



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Daniel Sousa da Silva

Detecção de Falhas de Comutação em Sistemas HVDC Multi-Infeed utilizando Sincrofasores

Florianópolis
2023

Daniel Sousa da Silva

Detecção de Falhas de Comutação em Sistemas HVDC Multi-Infeed utilizando Sincrofasores

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Grau de Mestre em Sistemas de Energia.

Orientador: Prof. Diego Issicaba, Ph.D.

Florianópolis
2023

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

Silva, Daniel

Detecção de Falhas de Comutação em Sistemas HVDC Multi
Infeed utilizando Sincrofasores / Daniel Silva ;
orientador, Diego Issicaba, 2023.

103 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. WAMS. 3. Transmissão HVDC
4. Transformada Wavelet. 5. Sincrofasores. I. Issicacaba,
Diego. II. Universidade Federal de Santa Catarina.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III.
Título.

Daniel Sousa da Silva

Detecção de Falhas de Comutação em Sistemas HVDC Multi-Infeed utilizando Sincrofasores

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Dr. Robson Francisco da Silva Dias
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Dr. Ildemar Cassana Decker
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Grau de Mestre em Sistemas de Energia.

Prof. Telles Brunelli Lazzarin, Dr.
Coordenador do Programa

Prof. Diego Issicaba, Ph.D.
Orientador

Florianópolis, 01 de Março de 2023.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, que sempre me apoiaram em todos os momentos até hoje e sempre acreditaram que a educação é a base de tudo e deram o apoio para o meu desenvolvimento pessoal e profissional.

Ao meu orientador Diego Issicaba pela orientação na pesquisa, oportunidade de trabalhar no tema proposto, auxílio no meu desenvolvimento pessoal e profissional ao longo do mestrado.

Ao Prof. Antonio Felipe da Cunha de Aquino que realizou grandes contribuições na orientação desta pesquisa com toda a sua experiência acerca do tema, e também no auxílio na revisão da dissertação.

Ao Guido Moraes pelo auxílio e companheirismo em diversos momentos no desenvolvimento da pesquisa.

Aos professores, colegas e amigos de laboratório (Labplan e Labspot) pelo companheirismo e por fazerem parte de toda esta jornada no mestrado. A todos meus amigos que fizeram de alguma maneira parte e contribuíram para o desenvolvimento desta dissertação.

Ao CNPQ e INESC P&D Brasil pelo apoio financeiro desprendido durante o curso de mestrado.

*“Valeu a pena?
Tudo vale a pena
Se a alma não é pequena.”
(Fernando Pessoa, 1922)*

RESUMO

Neste trabalho é proposta uma abordagem inovadora para detectar Falha de Comutações (FCs) em sistemas *High Voltage Direct Current* (HVDC) em configuração *multi-infeed* utilizando Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada (SMFS). A abordagem é baseada em avaliações de sinais de potência e corrente obtidos a partir de sincrofasores adquiridos nas estações conversoras HVDC. A abordagem é composta de uma etapa de detecção preliminar seguida de duas etapas de detecção de falsos positivos. Para cada uma das etapas foram desenvolvidos indicadores específicos a partir dos efeitos e características da FC. Na detecção preliminar e 1ª etapa de detecção de falsos positivos são avaliadas as assinaturas da energia da wavelet de sinais de potência. Na 2ª etapa de detecção de falsos positivos são analisados os desbalanços entre as magnitudes de corrente de fase. Na abordagem são detectados eventos de FC que afetam uma ou mais pontes da estação conversora de sistemas HVDC. Na abordagem é especificada a infraestrutura das medições das grandezas elétricas no Sistema de Energia Elétricas (SEEs) dentro do contexto de *Wide Area Measurement System* (WAMS), de modo a possibilitar a detecção de FCs simultâneas. Visa-se proporcionar, aos operadores de sistemas elétricos, meios de detectar e avaliar a severidade das FCs simples e simultâneas. A abordagem é validada com dados de simulações de *Electromagnetic Transients* (EMT) e testada com dados de medições de campo do Sistema Interligado Nacional (SIN).

Palavras-chave: WAMS. Transmissão HVDC. Transformada Wavelet.

ABSTRACT

This work proposes an innovative approach to detect commutation failures (CFs) in multi-infeed high voltage direct current (HVDC) systems using synchronized phasor measurement systems (SPMS). The approach is based on the assessment of power signal and current from synchrophasors data acquired at HVDC converter stations. The approach is composed of step of preliminary detection, 1^a and 2^a steps of false positive detection, in each step is developed specific indicators from effects and technical features. Steps of preliminary detection and 1^a step of false positive detection are analyzed wavelet energy signatures of power signal. The 2^a step of false positive detection is analyzed imbalances between the current magnitudes of phase. In the approach is detected events of CF that affect one or more bridges of HVDC station. The approach is specified the infrastructure of measurements of electrical quantities in Electric Power System (EPS) within the context of WAMS that enable the detection of simultaneous CF. The aim of this work is to allow the System Operator (SO) to monitor simultaneous CFs on different converter stations of a power system and their impact on system dynamic performance. The approach is validated with data from electromagnetic transient (EMT) simulations and tested with data from a real event in the Brazilian Interconnected Power System (BIPS).

Keywords: WAMS. HVDC Transmission. Wavelet transform.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Típica estação conversora HVDC.	20
Figura 2 – Ponte conversora de 6 pulsos.	21
Figura 3 – Tensão <i>Direct Current</i> (DC) em função do ângulo α ponte conversora de 6 pulsos - Retificador.	22
Figura 4 – Circuito equivalente ilustrativo do processo de comutação na ponte conversora de 6 pulsos.	23
Figura 5 – μ na ponte conversora de 6 pulsos - a) Formas de tensão alternadas e retificada do polo positivo; b) Formas de onda das correntes da válvulas 1 e 3.	24
Figura 6 – γ na ponte conversora de 6 pulsos.	24
Figura 7 – Ângulos presentes no processo de comutação.	25
Figura 8 – Sistema Multi-infeed.	26
Figura 9 – Representação do efeito da FC na ponte conversora.	27
Figura 10 – Falha de comutação no inversor.	28
Figura 11 – Falha de comutação no inversor.	28
Figura 12 – Elos HVDC do SIN.	31
Figura 13 – Representação de sistema HVDC assíncrono.	33
Figura 14 – Representação de sistema HVDC assíncrono antes de FC.	33
Figura 15 – Representação de sistema HVDC assíncrono durante FC.	34
Figura 16 – Representação de sistema HVDC síncrono.	34
Figura 17 – Representação de sistema HVDC síncrono antes de FC.	35
Figura 18 – Representação de sistema HVDC síncrono durante FC.	35
Figura 19 – Sistema equivalente assíncrono para simulação de FC.	36
Figura 20 – Sistema equivalente síncrono para simulação de FC.	36
Figura 21 – Resultados das simulações de FC em sistemas síncronos e assíncronos.	37
Figura 22 – Caso síncrono - Defasagem angular.	38
Figura 23 – Sinais de corrente - Agente de Transmissão 3 (AG3) inversor.	40
Figura 24 – Sinais de corrente - Agente de Transmissão 1 (AG1) inversor.	40
Figura 25 – Sinais de corrente - Agente de Transmissão 2 (AG2) inversor.	41
Figura 26 – Sinais de corrente - Agente de Transmissão 4 (AG4) inversor.	42
Figura 27 – Efeitos na potência ativa nos conversores.	43
Figura 28 – Sinal de potência ativa nos elos HVDC do Norte e Sudeste do SIN sob efeitos da FC devido a falta em Araraquara 2 500 kV.	44
Figura 29 – Energias totais acelerante e desacelerante nos sistemas Norte e Sudeste, respectivamente, com os elos HVDC sob efeito de FC devido a curto-circuito em Araraquara 2 500 kV.	45

Figura 30 – Fluxograma da abordagem proposta de detecção de falhas de comutação - Transformador conversor de dois enrolamentos.	48
Figura 31 – Fluxograma da abordagem proposta de detecção de falhas de comutação - Transformador conversor de três enrolamentos.	49
Figura 32 – Algoritmo de detecção preliminar.	54
Figura 33 – Algoritmo 1ª etapa de detecção de falsos positivos.	56
Figura 34 – Algoritmo da 2ª Etapa de Detecção de Falsos Positivos.	58
Figura 35 – Algoritmo da Etapa Final de Análise Lógica de Falsos Positivos.	59
Figura 36 – Infraestrutura proposta de medição.	60
Figura 37 – Sinal de potência da ponte do transformador conversor YY no terminal inversor - Falha em Estreito.	64
Figura 38 – Resultados da Abordagem - Falta na SE Estreito 500 kV.	65
Figura 39 – POTINST (em MW) dos elos HVDC dos elos HVDC do Norte e Sudeste do SIN sob os efeitos devido a falta em Estreito 500 kV.	67
Figura 40 – Resultados da Abordagem - Falta na linha de transmissão DC do polo 1 de AG3.	69
Figura 41 – Falta na Subestação (SE) ARARAQ-SP500 kV - Potência Ativa - Polo 1 - AG4	75
Figura 42 – Potência Ativa - Polo 1 e 2 - AG2 - Evento 16/01/2020	80
Figura 43 – Potência Ativa - Pontes dos Transformadores Conversores YY e YD - AG3 - SE Estreito 500 kV - Evento 16/01/2020.	80
Figura 44 – Caso 1 - Etapa de detecção preliminar - EWN - AG2 - SE Coletora Porto Velho 500 kV - Terminal Retificador	82
Figura 45 – Caso 1 - 1ª etapa de identificação de falsos positivos - AG2 - SE Coletora Porto Velho 500 kV - Terminal Retificador	83
Figura 46 – Caso 1 - Etapa de detecção preliminar - Energia Wavelet Normalizada (EWN) - AG3 - SE Estreito 500 kV - Terminal Inversor.	84
Figura 47 – Caso 1 - 1ª etapa de identificação de falsos positivos - EWN - AG3 - SE Estreito 500 kV - Terminal Inversor.	85
Figura 48 – Potência ativa calculada a partir dos fasores de tensão e corrente - Polo 1 e 2 - AG2 - Eventos em 26/01/2022.	86
Figura 49 – Potência ativa calculada a partir das oscilografias de tensão e corrente - Polo 1 e 2 - SE Estreito 500 kV - AG2 - Eventos em 26/01/2022.	87
Figura 50 – Potência ativa calculada a partir das oscilografias de tensão e corrente - Polo 1 e 2 - SE Estreito 500 kV - AG3 - Eventos em 26/01/2022.	87
Figura 51 – Sinal Digital - Polo 1 e Polo 2 - AG3 - Evento 1 em 26/01/2022.	89
Figura 52 – Caso 2 - Etapa de detecção preliminar - EWN - SE Araraquara 2 500 kV - AG2 - Terminal Inversor	90

Figura 53 – Caso 2 - 1ª etapa de identificação de falsos positivos - EWN - SE Araraquara 2 500 kV - AG2 - Terminal Inversor.	91
Figura 54 – Caso 2 - Etapa de detecção preliminar - EWN - SE Estreito 500 kV - AG3 - Terminal Inversor.	93
Figura 55 – Caso 2 - 1ª etapa de identificação de falsos positivos - EWN - SE Estreito 500 kV - AG3 - Terminal Inversor.	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 2 – Sistemas de Transmissão HVDC do SIN.	30
Tabela 3 – TIP (ms) para casos de simulação	63
Tabela 4 – Parâmetros da abordagem selecionados	63
Tabela 5 – Indicadores	68
Tabela 6 – Resultados da detecção preliminar	70
Tabela 7 – Resultados da 1ª etapa de identificação de falsos positivos.	72
Tabela 8 – Resultados da 2ª etapa de identificação de falsos positivos.	76
Tabela 9 – Registro disponíveis das medições de campo.	78
Tabela 10 – Síntese dos resultados das etapas para o caso 1.	81
Tabela 11 – Síntese dos resultados das etapas para o caso 2.	90
Tabela 12 – Resultados caso 2 - 2ª etapa de identificação de falsos positivos - AG2 - Terminal Inversor.	92
Tabela 13 – Resultados caso 2 - 1ª e 2ª etapa de identificação de falsos positivos - SE Estreito 500 kV - AG3.	94

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	<i>Alternating Current</i>
AG1	Agente de Transmissão 1
AG2	Agente de Transmissão 2
AG3	Agente de Transmissão 3
AG4	Agente de Transmissão 4
AG5	Agente de Transmissão 5
ANATEM	Análise de Transitórios Eletromecânicos
cA	Coeficiente de Aproximações
cD	Coeficiente de Detalhe
CEA	<i>Constant Extinction Angle</i>
DC	<i>Direct Current</i>
ECCTOT-N	Energia Total Interrompida no sistema Norte
ECCTOT-SE	Energia Total Interrompida no sistema Sudeste
EMT	<i>Electromagnetic Transients</i>
EWN	Energia Wavelet Normalizada
EWS	Energia Wavelet Sinalizada
EWSM	Energia Wavelet Sinalizada Modificada
FC	Falha de Comutação
FLDC	Falta na linha DC
FR	<i>Forced Retard</i>
GPS	<i>Global Position System</i>
HVAC	<i>High Voltage Alternating Current</i>
HVDC	<i>High Voltage Direct Current</i>
LCC	<i>Line-Commutated Converter</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
OS	Operador do Sistema
PDC	<i>Phasor Data Concentrator</i>
PMU	<i>Phasor Measurement Units</i>
POTINST	Potência Instantânea
PSCAD/EMTDC	<i>Power Systems Computer Aided Design/Electromagnetic Transients including DC</i>
RMD	Regra da Maior Descida
SE	Subestação
SEE	Sistema de Energia Elétrica
SIN	Sistema Interligado Nacional
SMFS	Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada
TIMEREC	Tempo de Recuperação

TIP	Tempo de Interrupção de Potência
TWD	Transformada Wavelet Discreta
UG	Unidade Geradora
UHE	Unidade Hidrelétrica
WAMS	<i>Wide Area Measurement System</i>
WAN	<i>Wide Area Network</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVOS	17
1.2	ESTRUTURA DO DOCUMENTO	18
2	ASPECTOS GERAIS DA TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA HVDC	19
2.1	PRINCIPAIS ELEMENTOS	19
2.2	PROCESSO DE CONVERSÃO AC/DC	21
2.3	SISTEMAS HVDC EM CONFIGURAÇÃO MULTI-INFEED	25
2.4	FALHA DE COMUTAÇÃO	26
2.5	SÍNTESE DO CAPÍTULO E CONSIDERAÇÕES	29
3	FALHA DE COMUTAÇÃO EM ELOS HVDC E SEUS EFEITOS NA DINÂMICA DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA	30
3.1	ASPECTOS ESTRUTURAIS E OPERACIONAIS RELEVANTES DO SIN	30
3.2	EFEITOS NO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE UM SISTEMA DE ENERGIA ELÉTRICA	32
3.3	EFEITOS DAS FC NAS CORRENTES DAS PONTES CONVERSORAS E NA POTÊNCIA ATIVA INJETADA	37
3.3.1	Efeitos nas correntes das ponte conversoras	38
3.3.2	Efeitos na potência ativa injetada	42
3.4	OBSERVAÇÃO DOS EFEITOS NA DINÂMICA COM BASE EM SIN-CROFASORES	42
3.5	TRABALHOS CORRELATOS NA LITERATURA	44
3.6	SÍNTESE DO CAPITULO E CONSIDERAÇÕES	46
4	ABORDAGEM PROPOSTA	47
4.1	VISÃO GERAL DA ABORDAGEM DESENVOLVIDA	47
4.2	PASSOS PRINCIPAIS DA ABORDAGEM DESENVOLVIDA	52
4.2.1	Detecção Preliminar	52
4.2.2	1ª Etapa de detecção de falsos positivos	53
4.2.3	2ª Etapa de detecção de falsos positivos	57
4.2.4	Etapa final de detecção de falsos positivos	57
4.3	INDICADORES DE SEVERIDADE SISTÊMICA	58
4.4	INFRAESTRUTURA PROPOSTA	60
4.5	SÍNTESE DO CAPÍTULO E CONSIDERAÇÕES	61
5	RESULTADOS NUMÉRICOS	62
5.1	ESTUDO DE CASOS DE SIMULAÇÃO	62

5.1.1	Estudo detalhado com o caso de simulação de falta na SE Estreito 500 kV	64
5.1.1.1	Indicadores de severidade sistêmico do caso de simulação de falta na SE Estreito 500 kV	67
5.1.2	Estudo detalhado com o caso de simulação de falta na linha 800 kVcc de AG3	68
5.1.3	Resultados da detecção preliminar para os casos de simulação .	70
5.1.4	Resultado de eficiência da 1ª etapa de identificação de falsos positivos para os casos de simulação	72
5.1.5	Resultado de eficiência da 2ª etapa de identificação de falsos positivos para os casos de simulação	75
5.2	RESULTADOS DE CASOS COM MEDIÇÕES DE CAMPO	78
5.2.1	Caso 1 - 16/01/2020	79
5.2.1.1	Descrição do caso	79
5.2.1.2	Resultados numéricos	81
5.2.1.2.1	<i>Bipolo SE Coletora Porto Velho - SE Araraquara 2</i>	82
5.2.1.2.2	<i>Bipolo SE Xingu - SE Estreito</i>	84
5.2.2	Caso 2 - 26/01/2022	85
5.2.2.1	Descrição do caso	85
5.2.2.2	Resultados do caso 2	89
5.2.2.2.1	<i>Bipolo SE Coletora Porto Velho - SE Araraquara 2</i>	90
5.2.2.2.2	<i>Bipolo SE Xingu - SE Estreito</i>	92
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	96
6.1	CONCLUSÕES	96
6.2	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	97
	REFERÊNCIAS	98

1 INTRODUÇÃO

Nos sistemas HVDC baseados em conversores do tipo *Line-Commutated Converter* (LCC), a FC ocorre quando uma válvula de tiristores que deveria ser bloqueada continua a conduzir sem a necessária transferência da corrente para a próxima válvula na sequência de disparo. Este fenômeno é causado, majoritariamente, por quedas de tensão na rede *Alternating Current* (AC) eletricamente próxima ao terminal operando como inversor, geralmente originadas por curtos-circuitos na rede AC. Uma das principais consequências da FC é o estabelecimento de um curto-circuito na ponte (lado DC), o qual faz as válvulas conectadas a uma mesma fase da ponte de 6 pulsos conduzirem simultaneamente. Em decorrência disso, a tensão DC no inversor colapsa para zero, levando as potências DC e AC também a zero (WEI; FANG; LIU, 2020).

O impacto sistêmico da FC pode ser agravado conforme a topologia e características do SEE. Nos sistemas em configuração *multi-infeed* HVDC, onde múltiplos terminais de elos HVDC são conectados a uma mesma rede AC e em pontos eletricamente próximos, a ocorrência de FC em um terminal pode induzir FCs em outros terminais, aumentando os montantes de potência total não transmitidas e agravando a severidade do evento. Além disso, em sistemas com redes AC e DC em paralelo, com elos HVDC embutidos, as FCs podem agravar a severidade de contingências e conduzir unidades geradoras à perda de sincronismo, afetando significativamente a operação do SEE. Essas características estão presentes no SIN, o qual é constituído por seis bipolos HVDC em configuração *multi-infeed*, dois deles embutidos no sistema AC (WEI; LIU *et al.*, 2016).

A maioria dos trabalhos na literatura científica relacionados ao tema da FC tem enfoque na operação, aspectos do sistema de controle e análise do impacto do fenômeno (JUN; CHONG; JIANJUN (2016), XIA *et al.* (2018), DU *et al.* (2018), LI, G. *et al.* (2020), ZHANG; DOFNAS (2002)). Poucos trabalhos propõem técnicas para detectar FCs, focando-se principalmente em fornecer informações locais, geralmente contando com o monitoramento dos ângulos de comutação das válvulas das pontes e tensões AC nos terminais do conversor OKETCH (2016), ZHANG; JING *et al.* (2018), MIRSA-EIDI *et al.* (2019), LI, T. *et al.* (2020), MUKHOPADHYAY *et al.* (2014). Recentemente, SMFSs têm sendo usados para monitorar e detectar eventos sistêmicos em tempo real com suporte de *Global Position System* (GPS) para sincronização dos fasores (KIM *et al.*, 2017). Neste contexto, este trabalho busca apresentar uma abordagem para a detecção de FCs em sistemas HVDC multi-infeed usando SMFS, com vistas a oferecer ao Operador do Sistema (OS): aumento da capacidade de monitorar FCs simultâneas em tempo real; informações a respeito do efeito das FCs na dinâmica do sistema, suporte nas análises das perturbações envolvendo os elos HVDCs; e informações que permitam aperfeiçoar a modelagem de eventos de FC em estudos de estabilidade. De

conhecimento do autor, esta é a primeira abordagem utilizando SMFSs desenvolvida para o problema.

A abordagem utiliza a Transformada Wavelet Discreta (TWD) para analisar a energia dos sinais elétricos AC adquiridos pelas *Phasor Measurement Units* (PMU) instaladas nas estações conversoras HVDC-LCC. O principal sinal de entrada da abordagem proposta é a potência ativa instantânea transmitida nos elos HVDC-LCC, a qual possui uma assinatura particular quando há ocorrência de FCs. Também utiliza-se como entrada as correntes AC nas três fases dos transformadores conversores, medidas no lado da ponte, para descarte de eventos, tais como Falta na linha DC (FLDC), caracterizados por elevado decaimento de potência ativa, a exemplo do que é verificado durante a FC.

A abordagem faz uso de 4 macro passos. No primeiro passo, a EWN é usada para capturar de forma generalizada a ocorrência de eventos com afetação na potência transferida. No segundo passo, a Energia Wavelet Sinalizada Modificada (EWSM) é aplicada para classificar o evento como FC. No terceiro passo é calculado o desbalanço entre a magnitude das correntes de fase, tendo por fim descartar eventos correspondentes a ações de controle nos quais tal desbalanço não é caracterizado. Finalmente, no quarto passo, é realizada a análise cruzada dos resultados obtidos na segunda e terceira etapa para a obtenção do diagnóstico final sobre a detecção do evento de FC. Após as etapas de detecção do evento, caso o evento seja classificado como FC, são calculados indicadores de severidade desenvolvidos para análise dos impactos sistêmicos da FC.

A abordagem é validada a partir de dados de simulações do sistema equivalente do SIN realizadas em *Power Systems Computer Aided Design/Electromagnetic Transients including DC* (PSCAD/EMTDC), e testados com medições de campo de FC registradas por PMUs e equipamentos de proteção no SIN, fornecidos pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral desta dissertação é desenvolver uma abordagem para a identificação do evento de FC em sistemas HVDC multi-infeed com base em dados de PMUs, a fim de proporcionar ao OS meios para o monitoramento contínuo, a detecção e a avaliação da severidade das FCs, simples e simultâneas. No que se refere aos objetivos específicos, destacam-se

- Desenvolver algoritmos para detecção de eventos de FCs, simples e simultâneas, em elos HVDC, via dados provenientes de SMFS;
- Desenvolver algoritmos de descarte de eventos que podem representar falsos positivos na identificação de FC, via dados provenientes de SMFS;

- Estudar os possíveis efeitos no SEE decorrentes de FCs simples ou simultâneas a partir de dados de sincrofasores no SEE;

Além disso, busca-se o desenvolvimento de indicadores de severidade a partir de dados de sincrofasores, para futura avaliação dos impactos sistêmicos das FCs simples e simultâneas em elos HVDC operando em configuração *multi-infeed*.

1.2 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

Este documento está organizado como segue:

Capítulo 1: Neste capítulo, realiza-se uma contextualização do problema e descreve-se de forma sucinta a abordagem proposta. Apresenta-se também os objetivos e estrutura do documento.

Capítulo 2: Neste capítulo são apresentados os principais conceitos relativos à operação de sistemas HVDC, necessários para a compreensão do fenômeno de FC. São abordadas questões estruturais dos elos HVDC, os processos fundamentais para a operação do elo em regime permanente e o fenômeno da FC.

Capítulo 3: Neste capítulo são apresentados os principais efeitos das FCs em SEEs, em particular no SIN. Com base em resultados de simulação PSCAD/EMTDC, são evidenciados os efeitos nas principais grandezas elétricas associadas à ponte conversora. Apresenta-se, ainda, os potenciais efeitos das FCs simples e simultâneas no desempenho dinâmico do SIN.

Capítulo 4: Neste capítulo é apresentada a abordagem para detecção de FCs proposta, com enfoque nos passos da abordagem e indicadores de impacto sistêmico desenvolvidos. Detalhes acerca da infraestrutura requerida para a aplicação da abordagem proposta no monitoramento de FCs no SIN também são expostos.

Capítulo 5: Neste capítulo são apresentados os resultados numéricos da abordagem proposta. Os resultados foram obtidos via casos de simulação de um equivalente do SIN em PSCAD/EMTDC e casos reais de registros de sincrofasores de elos HVDC do SIN.

Capítulo 6: Neste capítulo são apresentadas as conclusões e discussões finais sobre os resultados obtidos. Sugestões de trabalhos futuros são também listadas ao fim do documento.

2 ASPECTOS GERAIS DA TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA HVDC

A utilização da transmissão HVDC nos SEE vem se ampliando em diversos países. Entre as razões para este crescimento, pode-se citar a capacidade de transmissão de energia ponto a ponto a grandes distâncias a custos competitivos, a grande flexibilidade operacional e a possibilidade de interligar sistemas de frequência nominal distinta. No entanto, os sistemas de transmissão LCC-HVDC agregam maior complexidade à operação dos SEE, por conta dos equipamentos de conversão e sistemas de controle associados.

Neste capítulo, busca-se apresentar os principais processos e elementos que compõem os elos HVDC, com ênfase a operação de sistemas HVDC tipo LCC, para que seja possível a compreensão de aspectos básicos do fenômeno de FC. Assim, aborda-se na seção 2.1, os principais elementos presentes na SE dos elos HVDC. Na seção 2.2, aborda-se o processo de comutação das válvulas de tiristores, de forma a constituir os conceitos e elementos estruturais das estações conversoras, unidades básicas dos sistemas HVDC. Na seção 2.3 são apresentados conceitos para a caracterização da configuração *multi-infeed* em elos HVDC. Na seção 2.4 são descritos aspectos da origem e do comportamento das FCs nos sistemas HVDC.

2.1 PRINCIPAIS ELEMENTOS

Os sistemas HVDC-LCC são constituídos, basicamente, por estações conversoras, responsáveis pelo processo de conversão AC-DC, e pela linha de transmissão em corrente contínua, responsável pela transmissão da potência DC. Os elementos presentes nas estações conversoras são, basicamente, as pontes conversoras, transformadores conversores, filtros AC e DC, reator de alisamento e eletrodo de terra.

O conversor eletrônico é a unidade básica de conversão, composto por válvulas de tiristores formadas pela conexão de vários tiristores em série, para viabilizar a operação em um determinado nível de tensão (RUDERVALL; CHARPENTIER; SHARMA, 2000). A transmissão de alta potência a longas distâncias é realizada, tipicamente, por sistemas HVDCs do tipo LCC, com base em arranjos com pontes dos transformadores conversores de 12 pulsos (ALSTOM, 2018).

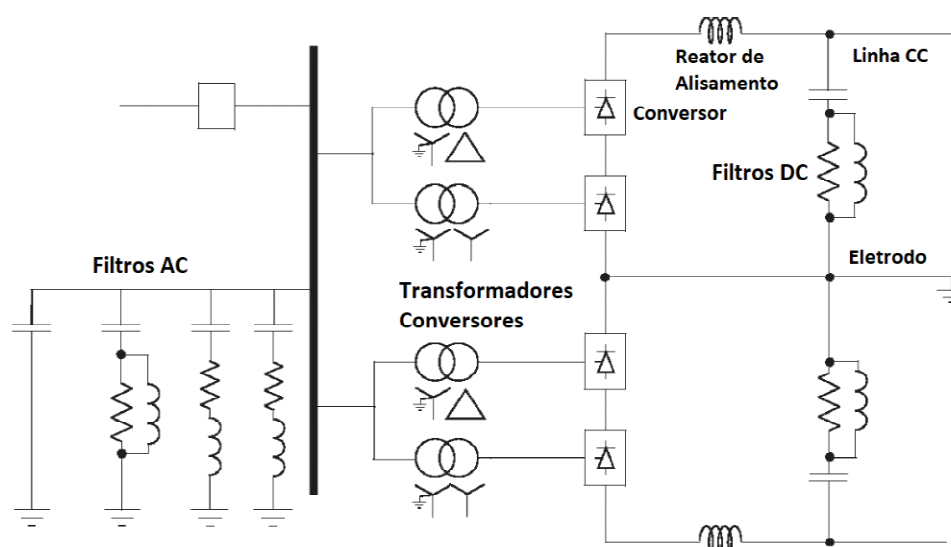
Os transformadores conversores fazem o acoplamento entre as redes CA e os conversores eletrônicos. Pelo lado das válvulas, a conexão do transformador é em estrela com o neutro não aterrado ou em delta; no lado AC, os transformadores são conectados em estrela com neutro aterrado (SOOD, 2011). O uso dos transformadores trifásicos é limitado nas estações devido às suas características (potência, custo, peso, etc) e à necessidade de dispor de unidades sobressalentes nas estações. Assim, as configurações geralmente adotadas na construção das pontes conversoras de 12 pulsos das estações conversoras consideram transformadores monofásicos de 3 enro-

lamentos estrela-estrela-delta ou a combinação de dois transformadores monofásicos de dois enrolamentos conectados em estrela-estrela e estrela-delta (OKETCH, 2016). A utilização de ligações distintas (delta-estrela e estrela-estrela) resulta na eliminação de correntes harmônicas de baixa ordem (FERREIRA, 2014). Para atender aos requisitos de controle do elo, os transformadores conversores são sempre equipados com OLTC (*on-load tap changer*).

Os filtros são utilizados para a limitação das distorções harmônicas em ambos os terminais devido ao chaveamento dos conversores. Os filtros do lado AC são necessários para limitar as harmônicas e mitigar a distorção na tensão. Quanto aos filtros do lado DC, são empregados para diminuir a interferência dos fios das companhias de telefone e similares, quando estão próximas linhas de transmissão aéreas (STEFAN; LIN; ANDERS, 2006).

Uma estação conversora de um sistema HVDC típico pode ser observada na Figura 1. Observa-se que a conexão das pontes conversoras, representadas pelos transformadores Y-D e Y-Y, tem os conversores em série do lado DC, constituindo um polo do sistema HVDC (e dois polos configuram um bipolo). Dessa forma, na Figura 1 há 4 pontes de transformadores conversores de 6 pulsos, 2 polos e 1 bipolo. Na Figura 1, os polos que compõem o bipolo têm polaridade oposta em relação ao terra e correntes aproximadamente iguais em módulo, não havendo corrente de retorno em condições normais de operação (SILVA JÚNIOR, 2018).

Figura 1 – Típica estação conversora HVDC.



Fonte: RUDERVALL; CHARPENTIER; SHARMA (2000).

Entre os outros elementos que compõem uma estação conversora típica HVDC, conforme Figura 1, destacam-se os seguintes:

- Reator de Alisamento: Reatores ligados em série com a linha de transmissão,

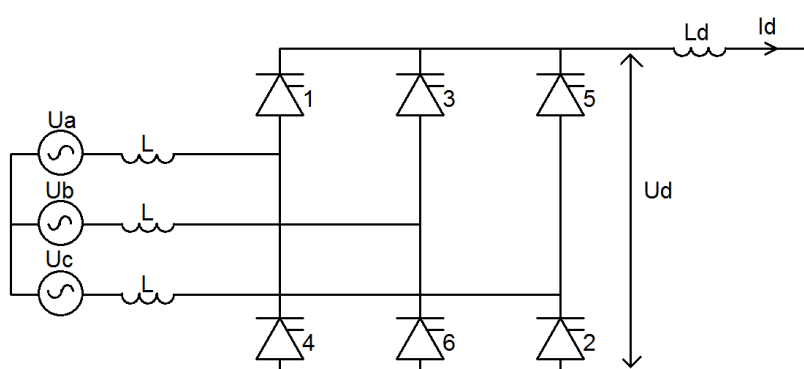
entre os terminais da linha e o conversor, visando reduzir os harmônicos do lado DC, a elevação da corrente causada por falhas no sistema DC, o *ripple* da corrente DC (OLIVEIRA JÚNIOR, 2012).

- Eletrodo de Aterramento: Visa agregar maior flexibilidade e confiabilidade aos sistemas bipolares. Na presença de uma falha em um dos polos, por exemplo, o sistema poderá operar em configuração monopolar com circulação de corrente com retorno pela terra (ZHANG; JING *et al.*, 2018a).
- Linha DC: Pode ser aérea, com condutores nus, ou subterrânea/subaquática, com cabos isolados. No caso da configuração bipolar, um condutor (ou feixe de condutores) opera com a polaridade positiva e o outro com a polaridade negativa (RUDERVALL; CHARPENTIER; SHARMA, 2000).

2.2 PROCESSO DE CONVERSÃO AC/DC

Nos sistemas HVDC-LCC, as estações conversoras realizam o processo de conversão AC/DC. A ponte conversora trifásica de 6 pulsos, ou ponte de Graetz, composta por 6 válvulas de tiristores, é a unidade básica das estações conversoras. Sua representação esquemática pode ser vista na Figura 2, onde U_a , U_b e U_c são as tensões de cada fase, L é a indutância da fonte, U_d é a tensão DC, L_d é a indutância da linha de transmissão HVDC e I_d é a corrente DC. Os pares das válvulas de tiristores 1 e 4, 3 e 6, 5 e 2 estão conectados às fases A, B e C, respectivamente.

Figura 2 – Ponte conversora de 6 pulsos.



Fonte: OKETCH(2016).

