



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS REITOR JOÃO DAVID FERREIRA LIMA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Henrique Pederneiras dos Guaranys

**SISTEMAS CCAT EM CONFIGURAÇÃO MULTI-INFEED: OPERAÇÃO EM REGIME
NORMAL E DURANTE FALHAS DE COMUTAÇÃO**

Florianópolis
2021

Henrique Pederneiras dos Guarany's

**SISTEMAS CCAT EM CONFIGURAÇÃO MULTI-INFEED: OPERAÇÃO EM REGIME
NORMAL E DURANTE FALHAS DE COMUTAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação submetida ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Antonio Felipe da Cunha de Aquino, Dr.

Coorientador: Prof. Ildemar Cassana Decker, Dr.

Florianópolis
2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Guaranys, Henrique Pederneiras dos

Sistemas CCAT em configuração multi-infeed : Operação em regime normal e durante falhas de comutação / Henrique Pederneiras dos Guaranys ; orientador, Antonio Felipe da Cunha de Aquino, coorientador, Ildemar Cassana Decker, 2021.

72 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2021.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Sistemas elétricos de potência. 3. Eletrônica de potência. 4. Sistemas de transmissão em corrente contínua. 5. Falhas de comutação .
I. de Aquino, Antonio Felipe da Cunha. II. Decker, Ildemar Cassana. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

Henrique Pederneiras dos Guarany's

SISTEMAS CCAT EM CONFIGURAÇÃO MULTI-INFEED: OPERAÇÃO EM REGIME NORMAL E DURANTE FALHAS DE COMUTAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Banca Examinadora como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Florianópolis, 10 de março de 2021.



Documento assinado digitalmente

Jean Viane Leite

Data: 15/03/2021 16:23:29-0300

CPF: 003.474.909-80

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Jean Viane Leite, Dr.
Coordenador do Curso de Graduação em
Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente

Antonio Felipe da Cunha de Aquino

Data: 15/03/2021 09:45:46-0300

CPF: 044.652.117-59

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Antonio Felipe da Cunha de Aquino, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina
Orientador

ILDEMAR CASSANA

DECKER:20024720097

Assinado de forma digital por ILDEMAR

CASSANA DECKER:20024720097

Dados: 2021.03.11 13:49:56 -03'00'

Prof. Ildemar Cassana Decker, Dr.
Coorientador

Eng. Fabrício Andrade Mourinho, M. Sc.
Operador Nacional do Sistema Elétrico

Prof. Diego Issicaba, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente

Diego Issicaba

Data: 12/03/2021 10:57:09-0300

CPF: 045.633.719-98

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Este trabalho é dedicado aos meus pais, amigos e familiares próximos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Antonio Felipe da Cunha de Aquino pela orientação durante a elaboração desse trabalho e pelos ensinamentos relacionados ao tema escolhido tão claramente ministrados pelo professor, que o senhor possa inspirar a próxima geração de alunos de engenharia elétrica da UFSC com os exímios conhecimentos e didáticas no que se refere à sistemas de potência. Ao professor Ildemar Cassana Decker, agradeço pela oportunidade de fazer parte da equipe do LabPlan e pela confiança depositada em mim durante meu vínculo com os projetos de ponta chefiados pelo professor. Seu trabalho árduo e seriedade contribuem para o crescimento científico do Brasil assim como contribuíram para a minha formação como profissional. Agradeço ao Fabricio Mourinho pela orientação sobre as simulações de falha de comutação e ao professor Diego Issicaba pela presença na banca e pelas sugestões para o trabalho. Agradeço aos meus amigos que ajudaram a tornar a graduação suportável e pelos momentos de descontração. Por último, mas não menos importante, agradeço aos meus pais e aos familiares que contribuíram direta ou indiretamente com o meu crescimento como ser humano.

*“Forças elétricas e magnéticas.
Que elas vivam para sempre e
nunca sejam esquecidas.”
(HEAVISIDE, 1912)*

RESUMO

Apresentam-se nesse trabalho duas partes: teoria e simulação. Na primeira delas, o objetivo é explicar o funcionamento teórico dos elementos associados aos sistemas de transmissão CCAT (corrente contínua em alta tensão), com destaque para o processo de comutação nas pontes conversoras, fazer a caracterização de um sistema em configuração *Multi-Infeed* e definir os principais indicadores de avaliação do desempenho de sistemas operando em configuração *Multi-Infeed*. Ainda nessa parte, trata-se de alguns fenômenos de interação entre os elos CCAT e suas causas, dos quais um dos mais importantes é a falha de comutação em conversores tipo LCC. A parte de simulação trata do impacto sistêmico de falhas de comutação sequenciais e simultâneas em sistemas em configuração *Multi-Infeed*, cujo objetivo será interpretar o impacto das falhas na resposta dinâmica do sistema em múltiplos pontos de operação. O objetivo geral é revelar o impacto do uso de sistemas CCAT integrados a redes CA e ressaltar a necessidade de estudos para uma operação confiável, sobretudo no que se refere a falhas de comutação.

Palavras-chave: *Multi-Infeed*. Transmissão CCAT. Elos CCAT. Falha de comutação. Ponte conversora de 6 pulsos a tiristor.

ABSTRACT

The work has two parts: theory and simulation. In the first one, the objective is to explain the theoretical functioning of the elements associated with the HVDC (high-voltage direct current) transmission systems, with emphasis on the commutation process in the wave converter bridges, to characterize a system in Multi-Infeed configuration and define the main performance evaluation indicators of systems operating in Multi-Infeed configuration. Furthermore, the document presents some interaction phenomena between the HVDC links and their causes, of which one of the most important is the commutation failure at LCC converters. The simulation part brings the systemic impact of sequential and simultaneous commutation failures in systems in Multi-Infeed configuration, whose objective is to interpret the impact of failures in the dynamic response of the system at multiple points of operation. The general objective is to reveal the impact of HVDC systems integrated to AC networks and to highlight the need for studies for reliable operation, especially with regard to commutation failures.

Keywords: Multi-Infeed. HVDC transmission. HVDC links. Commutation failure. Six pulse controlled converter bridge.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distância de <i>Break even</i> - CC x CA	16
Figura 2 – Esquemático 1 de um sistema de transmissão CCAT	17
Figura 3 – Circuito simples a tiristor.	18
Figura 4 – Ponte conversora de 6 pulsos a tiristor	19
Figura 5 – Ponte conversora de 12 pulsos a tiristor	19
Figura 6 – Ponte conversora de 6 pulsos a diodo	21
Figura 7 – Conversor (a diodos vs. tiristores): processo de comutação com in- dutância da fonte nula	22
Figura 8 – Conversor (diodo vs tiristor): tensões CC médias	23
Figura 9 – Processo de comutação em um conversor de 6 pulsos com indutân- cias não nulas na fonte	25
Figura 10 – Esquemático 2 de um sistema de transmissão CCAT	26
Figura 11 – Circuito Equivalente de um Sistema CCAT	28
Figura 12 – Controles de Um Único Conversor Controlado	31
Figura 13 – Representação Simplificada de Um Elo CCAT	32
Figura 14 – Fluxograma de Confecção dos Casos	41
Figura 15 – Mapa do SIN com Intercâmbios Regionais	43
Figura 16 – Injeção CC Total [MW]	56
Figura 17 – Variação na Injeção CC Total [MW]	56
Figura 18 – Injeção CC Total - Caso 1 - Detalhe [MW]	57
Figura 19 – Frequência em Ibiúna	58
Figura 20 – Frequência em Araraquara 2	58
Figura 21 – Frequência em Terminal Rio	59
Figura 22 – Frequência em Estreito	60
Figura 23 – Variação do Ângulo de Carga em Itaipu 60 Hz	61
Figura 24 – Variação do Ângulo de Carga em Emborcação	61
Figura 25 – Tensão em Ibiúna	63
Figura 26 – Tensão em Araraquara 2	63
Figura 27 – Tensão em Terminal Rio	64
Figura 28 – Tensão em Estreito	64
Figura 29 – Frequência em Foz Do Iguaçu (Paraguai)	66
Figura 30 – Frequência na Conversora Porto Velho	66
Figura 31 – Frequência em Xingu	67
Figura 32 – Geração em Itaipu 50 Hz	67
Figura 33 – Geração em Belo Monte	68
Figura 34 – Variação do Ângulo de Carga em Belo Monte	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação do Potencial de Interação	39
Tabela 2 – Injeção CC, Geração e Intercâmbios Regionais	42
Tabela 3 – Máquinas Despachadas - Usinas Selecionadas do SIN	45
Tabela 4 – Tensões nas Subestações Terminais dos Bipolos	45
Tabela 5 – Fator de Interação <i>Multi-Infeed</i>	47
Tabela 6 – Fator de Interação <i>Multi-Infeed</i> - Comparação Percentual	48
Tabela 7 – Potencial de Interação	49
Tabela 8 – <i>Multi-Infeed</i> - Outros Indicadores Calculados	50
Tabela 9 – DIF e TVZ - Perda Dupla da LT 500 kV Ibiúna - Bateias	52
Tabela 10 – Bipolos em Falha de Comutação por Intervalo de Tempo Durante Falha da LT	52
Tabela 11 – Injeção CC na Rede CA	53
Tabela 12 – Elementos Selecionados	55

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS E MOTIVAÇÕES	13
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	14
2	TRANSMISSÃO EM CORRENTE CONTÍNUA	15
2.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	15
2.2	ELEMENTOS INTEGRANTES DE UM SISTEMA DE TRANSMISSÃO CCAT	16
2.2.1	Pontes Conversoras	17
2.2.1.1	Processo de Comutação	20
2.2.1.1.1	<i>Processo de Comutação com Indutâncias de Fonte Nulas</i>	20
2.2.1.1.2	<i>Efeito da Indutância da Fonte no Processo de Comutação</i>	23
2.2.2	Outros Elementos	26
2.2.2.1	Linha de Transmissão	26
2.2.2.2	Transformador conversor	27
2.2.2.3	Disjuntores CA	27
2.2.2.4	Reatores de alisamento	27
2.2.2.5	Eletrodos	27
2.2.2.6	Filtros Harmônicos	27
2.2.2.7	Fontes de Potência Reativa	27
2.3	CIRCUITO EQUIVALENTE DE UM SISTEMA CCAT	28
2.4	ESQUEMAS DE CONTROLE	30
2.4.1	Controles de Um Conversor CA/CC	30
2.4.2	Controles Básicos de Corrente e Tensão de Um Elo CCAT	31
2.4.3	Esquemas de Controle nas Estações CCAT	32
2.4.3.1	Esquemas de Controle para Retificadores	32
2.4.3.2	Esquemas de Controle para Inversores	32
3	SISTEMA ELÉTRICO EM CONFIGURAÇÃO <i>MULTI-INFEED</i>	33
3.1	INTERAÇÃO ENTRE OS ELOS CCAT: PRINCIPAIS FENÔMENOS DE INTERAÇÃO	33
3.1.1	Falha de Comutação	33
3.1.1.1	Ângulo de Extinção	34
3.1.1.2	Cálculo dos Ângulos de Comutação e de Extinção	35
3.1.2	Sobretensões Transitórias	35
3.1.3	Interações Harmônicas	36
3.1.4	Instabilidade de Tensão	36
3.2	ÍNDICES DE AVALIAÇÃO <i>MULTI-INFEED</i>	36
3.2.1	Potência no Elo CCAT	36

3.2.2	Nível de Curto-Circuito	36
3.2.3	Relação de Curto-Circuito	37
3.2.4	Relação de Curto-Circuito Efetiva	37
3.2.5	Fator de Interação <i>Multi-Infeed</i>	38
3.2.6	Relação de Curto-Circuito Interativa de <i>Multi-Infeed</i> e Relação de Curto-Circuito Efetiva Interativa de <i>Multi-Infeed</i>	38
3.2.7	Potencial de Interação	39
4	EFEITOS DE FALHAS DE COMUTAÇÃO NO DESEMPENHO DINÂMICO DE SISTEMAS ELÉTRICOS EM CONFIGURAÇÃO <i>MULTI-INFEED</i>	40
4.1	CASOS PARA SIMULAÇÃO - ANAREDE	40
4.2	ÍNDICES DE AVALIAÇÃO <i>MULTI-INFEED</i> CALCULADOS	45
4.3	METODOLOGIA PARA SIMULAÇÃO DE FALHAS NO ANATEM	51
4.4	CASO DE ESTUDO: PERDA DUPLA DA LT 500 KV IBIÚNA - BATEIAS C1 E C2	51
4.5	RESULTADOS OBTIDOS	54
4.5.1	Resultados de Injeção CC na Simulação	55
4.5.2	Rede Próxima aos Inversores	57
4.5.2.1	Análise dos Resultados de Frequência e Ângulo de Carga	57
4.5.2.2	Análise dos Resultados de Tensão	62
4.5.3	Rede Próxima aos Retificadores: Análise dos Resultados de Frequência e Geração nas Usinas	65
5	CONCLUSÕES	69
6	REFERÊNCIAS	70

1 INTRODUÇÃO

1.1 OBJETIVOS E MOTIVAÇÕES

Desde 1984, encontram-se em funcionamento no Brasil aplicações CCAT, sendo a mais antiga delas constituída pelas linhas de transmissão CCAT 600 kV que conectam as subestações de Foz do Iguaçu e Ibiúna e são responsáveis pela entrega da energia fornecida pelo Paraguai (Itaipu 50 Hz). Em 2014, de acordo com [1], os dois elos do sistema CCAT 600 kV do Madeira passaram a operar integralmente, permitindo a transmissão da energia gerada no complexo do Rio Madeira (RO) até os centros de carga da região Sudeste. Com a entrada em operação do segundo elo CCAT 800 kV de Belo Monte em 2019, o Brasil passou a contar com seis bipolos CCAT responsáveis por levar grandes blocos de potência até a região Sudeste do país, com capacidade total de 20,6 GW. Além dos elos já em operação e conforme descrito em [2], encontra-se em estudo um novo empreendimento CCAT 500 kV de 1460 km de extensão para 2026, com capacidade de transmissão de 4000 MW e interligando as SE (subestação) Graça Aranha (MA) e SE Silvânia (GO).

Segundo [3], o recorde de carga no subsistema SECO (subsistema que engloba as regiões Sudeste e Centro-Oeste) data de 23 de janeiro de 2019, dia em que o valor máximo registrado de demanda foi de 53.143 MW. Sendo assim, em um cenário considerando a carga máxima registrada e a injeção máxima dos elos (20,6 GW) na região, cerca de 39% da carga seria atendida por sistemas CCAT com terminais inversores geoeletricamente próximos entre si. Dessa maneira, a entrada em operação dos elos tornou a região significativamente sensível à presença das injeções CC, bem como aos problemas que por elas podem ser causados. A partir da entrada em operação dos bipolos associados à transmissão da energia gerada nas usinas do Rio Madeira, o SIN passou a operar na configuração *Multi-Infeed*. Um sistema está em tal configuração quando os terminais conversores de dois ou mais elos estão conectados a barras CA eletricamente próximas. Dessa forma, a operação dos vários elos passou a ser determinante para a estabilidade sistêmica do SIN, sobretudo em cenários de falhas de comutação simultâneas nos mesmos, segundo [1].

O objetivo do trabalho é a descrição dos sistemas de transmissão de alta tensão em corrente contínua (CCAT ou HVDC) e de suas interações entre si e com o sistema elétrico em corrente alternada, durante a operação em regime normal dos elos CCAT e diante de falhas de comutação. A descrição fará uso de simulações computacionais com o intuito de validar o conteúdo teórico exposto. Em termos de operação em regime normal do sistema, os seguintes assuntos são explicitados com maiores detalhes: aspectos gerais da transmissão CC; funcionamento básico das pontes de 6/12 pulsos, tipo LCC (*Line-Commutated Converter*), na operação como retificador e inversor; compensação reativa nas estações conversoras; malhas de controle principais, entre

outros. Em se tratando da operação durante faltas, será abordado o tema das falhas de comutação nos conversores da estação inversora dos elos de transmissão CC, das suas causas e de seu impacto na rede CA em configuração *Multi-Infeed*.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

No capítulo 2, faz-se uma contextualização da tecnologia de transmissão em corrente contínua, expondo os fatores que levam à implementação da solução CC em vez da alternativa CA. Na sequência, apresenta-se os conceitos fundamentais da transmissão em corrente contínua e da teoria por trás do funcionamento de elos CCAT.

No capítulo 3, apresentam-se os índices de avaliação *Multi-Infeed*, os principais tipos de interação entre elos CCAT e são explicitados os conceitos envolvidos no fenômeno de falha de comutação e de suas implicações no elo de ocorrência e nos elos eletricamente próximos.

No capítulo 4 foram simuladas falhas de comutação no SIN usando-se o software ANATEM para a demonstrar os impactos dinâmicos de tais eventos no sistema elétrico, sobretudo quando esse opera com configuração *Multi-Infeed*.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões, onde há uma avaliação sobre as informações teóricas e de simulações e ainda sugestões para futuros trabalhos.

2 TRANSMISSÃO EM CORRENTE CONTÍNUA

2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Na modernidade, conceitos como uso econômico dos recursos, respeito ao meio-ambiente e estabilidade sistêmica se tornaram requisitos para qualquer projeto de transmissão. Neste contexto, ampliou-se o uso da tecnologia de transmissão CC nos grandes sistemas elétricos, sendo usada como solução para a transmissão de grandes blocos de energia distantes dos centros consumidores, como interligação entre sistemas elétricos assíncronos, em conexões que fazem uso de cabamentos submarinos, entre outras aplicações.

Em termos de transmissão CC de longa distância, por envolver grandezas elétricas contínuas, não há - em condições normais de operação - a manifestação dos efeitos da componente reativa da impedância equivalente do circuito [4] e do efeito pelicular [5]. A transferência de potência pelo sistema CC é controlada pelo ângulo de disparo das pontes conversoras [6], não havendo restrições diretamente relacionadas a critérios de defasagem angular para a estabilidade estática e dinâmica, como ocorre na transmissão CA convencional. De acordo com [4], as torres de transmissão em corrente contínua são menores do que as de corrente alternada por conta da necessidade de apenas dois condutores e de requisitos menores para a faixa de passagem, de modo que o uso de menos material na construção das torres acarreta a redução dos impactos ambientais do circuito.

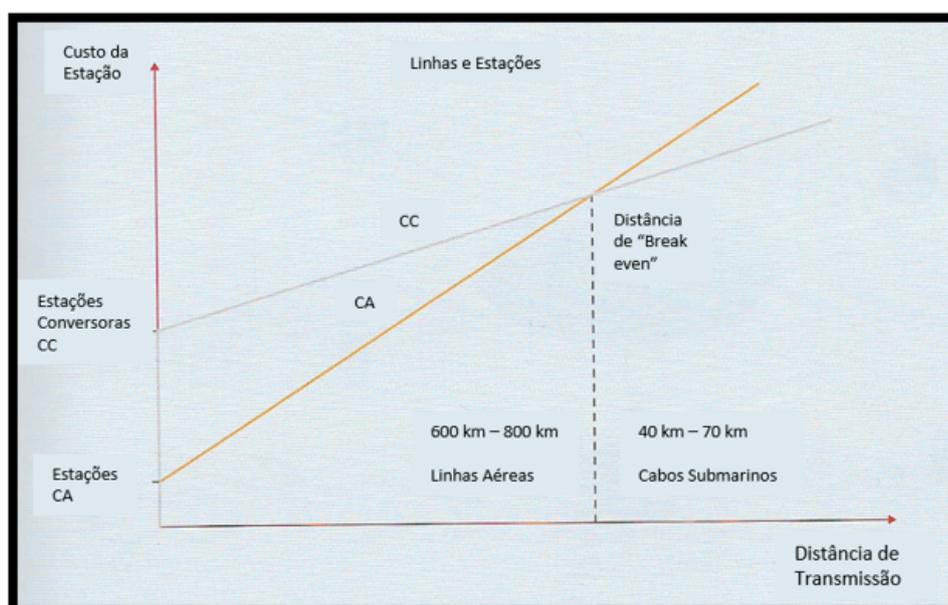
Para se interligar dois sistemas elétricos CA assíncronos de frequências nominais, pode-se fazer o uso de uma conexão CC. Conforme [5] e [6], esse modo de conexão permite que não ocorram impactos na transferência entre os dois sistemas por conta de oscilações de potência, sendo preferível mesmo em alguns casos em que os dois sistemas operam com a mesma frequência nominal. No caso da conexão de sistemas de frequência nominal distinta, a corrente contínua é a única alternativa comercialmente viável.

De acordo com [6], a corrente contínua pode ainda ser usada para transmissão de energia em cabos submarinos, pois a alternativa CA desse sistema apresenta um circuito com capacitância *shunt* equivalente elevada e proporcional ao comprimento do próprio cabo, podendo resultar em elevados valores da componente reativa da corrente, o que inviabiliza a implementação de cabos submarinos CA a partir de uma dada distância. A condução CC, por sua vez, não apresentará esse problema associado com o carregamento reativo, de modo que não há - teoricamente - um limite de comprimento para o sistema, tratando-se apenas da questão das perdas Joule e do custo do condutor.

Ressalta-se que o custo das subestações conversoras nos terminais é superior ao de uma subestação CA convencional, entretanto e conforme explicitado em [6],

calcula-se que a distância para que os empreendimentos CC se tornem mais vantajosos que os CA esteja entre 600 e 800 km para linhas aéreas e entre 40 e 70 km para cabos submarinos. Uma vez superada tal distância (*break-even distance*), a alternativa CC passa a ser mais econômica, conforme ilustrado na Figura 1. Embora o custo das estações conversoras seja superior ao custo das subestações terminais CA convencionais, no caso da transmissão CA haverá subestações intermediárias para instalação de compensação shunt e manobra das linhas, o que não existe no caso da transmissão CC. Dessa forma, verifica-se que com o aumento das distâncias contempladas por novos empreendimentos de transmissão, dentro de um único país ou interligando diversos países com redes síncronas ou assíncronas entre si, a solução em condução CC tende a ocupar um espaço ainda maior nos sistemas elétricos de potência.

Figura 1 – Distância de *Break even* - CC x CA



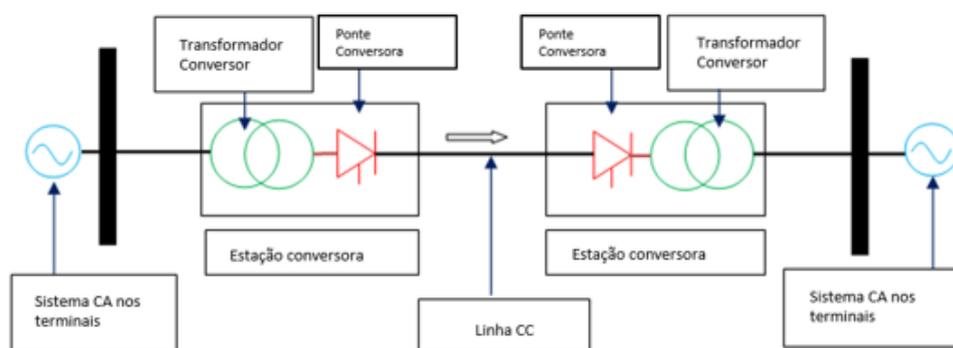
Fonte – Alstom (adaptado), 2010.

2.2 ELEMENTOS INTEGRANTES DE UM SISTEMA DE TRANSMISSÃO CCAT

Um sistema de transmissão CCAT é formado pela linha de transmissão em corrente contínua e pelas estações conversoras, que operam como estações retificadoras ou inversoras a depender da configuração do sistema elétrico e do sentido do fluxo de energia. Na Figura 2, apresenta-se um esquemático de um sistema CCAT de transmissão.

