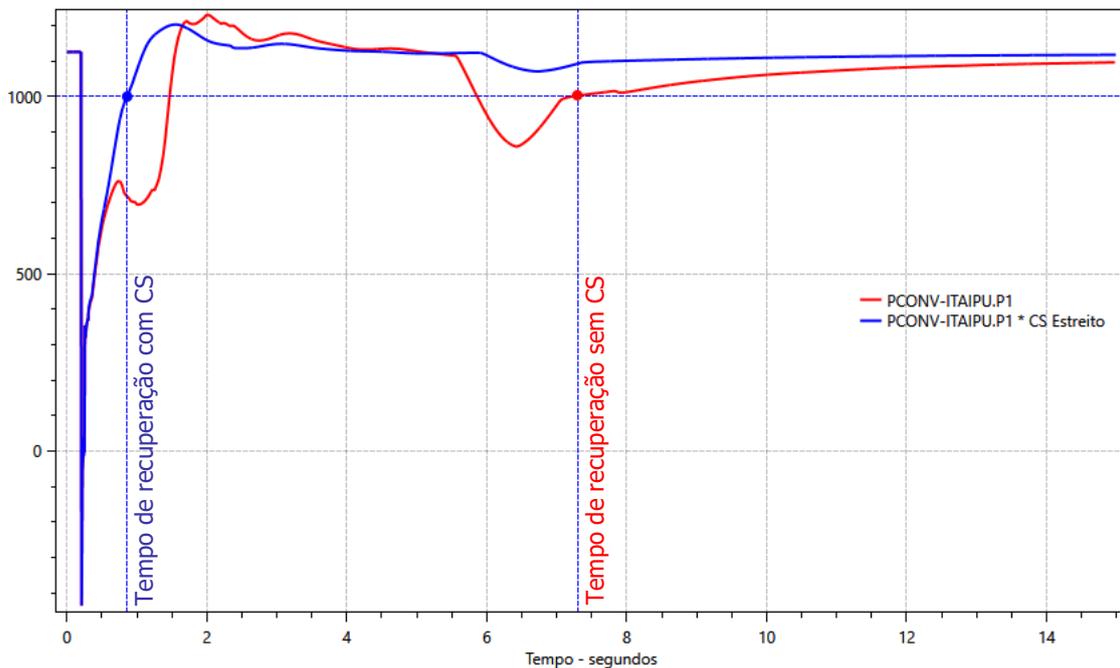


Figura 11-10-Potência [MW] por elo CCAT Itaipu após perda dupla da LT 500 kV Estreito-C. Paulista. (Cenário 1c - ano 2029)

Outra característica positiva e relevante para o desempenho do sistema nesta perturbação foi o perfil de tensão da SE 345 kV Ibiúna, barra em que se conecta a conversora do bipolo de Itaipu na região Sudeste. A geração de potência reativa dos compensadores síncronos chega a 1.000 Mvar no período de recuperação de potência das conversoras, isto é, após a eliminação do curto-circuito. O efeito deste suporte de potência reativa pode ser notado na Figura 11-11, que apresenta o perfil de tensão da SE

345 kV Ibiúna durante a perda dupla da LT 500 kV Estreito-Cachoeira Paulista, considerando um caso com e outro sem os compensadores síncronos na SE Estreito, representados pelas curvas azul e vermelha respectivamente.

Cabe ressaltar que apenas no caso com compensadores síncronos em Estreito o critério de primeiro *swing* de tensão é atendido, pois observa-se que no caso sem estes compensadores síncronos, após a eliminação do curto-circuito, tanto o primeiro como o segundo afundamento de tensão são inferiores a 0.8 p.u.

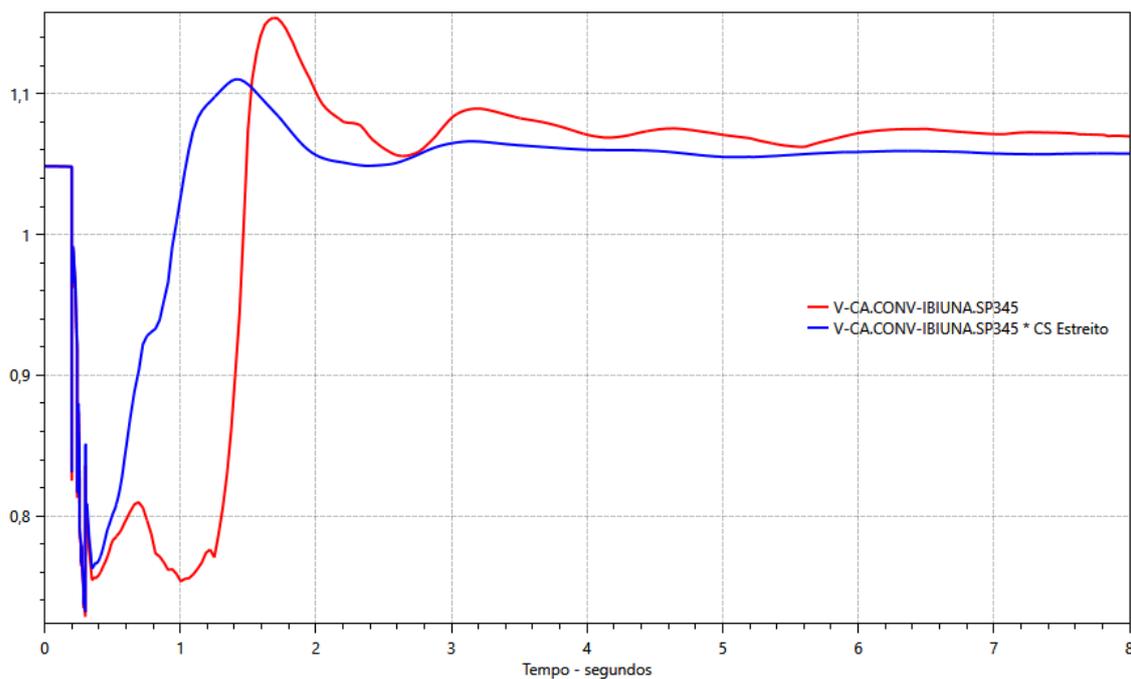


Figura 11-11-Tensão [pu] na SE 345 kV Ibiúna após perda dupla da LT 500 kV Estreito-C. Paulista. (Cenário 1c - ano 2029)

Outro exemplo, no mesmo cenário, de como os compensadores síncronos de Estreito melhoram o desempenho dos bipolos vizinhos, ocorre após bloqueio do elo CCAT Xingu-Terminal Rio. A Figura 11-12 ilustra a ocorrência de afundamentos de tensão nas barras próximas à SE Estreito, inclusive na SE Araraquara, após a ocorrência do evento, particularmente devido à sobrecarga assumida pelo bipolo Xingu-Estreito.

Ficou evidente, com esta perturbação, que os compensadores síncronos de Estreito proporcionam menor afundamento de tensão e rápido amortecimento de oscilações de tensão também em subestações vizinhas.