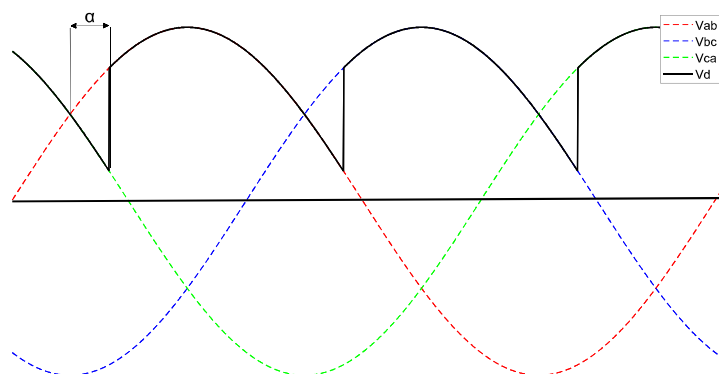
O processo de comutação consiste na transferência de corrente de uma válvula que será bloqueada para outra que irá conduzir, de acordo com a sequência de disparo. A condução das válvulas de tiristores é realizada em pares e em ciclos (60°); no total cada tiristor é acionado por 120° a cada ciclo. A sequência de disparo das válvulas,

considerando uma fonte trifásica na sequência ABC, é realizada pelos pares de tiristores 1 e 6, 1 e 2, 3 e 2, 3 e 4, 5 e 4, 5 e 6. Assim, ao longo do processo de comutação são obtidos U_d e I_d em cada um desses intervalos de tempo.

O controle do conversor tem como base a aplicação de sinais de disparo nos *gates* dos tiristores. O disparo, quando aplicado em condições adequadas de tensão, resulta na polarização e condução do tiristor. O intervalo de tempo entre a aplicação do sinal de disparo e o início da condução do tiristor é definido pelo ângulo de disparo (α).

Conforme a Figura 3, tem-se a representação das tensões alternadas e contínua obtidas para um determinado ângulo α durante o processo de comutação, sendo as tensões de linha indicadas por V_{ab} (em vermelho), V_{bc} (em azul), V_{ca} (em verde) e a tensão retificada indicada por V_d (em negro). Na Figura 3, está indicado o ângulo α a partir do cruzamento entre as tensões nas fases V_a e V_b . Observa-se que, por conta do atraso α , a forma de onda da tensão contínua apresenta-se chanfrada na transição de cada ciclo das tensões alternadas.

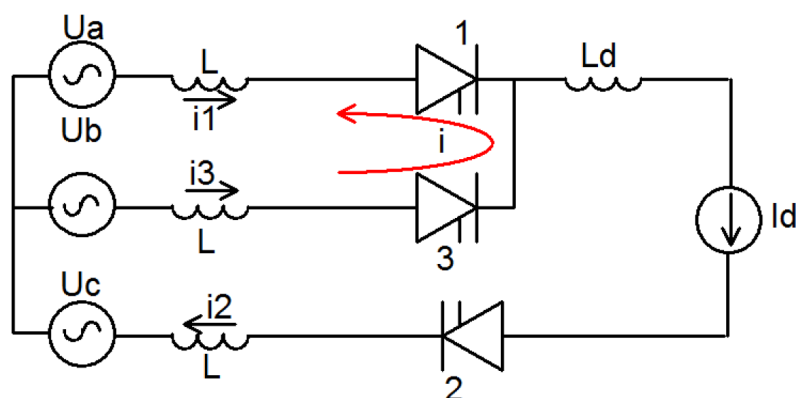
Figura 3 – Tensão DC em função do ângulo α ponte conversora de 6 pulsos - Retificador.



Na prática, a comutação entre as válvulas de tiristores não é instantânea, pois a indutância L dos transformadores conversores limita as variações de corrente nas válvulas envolvidas no processo. Diante disso, apesar da condução das válvulas ser realizada em pares, durante o processo de comutação três válvulas conduzem ao mesmo tempo. Assim, a válvula seguinte na sequência de disparo é acionada antes de finalizar a comutação anterior.

Para exemplificar, observa-se na Figura 4 o circuito equivalente no qual inicialmente conduzem as válvulas 1 e 2. Após o disparo da válvula 3, inicia-se o processo de comutação por meio da transferência gradual da corrente DC da válvula 1 para a válvula 3. A dinâmica deste processo é fortemente dependente da indutância de dispersão das fases do transformador conversor envolvidas no processo; neste caso, fases A e B. O processo de comutação entre as válvulas 1 e 3 é finalizada quando

Figura 4 – Circuito equivalente ilustrativo do processo de comutação na ponte converSORA de 6 pulsos.



Fonte: OKETCH(2016).

a corrente na válvula 3 é igual a I_d e na válvula 1 é igual a zero, quando então esta última é bloqueada.

De modo a ilustrar o efeito na tensão retificada durante a comutação, considere-se o processo de comutação entre as válvulas 1 e 3 (mesma situação da Figura 4). Assim, destaca-se na Figura 5 as formas de ondas das tensões alternadas (em (a) linhas tracejadas em vermelho, azul e verde claro) e retificada do polo positivo (em (a) linha em preto negrito) correspondentes ao intervalo de transferência da corrente da válvula 1 para a válvula 3 (em (b) linha vermelho e verde escuro). Analisando a forma de onda da tensão retificada do polo positivo no cruzamento das tensões alternadas V_a e V_b , μ é contabilizado a partir do instante do disparo da válvula 3, que ocorre depois de transcorrido o ângulo α . Durante o processo de comutação, a magnitude da tensão retificada do polo positivo é igual ao valor de $(v_a + v_b)/2$ (em (a) linha tracejada em preto). Nas formas de onda das correntes nas válvulas 1 e 3, o ângulo μ corresponde ao intervalo no qual ocorre a transferência da corrente entre as válvulas. Tipicamente, no processo de comutação de sistemas HVDC, o valor de ângulo μ está entre 15° e 25° (AHMED, 1999).

No terminal inversor, para que seja assegurado o bloqueio da válvula de tiristores de saída antes do cruzamento com a tensão da outra fase, a soma dos ângulos α e μ não devem atingir 180° (SOUSA, 2020). O ângulo medido ao fim da comutação até 180° , é o o ângulo de extinção γ . A representação do ângulo γ pode ser vista na Figura 6.

Os ângulos α , μ e γ representam intervalos no processo de comutação. A soma destes ângulos é igual a 180° , conforme definido na Equação 1.

$$\alpha + \mu + \gamma = 180^\circ \quad (1)$$

Isolando γ na Equação 1 e fazendo a consideração do modo de operação

Figura 5 – μ na ponte conversora de 6 pulsos - a) Formas de tensão alternadas e retificada do polo positivo; b) Formas de onda das correntes da válvulas 1 e 3.

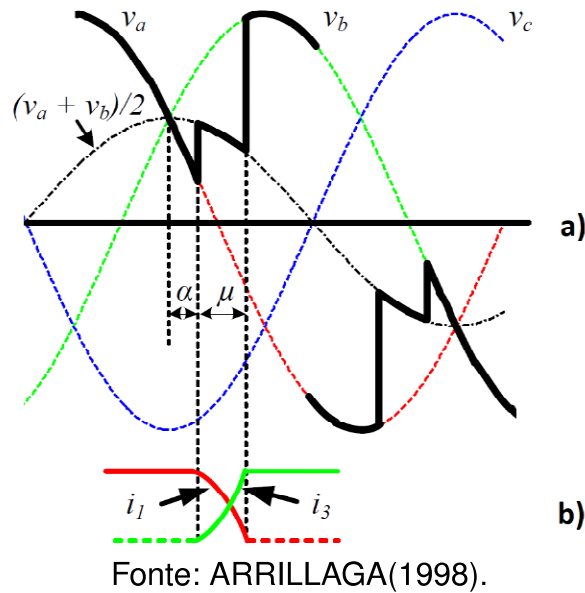
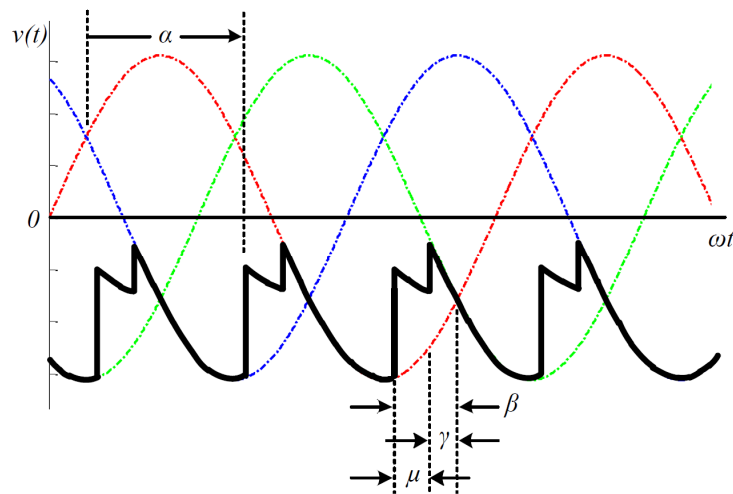


Figura 6 – γ na ponte conversora de 6 pulsos.



inversor e retificador, obtém-se a margem de atuação deles pelo ângulo de extinção, conforme Equações 2 e 3. Há diferença das margens dos valores dos ângulos conforme o modo de operação retificador ou inversor.

$$\gamma_{retificador} = 180^\circ - \alpha_{retificador} - \mu, \text{ para } \alpha_{retificador} < 90^\circ \quad (2)$$

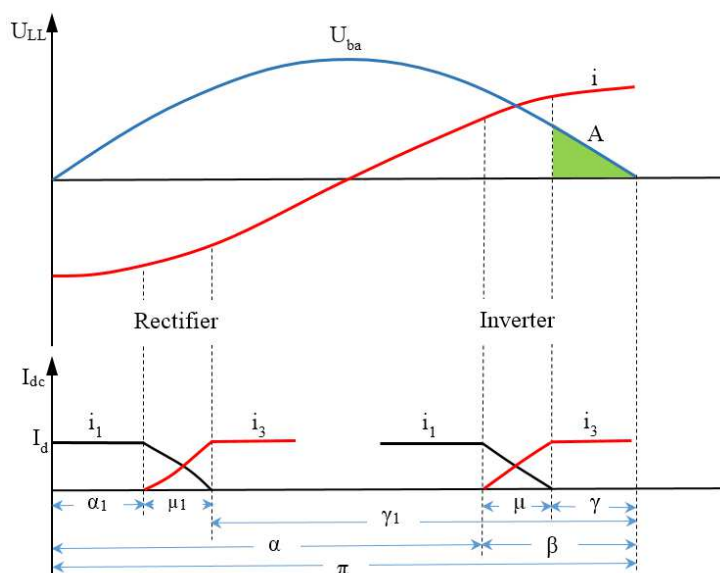
$$\gamma_{inversor} = 180^\circ - \alpha_{inversor} - \mu, \text{ para } \alpha_{inversor} > 90^\circ \quad (3)$$

O comportamento do ângulos nos modos de operação do processo de comutação podem vistos na Figura 7, onde retrata-se na sub-figura superior a tensão alternada

U_{ba} (em azul), a corrente i (em vermelho) que flui no conversor, entre as válvulas de tiristores 1 e 3, e pode ser visto na sub-figura inferior, as correntes i_1 (em preto) e i_3 (em vermelho) destas chaves, os ângulos α_1 , μ_1 , γ_1 referente ao modo de operação retificador e α , μ , γ e β ao modo de operação inversor.

A corrente i_3 flui tanto nos modos de operação do retificador e inversor durante γ_1 e γ , respectivamente. Observa-se que $\gamma_1 > \gamma$ ao longo do processo de comutação, possibilitando que na ocorrência de um distúrbio na operação γ_1 consiga completar sua passagem, no entanto o mesmo não será possível para γ , pois seu tempo de duração possivelmente será reduzido. O tempo de atuação de γ é representado na Figura 7 pela área A de tensão restante-tempo (em verde) que pode ser reduzido significativamente caso ocorra distúrbios na rede elétrica AC (OKETCH, 2016).

Figura 7 – Ângulos presentes no processo de comutação.



Fonte: OKETCH(2016).

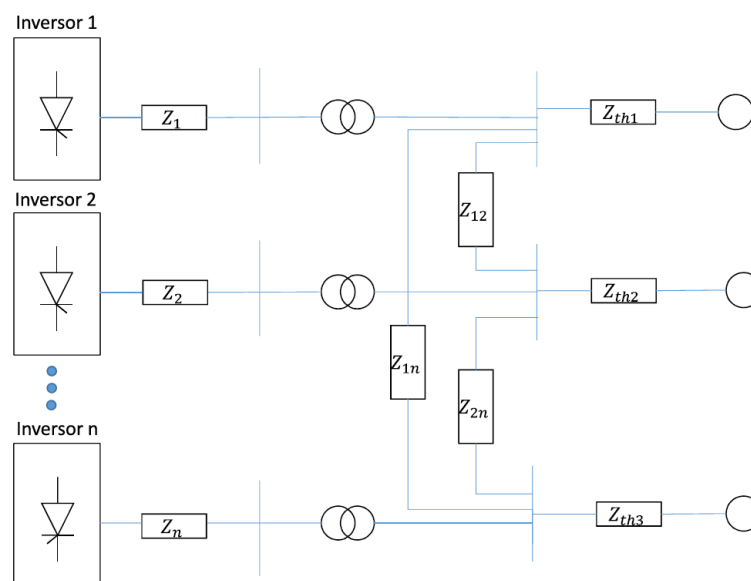
2.3 SISTEMAS HVDC EM CONFIGURAÇÃO MULTI-INFEED

Os elos HVDC de uma SE no sistema SEE podem estar conectados no mesmo sistema AC e com estações conversoras eletricamente próximas. Tal configuração é denominada *multi-infeed*.

Na Figura 8 está ilustrada uma configuração multi-infeed, composta pelos inversores (1,2,...,n), impedâncias próprias dos conversores (Z_1, Z_2, \dots, Z_n), impedância mútuas entre as barras (Z_{12}, Z_{1n} e Z_{2n}) e a impedância de Thévenin equivalente vista nas barras (Z_{th1}, Z_{th2} e Z_{th3}).

Na configuração multi-infeed, devido à proximidade das estações conversoras HVDC, ocorrem diferentes tipo de interações entre elas, a saber: sobretensões transitó-

Figura 8 – Sistema Multi-infeed.



Fonte: SOUZA, M. J. A. (2020).

rias; falhas de comutação, incluindo o processo de recuperação após a falta; interação harmônica; instabilidade de tensão e potência; e interação entre os controles (SOUZA, Y. R., 2014).

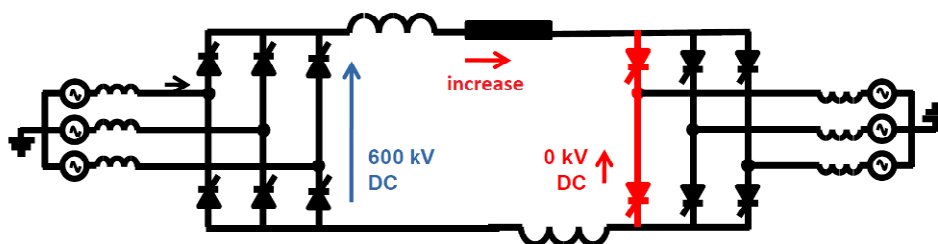
As sobretensões transitórias e as falhas de comutação são causadas por distúrbios nos sistemas AC ou DC. Quanto à interação harmônica, esta deve-se aos sistemas HVDC-LCC serem grandes fontes de harmônicas, gerados pelo lado AC ou DC. E, as ações de controle associadas a sistemas HVDC podem agravar a instabilidade de tensão/potência na barra da SE da estação inversora (SOUZA, Y. R., 2014).

Os impactos das interações *multi-infeed* são quantificados mediante índices de avaliação discutidos na literatura. Entre eles, os principais são a relação de curto-circuito e fator de interação *multi-infeed*, sendo modelados através das grandezas do sistema (SOUZA, Y. R., 2014). Esses índices não são abordados no capítulo, pois não compõem fator primordial do escopo para o desenvolvimento do trabalho proposto.

2.4 FALHA DE COMUTAÇÃO

A FC ocorre quando uma válvula conversora, que deve ser desligada, permanece a conduzir sem transferir sua corrente para a próxima válvula na sequência de disparo (KUNDUR, 1994). Durante a FC, há um curto-circuito no lado DC na ponte conversora, uma vez que ambas as válvulas em um mesmo ramo conduzem simultaneamente (SOOD(2011);XIA *et al.*(2018);PADIYAR(2011)). Dessa forma, a tensão na ponte conversora do terminal inversora se anula, conforme representado de forma esquemática na Figura 9. Como a tensão na ponte conversora do terminal inversora é zero, conseqüentemente a potência transferida também se anula.

Figura 9 – Representação do efeito da FC na ponte conversora.



Fonte: DECKER(2020).

Na maioria dos casos, as FCs são causadas por condições externas ao elo HVDC, que resultam na elevação da corrente DC, em afundamentos da tensão AC ou na ignição tardia. A quase totalidade das FCs ocorrem no terminal inversor; podem ocorrer no retificador no caso de falhas no circuito de disparo (KUNDUR, 1994).

As FCs podem ocorrer em 1 ou 2 ciclos após o distúrbio devido a um curto-circuito na rede AC (RAHIMI *et al.*, 2011). No entanto, a quantidade de ciclos da FC podem variar dependendo da localização da falta e severidade da falta que originou a FC (DAVIES, 2007).

De forma geral, uma queda de tensão em torno de 90% da tensão pré-falta em uma das fases já pode resultar em uma FC (DAVIES, 2007). Na prática, quanto maior for a queda de tensão causada pelo evento externo, maior a probabilidade de ocorrência da FC. A Equação (4) representa a condição necessária para que não ocorra a FC (SOUSA, 2020).

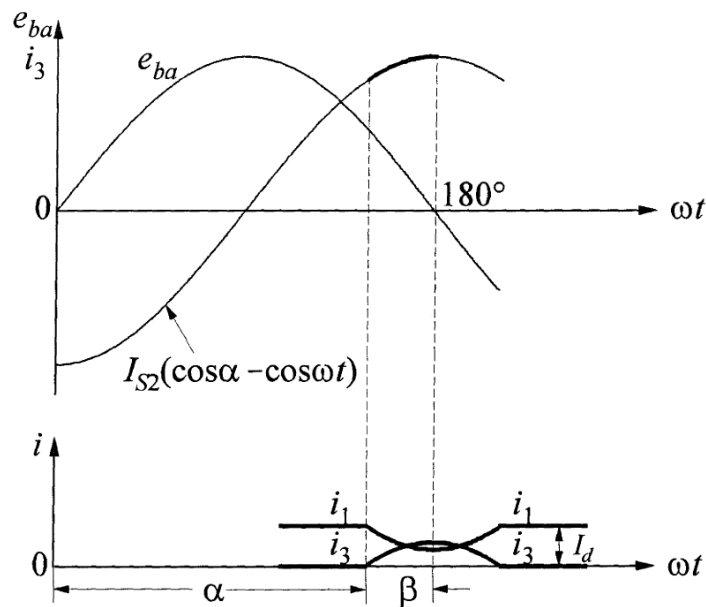
$$\alpha + \mu + \gamma_0 = 180^\circ \quad (4)$$

onde γ_0 é o ângulo correspondente ao tempo de recuperação reverso da chave e a margem necessária para que o processo de comutação seja completado com sucesso. A fim de evitar FC, γ deve ser maior que γ_0 . Ressalta-se que apesar do ângulo máximo dos tiristores seja 180° no modo inversor do conversor, torna-se imprescindível limita-lo a um valor inferior por questões operacionais (ARRILLAGA, 1998). Nos sistemas de controle, γ_{min} é o valor mínimo definido para evitar a ocorrência de FC (PADIYAR, 2011).

Uma ilustração da FC, envolvendo as válvulas 1 e 3 da ponte, pode ser vista na Figura 10, onde tem-se a representação das formas de onda no tempo da tensão sobre a válvula e_{ba} e a corrente AC do conversor i_{S2} (conforme gráfico superior), e das formas de onda no tempo da corrente DC i retratado por i_1 e i_3 durante a comutação das válvulas 1 e 3 (conforme gráfico inferior). Observa-se que após o ângulo de 180° , a extinção da corrente da válvula 1 não é mais possível, pois a tensão e_{ba} sobre a chave se inverte e a válvula continuará a conduzir quando deveria já estar bloqueada.

As correntes das válvulas 2, 4 e 6 durante este evento podem ser vistas na

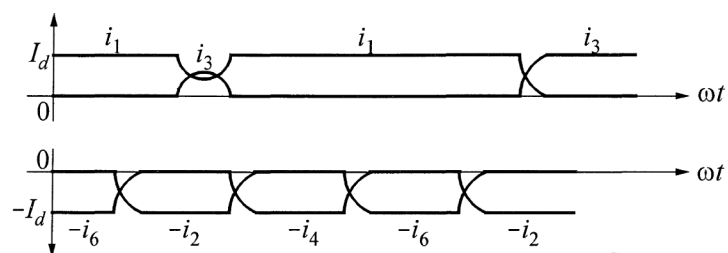
Figura 10 – Falha de comutação no inversor.



Fonte: KUNDUR(1994).

Figura 11. Verifica-se que quando a válvula 4 é disparada, a válvula 1 mantém-se conduzindo por um tempo três vezes maior do o normal. Neste intervalo, verifica-se um curto-circuito na ponte conversora. Neste período que tanto a válvula 1 e 4 estão conduzindo, a tensão DC no inversor é nula e não há transferência de potência pela correspondente ponte conversora do elo HVDC. Como consequência, a tensão DC mantém negativa a tensão na válvula 5, impossibilitando a sua condução. Na sequência, a válvula 4 é bloqueada e a válvula 6 é disparada normalmente, caracterizando a extinção natural da FC (KUNDUR, 1994). A comutação em sequência é iniciada pelo *Constant Extinction Angle* (CEA) e usualmente é bem sucedida; caso o evento persista, o elo HVDC é bloqueado (KIMBARK, 1971).

Figura 11 – Falha de comutação no inversor.



Fonte: KUNDUR(1994).

As FCs podem se repetir, caracterizando as FC duplas ou até mesmo FC sucessivas. A ocorrência de falhas de comutação sucessivas são eventos raros, pois

após uma FC a proteção dos sistemas do controle HVDC atua no sentido de reduzir o ângulo de atraso nos disparos, o que minimiza a chance de ocorrer nova FC (KUNDUR, 1994).

2.5 SÍNTESE DO CAPÍTULO E CONSIDERAÇÕES

Neste capítulo, foram apresentados aspectos estruturais e processos da operação de sistemas HVDC. Assim, conceitou-se a partir do processo de comutação a origem do fenômeno de FC, geralmente associada a curtos-circuitos no sistema AC. A compreensão teórica da FC nos conversores fornece insumos para caracterização dos eventos e a concepção de técnicas de detecção dos mesmos.

3 FALHA DE COMUTAÇÃO EM ELOS HVDC E SEUS EFEITOS NA DINÂMICA DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Nesta seção são abordados os principais aspectos das FC e seus efeitos em SEE, em particular no SIN. Na subseção 3.1, são apresentados os principais aspectos estruturais e operacionais do SIN relevantes ao entendimento do fenômeno. Na subseção 3.2, são apresentadas análises do efeito das FCs no comportamento dinâmico do SIN utilizando dados reais obtidos por PMUs instaladas no sistema de transmissão HVDC do Rio Madeira. Na subseção 3.3, são apresentadas análises dos efeitos do fenômeno de FC na corrente e potência ativa nas pontes conversoras. Na subseção 3.4, observa-se os efeitos da FC na dinâmica do SIN por meio de sincrofasores. Na subseção 3.5, apresenta-se uma revisão de literatura de alguns trabalhos correlatos na literatura.

3.1 ASPECTOS ESTRUTURAIS E OPERACIONAIS RELEVANTES DO SIN

No horizonte 2022, a geração total instalada é 181,5 GW e a geração síncrona total é 150,87 GW. Os sistemas de transmissão HVDC são responsáveis por 20 GW (12,6 GW – 600 kVcc e 8,0 GW – 800 kVcc) de potência instalada, cerca de 13% da geração síncrona total, sendo compostos por 6 bipolos HVDC do tipo LCC em configuração *multi-infeed* (ONS, 2023). A Tabela 2 apresenta as informações principais dos elos HVDC em operação atualmente no SIN. Ressalta-se que apesar de ter extensão da rede básica menor em relação ao sistema de transmissão de *High Voltage Alternating Current* (HVAC) no SIN considerando a totalização do quantitativo em km das linhas de transmissão em operação (ONS, 2023), o sistema de transmissão HVDC é responsável pela transmissão de montante significativo de potência do SIN para o subsistema Sudeste, maior centro de carga do sistema. Todos os elos HVDC são formados por conversores do tipo LCC e operam em configuração *multi-infeed*, caracterizada pela conexão de duas ou mais estações conversoras em subestações eletricamente próximas entre si, em um mesmo sistema de corrente alternada.

Tabela 2 – Sistemas de Transmissão HVDC do SIN.

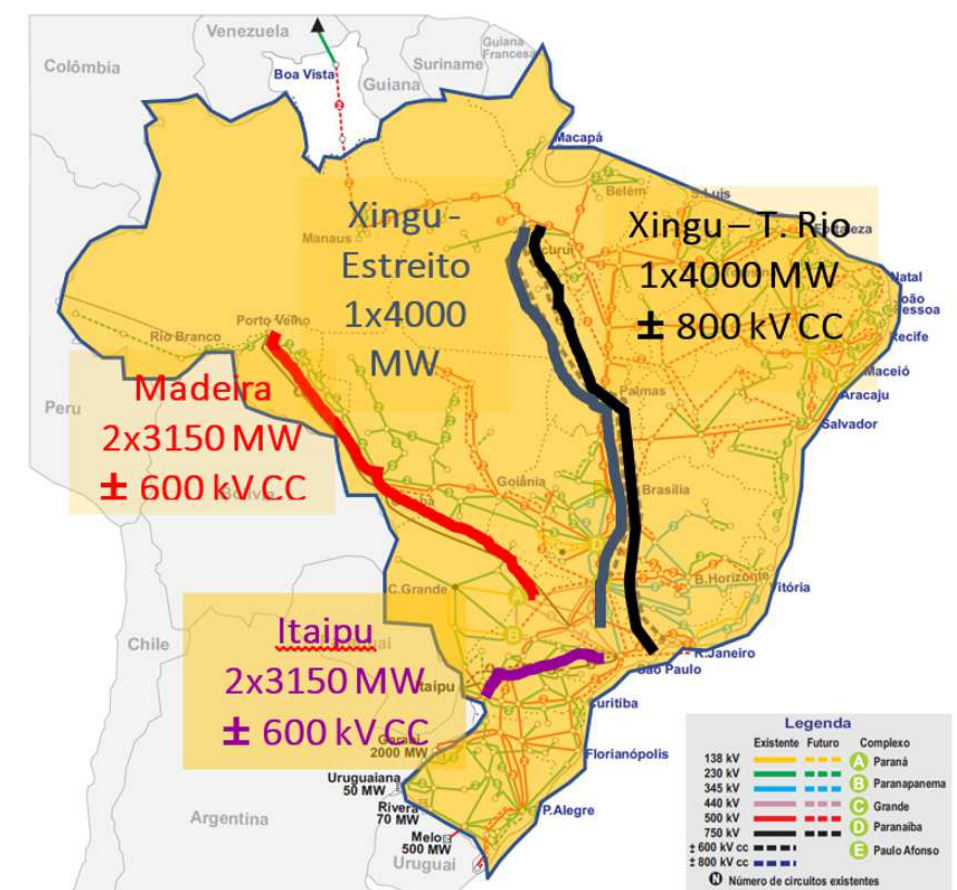
Bipolo (Terminais)	Tensão (kVcc)	Potência (MW)	Comprimento do elo HVDC (km)
Foz do Iguaçu - Ibiúna	600	6.300 (2x3.150)	2 x 820
Coletora Porto Velho – Araraquara 2	600	6.300 (2x3.150)	2 x 2.375
Xingu – Estreito	800	4.000	2.140
Xingu – Terminal Rio	800	4.000	2.438

Cada bipolo HVDC possui a concessão de um agente de transmissão, conforme indicado a seguir: AG1 responsável pelo trecho Coletora Porto Velho - Araraquara 2 em relação ao Bipolo 1 da interligação; AG2 responsável pelo trecho Coletora Porto

Velho - Araraquara 2 em relação ao Bipolo 2 da interligação; AG3 responsável pelo trecho Xingu - Estreito; AG4 responsável pelo trecho Xingu - Terminal Rio; e Agente de Transmissão 5 (AG5) responsável pelo trecho Foz do Iguaçu - Ibiúna.

Na Figura 12 apresenta-se um diagrama geoeletrico com indicação dos elos HVDC. Destaca-se que os elos HVDC associados às estações conversoras Xingu, Estreito e Terminal Rio estão embutidos no mesmo sistema de corrente alternada (subsistema síncrono principal do SIN). Em especial, contingências no sistema de transmissão HVDC de Belo Monte, incluindo aquelas relativas a FCs, afetam de forma particular a estabilidade eletromecânica das máquinas síncronas do SIN, podendo conduzir máquinas da região Norte à perda de sincronismo em relação às demais máquinas do SIN. Nesse caso, pode ocorrer a abertura das interligações AC da região Norte com o restante do SIN, com formação de ilhas sujeitas a grandes desbalanços de geração (DECKER, 2020).

Figura 12 – Elos HVDC do SIN.



Fonte: AQUINO (2022).

As demais interligações HVDC do SIN representadas na Figura 3 conectam usinas (Santo Antônio, Jirau e Itaipu 50 Hz) que operam de forma assíncrona em relação ao restante do sistema. Ainda assim, os efeitos de falhas de comutação nesses sistemas podem contribuir para o agravamento do desempenho dinâmico do SIN, pois

reduções abruptas na potência injetada na região Sudeste têm como consequência a desaceleração dos rotores das máquinas síncronas que operam nessa região, com consequente aumento da defasagem angular entre os diversos subsistemas do SIN.

A distribuição espacial da carga e a variabilidade e sazonalidade dos recursos de geração disponíveis em cada subsistema dá origem a diferentes cenários de importação e exportação de energia. Os diferentes cenários resultam em maiores ou menores fluxos nas interligações elétricas existentes, condição operacional que tem grande influência no comportamento dinâmico do SIN. No período úmido no qual tem-se o cenário Norte exportador, há elevadas transferências de energia para a região Sudeste pelos sistemas de transmissão HVAC e HVDC (DECKER, 2020). Com isto, tem-se menor número de unidades geradoras sincronizadas na região Sudeste e interações AC-DC mais intensas, principalmente relacionadas à Unidade Hidrelétrica (UHE) Belo Monte, que está em sincronismo ao sistema de corrente alternada do SIN por meio da interligação Norte - Sudeste. Por estas características, este cenário se apresenta como o mais crítico para a segurança elétrica do sistema na ocorrência de FC.

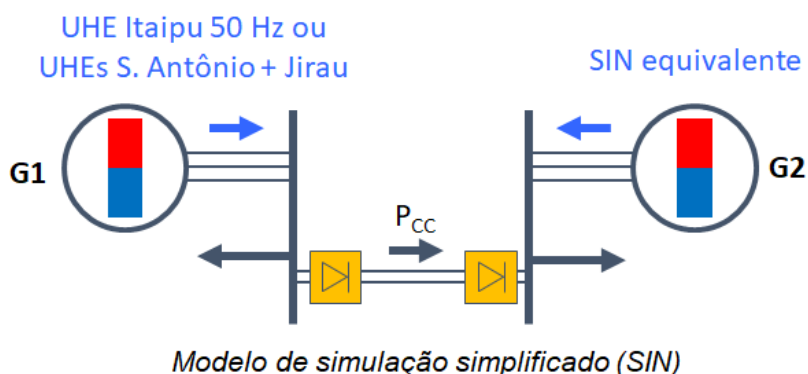
3.2 EFEITOS NO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE UM SISTEMA DE ENERGIA ELÉTRICA

A severidade sistêmica das FC está associada ao montante de potência interrompido no elo HVDC e a dinâmica de recuperação da potência até o valor original de transmissão. Em específico, como o SIN possui sistemas de transmissão HVDC embutidos ou não no sistema AC, o efeito que FCs causam no comportamento dinâmico do sistema depende também de qual sistema HVDC sofreu a FC. Com o fim de exemplificar os efeitos da FC no comportamento dinâmico de um SEE, apresenta-se na sequência simulações para um modelo equivalente do SIN, conforme exposto em (DECKER, 2020).

De forma ilustrativa, a Figura 13 apresenta um modelo equivalente do sistema de transmissão HVDC que conecta as UHEs associadas ao rio Madeira (S. Antônio e Jirau) e o SIN. O modelo equivalente também seria válido para a representação da conexão da UHE Itaipu 50Hz ao SIN. Na Figura 13, P_{cc} representa o fluxo de potência entre os sistemas importador e exportador, que flui pelo elo HVDC.

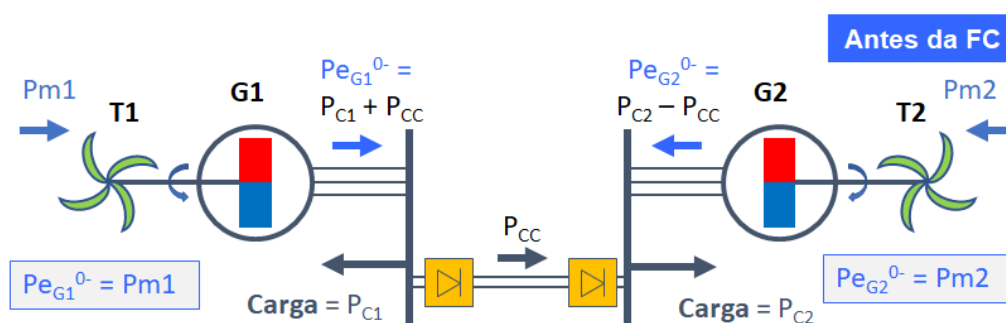
A Figura 14 apresenta o mesmo sistema um instante antes (0^-) da ocorrência de uma FC. Na figura 14, P_{mi} representa a potência mecânica equivalente, P_{gi} representa a potência elétrica equivalente, P_{ci} representa a carga equivalente do sistema $i=1,2$, sendo 1 o lado exportador (UHEs) e 2 o lado importador (SIN). Observa-se que no instante 0^- o sistema equivalente exportador supre a carga P_{c1} fornece potência ativa P_{cc} e P_{ca} ao sistema importador, que desta forma supre a carga P_{c2} complementarmente com a geração própria.