As estações conversoras são compostas basicamente por dois elementos, o transformador conversor e a ponte conversora. A ponte conversora é o elemento fundamental da estação conversora e do próprio sistema CCAT e é nela onde de fato

Figura 2 – Esquemático 1 de um sistema de transmissão CCAT



Fonte – Electrical4U (adaptado), 2020.

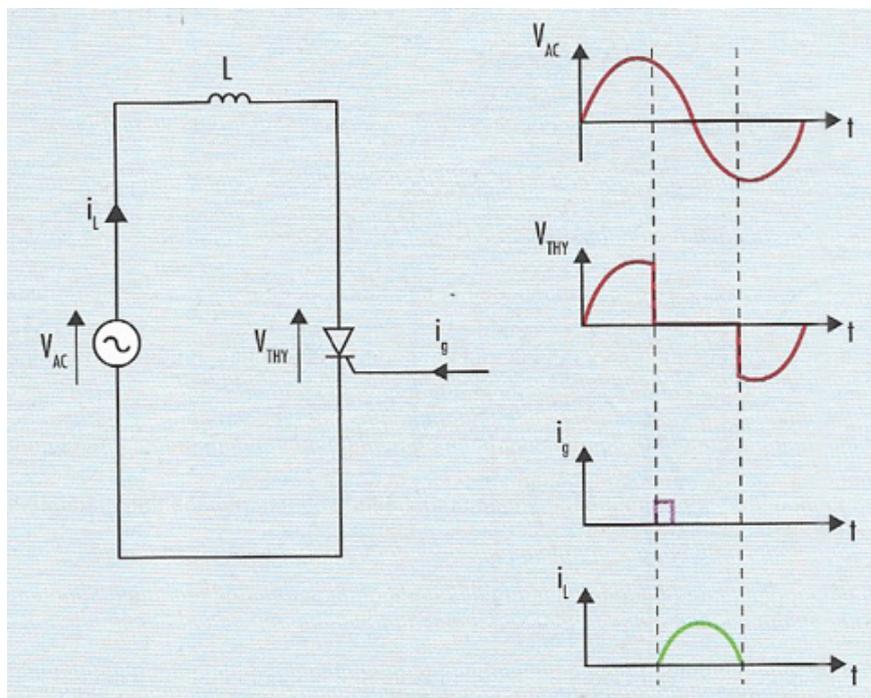
ocorrem as conversões CA/CC e CC/CA, motivo pelo qual será explicitada em maiores detalhes na sequência. As pontes conversoras têm seus terminais CA conectados ao transformador conversor e seus terminais CC conectados aos circuitos de transmissão em corrente contínua. A linha de transmissão conecta os terminais CC dos conversores das estações conversoras, sendo responsável pelo fluxo de potência entre elas. O fluxo de potência percorre o sistema na seguinte ordem: estação conversora operando como retificadora, linha de transmissão CC e estação conversora operando como inversora.

2.2.1 Pontes Conversoras

Os conversores utilizados nos sistemas CCAT funcionam com base nos tiristores, dispositivos unidirecionais que permitem a condução de corrente em apenas uma direção. Diferentemente do diodo, é possível inserir um atraso na condução de corrente durante o período em que a tensão entre o cátodo e o ânodo tem polarização positiva por conta da presença de um terminal adicional denominado *gate*. É comum se referir a esse atraso em termos de ângulos elétricos, com o ângulo zero sendo o ponto onde o conversor à diodo ideal começaria a conduzir, de forma que se adota o termo ângulo de atraso ou de disparo. O tiristor então, quando polarizado positivamente, só entrará em condução no momento em que o *gate* receber um pulso elétrico, no caso de um tiristor tipo *Electrically Triggered Thyristor* (ETT), ou um pulso de luz, no caso de um tiristor tipo *Light-Triggered Thyristor* (LTT). O fim da condução ocorre somente quando a tensão aplicada ao tiristor é revertida (polarização negativa entre os terminais ânodo e cátodo do tiristor), de maneira que um conversor a tiristores precisa de uma fonte de tensão CA externa para que as chaves possam ser polarizadas e comutadas, constituindo o porquê da topologia usada em sistemas CCAT ser conhecida como *Line Commuted Converter* (LCC). Na Figura 3, faz-se o uso de um circuito simples a tiristor

para ilustrar o funcionamento desse tipo de chave.

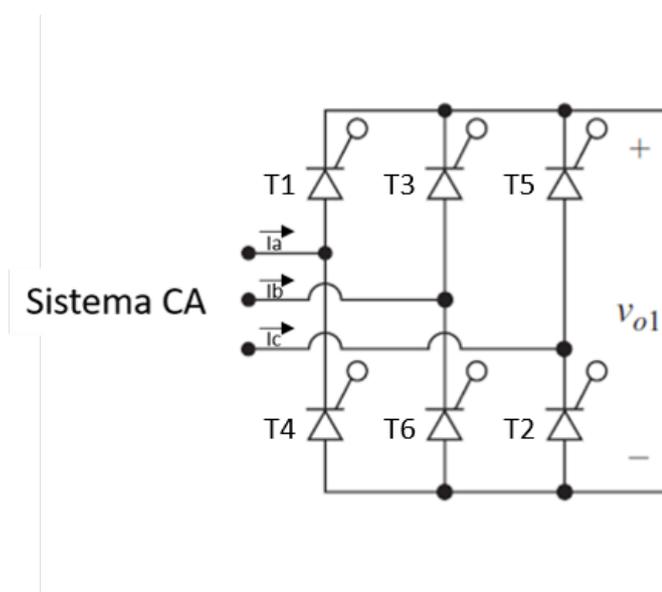
Figura 3 – Circuito simples a tiristor.



Fonte – Alstom, 2010.

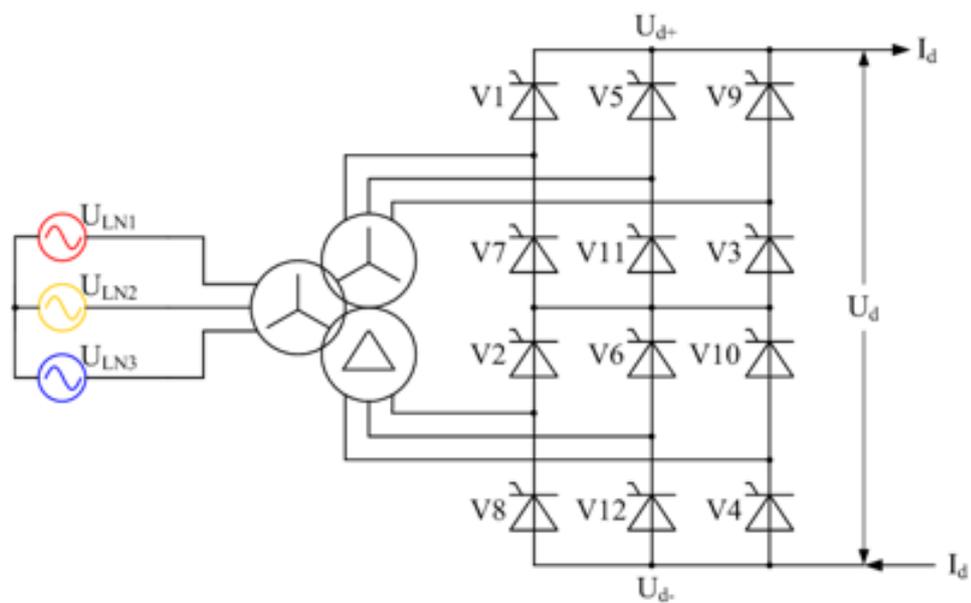
De acordo com [6], o elemento fundamental de um sistema de transmissão em corrente contínua é uma ponte conversora de 6 pulsos (ou ponte de Graetz). Essa servirá como base para a compreensão da estrutura e operação de um sistema CCAT de transmissão. Considerando-se a versão mais simples de um elo, faz-se necessária a utilização de duas dessas pontes, uma operando como retificadora e a outra como inversora. Atualmente passou a ser comum a implementação com duas pontes conversoras em cada subestação conversora (totalizando 4 pontes) com terminações conectadas em série em cada um dos terminais, com defasamento angular de 30 graus entre elas, o objetivo de tal conexão é gerar uma onda de 12 pulsos no terminal CC da subestação conversora. O defasamento pode ser obtido de duas formas, usando-se um transformador de três enrolamentos com secundário em estrela e terciário em delta ou por meio da utilização de dois transformadores com configurações estrela-estrela e estrela-delta. Na Figura 4 e na Figura 5, traz-se a representação de uma ponte de 6 e de 12 pulsos, respectivamente. As fontes de tensão explicitadas nas figuras representam as conexões com a rede CA, enquanto que as tensões V_{o1} e U_d representam as tensões CC em um dos terminais do circuito de transmissão.

Figura 4 – Ponte conversora de 6 pulsos a tiristor



Fonte – Hart (adaptado), 2010.

Figura 5 – Ponte conversora de 12 pulsos a tiristor



Fonte – Green Power Co., 2018.

Os dois modelos de conversores, apresentados na Figura 4 e na Figura 5, são do tipo controlados por tiristores, de modo que a determinação da potência elétrica a ser transmitida pelo sistema e o sentido da transmissão é determinado exclusivamente pelo ajuste do ângulo de disparo ou de atraso dos tiristores, independentemente do ângulo elétrico dos barramentos CA conectados ao elo.

Para se exemplificar o funcionamento de uma ponte conversora trifásica, faz-se o uso da configuração apresentada na Figura 4, cuja saída é uma onda de tensão de 6 pulsos. A escolha dessa configuração ao invés da 12 pulsos se deve ao fato da primeira possuir um circuito mais simples que o da segunda e ainda sim explicitar as mesmas características de funcionamento. A seguir, apresenta-se o processo de comutação com base na configuração escolhida.

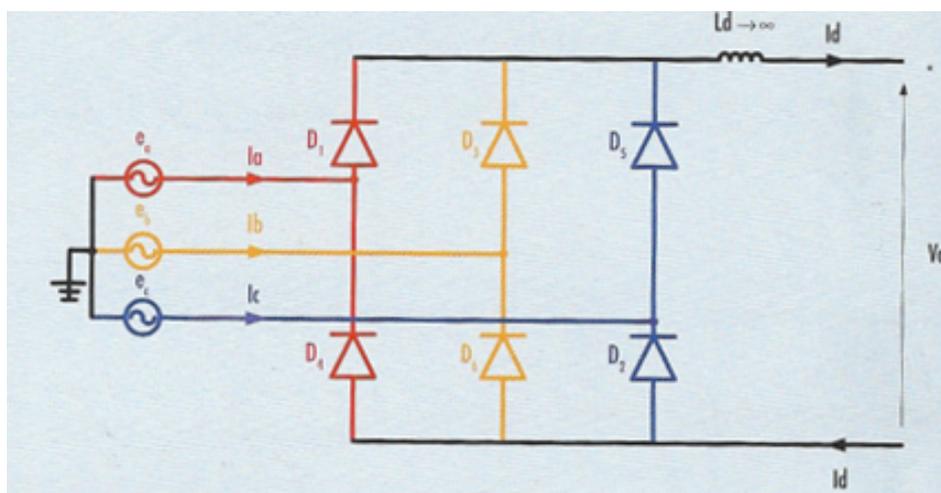
2.2.1.1 Processo de Comutação

O processo de comutação nas pontes conversoras consiste nas transferências cíclicas de corrente entre uma chave (diodo ou tiristor) em final de condução e uma chave em início de condução, de maneira que na nova chave passe a circular toda a corrente que estava na chave anterior. Para análise de tal processo, considera-se que as tensões CA aplicadas são balanceadas em magnitude e ângulo, que as perdas elétricas nos equipamentos podem ser negligenciadas, que o efeito dos circuitos equivalentes das chaves podem ser ignorados e que a indutância do lado CC é infinita, de modo que a corrente CC é livre de *ripple*, conforme explicitado em [6]. Separa-se a análise de tal processo em duas partes, a primeira delas, que será vista na sequência, considera ainda que as indutâncias das fontes de tensão CA são nulas, enquanto que a segunda não adota tal simplificação.

2.2.1.1.1 Processo de Comutação com Indutâncias de Fonte Nulas

Considera-se, primeiramente, que as válvulas usadas no conversor são diodos, chaves que não permitem atrasar o início da condução de corrente. Na Figura 6, apresenta-se uma ponte de 6 pulsos a diodos e esses conduzem conforme a seguinte sequência: 1, 2, 3, 4, 5, 6. Dessa maneira, as transições entre um diodo e o próximo ocorrem alternadamente entre a meia-ponte superior e a meia-ponte inferior. Cada diodo conduz por 120 graus em cada ciclo de 360 graus, de forma que os pares sucessivos de diodos em condução são 1 e 2, 2 e 3, 3 e 4, 4 e 5, 5 e 6 e 6 e 1. Cada par conduz por 60 graus e o par em condução apresenta a maior diferença de tensão entre seus diodos em comparação aos outros pares, o que ocorre porque o circuito aplica tensões reversas em todos os outros diodos. Com o passar do tempo, as amplitudes relativas das tensões trifásicas aplicadas ao conversor variam conforme suas senoides características, a tensão B-C se torna maior que a tensão A-C e a válvula 3 recebe a

Figura 6 – Ponte conversora de 6 pulsos a diodo



Fonte – Alstom, 2010.

corrente que passava pela válvula 1 como pode ser visto na Figura 7a. Trata-se, então, do processo de comutação e a tensão média no lado CC durante um ciclo equivale à média da área hachurada na Figura 8a ao longo do período de condução de um diodo.

Desse modo, mostra-se o porquê da capacidade de controle de potência transferida a partir do uso de conversores controlados à tiristor, característica que não pode ser encontrada em uma ponte a diodos, onde o α é fixo e igual a zero. Nas 4 equações apresentadas na sequência, $V_{m,L-L}$ corresponde à tensão de pico de linha da fonte CA balanceada aplicada, E_m é o valor eficaz (rms) da tensão de fase aplicada pela mesma fonte CA e V_d corresponde à tensão DC média ideal. Na Equação (3), reescreve-se $V_{m,L-L}$ em função de E_m . A média da integração da Figura 8b no período de condução é calculada a partir da Equação (1), retirada de [6] e sua resolução dá origem à Equação (2), substituindo-se (3) em (2), tem-se que como resultado a Equação (4).

$$V_d = \int_{\frac{\pi}{3} + \alpha}^{\frac{2\pi}{3} + \alpha} \frac{3\sqrt{2}\sqrt{3}E_m \cdot \sin(\omega t) d\omega t}{\pi} \quad (1)$$

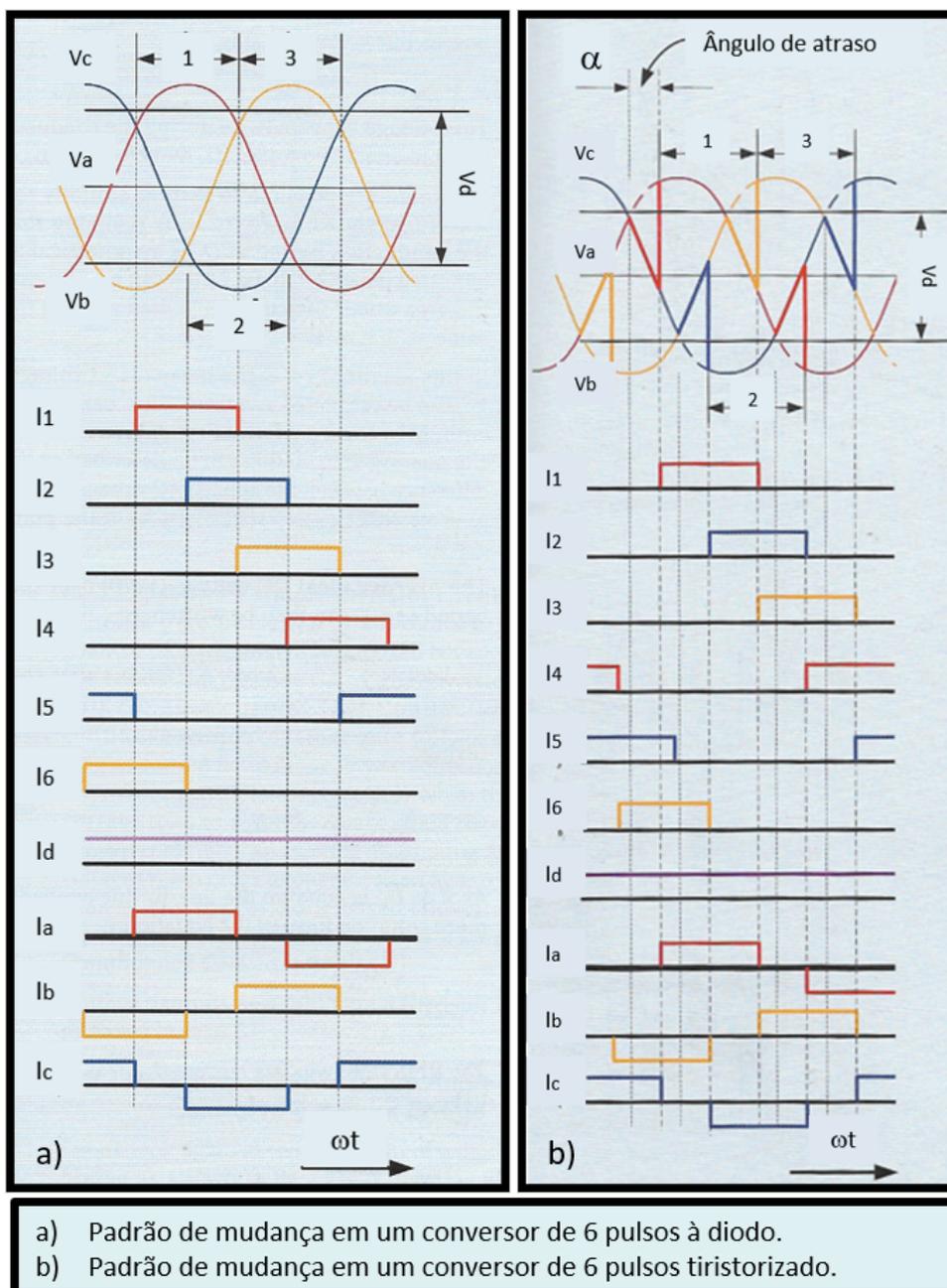
$$V_d = \frac{3\sqrt{2}\sqrt{3}E_m \cdot \cos(\alpha)}{\pi} \quad (2)$$

$$\sqrt{2}\sqrt{3}E_m = V_{m,L-L} \quad (3)$$

$$V_d = \frac{3V_{m,L-L} \cdot \cos(\alpha)}{\pi} \quad (4)$$

Usando tiristores em lugar dos diodos e considerando um atraso (α) no disparo das chaves, pode-se verificar que conforme se incrementa o atraso, reduz-se área

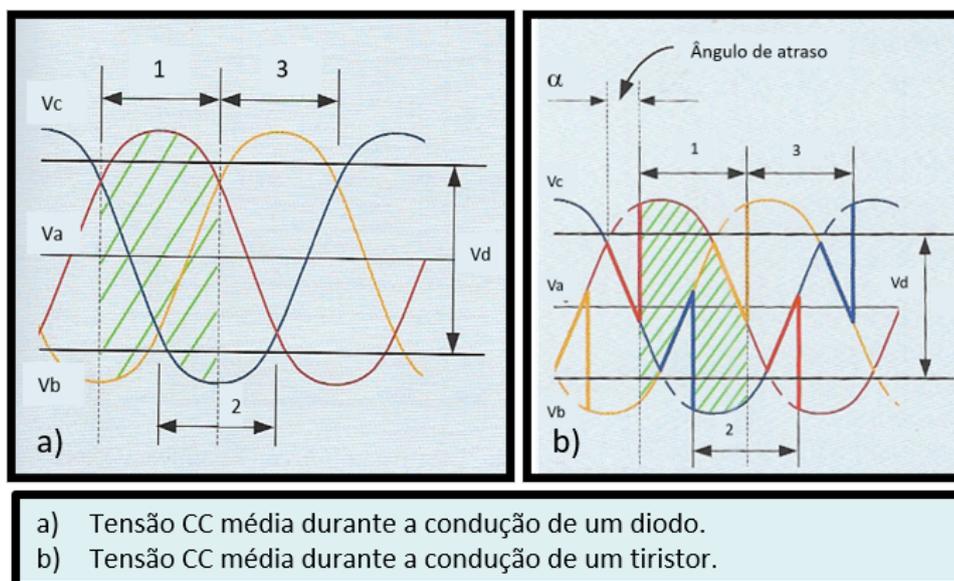
Figura 7 – Conversor (a diodos vs. tiristores): processo de comutação com indutância da fonte nula



Fonte – Alstom (adaptado), 2010.

hachurada na Figura 8b, e conseqüentemente a tensão média no lado CC. Esta característica dos conversores a tiristores viabiliza o controle da corrente e da potência transferida entre os terminais conversores. A tensão média do lado CC quando o ângulo de disparo é superior a 90 graus torna-se negativa, colocando o conversor em operação como inversor.

Figura 8 – Conversor (diodo vs tiristor): tensões CC médias



Fonte – Alstom (adaptado), 2010.

Como descrito na seção 2.2.1.1, na sequência se descreve o efeito das indutâncias das fontes CA no processo de comutação.

2.2.1.1.2 Efeito da Indutância da Fonte no Processo de Comutação

Admitindo-se agora indutâncias equivalentes não nulas nas fontes de tensão e uma carga RL para representar o lado CC do circuito, faz-se a análise do processo de comutação para a verificação dos impactos nas formas de onda de tensão e de corrente. Na Figura 9, apresenta-se uma ponte a diodos e usa-se tal modelo para simplificar o entendimento do fenômeno a partir do conteúdo apresentado em [4]. Na figura, V_0 e I_0 correspondem à tensão e à corrente no lado CC do conversor.

Quando ocorre uma troca de polaridade na fonte de tensão, a corrente nas chaves não pode variar instantaneamente por conta da presença da indutância equivalente no lado CA, de modo que a corrente precisa ser transferida gradualmente do diodo no fim de condução para o próximo diodo, o que ocorre durante um intervalo de comutação μ , que também pode ser referenciado em termos de ângulos elétricos e chamado de ângulo de comutação. Diferentemente do que ocorre quando se despreza as indutâncias da fonte, o processo de comutação não pode mais ser considerado instantâneo e se faz necessário o estudo do comportamento do conversor durante o processo.

Assumindo que os diodos D_1 e D_2 do conversor presente na Figura 9a estão em condução e que a corrente da carga I_0 é constante, a próxima transição transfere

a corrente do diodo D₁ para o diodo D₃, de modo que durante a transferência os três diodos (D₁, D₃ e D₂) estão conduzindo e o circuito equivalente durante a comutação é explicitado na Figura 9b. A partir dessa, verifica-se que a corrente na indutância L_a (e na chave D₁) inicialmente possui magnitude I_o e é gradualmente reduzida a zero no final do intervalo conforme a Equação (5) e que a corrente na indutância L_b (e na chave D₃) parte de zero e cresce gradualmente até atingir o valor I_o, de modo que durante a comutação a tensão de saída V₀ é dada pela Equação (6), na qual V_{BC} representa a tensão de linha entre a fase b e a fase c da fonte e V_{AC} representa a tensão de linha entre a fase a e a fase c da fonte. A resolução de (5) para μ resulta na Equação (7), que fornece o ângulo de comutação a partir dos parâmetros do circuito, na qual X_s = ωL_a.

$$I_{La}(\pi + \mu) = \int_{\pi}^{\pi+\mu} \frac{V_{m,L-L} \sin(\omega t) d(\omega t)}{2\omega L_a} + I_o \quad (5)$$

$$V_0 = \frac{V_{BC} + V_{AC}}{2} \quad (6)$$

$$\mu = \cos^{-1}\left(1 - \frac{2\omega L_a I_o}{V_{m,L-L}}\right) = \cos^{-1}\left(1 - \frac{2X_s I_o}{V_{m,L-L}}\right) \quad (7)$$

Na, Equação (8) mostra-se que a presença de indutâncias equivalentes nas fontes implica uma redução da tensão média CC nos conversores trifásicos. Na Figura 9c, explicita-se as formas de onda de corrente e tensão durante o intervalo de comutação.