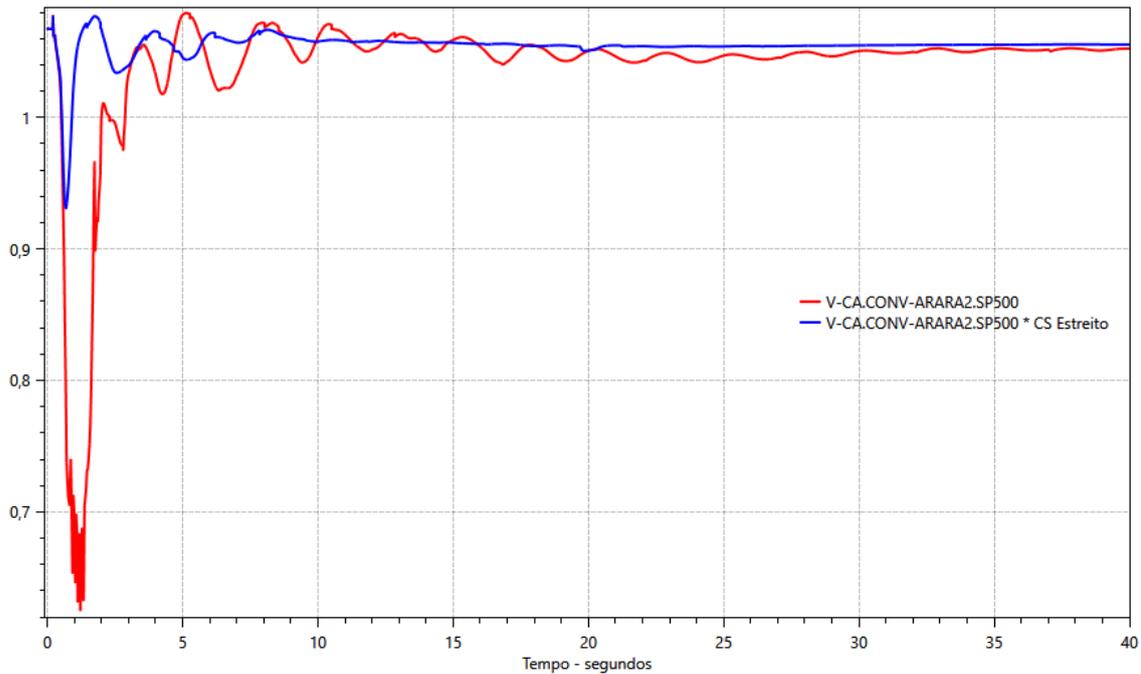


Figura 11-12-Tensão [pu] na SE 500 kV Araraquara2 após bloqueio do bipolo Xingu - T. Rio. (Cenário 1c - ano 2029)

11.7 Amortecimento mais rápido das oscilações de tensão nas interligações CA

Assim como o desempenho dos bipolos presentes no Sistema Interligado Nacional é aprimorado com o suporte adicional de reativos prestado pelos compensadores síncronos em Estreito, os troncos de transmissão CA, que interligam as regiões Norte e Nordeste também apresentam melhor desempenho quanto à amplitude e tempo de amortecimento das oscilações de tensão.

Para expor esse benefício agregado pelos compensadores síncronos ao SIN, apresenta-se novamente a perda dupla da LT 500 kV Estreito-Cachoeira Paulista no cenário Norte/Nordeste Exportador, no ano 2029 e patamar de carga média.

A Figura 11-13 apresenta o perfil de tensão na SE 500 kV Serra da Mesa 2 durante a perda dupla, mostrando que a inclusão dos compensadores síncronos na SE Estreito reduz o tempo de amortecimento das oscilações de tensão na interligação Norte-Sul.

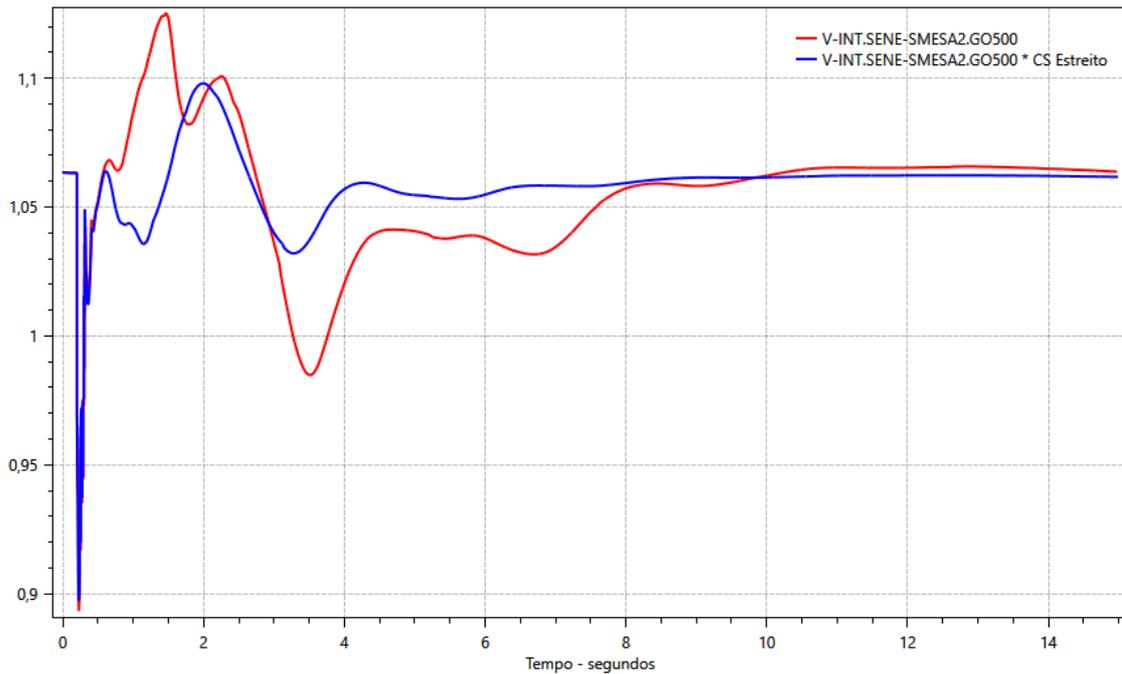


Figura 11-13-Tensão [pu] na SE 500 kV Serra da Mesa 2 após perda dupla da LT 500 kV Estreito-C. Paulista. (Cenário 1 - ano 2029)

11.8 Operação da conversora de Estreito em condições mais seguras

Outro benefício que os compensadores síncronos em Estreito trazem ao Sistema Interligado Nacional refere-se à operação mais segura da conversora de Estreito durante perturbações. Grandezas físicas, como tensão e ângulo de extinção (gama), passam a operar em faixas mais conservadoras, minimizando o risco de ocorrência de falhas de comutação.

O bloqueio do bipolo Xingu-Terminal Rio, no cenário Sudeste Máximo Importador, permite observar com clareza a diferença no modo de operação da inversora de Estreito.

A Figura 11-14 apresenta, para a referida perturbação, a alternância da operação da inversora de Estreito entre o modo de controle de tensão e controle de gama. Em condições normais, ela opera em modo de controle de tensão, na tentativa de igualar a tensão DC na retificadora a 1 p.u., variando, para isso, o ângulo gama acima do valor considerado como mínimo.

Durante a perturbação, a tensão DC cai e o ângulo de extinção atinge seu valor mínimo, o que representa uma condição de maior susceptibilidade à ocorrência de falhas de comutação. Nesta condição, a inversora perde a capacidade de controle de tensão e passa a controlar gama, impedindo que ele reduza a valores abaixo do mínimo.

A Figura 11-15 mostra que no caso original, a inversora opera por 35,8 segundos em modo de controle de gama, condição de maior exposição a ocorrência de falhas de comutação, enquanto no caso com

compensação síncrona, ela permanece nesse modo de operação por apenas 11.15 segundos, operando na maior parte do tempo no modo de controle de tensão, mais seguro no sentido de apresentar menor risco de ocorrência de falhas de comutação.