Figura 13 – Representação de sistema HVDC assíncrono.



Fonte: AQUINO (2022).

Figura 14 – Representação de sistema HVDC assíncrono antes de FC.



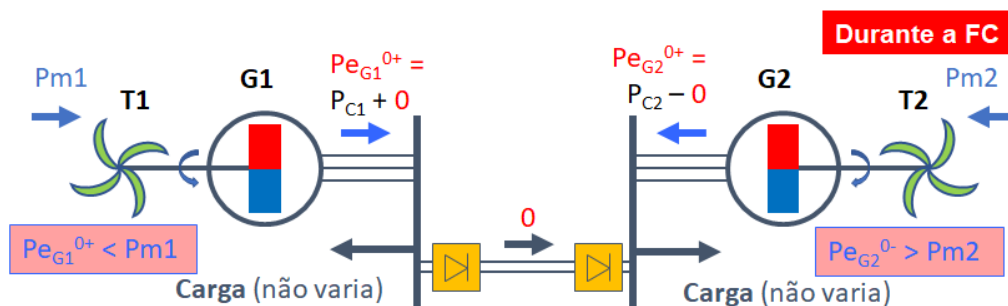
Fonte: AQUINO (2022).

Quando ocorre um evento de falha de comutação (instante 0^+), o fluxo P_{cc} torna-se nulo e a potência ativa dos sistemas importador e exportador passam a ser diferentes das suas respectivas potências mecânicas equivalentes, conforme representado na Figura 15. No sistema 1 (até então exportador), a potência elétrica passa a ser menor que a potência mecânica e o gerador equivalente acelera. No sistema 2 (até então importador), o oposto ocorre. Embora tais variações não sejam na prática instantâneas, são relativamente rápidas no contexto da dinâmica dos rotores, razão pela qual se está considerando que a potência do elo vai a zero instantaneamente.

No caso de FCs em sistema com elos embutidos na rede AC, há especificidades relacionadas com a configuração, conforme ilustrado a seguir. A Figura 16 apresenta uma representação do sistema de transmissão que conecta a UHE Belo Monte (ou Unidade Geradoras (UGs) da região Norte ao SIN), onde P_{CA} representa o fluxo AC. O cenário de geração representado é conhecido como Norte exportador, no qual tem-se exportação para a região Sudeste pelo bipolo associado à Belo Monte e pela conexão AC. O fluxo P_{CA} representa o fluxo na interligação Norte-Sudeste do SIN, conforme descrita na seção 3.1.

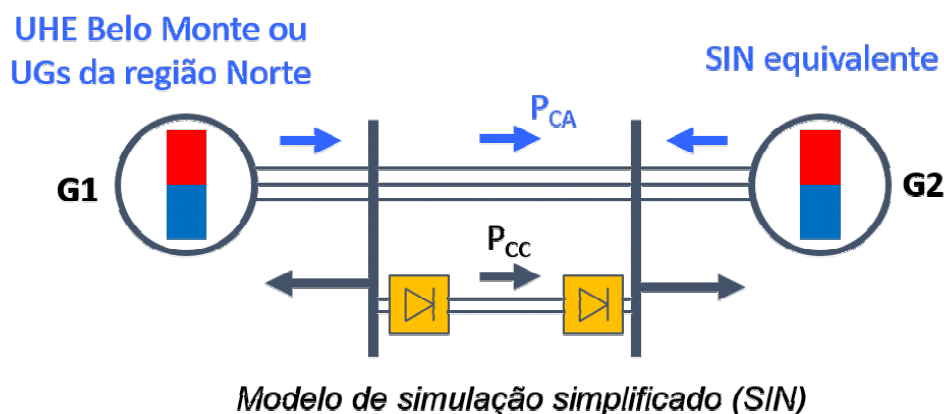
A Figura 17 representa os fluxos de potência durante o regime permanente

Figura 15 – Representação de sistema HVDC assíncrono durante FC.



Fonte: AQUINO (2022).

Figura 16 – Representação de sistema HVDC síncrono.



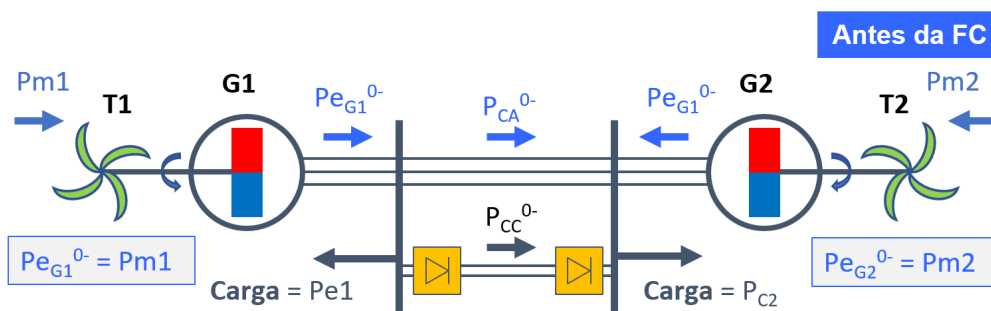
Modelo de simulação simplificado (SIN)

Fonte: AQUINO (2022).

antes das FCs. Na figura 17, o sistema 1 representa a região Norte e o sistema 2 representa a região Sudeste, com os fluxos de potência no sentido Norte-Sudeste (P_{CA} e P_{CC}) para seus respectivos carregamentos (P_{e1} e P_{e2}). Na prática, nestas condições operativas as interligações em corrente alternada e os elos HVDC encontram-se mais carregados, agravando os efeitos das FC no comportamento dinâmico do SIN. Além disso, o cenário Norte exportador caracteriza-se pela operação com número reduzido de unidades geradoras na região Sudeste. Como consequência, reduzem-se os níveis de curto-circuito e a inércia equivalente no subsistema Sudeste, resultando em maior fragilidade operacional do sistema elétrico nesta condição específica.

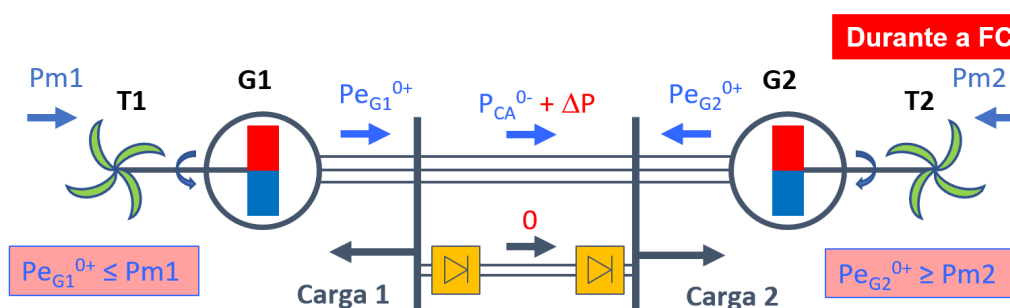
A Figura 18 apresenta as interações dos fluxos durante a FC. Observa-se que o bipolo passa a não transmitir potência durante a FC e há transferência de parte da potência interrompida para a rede AC (ΔP na figura). A parcela da potência do elo HVDC não transferida para a rede AC faz com que o gerador equivalente do sistema exportador acelere e o gerador equivalente do sistema importador desacelere, resultando em aumento das defasagens angulares, com riscos de perda de sincronismo a depender da severidade da FC e das condições operacionais do SIN.

Figura 17 – Representação de sistema HVDC síncrono antes de FC.



Fonte: AQUINO (2022).

Figura 18 – Representação de sistema HVDC síncrono durante FC.

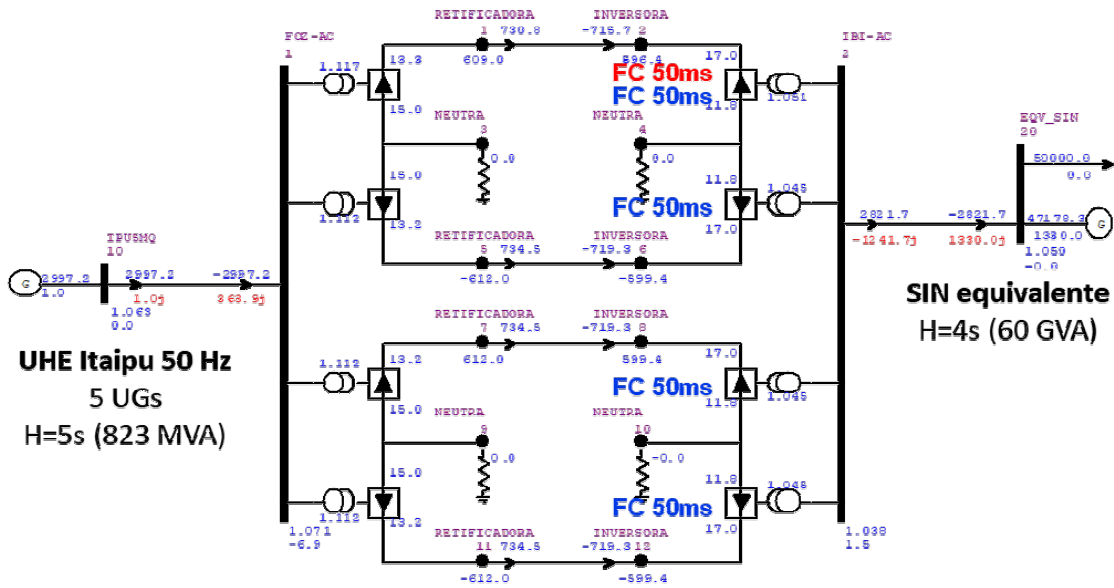


Fonte: AQUINO (2022).

Para a comparação do impacto de FCs em sistemas HVDC síncronos e assíncronos do SIN, realizou-se simulações ilustrativas no *software* Análise de Transitórios Eletromecânicos (ANATEM) (INESC, 2022). Primeiramente, estudando os sistemas assíncronos, simulou-se dois casos de FC na linha HVDC conectada a Itaipu 50Hz, como representado na Figura 19. No primeiro caso, a FC foi simulada em apenas um polo do sistema, (indicado em vermelho na figura), e em seguida a FC foi simulada em 4 polos do sistema (indicados em azul). Para o estudo de FC em sistema HVDC síncrono, utilizou-se o equivalente representado na Figura 20. Novamente, foram simulados dois casos: FC em um só polo (em vermelho) e FC em quatro polos (em azul). A potência e a inércia do sistema equivalente do SIN foram mantidas as mesmas em todas as simulações, e as potências e inércias da UHE Itaipu 50Hz e UHE Belo Monte foram ajustadas em função das características de cada sistema.

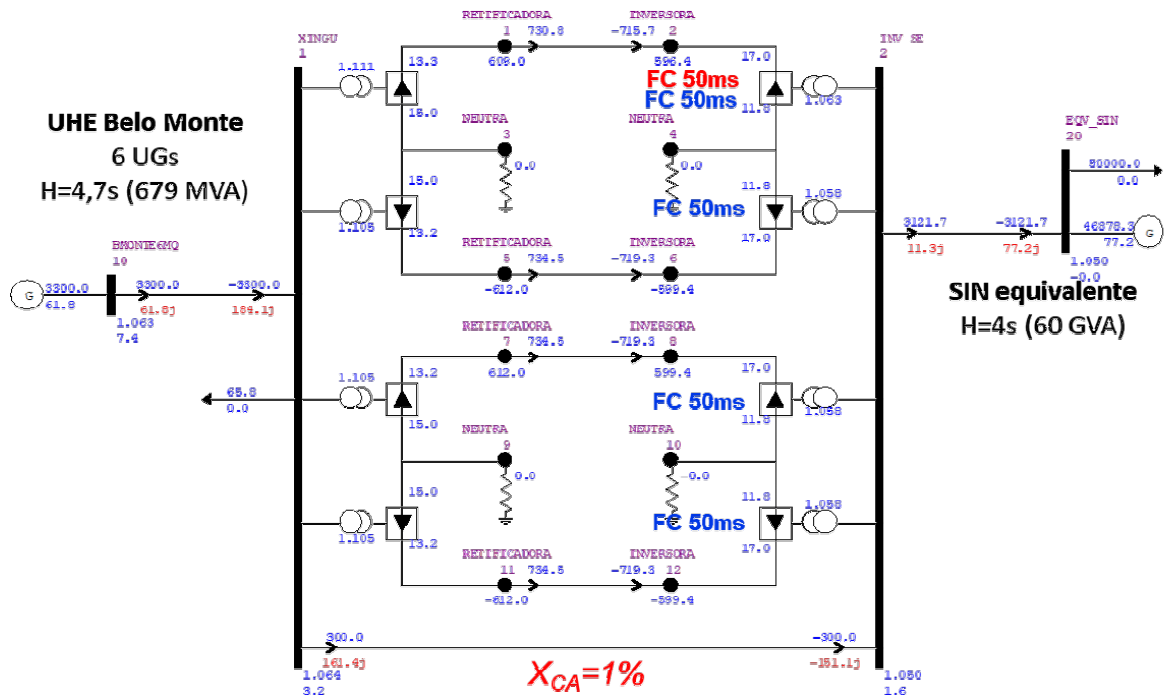
Os resultados das simulações podem ser vistos na Figura 21, onde cada uma das figuras apresenta a frequência dos geradores equivalentes para os casos com FC em um polo (vermelho) e quatro polos (azul), sendo que a sub-figura superior esquerda está relacionada ao gerador equivalente de Itaipu, a sub-figura inferior esquerda está relacionada ao gerador equivalente do SIN no caso assíncrono, a sub-figura superior direita está relacionada ao gerador equivalente de Belo Monte e a sub-figura inferior

Figura 19 – Sistema equivalente assíncrono para simulação de FC.



Fonte: AQUINO (2022).

Figura 20 – Sistema equivalente síncrono para simulação de FC.



Fonte: AQUINO (2022).

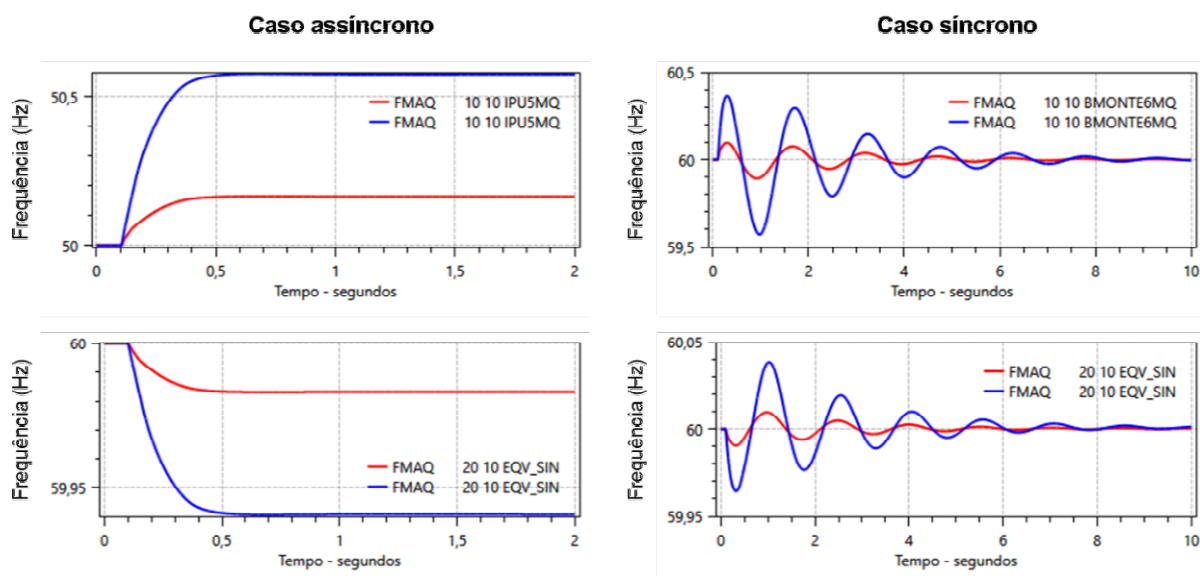
direita está relacionada ao sistema equivalente do SIN no caso síncrono. Pode-se observar que houve maior excursão de frequência nos casos em que mais polos

sofreram FC, resultado esperado em função do maior valor de energia interrompida no caso de FC em 4 polos.

A questão central a ser destacada na comparação entre os casos síncrono e assíncrono está associada a questões relativas ao sincronismo entre os sistemas. No caso síncrono, há que se garantir o sincronismo entre os sistemas exportador e importador; caso contrário, a interligação CA será aberta por suas proteções de perda de sincronismo, resultando no agravamento da perturbação. No caso assíncrono, não há que se falar em manter o sincronismo entre os sistemas exportador e importador, que operam normalmente de forma assíncrona.

O efeito das FC na estabilidade de sistemas síncronos está ilustrado na Figura 22. Embora o sistema tenha se mantido estável para ambos os casos simulados (FC em 1 polo e em 4 polos), as FCs causaram aumento da defasagem angular entre o rotor do gerador equivalente de Belo Monte e o rotor do gerador equivalente do SIN, com severidade maior para o caso de FC em 4 polos (maior energia interrompida). Para o caso com FCs em quatro polos, a defasagem angular adicional atingiu cerca de 50° na primeira oscilação. Conforme exposto anteriormente, maiores defasagens angulares conduzem a riscos de perda de sincronismo entre os dois terminais.

Figura 21 – Resultados das simulações de FC em sistemas síncronos e assíncronos.

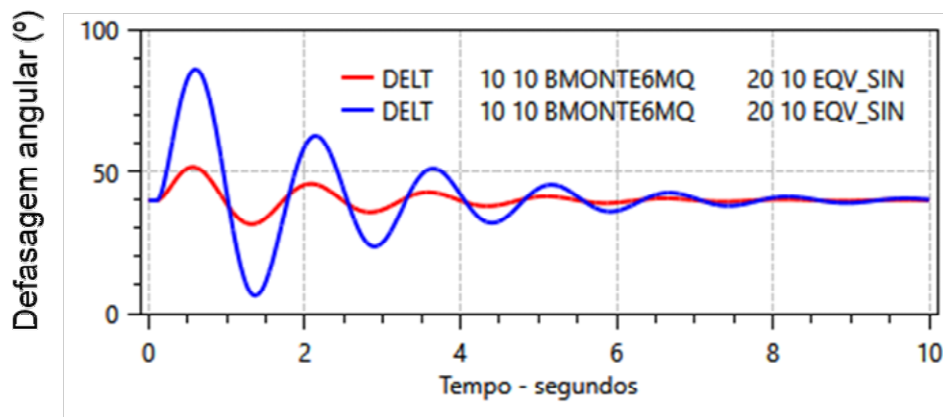


Fonte: AQUINO (2022).

3.3 EFEITOS DAS FC NAS CORRENTES DAS PONTES CONVERSoras E NA POTÊNCIA ATIVA INJETADA

Nesta seção aborda-se, dentro do contexto do SIN, casos de simulação da FC com o intuito de analisar seus efeitos em grandezas do sistema elétrico, tais como a

Figura 22 – Caso síncrono - Defasagem angular.



Fonte: AQUINO (2022).

corrente e a potência ativa. Na Subseção 3.2.1, verifica-se os efeitos nas correntes nas pontes conversoras associadas aos transformadores conversores com ligação YY e YD. Na Subseção 3.2.2, examina-se as repercussões dos eventos da potência ativa instantânea.

3.3.1 Efeitos nas correntes das ponte conversoras

As principais evidências das FC são observadas nas grandezas elétricas do lado DC do conversor; no entanto, é possível observar a repercussão dos efeitos da FC na tensão e corrente pelos lados AC. Para ilustrar os efeitos de FCs nas pontes conversoras para o estudo do fenômeno, escolheu-se analisar um dos casos de simulação fornecidos pelo ONS, produzidos no programa PSCAD/EMTDC. Os casos fornecidos consideram as seguintes premissas (ONS, 2019):

- Bipolos Xingu-Estreito e Xingu-Terminal Rio com potência máxima (2 x 4.000 MW);
- Bipolos do Complexo do Madeira por potência total de 6.000 MW;
- Bipolos associados à UHE Itaipu 50 Hz com potência total de 4.200 MW;
- Modelos dos bipolos fornecidos pelos correspondentes agentes de transmissão 1 a 5, denotados por AG1, AG2, AG3, AG4 e AG5;
- Sistema equivalente composto por equivalentes estáticos e dinâmicos, com representação detalhada de algumas usinas;
- Representação equivalente da interligação Norte-Sul, por meio de dois equivalentes de transferência em 500 kV, entre as barras de fronteira.

Os registros fornecidos em formato de oscilografias no tempo pelo ONS referem-se à aplicação de curtos-circuitos monofásicos sólidos, de duração igual a 100 ms, em uma das seguintes subestações (barras): Adrianópolis 500 kV, Araraquara 2 500 kV (estação conversora), Araraquara 440 kV, Estreito 500 kV (estação conversora), Ibiúna 345 kV (estação conversora), Nova Iguaçu 500 kV, Terminal Rio 500 kV (estação conversora) e Araraquara 500 kV.

Nesta seção, optou-se por utilizar a simulação com curto-circuito de 100 ms na SE Estreito 500 kV. Para curtos-circuitos nessa SE, nem todas as pontes das estações conversoras sofreram FC. Além disso, foram observadas FCs de diferentes severidades, sendo possível analisar perfis de comportamento da FC.

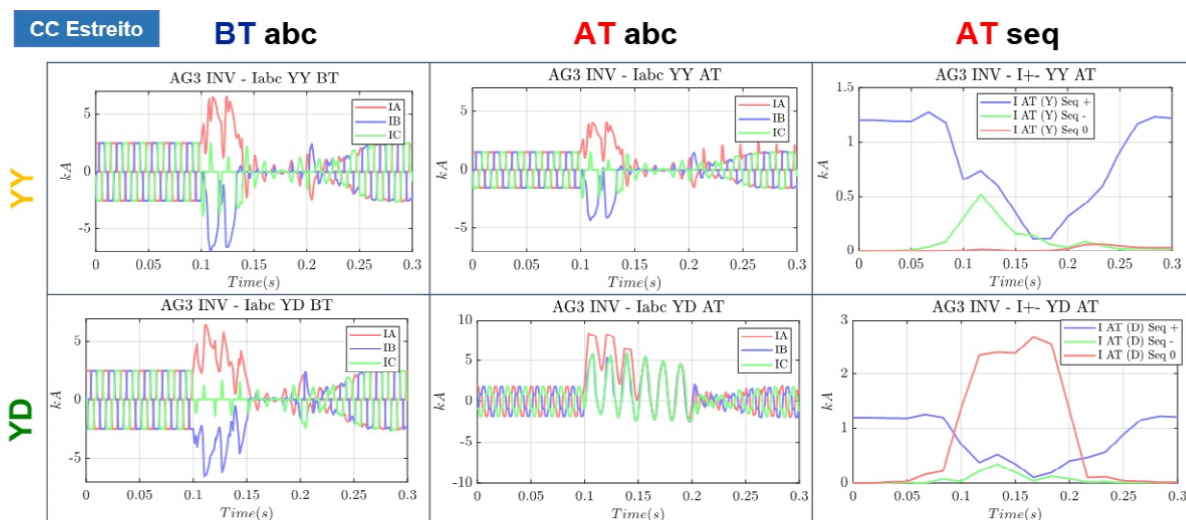
A severidade do evento, que consiste num aspecto importante para avaliação da FC, foi feita principalmente pelo parâmetro Tempo de Interrupção de Potência (TIP), que contabiliza o tempo no qual a potência ativa encontra-se em zero. Este parâmetro é decisivo nos efeitos da FC pois está ligado ao impacto na estabilidade eletromecânica do SIN, em função das contingências que provoquem o evento de FC (ONS, 2019). Assim, investigou-se inicialmente o terminal inversor do agente AG3, por apresentar maior TIP entre todos os bipolos ($TIP = 48ms$). Na prática, o conversor que opera como inversor é o que está de fato sujeito às FCs com origem em curtos-circuitos no sistema AC. Isto ocorre devido à menor margem de ângulo de extinção com que o inversor opera, em relação ao retificador, conforme abordado na seção 2.2. Desta forma, apesar dos efeitos de FC também afetarem o terminal do retificador, são os sinais do inversor os mais importantes para compreensão dos eventos.

A Figura 23 apresenta as componentes trifásicas e a componentes de sequência das correntes nos transformadores do terminal inversor AG3. No transformador YY, observa-se que a FC se comporta semelhantemente a um curto-circuito bifásico entre as fases A e B (ver subfiguras AG3 INV - $I_{abc}YYBT$ e AG3 INV - $I_{abc}YYAT$). No domínio de fase, tem-se $I_a \cong -I_b$ e $I_c \cong 0$ (ver subfiguras AG3 INV - $I_{abc}YYBT$ e AG3 INV - $I_{abc}YYAT$) e no domínio de sequência tem-se $I_+ \cong -I_-$, $I_0 \cong 0$ (ver subfigura AG3 INV $I_+ - 0YY$) logo após a falha. Observa-se também o comportamento similar em ambos os lados de BT e AT do transformador, salvo a magnitude diferente, devido à configuração YY.

Em relação ao transformador YD, devido à configuração em delta no lado de BT, o comportamento entre os dois lados difere bastante. No lado de AT, constata-se que, durante a FC, as correntes estão em fase, com baixa distorção harmônica. Com isto, observa-se a alta magnitude de corrente de sequência zero e baixa magnitude das correntes de sequência positiva e negativa. A alta magnitude da componente zero, deve-se ao evento estar eletricamente próximo ao terminal e a natureza da falta ser fase-terra.

Posteriormente, também analisou-se os sinais de corrente do terminal inversor

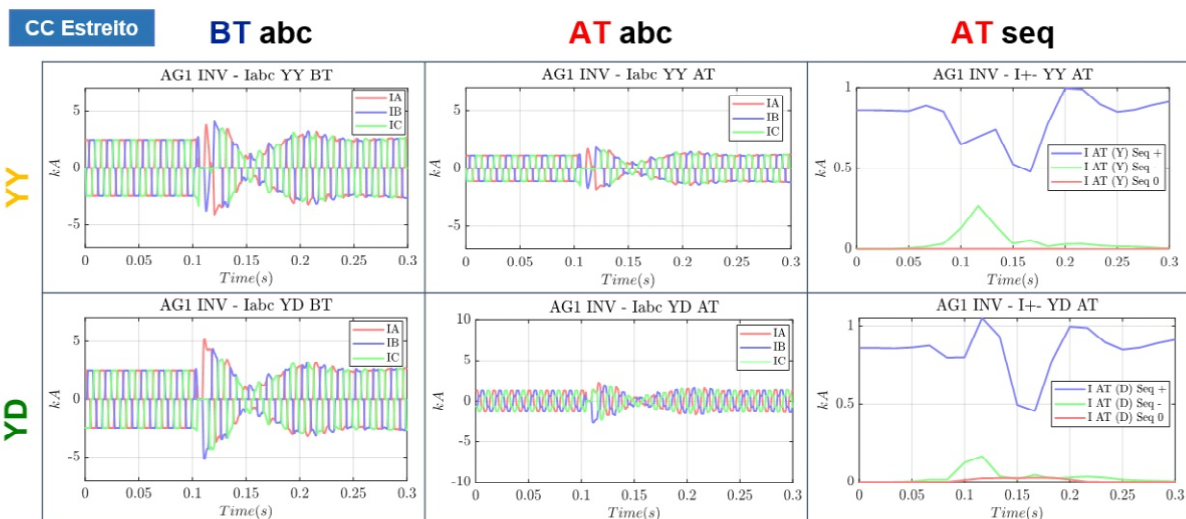
Figura 23 – Sinais de corrente - AG3 inversor.



dos demais agentes AG1, AG2, AG4 e AG5, devido à falha na SE Estreito 500 kV. As correntes nos transformadores do AG5, apresentaram comportamento análogo àquele correspondente ao visto AG1.

Como pode ser visto na Figura 24, que apresenta as componentes de fase e simétricas das correntes dos transformadores conversores das pontes da estação inversora do sistema AC HVDC de AG1, constata-se que a magnitude das correntes durante o evento são inferiores as de AG3. O *TIP* correspondente a este evento está em torno de 3 ms, caracterizando um evento pouco severo, o que é evidente principalmente nas correntes de fase, que não chegam a apresentar valores nulos. Em relação às componentes simétricas das correntes, verifica-se valor bastante reduzido da componente de sequência zero na ponte do transformador conversor YD (ver subfigura ELN INV $I+ - 0YD$), em comparação com o terminal de AG3, em razão do terminal do agente AG1 estar eletricamente distante da falta em Estreito.

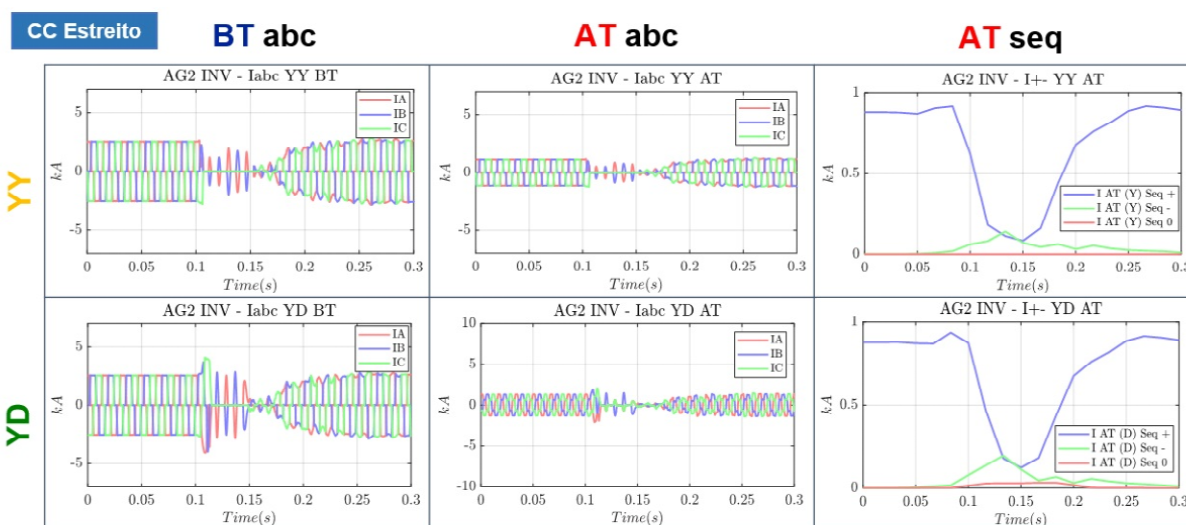
Figura 24 – Sinais de corrente - AG1 inversor.



Ressalta-se que mesmo o sinal de corrente de AG1 não tenha alcançado valor zero na subfigura AG1 INV - I_{+0YYAT} , devido à baixa severidade do evento, este evento é caracterizado como FC. De fato, observa-se nas subfiguras AG1 INV $I_{abc} YD BT$, e AG1 INV $I_{abc} YY AT$, AG1 INV $I_{abc} YD BT$ e AG1 INV $I_{abc} YD BT$ que $I_a \cong I_b$ e $I_c \cong 0$ após $t > 0.1s$. No sinal de potência calculado é possível observar a potência alcançando valor zero, o que representa a ausência de transferência da energia.

As correntes nos transformadores do agente AG2 apresentam severidade maior ($TIP = 38$ ms) que aquelas observadas no bipolo de AG1, que opera em paralelo a este. O comportamento das correntes das componentes de fase e simétricas é similar àquele apresentado no terminal do elo HVDC de AG3, conforme pode ser visto na Figura 25, sendo $I_a \cong -I_b$ e $I_c \cong 0$ (ver subfiguras AG2 INV - $I_{abc} YYBT$, AG2 INV - $I_{abc} YYBT$ e AG2 INV - $I_{abc} YDAT$). Porém, é nulo o valor da sequência zero na ponte do transformador conversor YD (ver subfigura AG1 INV I_{+0YD}), assim tem-se que $I_b \cong -I_c$ e $I_a \cong 0$ (ver subfigura AG2 INV - $I_{abc} YDAT$). Este comportamento das correntes deve-se ao elo HVDC de AG2 está eletricamente distante da falta sólida fase-terra na SE Estreito 500 kV.

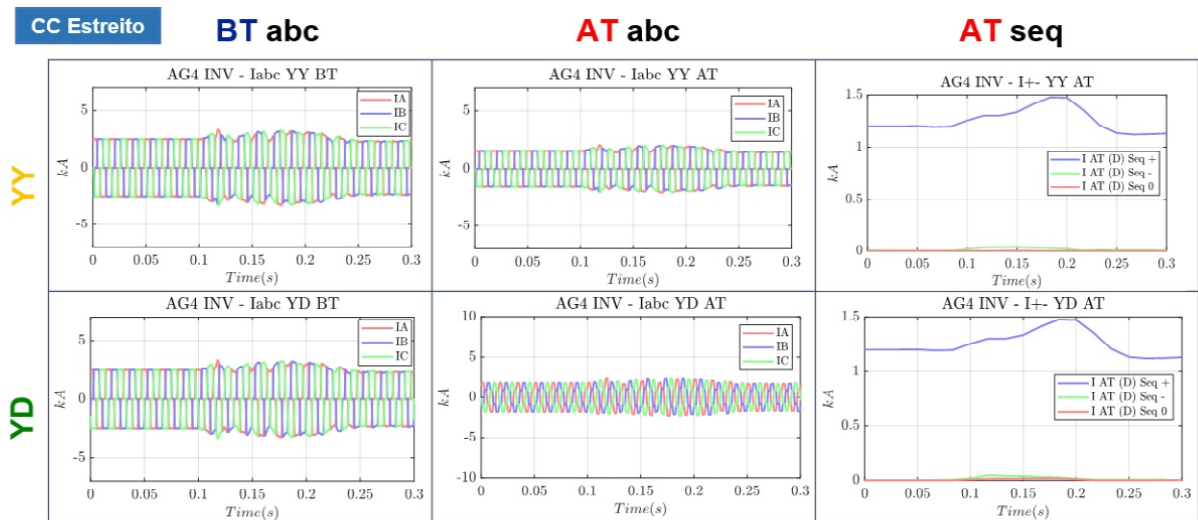
Figura 25 – Sinais de corrente - AG2 inversor.