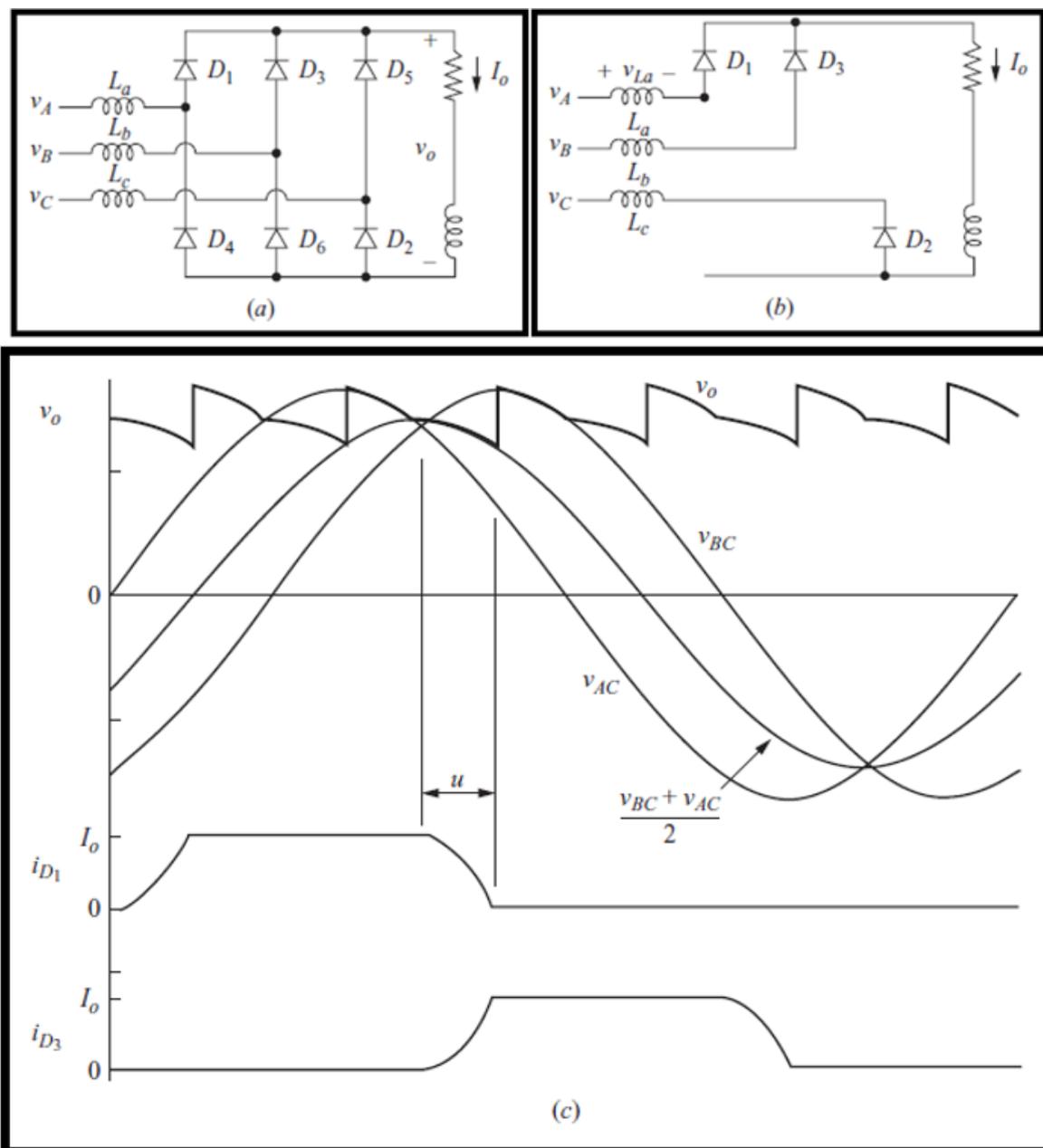
$$V_0 = \frac{3V_{m,L-L}}{\pi} \cdot \left(1 - \frac{X_s I_o}{V_{m,L-L}}\right) \quad (8)$$

As equações acima, por se basearem em uma ponte a diodos, desconsideram os efeitos do ângulo de atraso (α), entretanto os conversores usados na prática são a tiristores, de modo que se faz necessário considerar os efeitos do ângulo de atraso no cálculo da tensão CC. Na Equação (9), retirada de [7], apresenta-se o cálculo da tensão CC em termos do ângulo de atraso e do ângulo de comutação (μ). A Equação (8) pode então ser considerada um caso particular (α = 0°) da Equação (9).

$$V_0 = \frac{3V_{m,L-L}}{2\pi} \cdot (\cos(\alpha) + \cos(\alpha + \mu)) \quad (9)$$

A Equação (8) e a Equação (9) são usadas para os conversores operando como retificadores, entretanto serão válidas também para os conversores operando como inversores desde que se substitua α pelo ângulo de extinção. O intervalo que decorre entre o instante em que se encerra a comutação e o instante em que a tensão em uma dada válvula volta a ficar positiva é conhecido como ângulo de extinção. Atribui-se a letra grega γ para representar tal valor. A Equação (10) explicita o cálculo da tensão

Figura 9 – Processo de comutação em um conversor de 6 pulsos com indutâncias não nulas na fonte



Fonte – Hart (adaptado), 2010.

CC para os conversores operando como inversores em função de γ e μ . A relação entre os ângulos de atraso, de comutação e de extinção é dada pela Equação (11).

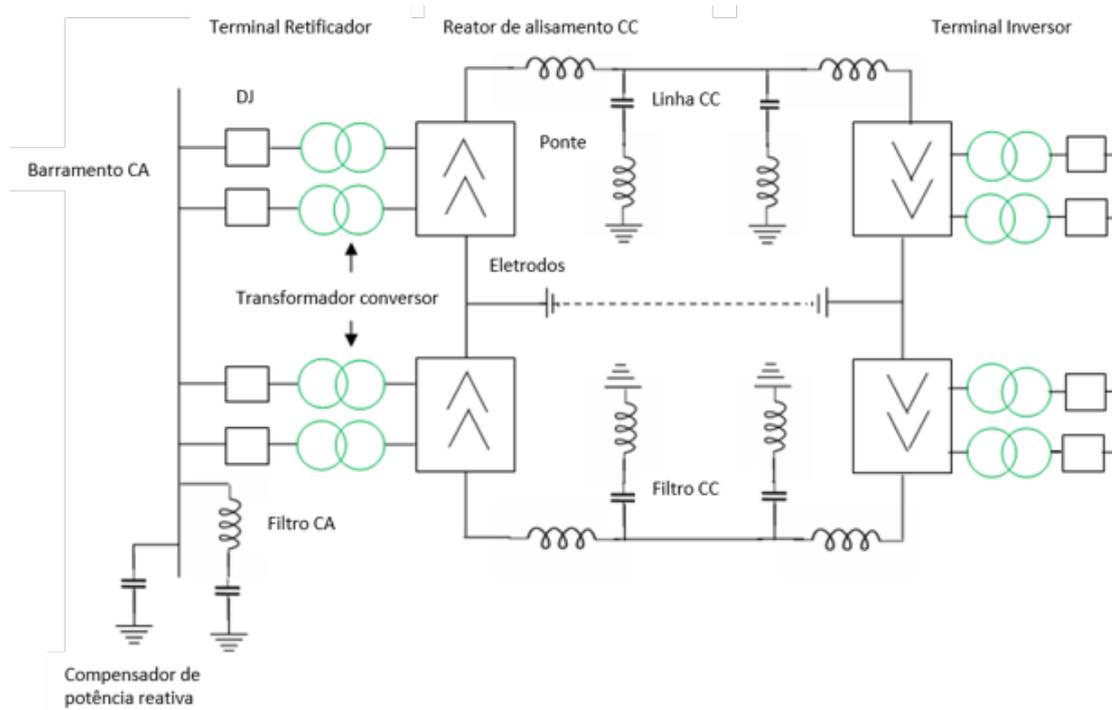
$$V_0 = \frac{3V_{m,L-L}}{2\pi} \cdot (\cos(\gamma) + \cos(\gamma + \mu)) \quad (10)$$

$$\gamma = 180^\circ - \alpha - \mu \quad (11)$$

2.2.2 Outros Elementos

De forma mais detalhada, conforme explicitado na Figura 10, há uma série de componentes dos elos CC que merecem destaque. Os seguintes componentes foram descritos baseando-se na teoria apresentada em [6] e [7]: disjuntores CA, transformador conversor, reatores de alisamento, eletrodos, filtros harmônicos e fontes de potência reativa.

Figura 10 – Esquemático 2 de um sistema de transmissão CCAT



Fonte – Electrical4U (adaptado), 2020.

2.2.2.1 Linha de Transmissão

A linha de transmissão em um elo CCAT é formada pelos cabos condutores aéreos de longo comprimento que permitem o fluxo de potência entre as duas estações

conversoras, interligando-as. A configuração mais utilizada, conhecida como circuito bipolar simples, faz uso de dois cabos codutores, possibilitando que se transfira potência nos dois sentidos do circuito com base nos ajustes dos conversores nas extremidades.

2.2.2.2 Transformador conversor

Constitui o conjunto formado pelos transformadores conectados ao barramento CA, responsáveis pela transformação e controle do nível de tensão por meio da variação dos taps.

2.2.2.3 Disjuntores CA

Os disjuntores, identificados na Figura 10 como DJ, são responsáveis pelo isolamento dos transformadores em caso de faltas nesses e por desligar o elo CC associado. São usados para eliminação de defeitos no sistema CA, visto que falhas no sistema CC podem ser mais rapidamente eliminadas pelos controles dos conversores.

2.2.2.4 Reatores de alisamento

Tratam-se de grandes reatores usados para a diminuir tensões e correntes harmônicas na linha CC, prevenir falhas de comutação na estação inversora, prevenir descontinuidades na corrente em cenário de baixas correntes e limitar a corrente de crista na estação retificadora durante defeito na linha CC.

2.2.2.5 Eletrodos

Os eletrodos são condutores conectados à terra que funcionam como retorno do circuito de transmissão CCAT.

2.2.2.6 Filtros Harmônicos

Os conversores geram componentes harmônicos tanto no lado CC como no lado CA, de forma que é necessária a instalação de filtros nos dois lados para minimização de problemas associados aos harmônicos, como superaquecimento de geradores e capacitores próximos. Os filtros do lado CA são fontes de potência reativa capacitiva à frequência nominal, de modo que ainda podem ser usados para fornecer potência reativa aos conversores.

2.2.2.7 Fontes de Potência Reativa

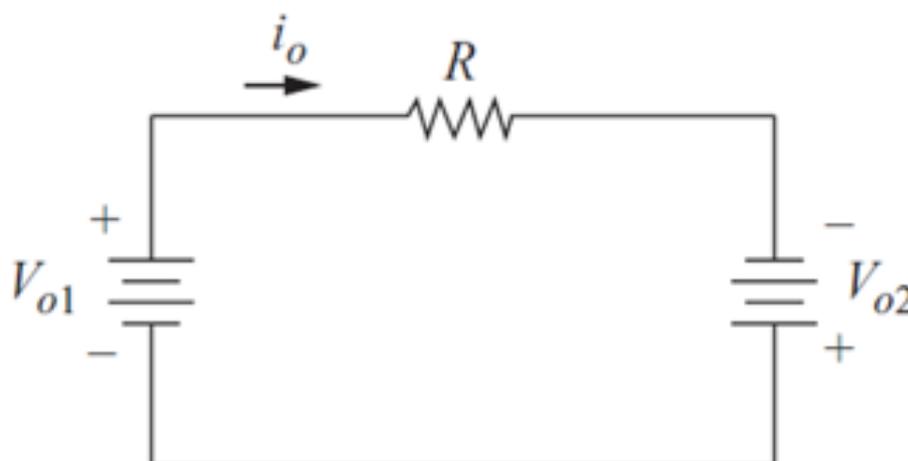
A potência reativa consumida por um elo em regime normal de operação é cerca de 50% do valor de potência ativa transferida quando o elo opera com potência

nominal, de maneira que fontes de potência reativa, principalmente capacitores, são conectadas ao barramento CA das subestações conversoras.

2.3 CIRCUITO EQUIVALENTE DE UM SISTEMA CCAT

De acordo com [2], considerando-se uma condução somente com a componente CC é possível considerar o circuito equivalente explicitado na Figura 11 como representação da linha de transmissão CCAT entre os terminais do elo, onde o condutor e as subestações conversoras são representados pela resistência equivalente e pelas fontes de tensão equivalentes, respectivamente. Ressalta-se que para o circuito equivalente apresentado assumiu-se que as fontes de tensão têm indutância equivalente nula, de maneira que se considerou o ângulo de comutação igual a zero ($\mu = 0^\circ$) para a dedução das fórmulas.

Figura 11 – Circuito Equivalente de um Sistema CCAT



Fonte – Hart, 2010.

Os valores das tensões equivalentes V_{o1} e V_{o2} se referem às tensões nos terminais CC de cada uma das pontes conversoras e são calculadas por meio da Equação (12) e da Equação (13), onde α se refere ao ângulo de disparo, γ se refere ao ângulo de extinção e $V_{m,L-L}$ corresponde ao valor de pico da tensão trifásica oriunda da rede CA.

$$V_{o1} = \frac{3V_{m1,L-L} \cdot \cos(\alpha_1)}{\pi} \quad (12)$$

$$V_{o2} = -\frac{3V_{m2,L-L} \cdot \cos(\gamma_2)}{\pi} \quad (13)$$

Para o conversor 1, que opera como retificador, faz-se o uso do ângulo α na Equação (12), enquanto que para o conversor 2, que opera como inversor, faz-se o uso

do ângulo γ na Equação (13). Conforme [4], pode-se verificar a partir das Equação (12) e Equação (13) que V_{01} e V_{02} serão positivas para α entre 0 e 90 graus e negativas para α entre 90 e 180 graus (ou γ entre 0 e 90 graus), de modo que o conversor operando como retificador terá sempre tensão positiva enquanto que o que opera como inversor terá tensão negativa. A corrente I_0 , que flui pelo circuito é então calculada pelo quociente da soma das tensões pela resistência equivalente do cabo condutor, conforme indicado pela Equação (14).

$$I_0 = \frac{V_{01} + V_{02}}{R} \quad (14)$$

Dessa forma, a potência suprida por cada um dos conversores é dada pelo produto de sua tensão pela corrente, ver Equação (15) e Equação (16).

$$P_1 = -V_{01} \cdot I_0 \quad (15)$$

$$P_2 = -V_{02} \cdot I_0 \quad (16)$$

Substituindo-se (14) em (15) e (14) em (16), obtêm-se as Equação (17) e Equação (18), a partir das quais se pode verificar que as fórmulas que determinam a transferência de potência podem ser reescritas em função das tensões CC dos conversores e da resistência equivalente.

$$P_1 = -V_{01} \cdot \frac{V_{01} + V_{02}}{R} \quad (17)$$

$$P_2 = -V_{02} \cdot \frac{V_{01} + V_{02}}{R} \quad (18)$$

Considera-se ainda que $V_{m1,L-L}$ e $V_{m2,L-L}$ são constantes, de modo que V_{01} e V_{02} terão como variáveis independentes o ângulo de atraso (α_1) e o ângulo de extinção (γ_2), respectivamente. Substituindo-se (12) e (13) em (17) e (18), obtêm-se as Equação (19) e Equação (20), mostra-se então que a transferência de potência em um circuito CCAT é controlada pelo ângulo de atraso (α) dos conversores operando como retificadores e pelo ângulo de extinção (γ) dos conversores operando como inversores.

$$P_1 = -\frac{9V_{m1,L-L}}{\pi^2 R} \cdot [V_{m1,L-L} \cdot \cos^2(\alpha_1) - V_{m2,L-L} \cdot \cos(\alpha_1) \cdot \cos(\gamma_2)] \quad (19)$$

$$P_2 = -\frac{9V_{m2,L-L}}{\pi^2 R} \cdot [V_{m2,L-L} \cdot \cos^2(\gamma_2) - V_{m1,L-L} \cdot \cos(\alpha_1) \cdot \cos(\gamma_2)] \quad (20)$$

2.4 ESQUEMAS DE CONTROLE

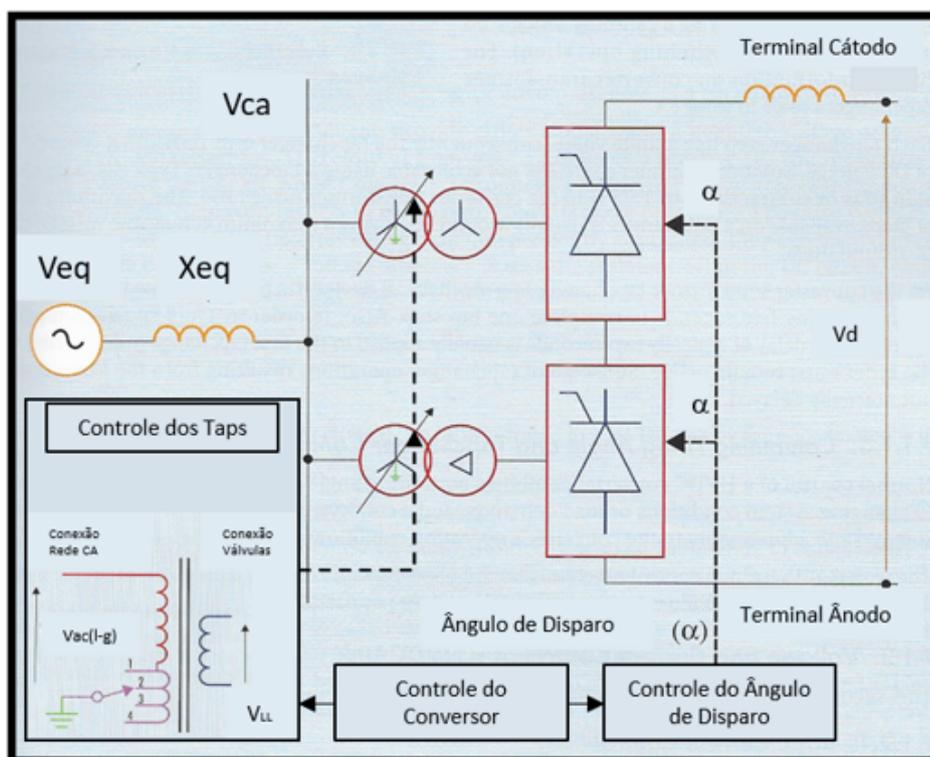
Na operação de um sistema dinâmico é necessário controlar as inúmeras condições operativas associadas. Na presente seção, versa-se sobre os esquemas de controle empregados para controlar o fluxo de potência em um sistema de transmissão CCAT de maneira segura, isto é, mantendo as diversas variáveis operacionais dentro de faixas apropriadas e em conformidade com os procedimentos de rede do operador do sistema elétrico em que o elo se encontra integrado.

Conforme [5], um sistema de controle ideal para o conversor precisa cumprir uma série de requisitos: simetria entre os ângulos de disparo das válvulas durante a operação em regime normal; habilidade para determinar o ângulo de disparo usando a tensão de comutação e o mínimo de consumo de potência reativa pelo conversor sem causar uma falha de comutação; insensibilidade às variações nas tensões e frequências do sistema de transmissão CA; habilidade de prever o ângulo de disparo ótimo baseado na tensão atual do sistema e em sua corrente CC sem causar uma falha de comutação; possuir um esquema de controle de corrente com margens suficientes na velocidade e na estabilidade para lidar com mudanças na referência ou com perturbações.

2.4.1 Controles de Um Conversor CA/CC

De acordo com [6], um único conversor controlado fornece apenas o controle de sua tensão CC (V_d) e tal valor será uma função da tensão CA aplicada (V_{LL}) e do ângulo de atraso (α), ver Equação (12). Pelo ajuste do ângulo de disparo das válvulas do conversor é feito o controle da tensão no lado CC, pois esta é proporcional ao cosseno do ângulo de disparo. O ângulo (α) pode ser reajustado a cada ciclo; tem-se então uma resposta rápida para esse tipo de controlador e uma saída de qualquer valor dentro da faixa operativa do conversor pode ser obtida. Os transformadores usados nos sistemas CCAT possuem tap variável; tal característica permite que se possa alterar a relação de transformação por meio da mudança de posição do tap dentro de um número finito de passos. Além disso, são capazes de chavear entre as posições durante a passagem de corrente pelos enrolamentos, o que caracteriza transformadores com função OLTC (*on-load tap changer*) e faz com que o controle da tensão CC também dependa da posição do tap. Os controles do ângulo de disparo e da posição do tap normalmente são combinados em um único controlador, com o objetivo de otimizar o controle de tensão. Na Figura 12, apresenta-se um único conversor controlado com os controles de tap e de ângulo de disparo vinculados à um mesmo controlador. Na sequência, aborda-se o controle de tensão e corrente nos elos CCAT.

Figura 12 – Controles de Um Único Conversor Controlado



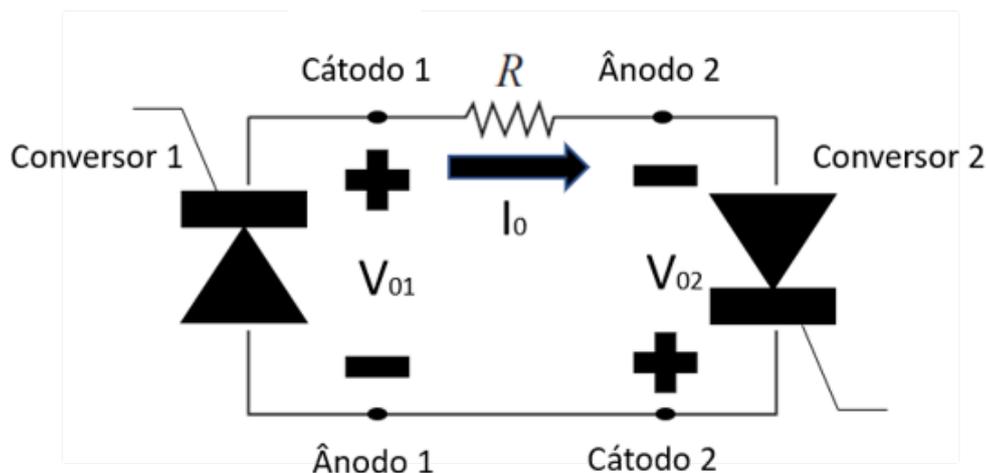
Fonte – Alstom (adaptado), 2010.

2.4.2 Controles Básicos de Corrente e Tensão de Um Elo CCAT

Conforme [6], a corrente em um tiristor só pode fluir do terminal ânodo para o terminal cátodo. Desse modo, se dois conversores forem conectados para a formação de um elo CCAT, é necessário que esses sejam conectados por meio de terminais opostos: terminal ânodo do conversor 1 conectado ao terminal cátodo do conversor 2 e terminal ânodo do conversor 2 conectado ao terminal cátodo 1; tal conexão é apresentada na Figura 13.