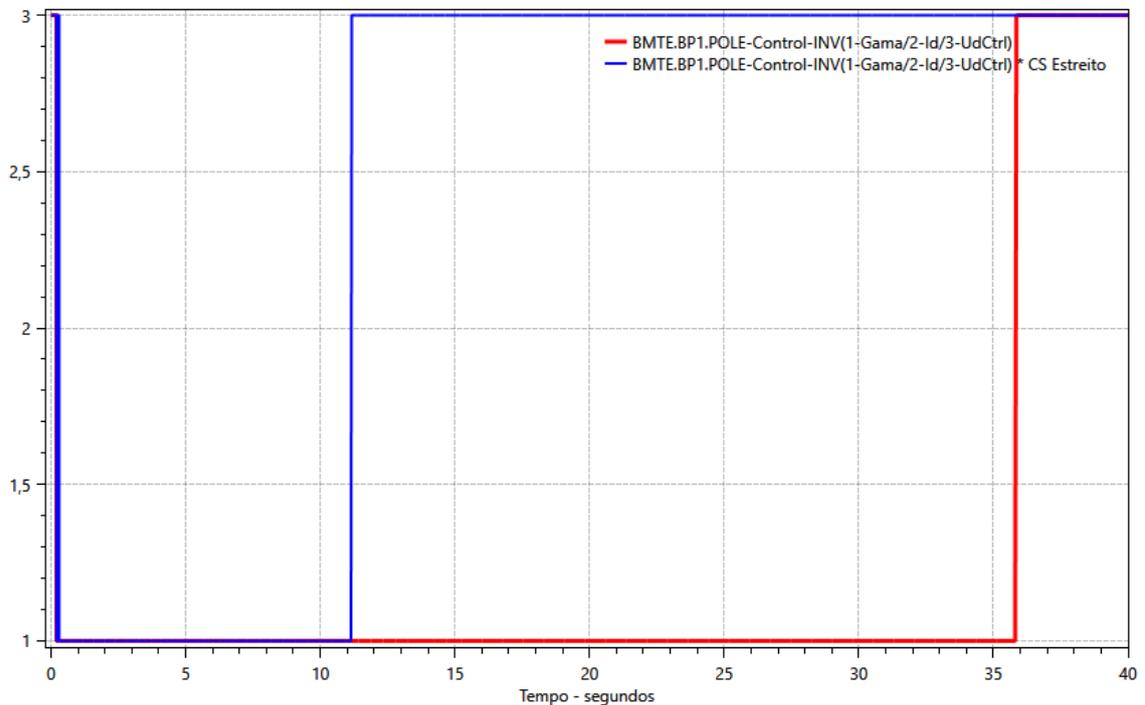


Figura 11-14-Controle da Conversora Estreito após bloqueio do bipolo Xingu - Terminal Rio. (Cenário 2 - ano 2024)

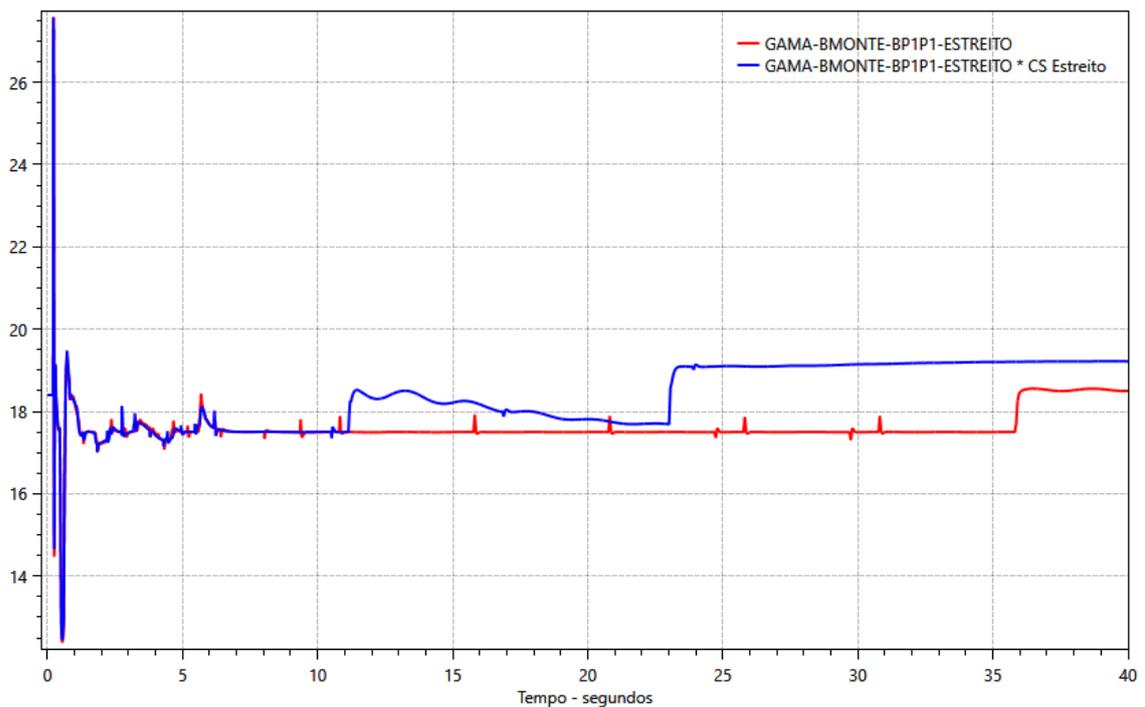


Figura 11-15-Ângulo de Extinção da conversora Estreito após bloqueio do bipolo Xingu - Terminal Rio. (Cenário 2 - ano 2024)

11.9 Menor frequência de comutação de tapes

No cenário Sudeste Máximo Importador, quando ocorre o bloqueio do bipolo Xingu-Terminal Rio e, na sequência, a sobrecarga do bipolo Xingu-Estreito, a tensão da conversora de Estreito sofre uma redução e os tapes dos transformadores comutam sua posição num intervalo de 5 em 5 segundos após a perturbação, na tentativa de controlar a tensão CA na subestação Estreito.

Observa-se, na Figura 11-16, que na simulação em que há compensadores síncronos em Estreito houve apenas três comutações de tape nos transformadores da conversora, ao passo que no caso sem compensadores síncronos houve seis comutações, isto é, o dobro de operações do equipamento.

O menor número de comutação de tapes na subestação de Estreito sinaliza o benefício da inserção dos compensadores síncronos no que concerne ao controle mais rápido da tensão CA, bem como na maior flexibilidade operativa em cenários críticos, uma vez que fica explícita a disponibilidade de maior margem nos recursos de controle de tensão existentes, tais como o próprio chaveamento de tape, que deixa de ser plenamente utilizado, em situações como a da Figura 11-16.