As correntes nos transformadores do agente AG4, como pode ser visto na Figura 26, não são indicativas da ocorrência de FC. As componentes de fase e componente simétrica da corrente apresentam uma pequena perturbação.

Observou-se os resultados relativos aos outros casos de simulação de FC com origem em curto-circuitos em outras SE no SIN. Nas estações conversoras que situam-se eletricamente próximas ao local da falta, as FC foram mais severas e a corrente do transformador conversor YD pelo lado de AT apresentaram elevada presença de sequência zero. Tal constatação indica que a componente simétrica de sequência zero não está ligado a uma caracterização própria da FC. Porém, em todos os casos das simulações verificou-se uma queda da componente simétrica de sequência positiva e

Figura 26 – Sinais de corrente - AG4 inversor.



elevação da componente de sequência negativa com proporções variando de acordo com a severidade do evento.

3.3.2 Efeitos na potência ativa injetada

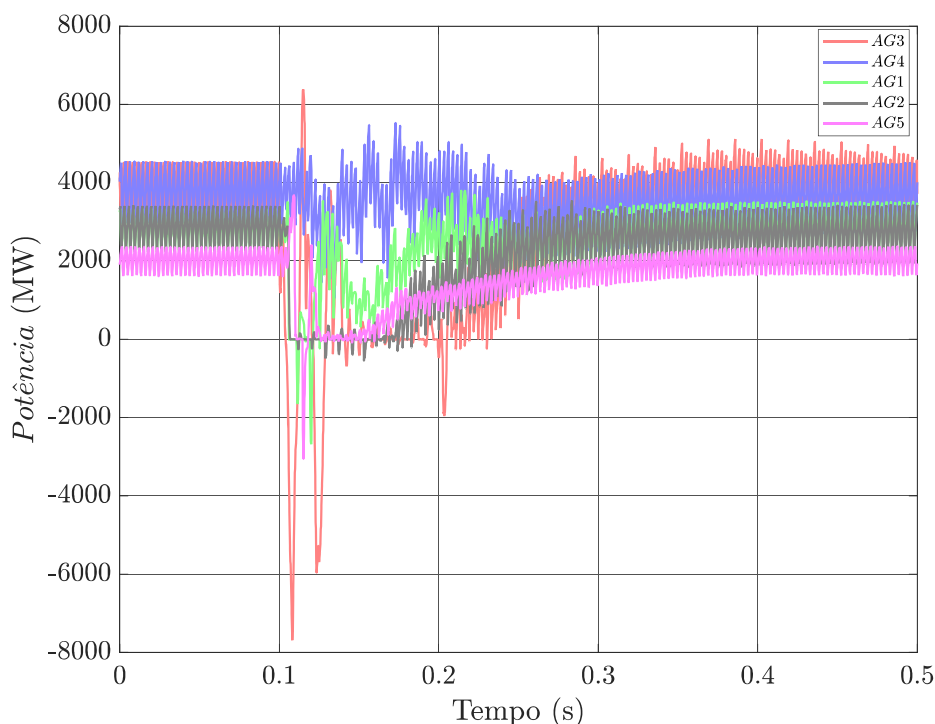
Os efeitos da potência ativa nos conversores podem ser vistos na Figura 27, que apresenta as potências dos terminais inversores dos elos HVDC AG1, AG2, AG3, AG4 e AG5 referentes à simulação estudada. Observa-se que o curto-circuito em Estreito ocasiona FC em quatro dos cinco terminais (AG4 não sofre FC nesse caso). A potência destes quatro terminais reduz-se significativamente após o instante do início da falta, 0,1 s. Também verifica-se que o terminal AG4 é afetado, embora não exista a ocorrência de FC e interrupção de transmissão de potência.

O evento descrito caracteriza uma condição de FCs simultâneas, propiciadas pela configuração *multi-Infeed*. Neste sentido, fica evidente a importância do monitoramento de todos os terminais de bipolos para que seja possível a avaliação dos efeitos dinâmicos no SIN, após a detecção do evento. Nos outros casos de simulações fornecidos pelo ONS, observou-se o mesmo comportamento nas oscilografias das pontes conversoras nos terminais que foram afetados pela FC e tiveram TIP maior que 0, tal como FCs simultâneas devido a configuração em *multi-Infeed* dos elos HVDC. Desta forma, tem-se que a potência oferece caracterização relevante para fornecer insumo na elaboração de métodos de identificação da FC.

3.4 OBSERVAÇÃO DOS EFEITOS NA DINÂMICA COM BASE EM SINCROFASORES

Por conta do advento da tecnologia de sincrofesores, tornou-se possível observar os efeitos causados por FCs na dinâmica do SEE monitorado, a partir de sinais

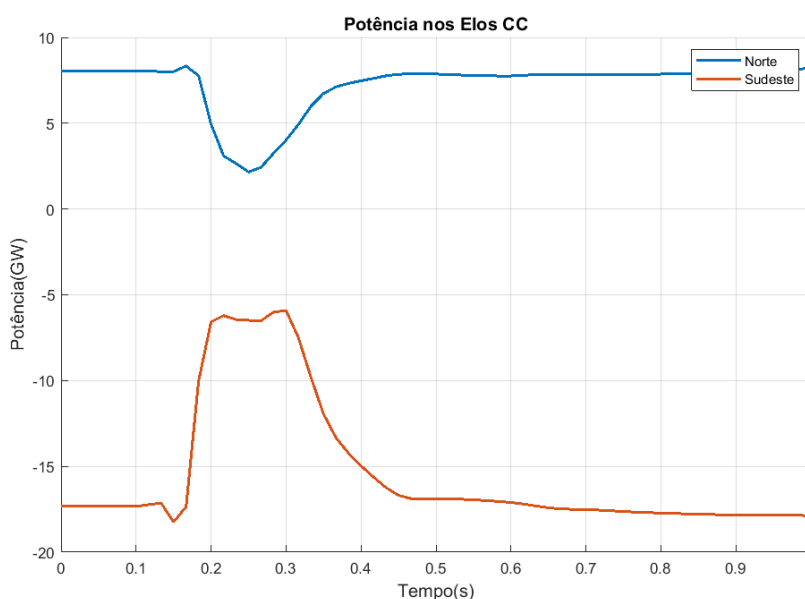
Figura 27 – Efeitos na potência ativa nos conversores.



de tensão, corrente, defasagem angular, frequência e potência. Especialmente os sinais de potência tornaram-se de grande valia no estudo das FCs, devido às possíveis interrupções de fornecimento e conseqüente perda de sincronismo em sistemas com interligações AC em paralelo às interligações DC. Para ilustrar os efeitos na dinâmica do SIN, o caso de simulação anteriormente apresentado na Seção 3.2, que consiste na aplicação de uma falta monofásica sólida no barramento AC da SE ARARAQUARA2 – SP500 que ocasiona FC nos elos HVDC do SIN, é utilizado na observação dos efeitos da FC com base em sincrofases.

Na Figura 28 são apresentados os sinais de potência relacionados ao evento simulado, calculados a partir dos fasores de tensão e corrente na taxa de resolução em 60 FPS, sendo o sinal em azul que representa os dados referentes aos elos HVDC do sistema Norte do SIN (AG1, AG2, AG3 e AG4 – Estações retificadoras), e em laranja os dados dos elos HVDC do sistema Sudeste do SIN (AG1, AG2, AG3, AG4 e AG5 – Estações inversoras). Nos dados referentes ao sistema Norte, observa-se variação abrupta da potência ativa, que inicialmente cresce para em seguida decrescer em 75% o valor pré-evento em regime permanente, cerca de 10 ms após o início do evento. Nos dados referentes ao sistema Sudeste, também ocorrem variações abruptas, e o sinal de potência decresce em 65% o valor original, em cerca de 12 ms após o início do evento. As injeções de potência em ambos os terminais são reestabelecidas a 90% do patamar pré-evento em cerca de 200 ms após o início do evento, incluindo a duração do curto-circuito.

Figura 28 – Sinal de potência ativa nos elos HVDC do Norte e Sudeste do SIN sob efeitos da FC devido a falta em Araraquara 2 500 kV.



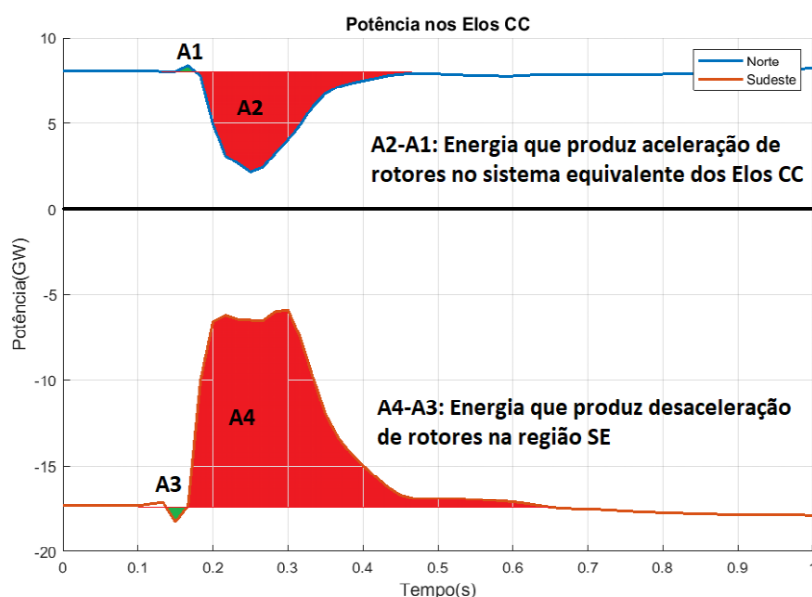
A partir destes dados é possível avaliar a severidade do impacto causado pela FC no sistema. Como pode ser visto Figura 29, é possível estimar a energia total acelerante (nos elos HVDC do sistema Norte) e desacelerante (nos elos HVDC do sistema Sudeste), destacado em vermelho nas áreas A2 e A4, respectivamente. O impacto estimado foi de 735MWs e 2030MWs nos bipolos e nos elos HVDC do sistema Norte e Sudeste, respectivamente, o que pode ser utilizado como indicador da severidade dos eventos de falhas de comutação nos elos HVDC do SIN, tendo em vista a repercussão na dinâmica do SIN.

3.5 TRABALHOS CORRELATOS NA LITERATURA

A FC é um fenômeno descrito de forma ampla na literatura de sistemas HVDC. Destaca-se, entretanto, alguns trabalhos correlatos à temática desta dissertação. A maioria dos trabalhos encontrados de detecção de FC utilizam grandezas elétricas DC como tensão DC, correntes da linha DC, corrente DC das válvulas das pontes conversoras e ângulos do processo de comutação, obtidos através do sistema de proteção e controle dos elos HVDC (ZHOU *et al.*, 2022). Apenas CALDERON (2018) propõe a detecção de FC através de sincrofasores, mas com escopo restrito. A seguir são destacados os principais trabalhos correlatos à temática da dissertação.

Em CALDERON (2018), aborda-se a temática de detecção e localização das FC. No entanto, devido a dificuldades de simulação da FC nas plataformas propostas, é realizado somente o estudo dos efeitos físicos das FCs com PMU, utilizando simulações de sincrofasores via MATLAB/Simulink para o modelo *benchmarking* CIGRE

Figura 29 – Energias totais acelerante e desacelerante nos sistemas Norte e Sudeste, respectivamente, com os elos HVDC sob efeito de FC devido a curto-circuito em Araraquara 2 500 kV.



LCC-HVDC. São analisados os circuitos das pontes conversoras para investigar o comportamento das componentes simétricas de grandezas elétricas durante o fenômeno de interesse para diversos casos de curto-circuito.

Em MA; LIU; CHENG (2022), é desenvolvida uma metodologia de detecção de FC baseada na taxa de variação da energia da indutância de comutação. No estudo, a metodologia desenvolvida faz uso de características distintas da tensão DC, corrente DC da linha de transmissão e corrente DC das válvulas quer em condições normais do processo de comutação e durante FC. Na metodologia é detectada a FC sem a necessidade de dados de corrente DC das válvulas. No entanto, a metodologia desenvolvida é muito dependente das impedâncias intrínsecas do SEE. A metodologia foi testada no modelo *benchmarking* CIGRE LCC-HVDC.

Em LIN *et al.* (2018), é elaborado um método de detecção de FCs consecutivas baseado nos coeficientes da wavelet Daubechies. O sinal de entrada utilizado no método consiste na corrente DC do elo HVDC. Uma vez que os coeficientes da wavelet obtidos excedem um valor limiar estabelecido, a FC é detectada. O método foi testado no modelo *benchmarking* CIGRE LCC-HVDC.

Dessa forma, o trabalho proposto nesta dissertação é o primeiro estudo que utiliza sincrofasores para detecção de FC num contexto de sistemas HVDC Multi-infeed com resultados concretos. Os dados de sincrofasores apresentam-se como uma alternativa no desenvolvimento tema, também sendo possível oferecer uma confiabilidade a mais nos sistemas HVDC no reconhecimento do evento.

3.6 SÍNTESE DO CAPITULO E CONSIDERAÇÕES

O estudo apresentado neste capítulo contextualiza os efeitos da FC no SEE de forma a detalhar padrões do evento com vistas a elaboração de técnicas de detecção. Nos casos observados, alguns comportamentos característicos podem oferecer elementos para a detecção do evento de FC, tal como a queda na potência ativa nos conversores pelo lado AC. A corrente nos conversores pelo lado AC também apresenta um padrão pertinente no comportamento da FC, tendo em vista que uma das fases é mantida nula e as outras duas sofrem oposição de fase durante alguns ciclos.

Os padrões descritos podem ser detectados de forma aproximada por sistemas de medição de sincrofasores, os quais viabilizam também o monitoramento dos efeitos de FCs na dinâmica dos SEEs. A aquisição de grandezas elétricas sincronizadas no tempo permite a caracterização de FCs simultâneas com índices de severidade associados.

4 ABORDAGEM PROPOSTA

Este trabalho tem como enfoque a proposição de uma abordagem para a detecção de eventos de FCs em elos HVDC com base em dados de PMU. Uma visão geral da abordagem proposta é apresentada na seção 4.1. A abordagem é composta por um conjunto de algoritmos, descritos na seção 4.2; e indicadores de severidade sistêmicos da FC, expostos na seção 4.3. Aspectos da infraestrutura de aquisição de dados requerida para a aplicação da abordagem e demais considerações são apresentados na seção 4.4 e 4.5, respectivamente. Os algoritmos tem por base a aplicação e análise da TWD de sinais provenientes de dados de sincrofasores, sendo organizados nos quatro passos a seguir: no primeiro passo, um algoritmo de detecção preliminar é utilizado visando a identificação de eventos que afetam diretamente a potência elétrica transmitida pelas pontes conversoras do sistema HVDC; no segundo passo, sinais de entradas são avaliados mediante um padrão de nível energético associados à TWD com vistas a reduzir a probabilidade de detecção de falsos positivos; no terceiro passo, sinais de corrente são avaliados com o objetivo de eliminar padrões de desbalanço de corrente não inerentes à eventos de FC, também a fim de reduzir a probabilidade de detecção de falsos positivos; no quarto passo, uma análise cruzada das etapas anteriores é realizada para a emissão do diagnóstico final.

4.1 VISÃO GERAL DA ABORDAGEM DESENVOLVIDA

Uma visão geral da abordagem proposta pode ser observada no fluxograma da Figura 30, no qual são identificados os processos e as etapas necessárias para a aplicação da abordagem de identificação de FC em elos HVDC providos de estação conversoras com transformadores de 2 enrolamentos. Analogamente, um fluxograma com uma visão geral da abordagem proposta é apresentado na Figura 31, tendo em conta estações conversoras com transformadores de 3 enrolamentos. Na abordagem, dados de sincrofasores são aquisitados em estações conversoras e enviados ao concentrador de dados providos de aplicativos que encapsulam os algoritmos desenvolvidos. Caso o evento analisado for identificado como FC, posteriormente avalia-se o impacto sistêmico da FC no SEE.

Para o caso de estação conversora com transformadores de 2 enrolamentos, a entrada de dados da abordagem corresponde a grandezas associadas às pontes dos transformadores conversores YY e YD nos terminais retificador e inversor. No terminal inversor, os dados são processados nos seguintes três conjuntos de blocos destacados na Figura 30: Etapa de Detecção Preliminar (retângulo tracejado em vermelho); 1ª etapa de detecção de falsos positivos (retângulo tracejado em verde); 2ª etapa de detecção de falsos positivos (retângulo tracejado em azul); etapa de análise lógica (retângulo tracejado em laranja). No terminal retificador, são aplicados blocos da

Figura 30 – Fluxograma da abordagem proposta de detecção de falhas de comutação - Transformador conversor de dois enrolamentos.

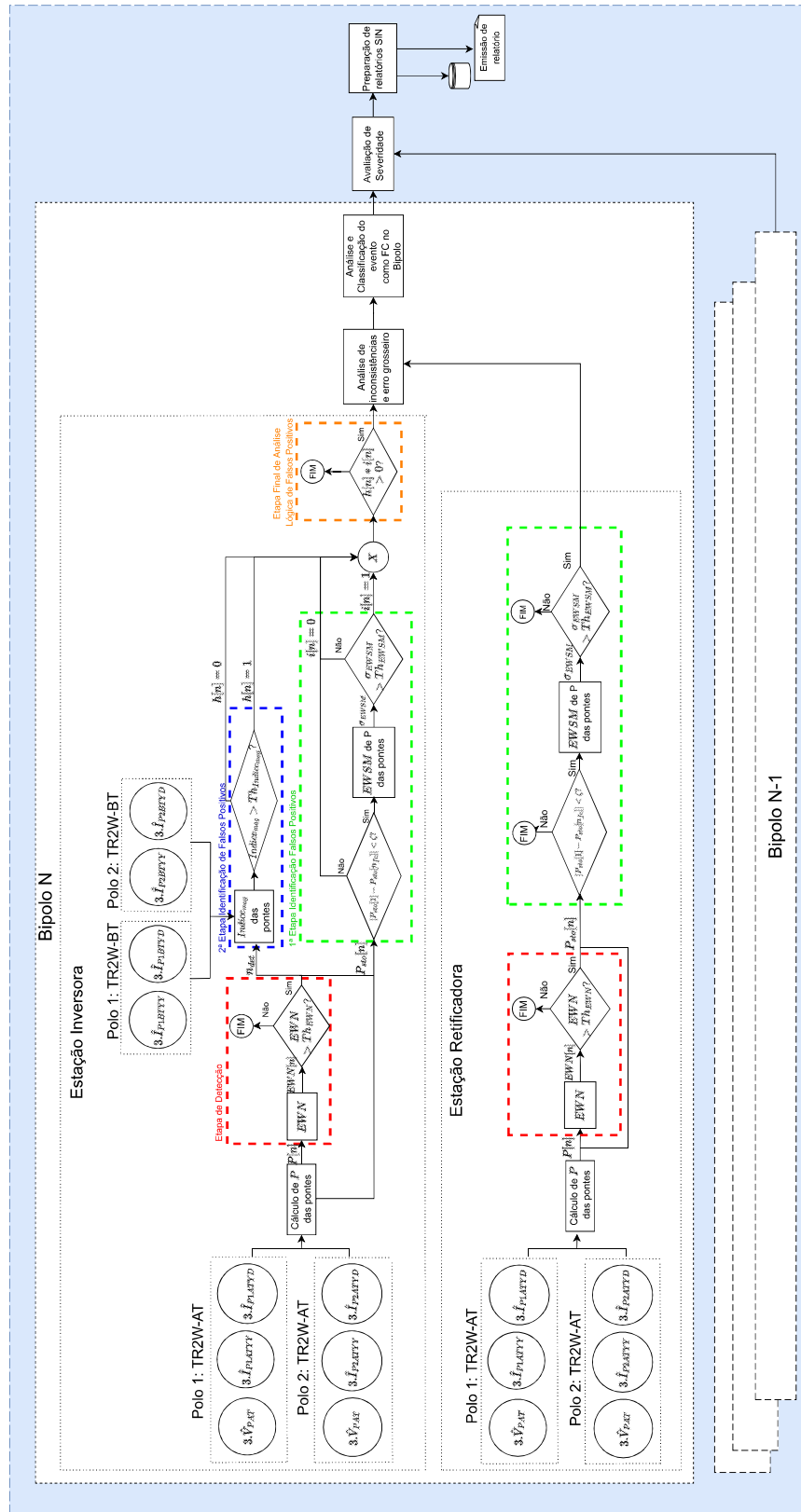
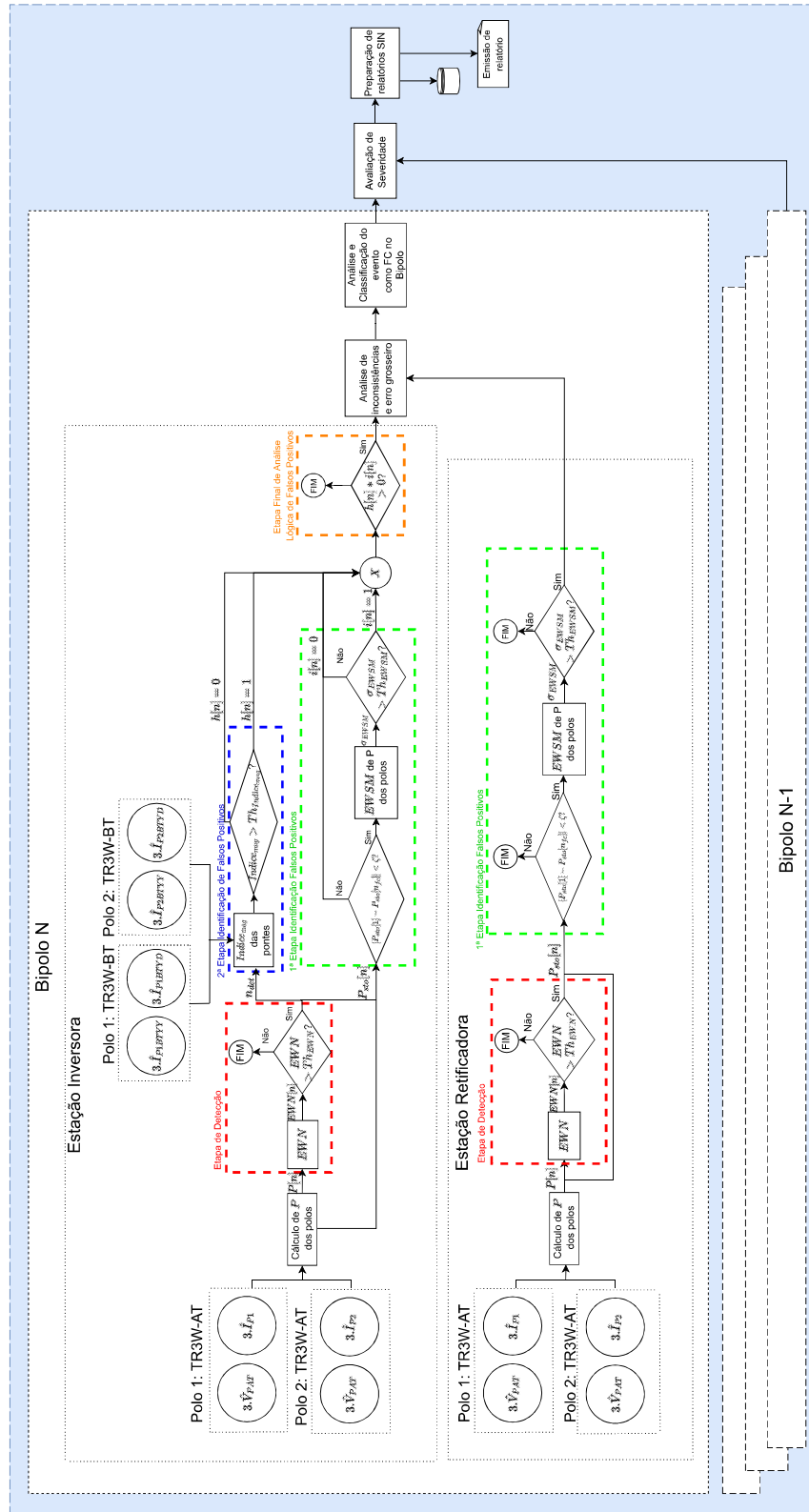


Figura 31 – Fluxograma da abordagem proposta de detecção de falhas de comutação - Transformador conversor de três enrolamentos.



etapa de detecção preliminar e 1ª etapa de detecção de falsos positivos. Nos blocos de entrada, representados por retângulos tracejados de cor preta, são identificados os dados de entrada da abordagem, onde cada bloco de entrada é constituído por fasores de tensão e corrente (em circunferência) aqisitados via PMUs. Nos blocos de processo, representados por retângulos, são realizadas sub-etapas específicas de processamento de dados. Nos blocos de decisão, representados por losangos, são avaliados limiaries de decisão.

Em síntese, para o caso de estações conversoras com transformadores de 2 enrolamentos, são destacadas as seguintes sub-etapas no fluxograma:

- Blocos “Polo 1:TR2W-AT”, “Polo 2:TR2W-AT”, “Polo 1:TR2W-AT” e “Polo 2: TR2W-AT”: Recebe-se sinais aqistados pelo lado de AT dos transformadores conversores de 2 enrolamentos dos polos (TR2W-AT) das estações conversoras como dados de entrada. Os blocos indicam a aquisição de sincrofasores de tensão (\widehat{V}_{PAT}) e corrente nas pontes conversoras conectadas aos transformadores YD e YY (\widehat{I}_{P1ATYY} , \widehat{I}_{P1ATYD} , \widehat{I}_{P2ATYY} , \widehat{I}_{P2ATYD}). Os sincrofasores referentes ao lado de AT são utilizados para o cálculo da potência ativa (P) no bloco seguinte. A medição de tensão e corrente é realizada pelo lado da AT dado o enfoque na análise do sinal de potência transmitida e efeitos sistêmicos da FC.
- Blocos “Polo 1: TR2W-BT” e “Polo 2: TR2W-BT”: Recebe-se sinais aqistados pelo lado de BT dos transformadores conversores de 2 enrolamentos dos polos (TR2W-BT) das estações conversoras como dados de entrada. Os blocos indicam a aquisição de sincrofasores de corrente (\widehat{I}_{P1BTYY} , \widehat{I}_{P1BTYD} , \widehat{I}_{P2BTYY} e \widehat{I}_{P2BTYD}). Os sincrofasores referente ao lado de BT são utilizados para garantir insumos ao bloco “*Índice_{mag} das Pontes*” na 2ª etapa de detecção de falsos positivos. A medição é realizada pelo lado de BT, o qual está ligado diretamente à ponte conversora.
- Bloco “Cálculo de P das pontes”: Calcula-se a potência ativa (P) das pontes. O sinal de potência ativa calculado é utilizado como entrada do bloco seguinte “EWN” no escopo da etapa de detecção preliminar.
- Bloco “EWN”: Calcula-se a figura de mérito EWN do sinal de potência, a cada instante n , ao longo de uma janela deslizante de tempo, especificada em 30 s. O valor calculado de EWN[n] é repassado ao bloco de decisão seguinte.
- Bloco “EWN > Th_{EWN} ”: Busca verificar se o valor de EWN[n] obtido viola um limiar de detecção Th_{EWN} . Caso haja violação, assinala-se uma detecção preliminar como ocorrida e passa-se para a fase de descarte de falsos positivos. Uma vetor de potência armazenada P_{sto} é gerada como insumo para a 1ª etapa de detecção de falsos positivos. Se não houver violação, o dado de EWN[n] é descartado.

- Bloco “ $Indice_{mag}$ das pontes”: Calcula-se o valor de um indicador de desequilíbrio de correntes das pontes. As entradas do bloco são o instante n_{det} e as correntes em “Polo 1:TR2W-BT” e “Polo 2:TR2W-BT”.
- Bloco “ $|P_{sto}[1]-P_{sto}[n_{fc}]| < \zeta$ ”: Verifica-se se a potência armazenada P_{sto} nos instantes n e n_{cf} caracterizam um retorno ao regime permanente pré-perturbação, para um limiar ζ . Se não for violado o limiar, segue-se ao bloco “EWSM de P das Pontes”.
- Bloco “EWSM de P das pontes”: Calcula-se uma segunda figura de mérito chamada de EWSM tendo em conta o sinal de potência armazenado P_{sto} das pontes dos transformadores conversores YY e YD. A saída do bloco consiste na média da EWSM, representada por σ_{EWSM} .
- Bloco “ $\sigma_{EWSM} > Th_{EWSM}$ ”: Compara-se σ_{EWSM} com um limiar pré-especificado Th_{EWSM} . Se $\sigma_{EWSM} \geq Th_{EWSM}$, então $i[n] = 1$. Caso contrário, $i[n] = 0$.
- Bloco “ $Indice_{mag} > Th_{Indice_{mag}}$ ”: Compara-se $Indice_{mag}$ com um limiar pre-estabelecido $Th_{Indice_{mag}}$. Se $Indice_{mag} \geq Th_{Indice_{mag}}$, é indicado $h[n] = 1$; caso contrário, $h[n] = 0$.
- Bloco “X”: Realiza-se o produto entre as *flags* $i[n]$ e $h[n]$, correspondentes à análise dos blocos das 1ª e 2ª etapas de detecção de falsos positivos, respectivamente. Segue-se o sinal resultante para os blocos da etapa final de análise lógica de falsos positivos.
- Bloco “Análise de inconsistências e erros grosseiros”: Verifica-se se houve a detecção de FC tanto no lado retificador quanto no lado inversor e avalia-se a existência de indisponibilidade de dados ao longo do período de estudo.
- Bloco “Análise e classificação do evento como FC no Bipolo”: Verifica-se se o evento ocorreu apenas em um dos polos ou no bipolo.
- Bloco “Avaliação de severidade”: Calcula-se os indicadores Potência Instantânea (POTINST), Energia Total Interrompida no sistema Sudeste (ECCTOT-SE), Energia Total Interrompida no sistema Norte (ECCTOT-N) e Tempo de Recuperação (TIMEREC) para análise do impacto sistêmico da FC identificada. A informação é cruzada com os outros bipolos do SEE, os quais são representados pelo bloco “Bipolo N-1”.
- Bloco “Preparação de relatórios SIN”: Organiza-se as informações da FC detectada; incluindo os parâmetros utilizados pelos métodos, os valores obtidos nas etapas de detecção e os efeitos sistêmicos do evento no SIN. Nos blocos seguintes são armazenados os dados em uma base apropriada e emitidos relatórios.

Para o caso de estações conversoras com transformadores de 3 enrolamentos, são realizadas medidas de corrente de polo do lado de AT dos transformadores. Na Figura 31, os blocos de entradas “Polo 1:TR3W-AT” e “Polo 2:TR3W-AT” são constituídos do fasor de tensão (\widehat{V}_{PAT}) e corrente de polo 1 e 2 ($\widehat{I}_{P1}, \widehat{I}_{P2}$), respectivamente. Na estação inversora, os blocos de processos que realizam o cálculo da potência ativa e EWSM são alterados para “Cálculo de P dos polos” e “EWSM dos polos”. Os demais blocos são iguais aos utilizados para o caso de estações com transformadores de 2 enrolamentos.

4.2 PASSOS PRINCIPAIS DA ABORDAGEM DESENVOLVIDA

Nas próximas subseções são descritos os processos e algoritmos aplicados nos macro passos da abordagem proposta. Na subseção 4.2.1 são apresentados os procedimentos realizados na etapa de detecção preliminar. Nas subseções 4.2.2 e 4.2.3, a ênfase é empregada para a 1ª e 2ª etapa de detecção de falsos positivos, respectivamente.

4.2.1 Detecção Preliminar

A TWD é uma técnica largamente utilizada para a análise de sinais, tendo por base a decomposição de sinais transitórios de acordo com uma referência de sinal pré-definida chamada função wavelet mãe. A TWD é particularmente usada para a análise multiresolução, com o objetivo de capturar informação de baixas e altas frequência do sinal e detectar variações súbitas. Em cada nível da resolução, a TWD decompõe o sinal em Coeficiente de Detalhes (cDs) e Coeficiente de Aproximações (cAs) (OKETCH, 2016), sendo que os cDs encapsulam informação das componentes de mais alta frequência do sinal, enquanto que os cAs encapsulam informação das componentes de mais baixa frequência do sinal. Na abordagem proposta, a wavelet mãe Har foi escolhida, devido a sua aplicação com sucesso em VAZ *et al.*(2021) na detecção e classificação de eventos do SEE, tendo por base dados de sincrofasores.

Conforme o teorema de Parseval, a energia do sinal no domínio do tempo é igual a soma da energia dos coeficientes em todos os níveis da decomposição. Devido a isto, torna-se possível detectar variações súbitas de sinal baseadas na energia proveniente destes coeficientes (SOOD, 2011). Na abordagem proposta, a EWN introduzida em KIM *et al.*(2017) foi aplicada conforme a Eq. (5).

$$NWE[n] = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{l=1}^{L_d} \sum_{k=1}^{N_d} |cD_{l,k}[n]|^2}}{\sqrt{\frac{1}{M} \sum_{l=1}^{L_n} \sum_{k=1}^{N_n} |cD_{l,k}[n]|^2}} \quad (5)$$

onde n denota o índice associado ao instante de tempo do sinal. No numerador, N é o número de amostras da primeira janela de análise, N_d é o número total de amostras de cD em cada nível de decomposição, e L_d é o último nível. No denominador, M é o número de amostras da segunda janela, L_n é o número total de níveis de decomposição para a janela e N_n é o número de cDs em cada nível.