Na Equação (14), apresentada na seção 2.3, descreve-se o cálculo da corrente CC que circula pelo elo em função das tensões CC dos conversores e dela se pode inferir que para que haja circulação de corrente no elo é necessário que a tensão CC no conversor operando como retificador (V_{01}) e que a tensão CC no conversor operando como inversor (V_{02}) satisfaçam a seguinte inequação: $V_{01} > -V_{02}$. Substituindo-se (12) e (13) na inequação apresentada, pode-se reescrevê-la da seguinte forma: $V_{m1,L-L} * \cos(\alpha_1) > V_{m2,L-L} * \cos(\gamma_2)$, na qual as tensões serão controladas pelos controladores de taps. Dessa forma, tanto as tensões CC nos conversores como a corrente CC que circula pelo elo serão controladas pela ação coordenada dos controladores dos dois conversores que formam o elo. Na próxima seção, trata-se dos esquemas de controle

Figura 13 – Representação Simplificada de Um Elo CCAT



Fonte – Hart (adaptado), 2010.

nas estações CCAT.

2.4.3 Esquemas de Controle nas Estações CCAT

A estratégia clássica considera o controle de corrente do elo pelo retificador e o controle da tensão do elo pelo terminal inversor, em condições normais de operação.

2.4.3.1 Esquemas de Controle para Retificadores

Em um esquema básico, a corrente medida é comparada com a corrente CC requerida e a diferença entre o valor medido e o valor desejado causará um erro, que sensibilizará o sistema de controle. Esse modificará o ângulo α , com o objetivo de reduzir o erro do controle de corrente. Em uma malha mais lenta, a posição dos taps é ajustada para que se mantenha α dentro de uma faixa de valores pré-definida.

2.4.3.2 Esquemas de Controle para Inversores

Um dos esquemas básicos para controle do inversor é o Controle com Ângulo de Extinção Constante (CEA), que está baseado na manutenção do ângulo de extinção (γ) em um valor constante durante a operação em regime normal. A tensão CC é controlada pelos controles de tap.

3 SISTEMA ELÉTRICO EM CONFIGURAÇÃO *MULTI-INFEED*

Após a entrada em operação dos sistemas CCAT associados à transmissão das usinas do Rio Madeira e de Belo Monte, o SIN passou a operar na configuração *Multi-Infeed*. Tal cenário ocorre quando os terminais conversores de dois ou mais elos estão conectados a barras CA eletricamente próximas. Em tais configurações, interações significativas, descritas na sequência, poderão ocorrer entre os elos e são dependentes principalmente do valor da impedância entre as barras de conexão, do nível de curto-circuito do sistema CA visto a partir de cada barra CA com terminais de bipolo conectadas e do despacho de potência CC passante pelos elos.

3.1 INTERAÇÃO ENTRE OS ELOS CCAT: PRINCIPAIS FENÔMENOS DE INTERAÇÃO

Descreve-se aqui os principais fenômenos de interação com base na teoria apresentada por [7], [8] e [9].

3.1.1 Falha de Comutação

As falhas de comutação ocorrem quando a transferência da corrente de uma válvula em final de condução para a próxima válvula da sequência de condução não ocorre, de forma que a primeira se manterá em condução. Essa ocorrência faz com que haja interrupção temporária da potência transmitida pelo elo, com efeitos para os sistemas CA conectados às estações conversoras. A falha pode ser causada por aumentos repentinos na corrente CC, entretanto sua ocorrência é mais comumente associada a quedas de tensão no barramento CA da subestação inversora devido a faltas na rede CA eletricamente próxima da subestação.

Durante uma falha de comutação, o conversor passa a operar com potência reativa indutiva mais elevada, resultando em um maior fluxo de reativo da rede CA para o conversor. No caso de sistemas *Multi-Infeed* a situação pode ser mais grave, pois tal fluxo pode ser feito a partir de barras próximas a outros elos em operação, que também podem sofrer falha de comutação. Sistemas com maior acoplamento entre os elos estão mais sujeitos a esse tipo de ocorrência. Nesse cenário, o atendimento à demanda pode ser comprometido, resultando em blecautes, de modo a constituir uma situação bem crítica. Ressalta-se ainda que mesmo que o afundamento de tensão em uma barra de tensão próxima a um segundo elo por conta de uma falha de comutação no primeiro não seja suficiente por si só para induzir uma falha de comutação no segundo, ainda pode ocorrer falha de comutação e a recuperação da falha passa a depender da robustez de todas as barras CC eletricamente próximas. O aumento da densidade de injeções de potência por elos CC em uma mesma região tornam o

sistema mais suscetível aos problemas decorrentes da interação entre elos, de modo que o estudo desses se torna imprescindível para sistemas com alto acoplamento entre dois ou mais elos. Na sequência, faz-se uma abordagem em maiores detalhes para o ângulo de extinção.

3.1.1.1 Ângulo de Extinção

Conforme abordado no capítulo anterior, na operação dos conversores que compõem um elo CC, os seguintes ângulos são relevantes: ângulo de disparo (ou de atraso), ângulo de comutação e ângulo de extinção. A partir de um ciclo de polarização de um tiristor, a Equação (21) será sempre satisfeita pelos três ângulos.

$$\alpha + \mu + \gamma = 180^\circ \quad (21)$$

Reescrevendo-se a Equação (21) e se isolando γ para os modos retificador e inversor, obtêm-se as Equação (22) e Equação (23). A partir delas é possível verificar que o ângulo de extinção no modo retificador é muito maior do que no modo inversor, constituindo o principal motivo da falha de comutação ser mais frequente no terminal inversor. As falhas de comutação ocorrem com maior frequência na subestação inversora porque as válvulas na subestação inversora permanecem sob tensão reversa por um período muito mais curto depois que deixam de conduzir (menor ângulo de extinção) quando comparado ao período de tensão reversa nas válvulas da subestação retificadora. A válvula que está deixando de conduzir necessita de um tempo para desionizar e recuperar sua capacidade de bloqueio. Segundo [7], existe um valor mínimo para o ângulo de extinção para que as válvulas possam comutar entre si de forma perfeita, esse representa o intervalo mínimo necessário para que a válvula que acabou de deixar de conduzir recupere sua capacidade de bloqueio. Dessa maneira, quando a comutação entre duas válvulas ocorre sem margem para desionização da válvula em fim de condução, a corrente pode voltar a passar pela primeira válvula, o que resulta em um curto-circuito na ponte conversora, de modo que a tensão CC vai a zero e conseqüentemente não haverá transferência de potência. O tempo da falha é proporcional à queda da tensão. Após a falha, a capacidade de restauração da plena potência do elo pelos sistemas de controle dependerá da capacidade dos sistemas CA (ESCR - Relação Efetiva de Curto Circuito) conectados às estações conversoras, especialmente no terminal inversor, conforme apresentado em [8]. Na sequência, explicita-se as equações usadas para o cálculo dos ângulos de comutação e de extinção.

$$\gamma_{\text{retificador}} = 180^\circ - \alpha_{\text{retificador}} - \mu, \alpha < 90^\circ \quad (22)$$

$$\gamma_{\text{inversor}} = 180^\circ - \alpha_{\text{inversor}} - \mu, \alpha > 90^\circ \quad (23)$$

3.1.1.2 Cálculo dos Ângulos de Comutação e de Extinção

Tomando como base a teoria de funcionamento da ponte conversora em [4] e [6], considera-se que o ângulo de comutação é função da tensão aplicada, da corrente CC que circula pelo elo, dos parâmetros construtivos dos componentes do sistema CCAT e do ângulo α , o que pode ser verificado na Equação (24).

$$\mu = \cos^{-1}\left(\cos\alpha - \frac{2X_c I_d}{\sqrt{2} V_{ac}}\right) - \alpha \quad (24)$$

A Equação (21) pode ser reescrita como Equação (25) por meio da substituição da Equação (24) em (21), onde X_c é a reatância equivalente do transformador conversor, I_d é a corrente CC fluindo pelo circuito de transmissão do elo e V_{ac} é a tensão eficaz da rede CA aplicada aos terminais primários do transformador conversor. Na Equação (25), mostra-se então que as características construtivas do transformador conversor terão impacto no cálculo do ângulo de extinção, de modo que um equipamento com uma reatância equivalente maior resultará em um ângulo de extinção menor. Os aumentos do ângulo de disparo e da corrente CC que circula pelo elo também causam uma redução no ângulo, enquanto que aumentos na tensão CA aplicada aos terminais CA do conversor causam um aumento no ângulo. Infere-se, então, que a redução da tensão CA nos terminais do inversor e a elevação abrupta da corrente do elo CC conduz a riscos de falha de comutação. Cada fabricante dispõe de estratégias de controle proprietárias, destinadas à minimização de eventos de falha de comutação e à redução do tempo de recuperação de potência.

$$\gamma = \cos^{-1}\left(\frac{\sqrt{2}X_c I_d}{V_{ac}} - \cos\alpha\right) \quad (25)$$

3.1.2 Sobretensões Transitórias

Distúrbios na rede CA ou no sistema CC podem ocasionar sobretensões nos terminais dos conversores, sendo que a situação mais crítica ocorre quando há bloqueio do elo e toda a compensação reativa que por ele era consumida passa a ser injetada na rede CA, causando sobretensões. Em sistemas *Multi-Infeed* a situação pode ser ainda mais crítica, especialmente na ocorrência de bloqueios simultâneos de múltiplos elos, cenário em que haverá injeção de reativo excedente a partir de duas ou mais barras diferentes, de maneira que a tensão em uma barra próxima a um bipolo será influenciada não só por um bloqueio nesse como também pelos bloqueios em todos os elos que estejam eletricamente próximos a ela.

Os estudos de dimensionamento dos elos e dos sistemas receptores devem indicar as formas de mitigação e limitação das sobretensões. Ações automáticas de controle e proteção sistêmica incluem a desconexão tempestiva de filtros e bancos de capacitores na hipótese do bloqueio de elos CC.

3.1.3 Interações Harmônicas

Os harmônicos trazem efeitos indesejados, pois reduzem a eficiência na geração e transmissão de potência, podendo ainda causar sobreaquecimento em capacitores e geradores, instabilidade dos sistemas de controle e interferência com circuitos de comunicação. Os conversores comutados pela rede (LCC) de um sistema CCAT são grandes fontes de harmônicos por conta da função de chaveamento, introduzindo harmônicos tanto no lado CC quanto no lado CA. Faz-se necessária então a instalação de filtros em ambos terminais de um bipolo para que se mantenha a distorção harmônica total (THD - *Total Harmonic Distortion* dentro da faixa recomendada.

3.1.4 Instabilidade de Tensão

Assim como em sistemas CA puros, a instabilidade de tensão e/ou potência na barra da estação inversora é uma preocupação. Ações de controle associadas a sistemas CCAT podem piorar a situação, em especial na configuração *Multi-Infeed*. A mitigação da instabilidade é normalmente alcançada quando se garante um nível de curto-circuito adequado em relação à potência que passa pelo elo CC, além da modificação das características de controle.

3.2 ÍNDICES DE AVALIAÇÃO MULTI-INFEED

Os índices explicitados nessa seção são usados para a obtenção de medidas quantitativas para a avaliação do risco da ocorrência de interações entre os elos CCAT eletricamente próximos em um sistema CA.

3.2.1 Potência no Elo CCAT

O indicador potência no elo CCAT se refere à potência ativa passante por esse e será identificado como P_{dc} .

3.2.2 Nível de Curto-Circuito

O nível de curto-circuito de uma barra de um sistema CA é uma medida da sua capacidade de suprimento elétrico. Pode ser calculada com base na Equação (21), onde V_i e Z_{eqi} se referem à tensão pré-falta na barra i e à impedância Thévenin equivalente do sistema vista da barra i sem considerar as compensações *shunts* necessárias para operação dos conversores, respectivamente. Ressalta-se ainda que o indicador pode ser calculado em p.u. por meio do uso da Equação (27), sendo comum a atribuição de 1p.u. para a tensão pré-falta.

$$S_{cci}(MVA) = \frac{V_i^2(kV)}{Z_{eqi}(\Omega)} \quad (26)$$

$$S_{cci}(p.u.) = \frac{1}{Z_{eqi}(p.u.)} \quad (27)$$

3.2.3 Relação de Curto-Circuito

A partir dos indicadores anteriores, pode-se obter o principal parâmetro, chamado de relação de curto-circuito (SCR - *Short Circuit Ratio*) para a avaliação da operação do elo em critérios relacionados a segurança e confiabilidade. Tal grandeza fornece uma boa sensibilidade quanto à robustez do sistema diante do volume de potência CC a ser injetado pelo elo, valores altos de SCR indicam que o elo CC tem - em tese - maior capacidade para recuperar-se após um defeito na rede CA. O SCR para uma dada barra i pode ser obtido a partir do uso das Equação (28) e Equação (29), onde $Z_{Li}(p.u.)$ é a impedância equivalente Thèvenin vista a partir da barra i em p.u. na mesma base do sistema, desconsiderando-se as compensações *shunts* necessárias para operação dos conversores. A Equação (29) só é válida se a base de conversão de Z_{Li} para p.u. for igual à base de potência nominal do sistema.

$$SCR_i = \frac{S_{cci}(MVA)}{P_{dci}(MW)} \quad (28)$$

$$SCR_i = \frac{1}{Z_{Li}(p.u.)} \quad (29)$$

3.2.4 Relação de Curto-Circuito Efetiva

Outro índice relevante a quantificação do potencial de interação entre os elos e os sistemas elétricos CA é relação de curto-circuito efetiva (ESCR - *Effective Short Circuit Ratio*), seu uso em substituição ao SCR se deve ao fato do ESCR ser uma grandeza mais realista, pois no cálculo desse indicador são contabilizados os efeitos dos filtros *shunts* presentes no lado CA. Para o cálculo da ESCR, usa-se a impedância equivalente de barra levando em consideração a impedância dos filtros, de maneira que a potência reativa dos filtros é descontada no nível de curto-circuito. As Equação (30) e Equação (31) podem ser usadas para o cálculo do ESCR de uma barra i , onde $Z_{Ei}(p.u.)$ é a impedância equivalente Thèvenin vista a partir da barra i em p.u. na mesma base de potência do sistema e considerando as compensações *shunts* associadas aos bipolos. A Equação (29) só é válida se a base de conversão de Z_{Ei} para p.u. for igual à base de potência nominal do sistema.

$$ESCR_i = \frac{S_{cci}(MVA) - Q_{filtrosi}(Mvar)}{P_{dci}(MW)} \quad (30)$$

$$ESCR_i = \frac{1}{Z_{Ei}(p.u.)} \quad (31)$$

3.2.5 Fator de Interação *Multi-Infeed*

O fator MIIF (*Multi-Infeed Interaction Factor*) de uma barra j em relação a uma barra i é a razão da variação de tensão na barra j pela variação de tensão na barra i quando se aplica uma variação de tensão na barra i , de modo a caracterizar uma sensibilidade de tensão da barra j em relação a barra i . O MIIF pode ser escrito em função das impedâncias da rede elétrica desde que se considere uma rede composta apenas por impedâncias lineares. O valor do fator varia de 0 a 1, onde 0 indica um desacoplamento total entre as barras j e i (impedância infinita entre as duas barras) e 1 indica que j e i são a mesma barra (impedância nula entre as duas barras). A Equação (32) é usada para o cálculo do MIIF, onde $Z_{i,j}$ e $Z_{i,i}$ são elementos da matriz Z_{barra} .

$$MIIF_{j,i} = \frac{\Delta V_j}{\Delta V_i} = \frac{Z_{i,j}}{Z_{i,i}} \quad (32)$$

3.2.6 Relação de Curto-Circuito Interativa de *Multi-Infeed* e Relação de Curto-Circuito Efetiva Interativa de *Multi-Infeed*

A primeira relação da seção é conhecida pela sigla MISCR (*Multi-Infeed Interactive Short Circuit Ratio*) e representa a relação de curto-circuito de uma barra levando em consideração a influência dos elos CCAT dotados de conversores ligados a barras CA que estão eletricamente próximas daquela barra. A segunda é identificada pela sigla MIESCR (*Multi-Infeed Effective Interactive Short Circuit Ratio*) e se diferencia da primeira pelo uso da ESCR em substituição à SCR. A MISCR pode ser calculada pelas Equação (33) e Equação (34), enquanto que a MIESCR pode ser calculada pelas Equação (35) e Equação (36).

$$MISCR_i = \frac{S_{cci}}{P_{dci} + \sum_j (MIIF_{j,i} * P_{dcj})} \quad (33)$$

$$MISCR_i = \frac{SCR_i * P_{dci}}{P_{dci} + \sum_j (MIIF_{j,i} * P_{dcj})} \quad (34)$$

$$MIESCR_i = \frac{S_{cci} - Q_{filtrosi}}{P_{dci} + \sum_j (MIIF_{j,i} * P_{dcj})} \quad (35)$$

$$MIESCR_i = \frac{ESCR_i * P_{dci}}{P_{dci} + \sum_j (MIIF_{j,i} * P_{dcj})} \quad (36)$$

A partir de [7], sabe-se ainda que os índices MISCR e MIESCR são equivalentes aos índices Relação de Curto-Circuito de *Multi-Infeed* (MSCR *Multi-Infeed Short Circuit Ratio*) e Relação de Curto-Circuito Efetiva de *Multi-Infeed* (MESCR - *Multi-Infeed Effective Short Circuit Ratio*), respectivamente.

3.2.7 Potencial de Interação

Nos cenários em que os elos CC possuem valores nominais distintos de potência ativa, o Potencial de Interação é mais apropriado para se analisar os sistemas *multi-infeed*. De acordo com [9], para o cálculo desse índice ocorre a ponderação do MIIF pela relação entre a potência injetada pelo inversor da barra j e a potência do inversor da barra i analisada, conforme explicitado pela Equação (37). A Tabela 1 mostra a classificação do potencial de interação entre as barras conforme os valores obtidos pela Equação (34).

$$PI_{j,i} = MIIF_{j,i} * \frac{P_{dcj}}{P_{dci}} \quad (37)$$

Tabela 1 – Classificação do Potencial de Interação

Potencial de Interação	Classificação
$0 < PI < 0,15$	Interação Baixa
$0,15 < PI < 0,40$	Interação Moderada
$0,40 < PI$	Interação Alta

4 EFEITOS DE FALHAS DE COMUTAÇÃO NO DESEMPENHO DINÂMICO DE SISTEMAS ELÉTRICOS EM CONFIGURAÇÃO *MULTI-INFEED*

O presente capítulo tem como objetivo ilustrar os efeitos de falhas de comutação simultâneas em sistemas *Multi-Infeed* por meio da avaliação da resposta dinâmica dos diversos elementos integrantes desses sistemas. Dessa forma, usa-se curvas de tensão, frequência e ângulo de carga obtidas para diversos pontos e equipamentos do SIN (Sistema Interligado Nacional) e dos indicadores *Multi-Infeed* para a análise.

De modo a buscar uma maior validade para os resultados das simulações aqui apresentados, usou-se como base o arquivo de simulação de fluxo de potência do Relatório das Diretrizes para Operação Elétrica com Horizonte Quadrimestral Janeiro - Abril 2021, implementado em ANAREDE e emitido pelo ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico). Além dos arquivos em simulação em regime permanente, foram usados os modelos de controladores disponibilizados na base de dados oficial do ONS para simulação em ANATEM, versão 11.10.2 de 2020. Entre os patamares de carga disponíveis no caso de simulação, escolheu-se o caso de carga média não coincidente de janeiro de 2021 como ponto de partida para a análise aqui realizada, uma vez que é provável a operação com elevada injeção de potência pelos elos HVDC nos primeiros meses do ano, dadas as condições hidrológicas da região Norte. Constitui então, um ponto de operação com alta sensibilidade a bloqueios nos bipolos. No caso selecionado, atribuiu-se aos barramentos de carga os valores máximos não coincidentes previstos para o mês de janeiro.

4.1 CASOS PARA SIMULAÇÃO - ANAREDE

A partir do caso obtido no ONS, foram elaborados 6 cenários para utilização nas simulações dinâmicas, sendo o caso 1 o próprio caso selecionado do ONS sem alterações significativas e os demais obtidos conforme ilustrado na Figura 14. Todos os casos contam com o mesmo patamar de carga e as principais diferenças entre eles estão listadas nas Tabela 2, Tabela 3 e Tabela 4.