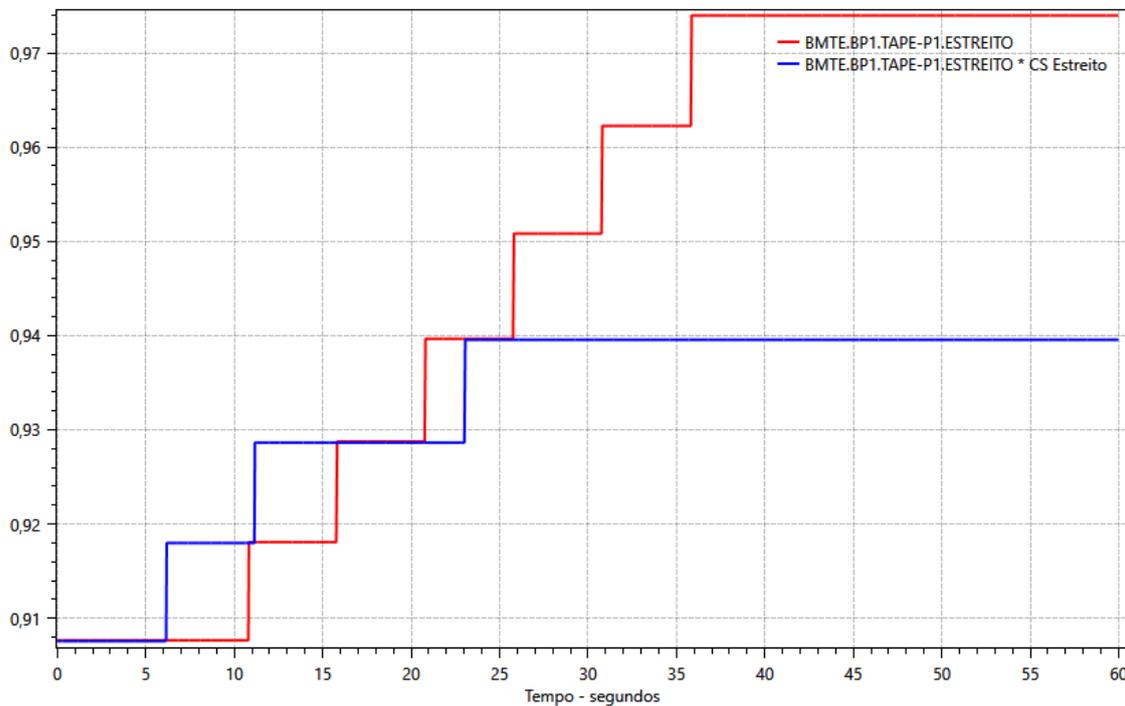


Figura 11-16-Relação de transformação na conversora de Estreito após bloqueio do bipolo Xingu - Terminal Rio. (Cenário 2 - ano 2024)

12 ANÁLISE DO DESEMPENHO DO SISTEMA EM AMBIENTE PSCAD

Para a avaliação de reforços alocados na vizinhança de elos CCAT é desejável a realização de análises em programas de transitórios eletromagnéticos (EMT), como o PSCAD, em complemento às tradicionais análises de transitórios eletromecânicos, que foram detalhadas nas seções anteriores.

A importância das simulações em PSCAD, no contexto da avaliação do desempenho de elos CC, reside no fato de que é necessária a representação e observação de fenômenos que ocorrem em escala de tempo inferior aos milissegundos. Além disso, para a representação completa e fidedigna do processo de conversão CA/CC é necessária a representação trifásica da rede, para fins de avaliação da influência de desequilíbrios entre fases na rede CA sobre a sequência de condução e bloqueio das válvulas da ponte conversora, permitindo, por exemplo, a identificação precisa da ocorrência de falhas de comutação.

A representação do sistema elétrico em ambiente EMT deve ser simplificada, para redução do tempo de execução das análises, o que exige a confecção de equivalentes de rede, que contemplem apenas a região mais próxima e/ou de maior influência sobre a região de análise. Esses equivalentes de rede são desenvolvidos considerando-se uma condição de despacho de geração e carga representativa de um cenário crítico, para que nele sejam avaliados os impactos da ocorrência de eventos de elevada severidade.

Em função da elevada complexidade para elaboração e validação desses equivalentes, foi adotado, por simplificação, nas análises dessa Nota Técnica, o mesmo equivalente de rede utilizado na etapa de concepção do bipolo Xingu – Terminal Rio, mais especificamente na etapa do detalhamento da alternativa de referência, relatório R2 [9].

12.1 Caso de trabalho e Premissas

O cenário base utilizado para as simulações foi o denominado "2L", no âmbito do estudo R2, representativo do cenário Sudeste importador na carga leve.

Cabe ressaltar que, nesse arquivo, a modelagem dos elos CC era genérica, dado que em se tratando da etapa de concepção, o fabricante e a tecnologia que seria empregada nesse bipolo ainda eram desconhecidas.

Foram adicionados ao arquivo base, alguns compensadores síncronos planejados após a realização do R2, tais como os da SE Araraquara 2 e os da SE Terminal Rio.

Nos casos em que se avaliou a presença de compensadores síncronos na SE Estreito, estes foram modelados, por simplificação, como fonte de tensão atrás de uma impedância. Cabe ressaltar que, uma representação mais detalhada, incluindo modelagem para a máquina síncrona e seus controles, bem como a representação do seu transformador elevador, poderia capturar melhor a influência de desequilíbrios de tensão entre fases e de elementos não lineares sobre os fenômenos observados.

Para a simulação de eventos, considerou-se a aplicação de curto-circuito em 100ms de simulação e extinção do curto e aberturas de linhas de transmissão em 200ms de simulação, quando aplicável. Os tempos de recuperação de potência foram medidos entre o instante de extinção da falta na rede CA até o momento em que os elos voltam a transmitir 90% da potência pré-falta, sem redução posterior.

12.2 Cenários Simulados

Com a finalidade de avaliar os benefícios da inserção de um novo compensador síncrono em Estreito, foram avaliados dois cenários:

1. Cenário A - Arquivo PSCAD contendo a representação de compensadores síncronos nas subestações Ibiúna, Araraquara e Terminal Rio;
2. Cenário B – Variação do cenário A, com a inserção do compensador síncrono na SE Estreito.

12.3 Medições de interesse e sinais monitorados durante as simulações

Para a avaliação comparativa de desempenho dos elos CC, antes e após a inclusão da compensação síncrona na SE Estreito, foi monitorada a ocorrência de falhas de comutação, e demonstrado seu efeito por meio da medição do tempo de interrupção total da potência transmitida (tempo em que a potência no terminal inversor é nula).

Outro importante parâmetro medido e avaliado na comparação de desempenho foi o tempo de recuperação de potência pelos bipolos, após a ocorrência de eventuais falhas de comutação. Esta medição indica, a partir da eliminação do curto-circuito na rede CA, quanto tempo o bipolo demanda para restabelecer 90% da potência originalmente transmitida antes da falta.

12.4 Eventos simulados no PSCAD e Comparação dos Índices de Desempenho

Foram avaliados os seguintes eventos, no PSCAD, em ambos os cenários simulados:

1. Curto-circuito monofásico na SE Estreito 500 kV;
2. Curto-circuito monofásico na SE Araraquara 500 kV;

3. Curto-circuito monofásico na SE Terminal Rio 500 kV;
4. Curto-circuito monofásico na SE Ibiúna 345 kV;

Os eventos listados acima envolvem subestações nas quais se conectam conversoras e, portanto, representam os pontos potencialmente mais sensíveis para o desempenho do sistema, visto que a ocorrência de falta, nestes pontos da rede CA, influencia diretamente o desempenho da conversora mais próxima e também pode causar impactos ao desempenho de conversoras remotas.

Na Tabela 12-1 e na Tabela 12-2 são apresentados os tempos de interrupção de potência e de recuperação de potência medidos nas simulações, para cada evento simulado. Para cada curto-circuito monofásico, indicado na primeira coluna, são apresentados, nas demais colunas, os tempos observados para o cenário com compensadores síncronos na SE Estreito e sem estes compensadores síncronos, bem como sua variação percentual.

A partir dos resultados apresentados, conclui-se que a implantação dos compensadores síncronos na subestação de Estreito reduz tanto o tempo de recuperação de potência dos bipolos, como o tempo total de interrupção de potência nestes equipamentos. Estes resultados indicam aumento de segurança para Sistema Interligado Nacional, pois otimizam o desempenho de grandes e importantes troncos de transmissão em corrente contínua.

É importante ressaltar que para a simulação de curto-circuito na SE Estreito, o tempo de interrupção de potência foi ligeiramente superior na presença dos compensadores síncronos recomendados, entretanto, a redução do tempo de recuperação da potência do bipolo Xingu-Estreito foi relevante, confirmando o benefício que esses equipamentos proporcionam às conversoras.

Assim, conclui-se, com o auxílio de uma modelagem mais detalhada por meio do programa PSCAD, que a inserção dos compensadores síncronos em Estreito resulta em melhora do tempo de recuperação e de interrupção de potência do bipolo Xingu – Estreito, e em ganhos marginais na operação dos demais elos.