A motivação para a diferença de tamanho nas duas janelas, representado pelo número de amostras N e M no numerador e denominador, respectivamente, jaz na aplicação. A janela definida no numerador, nomeada janela de detecção, tem tamanho pequeno e é concebida para detectar variações súbitas do sinal. A janela definida no denominador, nomeada janela de normalização, tem tamanho grande e tem por objetivo a normalização do sinal, removendo ruídos que podem estar presentes na operação em regime permanente. Implementou-se os tamanhos de janelas [16,24] e [1024,2048] para a detecção e normalização, respectivamente.

O algoritmo para detecção preliminar da FC é apresentado na Figura 32. Para o caso de estação com transformadores de 2 enrolamentos, as entradas correspondem à tensão de sequência positiva (V_{AC}) e corrente de sequência positiva (I_{AC}) obtida do lado de AT dos transformadores conversores, avaliados a cada índice n . Para o caso de estação com transformadores de três enrolamentos, a análise é realizada em nível de polo. O vetor de *buffer* P_{BUF} armazena a potência ativa até o tamanho da janela M ser alcançado. A $EWN[n]$ é computada aplicando-se a Equação 5 com os cDs de P_{BUF} . Se $NWE[n]$ ultrapassar o valor de limiar Th_{NWE} , o evento é assinalado como detectado. O vetor de *buffer* P_{sto} armazena n_{sto} valores de P_{sto} , começando a partir do índice n_s antes do evento, com objetivo de garantir que sejam armazenadas amostras que contenham informação suficiente do regime permanente e comportamento dinâmico do sinal.

4.2.2 1ª Etapa de detecção de falsos positivos

Após o vetor de *buffer* P_{sto} ser completado, o algoritmo da 1ª etapa de detecção de falsos positivos é executado. A 1ª etapa de detecção de falsos positivos é necessária porque a EWN usa uma janela pequena para detectar variações súbitas no sinal de potência, capturando diferentes eventos, os quais não podem ser facilmente dissociados apenas por um valor energético limiar. De modo a detectar um evento como FC e descartar outros eventos, padrões de sinais devem ser avaliados. Durante a FC, a potência ativa (medida tanto no lado retificador quanto no lado inversor) colapsa para valores próximos a zero, e este comportamento pode ser capturado a partir de uma modificação da Energia Wavelet Sinalizada (EWS), a qual realça variações de um sinal com suas correspondentes direções (positivo ou negativo), em múltiplas resoluções temporais.

A EWS foi aplicada em VAZ *et al.* (2021) conforme Equação 6.

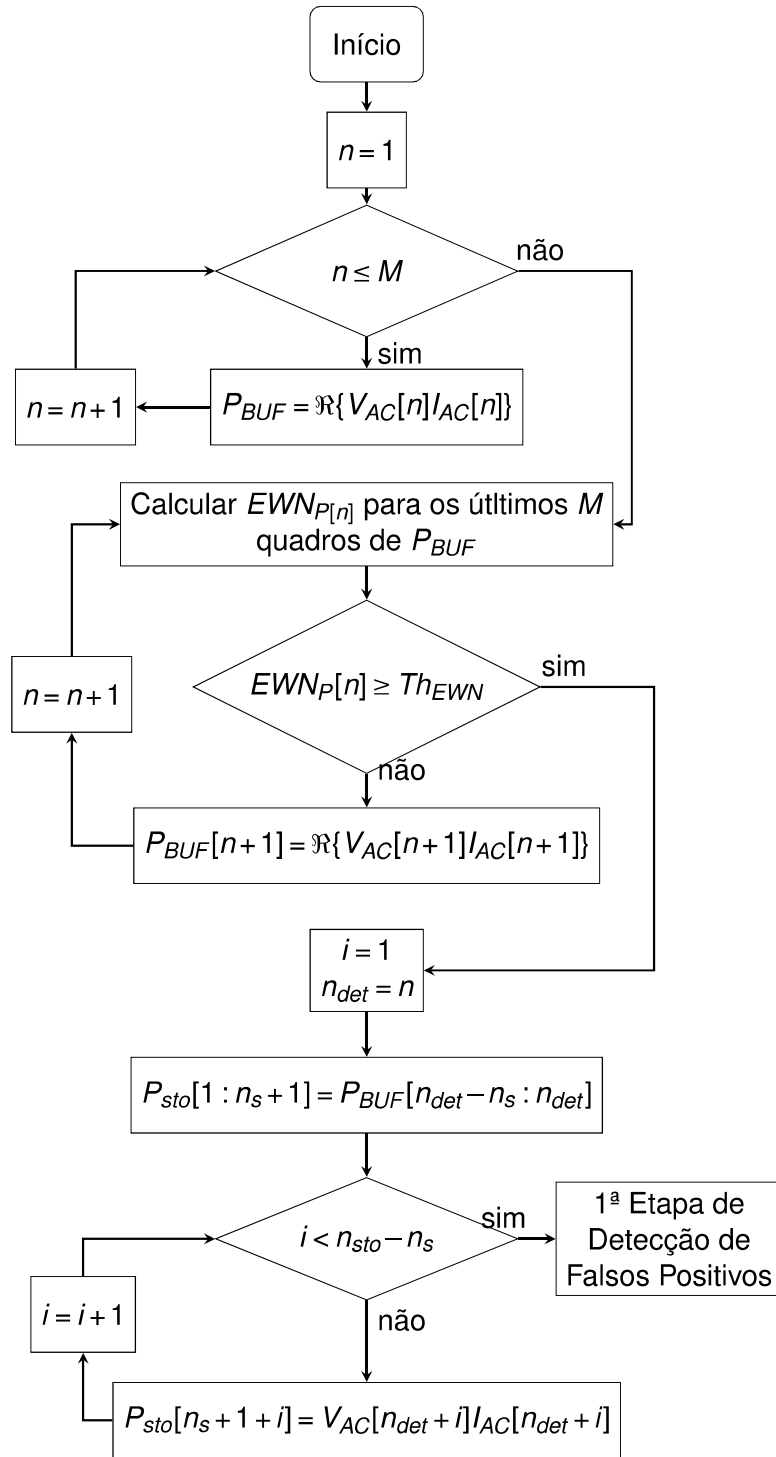


Figura 32 – Algoritmo de detecção preliminar.

$$EWS[n] = \sum_{l=L_c^{inf}}^{L_c^{sup}} \underbrace{\sum_{k=1}^{N_l} |cD_{l,k}[n]| cD_{l,k}[n]}_{EWS_l[n]} \quad (6)$$

onde L_C^{sup} e L_C^{inf} são, respectivamente, o máximo e mínimo níveis da análise, N_l é o número de cDs em cada nível, e $EWS_l[n]$ é a contribuição de nível l em $EWS[n]$.

Como o sinal da potência ativa aproxima-se de uma função decrescente, mais cDs positivos serão encontrados. Contudo, a potência ativa decai a zero no elo HVDC devido à FC e o sinal terá picos e oscilações de curta duração (ou seja, poucas amostras que contereão o decaimento do sinal). Essas características afetam a EWS, pois são encontrados cDs positivos e negativos que contrapõem um ao outro, impossibilitando a identificação do comportamento esperado da FC. Para contornar esse efeito, a Regra da Maior Descida (RMD) é proposta, onde os padrões descendentes de $EWS_I[n]$ são contabilizados a partir do maior valor positivo de $EWS_I[n]$, dentre o conjunto de níveis sob análise, até que seja encontrado um crescimento entre $EWS_I[n]$ consecutivos ou valor negativo de $EWS_I[n]$. O padrão com a maior descida energética é identificado e seus níveis associados contribuem para o valor de EWSM.

A EWSM é expressada conforme a Equação 7.

$$EWSM[n] = \sum_{l \in \Omega} EWS_I[n] \quad (7)$$

onde Ω denota ao conjunto de níveis inteiros em $[L_C^{inf}, L_C^{sup}]$ que pertence em RMD.

A aplicação da EWSM pode ser afetada pelo número de amostras em regime permanente considerados antes e após o evento. Quando computados os cDs para função wavelet Haar, as amostras são avaliadas em pares, e pareando as amostras de regime permanente com as amostras de regime transitório são gerados resultados diferentes do que quando são pareadas duas amostras de regime transitório. Isto, pois as FC são eventos rápidos e apenas algumas amostras contêm informação sobre o período transitório. Para contornar esses efeitos, a seguinte estratégia foi adotada: um vetor auxiliar aux de tamanho $n_{EWSM} = 2^{L_C^{sup}}$ amostras é criado com todas as amostras de P_{sto} e completado com $n_{EWSM} - n_{sto}$ amostras sintéticas que repetem o valor de $P_{sto}[n_{sto}]$. Então, a EWSM é calculada e seu valor correspondente é armazenado. Posteriormente, aux é atualizado baseado na amostra anterior: a última amostra é excluída e a primeira amostra é repetida no começo. Este processo de deslocamento é realizado até a última amostra de P_{sto} ser a última amostra de aux , sendo que $EWSM(aux)$ é computada e armazenada em cada deslocamento. Finalmente, a média σ dos valores armazenados de $EWSM(aux)$ é calculada e comparada com um valor limiar, conforme Equação 8.

$$\sigma_{EWSM} = \text{média}(EWSM(aux[n])) \quad (8)$$

O algoritmo da 1ª etapa de detecção de falsos positivos pode ser observado na Figura 33. As variáveis de controle x e y são índices adicionais que controlam o número de amostras incluídas no começo e excluídas no final de aux , respectivamente, O é um vetor unitário, V_{EWSM} é o vetor que armazena os resultados de $EWSM(aux[n])$ e σ é a média dos elementos de V_{EWSM} . Antes dos procedimentos de cálculo da EWSM,

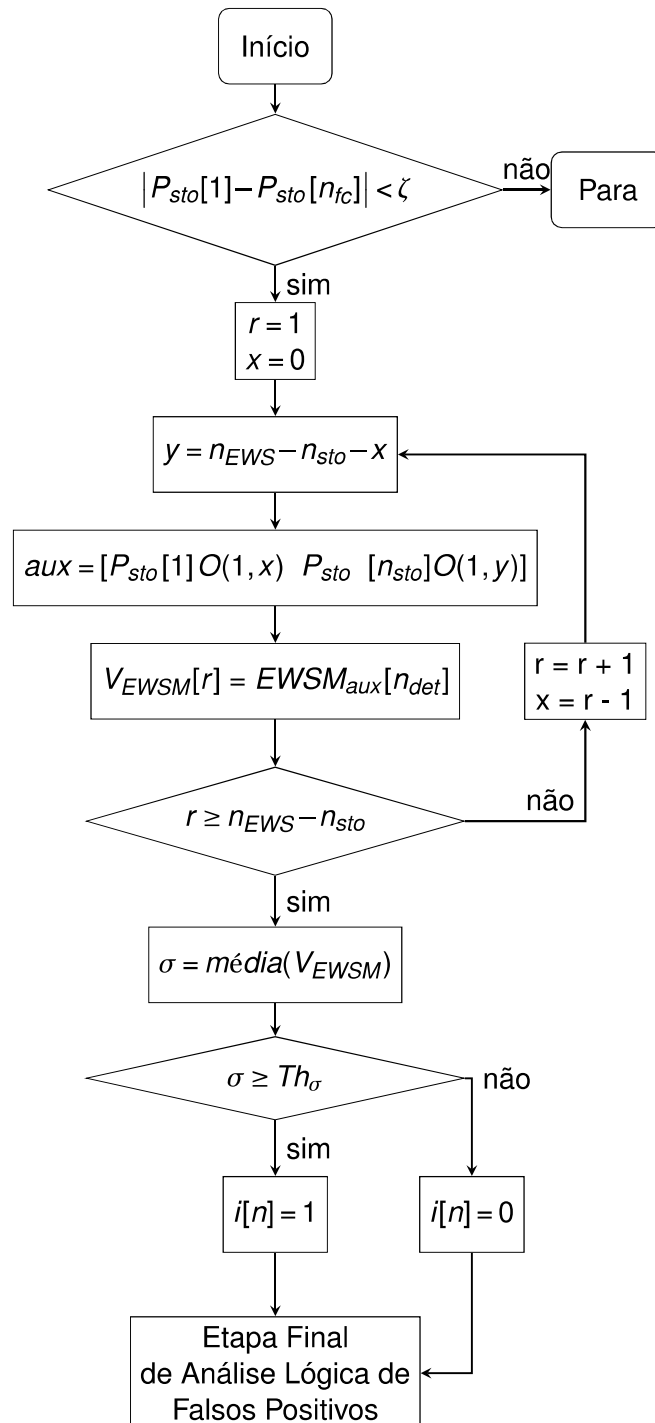


Figura 33 – Algoritmo 1^a etapa de detecção de falsos positivos.

utiliza-se a inequação $|P_{sto}[1] - P_{sto}[n_{fc}]| < \zeta$ para considerar a recuperação de potência, onde ζ é o parâmetro de convergência e n_{fc} é escolhido tendo em consideração os ajustes de tempo da proteção do sistemas do controle DC. A inequação busca descartar eventos correspondentes a ações de controle tal como *restart* e *Forced Retard* (FR) após falta na linha DC, os quais têm comportamento mais lento na recuperação do sinal de potência ativa.

4.2.3 2ª Etapa de detecção de falsos positivos

O algoritmo da 2ª etapa de detecção de falsos positivos é baseado na implementação do $Indice_{mag}$. Esse indicador quantifica o desbalanço entre a magnitude dos sincrofasores de corrente de fase. O cálculo de $Indice_{mag}$ é apresentado na Equação 9.

$$Indice_{mag} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |i_a(k) - i_b(k)|^2 + |i_b(k) - i_c(k)|^2 + |i_a(k) - i_c(k)|^2 \quad (9)$$

onde i_a , i_b e i_c denotam as magnitudes dos fasores de corrente em pu em cada fase do lado de BT dos transformadores conversores, e N é o número de amostras contidas na janela de análise.

O algoritmo da 2ª etapa de detecção de falsos positivos pode ser visto na Figura 34. O algoritmo é inicializado em $j = n_{det} - n_s$, com $i = k = 1$. Armazena-se na variável $somaAux$ os somatórios dos quadrados das diferenças entre correntes de fase até que $k < N$. Se $k \geq N$, o indicador $Indice_{mag}$ é calculado para cada passo i . Após ser obtido um vetor com indicadores $Indice_{mag}$ de para toda a janela especificada, cada $Indice_{mag}[i]$ é comparado com o valor limiar $Th_{Indice_{mag}}$. Se o limiar for ultrapassado, então $flag\ h[n] = 1$ para indicar a ocorrência de FC; caso contrário $h[n] = 0$.

Os efeitos de desbalanço entre as magnitudes de corrente de fase devem ser observados apenas no terminal inversor durante as FCs. Logo, para fins de descarte de falsos positivos, o $Indice_{mag}$ é calculado apenas a partir dos dados coletados no terminal inversor.

4.2.4 Etapa final de detecção de falsos positivos

Esta etapa consiste na avaliação cruzada dos resultados obtidos durante as etapas anteriores de identificação de falsos positivos para a obtenção do diagnóstico final. Desenvolveu-se uma abordagem com etapas de identificação de falsos positivos processadas em paralelo, com o fim de facilitar a inclusão de desenvolvimentos futuros.

O algoritmo desenvolvido na etapa final de falsos positivos pode ser visto na Figura 35. A saída obtida da primeira etapa de detecção de falsos positivos é o índice lógico $i[n]$. Caso σ_{EWSM} ultrapasse o valor limiar, $i[n]$ assume o valor lógico 1, senão 0. A saída da segunda etapa de detecção de falsos positivos é um índice lógico $h[n]$, com nível lógico 1 caso $Indice_{mag}$ seja maior que o valor limiar, e nível lógico 0, caso contrário. As saídas $i[n]$ e $h[n]$ são multiplicadas, com resultado unitário indicando a ocorrência de FC.

Esta etapa é referente apenas aos polos do terminal inversor, dada a existência de mais de uma etapa de detecção falsos positivos. Após esta etapa, são finalizados os processos em nível de ponte/polos. A abordagem segue para a fase de análise dos

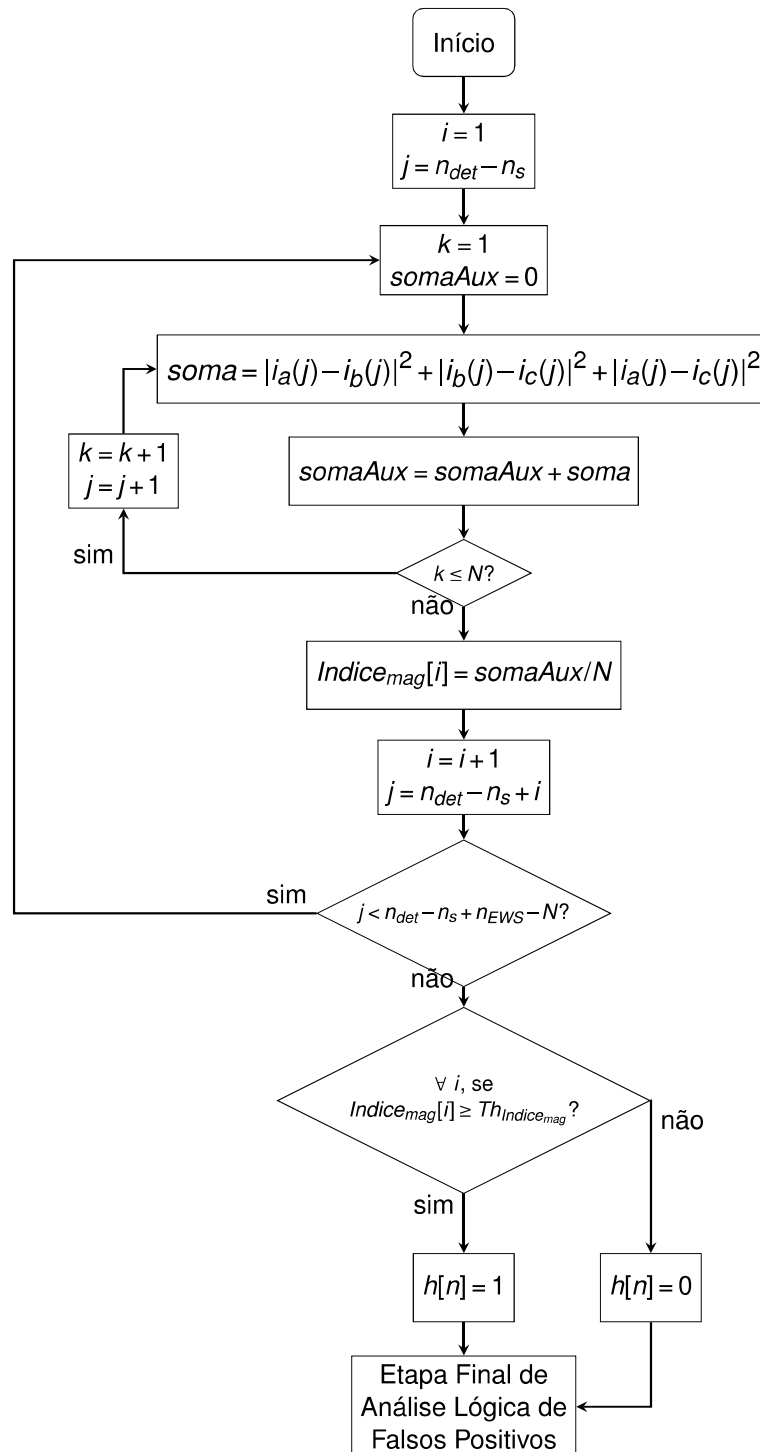


Figura 34 – Algoritmo da 2ª Etapa de Detecção de Falsos Positivos.

efeitos sistêmicos da FC através dos indicadores de impacto desenvolvidos e emissão de relatórios.

4.3 INDICADORES DE SEVERIDADE SISTÊMICA

A severidade sistêmica das FC está associada ao montante de potência interrompido no elo HVDC e a dinâmica de recuperação da potência transmitida. Além

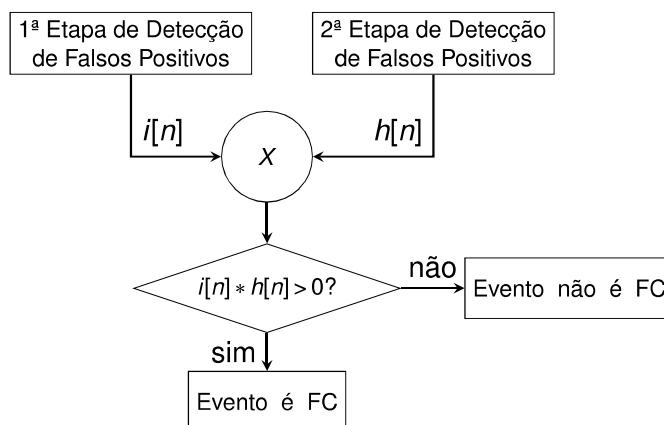


Figura 35 – Algoritmo da Etapa Final de Análise Lógica de Falsos Positivos.

disso, como o SIN possui sistemas de transmissão HVDC assíncronos e síncronos ao sistema AC, o efeito que FCs causam no comportamento dinâmico do sistema depende também de qual sistema HVDC sofreu a FC.

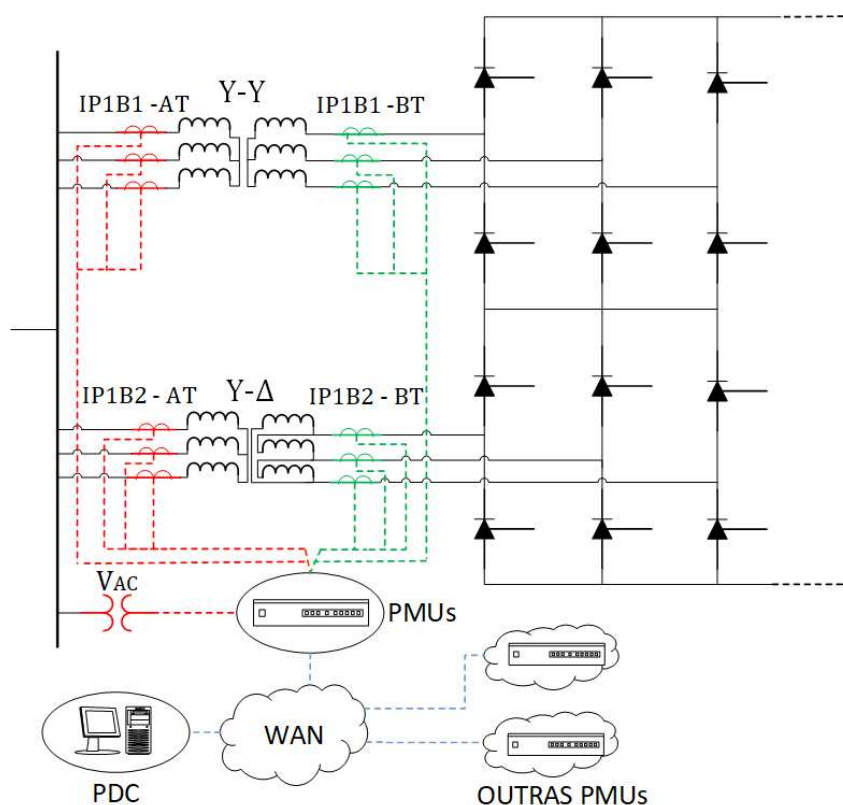
Para melhor quantificar tal impacto, foram desenvolvidos indicadores de severidade sistêmica que podem ser calculados com o monitoramento em tempo real via a tecnologia de sincrofasores, a saber:

- POTINST (em MW): Potência instantânea total transmitida nos elos HVDC do SIN em situações com FC;
- ECCTOT-SE (em MW.s): Energia total interrompida no sistema CC; “deficit” no sistema Sudeste, com base na potência instantânea total transmitida nos elos HVDC do SIN em janelas de 300ms, 500ms e 1s;
- ECCTOT-N (em MW.s): Energia total interrompida no sistema CC associado à UHE Belo Monte; “excedente” no sistema Norte, com base na potência instantânea total transmitida nos elos HVDC associados à UHE Belo Monte, em janelas de 300ms, 500ms e 1s;
- Maximum DC Power Sag (em MW): Diferença entre o valor inicial/pré-evento e o valor mínimo da potência (em janela de 1s);
- Maximum DC Power Sag Instant (em MW): Diferença entre o instante referente ao valor inicial/pré-evento (pré-identificado) e o instante referente ao valor mínimo de potência (em janela de 1s);
- TIMEREC (em ms): Tempo de recuperação global de 90% da potência instantânea total transmitida nos elos HVDC pré-evento de FC.

4.4 INFRAESTRUTURA PROPOSTA

Como as FCs tipicamente duram dezenas de milissegundos (RAHIMI *et al.*, 2011), o evento repercute nos sinais elétricos de modo a ser capturado e observado durante algumas amostras sincrofasoriais. A infraestrutura proposta para sistemas HVDC-LCC é apresentada na Figura 36, para um polo de estação conversora com transformadores de 2 enrolamentos (YY/YD) na configuração de ponte de 12 pulsos. As correntes medidas $IP1B1-AT$ ¹ e $IP1B2-AT$ (linha tracejada em vermelho) são adquiridas com transformadores de corrente pelo lado de AT dos transformadores conversores Y-Y e Y- Δ , respectivamente. As correntes medidas $IP1B1-BT$ e $IP1B2-BT$ (linha tracejada em verde) são adquiridas com transformadores de corrente pelo lado de BT dos transformadores conversores Y-Y e Y- Δ , respectivamente. As tensões medidas V_{AC} são adquiridas com o transformador de potencial conectadas no barramento de AT do terminal. As medidas são processadas pelas PMUs, que calculam e enviam os sincrofasores para o *Phasor Data Concentrator* (PDC) através de uma rede *Wide Area Network* (WAN).

Figura 36 – Infraestrutura proposta de medição.



A possibilidade de enviar sincrofasores usando o protocolo IEEE C37.118 permite a um servidor dedicado executar os algoritmos propostos com os dados de entrada

¹ A letra I é referente a “corrente”, a letra P é referente a “polo” que em inglês é “pole”, e a letra B é referente a “ponte” que em inglês é “bridge”.

de múltiplas PMUs instaladas nos polos dos terminais HVDC-LCC.

4.5 SÍNTESE DO CAPÍTULO E CONSIDERAÇÕES

Neste capítulo, demonstrou-se os passos desenvolvidos para a detecção de FC e a infraestrutura proposta de aquisição dos sincrofasores. Descreveu-se as técnicas envolvidas nas etapas de detecção preliminar, 1ª e 2ª etapa de detecção de falsos positivos e a etapa final de análise lógica de falsos positivos.

A abordagem proposta durante a detecção preliminar identifica os instantes dos eventos que tiveram súbitas variações no sinal de potência através da EWN. Na 1ª etapa de detecção de falsos positivos, é avaliado os energéticos níveis dos cD do sinal de potência por meio da EWSM. Na 2ª etapa de detecção de falsos positivos, verifica-se o desbalanço entre as magnitudes de corrente de fase calculo pelo $Indice_{mag}$. As etapas de detecção de falsos positivos são submetidas na etapa final de análise lógica de falsos positivos para confirmação da FC. A severidade da FC é avaliada através de indicadores sistêmicos.

5 RESULTADOS NUMÉRICOS

Neste capítulo, os resultados numéricos da aplicação da abordagem são apresentados. Na seção 5.1, são descritos os resultados dos principais casos de simulações de FC com intuito de ilustrar as funcionalidades das etapas da abordagem desenvolvida. Na seção 5.2, tem-se a aplicação da abordagem tendo em conta medições de campo referente aos eventos ocorridos no SIN em 16/01/2020 e 26/01/2022. Os resultados numéricos apresentados são referentes aos terminais inversores dos elos HVDC do SIN. Apesar da abordagem contemplar os terminais retificadores, conforme exposto na Figura 30, seus resultados numéricos são análogos aos obtidos via terminais inversores.

5.1 ESTUDO DE CASOS DE SIMULAÇÃO

Os casos de simulação visam analisar as repercussões da FC nas pontes conversoras para o estudo do fenômeno. Tratam-se de casos de simulação fornecidos pelo ONS, os quais foram realizados no programa PSCAD/EMTDC. Os casos fornecidos consideram as seguintes premissas (ONS, 2019):

- Bipolos Xingu-Estreito e Xingu-Terminal Rio com potência máxima (2 x 4.000 MW);
- Bipolos do Complexo do Madeira com potência total de 6.000 MW;
- Bipolos associados à UHE AG5 50 Hz com potência total de 4.200 MW;
- Modelos dos bipolos fornecidos pelos correspondentes agentes de transmissão: AG1, AG2, AG3, AG4 e AG5;
- Sistema equivalente composto por equivalentes estáticos e dinâmicos, com representação detalhada de algumas usinas;
- Representação equivalente da interligação Norte-Sul, por meio de dois equivalentes de transferência em 500 kV, entre as barras de fronteira.

Os registros com duração de 5 s fornecidos em formato de oscilografias no tempo pelo ONS referem-se à aplicação de curtos-circuitos monofásicos sólidos, de duração igual a 100 ms, em uma das seguintes subestações (barras): SE Estreito 500 kV, SE Ibiúna 500 kV (estação conversora), SE Terminal Rio 500 kV, SE Emborcação 500 kV, SE Cascavel 525 kV, SE Fernão Dias 500 kV, SE Itaberá 765 kV e SE Londrina 525 kV.

Os Tempos de Interrupção de Potência (TIPs) dos eventos selecionados podem ser observados na Tabela 3. As simulações com locais de falta em SE Estreito 500

kV, SE Ibiúna 500 kV e SE Terminal Rio 500 kV foram casos de particular interesse para estudar os impactos da ocorrência da FCs, pois apresentaram FCs simultâneas. As simulações com locais de falta em SE Cascavel 525 kV, SE Fernão Dias 500 kV, SE Itaberá 765 kV e SE Londrina 525 kV foram utilizados para validar os limiares do algoritmo proposto.

Tabela 3 – TIP (ms) para casos de simulação

Local da Falta	AG1	AG2	AG3	AG4	AG5
Estreito 500 kV	3	38	48	-	10
Araraquara 500 kV	97	93	42	16	15
Araraquara 2 440 kV	94	93	25	16	15
Adrianópolis 500 kV	7	39	3	88	6
Ibiúna 345kV	3	46	5	4	73
Terminal Rio 500 kV	4	47	5	92	6
Emborcação 500 kV	6	30	77	-	10
Cascavel 525 kV	-	-	-	-	-
Fernão Dias 500 kV	-	55	-	-	-
Itaberá 765 kV	-	-	-	-	-
Londrina 525 kV	7	70	-	-	42
AG3 linha 800 kVcc	-	-	-	-	-
AG4 linha 800 kVcc	-	-	12	-	-

Além destes casos, foram fornecidos pelo ONS casos de faltas em elos HVDC com o intuito de analisar outros eventos, também com decaimento de potência proeminente, e verificar o desempenho das etapas de identificação de falsos positivos. Tais casos correspondem à aplicação de um curto-circuito em elo HVDC com ação de controle FR. Cada um dos casos tem a aplicação de um curto-circuito no polo 1 dos elos HVDC de AG3 ou AG4 nas seguintes situações: (i) com eliminação em tempo normal e uma tentativa de *restart*, com sucesso; (ii) com duas tentativas de *restart*, com sucesso; e (iii) com duas tentativas de *restart*, sem sucesso.

A abordagem proposta foi parametrizada conforme apresentado na Tabela 4. Os valores utilizados foram deferidos de forma empírica a partir dos resultados de simulação.

Tabela 4 – Parâmetros da abordagem selecionados

Etapa	Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
Detecção Preliminar	n_s	8 amostras	N	16 amostras
	n_{sto}	36 amostras	L_d	4
	Th_{EWN}	5 pu ²	L_m	4
	M	2048 amostras	-	-
1ª Detecção de Falsos Positivos	n_{fc}	21 amostras	Th_σ	0.1 pu ²
	ζ	20%	L_c^{inf}	1
	n_{SWE}	1024 amostras	L_c^{sup}	10
2ª Detecção de Falsos Positivos	N	3 amostras	$Th_{Indice_{mag}}$	0.01 pu ²

Na subseção 5.1.1, descreve-se a análise do caso com a falta na SE Estreito 500kV para apresentar detalhadamente os funcionamentos da abordagem em todas

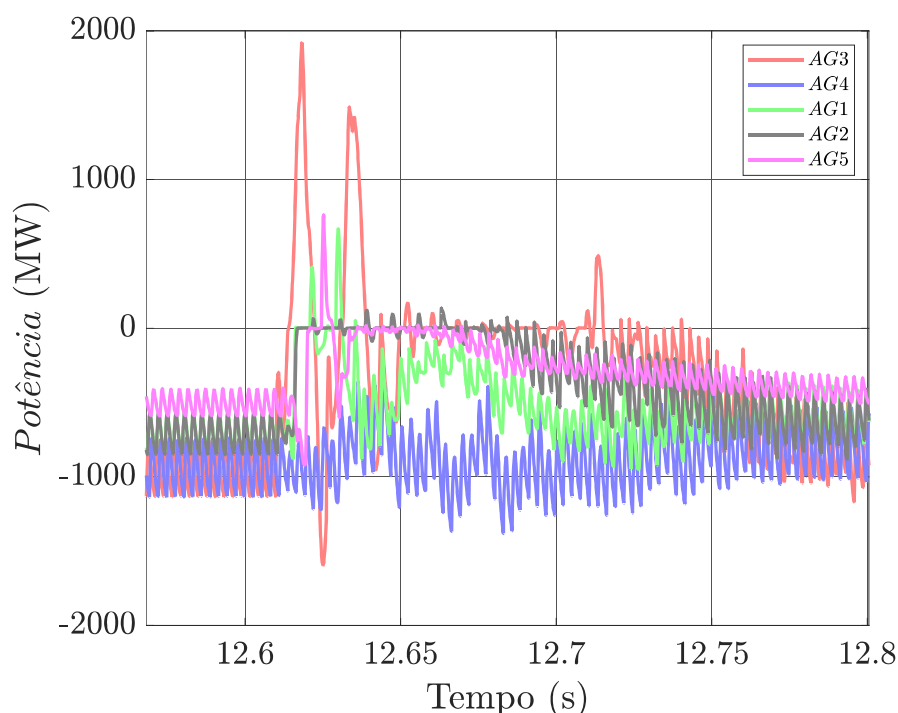
as etapas implementadas. Na subseção 5.1.2, é analisada a simulação com falta na linha DC em AG3 com eliminação em tempo normal, com o fim de ilustrar o descarte de falsos positivos. Nas subseções 5.1.3, 5.1.4 e 5.1.5, são apresentados os resultados numéricos de cada uma das etapas dos casos de simulação.