Figura 14 – Fluxograma de Confeção dos Casos

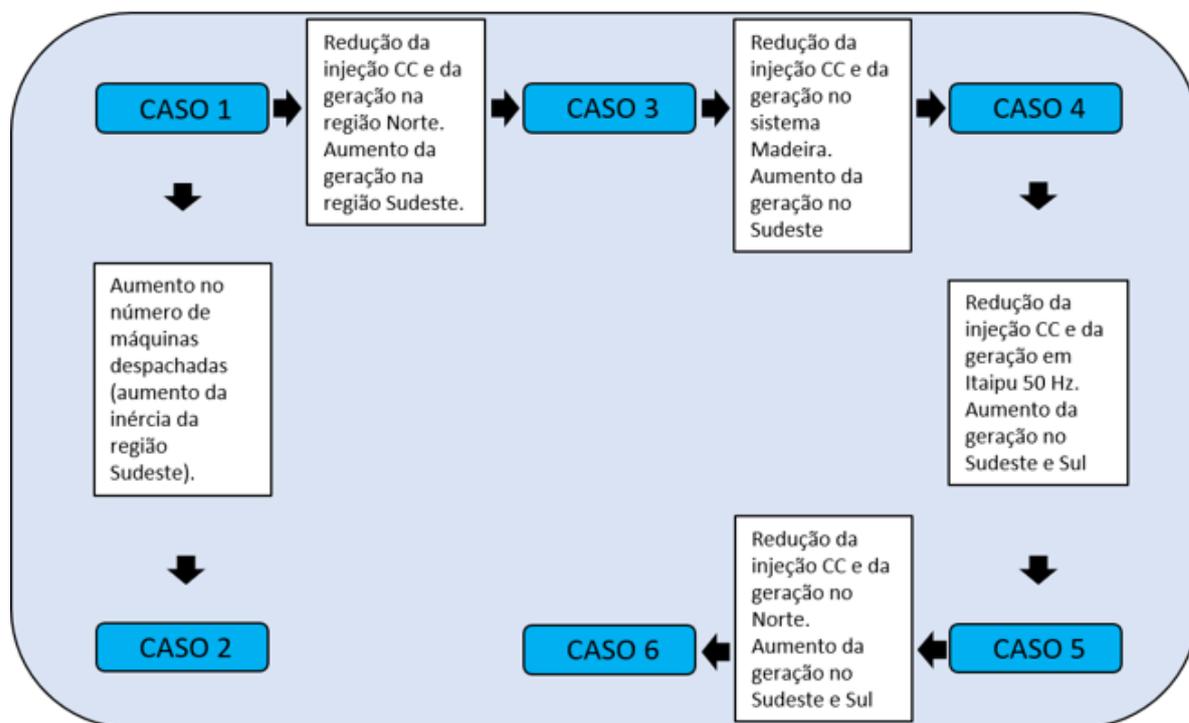


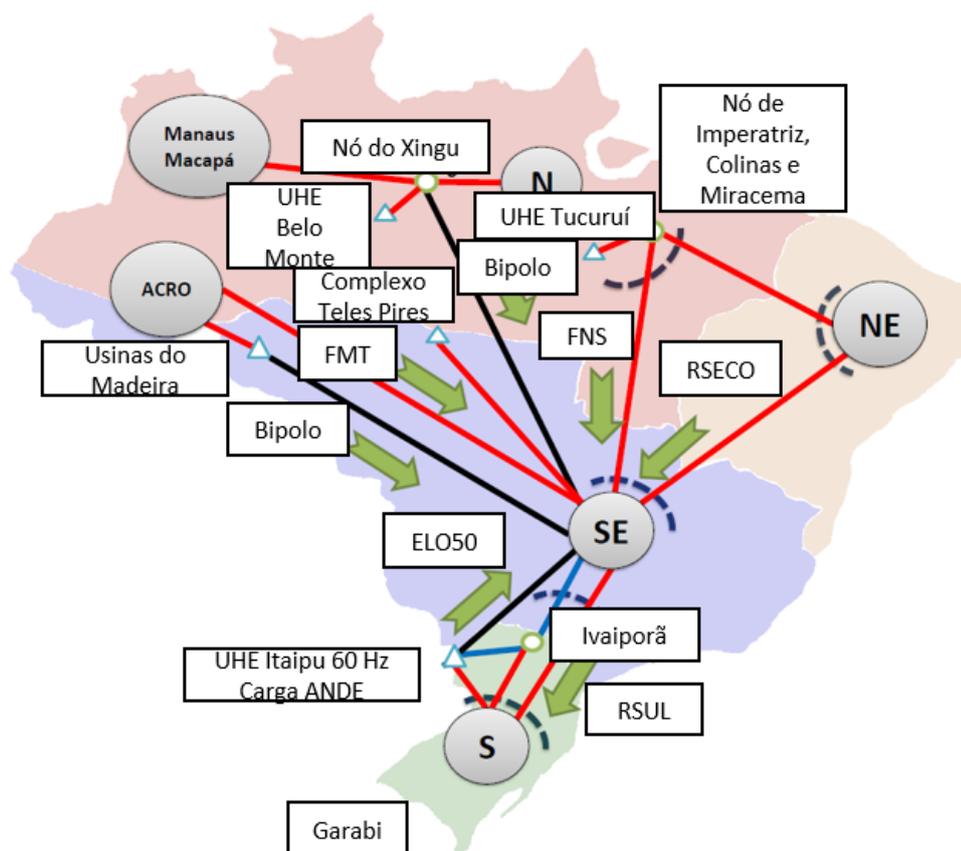
Tabela 2 – Injeção CC, Geração e Intercâmbios Regionais

Injeção na Rede CA [MW]						
Subestação	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6
Xingu	-8000	-8000	-6000	-6000	-6000	-4000
Terminal Rio	3789,9	3789,9	2881,8	2881,8	2881,8	1947,5
Estreito	3826,3	3826,3	2902,3	2902,3	2902,3	1956,6
Porto Velho	-6300	-6300	-6300	-4200	-4200	-4200
Araraquara 2	5845,9	5845,9	5845,9	3998,2	3998,2	3998,2
Foz do Iguaçu	-4500	-4500	-4500	-4500	-3000	-3000
Ibiúna	4352,8	4352,8	4352,8	4352,8	2934,6	2934,6
INJEÇÃO NO SU- DESTE	17814,9	17814,9	15982,8	14135,1	12716,9	10836,9
Geração [MW]						
Usina	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6
Belo Monte	6267	6267	4000	4000	4000	2000
Tucuruí	5928	5928	5928	5928	5928	5928
Santo Antônio	3572	3568	3568	2518	2518	2518
Jirau	3589	3589	3589	2525	2525	2525
Itaipu 50Hz	6714	6714	6714	6714	5212	5212
Itaipu 60Hz	6300	6300	6300	6300	6300	6300
Angra 1	640	640	640	640	640	640
Angra 2	1220	1220	1220	1220	1220	1220
Marimbondo	1190	1190	1264	1413	1413	1413
São Simão	1478	1478	1428	1596	1596	1596
Itumbiara	1710	1710	1938	2166	2166	2166
Emborcação	894	894	1013	1132	1132	1132
Nova Ponte	383	383	433	484	484	484
Ilha Solteira	2429	2410	2388	2112	2006	2198
Total Sudeste	33326	33357	35574	37515	35907	36099
Total Norte	16686	16675	14407	14407	14407	12407
Total Sul	9031	9024	9021	9025	10547	12243
Belo Monte + Tucuruí	12195	12195	9928	9928	9928	7928
Intercâmbios [MW]						
Usina	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6
FNS	719	707	501	490	490	474
RSUL	7731	7740	7750	7749	6202	4479
RSECO	1722	1699	1442	1439	1439	1442
FMT	3042	3039	3180	3246	3246	3244

Na Tabela 2, apresentam-se os valores das injeções de potência ativa na rede CA pelos conversores integrantes dos sistemas CCAT (com exceção dos sistemas *back-to-back* e os despachos de algumas usinas selecionadas do Sudeste, que foram escolhidas por estarem fortemente acopladas eletricamente a subestações conversoras pelos motivos descritos na sequência. No caso das usinas de Santo Antônio, Jirau e Itaipu 50 Hz, não há acoplamento síncrono com o restante do SIN, sendo a potência dessa usinas transmitida inteiramente por sistemas CCAT, de modo que em cenários de falha de comutação em seus respectivos bipolos haverá considerável sensibilização das usinas.

No caso de Belo Monte e Tucuruí há transferência significativa da potência gerada por essas pelo sistema CCAT localizado na SE 500 kV Xingu. As demais usinas foram escolhidas por estarem geoeletricamente próximas de um ou mais terminais inversores na rede do Sudeste e no caso de Ilha Solteira também por constituir uma usina de grande porte da região SE. Além disso, apresentou-se os valores de geração total nas regiões Sul, Norte e Sudeste. O total apresentado para o Sudeste considera apenas os despachos hidráulicos das seguintes bacias hidrográficas: Paraná, Parapanema, Tietê, do Grande, Parnaíba e Paraguai, nas quais há variação de geração entre os casos de estudo. Expôs-se ainda alguns valores de intercâmbios regionais, sendo eles o Fluxo Norte-Sul (FNS), o Recebimento do Sul (RSUL), o Recebimento do Sudeste-Centro Oeste (RSECO) e o Fluxo Mato Grosso (FMT), ver a Figura 15. Os valores de RSUL indicam que todos estão dentro dos limites operativos vigentes para a interligação Sul - Sudeste.

Figura 15 – Mapa do SIN com Intercâmbios Regionais



Fonte – ONS (adaptado), 2021.

Na Tabela 2 e na Tabela 4, pode-se verificar que os valores de injeção CCAT e de tensão nos casos 1 e 2 são iguais, com exceção da tensão na SE 500 kV Estreito, na qual o valor está muito próximo. A principal diferença entre os dois casos está no número de unidades geradoras despachadas em cada usina: no caso 1 foi considerado o critério de inércia mínima, de modo a se despachar o menor número possível de máquinas para atender ao despacho, enquanto que no caso 2 foi adotado o critério de inércia máxima, no qual fez-se o despacho do maior número de máquinas respeitando o despacho e os limites operativos de cada unidade. Em termos de geração, há uma pequena diferença entre as gerações totais das regiões resultante da correção de erros que apareceram na simulação no ANATEM, sobretudo associados a máquinas operando no limite superior de potência ativa. Na Tabela 3 é apresentada a diferença no número de máquinas despachadas para as usinas selecionadas. Cabe ressaltar que houve incremento do número de máquinas despachadas em outras usinas da rede do Sudeste que não se encontram listadas na tabela, o que pode ser percebido com base nos números totais de máquinas despachadas na rede do Sul e do Sudeste considerando as usinas das mesmas bacias usadas no cálculo do total de geração do Sudeste apresentado na Tabela 2. Espera-se que a partir da comparação dos resultados dos casos 1 e 2, possam ser caracterizados os efeitos no comportamento dinâmico da maior inércia e nível de curto-circuito na região Sudeste.

Ainda com base na Tabela 2, percebe-se que à medida que se avança em direção ao caso 6, seguindo a sequência de casos 1, 3, 4, 5 e 6, ocorre a gradual redução da injeção CC na rede CA, da geração nas usinas na rede adjacente aos terminais retificadores e o gradual aumento da geração no Sudeste (e no Sul, nos casos 5 e 6), para que sejam respeitados o balanço carga-geração e os limites da barra de folga para a convergência adequada. A redução da injeção pelos bipolos e aumento da geração na rede do Sudeste também significa o aumento da inércia e do nível de curto-circuito do subsistema do Sudeste, visto que a carga anteriormente atendida pela potência assíncrona dos elos passa a ser suprida pelas máquinas girantes do Sudeste. Da mesma forma que se espera que o caso 2 seja mais estável que o caso 1, sob o ponto de vista dinâmico, espera-se que o caso 6 seja o mais estável de todos, visto que esse possui a menor injeção CC e o maior despacho síncrono no Sudeste.

Para o ajuste dos casos, adotou-se a premissa de se manter um perfil de tensão semelhante nos 6 casos de estudo, em especial nas barras terminais dos sistemas CCAT. Os valores de tensão empregados nessas estão listados na Tabela 4 e o objetivo de tal ajuste é facilitar a análise da dinâmica de tensão nesses barramentos por meio da adoção de pontos iniciais semelhantes antes de quaisquer eventos de falha de comutação. Adotar valores iguais para a tensão inicial em todos os casos também é essencial para o cálculo do Fator de Interação *Multi-Infeed* e do Potencial de Interação.

Tabela 3 – Máquinas Despachadas - Usinas Selecionadas do SIN

Usina	Número de Máquinas Despachadas					
	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6
Belo Monte	12	12	7	7	7	4
Tucuruí	17	17	17	17	17	17
Santo Antônio	44	44	44	30	30	30
Jirau	50	50	50	35	35	35
Itaipu 50Hz	9	10	9	9	7	7
Itaipu 60Hz	9	10	9	9	9	9
Angra 1	1	1	1	1	1	1
Angra 2	1	1	1	1	1	1
Marimbondo	7	8	7	8	8	8
São Simão	6	6	6	6	6	6
Itumbiara	5	6	6	6	6	6
Emborcação	3	4	4	4	4	4
Nova Ponte	3	3	3	3	3	3
Total Sudeste	237	269	261	263	261	261
Total Sul	86	86	86	86	96	98

Tabela 4 – Tensões nas Subestações Terminais dos Bipolos

Subestação	Tensões CA [pu]					
	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6
Nome	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6
Xingu	1,035	1,035	1,035	1,035	1,035	1,035
Terminal Rio	1,046	1,046	1,046	1,045	1,045	1,045
Estreito	1,059	1,060	1,060	1,059	1,060	1,060
Porto Velho	1,042	1,042	1,042	1,042	1,042	1,042
Araraquara 2	1,060	1,060	1,060	1,060	1,060	1,060
Foz do Iguaçu	1,024	1,024	1,024	1,024	1,025	1,025
Ibiúna	1,025	1,025	1,025	1,025	1,025	1,025

4.2 ÍNDICES DE AVALIAÇÃO MULTI-INFEED CALCULADOS

A partir dos 6 casos apresentados na etapa anterior e fazendo-se o uso do software ANATEM, calculou-se os principais índices de avaliação *Multi-Infeed*. A Tabela 5 traz os valores de MIIF calculados para as possíveis interações entre as quatro subestações inversoras localizadas na rede do Sudeste para cada um dos 6 casos. Com base nas informações expostas nela fica claro que à medida que se segue a sequência de casos 1, 3, 4, 5 e 6, ocorre a redução do nível de interação entre todos os terminais inversores em relação aos níveis do caso imediatamente anterior, o que está associado à redução da injeção CC na região e ao aumento da geração síncrona na região. A Tabela 6 apresenta os valores de MIIF em termos percentuais considerando como referências os valores obtidos no caso 1. A Tabela 7 apresenta os valores calculados do Potencial de Interação, que conforme descrito pela Equação (32), nada mais é que o MIIF ponderado pela relação entre a potência injetada pelo inversor da barra j e a potência injetada pelo inversor da barra i . Por conta dessa ponderação não se tem o mesmo padrão de decréscimo do indicador que se verificou na tabela de MIIF,

justamente porque agora as modificações nas injeções CCAT serão consideradas no cálculo do indicador.

Os valores de outros indicadores de interação *Multi-Infeed* são apresentados na Tabela 8, identificados pelas siglas Pdc, Scc, MSCR e MISCR. Conforme a Equação (26), sabe-se que o Scc(MVA) de uma dada barra depende de sua tensão e da impedância sistêmica vista a partir dela. Observando-se os resultados obtidos para o indicador nos casos de estudo e sabendo-se que as tensões pré-falta nos terminais dos sistemas CCAT foram mantidas praticamente iguais em todos os casos, a variação percebida no Scc(MVA) é consequência da diferença no valor da impedância sistêmica por conta do número distinto de máquinas sincronizadas em cada caso. Com relação aos demais indicadores, tratam-se todos de relações de curto-circuito, direto no caso da SCR, ou com algum tipo de ponderação no caso da MSCR e da MISCR. Com base nos valores obtidos para os 6 casos, pode-se verificar que à medida que se avança na sequência de casos 1, 3, 4, 5 e 6, ocorre o aumento dos valores calculados para esses três indicadores, deixando evidente que as injeções CCAT têm impacto nas relações de curto-circuito de suas barras inversoras.

Tabela 5 – Fator de Interação *Multi-Infeed*

Barra de Medição de Afundamento				
Barra de Aplicação	IBIUNA	ARARQ2	ESTREIT	T.RIO
Caso 1				
IBIUNA	1,000000	0,383799	0,244293	0,290698
ARARQ2	0,468983	1,000000	0,359466	0,350264
ESTREIT	0,286396	0,337367	1,000000	0,252858
T.RIO	0,268698	0,266344	0,201038	1,000000
Caso 2				
IBIUNA	1,000000	0,368854	0,228801	0,282143
ARARQ2	0,456572	1,000000	0,340116	0,341124
ESTREI	0,271937	0,319522	1,000000	0,242126
T.RIO	0,258304	0,253689	0,188032	1,000000
Caso 3				
IBIUNA	1,000000	0,374334	0,224197	0,276276
ARARQ2	0,459703	1,000000	0,332936	0,331098
ESTREI	0,278969	0,329314	1,000000	0,238872
T.RIO	0,256398	0,251329	0,178628	1,000000
Caso 4				
IBIUNA	1,000000	0,348867	0,211918	0,267776
ARARQ2	0,457119	1,000000	0,326533	0,329472
ESTREI	0,268911	0,308295	1,000000	0,231491
T.RIO	0,246987	0,232626	0,168995	1,000000
Caso 5				
IBIUNA	1,000000	0,336064	0,203738	0,260536
ARARQ2	0,447953	1,000000	0,324817	0,326988
ESTREI	0,263444	0,305195	1,000000	0,229778
T.RIO	0,239791	0,228155	0,166727	1,000000
Caso 6				
IBIUNA	1,000000	0,334082	0,203263	0,254747
ARARQ2	0,445596	1,000000	0,320935	0,317081
ESTREI	0,261295	0,300427	1,000000	0,223046
T.RIO	0,228969	0,215939	0,157598	1,000000

Tabela 6 – Fator de Interação *Multi-Infeed* - Comparação Percentual

Barra de Medição de Afundamento				
Barra de Aplicação	IBIUNA	ARARQ2	ESTREIT	T.RIO
Caso 1				
IBIUNA		100%	100%	100%
ARARQ2	100%		100%	100%
ESTREI	100%	100%		100%
T.RIO	100%	100%	100%	
Caso 2				
IBIUNA		96,1%	93,7%	97,1%
ARARQ2	97,4%		94,6%	97,4%
ESTREI	95,0%	94,7%		95,8%
T.RIO	96,1%	95,2%	93,5%	
Caso 3				
IBIUNA		97,5%	91,8%	95,0%
ARARQ2	98,0%		92,6%	94,5%
ESTREI	97,4%	97,6%		94,5%
T.RIO	95,4%	94,4%	88,9%	
Caso 4				
IBIUNA		90,9%	86,7%	92,1%
ARARQ2	97,5%		90,8%	94,1%
ESTREI	93,9%	91,4%		91,5%
T.RIO	91,9%	87,3%	84,1%	
Caso 5				
IBIUNA		87,6%	83,4%	89,6%
ARARQ2	95,5%		90,4%	93,4%
ESTREI	92,0%	90,5%		90,9%
T.RIO	89,2%	85,7%	82,9%	
Caso 6				
IBIUNA		87,0%	83,2%	87,6%
ARARQ2	95,0%		89,3%	90,5%
ESTREI	91,2%	89,1%		88,2%
T.RIO	85,2%	81,1%	78,4%	

Tabela 7 – Potencial de Interação

Barra de Medição de Afundamento				
Barra de Aplicação	IBIUNA	ARARQ2	ESTREIT	T.RIO
Caso 1				
IBIUNA	1,000000	0,515465	0,214625	0,253656
ARARQ2	0,349190	1,000000	0,235143	0,227564
ESTREIT	0,325984	0,515737	1,000000	0,251137
T.RIO	0,307936	0,409953	0,202416	1,000000
Caso 2				
IBIUNA	1,000000	0,495383	0,201125	0,245657
ARARQ2	0,339956	1,000000	0,222612	0,221149
ESTREI	0,309357	0,488179	1,000000	0,239824
T.RIO	0,296669	0,391317	0,189837	1,000000
Caso 3				
IBIUNA	1,000000	0,502743	0,149486	0,182912
ARARQ2	0,342287	1,000000	0,165290	0,163218
ESTREI	0,418392	0,663323	1,000000	0,237188
T.RIO	0,387272	0,509836	0,179896	1,000000
Caso 4				
IBIUNA	1,000000	0,320448	0,141300	0,177285
ARARQ2	0,497659	1,000000	0,237029	0,237476
ESTREI	0,403308	0,424709	1,000000	0,229859
T.RIO	0,373057	0,322743	0,170195	1,000000
Caso 5				
IBIUNA	1,000000	0,457869	0,201496	0,255852
ARARQ2	0,328786	1,000000	0,235783	0,235686
ESTREI	0,266376	0,420438	1,000000	0,228158
T.RIO	0,244181	0,316540	0,167911	1,000000
Caso 6				
IBIUNA	1,000000	0,455263	0,135555	0,169047
ARARQ2	0,326988	1,000000	0,157060	0,154405
ESTREI	0,391809	0,613891	1,000000	0,221940
T.RIO	0,345046	0,444445	0,158383	1,000000

Tabela 8 – Multi-Infeed - Outros Indicadores Calculados

Nome da Barra	Pdc [MW]	Scs[MVA]	SCR	MSCR	MISCR
Caso 1					
IBIUNA	4352,84	21768,11	5,0009	3,1463	2,5208
ARARQ2	5846,13	25767,80	4,4077	2,9556	2,4323
ESTREIT	3824,22	20930,79	5,4732	3,4902	2,6144
T.RIO	3798,19	19416,53	5,1120	3,3889	2,6620
Caso 2					
IBIUNA	4352,77	21879,50	5,0266	3,1953	2,5880
ARARQ2	5845,91	26110,04	4,4664	3,0192	2,5036
ESTREI	3826,25	21341,89	5,5778	3,6005	2,7370
T.RIO	3789,87	19459,80	5,1347	3,4339	2,7343
Caso 3					
IBIUNA	4352,77	21837,24	5,0169	3,3105	2,7335
ARARQ2	5845,91	25972,13	4,4428	3,1357	2,6589
ESTREI	2902,27	21315,44	7,3444	4,3391	3,1666
T.RIO	2881,80	19446,83	6,7481	4,1634	3,2486
Caso 4					
IBIUNA	4352,77	21843,51	5,0183	3,5490	3,0612
ARARQ2	3998,18	26018,26	6,5075	4,0458	3,2996
ESTREI	2902,27	21329,44	7,3492	4,6667	3,5707
T.RIO	2881,80	19449,35	6,7490	4,4226	3,6161
Caso 5					
IBIUNA	2934,56	21938,75	7,4760	4,6436	3,9024
ARARQ2	3998,18	26070,16	6,5205	4,3308	3,6218
ESTREI	2902,27	21338,70	7,3524	4,8828	3,8388
T.RIO	2881,81	19461,50	6,7532	4,6446	3,9059
Caso 6					
IBIUNA	2934,08	21945,83	7,4796	4,9351	4,2489
ARARQ2	3998,35	26074,42	6,5213	4,6321	3,9800
ESTREI	1956,72	21339,38	10,9057	6,4458	4,8951
T.RIO	1947,02	19462,61	9,9961	6,1787	5,1327

4.3 METODOLOGIA PARA SIMULAÇÃO DE FALHAS NO ANATEM

Nas simulações de falhas de comutação aqui descritas, tomou-se como base os resultados obtidos em [10]. Tal referência foi confeccionada pelo ONS e teve como objetivo principal a obtenção dos valores de Diferença do Início da Falha (DIF) e de Tempo de Duração da Tensão CC abaixo de Zero (TVZ).

Segundo [10], como a falha de comutação em cada bipolo não ocorre no início da falta aplicada em uma das barras do sistema, o indicador DIF contabiliza o tempo entre o instante da falta e o instante em que a tensão CC passa por zero pela primeira vez no bipolo. Ainda conforme [10], a variável TVZ representa a duração do período que começa no primeiro momento no qual a tensão CC assume um valor igual ou menor do que zero e termina no instante em que ela se torna novamente positiva e não retorna mais a valores abaixo de zero. Os valores de DIF e de TVZ presentes em [10] foram obtidos por meio de simulações utilizando o programa PSCAD, considerando faltas monofásicas nas subestações inversoras de Ibiúna, Araraquara 2, Estreito, Terminal Rio e outras subestações consideradas relevantes para a estabilidade do SIN, considerando a configuração 2020. Além disso, os eventos sistêmicos na rede CA foram simulados com a abertura de um ou dois circuitos associados ao ponto do curto.

O equivalente sistêmico utilizado pelo ONS para as simulações do relatório fez uso de modelos detalhados, com controles que representam de maneira mais fiel a implementação em campo dos bipolos, de modo a aproximar os resultados obtidos com o que se verifica nos eventos reais do SIN. O procedimento de simulação então consistiu na aplicação de faltas sistêmicas semelhantes nos seis casos confeccionados considerando os valores de TVZ e DIF listados em [10] no ANATEM por meio dos comandos APFC (Aplica Falha de Comutação) e RMFC (Remove Falha de Comutação) e a análise dos resultados será baseada na comparação entre as curvas de tensão, frequência e ângulo de carga obtidas para elementos selecionados em cada caso.

4.4 CASO DE ESTUDO: PERDA DUPLA DA LT 500 KV IBIÚNA - BATEIAS C1 E C2

A falta sistêmica escolhida para a análise foi a perda dupla da LT 500 kV Ibiúna - Bateias. Tal linha de transmissão foi escolhida por constituir um importante ramal da interligação Sudeste-Sul e por ter um de seus terminais conectado diretamente a SE 500 kV Ibiúna, onde se encontram os inversores do sistema CCAT responsável pela injeção da energia oriunda no Paraguai (Itaipu 50 Hz) no SIN. Conforme [10], tal ocorrência resultará em falhas de comutação simultâneas nos inversores dos sistemas CCAT com DIFs e TVZs explicitados na Tabela 9. A partir dessa pode-se verificar que o primeiro elo sensibilizado pela perda dupla do circuito será o de Ibiúna e que a falha de comutação de maior duração ocorre no Bipolo 2 de Araraquara 2.