Tabela 12-1 – Tempo de duração total da Interrupção de potência (ms)

| CURTO MONOFÁSICO | Inversora em que o tempo total de interrupção de potência está sendo medido | | | | | | | | | | | |
|---------------------|---|--------------|--------|--------------|--------------|-------|--------------|--------------|--------|--------------|--------------|-------|
| | Estreito | | | Terminal Rio | | | Araraquara | | | Ibiúna | | |
| | Sem Síncrono | Com Síncrono | Δ(%) | Sem Síncrono | Com Síncrono | Δ(%) | Sem Síncrono | Com Síncrono | Δ(%) | Sem Síncrono | Com Síncrono | Δ(%) |
| ESTREITO 500 KV | 106 | 110 | 3.8% | 52 | 52 | 0.0% | 44 | 44 | 0.0% | 21 | 21 | 0.0% |
| ARARAQUARA 2 500 KV | 52 | 51 | -1.9% | 52 | 52 | 0.0% | 97 | 97 | 0.0% | 21 | 21 | 0.0% |
| TERMINAL RIO 500 KV | 52 | 38 | -26.9% | 107 | 101 | -5.6% | 34 | 26 | -23.5% | 23 | 22 | -4.3% |
| IBIÚNA 345 KV | 41 | 35 | -14.6% | 54 | 54 | 0.0% | 45 | 45 | 0.0% | 83 | 76 | -8.4% |

Tabela 12-2 - Tempos de Recuperação de Potência (ms)

| CURTO MONOFÁSICO | Inversora em que o tempo de recuperação de potência está sendo medido | | | | | | | | | | | |
|---------------------|---|--------------|--------|--------------|--------------|-------|--------------|--------------|-------|--------------|--------------|-------|
| | Estreito | | | Terminal Rio | | | Araraquara | | | Ibiúna | | |
| | Sem Síncrono | Com Síncrono | Δ(%) | Sem Síncrono | Com Síncrono | Δ(%) | Sem Síncrono | Com Síncrono | Δ(%) | Sem Síncrono | Com Síncrono | Δ(%) |
| ESTREITO 500 KV | 163 | 127 | -22.1% | 139 | 138 | -0.7% | 161 | 161 | 0.0% | 147 | 144 | -2.0% |
| ARARAQUARA 2 500 KV | 107 | 107 | 0.0% | 154 | 152 | -1.3% | 263 | 240 | -8.7% | 105 | 105 | 0.0% |
| TERMINAL RIO 500 KV | 121 | 110 | -9.1% | 161 | 154 | -4.3% | 164 | 166 | 1.2% | 151 | 159 | 5.3% |
| IBIÚNA 345 KV | 115 | 112 | -2.6% | 138 | 130 | -5.8% | 151 | 151 | 0.0% | 103 | 104 | 1.0% |

13 ANÁLISE DE CURTO-CIRCUITO

Foi realizada a análise de curto-circuito em subestações representativas do sistema elétrico na vizinhança da SE 500kV Estreito, utilizando como referência os casos de curto-circuito máximo da base de dados do PDE2029, sobre os quais foram aplicadas atualizações quanto a topologia da rede [4].

A Tabela 13-1 e a Tabela 13-2 apresentam os níveis de curto-circuito, nos anos 2024 e 2029, respectivamente, considerando o sistema elétrico atual e o sistema após a implantação dos compensadores síncronos. É apresentada, também, a evolução percentual do nível de curto-circuito, após a implantação destes equipamentos.

Tabela 13-1 - Níveis de Curto-circuito verificados no ano 2024

| SUBESTAÇÃO | Sem compensação síncrona | | | Com compensação síncrona | | | Variação Percentual | | |
|-------------------|--------------------------|--------|---------|--------------------------|--------|---------|---------------------|-------|--------|
| | 3F(kA) | FT(kA) | 2FT(kA) | 3F(kA) | FT(kA) | 2FT(kA) | 3F(%) | FT(%) | 2FT(%) |
| Estreito 500kV | 30.78 | 30.53 | 30.99 | 35.02 | 37.17 | 36.45 | 13.76 | 21.78 | 17.62 |
| Estreito 345kV | 36.04 | 33.49 | 35.36 | 37.57 | 35.69 | 37.04 | 4.23 | 6.57 | 4.77 |
| Jaguara 500kV | 26.31 | 22.81 | 25.39 | 27.27 | 23.56 | 26.4 | 3.67 | 3.28 | 3.96 |
| N. Ponte 500kV | 26.06 | 21.13 | 24.78 | 26.44 | 21.32 | 25.12 | 1.47 | 0.89 | 1.36 |
| R. Preto 500kV | 18.48 | 11.75 | 16.98 | 18.72 | 11.84 | 17.2 | 1.31 | 0.78 | 1.28 |
| Fernão Dias 500kV | 28.91 | 22.84 | 27.35 | 29.2 | 22.96 | 27.59 | 0.97 | 0.51 | 0.89 |
| C. Paulista 500kV | 32.66 | 24.02 | 30.58 | 32.93 | 24.14 | 30.83 | 0.81 | 0.46 | 0.81 |

Tabela 13-2 - Níveis de Curto-circuito verificados no ano 2029

| SUBESTAÇÃO | Sem compensação síncrona | | | Com compensação síncrona | | | Variação Percentual | | |
|-------------------|--------------------------|--------|---------|--------------------------|--------|---------|---------------------|-------|--------|
| | 3F(kA) | FT(kA) | 2FT(kA) | 3F(kA) | FT(kA) | 2FT(kA) | 3F(%) | FT(%) | 2FT(%) |
| Estreito 500kV | 31.01 | 30.66 | 31.17 | 34.79 | 37 | 36.24 | 12.19 | 20.67 | 16.25 |
| Estreito 345kV | 36.2 | 33.53 | 35.52 | 37.56 | 35.66 | 37.07 | 3.77 | 6.33 | 4.38 |
| Jaguara 500kV | 26.37 | 22.85 | 25.49 | 27.28 | 23.54 | 26.38 | 3.47 | 3.04 | 3.5 |
| N. Ponte 500kV | 26.15 | 21.14 | 24.84 | 26.48 | 21.31 | 25.13 | 1.27 | 0.79 | 1.18 |
| R. Preto 500kV | 18.54 | 11.73 | 17.05 | 18.76 | 11.82 | 17.23 | 1.17 | 0.69 | 1.08 |
| Fernão Dias 500kV | 29.47 | 23.06 | 27.82 | 29.72 | 23.17 | 28.03 | 0.84 | 0.48 | 0.77 |
| C. Paulista 500kV | 34.84 | 24.88 | 32.46 | 35.1 | 24.98 | 32.68 | 0.74 | 0.4 | 0.69 |

A Tabela 13-3 e a Tabela 13-4 apresentam a relação entre a corrente de curto-circuito (I_{cc}) e a capacidade de interrupção de corrente simétrica (I_{cs}) pelos disjuntores das subestações vizinhas à SE Estreito, antes e após a implementação dos compensadores síncronos na SE 500kV Estreito.