5.1.1 Estudo detalhado com o caso de simulação de falta na SE Estreito 500 kV

Esta simulação foi selecionada em específico, pois permite estudar o comportamento dos sinais dos terminais em situações bem distintas, dado que a falta em Estreito causou FC nos terminais de AG2 e AG3 com TIP bastante relevante; causou FC com TIP menos relevante nos terminais AG1 e AG5; e não causou TIP no terminal AG4. Desta forma, este caso permite avaliar o comportamento dos índices utilizados na abordagem perante os limiares pré-especificados em cada uma das situações.

Na Figura 37, são apresentados os sinais de potência ativa (calculados a partir das oscilografias de tensão e corrente) provenientes das pontes dos transformadores conversores YY dos terminais inversores dos agentes AG1 (em verde), AG2 (em cinza), AG3 (em vermelho), AG4 (em azul) e AG5 (em rosa). Observa-se que os sinais referentes aos terminais inversores dos agentes de AG1, AG2, AG3 e AG5 decaem a zero durante o evento, com ausência do recebimento de potência ativa devido à ocorrência de FC. O sinal referente ao agente AG4, apesar de sofrer uma perturbação, mantém seus níveis de potência, característica de não ocorrência de FC.

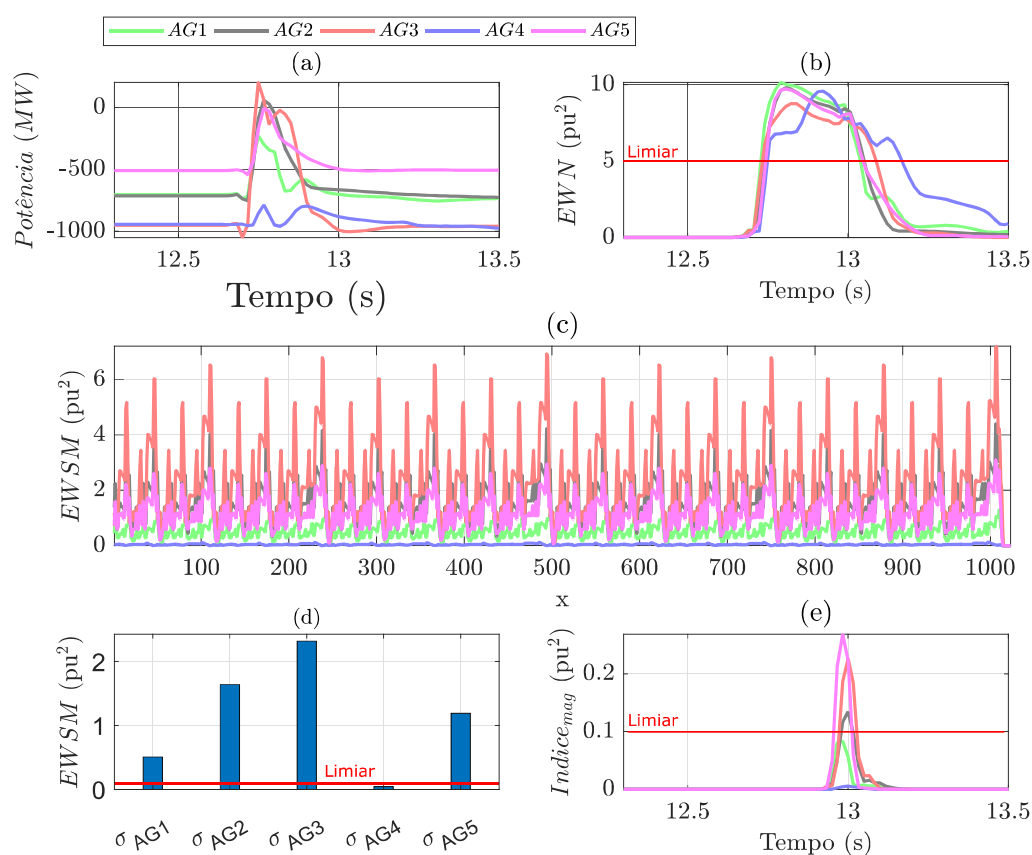
Figura 37 – Oscilografias da ponte do transformador conversor YY no terminal inversor - Falha em Estreito.



Na Figura 38, são apresentados os resultados da abordagem para a falta na

SE Estreito 500 kV, descritos por AG1 (linhas em verde claro), AG2 (linhas em cinza), AG3 (linhas em vermelho), AG4 (linhas em azul) e AG5 (linhas em rosa). A Figura 38 é composta das seguintes subsubfiguras: (a) a potência ativa calculada a partir dos sincrofasores de tensão e corrente, (b) perfil do sinal da EWN referente a etapa de detecção preliminar, (c) perfil do sinal da EWSM referente a 1ª etapa de detecção de falsos positivos, (d) σ_{EWSM} dos agentes de transmissão referente a 1ª etapa de detecção de falsos positivos, (e) o perfil do sinal de $Indice_{mag}$ referente a 2ª etapa de detecção de falsos positivos.

Figura 38 – Resultados da Abordagem - Falha na SE Estreito 500 kV.



Na Figura 38(a) pode ser vista a potência ativa da ponte do transformador conversor YD dos terminais, calculada a partir de sincrofasores obtidos via um simulador de PMU tipo M (60 fps), implementado em projeto de cooperação técnica INESC(2022). Nota-se que nem todos os sinais referentes aos terminais que sofreram a FC decaem a zero, como no sinal de potência calculado a partir das oscilografias de tensão e corrente (Figura 37). Ainda assim, pode-se constatar que os sinais referentes aos terminais AG1 (em verde), AG2 (em cinza), AG3 (em vermelho) e AG5 (em rosa) em que ocorreram a FC apresentaram perturbação mais significativa do que a perturbação observada nos sinais de AG4 (em azul), no qual não houve FC. Esta diferença é explorada nas etapas de detecção de falsos positivos, como descrito na sequência. Destaca-se que quando o sinal de potência ativa é utilizado nas próximas etapas, a

base do sistema pu utilizada para a normalização é dada pela primeira amostra do sinal em regime permanente. A escolha dessa base visa manter as entradas do sinal de potência sempre próximas a $1 pu$, assim facilitando o uso de um mesmo limiar de detecção para sinais com diferentes níveis de carregamentos dos elos HVDC.

Na etapa de detecção preliminar, calcula-se a EWN do sinal de potência com o fim de detectar variações abruptas no sinal. Os resultados da EWN podem ser vistos na Figura 38(b), onde se observa que todos os sinais ultrapassam o valor limiar de detecção pré-definido de $5 pu^2$, indicado com uma linha tracejada. Desta forma, nesta etapa considera-se que houve uma detecção preliminar em cada um dos terminais avaliados.

Na 1ª etapa de detecção de falsos positivos, calcula-se a EWSM referente aos sinais de potência. Os resultados obtidos podem ser vistos na Figura 38(c). Apesar dos picos de variação, observa-se que os resultados referentes aos terminais AG1 (em verde), AG2 (em cinza), AG3 (em vermelho) e AG5 (em rosa) apresentam valores energéticos altos, enquanto o resultado referente a AG4 (em azul) apresenta valor muito próximo de zero. No passo seguinte, calcula-se σ_{EWSM} (Equação 8), que representa a média de cada EWSM apresentada na Figura 38(d). Os valores de σ_{EWSM} dos terminais inversores da ponte do transformador conversor YY (em barras azuis) e o limiar de classificação (linha em vermelho) também são ilustrados na Figura 38(d). Constata-se que apenas o valor referente ao AG4 não excedeu o limiar, indicando que este terminal não apresentou FC, e que a detecção preliminar havia sido um falso positivo. Os resultados de σ_{EWSM} referentes aos demais terminais indicam que os eventos preliminarmente detectados são de FCs.

A 2ª etapa de identificação de falsos positivos consiste em avaliar o $Indice_{mag}$ calculado a partir dos dados de corrente obtidos no lado de BT dos transformadores conversores da ponte do transformador conversor YY do inversor. Os resultados podem ser vistos na Figura 38(e), com destaque ao limiar pré-especificado de $0,01 pu^2$. Tal qual observado na 1ª etapa de identificação de falsos positivos, observa-se que o resultado referente ao terminal AG4 foi o único que não violou o limiar, indicando a não ocorrência de FC neste terminal.

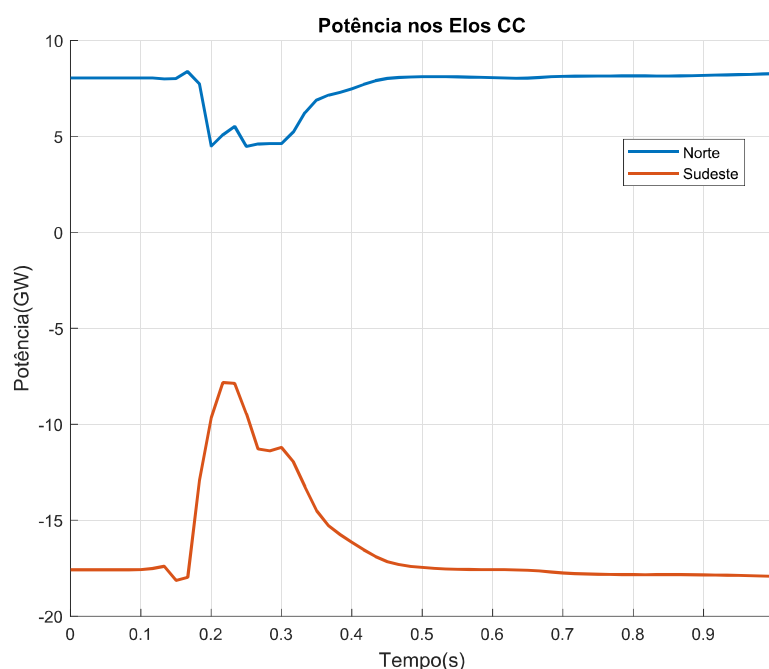
Quanto à ponte do transformador conversor YD, verificou-se um diagnóstico análogo ao apresentado na ponte do transformador conversor YY. A indicação dos valores obtidos ultrapassarem os limiares estabelecidos em ambas as pontes conversoras, confirma a ocorrência de FC devido à falta na SE Estreito 500 kV nos polos dos agentes AG1, AG2, AG3 e AG5.

5.1.1.1 Indicadores de severidade sistêmico do caso de simulação de falta na SE Estreito 500 kV

Os indicadores de severidades são aplicados nos sinais de potência ativa dos subsistemas Norte e Sudeste do SIN com o objetivo de analisar os impactos dinâmicos das FC. O subsistema Norte é composto pelas SEs dos terminais retificadores dos elos HVDC de AG1, AG2, AG3 e AG4; o subsistema Sudeste é composto pelas SEs dos terminais inversores dos elos HVDC de AG1, AG2, AG3, AG4 e AG5.

Os resultados dos indicadores sistêmicos são analisados nesta subseção. Foram calculados os indicadores sob a perspectiva dos elos HVDC do Norte e Sudeste do SIN. Na Figura 39 pode ser visto a potência instantânea por meio do indicador POTINST dos elos HVDC do Norte (em linha azul) e Sudeste (em linha laranja).

Figura 39 – POTINST (em MW) dos elos HVDC dos elos HVDC do Norte e Sudeste do SIN sob os efeitos devido a falta em Estreito 500 kV.



Os indicadores ECCTOT-SE e ECCTOT-N representam as energias de desaceleração dos geradores da região Sudeste e de aceleração dos geradores da região Norte, respectivamente. Nesse sentido, estão sendo estudados indicadores complementares, com base nos valores de ECCTOT-SE e ECCTOT-N, que visam estimar a severidade de eventos de falhas de comutação simultâneas em relação aos riscos de perda de sincronismo entre as máquinas das regiões Norte e Sudeste. Nos indicadores MAXIMUM DC POWER SAG, MAXIMUM DC POWER SAG INSTANT e TIMEREC correspondem ao registro de características do sinal de potência devido a FC. Na Tabela 5 são apresentados os resultados dos indicadores de severidade ECCTOT, MAXIMUM DC POWER SAG, MAXIMUM DC POWER SAG INSTANT e TIMEREC. A

janela utilizada em ECCTOT corresponde a 1 s.

Tabela 5 – Indicadores

Indicador de Severidade	Subsistemas	
	Norte	Sudeste
ECCTOT-SE_Positiva (MW.s)	-	14,40
ECCTOT-SE_Negativa (MW.s)	-	-1418,20
ECCTOT-SE (MW.s)	-	-1465,80
ECCTOT-N_Positiva (MW.s)	5,00	-
ECCTOT-N_Negativa (MW.s)	-487,50	-
ECCTOT-N (MW.s)	-482,50	-
MAXIMUM DC POWER SAG (MW)	3559,20	9754,20
MAXIMUM DC POWER SAG INSTANT (ms)	120,00	86,70
TIMEREC (ms)	133,33	

Nos resultados dos indicadores apresentados na Tabela 5, os elos HVDC do Sudeste foram submetidos a maiores variações de energia (indicador ECCTOT), em função deste subsistema também receber os elos HVDC associados à UHE Itaipu de AG5. Esses fatores são corroborados pelos valores do indicador MAXIMUM DC POWER SAG no subsistema Sudeste.

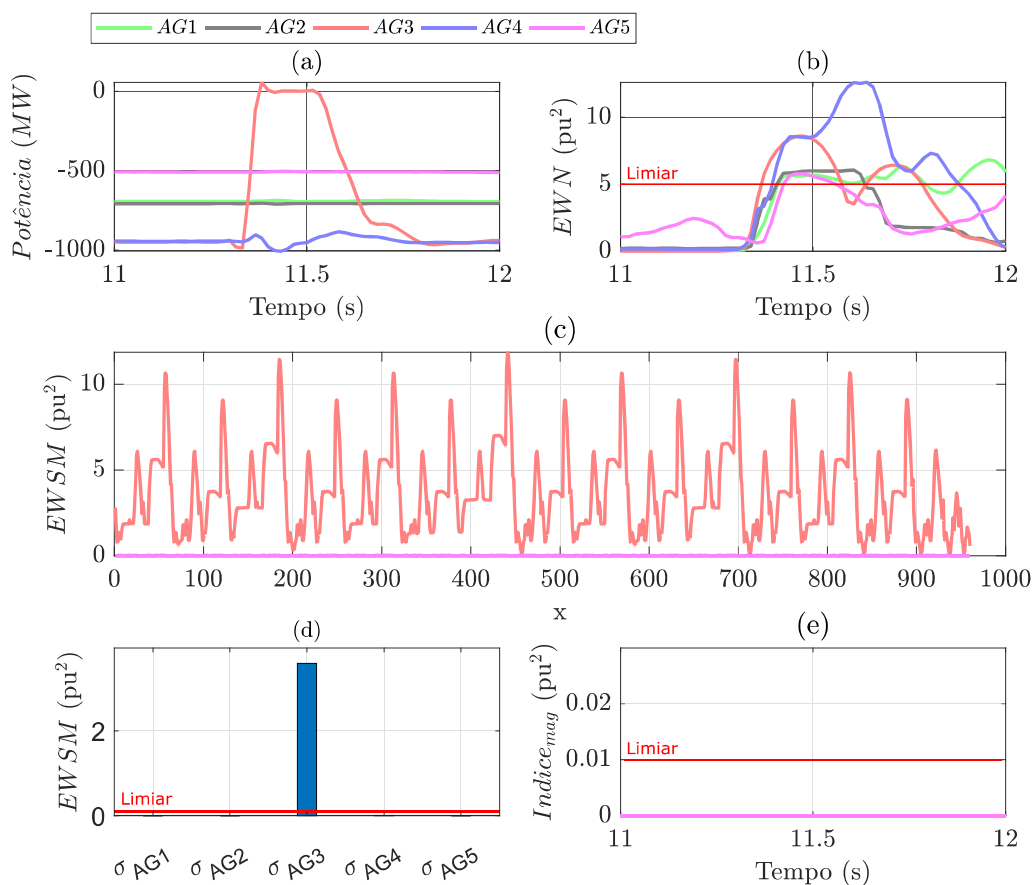
Os indicadores de severidade desenvolvidos ainda estão em estudo, visando a sua utilização no contexto da análise de segurança dinâmica do SIN. Os resultados apresentados nesse subseção correspondem a um demonstrativo e, por isso, não serão apresentados ao longo das demais seções.

5.1.2 Estudo detalhado com o caso de simulação de falta na linha 800 kVcc de AG3

Esta subseção tem o intuito de apresentar uma avaliação do comportamento da abordagem face um evento de falta na linha DC, com potencial de causar efeitos na potência transmitida semelhantes às FCs. Para isto, foram estudados os registros da simulação PSCAD/EMTDC elaborada pelo ONS de falta na linha DC Xingu - Estreito, com recuperação adequada. Os resultados desta subseção correspondem à aplicação da abordagem nos lados de AT e BT dos transformadores conversores YY das estações inversoras dos agentes.

Os resultados podem ser observados na Figura 40, onde os agentes são demarcados por AG1 (linhas em verde claro), AG2 (linhas em cinza), AG3 (linhas em vermelho), AG4 (linhas em azul) e AG5 (linhas em rosa). A Figura 40 é composta das seguintes subfiguras: (a) a potência ativa calculada a partir dos sincrofasores de tensão e corrente, (b) perfil do sinal da EWN referente a etapa de detecção preliminar, (c) perfil do sinal da EWSM referente a 1ª etapa de detecção de falsos positivos, (d) σ_{EWSM} dos agentes de transmissão referente a 1ª etapa de detecção de falsos positivos, (e) o perfil do sinal de $Indice_{mag}$ referente a 2ª etapa de detecção de falsos positivos.

Figura 40 – Resultados da Abordagem - Falha na linha de transmissão DC do polo 1 de AG3.



Observa-se que no terminal de AG3 (linha azul) na Figura 40(a), que corresponde a um dos extremos da linha sob falta, a potência cai e mantém-se em zero por aproximadamente 150 ms até a recuperação. Nos sinais de potência referentes aos demais terminais não se verifica redução significativa da potência. Quanto ao sinal referente ao terminal de AG4 (em azul), nota-se perturbação mais relevante que nos sinais referentes aos terminais AG1, AG2 e AG5, devido ao terminal AG4 compartilhar uma das estações conversoras com o Bipolo Xingu-Estreito, onde ocorreu a falta.

A detecção preliminar do evento pela EWN é vista na Figura 40(b). Todos os terminais tiveram variações para a detecção da ocorrência de um evento, sendo ultrapassado o valor limiar 5 pu^2 . É usual ter resultado como este, pois a EWN busca as mínimas variações para detectar o início dos eventos e os próximos passos desenvolvidos na metodologia eliminam os falsos positivos detectados.

A 1ª etapa de detecção de falsos positivos tem o resultado de σ_{EWSM} conforme a Figura 40(d). Observa-se que o limiar estabelecido para FC é ultrapassado apenas pelo terminal AG3, pois apresentou alto decaimento no sinal de potência impactando nos valores energéticos nos cDs. O perfil da curva da EWSM, conforme a Figura 40(c), apresenta amplitudes elevadas em comparação com os outros elos HVDC.

Os resultados da 2ª etapa de detecção de falsos positivos via $Indíce_{mag}$ podem

ser observados na Figura 40(e). Os valores de $Indice_{mag}$ para os terminais constam da ordem de 10^{-3} . Assim, tem-se que as correntes não apresentaram desequilíbrio suficiente para que fosse ultrapassado o limiar estabelecido.

Apesar do resultado da EWSM apresentado pela Figura 40(c) e (d) se assemelharem ao padrão associado a ocorrência de FC, o resultado de $Indice_{mag}$ dita que este evento não corresponde a uma FC. Devido a forma com que ação de FR é executada, não há desequilíbrio entre as correntes na ponte inversora.

5.1.3 Resultados da detecção preliminar para os casos de simulação

Os resultados da detecção preliminar dos casos de simulação podem ser vistos na Tabela 6. Cada caso é identificado na primeira coluna “Local da Falta” que aponta a origem do evento. Na segunda coluna “Indicador” apresentam-se os indicadores da análise que são “max(EWN - P1PY)”, “max(EWN - P1PD)”, e os diagnósticos “Diag. da Abor.” e “Diag. Real”. As colunas restantes apresentam os resultados obtidos dos polos 1 dos agentes dos elos HVDC do SIN.

Tabela 6 – Resultados da detecção preliminar

Local da Falta	Indicador	AG1	AG2	AG3	AG4	AG5
Estreito 500 kV	max(EWN-P1PY)	10,14	9,80	8,76	9,58	9,71
	max(EWN-P1PD)	9,88	9,79	8,88	9,50	9,77
	Diag. da Abor.	DET	DET	DET	DET	DET
	Diag. Real	DET	DET	DET	DET	DET
Araraquara 500 kV	max(EWN-P1PY)	8,69	9,15	8,71	10,07	9,61
	max(EWN-P1PD)	8,63	9,10	8,57	11,25	9,74
	Diag. da Abor.	DET	DET	DET	DET	DET
	Diag. Real	DET	DET	DET	DET	DET
Araraquara 2 440 kV	max(EWN-P1PY)	8,722	9,048	8,731	10,136	9,617
	max(EWN-P1PD)	8,563	9,043	8,594	11,325	9,617
	Diag. da Abor.	DET	DET	DET	DET	DET
	Diag. Real	DET	DET	DET	DET	DET
Adrianópolis 440 kV	max(EWN-P1PY)	9,183	9,859	9,469	8,557	9,694
	max(EWN-P1PD)	9,337	9,868	9,126	8,487	9,676
	Diag. da Abor.	DET	DET	DET	DET	DET
	Diag. Real	DET	DET	DET	DET	DET
Ibiúna 345 kV	max(EWN-P1PY)	9,21	9,67	9,25	10,13	9,80
	max(EWN-P1PD)	9,25	9,67	8,61	10,19	9,83
	Diag. da Abor.	DET	DET	DET	DET	DET
	Diag. Real	DET	DET	DET	DET	DET
Terminal Rio 500 kV	max(EWN-P1PY)	9,54	9,78	9,42	8,51	9,69
	max(EWN-P1PD)	9,56	9,78	9,36	8,39	9,68
	Diag. da Abor.	DET	DET	DET	DET	DET
	Diag. Real	DET	DET	DET	DET	DET

Emborcação 500 kV	max(EWN-P1PY)	9,61	10,70	9,43	11,86	10,23
	max(EWN-P1PD)	10,07	10,71	9,21	11,92	9,97
	Diag. da Abor.	DET	DET	DET	DET	DET
	Diag. Real	DET	DET	DET	DET	DET
Cascavel 525 kV	max(EWN-P1PY)	9,15	10,37	10,39	11,59	9,18
	max(EWN-P1PD)	9,18	10,36	10,39	12,23	9,29
	Diag. da Abor.	DET	DET	DET	DET	DET
	Diag. Real	DET	DET	DET	DET	DET
Fernão Dias 500 kV	max(EWN-P1PY)	9,59	10,79	9,75	11,25	9,90
	max(EWN-P1PD)	9,59	10,76	9,76	11,07	9,91
	Diag. da Abor.	DET	DET	DET	DET	DET
	Diag. Real	DET	DET	DET	DET	DET
Itaberá 765 kV	max(EWN-P1PY)	9,34	10,83	10,20	11,05	9,49
	max(EWN-P1PD)	9,37	10,84	10,20	10,93	9,64
	Diag. da Abor.	DET	DET	DET	DET	DET
	Diag. Real	DET	DET	DET	DET	DET
Londrina 525 kV	max(EWN-P1PY)	9,60	10,93	9,51	10,96	10,59
	max(EWN-P1PD)	9,30	10,91	9,52	11,03	10,42
	Diag. da Abor.	DET	DET	DET	DET	DET
	Diag. Real	DET	DET	DET	DET	DET
AG3 linha 800 kVcc	max(EWN-P1PY)	7,37	14,77	8,61	12,68	9,34
	max(EWN-P1PD)	7,17	14,71	8,61	12,66	9,52
	Diag. da Abor.	DET	DET	DET	DET	DET
	Diag. Real	DET	DET	DET	DET	DET
AG4 linha 800 kVcc	max(EWN-P1PY)	9,97	10,03	10,49	8,27	9,10
	max(EWN-P1PD)	9,96	10,04	10,66	8,28	8,89
	Diag. da Abor.	DET	DET	DET	DET	DET
	Diag. Real	DET	DET	DET	DET	DET

Os indicadores “max(EWN - P1PY)” e “max(EWN - P1PD)” (em pu^2) são os resultados dos pontos de máximo da EWN do sinal de potência ativa pelo lado de AT dos transformadores conversores YY e YD, respectivamente. Caso o valor ultrapasse $Th_{EWN} \geq 5 pu^2$, um evento é detectado como a uma perturbação abrupta no sinal de potência ativa e a célula da tabela na coluna referente ao terminal é apresentada em cor vermelho; caso contrário, em branco.

Os diagnósticos “Diag. da Abor” e “Diag. Real” representam o resultado da abordagem e o resultado real verificado nos sinais de potência, respectivamente. O “Diag. Real” é realizado a partir de análise do sinal de potência (calculado a partir das oscilografias de tensão e corrente) com o objetivo de validar o resultado obtido pelo “Diag. da Abor”. Caso para os indicadores “max(EWN-PIPY)” ou “max(EWN-PIPD)” seja obtida a condição $Th_{EWN} \geq \max(EWN)$, o “Diag. da Abor” apresenta o resultado “DET” designando a detecção preliminar e “-”, caso contrário. A mesma notação é utilizada para os resultados do “Diag. Real”.

Nos resultados analisados da Tabela 6, observa-se que todos os casos apresen-

taram ultrapassagem do valor limiar $Th_{EWN} \geq \max(EWN)$, assim o resultado de “Diag. da Abor” é apresentado por “DET”. Os resultados fornecidos pela metodologia desenvolvida indicam os mesmos verificados no sinal de potência ativa representado por “Diag. Real”. Desta forma, a etapa de detecção preliminar foi capaz de detectar o instante inicial da ocorrência de um evento e prover esta informação as etapas seguintes para o processamento do sinal de potência.

Constata-se que a etapa de detecção preliminar é susceptível a quaisquer variações que ocorrem ao sinal de potencia. Os resultados encontrados pela Tabela 6 não representam obrigatoriamente a ocorrência de um evento de FC, podendo ser detectadas até mesmo pequenas variações do sinal analisado. Assim, conforme esperado, todos os resultados desta etapa ultrapassam o valor limiar estabelecido de $5 p.u^2$, pois mesmo pequenas variações devem ser detectadas e descartadas nas etapas seguintes, a fim de evitar falsos positivos.

5.1.4 Resultado de eficiência da 1ª etapa de identificação de falsos positivos para os casos de simulação

Os resultados da 1ª etapa de identificação de falsos positivos dos casos de simulação podem ser vistos na Tabela 7. Na primeira coluna é apresentado o local da falta que originou as FCs nos elos HVDC do SIN. Os indicadores da avaliação podem ser vistos na segunda coluna que correspondem aos seguintes: “ $\sigma-P1PY$ ”, “ $\sigma-P1PD$ ”, “Diag. da Abor” e “Diag. Real”. As colunas restantes representam os resultados obtidos dos polos 1 dos agentes dos elos HVDC do SIN.

Tabela 7 – Resultados da 1ª etapa de identificação de falsos positivos.

Local da Falta	Indicador	AG1	AG2	AG3	AG4	AG5
Estreito 500 kV	$\sigma-P1PY$	0,504	1,639	2,304	0,042	1,191
	$\sigma-P1PD$	0,278	1,480	2,290	0,045	1,434
	Diag. da Abor.	FC-2P	FC-2P	FC-2P	-	FC-2P
	Diag. Real	FC-2P	FC-2P	FC-2P	-	FC-2P
Araraquara 500 kV	$\sigma-P1PY$	2,524	2,099	1,872	0,575	1,144
	$\sigma-P1PD$	2,066	2,107	1,466	0,330	1,410
	Diag. da Abor.	FC-2P	FC-2P	FC-2P	FC-2P	FC-2P
	Diag. Real	FC-2P	FC-2P	FC-2P	FC-1P	FC-2P
Araraquara 2 440 kV	$\sigma-P1PY$	2,226	2,152	1,868	0,554	1,130
	$\sigma-P1PD$	1,750	2,265	1,423	0,296	1,395
	Diag. da Abor.	FC-2P	FC-2P	FC-2P	FC-2P	FC-2P
	Diag. Real	FC-2P	FC-2P	FC-2P	FC-1P	FC-2P
Adrianópolis 500 kV	$\sigma-P1PY$	0,335	1,559	0,541	2,724	1,064
	$\sigma-P1PD$	0,255	1,528	0,718	2,402	1,065
	Diag. da Abor.	FC-2P	FC-2P	FC-2P	FC-2P	FC-2P
	Diag. Real	FC-1P	FC-2P	FC-2P	FC-2P	FC-2P

Ibiúna 345 kV	σ -P1PY	0,414	1,768	1,120	0,377	2,976
	σ -P1PD	0,428	1,711	1,700	0,366	2,770
	Diag. da Abor.	FC-2P	FC-2P	FC-2P	FC-2P	FC-2P
	Diag. Real	FC-2P	FC-2P	FC-2P	FC-2P	FC-2P
Terminal Rio 500 kV	σ -P1PY	0,377	1,723	0,438	2,483	1,164
	σ -P1PD	0,384	1,678	0,658	2,597	1,142
	Diag. da Abor.	FC-2P	FC-2P	FC-2P	FC-2P	FC-2P
	Diag. Real	FC-2P	FC-2P	FC-2P	FC-2P	FC-2P
Emborcação 500 kV	σ -P1PY	0,102	1,474	2,015	0,045	1,111
	σ -P1PD	0,128	1,512	1,664	0,045	0,793
	Diag. da Abor.	FC-2P	FC-2P	FC-2P	-	FC-2P
	Diag. Real	FC-2P	FC-2P	FC-2P	-	FC-1P
Cascavel 525 kV	σ -P1PY	0,002	7,052e-05	4,396e-04	6,397e-04	0,001
	σ -P1PD	0,002	6,088e-05	4,309e-04	0,001	0,000
	Diag. da Abor.	-	-	-	-	-
	Diag. Real	-	-	-	-	-
Fernão Dias 500 kV	σ -P1PY	0,059	1,560	0,093	0,048	0,017
	σ -P1PD	0,059	1,374	0,049	0,018	0,017
	Diag. da Abor.	-	FC-2P	-	-	-
	Diag. Real	-	FC-2P	-	-	-
Itaberá 765 kV	σ -P1PY	0,007	2,439e-04	0,001	0,003	0,003
	σ -P1PD	0,007	0,001	0,004	0,003	0,002
	Diag. da Abor.	-	-	-	-	-
	Diag. Real	-	-	-	-	-
Londrina 525 kV	σ -P1PY	0,176	1,427	0,039	0,033	1,393
	σ -P1PD	0,244	1,407	0,040	0,033	1,169
	Diag. da Abor.	FC-2P	FC-2P	-	-	FC-2P
	Diag. Real	FC-2P	FC-2P	-	-	FC-2P
AG3 linha 800 kVcc	σ -P1PY	8,220e-04	9,891e-05	3,659	0,009	7,256e-04
	σ -P1PD	8,196e-04	9,726e-05	3,658	0,009	6,803e-04
	Diag. da Abor.	-	-	FC-2P	-	-
	Diag. Real	-	-	FC-2P	-	-
AG4 linha 800 kVcc	σ -P1PY	0,006	1,783e-4	0,274	3,424	0,001
	σ -P1PD	0,006	1,847e-4	0,368	3,421	0,001
	Diag. da Abor.	-	-	FC-2P	FC-2P	-
	Diag. Real	-	-	FC-2P	FC-1P	-

Os indicadores “ σ -P1PY” e “ σ -P1PD” constituem os valores das médias da EWSM (Equação 8) nos lados de AT dos transformadores YD e YY do polo 1 dos agentes dos elos HVDC, respectivamente. Se o valor encontrado for $Th_{\sigma} \geq 0.1 pu^2$, indica-se alto decaimento do sinal de potência ativa e a célula é assinalada em vermelho. Caso a condição não seja alcançada, não houve decaimento relevante do sinal de potência ativa e a célula é assinalada em azul.

Os diagnósticos “Diag. da Abor” e “Diag. Real” são classificados por “FC-2P” em caso de um possível evento de FC em ambas as pontes conversoras, “FC-1P” a

ocorrência de FC em apenas uma das pontes conversoras e “-” a não ocorrência de FC em nenhuma das pontes conversoras. O “Diag. da Abor” é identificado por “FC-2P” quando ambos os indicadores “ $\sigma - P1PY$ ” e “ $\sigma - P1PD$ ” acarretam $Th_{\sigma} \geq 0.1pu^2$, por “FC-1P” se apenas um dos indicadores indicar $Th_{\sigma} \geq 0.1pu^2$ e por “-”, se $Th_{\sigma} < 0.1pu^2$ em ambas as pontes conversoras. Quanto ao “Diag. Real” é determinado por “FC-2P” e “FC-1P” se na verificação do sinal de potência ativa (calculado a partir das oscilografias de tensão e corrente) cruzar o eixo zero (ou tangenciar) em duas e uma das pontes conversoras, respectivamente, e por “-” caso contrário. Todos os resultados do “Diag. Real” foram apurados manualmente.