Com base nos dados apresentados na Tabela 9 e assumindo-se $t = 200ms$ e

Tabela 9 – DIF e TVZ - Perda Dupla da LT 500 kV Ibiúna - Bateias

Indicador	ESTREIT	T.RIO	ARARQ2- BIP1	ARARQ2- BIP2	IBIUNA
DIF[ms]	15	14	12	11	9
TVZ[ms]	48	32	16	72	32

$t = 300ms$ como os instantes de início e fim da falta na LT 500 kV Ibiúna - Bateias que foi aplicada no ANATEM, elaborou-se a Tabela 10, que divide o intervalo de 0 a $300ms$ em onze intervalos considerando como pontos limites os valores de TVZ e de DIF explicitados na Tabela 9 acrescidos do instante de aplicação da falta. Tal divisão permite que se possa verificar em quais intervalos há falhas simultâneas de comutação em inversores de bipolos distintos. As condições simuladas consideram uma falta monofásica de duração de $100ms$, de acordo com os critérios dos Procedimentos de Rede [11].

Tabela 10 – Bipolos em Falha de Comutação por Intervalo de Tempo Durante Falta da LT

Falta Aplicada em $t = 200ms$ e Removida em $t = 300ms$						
Bipolo em Falha de Comutação						
Intervalo[ms]	ESTREIT	T.RIO	ARARQ2- BIP1	ARARQ2- BIP2	IBIUNA	Bipolos sob Falha
$0 \leq t < 209$	Não	Não	Não	Não	Não	0
$209 \leq t < 211$	Não	Não	Não	Não	Sim	2
$211 \leq t < 212$	Não	Não	Não	Sim	Sim	3
$212 \leq t < 214$	Não	Não	Sim	Sim	Sim	4
$214 \leq t < 215$	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	5
$215 \leq t < 228$	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	6
$228 \leq t < 241$	Sim	Sim	Não	Sim	Sim	5
$241 \leq t < 246$	Sim	Sim	Não	Sim	Não	3
$246 \leq t < 263$	Sim	Não	Não	Sim	Não	2
$263 \leq t < 283$	Não	Não	Não	Sim	Não	1
$283 \leq t < 300$	Não	Não	Não	Não	Não	0

Os dados da Tabela 10 permitem que se infira que de $t = 211ms$ a $t = 263ms$ ocorrem falhas simultâneas de comutação em elos distintos e que no intervalo $t = 215ms$ a $t = 228ms$ ocorrem falhas de comutação simultâneas em todos os elos, de modo que durante esse intervalo não haverá injeção de potência ativa no sistema CA pelo inversores dos sistemas CCAT. Na Tabela 11 é apresentada a evolução esperada para a injeção CC à medida que as falhas de comutação ocorrem. Ao se analisar os dados nela apresentados, fica claro que à medida que as falhas de comutação ocorrem, reduz-se a injeção CC até que essa seja completamente zerada no instante $t = 215ms$. Sequencialmente, a partir do instante $t = 228ms$ as falhas de comutação começam a

ser eliminadas, de forma que se tem o incremento gradual da injeção CC até que esse retorne ao valor imediatamente anterior à perda dupla do circuito em $t = 200ms$. É importante ressaltar que os valores são teóricos, de maneira que a simulação dinâmica poderá trazer valores com desvios em relação aos presentes na tabela.

Tabela 11 – Injeção CC na Rede CA

Injeção CC Total na Rede CA[MW]						
Intervalo[ms]	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6
$0 \leq t < 209$	17814,9	17814,9	15982,8	14135,1	12716,9	10836,9
$209 \leq t < 211$	13462,1	13462,1	11630	9782,3	9782,3	7902,3
$211 \leq t < 212$	10530,5	10530,5	8698,4	7779,3	7779,3	5899,3
$212 \leq t < 214$	7616,1	7616,1	5784	5784,1	5784,1	3904,1
$214 \leq t < 215$	3826,2	3826,2	2902,2	2902,3	2902,3	1956,6
$215 \leq t < 228$	0	0	0	0	0	0
Varição Instantânea da Injeção CC Total[MW]						
Instante[ms]	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6
$t = 209$	-4352,8	-4352,8	-4352,8	-4352,8	-2934,6	-2934,6
$t = 211$	-2931,6	-2931,6	-2931,6	-2003	-2003	-2003
$t = 212$	-2914,4	-2914,4	-2914,4	-1995,2	-1995,2	-1995,2
$t = 214$	-3789,9	-3789,9	-2881,8	-2881,8	-2881,8	-1947,5
$t = 215$	-3826,2	-3826,2	-2902,2	-2902,3	-2902,3	-1956,6
Déficit Acumulado na Injeção CC Total[MW]						
Intervalo[ms]	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6
$0 \leq t < 209$	0	0	0	0	0	0
$209 \leq t < 211$	4352,8	4352,8	4352,8	4352,8	2934,6	2934,6
$211 \leq t < 212$	7284,4	7284,4	7284,4	6355,8	4937,6	4937,6
$212 \leq t < 214$	10198,8	10198,8	10198,8	8351	6932,8	6932,8
$214 \leq t < 215$	13988,7	13988,7	13080,6	11232,8	9814,6	8880,3
$215 \leq t < 228$	17814,9	17814,9	15982,8	14135,1	12716,9	10836,9

As falhas de comutação na simulação são vistas pelo sistema CA receptor como uma variação abrupta de potência, conduzindo a transmissão de potência a zero quase instantaneamente. Após a eliminação da falha, entretanto, a injeção CC será restaurada de modo gradual até o valor original. Dessa forma, verifica-se 5 degraus negativos associados às falhas nos bipolos e posteriormente o retorno gradual da injeção CC total. Os degraus negativos resultam em déficits de geração que deverão ser supridos com o aumento da potência elétrica nas máquinas síncronas conectadas ao sistema receptor, resultando em desaceleração. No lado do retificador, as máquinas síncronas aceleram, em função da redução da potência elétrica gerada. Como consequência, observa-se durante as falhas de comutação o aumento das defasagens angulares entre os rotores das máquinas síncronas conectadas aos terminais retificador e inversor. Essa condição é especialmente crítica na hipótese de haver ligação síncrona (em CA) entre os terminais retificador e inversor, pois resulta no agravamento da estabilidade do sistema. Em contrapartida, o retorno da injeção CC pelo elo CC introduzirá aumento da potência ativa nas máquinas do lado do retificador e redução nas máquinas do lado

do inversor, conduzindo à redução do ângulo de carga entre as máquinas.

Sabe-se que no período que antecede a perda dupla ($t < 200ms$) e no período em que todos os inversores já retornaram à operação normal se tem a mesma potência injetada a partir de inversores. Espera-se então que com o retorno dos inversores à operação, os ângulos de carga de todas as unidades geradoras do SIN tendam aos valores registrados em $t < 200ms$, resultado que se espera de um sistema estável pois a diferença de potência ativa entre o início e o fim dos eventos do período transitório é igual a zero em todos os casos. Analisando-se os degraus de carga apresentados na Tabela 11, verifica-se que as magnitudes desses são reduzidas conforme se avança do caso 1 ao 6, pois ocorre também a redução da injeção CC inicial. Sabe-se que quanto menor for a magnitude de uma função degrau, menor será a magnitude da curva de resposta do sistema, que nesse caso será composta pelas curvas dos ângulos de carga das diversas unidades geradoras. Espera-se então que as variações nos ângulos de carga ao longo do período transitório sejam menores (mais amortecidas) nos casos com menores injeções CC.

4.5 RESULTADOS OBTIDOS

Apresentam-se agora os resultados da simulação dos seis pontos de operação (casos) por meio do uso de gráficos de variáveis elétricas de elementos selecionados. Para as plotagens de tensão e frequência, escolheram-se as barras equivalentes das subestações terminais dos bipolos. No caso do ângulo de carga, escolheram-se as barras das usinas de Itaipu, Belo Monte e Emborcação. A UHE Itaipu foi selecionada por constituir a maior usina do sistema e por seu sistema de transmissão em 765 kV estar geoeletricamente próximo ao bipolo de Ibiúna, além do fato de que o lado paraguaio da usina está conectado ao SIN por esse bipolo. A escolha da UHE Belo Monte está associada ao fato de haver ligação síncrona em paralelo com os elos, o que resulta em risco de perda de sincronismo, situação que não ocorre no Madeira e Itaipu 50 Hz. A resposta dinâmica da UHE Belo Monte aos eventos de falha servirá como base para se entender o comportamento da geração na rede da região Norte. Por último, a UHE Emborcação se encontra na região Sudeste, sob forte influência das injeções CC dos múltiplos sistemas CCAT, de maneira que sua resposta permite que se compreenda os efeitos associados às falhas de comutação no subsistema do Sudeste. Optou-se ainda por fazer uma divisão nos elementos selecionados para a análise entre aqueles associados aos terminais retificadores e aqueles associados aos terminais inversores, conforme a Tabela 12.

Tabela 12 – Elementos Seleccionados

REDE INVERSORA	REDE RETIFICADORA
SE Ibiúna (Barra: 86)	SE Foz do Iguaçu (Barra: 85)
SE Araraquara 2 (Barra: 7057)	SE C. Porto Velho (Barra: 7055)
SE Terminal Rio (Barra: 9605)	SE Xingu (Barra: 8100)
SE Estreito (Barra: 3010)	
UHE Itaipu 60Hz (Barra: 1107)	UHE Itaipu 50Hz (Barra: 1100)
UHE Emborcação (Barra: 300)	UHE Belo Monte (Barra: 6729)

4.5.1 Resultados de Injeção CC na Simulação

Antes da exposição dos resultados obtidos nos elementos seleccionados acima, explicita-se as curvas de injeção CC total (Figura 16) e de variação na injeção CC total (Figura 17) ao longo do primeiro segundo da simulação. Por meio delas é possível observar que o comportamento dinâmico da injeção CC mostra que quanto maior for o nível original de injeção CC, maior será a variação negativa da potência ativa disponibilizada ao SIN e também da frequência sistêmica durante os eventos verificados nos inversores.

Na Figura 18, busca-se fazer uma associação entre a curva de injeção CC obtida na simulação com os valores calculados na Tabela 11 para os instantes em que ocorrem falhas de comutação. Fica claro então que os valores estimados estão próximos aos valores resultantes da simulação e que durante o intervalo entre $t = 215ms$ e $t = 228ms$ ocorre a falha de comutação simultânea em todos os inversores e a injeção CC é nula.

A partir de $t = 228ms$, inicia-se a recuperação da injeção de maneira gradual. Nota-se, entretanto, que no intervalo entre $t = 235ms$ e $t = 241ms$ a injeção CC total é novamente nula, tal fenômeno está associado ao comportamento da geração sistêmica, que precisa de um tempo para assumir um novo ponto de operação e não representa um novo período de falha de comutação simultânea em todos os inversores.

Figura 16 – Injeção CC Total [MW]

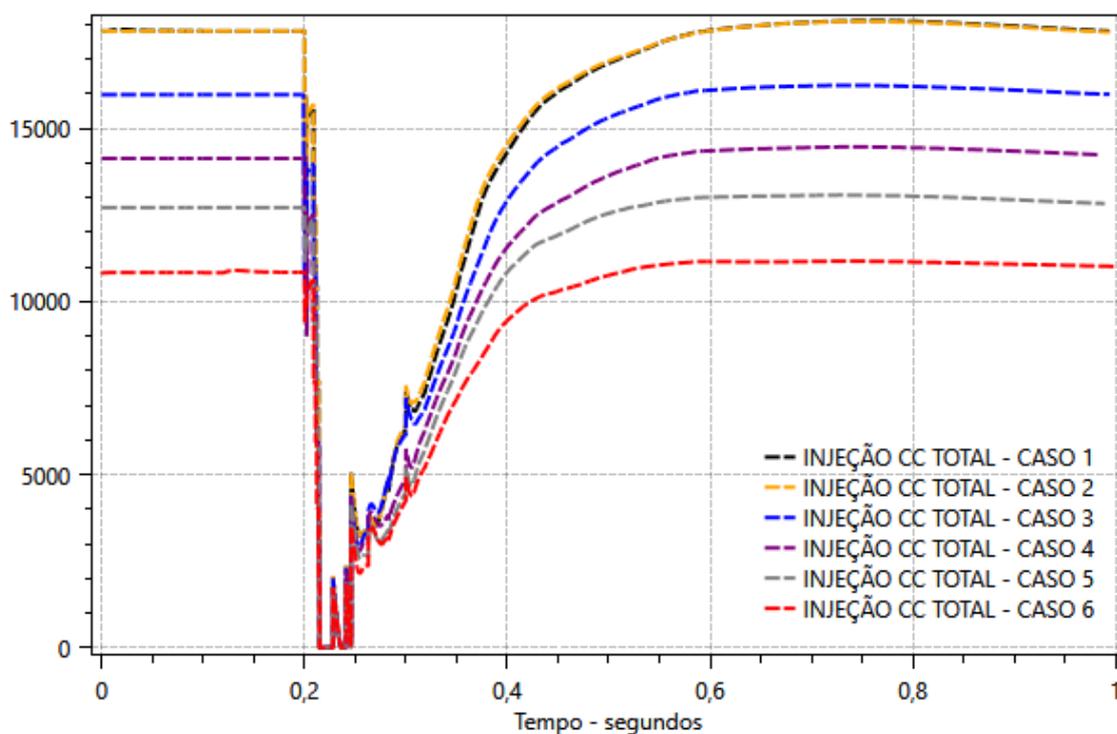


Figura 17 – Variação na Injeção CC Total [MW]

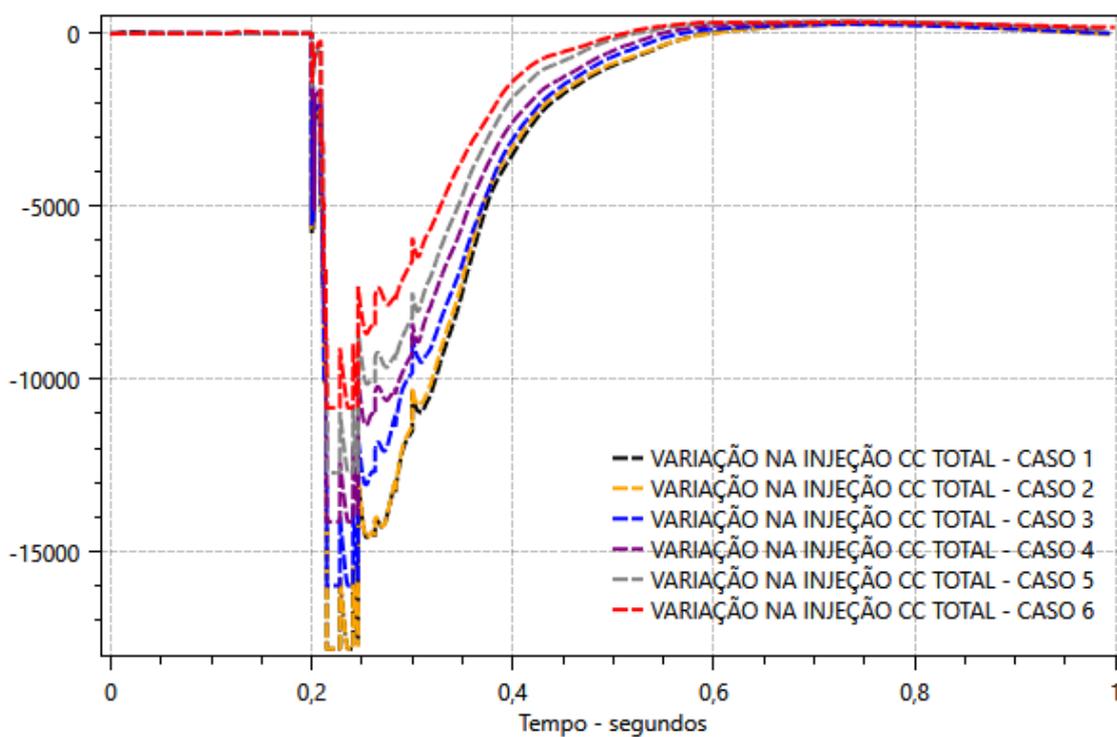
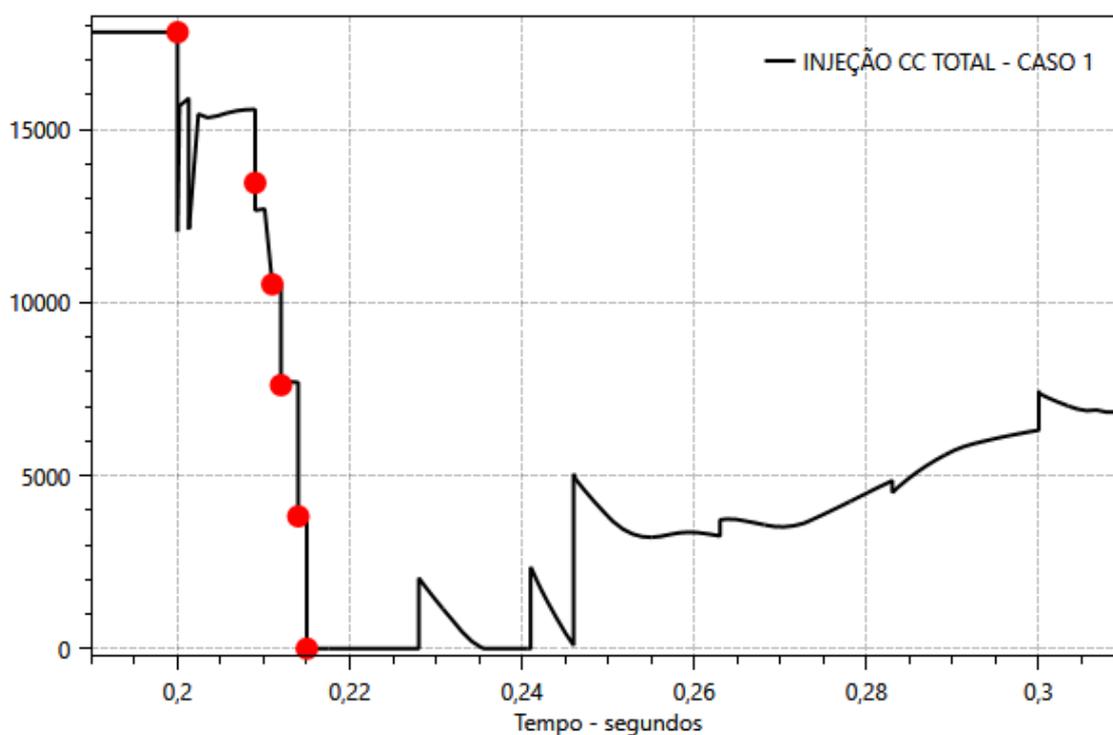


Figura 18 – Injeção CC Total - Caso 1 - Detalhe [MW]



4.5.2 Rede Próxima aos Inversores

4.5.2.1 Análise dos Resultados de Frequência e Ângulo de Carga

Nas figuras abaixo (Figura 19, Figura 20, Figura 21 e Figura 22), apresentam-se as frequências obtidas na simulação para as subestações inversoras do Sudeste. Para as SE Ibiúna, SE Araraquara 2 e SE Terminal Rio, considera-se a frequências medidas em seus respectivos síncronos e para a SE Estreito, consideram-se as frequência medida na UHE Nova Ponte. De maneira geral, percebe-se que há queda na frequência a partir do momento em que os inversores começam a entrar em falha de comutação e tal comportamento ocorre por conta dos déficits de potência ativa inseridos na rede do Sudeste após cada falha de comutação.

No instante imediatamente após a introdução do primeiro déficit, tem-se a conversão de parte da energia cinética das massas girantes (turbinas primárias) em energia elétrica para que a demanda do sistema possa ser suprida, o que resultará na redução da velocidade de rotação de tais corpos. Sabe-se que a frequência da rede é sincronizada com as velocidades de rotação das turbinas, de modo que a redução da velocidade nessas resultará em uma redução proporcional na frequência do sistema. Conforme explicitado na Tabela 10, ocorrem 5 déficits seguidos que dependem dos controladores para que sejam eliminados no menor tempo possível.