Tabela 13-3 – Relação entre corrente de curto-circuito e capacidade de interrupção de corrente simétrica (Icc/Ics) no ano 2024

| SUBESTAÇÃO | Capacidade de interrupção de corrente simétrica (kA) ⁶ | Icc/Ics (%) | | | | | |
|-------------------|---|--------------------------|-----|-----|--------------------------|-----|-----|
| | | Sem compensação síncrona | | | Com compensação síncrona | | |
| | | 3F | FT | 2FT | 3F | FT | 2FT |
| Estreito 500kV | 40 | 77% | 76% | 77% | 88% | 93% | 91% |
| Estreito 345kV | 40 | 90% | 84% | 88% | 94% | 89% | 93% |
| Jaguara 500kV | 38 | 69% | 60% | 67% | 72% | 62% | 69% |
| N. Ponte 500kV | 31.5 | 83% | 67% | 79% | 84% | 68% | 80% |
| R. Preto 500kV | 40 | 46% | 29% | 42% | 47% | 30% | 43% |
| Fernão Dias 500kV | 50 | 58% | 46% | 55% | 58% | 46% | 55% |
| C. Paulista 500kV | 31.5 | 104% | 76% | 97% | 105% | 77% | 98% |

Tabela 13-4 - Relação entre corrente de curto-circuito e capacidade de interrupção de corrente simétrica (Icc/Ics) no ano 2029

| SUBESTAÇÃO | Capacidade de interrupção de corrente simétrica (kA) ⁶ | Icc/Ics (%) | | | | | |
|-------------------|---|--------------------------|-----|------|--------------------------|-----|------|
| | | Sem compensação síncrona | | | Com compensação síncrona | | |
| | | 3F | FT | 2FT | 3F | FT | 2FT |
| Estreito 500kV | 40 | 78% | 77% | 78% | 87% | 93% | 91% |
| Estreito 345kV | 40 | 91% | 84% | 89% | 94% | 89% | 93% |
| Jaguara 500kV | 38 | 69% | 60% | 67% | 72% | 62% | 69% |
| N. Ponte 500kV | 31.5 | 83% | 67% | 79% | 84% | 68% | 80% |
| R. Preto 500kV | 40 | 46% | 29% | 43% | 47% | 30% | 43% |
| Fernão Dias 500kV | 50 | 59% | 46% | 56% | 59% | 46% | 56% |
| C. Paulista 500kV | 31.5 | 111% | 79% | 103% | 111% | 79% | 104% |

Conclui-se que a implantação dos compensadores síncronos não provocou superação da capacidade de interrupção de corrente simétrica na região analisada e que os níveis de curto-circuito foram incrementados de forma mais significativa na SE Estreito, sendo baixo o impacto da entrada em operação desses equipamentos no nível de curto-circuito das subestações vizinhas.

Deve ser observado que, na configuração atual do sistema, já ocorre superação da capacidade de interrupção de corrente simétrica na SE Cachoeira Paulista (Icc/Ics > 100%), para curto-circuito trifásico, desde o ano 2024, sendo a contribuição dos compensadores síncronos, no nível de curto-circuito dessa subestação, inferior a 1% para todo horizonte de análise. A recomendação da substituição dos disjuntores superados nessa subestação foi indicada no Plano de Ampliações e Reforços – PAR 2020-2024, conforme detalhado em [10].

Para fins de acompanhamento e monitoramento, em estudos de expansão futura, deve-se atentar para o estado dos disjuntores da SE Estreito em situação de alerta (90% < Icc/Ics < 100%).

⁶ Foi considerada a capacidade atual de interrupção simétrica do menor disjuntor dos barramentos avaliados[10].

14 REFERÊNCIAS

- [1] CCPE - Comitê Coordenador do Planejamento da Expansão dos Sistemas Elétricos, "Critérios e Procedimentos para o Planejamento da Expansão dos Sistemas de Transmissão - Volume 2," 2002.
- [2] ONS, "Premissas, critérios e metodologia para estudos- Submódulo 2.3," 2020.
- [3] EPE, "Plano Decenal de Expansão de Energia," [Online]. Available: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-pde>. [Acesso em 2020].
- [4] EPE, "Dados para Simulações Elétricas do SIN," 2020. [Online]. Available: <https://www.epe.gov.br/pt/areas-de-atuacao/energia-eletrica/expansao-da-transmissao/dados-para-simulacoes-eletricas-do-sin>.
- [5] ANEEL, "Base de Referência de Preços," 2020.
- [6] ANEEL, "Documentos LEILÃO 005/2016 - Planilhas de estabelecimento de RAP Máxima, NTNB e Debêntures - Lote_06_RAP_Leilão_05_2016_06mar2017.pdf," [Online]. Available: http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes_liferay/editais_transmissao/documentos_editais.cfm?IdProgramaEdital=164.
- [7] State Grid; COPPE UFRJ; POWERCONSULT;, "Webinar: Investigação do Impacto de Elos de CCUAT no SIN e STATCOM para Controle de Tensão e Mitigação de Falha de Comutação.," 17 de novembro de 2020.
- [8] F. C. Jusan, E. d. M. Brandi, I. L. Spinelli e S. Zheng, "Belo Monte HVDC Transmission System – Dynamic Performance Study for ± 800 kV, 4000 MW, Xingu to Estreito Interconnection in PSCAD and RTDS," em *XIV SEPOPE*, Recife, 2018.
- [9] EPE, "EPE-DEE-RE-136/2014 - Expansão da Interligação entre as Regiões Norte/Nordeste e Sudeste/Centro-Oeste," Outubro 2014. [Online]. Available: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-276/topico-349/Relat_EPE-DEE-RE-136-2014-rev0%20\(Bipolo%20800%20kV%20Xingu-TRio\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-276/topico-349/Relat_EPE-DEE-RE-136-2014-rev0%20(Bipolo%20800%20kV%20Xingu-TRio).pdf).
- [10] ONS, "DPL-REL-0358-2020_volume1," dezembro 2020. [Online]. Available: sintegre.ons.org.br/sites/8/32/85.
- [11] ONS, "Validação de dados e de modelos de componentes para estudos," novembro 2020. [Online]. Available: <https://sintegre.ons.org.br/sites/8/93>.
- [12] EPE e MME, "Plano Decenal de Expansão de Energia 2030 (Consulta Pública)," 2021. [Online]. Available: <http://antigo.mme.gov.br/web/guest/servicos/consultas-publicas>.
- [13] ANEEL, "Edital de leilão nº 011/2013- Anexo 6AB – Lote AB - Bipolo HVDC Xingu - Estreito," [Online]. Available: aneel.gov.br/transmissao4.

15 FICHAS PET/PELP

INSTALAÇÕES DE TRANSMISSÃO DE REDE BÁSICA

Sistema Interligado da Região SUDESTE

EMPREENDIMENTO:

SE 500 kV ESTREITO (Ampliação/Adequação)

UF: **MG**

DATA DE NECESSIDADE: **JAN/2024**

PRAZO DE EXECUÇÃO: **48 MESES**

JUSTIFICATIVA:

MELHORA DO DESEMPENHO DINÂMICA DA MALHA ELÉTRICA DE SÃO PAULO

Obras e Investimentos Previstos: (R\$ x 1.000)

| | |
|---|------------|
| Compensador Síncrono -180/300 Mvar | 444.658,56 |
| 3 CC (Conexão de Compensador) 500 kV, Arranjo DJM | 29.195,61 |
| 1 IB (Interligação de Barras) 500 kV, Arranjo DJM | 8.767,17 |
| MIG-A | 2.427,97 |
| MIM - 500 kV | 2.950,95 |

TOTAL DE INVESTIMENTOS PREVISTOS:

488.000,26

SITUAÇÃO ATUAL:

OBSERVAÇÕES:

APERFEIÇOAMENTO DO DESEMPENHO DINÂMICO DA MALHA ELÉTRICA DE SÃO PAULO

DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA:

[1] CUSTOS MODULARES DA ANEEL – JUNHO DE 2020.

16 ANEXO 1 – CONSULTAS DE VIABILIDADE DE EXPANSÃO

16.1 SE Estreito – MG LTT – Linhas de Transmissão Triângulo S.A.



Empresa de Pesquisa Energética

Ofício n. 0638/2020/DEE/EPE

48002.002324/2020-41

Rio de Janeiro, 11 de novembro de 2020.