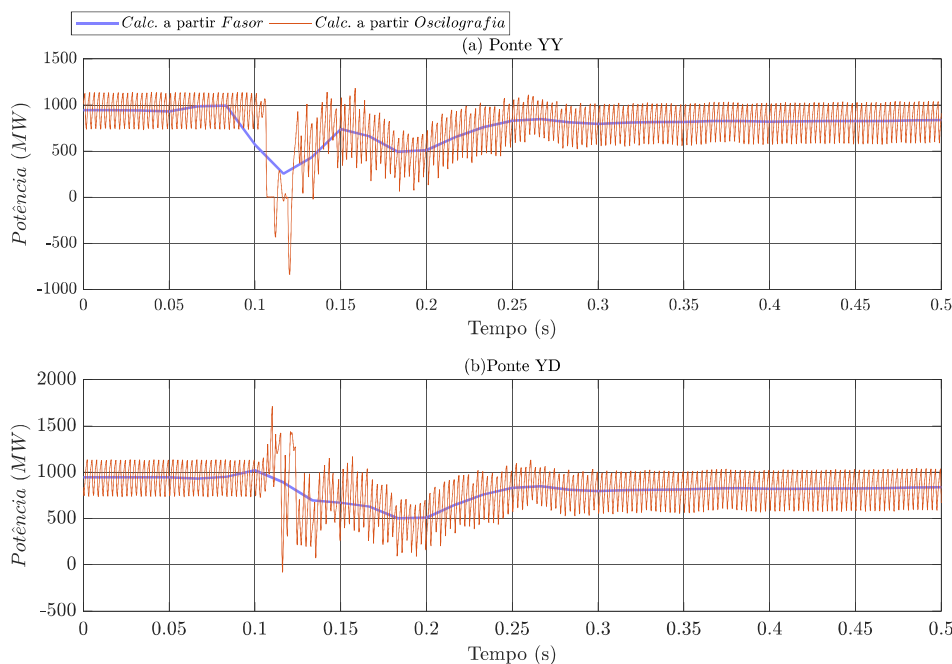
Na análise dos resultados que ocorreram FCs (em vermelho), observa-se que o “Diagnóstico da Metodologia” obteve a mesma determinação do “Diag. Real” nos casos “FC-2P” a qual ambas as pontes conversoras tiveram alto padrão de queda no sinal de potência ativa. No entanto, os casos “FC-1P” (“SE ARA 500 kV - AG4”, “SE ARA2 440 kV - AG4”, “SE ADRIAN 500 kV - AG1”, “SE EMBORC 500 kV - AG5”, “AG4 linha 800 kVcc - AG3”) a qual apenas uma das pontes conversoras tiveram FC, o “Diag. da Abor.” teve resultado diferente do “Diag. Real”. Para os casos sem FC (em azul), obtém-se valor de σ inferior ao limiar estabelecido. O limiar $Th_{\sigma} = 0,1pu^2$ mostra-se adequado em separar os casos “-” dos demais casos, pois os casos em que não ocorreram FC, não apresentam padrão de descida acentuado no sinal de potência ativa.

Observa-se que os casos poucos severos de FC, com TIP menor ou igual a 10 ms (Tabela 3), tiveram ultrapassagem do valor limiar. Entre estes, pode-se citar ELN nos casos de simulação de falta nas SEs Estreito 500 kV e Ibiúna 345 kV, ambos com TIP igual 3 ms. Esses casos com TIP muito baixo poderiam apresentar dificuldade na detecção nesta etapa, no entanto os resultados apresentados mostram a eficácia da etapa em capturar o padrão de descida do sinal de potência ativa, mesmo para variações pequenas. Ressalta-se que o TIP é apenas uma referência de análise prévia para diferenciar a severidade de uma FC, porém não é diretamente refletido no valor de magnitude do indicador σ desenvolvido.

Na 1ª etapa de identificação de falsos positivos não é dissociado todos os casos “FC-1P” e “FC-2P”, pois o cálculo realizado pela EWSM interpreta que ambas as pontes conversoras demonstram valor energético caracterizado pelo afundamento do sinal de potência ativa. Nos casos “FC-1P”, apesar de uma das pontes conversoras não apresentar a ocorrência efetiva de FC, o sinal de potência ativa calculado a partir dos sincrofasores em ambas as pontes conversoras apresentam decaimento não desprezível. No geral, os casos “FC-1P” possuem TIP menor ou igual a 20 ms, não correspondendo a eventos muito severos ao SEE, diferentemente dos casos “FC-2P”.

Como exemplo, apresenta-se na Figura 41, os sinais de potência calculado a partir dos sincrofasores (em linha azul) e das oscilografias de tensão e corrente (em linha laranja) de AG4 das pontes dos transformadores conversores YY e YD nas sub-

Figura 41 – Falta em ARARAQ-SP500 kV - Potência Ativa - Polo 1 - AG4



figuras (a) e (b) para o caso de falta na SE ARARAQ-SP500 kV. Na subfigura (a), o sinal de potência ativa da ponte do transformador conversor YY calculado a partir das oscilografias de tensão e corrente cruza o eixo zero por um ciclo, o que caracteriza uma possível ocorrência de FC. Na subfigura (b), o sinal de potência ativa da ponte do transformador conversor YD calculado a partir das oscilografias cruza o eixo horizontal mas não marca valor zero, o que não caracteriza a ocorrência de FC. Logo, verifica-se que apenas a ponte do transformador conversor YY sofreu FC, no entanto em ambas as pontes dos transformadores conversores houve considerável decaimento do sinal de potência ativa, com valores mínimos de potência ativa das pontes dos transformadores conversores YY e YD de 255 MW e 502 MW, respectivamente. O mesmo comportamento disposto na Figura 41 é encontrado nos casos “FC-1P” restantes, assim não ocorrendo o descarte desses casos na 1ª etapa de detecção de falsos positivos.

Observa-se que a partir dos resultados apresentados da subseção, o principal ganho desta etapa na metodologia deve-se em diferenciar os elos HVDC que não sofreram FC em ambas as pontes conversoras, mas tiveram perturbações nos sinais de potência ativa devido aos efeitos locais e sistêmicos da FC de modo a ser um possível falso positivo.

5.1.5 Resultado de eficiência da 2ª etapa de identificação de falsos positivos para os casos de simulação

Os resultados da 2ª etapa de identificação de falsos positivos podem ser vistos na Tabela 8. Na primeira coluna é indicada o local da falta. Na segunda coluna constam os indicadores “ $\max(\text{Indice}_{mag} - P1PY)$ ” e “ $\max(\text{Indice}_{mag} - P1PD)$ ”, e os diagnósticos

“Diag. da Abor” e “Diag. Real” utilizados na avaliação dos resultados desta etapa. Nas colunas restantes são apresentados os resultados em cada um dos polos 1 dos elos HVDC do SIN.

Tabela 8 – Resultados da 2ª etapa de identificação de falsos positivos.

Local da Falta	Indicador	AG1	AG2	AG3	AG4	AG5
Estreito 500 kV	$\max(\text{Indice}_{\text{mag}}\text{-P1PY})$	0,210	0,0431	0,358	0,003	0,142
	$\max(\text{Indice}_{\text{mag}}\text{-P1PD})$	0,083	0,134	0,226	0,005	0,268
	Diag. da Abor.	FC-2P	FC-2P	FC-2P	-	FC-2P
	Diag. Real	FC-2P	FC-2P	FC-2P	-	FC-2P
Araraquara 500 kV	$\max(\text{Indice}_{\text{mag}}\text{-P1PY})$	0,262	0,043	0,778	0,293	0,062
	$\max(\text{Indice}_{\text{mag}}\text{-P1PD})$	0,199	0,090	0,635	0,011	0,170
	Diag. da Abor.	FC-2P	FC-2P	FC-2P	FC-2P	FC-2P
	Diag. Real	FC-2P	FC-2P	FC-2P	FC-1P	FC-2P
Araraquara 2 440 kV	$\max(\text{Indice}_{\text{mag}}\text{-P1PY})$	0,239	0,0523	0,836	0,299	0,054
	$\max(\text{Indice}_{\text{mag}}\text{-P1PD})$	0,688	0,194	0,645	0,010	0,168
	Diag. da Abor.	FC-2P	FC-2P	FC-2P	FC-2P	FC-2P
	Diag. Real	FC-2P	FC-2P	FC-2P	FC-1P	FC-2P
Adrianópolis 500 kV	$\max(\text{Indice}_{\text{mag}}\text{-P1PY})$	0,0425	0,175	0,092	0,099	0,034
	$\max(\text{Indice}_{\text{mag}}\text{-P1PD})$	0,0035	0,058	0,176	0,363	0,070
	Diag. da Abor.	FC-1P	FC-2P	FC-2P	FC-2P	FC-2P
	Diag. Real	FC-1P	FC-2P	FC-2P	FC-2P	FC-2P
Ibiúna 345 kV	$\max(\text{Indice}_{\text{mag}}\text{-P1PY})$	0,075	0,124	0,080	0,152	0,284
	$\max(\text{Indice}_{\text{mag}}\text{-P1PD})$	0,098	0,043	0,792	0,085	0,094
	Diag. da Abor.	FC-2P	FC-2P	FC-2P	FC-2P	FC-2P
	Diag. Real	FC-2P	FC-2P	FC-2P	FC-2P	FC-2P
Terminal Rio 500 kV	$\max(\text{Indice}_{\text{mag}}\text{-P1PY})$	0,119	0,216	0,087	0,917	0,042
	$\max(\text{Indice}_{\text{mag}}\text{-P1PD})$	0,119	0,083	0,172	0,242	0,071
	Diag. da Abor.	FC-2P	FC-2P	FC-2P	FC-2P	FC-2P
	Diag. Real	FC-2P	FC-2P	FC-2P	FC-2P	FC-2P
Emborcação 500 kV	$\max(\text{Indice}_{\text{mag}}\text{-P1PY})$	0,009	0,168	0,617	0,001	0,120
	$\max(\text{Indice}_{\text{mag}}\text{-P1PD})$	0,038	0,239	0,709	0,001	0,001
	Diag. da Abor.	FC-1P	FC-2P	FC-2P	-	FC-1P
	Diag. Real	FC-1P	FC-2P	FC-2P	-	FC-1P
Cascavel 525 kV	$\max(\text{Indice}_{\text{mag}}\text{-P1PY})$	3,023e-04	0,001	3,087e-04	4,567e-04	0,001
	$\max(\text{Indice}_{\text{mag}}\text{-P1PD})$	3,041e-04	0,001	3,196e-04	6,867e-04	7,944e-04
	Diag. da Abor.	-	-	-	-	-
	Diag. Real	-	-	-	-	-
Fernão Dias 500 kV	$\max(\text{Indice}_{\text{mag}}\text{-P1PY})$	0,004	0,158	0,005	0,002	8,772e-04
	$\max(\text{Indice}_{\text{mag}}\text{-P1PD})$	0,004	0,085	0,005	0,003	0,003
	Diag. da Abor.	-	FC-2P	-	-	-
	Diag. Real	-	FC-2P	-	-	-
Itaberá 765 kV	$\max(\text{Indice}_{\text{mag}}\text{-P1PY})$	4,503e-04	0,002	5,577e-04	0,001	4,835e-04
	$\max(\text{Indice}_{\text{mag}}\text{-P1PD})$	4,445e-04	0,002	5,367e-04	0,001	0,001
	Diag. da Abor.	-	-	-	-	-

	Diag. Real	-	-	-	-	-
Londrina 525 kV	$\max(\text{Indice}_{mag}\text{-P1PY})$	0,067	0,159	0,001	0,001	0,182
	$\max(\text{Indice}_{mag}\text{-P1PD})$	0,064	0,075	0,001	0,001	0,138
	Diag. da Abor.	FC-2P	FC-2P	-	-	FC-2P
	Diag. Real	FC-2P	FC-2P	-	-	FC-2P
AG3 linha 800 kVcc	$\max(\text{Indice}_{mag}\text{-P1PY})$	4,206e-06	3,985e-06	0,002	5,218e-05	9,058e-05
	$\max(\text{Indice}_{mag}\text{-P1PD})$	2,726e-06	4,479e-06	0,002	1,788e-04	1,815e-04
	Diag. da Abor.	-	-	-	-	-
	Diag. Real	-	-	-	-	-
AG4 linha 800 kVcc	$\max(\text{Indice}_{mag}\text{-P1PY})$	4,956e-05	3,290e-4	0,009	0,001	1,491e-4
	$\max(\text{Indice}_{mag}\text{-P1PD})$	2,922e-5	3,302e-4	0,218	0,001	2,294e-4
	Diag. da Abor.	-	-	FC-1P	-	-
	Diag. Real	-	-	FC-1P	-	-

Os índices “ $\max(\text{Indice}_{mag}\text{-P1PY})$ ” e “ $\max(\text{Indice}_{mag}\text{-P1PD})$ ” correspondem aos valores máximos dos desbalanços obtidos conforme a Equação 9 e calculados a partir dos sincrofasores de corrente pelo lado de BT dos transformadores conversores das pontes dos transformadores conversores YY e YD do polo 1, respectivamente. Se $\max(\text{Indice}_{mag}\text{-P1PY}) \geq Th_{\text{Indice}_{mag}}$, ou $\max(\text{Indice}_{mag}\text{-P1PD}) \geq Th_{\text{Indice}_{mag}}$ para algum dos agentes, é indicado desbalanço relevante entre as correntes de fase. Esse desbalanço possivelmente está relacionado com a ocorrência de curto-circuito entre as pontes conversoras, sinalizando a ocorrência de FC. Para os casos de FC, a célula correspondente da tabela é assinalada em vermelho; caso contrário em azul. O limiar usado é $Th_{\text{Indice}_{mag}} = 0,1 \text{ pu}^2$.

O “Diagnóstico da Metodologia” representa a avaliação dos resultados obtidos pela abordagem. Se $\max(\text{Indice}_{mag}) \geq Th_{\text{Indice}_{mag}}$ para ambas as pontes conversoras, o diagnóstico indicado é “FC-2P”, e se apenas em uma das pontes conversoras $\max(\text{Indice}_{mag}) \geq Th_{\text{Indice}_{mag}}$, o diagnóstico indicado é “FC-1P”. Se em nenhuma das pontes conversoras $\max(\text{Indice}_{mag}) \geq Th_{\text{Indice}_{mag}}$, o diagnóstico é “-” (o evento não é de FC).

Observa-se através dos diagnósticos que todos os casos “FC-2P” tiveram a detecção correta. Não houve detecção de falsos positivos ou falsos negativos, demonstrando que o limiar utilizado está adequado para esses casos. A detecção correta desses casos é de relevância, pois os mesmos representam maior severidade ao SEE. Entre os resultados dos casos “FC-1P” (“SE ARA 500 kV - AG4”, “SE ARA2 440 kV - AG4”, “SE ADRIAN 500 kV - AG1”, “SE EMBORC 500 kV - AG5”, “AG4 linha 800 kVcc - AG3”) apresentados na Tabela 8, a metodologia indicou FC em ambas as pontes conversoras para os casos “SE ARA 500 kV - AG4” e “SE ARA2 440 kV - AG4”, e FC em apenas uma ponte conversora nos casos “SE ADRIAN 500 kV - AG1”, “SE EMBORC 500 kV - AG5” e “AG4 linha 800 kVcc”. Dessa forma, a 2ª etapa foi a responsável por realizar o descarte de falsos positivos de casos FC-1P e ações de FR após faltas em

linha.

Quanto aos resultados dos casos sem FC, resultados adequados são encontrados em todas as simulações, com baixo valores no indicador de desequilíbrio. Os resultados dos casos “-” correspondem às perturbações associadas a efeitos sistêmicos da FC ou ações de controle associadas ao FR nos terminais das estações conversoras dos elos HVDC.

5.2 RESULTADOS DE CASOS COM MEDIÇÕES DE CAMPO

A fim de avaliar a abordagem proposta com medições realizadas em campo, elaborou-se um estudo com dados das SEs conversoras dos elos HVDC do SIN relacionados a eventos ocorridos no dia 16/01/2020 (Caso 1) e 26/01/2022 (Caso 2). Os registros disponíveis desses casos podem ser vistos na Tabela 9 que contém as seguintes informações: o caso especificado na primeira coluna “Caso”, os dados disponibilizados em oscilografia e fasor na segunda coluna “Dado”, a identificação dos agentes nas estações retificadora “RET” e inversora “INV” para o polo 1 “P1” e polo 2 “P2” nas colunas restantes. O registro disponível para o teste da abordagem é assinalado por “X”, e caso contrário por “-”. As células assinaladas em verde denotam que foram disponibilizados todos os registros da SE necessários para o teste da abordagem e em vermelho denotam que nem todos os registros necessários foram disponibilizados.

Como pode ser observado na Tabela 9 em relação aos registros disponíveis, o único registro com todos os canais completos (em verde) adquirido foram oscilografias do caso 2 dos agentes AG2 e AG3 que constituem as tensões no barramento AC da SE e as correntes AC dos transformadores conversores pelos lados de AT e BT. Os registros com canais não disponibilizados (em vermelho) possuem apenas tensões do barramento AC da SE e corrente de AT do transformador conversor. Já os registros dos fasores dos casos foram obtidos por meio do projeto Medfasee a partir do *software* MedPlot_RT.

Tabela 9 – Registro disponíveis das medições de campo.

Caso	Dado	AG1				AG2				AG3				XRTE				AG5				
		RET		INV		RET		INV		RET		INV		RET		INV		RET		INV		
		P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	
1	Oscilografia	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Fasor	-	-	-	-	X	X	X	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	Oscilografia	-	-	-	-	-	-	X	X	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Fasor	-	-	-	-	X	X	X	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

No caso 1, os registros com canais faltantes inabilitaram a utilização da 2ª etapa de identificação de falsos positivos, sendo aplicável a detecção preliminar e a 1ª etapa de identificação de falsos positivos. No caso 2 foi possível aplicar a detecção preliminar,

1ª e 2ª etapas de detecção de falsos positivos, dado que foram disponibilizadas as oscilografias das SEs conversoras de AG2 e AG3. Esses registros foram processados para obtenção dos fasores de tensão e corrente do evento.

5.2.1 Caso 1 - 16/01/2020

Elaborou-se uma descrição do caso 1 ocorrido em 16/01/2020 na subseção 5.2.1.1 a partir das informações apresentadas em ONS (2020) e contextualizada pelos registros do AG2 obtidos via *software* MedPlot_RT. Na subseção 5.2.1.2, apresenta-se os resultados da abordagem referentes aos registros dos agentes AG2 e AG3.

5.2.1.1 Descrição do caso

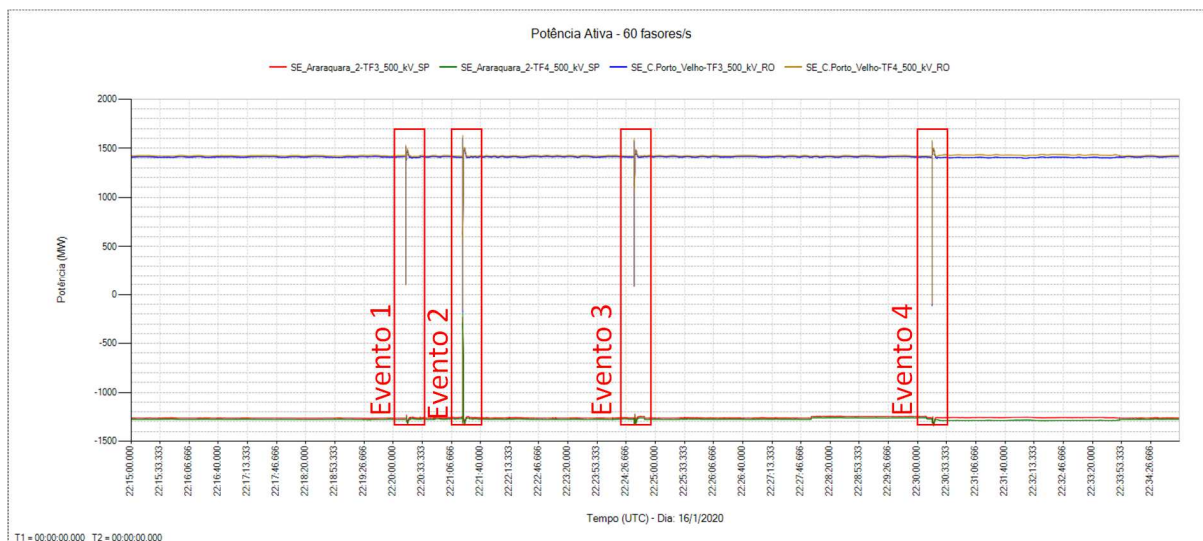
Realizou-se um estudo com dados relacionados a eventos ocorridos no dia 16/01/2020 no SIN. Os sincrofasores relacionados foram registrados pelas PMUs previamente instaladas nos polos do Sistema de Transmissão HVDC do Rio Madeira referentes ao AG2, os elos são constituídos pela SE Coletora Porto Velho 500 kV (CPV-500 kV) e SE Araraquara 2 500 kV (ARA2-500 kV) .

Conforme informado por ONS (2020) com base nas informações apresentadas pelos agentes, no dia 16/01/2020 ocorreram 3 eventos sucessivos de falta monofásica na fase C da linha Araraquara-Campinas com religamentos às 19h20 – 19h21 – 19h24 (horário de Brasília - BSB), sendo o primeiro automático e o segundo manual. Por meio da análise de oscilografias, constatou-se que apenas os dois bipolos do Madeira apresentaram FC. O primeiro curto teve duração de 58 ms, o segundo com 56 ms e o terceiro com tempo de 66 ms. A causa dos desligamentos foi vegetação a 40 km de Campinas.

Na Figura 42, são apresentados os sinais de potência ativa calculados a partir dos sincrofasores de tensão e corrente, correspondentes aos polos 1 e 2 do bipolo do sistema HVDC do Rio Madeira do agente AG2, reportados à taxa de 60 fasores/s e referenciados ao *Coordinated Universal Time* (UTC), que equivale a BSB-3h. Os três eventos reportados pelo ONS podem ser observados, sendo o Evento 1 às 19h20m15s, Eventos 2 às 19h21m20s e o Evento 3 às 19h24m36s. Observou-se, ainda, um outro evento que apresenta natureza similar de afundamento na potência ativa: Evento 4 às 19h30m17s. Todos os eventos podem ser visto na figura com destaque em vermelho conforme a descrição.

Verificou-se que durante os eventos 1, 3 e 4, o terminal SE CPV-500 kV apresentou variações abruptas de potência ativa em ambos os polos, atingindo valores próximos de zero cerca de 70 ms após o início do evento, enquanto o terminal SE ARA2-500 kV sofreu perda de dados. No Evento 2, foi possível observar que a potência ativa atingiu valores ligeiramente negativos nos polos do terminal SE CPV-500 kV e

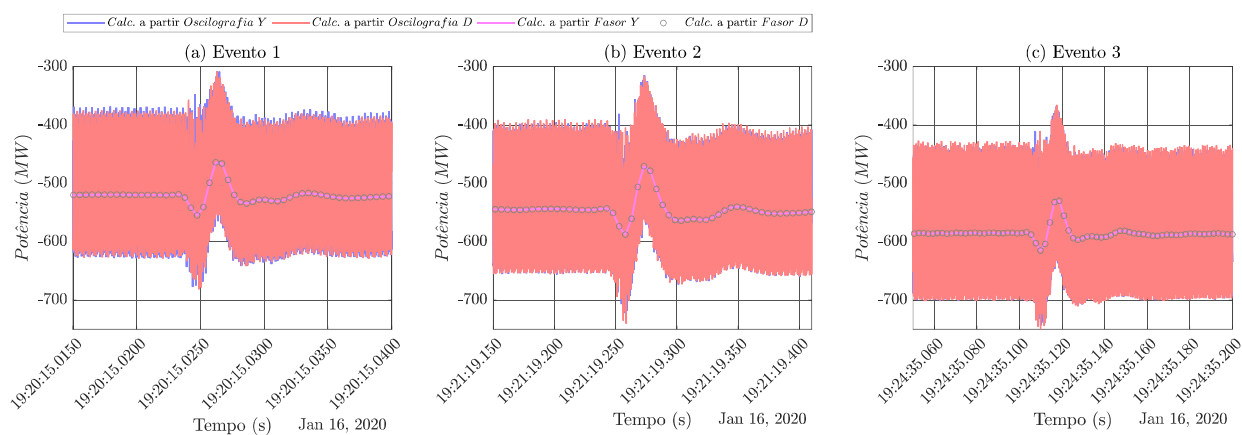
Figura 42 – Potência Ativa - Polo 1 e 2 - AG2 - Evento 16/01/2020



valores próximos a zero nos polos do terminal SE ARA2-500 kV, este sem ocorrência de perda de dados.

Os sinais de potência das pontes dos transformadores conversores YY e YD do polo 1 de AG3 na SE Estreito 500 kV calculados a partir das oscilografias (em linha azul e em linha vermelha nas pontes conversoras, respectivamente) e fasores (em linha rosa e círculos em cinza nas pontes dos transformadores conversores YY e YD, respectivamente) de tensão e corrente podem ser vistos na Figura 43. O evento 1 às 19h20m15s, evento 2 às 19h21m20s e evento 3 às 19h24m36s são representados nas subfiguras (a), (b) e (c), respectivamente. Os instantes dos eventos 1, 2 e 3 nos registros de AG3 correspondem, aproximadamente, aos mesmos instantes dos registros em AG2. O registro de AG3 correspondente ao evento 4 de AG2 não foi disponibilizado para a avaliação da abordagem.

Figura 43 – Potência Ativa - Pontes dos Transformadores Conversores YY e YD - AG3 - SE Estreito 500 kV - Evento 16/01/2020.



Observa-se que em nenhuma das subfiguras, os sinais de potência ativa calculados a partir das oscilografias tiveram variação abrupta até alcançar ou ultrapassar o

eixo horizontal. Assim, descarta-se que houve FC na SE Estreito 500 kV, sendo existente apenas uma pequena perturbação sem impacto significativo na operação do elo. Os sinais de potência calculados a partir dos fasores não apresentaram decaimento expressivo durante os eventos. No entanto, mesmo que não tenha ocorrido FC, os dados foram aplicados na abordagem a fim de verificar se os limiares dos algoritmos implementados não incorreriam em falsos positivos de FC.

5.2.1.2 Resultados numéricos

Os resultados gerais obtidos pela abordagem no caso 1 podem ser vistos conforme a Tabela 10. Nas colunas “Evento” e “Início do Evento” são apresentadas a numeração do evento detectado e o instante inicial de detecção, respectivamente. Nas colunas restantes é apresentado o resultado de cada etapa no seu respectivo agente. Caso em algumas das etapas seja ultrapassado o valor limiar, simboliza-se por “X”; caso contrário por “-”. Na coluna referente a 2ª etapa de detecção de falsos positivos, não são ofertados resultados devido a indisponibilidade do sinais de corrente de BT dos transformadores conversores.

A utilização deste caso no estudo mesmo sem a 2ª etapa de detecção de falsos positivos busca apresentar o funcionamento da metodologia com medições de campo e avaliar os limiares utilizados. Os dados de entrada utilizados nos resultados do caso 1 de AG2 correspondem a SE CPV-500 kV (terminal retificador) visto que na SE ARA2-500 kV (terminal inversor) houve falha de dados, quanto a AG3 os dados correspondem a SE Estreito 500 kV (terminal inversor).

Tabela 10 – Síntese dos resultados das etapas para o caso 1.

Evento	Instante de Detecção	Etapa					
		Detecção Preliminar		1ª Etapa de Identificação de Falsos Positivos		2ª Etapa de Identificação de Falsos Positivos	
		AG3	AG2	AG3	AG2	AG3	AG2
1	19:20:14	X	X	-	X	N/A	
2	19:21:20	X	X	-	X		
3	19:24:11	-	X	-	-		
4	19:24:36	X	X	-	X		
5	19:30:17	-	X	-	X		
6	19:33:51	-	X	-	-		

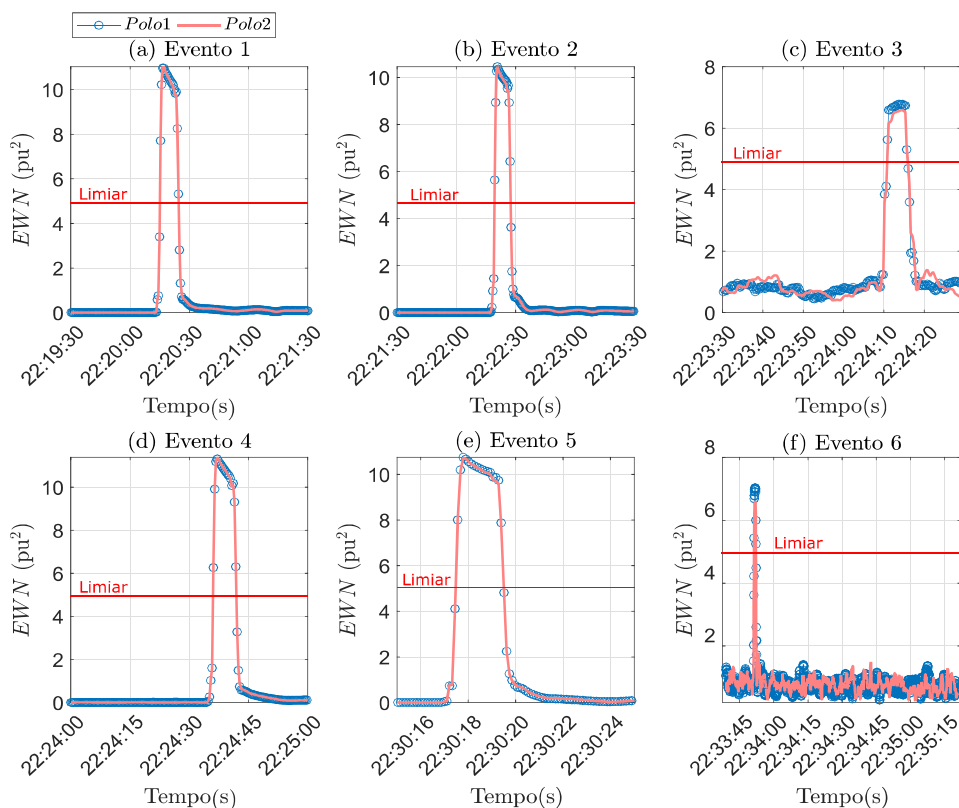
Conforme pode ser visto na Tabela 10, observa-se que foram detectados um total de 6 eventos na etapa de detecção preliminar. Os eventos 1, 2, 4 e 5 em na SE CPV 500 kV de AG2 detectados na etapa de detecção preliminar e confirmados como FC na 1ª etapa de identificação de falsos positivos correspondem aos mesmos vistos na Figura 42. Na SE Estreito 500 kV de AG3, os eventos 1, 2 e 4 foram detectados na etapa preliminar e descartados na etapa seguinte, sendo que tal resultados está em conformidade com verificado nos sinais de potência da Figura 43.

Os eventos 3 e 6 detectados em AG2 na etapa de detecção preliminar correspondem a falsos positivos, logo que não foram observadas variações abruptas nos sinais de potência e não houve violação do valor limiar na 1ª etapa de identificação de falsos positivos.

5.2.1.2.1 Bipolo SE Coletora Porto Velho - SE Araraquara 2

Como pode ser visto na Figura 44, apresenta-se os resultados da etapa de detecção preliminar com dados de AG2, na qual foram detectados 6 eventos. Cada evento é representado pelo perfil da EWN dos polos ao longo do tempo, estes dispostos em azul com marcador redondo e em linha rosa para os polos 1 e 2, respectivamente. Observa-se que em todos os perfis energéticos da detecção preliminar, as curvas do polo 1 e 2 encontram-se sobrepostas e tiveram ultrapassagem do valor de limiar de 5 pu^2 . Entre os valores vistos, evidencia-se que eventos 1, 2, 4 e 5 obtiveram maior valor máximo de 10 pu^2 , quanto aos eventos 3 e 6, os valores máximos estão em torno de 7 pu^2 . A diferença não torna possível concluir se um ou outro evento está propício a ocorrência de FC, apenas que houve possíveis variações no sinal de potência.