Figura 19 – Frequência em Ibiúna

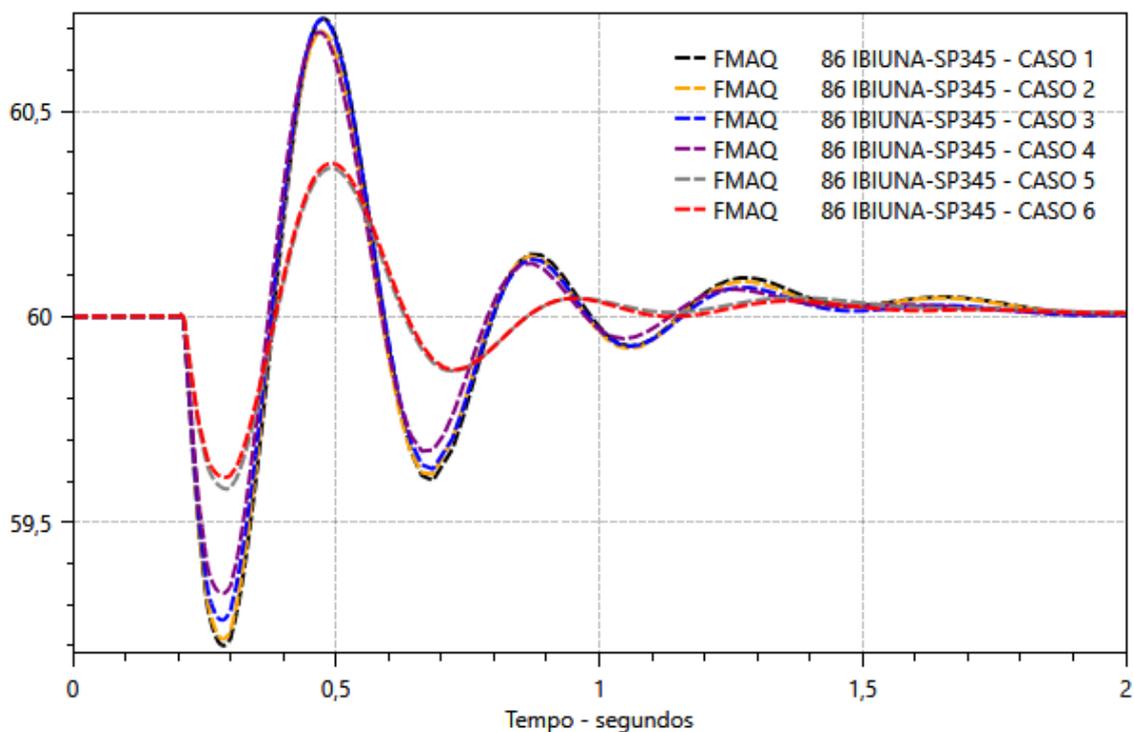
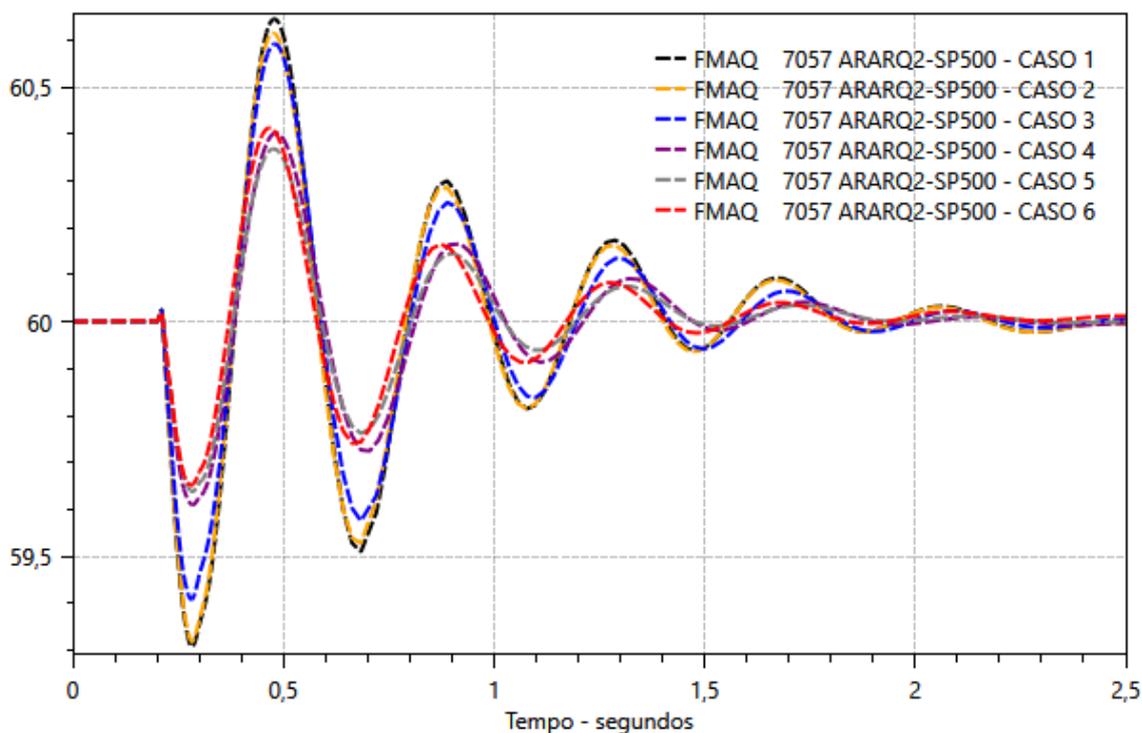
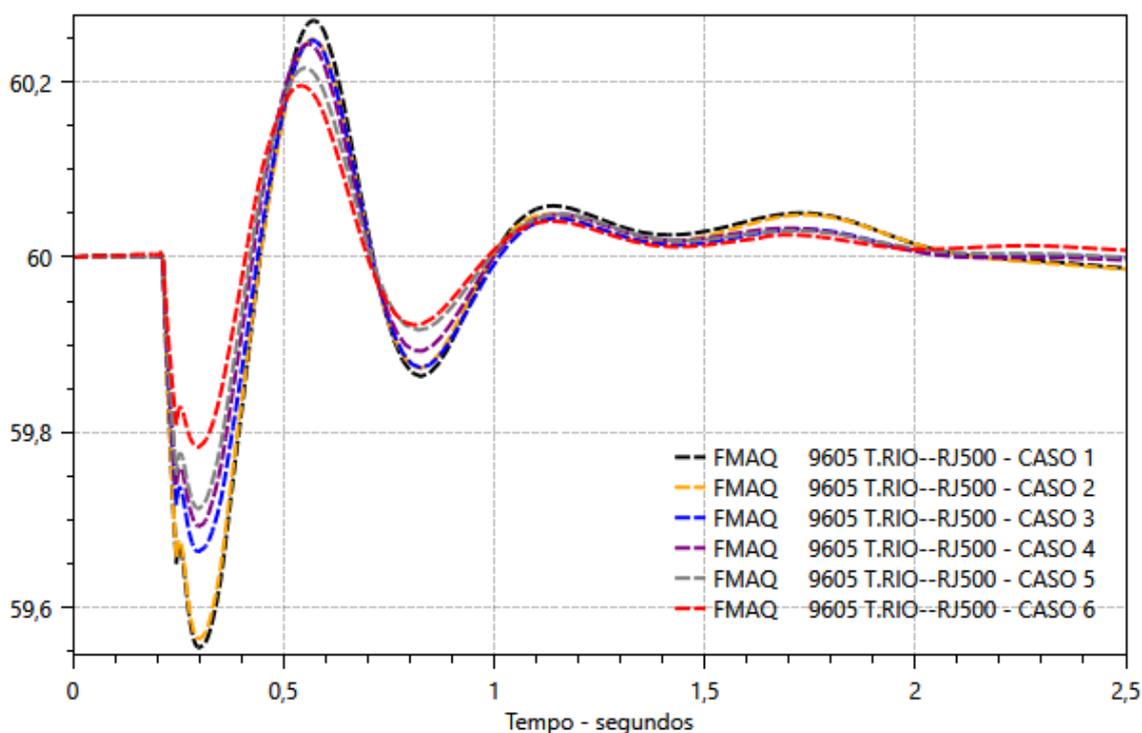


Figura 20 – Frequência em Araraquara 2



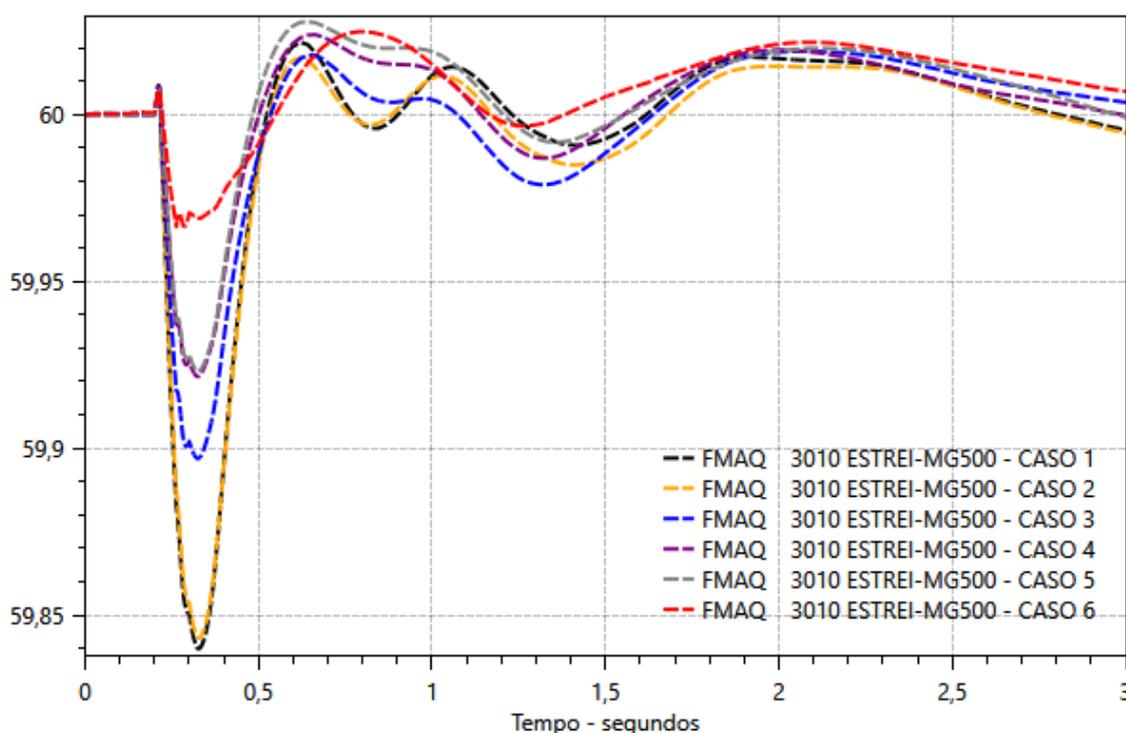
Adotando-se a Figura 21 para a interpretação da frequência ao longo do caso, nota-se que há uma perturbação na frequência no instante da falta na LT 500 kV Ibiúna - Bateias, que resulta em redução instantânea da frequência elétrica da barra, cujo ponto mínimo coincide com período entre $t = 215ms$ e $t = 228ms$, momento em que a injeção CC está completamente zerada. Após o final desse intervalo, verifica-se o início da recuperação da frequência, que está associada às sucessivas extinções das falhas de comutação nos inversores.

Figura 21 – Frequência em Terminal Rio



O tempo de recuperação típico dos fenômenos de falha de comutação é de 200ms e as constantes de tempo da regulação primária (ou controle de velocidade) das máquinas são da ordem de segundos, de maneira que não haverá tempo para a ação da regulação primária e as acelerações e reacelerações serão ditadas pelo balanço de potência elétrica na rede e conversores. Tais acelerações e reacelerações podem ser mensuradas pelo ângulo de carga e na Figura 23 e na Figura 24 estão explicitadas a variação do ângulo de carga das usinas de Itaipu 60 Hz e de Emborcação durante os dez primeiros segundos da simulação em relação à barra de referência do sistema, respectivamente.

Figura 22 – Frequência em Estreito



Na Figura 23, nota-se que não houve variação no ângulo de carga das unidades geradoras de Itaipu 60 Hz até cerca de 0,3s, momento que o desbalanço de potência nas unidades geradoras so sistema receptor resulta na aceleração dos rotores dessas máquinas. O valor máximo da variação da defasagem angular em relação à barra de referência do sistema (8,3 graus) é atingido no instante 0,5s. O sistema apresenta-se dinamicamente estável, com amortecimento das oscilações de potência. Comportamento similar é observado na Figura 24. Nota-se, entretanto, que os valores de ângulo apresentados na Figura 23, depois da estabilização, permaneceram com uma diferença em relação aos valores pré-falta. Tal diferença está associada ao incremento da geração de reativo nas máquinas da UHE Itaipu 60 Hz para controle de tensão na barra PV da usina.

Observando-se as curvas de frequência, nota-se que à medida que se reduz as injeções CC e se aumenta a potência sincronizada na rede do Sudeste a variação na frequência ao longo do período transitório é menor pois os degraus de potência ativa serão cada vez menores e a inércia local será cada vez maior. Em se tratando da comparação específica entre os casos 1 e 2, cuja única diferença é o número de máquinas, verifica-se uma melhora na resposta na frequência associada ao aumento da inércia disponível na rede do Sudeste.

Figura 23 – Variação do Ângulo de Carga em Itaipu 60 Hz

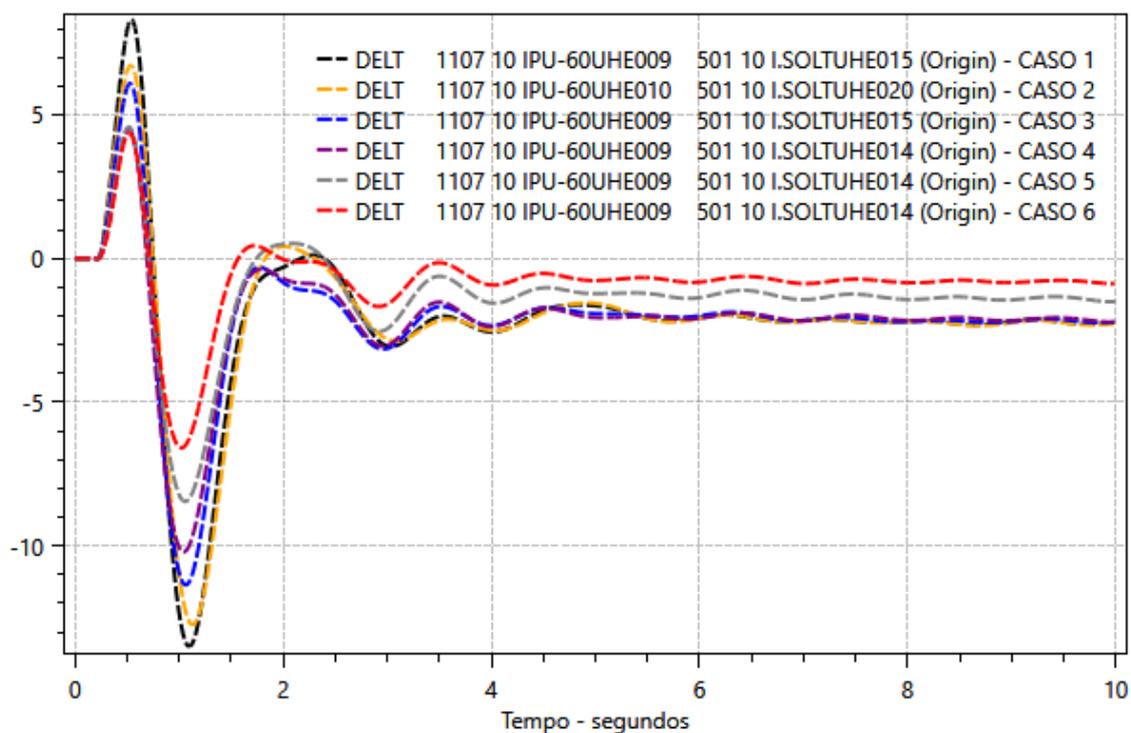
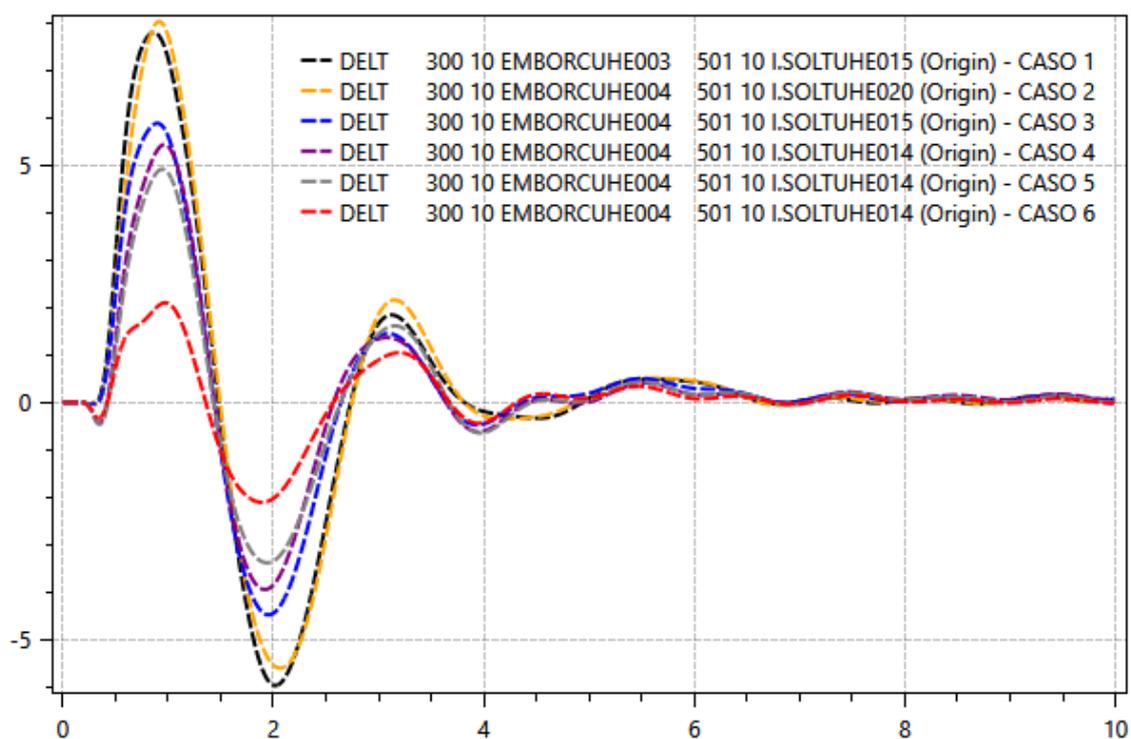


Figura 24 – Variação do Ângulo de Carga em Emborcação



Ao se comparar todos os casos, percebe-se que o ponto de operação apresentado no caso 6 possui a melhor resposta na frequência mais estável diante das falhas de comutação desencadeadas pelo curto da LT escolhida. Analisando-se as curvas das variações angulares, percebe-se que nessas a menor variação ocorre também no caso 6, o que já era esperado, pois frequência e ângulo de carga são grandezas associadas.

4.5.2.2 Análise dos Resultados de Tensão

Da mesma forma que se interpretou os resultados de frequência, faz-se o mesmo para os resultados de tensão nas subestações inversoras do subsistema do Sudeste.

Observando-se as curvas de tensão expostas abaixo (Figura 25, Figura 26, Figura 27 e Figura 28), nota-se que no momento em que se introduz a falta na LT 500 kV Ibiúna - Bateias, em $t = 200ms$, ocorre uma queda abrupta nas tensões das subestações inversoras. Logo após a primeira queda, verifica-se um incremento rápido nas tensões devido ao bloqueio dos inversores em Ibiúna, tal bloqueio faz com que o consumo de reativo pelos inversores caia para zero, de modo que o reativo excedente resulta no incremento registrado. Percebe-se ainda que tal incremento é maior nos casos de maior injeção CC, pois o consumo de reativo pelos inversores é proporcional à potência ativa transferida. Desse modo, as variações rápidas na tensão estão associadas com bloqueios e desbloqueios dos inversores dos elos.

Em $t = 300ms$, o aumento na tensão é causado pelo fim do curto na LT e após tal instante o sistema começa o processo de recuperação de seus níveis originais de tensão. Nota-se que a recuperação é mais rápida no caso 6, de modo que esse caso apresenta também a melhor resposta na tensão.

Figura 25 – Tensão em Ibiúna

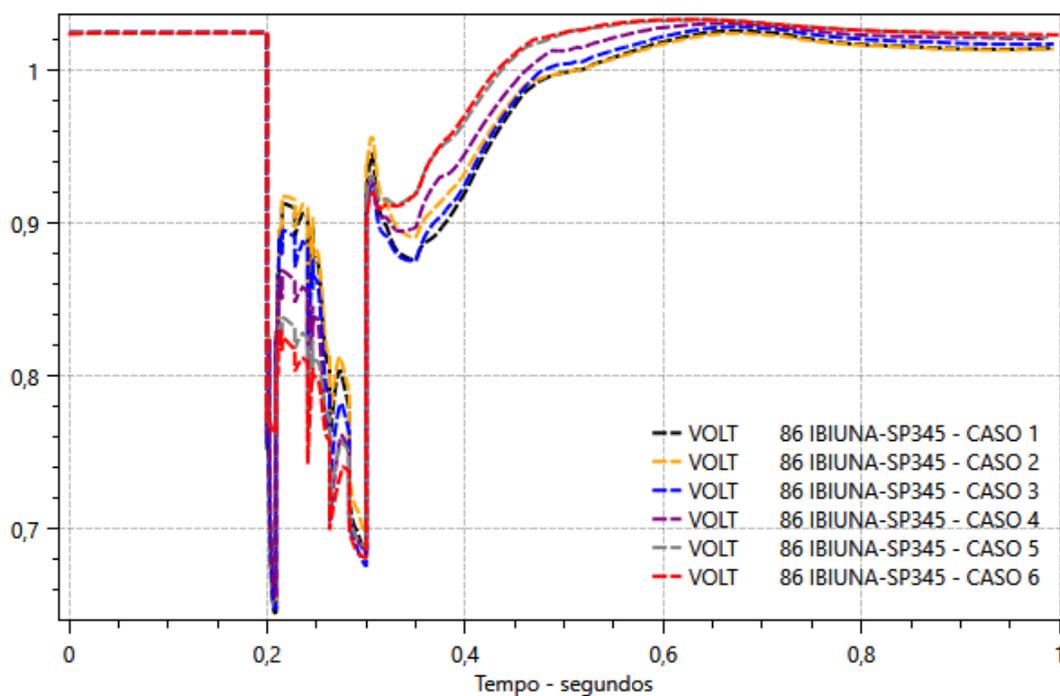


Figura 26 – Tensão em Araraquara 2

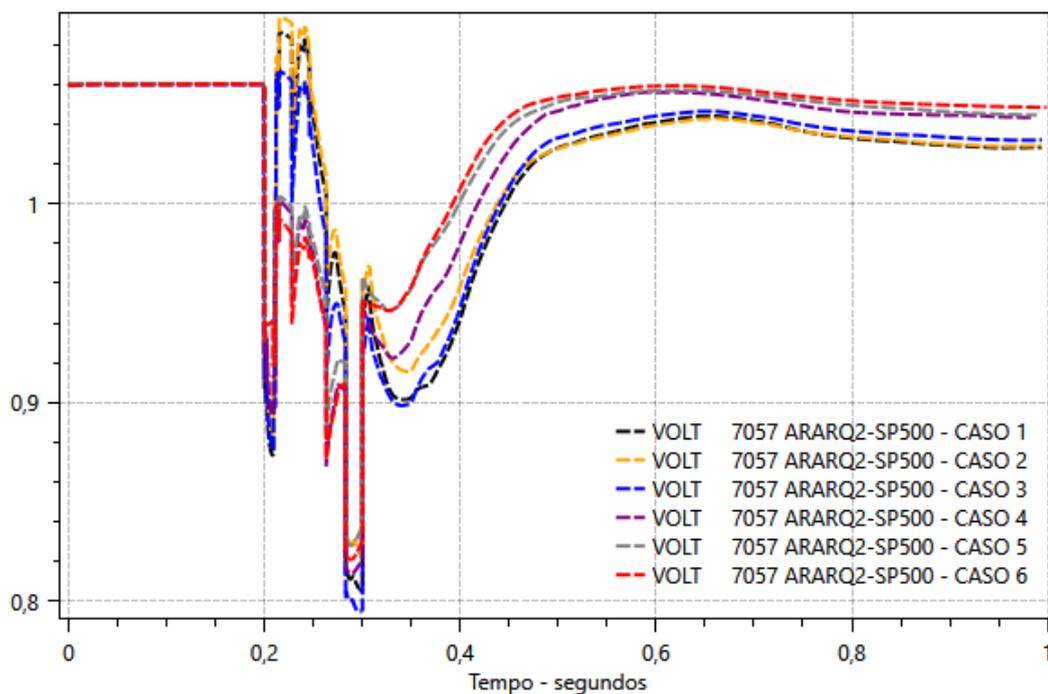


Figura 27 – Tensão em Terminal Rio

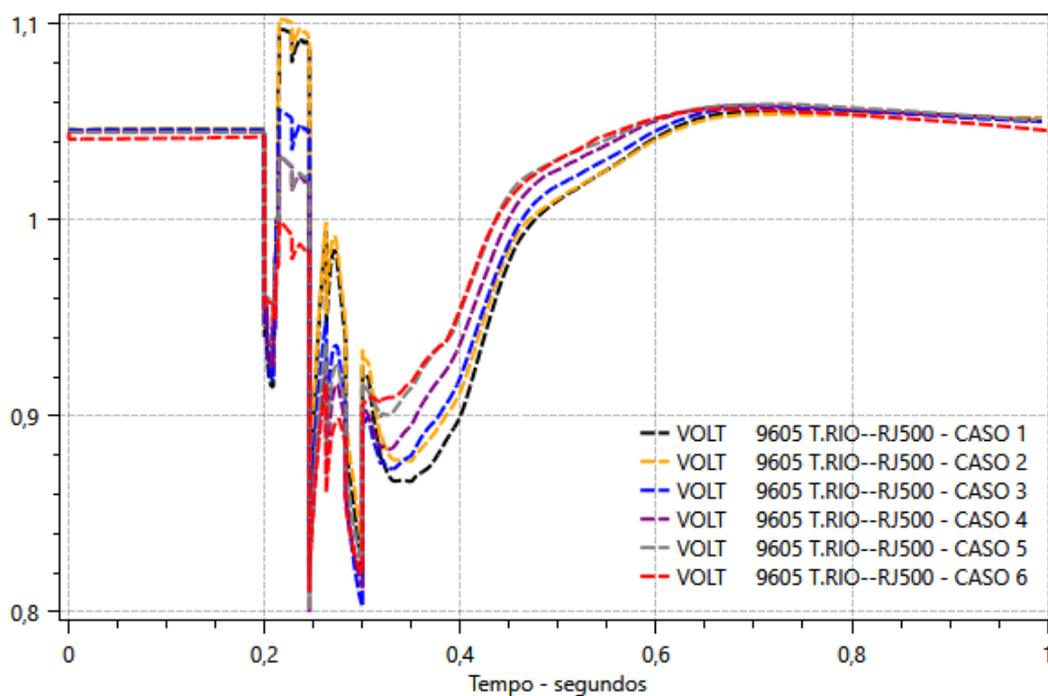
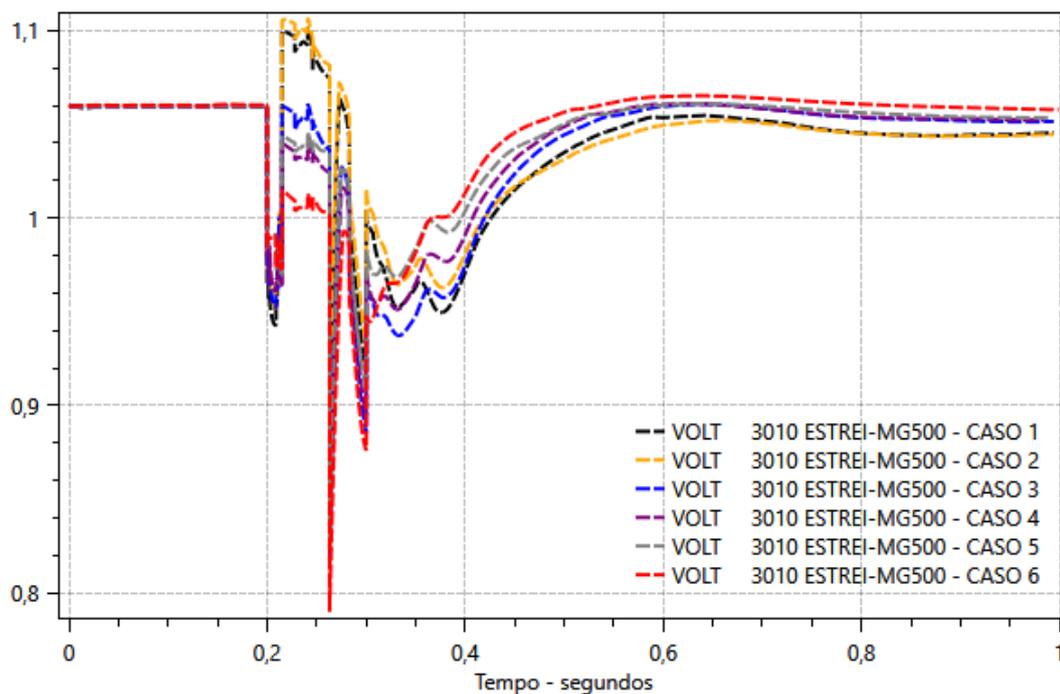