Ao Senhor
JOSÉ MAURÍCIO SCOVINO DE SOUZA
Diretor Técnico
LTT – LT Triângulo S.A.
Avenida Marechal Câmara, 160 Sala: 1623
20020-907 – Rio de Janeiro – RJ

Assunto: Consulta sobre a viabilidade de expansão da subestação Estreito

Senhor Diretor,

1. A EPE está desenvolvendo estudos de expansão da transmissão de energia elétrica com o intuito de propor reforços para melhoria do desempenho dinâmico do sistema de São Paulo. Visando a confirmação da viabilidade das alternativas estudadas, encaminhamos formulário anexo que trata da viabilidade de expansão da subestação Estreito.
2. O formulário solicita um levantamento de informações pelas áreas de Engenharia e Projetos quanto à viabilidade da implantação das obras a serem recomendadas neste estudo. Estas informações servirão de base documental e consultiva para o estudo de forma a dar solidez na recomendação e mitigação de eventuais problemas futuros.
3. Ressaltamos, contudo, que as expansões vislumbradas nas subestações desta concessionária de transmissão, objeto dessa consulta de viabilidade, devem ser tratadas como expansões possíveis, mas não mandatórias nesse momento. Assim sendo, podem ser efetivamente recomendadas no estudo ou não, a depender do desempenho final e do mínimo custo global das alternativas.
4. É importante mencionar que os dados informados por V.Sa. serão levados ao conhecimento do MME e da ANEEL com o objetivo de tornar o processo da expansão da transmissão mais célere, consistente e transparente em todas as suas etapas.

*Praça Pio X, n. 54, 5º andar – Centro
CEP 20091-040 – Rio de Janeiro – RJ
Telefone: (21) 3512-3100*



Ofício n. 0638/2020/DEE/EPE

5. Por fim, solicitamos que as informações requisitadas sejam encaminhadas à EPE em um prazo máximo de 30 dias, contados a partir da data de envio deste ofício, de forma a não comprometer o andamento das atividades subsequentes previstas para o estudo citado.

Atenciosamente,

JOSE MARCOS
BRESSANE:609632558
00

Assinado de forma digital por JOSE
MARCOS BRESSANE:60963255800
Dados: 2020.11.11 15:51:40 -03'00'

JOSÉ MARCOS BRESSANE
Superintendente de Transmissão de Energia
Empresa de Pesquisa Energética

Rua do Passeio nº 38, Setor 2,
Sala 1201 | Centro
Rio de Janeiro/RJ | 20.021-290

T. 21 3961.9400



Rio de Janeiro, 11 de dezembro de 2020
LTT 029/2020

Ao Sr. **José Marcos Bressane** – Superintendente de Transmissão de Energia

Empresa de Pesquisa Energética – EPE

Praça Pio X, nº 54, 5º andar – Centro – CEP: 20091-040 – Rio de Janeiro - RJ

Assunto: Ofício nº 0638/2020/DEE/EPE – Consulta sobre viabilidade de expansão da Subestação Estreito

Prezado Sr. Superintendente,

Em resposta ao Ofício nº 0638, que trata da viabilidade de expansão da subestação Estreito, da LT Triângulo S.A (LTT), encaminhamos o Formulário de Consulta sobre a Viabilidade de Expansão de Subestações preenchido, conforme solução proposta no documento em questão.

Aproveitamos para informar a alteração do endereço da Linha de Transmissão Triângulo e demais concessões do grupo Celeo para o endereço Rua do Passeio nº 38, Setor 2, Sala 1201 – Centro – Rio de Janeiro/RJ.

Nesta oportunidade manifestamos nossos votos de elevada estima e apreço e nos colocamos à disposição para prestar qualquer esclarecimento que se faça necessário.



Assinado de forma
digital por JOSE
MAURICIO SCOVINO DE
SOUZA:01068302798
Dados: 2020.12.11
11:15:30 -03'00'

LT Triângulo S.A.
Jose Maurício Scovino de Souza
Diretor de Operações

| | | |
|---|--|------------------|
|  | Formulário de Consulta sobre a Viabilidade de Expansão de Subestações | Data: 11/11/2020 |
| | | Revisão: 0 |

INFORMAÇÕES SOLICITADAS (PREENCHIDAS PELA EPE)

ESTUDO: Desempenho Dinâmico do Sistema de SP no Horizonte de Médio/Longo Prazo

ALTERNATIVA DE PLANEJAMENTO

Subestação: Estreito Concessionária Proprietária: LTT LT Triângulo S.A.

1. Módulos de Manobra

- EL Quantidade: 1 Tensão (kV): 500 Arranjo: DJM
- CRL fixo Quantidade: 1 Tensão (kV): 500 Arranjo: DJM
- CC Quantidade: 3 Tensão Prim/Sec/Ter (kV) 500/13.8/13.8kV Arranjo DJM
- IB Quantidade: 1 Tensão (kV): 500 Arranjo: DJM

2. Módulo de Equipamento

- Compensador Síncrono Quantidade: 3 Tensão Prim (kV) 13.8kV Potência nominal= -180/300 Mvar

3. Diagrama Unifilar

O diagrama unifilar simplificado da alternativa proposta encontra-se em figura anexa.

Legenda: MM: entrada de linha (EL), conexão de transformador ou autotransformador (CT), interligação de barramentos (IB), conexão de banco de capacitores paralelo (CCP) ou série (CCS), conexão de reatores de linha (CRL) ou de barra (CRB), conexão de transformador de aterramento (CTA), conexão de compensador síncrono (CC). ARRANJO: Barra Simples (BS), Barra Principal e Transferência (BPT), Barra Dupla 4 Chaves (BD4), ANEL (AN), Disjuntor e Meio (DJM).

| | | |
|---|--|------------------|
|  Empresa de Pesquisa Energética | Formulário de Consulta sobre a Viabilidade de Expansão de Subestações | Data: 11/11/2020 |
| | | Revisão: 0 |

INFORMAÇÕES ADICIONAIS

5. Observações da EPE

Segundo Diagrama, existe espaço suficiente para a entrada das expansões propostas.

A consulta consiste em 3 novos compensadores síncronos -180/300 Mvar conectados ao setor de 500 kV da SE Estreito e uma nova entrada de linha.

6. Observações do Proprietário

Haverá necessidade de realização de terraplanagem, drenagem, relocação da cerca do terreno, construção de dutos e canaletas, ampliação de de malha de terra e outras obras civis necessárias. Deve-se considerar que o terreno na região da ampliação proposta possui desníveis, tendo o pátio existente três platôs. Pode haver necessidade de relocação de uma rede de 13,8kV existente da distribuidora local.

11 de novembro de 2020

Data da Solicitação

JOSE MARCOS
BRESSANE:60963255800

Assinado de forma digital por JOSE MARCOS BRESSANE:60963255800
Dados: 2020.11.11 15:56:16 -03'00'

José Marcos Bressane
Superintendente de Transmissão de Energia
STE/DEE/EPE

11 de dezembro de 2020

Data da Entrega do Formulário

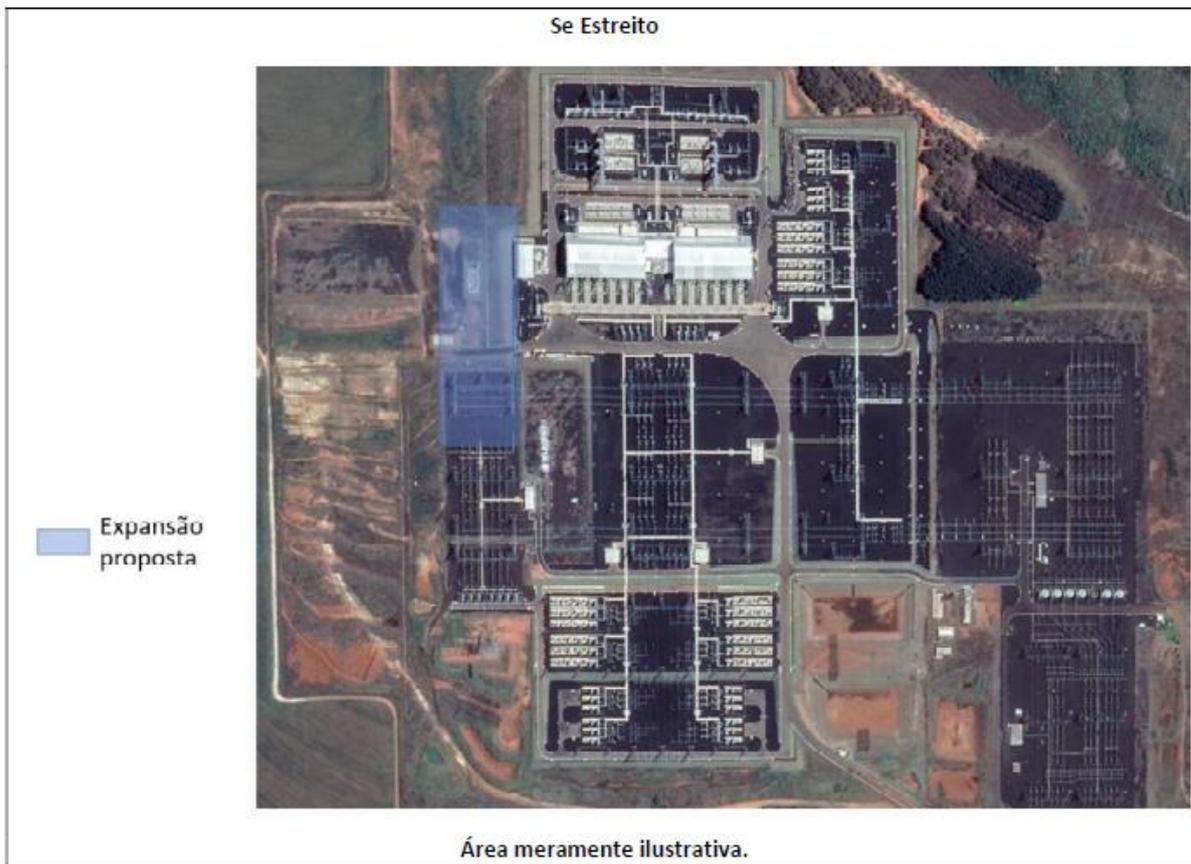


Assinado de forma digital por JOSE MAURICIO SCOVINO DE SOUZA:01068302798
Dados: 2020.12.11 11:00:08 -03'00'

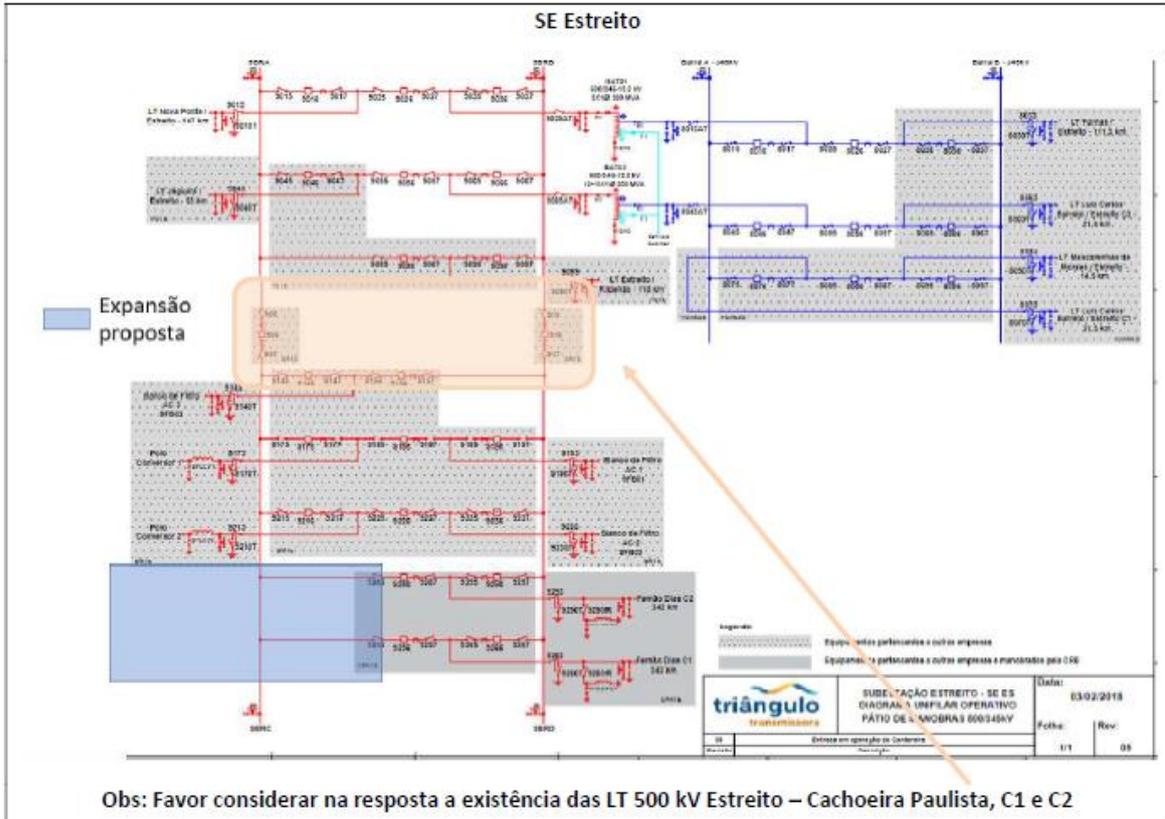
Assinatura do Responsável pelas Informações Solicitadas
Nome: José Maurício Scovino de Souza
Cargo: Diretor de Operações

| | | |
|---------------------------------------|---|-------------------------|
| <p>Empresa de Pesquisa Energética</p> | <p>Formulário de Consulta sobre a Viabilidade de Expansão de Subestações</p> | <p>Data: 11/11/2020</p> |
| | | <p>Revisão: 0</p> |

ANEXO → DIAGRAMA UNIFILAR SIMPLIFICADO DA ALTERNATIVA PROPOSTA



| | | |
|--|---|-------------------------|
| <p>Expresso de Pesquisa Energética</p> | <p>Formulário de Consulta sobre a Viabilidade de Expansão de Subestações</p> | <p>Data: 11/11/2020</p> |
| | | <p>Revisão: 0</p> |



17 ANEXO 2 – PLANO DE OBRAS E ESTIMATIVA DE CUSTOS

| Descrição | Ano | Qtde. | Fator | Custo Unitário (sem fator) | Custo da Alternativa (R\$ x 1000) | | | |
|---|------|-------|-------|----------------------------|-------------------------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| | | | | | Custo Total | VP | Parcela Anual | RN |
| | | | | | 488.000,26 | 488.000,26 | 43.347,81 | 290.867,34 |
| SE 500 kV ESTREITO (Ampliação/Adequação) | | | | | 488.000,26 | 488.000,26 | 43.347,81 | 290.867,34 |
| Compensador Síncrono -180/300 Mvar | 2024 | 3,0 | 1,0 | 148219,52 | 444.658,56 | 444.658,56 | 39.497,88 | 265.033,98 |
| CC (Conexão de Compensador) 500 kV, Arranjo DJM | 2024 | 3,0 | 1,0 | 9731,87 | 29.195,61 | 29.195,61 | 2.593,37 | 17.401,73 |
| IB (Interligação de Barras) 500 kV, Arranjo DJM | 2024 | 1,0 | 1,0 | 8767,17 | 8.767,17 | 8.767,17 | 778,77 | 5.225,58 |
| MIG-A | 2024 | 1,0 | 1,0 | 2427,97 | 2.427,97 | 2.427,97 | 215,67 | 1.447,17 |
| MIM - 500 kV | 2024 | 1,0 | 1,0 | 2950,95 | 2.950,95 | 2.950,95 | 262,13 | 1.758,88 |