Figura 28 – Tensão em Estreito



4.5.3 Rede Próxima aos Retificadores: Análise dos Resultados de Frequência e Geração nas Usinas

Os resultados de frequência nas subestações retificadoras dos bipolos (Figura 29, Figura 30 e Figura 31) mostram que enquanto há uma subfrequência na rede do Sudeste, registra-se sobrefrequência nas redes próximas aos retificadores. A Frequência apresentada para a SE Foz do Iguaçu foi medida na UHE Itaipu 50z. No caso da SE Conversora Porto Velho, foi medida na UHE Santo Antônio e para a SE Xingu, foi medida na UHE Belo Monte. Na Figura 29 e na Figura 32 estão apresentadas a frequência na SE Foz do Iguaçu (Paraguai) e a geração em Itaipu 50 Hz. O bloqueio do elo de Ibiúna resulta em um excesso de potência ativa no lado paraguaio, causando um aumento na frequência que é posteriormente eliminado quando ocorre o retorno do elo. Optou-se pelo uso da curva de geração em vez da curva de variação de ângulo de carga para a apresentação dos efeitos em Itaipu 50 Hz porque se trata de um sistema elétrico com frequência nominal diferente da usada no SIN. A Figura 33 mostra então que há uma redução na geração para ajuste da frequência e posteriormente ocorre o retorno aos níveis originais. As magnitudes das sobrefrequências são proporcionais à injeção CC, de modo que o caso 6 também apresenta a melhor resposta para estas.

Diferentemente dos demais bipolos, as duas subestações terminais do sistema CCAT do Xingu estão integradas ao mesmo sistema elétrico, de modo que se pode analisar a variação do ângulo de carga em relação à referência do sistema, apresentada na Figura 34. Verifica-se que Belo Monte apresenta uma considerável variação no ângulo de carga, também proporcional à injeção CC, sobretudo à injeção CC pelo bipolo do Xingu. Os casos com maior excursão angular apresentam-se mais críticos, sob o ponto de vista da dinâmica do sistema elétrico. Os riscos estão associados à perda de sincronismo das máquinas da região Norte em relação ao Sudeste. E esses riscos são maiores à medida que se aumenta a injeção CC ou reduz-se a inércia da região SE.

Figura 29 – Frequência em Foz Do Iguaçu (Paraguai)

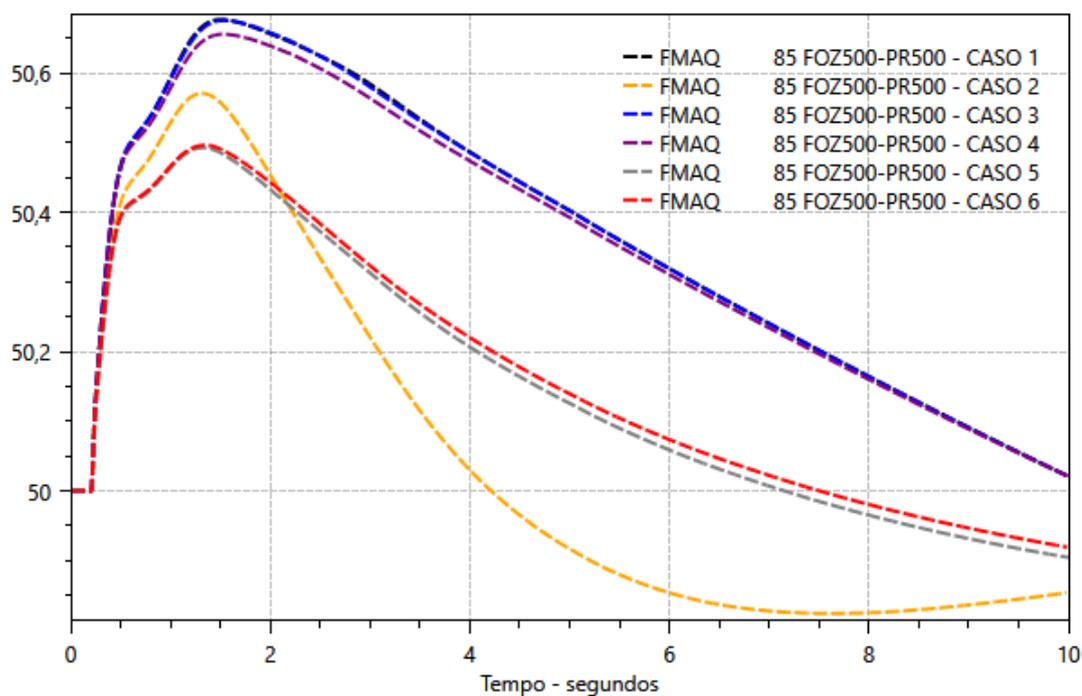


Figura 30 – Frequência na Conversora Porto Velho

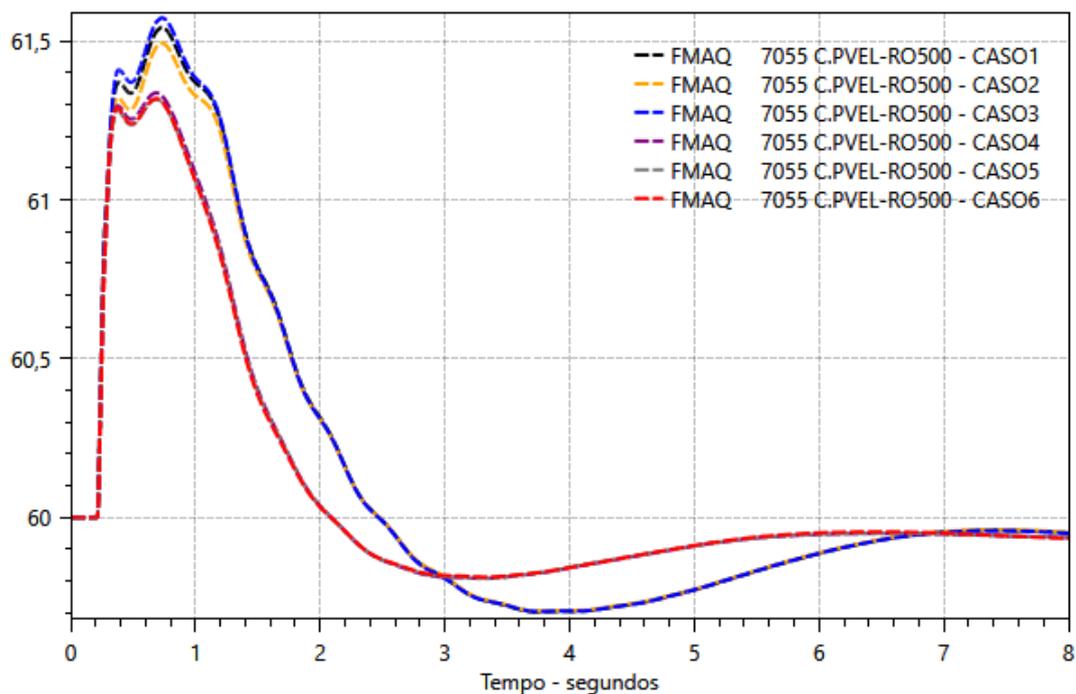


Figura 31 – Frequência em Xingu

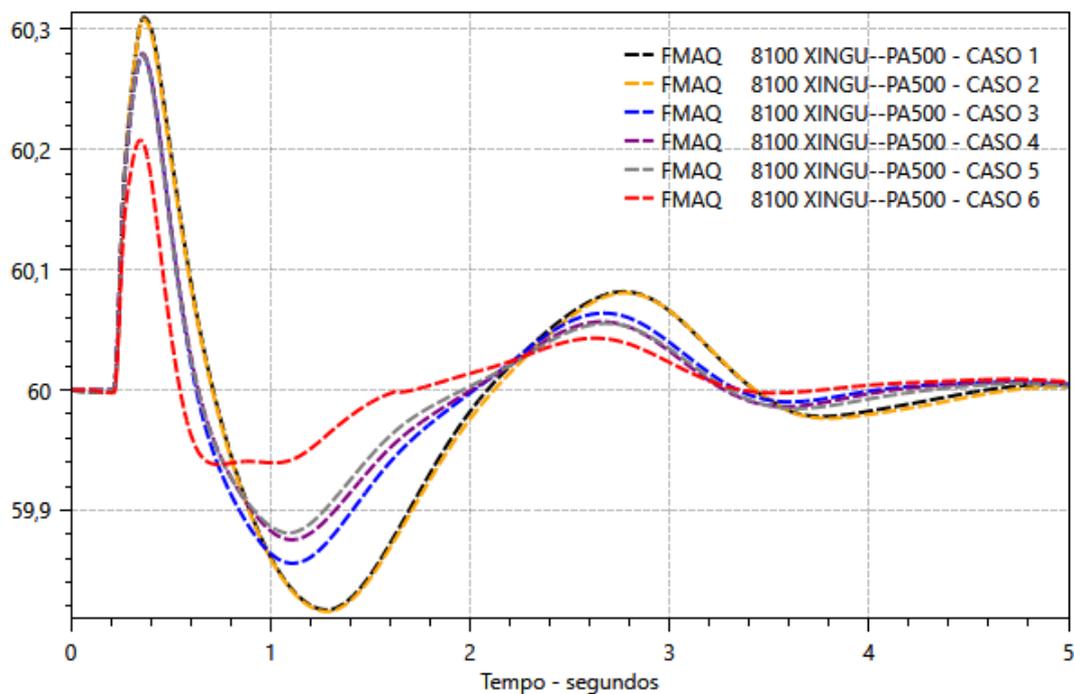


Figura 32 – Geração em Itaipu 50 Hz

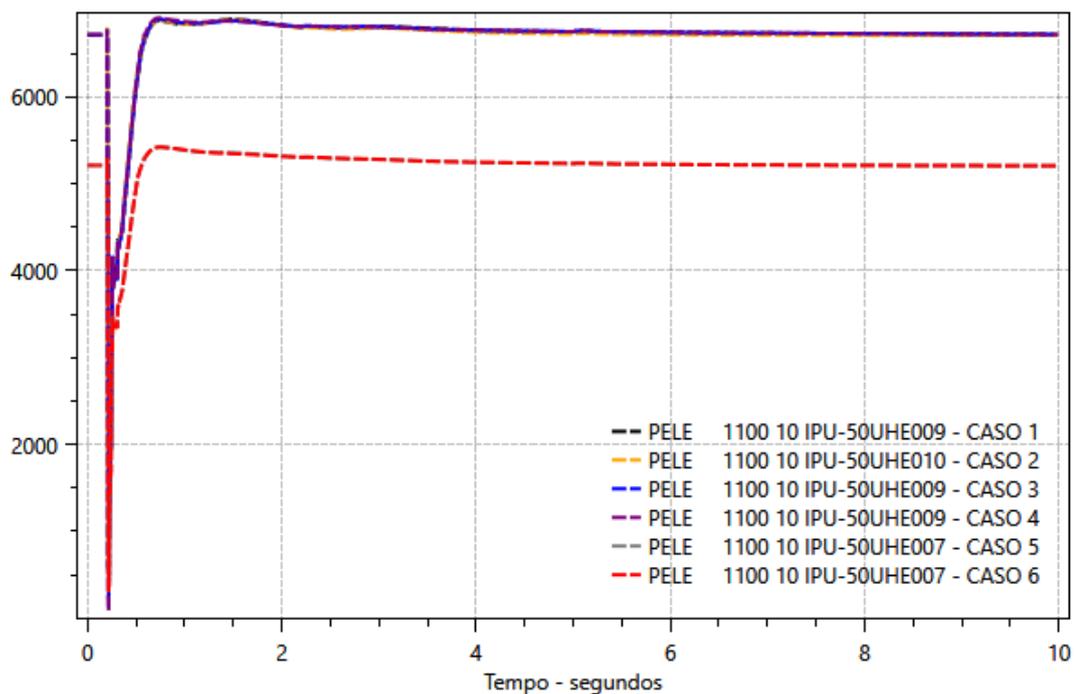


Figura 33 – Geração em Belo Monte

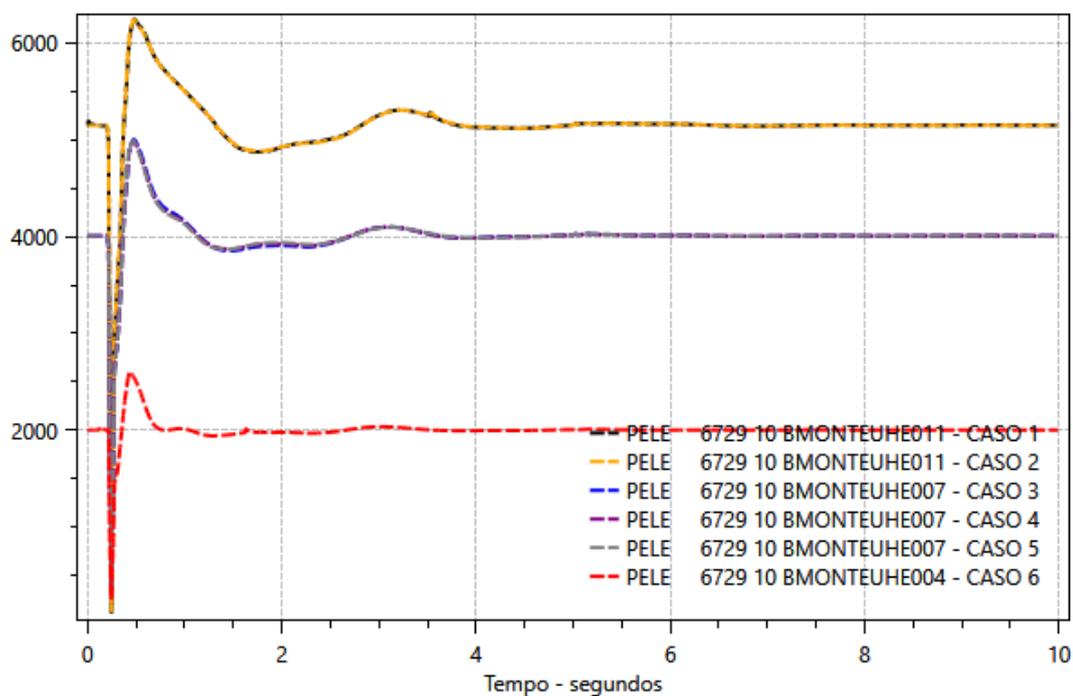
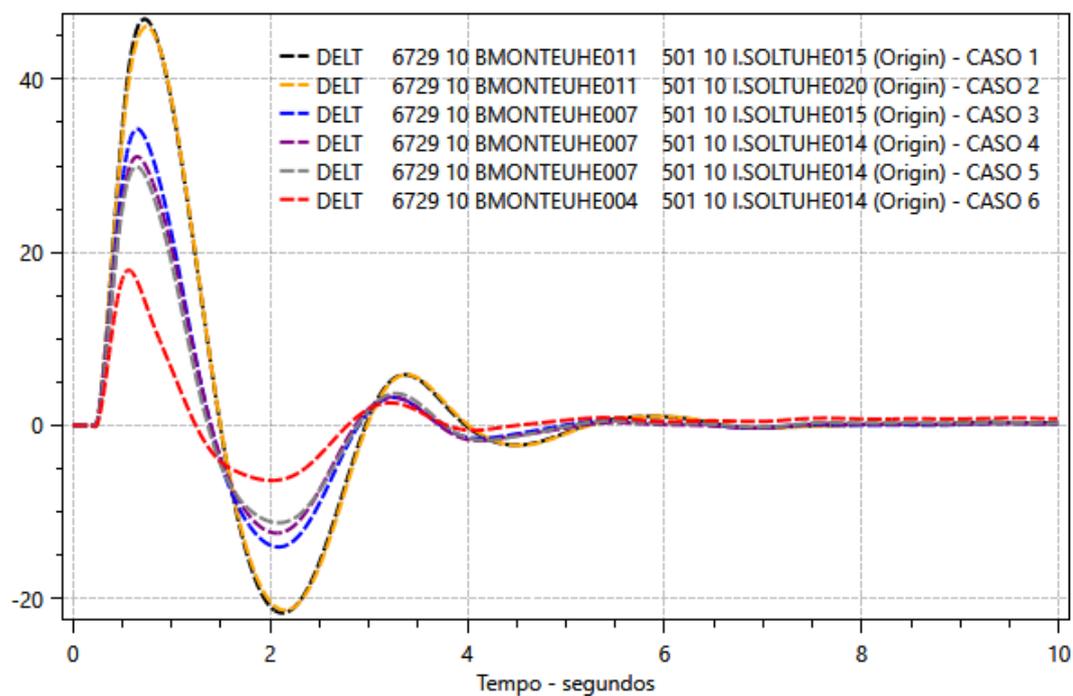


Figura 34 – Variação do Ângulo de Carga em Belo Monte



5 CONCLUSÕES

Os objetivos desse trabalho consistiram na descrição dos sistemas de transmissão CCAT e de suas interações entre si e com o sistema elétrico em corrente alternada em configuração *Multi-Infeed*, durante a operação em regime normal dos elos CCAT e diante de falhas de comutação nas subestações inversoras.

Com relação aos sistemas CCAT propriamente ditos, fez-se uma descrição detalhada de seus elementos associados e do funcionamento de tais sistemas em regime normal de operação. Dentro do tópico do funcionamento, deu-se ênfase ao processo normal de comutação nos conversores associados aos elos e à transmissão de energia nos circuitos CC. Em termos da interação dos elos, os principais fenômenos de interação foram explicitados, dentre os quais, um dos mais relevantes é a falha de comutação, o qual foi explorado com maior detalhamento. Fez-se ainda a descrição dos principais indicadores usados para a avaliação do risco da ocorrência de interações.

Para complementar o conteúdo teórico exposto, realizou-se simulações de falha de comutação em sistemas em configuração *Multi-Infeed*. Para tal processo, fez-se o uso de dados elaborados e validados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico como base para as simulações, de modo a aproximar os resultados simulados dos valores reais. Antes das simulações de falha propriamente dita, os principais índices de avaliação *Multi-Infeed* foram calculados. Com os índices calculados, foram aplicadas falhas de comutação semelhantes em cada um dos casos e foram feitas comparações entre suas respostas dinâmicas. A partir dos resultados das simulações, infere-se que o nível injeção CC na região Sudeste impacta na estabilidade sistêmica, uma vez que quanto maior for a injeção, maior será o déficit transitório de potência ativa neste sistema durante a ocorrência de falha de comutação, resultando em desaceleração dos rotores das máquinas síncronas desta região. Nos sistema exportadores, ocorre o inverso, com aceleração das máquinas síncronas e conseqüente degradação da estabilidade transitória do sistema. Tais características deixam clara a importância dos estudos de interação entre elos CC e seus impactos sistêmicos.

Uma proposta para trabalhos futuros seria um estudo comparativo entre os resultados da simulação dinâmica com dados obtidos a partir de sincrofasores e oscilografias gerados a partir de eventos reais. Desse modo, poderia-se examinar a precisão dos resultados da simulação e dos valores calculados de TVZ e DIF tomando como referência os dados reais.

6 REFERÊNCIAS

- [1] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). *DPL-REL-0259-2019 - Identificação do fenômeno de falha de comutação na operação dos bipolos do SIN*. Rio de Janeiro, 2019. Relatório.
- [2] MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA Empresa de Pesquisa Energética. *PLANEJAMENTO DECENAL DE EXPANSÃO DE ENERGIA 2029*. Brasília, 2020. Relatório.
- [3] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). Janeiro tem quarto recorde de carga no SIN. *Imprensa Notícias*, Rio de Janeiro, 23 janeiro 2019. Disponível em: http://www.ons.org.br/Paginas/Noticias/20190123_quartorecordedossin.aspx. Acesso em: 26 julho 2020.
- [4] HART, Daniel W. *Power Electronics* 1.ed. Nova Iorque: McGraw-Hill, 2010.
- [5] VIJAY, Sood K. *HVDC and facts controllers: applications of static converters in power systems*. 1.ed. Boston: Kluwer academic publishers, 2004.
- [6] BARKER, Carl, et al. *HVDC: connecting to the future*. 1.ed. Levallois-Perret: Alstom grid, 2010.
- [7] DE SOUZA, Yuri. R. *Análise da interação entre elos de corrente contínua em redes eletricamente próximas*. Rio de Janeiro, 2014. 233f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) UFRJ/COPPE.
- [8] SESSA, Bruno C. *Avaliação da estabilidade de tensão em sistemas com elos de corrente contínua em redes eletricamente próximas*. Rio de Janeiro, 2017. 146f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) UFRJ/COPPE.
- [9] CONCEIÇÃO, RENATO T. *Avaliação de desempenho da operação conjunta de múltiplos conversores considerando falhas de comutação sucessivas*. Rio de Janeiro, 2018. 57f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Curso de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

[10] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). *DPL-REL-0228-2020 - Identificação do fenômeno de falha de comutação na operação dos bipolos do SIN ano 2020*. Rio de Janeiro, 2020. Relatório.

[11] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). *Submódulo 23.3 - Diretrizes e critérios para estudos elétricos*. Rio de Janeiro, 2018.