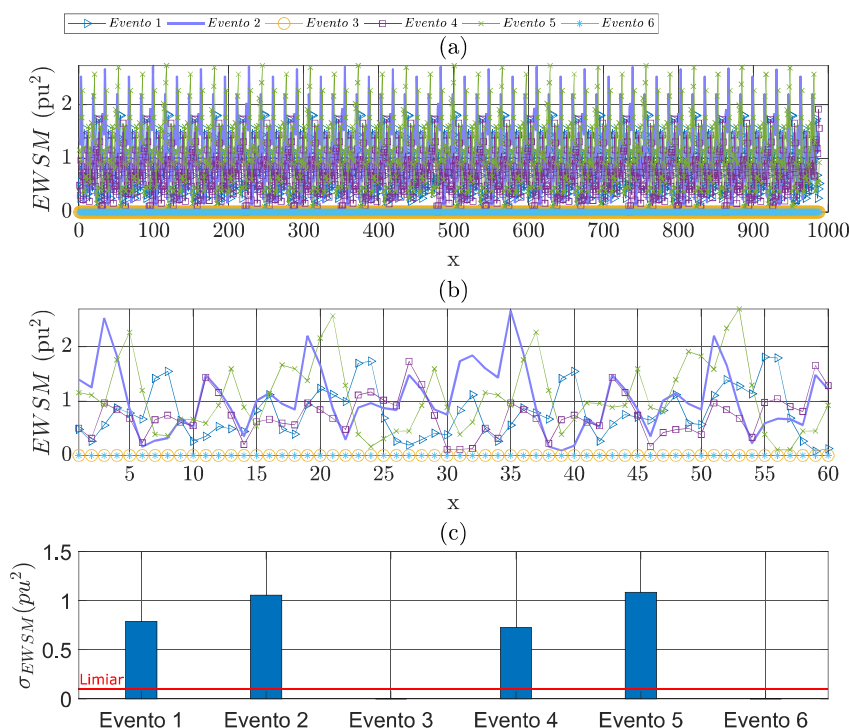
Figura 44 – Caso 1 - Etapa de detecção preliminar - EWN - AG2 - SE Coletora Porto Velho 500 kV - Terminal Retificador



Os resultados da 1ª etapa de identificação de falsos positivos são apresentados na Figura 45, a qual indica (a) o perfil energético da *EWSM* em zoom out, (b) *EWSM*

em zoom in e (c) σ_{EWSM} dos eventos na SE CPV 500 kV, respectivamente. Os resultados presentes na Figura 45 correspondem aos valores para o polo 1, dados que os resultados para o polo 2 são análogos. Na subfigura 45(a) e (b), os perfis energéticos dos eventos são destacados das seguintes formas: o evento 1 em linha azul com marcador triângulo, o evento 2 em linha azul escuro, o evento 3 em linha amarela com marcador circular, o evento 4 em linha roxa com marcador quadrado, o evento 5 em linha verde com marcador “x” e o evento 6 em linha azul com marcador “*”. Na subfigura 45(b), os valores de σ_{EWSM} são exibidos em barras e o limiar de $5pu^2$ em linha vermelha.

Figura 45 – Caso 1 - 1ª etapa de identificação de falsos positivos - AG2 - SE Coletora Porto Velho 500 kV - Terminal Retificador



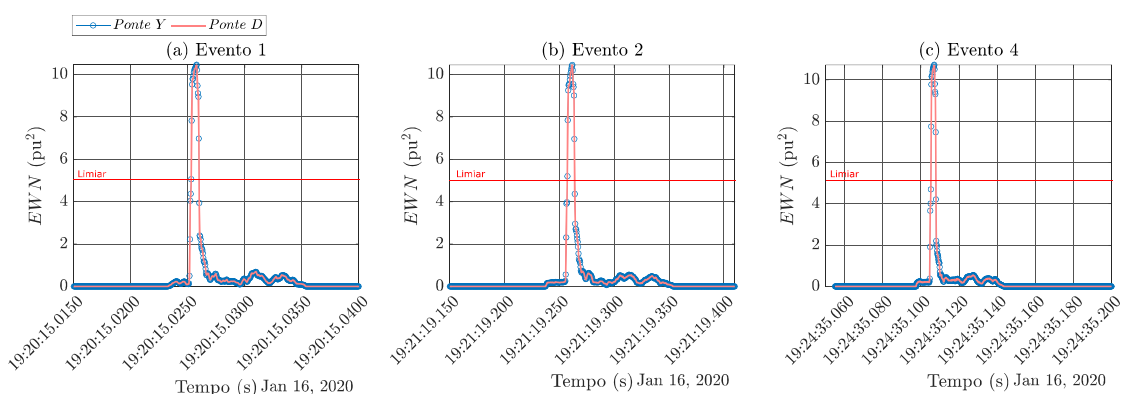
Avalia-se nos resultados das subfiguras 45(a) e (b) que os eventos que apresentaram os maiores valores de perfis energéticos são os eventos 1, 2, 4 e 5, quanto aos eventos 3 e 6 são caracterizados por valores sobrepostos próximos a zero. Nos resultados da subfigura 45(c), os eventos 1, 2, 4 e 5 violaram o limiar estabelecido, quanto aos eventos 3 e 6 foram obtidos valores próximos a zero.

Os resultados da 1ª etapa de detecção de falsos positivos confirmam a existência de elevados valores de EWSM e um possível caso de FC. Ressalta-se que apenas a etapa de detecção preliminar e 1ª etapa de detecção preliminar não confirmam a ocorrência da FC, de acordo com a abordagem. No entanto, pelo efeitos no comportamento do sinal de potência do elo HVDC de AG2, tem-se indícios de um caso de FC.

5.2.1.2.2 Bipolo SE Xingu - SE Estreito

Os resultados da detecção preliminar do polo 1 na SE Estreito 500 kV podem ser vistos na Figura 46, onde apresenta-se o perfil da EWN dos eventos nas subfiguras (a), (b) e (c), nas pontes dos transformadores conversores YD e YY, destacadas em azul com marcador circular e em rosa, respectivamente. Em ambos os eventos, os perfis de EWN estão sobrepostos e o limiar de 5 pu^2 foi ultrapassado.

Figura 46 – Caso 1 - Etapa de detecção preliminar - EWN - AG3 - SE Estreito 500 kV - Terminal Inversor.

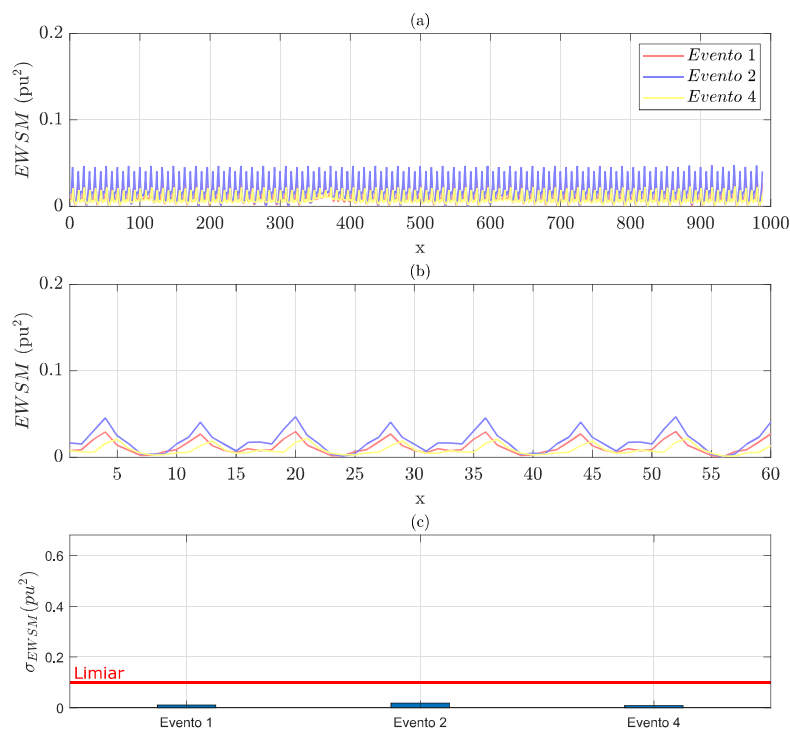


Os resultados da 1ª etapa de identificação de falsos positivos na SE Estreito 500 kV podem ser vistos na Figura 47, onde são apresentados os perfis energéticos da EWSM dos eventos detectados na subfigura (a) e o valor de σ_{EWSM} na subfigura (b). Os eventos 1, 2 e 4, na subfigura (a), são indicados pelas linhas em vermelho, azul e amarelo, respectivamente. Na subfigura (b), são exibidos os perfis energéticos da EWSM dos eventos em *zoom in* para melhor visualização das curvas. Na subfigura (c), os eventos 1, 2 e 4 são indicados por barras, com valor limiar de $0,1 \text{ pu}^2$ em linha vermelha.

Na Figura 47, os eventos 1, 2 e 4 correspondem aos resultados para os sinais de potência das pontes dos transformadores conversores YY e YD. Utilizou-se apenas uma curva para indicar ambas as pontes dos transformadores conversores devido ao sinal de potência ser aproximadamente idêntico, logo acarretando em iguais resultados da EWSM em ambas as pontes dos transformadores conversores. Nos níveis energéticos da EWSM da Figura 47(a), constata-se que todos os perfis energéticos da EWSM mantiveram valores abaixo de $0,1 \text{ pu}^2$, de modo a indicar baixo padrão de queda de potência nos sinais analisados. Na Figura 47(b), ambos os eventos não violaram o valor limiar de σ_{EWSM} , indicando a não ocorrência de FC.

Dessa forma, constata-se uma baixa variação do sinal de potência através do indicador σ_{EWSM} , onde tal resultado está adequado conforme foi visto nos sinais de potência (Figura 43). Para a confirmação da identificação de FC pela abordagem, é necessária a realização de todas as etapas. No entanto, pelo resultados apresentados

Figura 47 – Caso 1 - 1ª etapa de identificação de falsos positivos - EWN - AG3 - SE Estreito 500 kV - Terminal Inversor.



nas Figuras 46 e 47, tem-se indícios concretos que nos elos HVDC de AG3 não houve FC.

5.2.2 Caso 2 - 26/01/2022

Na subseção 5.2.2.1 é apresentada a descrição do caso 2 para os agentes AG2 e AG3 através dos registros disponibilizados, e na subseção 5.2.2.2 são apresentados os resultados obtidos.

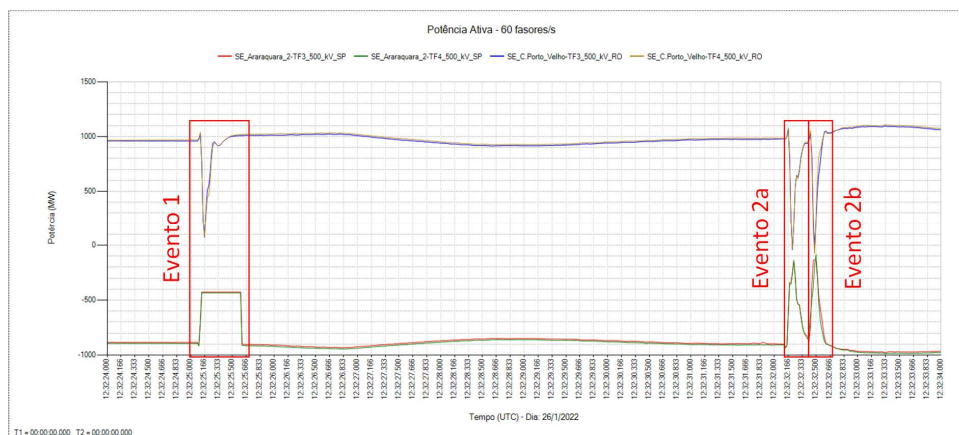
5.2.2.1 Descrição do caso

Na Figura 48 são apresentados os registros de potência ativa calculados a partir dos sincrofasores de tensão e corrente, correspondentes aos polos 1 e 2 do bipolo do sistema HVDC do Rio Madeira de AG2, reportados à taxa de 60 fasores/s. Observam-se três eventos, sendo o evento 1 às 12h32m25s, evento 2a às 12h32m32.166s e o evento 2b às 12h32m32.416s (UTC). A nomenclatura utilizada para identificar os eventos 2a e 2b foi assim escolhida por esses eventos ocorrerem em um intervalo de tempo muito curto.

Como pode ser visto na Figura 48, houve falha de transferência dos dados referentes à SE ARA2-500 kV (terminal inversor) ao longo do período, conforme destacado pelo círculo em vermelho tracejado no evento 1. Não obstante, testou-se o comportamento da abordagem frente à falha de transferência de dados utilizando-se os dados

da SE ARA2-500 kV. Para a confirmação dos casos da Figura 48 como FCs, foram utilizados os registros de oscilografia dos eventos.

Figura 48 – Potência ativa calculada a partir dos fasores de tensão e corrente - Polo 1 e 2 - AG2 - Eventos em 26/01/2022.



Na Figura 49 são apresentadas as potências ativas trifásicas calculadas com base nas oscilografias para os eventos 1 e 2. Observa-se que, durante todos os eventos, a potência transferida nos polos chegou a zero e se manteve nula por cerca de 2 ms (Evento 1) e 5 ms (Evento 2a e 2b juntos). Essas características indicam a ocorrência de FCs, corroboradas pelo comportamento de afundamento que pode ser observado nos sinais de tensão, bem como na ausência de corrente em umas das fases, em análises realizadas a parte com os demais dados recebidos para o estudo.

Embora os sincrofasores tenham sido obtidos apenas no lado de AT das pontes dos transformadores conversores, os dados de oscilografia recebidos abrangem também os dados de BT, o que permite realizar os cálculos correspondentes a 2ª etapa de identificação de falsos positivos, e assim testar todas as etapas da abordagem.

As oscilografias de potência ativa referentes aos eventos 1 e 2 na SE Estreito 500 kV (terminal inversor) podem ser vistas na Figura 50, tanto nas subfiguras (a) e (c) para os eventos no polo 1, quanto nas subfiguras (b) e (d) para os eventos no polo 2, sendo retratada as pontes dos transformadores conversores YY em linha azul com marcador quadrado e YD em linha laranja. As potências ativas calculadas a partir dos fasores de tensão e corrente das pontes dos transformadores conversores YY e YD foram representadas em linha rosa e marcador cinza circular, respectivamente.

Na Figura 50 são apresentadas as potências ativas calculadas a partir das oscilografias e fasores das pontes dos transformadores conversores YY e YD dos polos 1 e 2 da SE Estreito 500 kV de AG3. Analisando-se os sinais de potência ativa relativas às oscilografias na subfigura (a), observa-se que, devido aos efeitos do evento 1 no polo 1, houve interrupção da transmissão de potência às 12:32:25.020. Porém, observa-se que apenas na ponte do transformador conversor YD (em laranja) houve ultrapassagem do eixo horizontal. As potências ativas referentes às pontes dos trans-

Figura 49 – Potência ativa calculada a partir das oscilografias de tensão e corrente - Polo 1 e 2 - SE Estreito 500 kV - AG2 - Eventos em 26/01/2022.

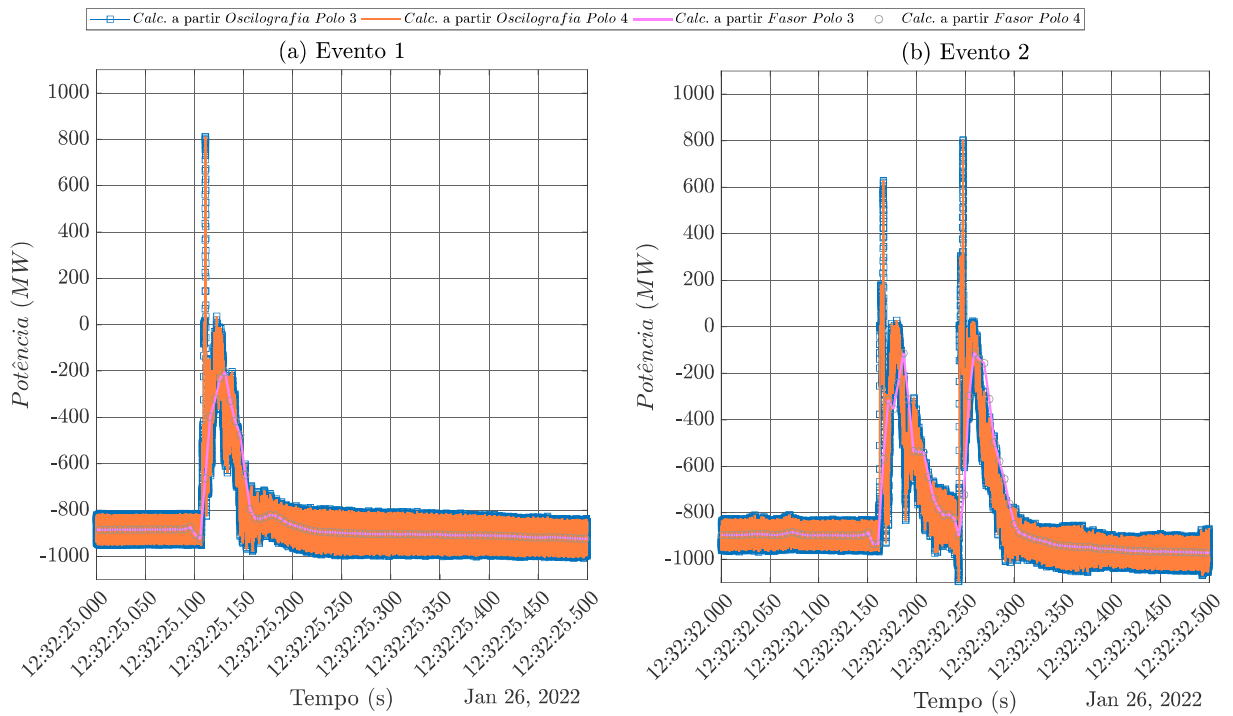
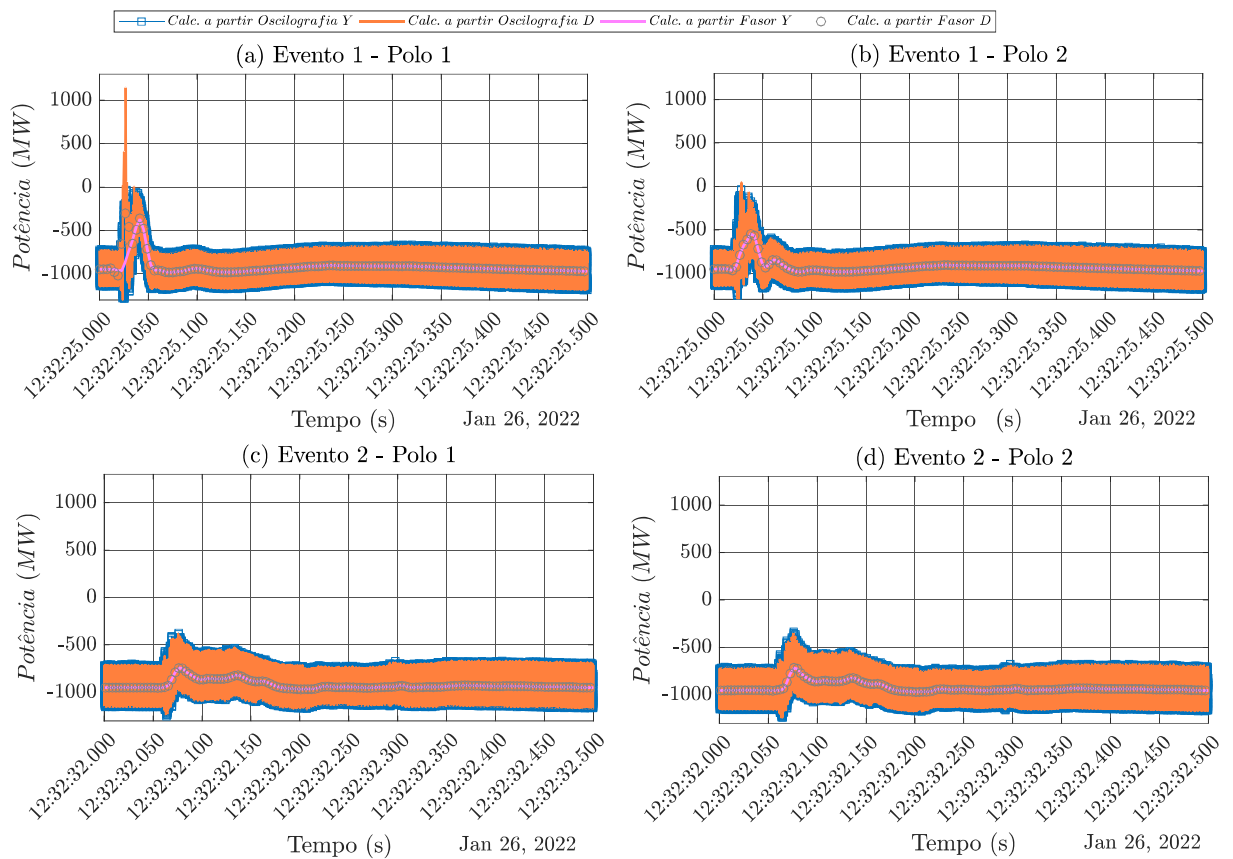


Figura 50 – Potência ativa calculada a partir das oscilografias de tensão e corrente - Polo 1 e 2 - SE Estreito 500 kV - AG3 - Eventos em 26/01/2022.



formadores conversores YD (marcador cinza) e YY (em linha rosa) calculadas a partir dos fasores não se sobrepõem no momento do evento: a potência relativa à ponte do transformador conversor YD apresentou maior padrão de afundamento em relação a potência ativa relativa à ponte do transformador conversor YY. Quanto ao evento 1 no polo 1, constatou-se indícios da ocorrência de FC apenas na ponte do transformador conversor YD, tendo como base os valores de potência ativa relativos à oscilografia e as correntes de BT das pontes dos transformadores conversores YY e YD.

Observando-se a subfigura (b), notou-se elevado afundamento da potência ativa às 12:32:25.020 no polo 2 devido ao evento 1. Constatou-se que nos sinais de potência ativa relativos às oscilografias das pontes dos transformadores conversores YD e YY (em laranja e azul) não ultrapassaram o eixo horizontal, o que indica que possivelmente não houve FC. Quanto às potências ativas relativas aos fasores nas pontes dos transformadores conversores, observou-se comportamentos sobrepostos ao longo do evento. Relata-se que este caso pode ser interpretado como limiar, devido aos sinais de potência ativa relativos às oscilografias tangenciarem o eixo horizontal para ambas as pontes dos transformadores conversores.

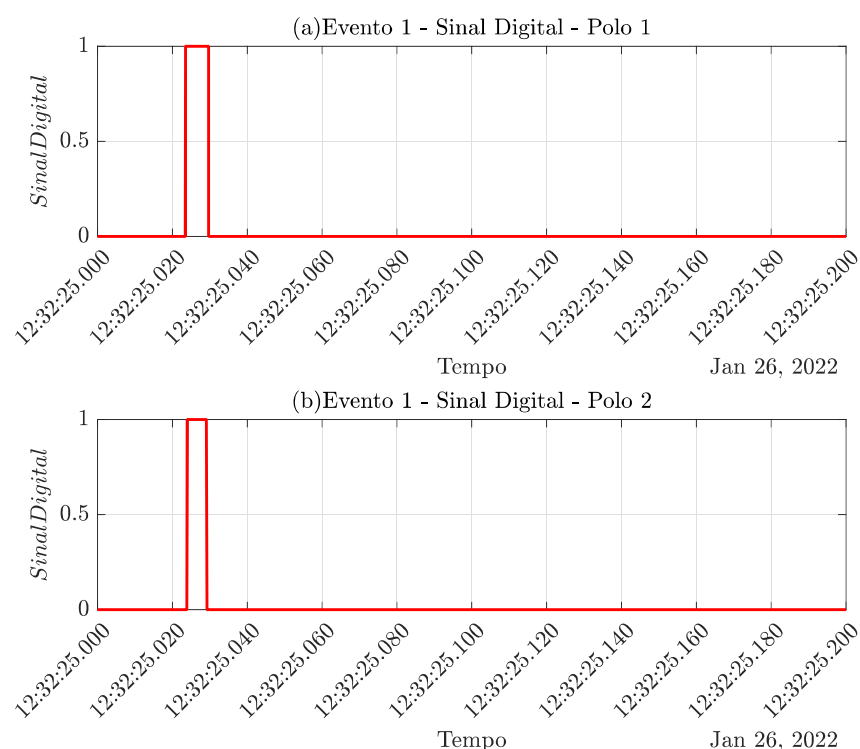
Nas subfiguras (c) e (d), não se verificou considerável afundamento nos sinais de potência ativas do evento 2 nas pontes dos transformadores conversores dos polos 1 e 2, em oposição ao verificado para o evento 1. Assim, não se classificou o evento 2 como um caso de FC, diagnóstico que pode ser confirmado com base nas oscilografias de corrente do lado de BT das pontes dos transformadores conversores YY e YD.

Dessa forma, o caso 2 na SE Estreito 500 kV nos elos HVDC de AG3 possivelmente em evento de FC em apenas uma das pontes dos transformadores conversores. Como há dados referentes as correntes do lado de BT dos transformadores conversores dos elos HVDC de AG3 quanto AG2 desse caso, é possível avaliar a abordagem em completude para a confirmação da ocorrência das FCs nas pontes dos transformadores conversores, isto com a aplicação da 2ª etapa de detecção de falsos positivos.

Por conta da complexidade dos eventos apresentados, principalmente do evento 1 que consiste possivelmente num caso de FC em apenas umas das pontes conversoras de 6 pulsos, buscou-se outros sinais para a confirmação de diagnóstico, a fim de avaliar a abordagem desenvolvida. Assim, verificou-se a existência dos sinais digitais emitidos em ocorrência de FC pelos sistema de proteção HVDC local do polo nos dados oscilográficos correspondentes aos eventos 1 e 2. Os sinais relativos ao evento 1 são apresentados na Figura 51, sendo o sinal referente ao polo 1 mostrado na subfigura (a) e o sinal referente ao polo 2 mostrado na subfigura (b).

Os comportamentos de tais sinais indicam a ocorrência de FC em ambos os polos, não possibilitando distinção em nível de ponte conversoras. Uma vez que não houve FC no polo 2 para o evento 1, conforme indicado anteriormente com base nas correntes das pontes dos transformadores conversores, há necessidade de um maior

Figura 51 – Sinal Digital - Polo 1 e Polo 2 - AG3 - Evento 1 em 26/01/2022.



conhecimento da estratégia utilizada pela função de detecção de FC implementada no sistema de controle e proteção do sistema HVDC para entender o resultado apresentado na subfigura (b). De qualquer forma, o evento 1 caracteriza-se por uma condição limítrofe, entre a ocorrência ou não de FC para as pontes conversoras de ambos os polos. Quanto ao evento 2, não houve emissão de sinal digital indicando a ocorrência de FC, fato pelo qual não são apresentados sinais digitais referentes a este evento.

5.2.2.2 Resultados do caso 2

Os resultados gerais do caso 2 podem ser visto na Tabela 11, os eventos detectados e o instante de detecção constam na coluna “Evento” e “Início de Detecção”, respectivamente. Os resultados das demais etapas estão descritos nas colunas seguintes: quando limiares estabelecidos são ultrapassados em alguma das etapas, assinala-se “X” e caso contrário “-”.

Conforme a Tabela 11, detectou-se os seguintes 4 eventos: evento 1 às 12:32:25 em AG2 e AG3, evento 2 às 12:32:32 em AG2 e AG3, evento 3 às 12:32:38 em AG2 e evento 4 às 12:35:51 em AG2. Os eventos 1 e 2 superaram o valor limiar em todas as etapas, assim tem-se a confirmação destes como FC. Os eventos 3 e 4 não tiveram o mesmo resultado nas 1ª e 2ª etapas de detecção de falsos positivos, logo sendo possíveis casos de falsos positivos, detectados por pequenas variações, mas eventos que não estão ligados aos efeitos da FC.

Tabela 11 – Síntese dos resultados das etapas para o caso 2.

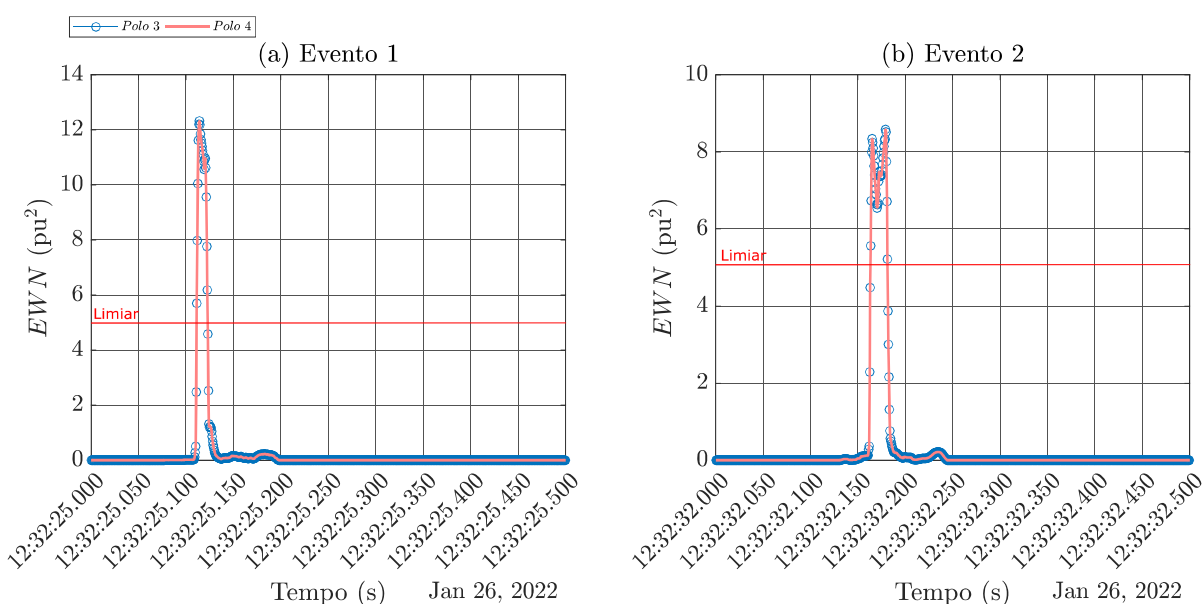
Evento	Instante de Detecção	Etapa					
		Detecção Preliminar		1ª Etapa de Identificação de Falsos Positivos		2ª Etapa de Identificação de Falsos Positivos	
		AG3	AG2	AG3	AG2	AG3	AG2
1	12:32:25	X	X	X	X	X	X
2	12:32:32	X	X	X	X	-	X
3	12:32:38	-	X	-	-	-	-
4	12:35:51	-	X	-	-	-	-

Observa-se que os resultados da Tabela 11 estão coerentes com a descrição do caso 2 visto na subseção anterior, pois os sinais de potência (Figuras 49 e 50) que consiste no evento 1, evento 2a e evento 2b encontram-se nos mesmos instantes dos eventos da Tabela 11. No entanto, a abordagem não foi capaz de dissociar os eventos sucessivos 2a e 2b, devido ao tamanho utilizado de janela englobar ambos os eventos. Em síntese aos resultados obtidos, nas subseções seguintes são apresentados apenas os resultados dos eventos 1 e 2 correspondentes aos possíveis casos de FC.

5.2.2.2.1 Bipolo SE Coletora Porto Velho - SE Araraquara 2

Como pode ser visto na Figura 52, tem-se os resultados da curva energética da EWN na SE Araraquara 2 500 kV dos polos 1 (em linha azul com marcador azul) e 2 (em linha vermelha) de AG2 referente aos eventos 1 (subfigura (a)) e 2 (subfigura (b)) detectados pela etapa de detecção preliminar. Observa-se que em ambas as subfiguras, o limiar de 5 pu^2 foi ultrapassado de modo a ser detectado em cada uma delas.

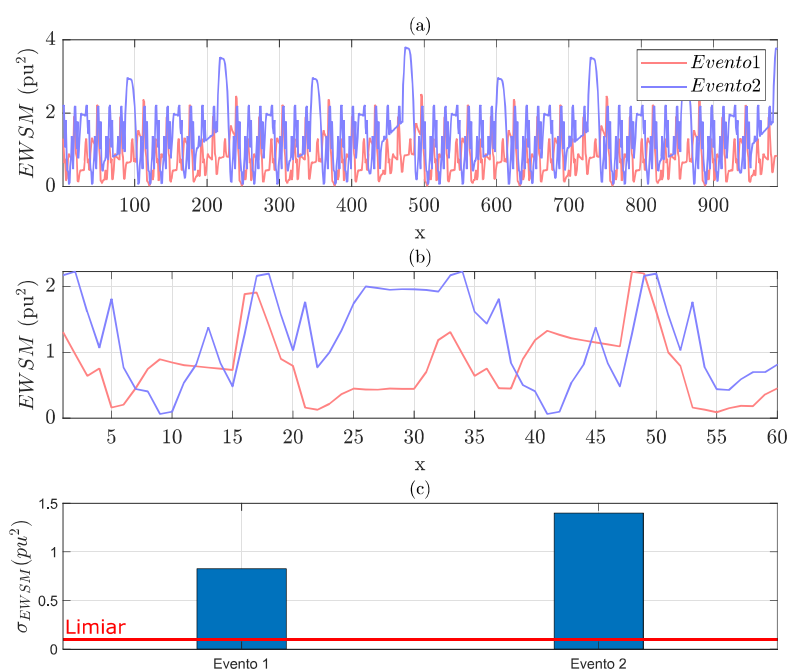
Figura 52 – Caso 2 - Etapa de detecção preliminar - EWN - SE Araraquara 2 500 kV - AG2 - Terminal Inversor



Observa-se na subfigura (b) que apenas um evento foi detectado, embora conforme visto conforme na Figura 48 o evento 2 é composto dos eventos sucessivos 2a e 2b. Assim, constata-se no perfil da curva da EWN bimodal: o formato é caracterizado por uma máximo local 8.341 pu^2 às 12:32:32.164s, posteriormente pelo mínimo local 6.638 pu^2 às 12:32:32.169s e por último, o máximo global 8.583 pu^2 às 12:32:32.179. Aprimoramentos na algoritimia podem ser realizados para buscar a dissociação dos eventos 2a e 2b.

Nos resultados da 1ª etapa de detecção de falsos positivos dos eventos detectados podem ser vistos na Figura 53. Nas subfiguras (a) e (b) é apresentado o perfil energético da EWSM dos eventos em *zoom in* e *zoom out*, respectivamente, e na subfigura (c) é apresentado σ_{EWSM} dos eventos 1 e 2. Nos resultados da EWSM desses eventos na Figura 53 são representados ambos os polos, utilizou-se apenas uma, pois os resultados são iguais.

Figura 53 – Caso 2 - 1ª etapa de identificação de falsos positivos - EWN - SE Araraquara 2 500 kV - AG2 - Terminal Inversor.



Os resultados da 2ª etapa de detecção de falsos dos elos HVDC do AG2 na SE Araraquara 2 500 kV ser vistos na Tabela 12. Na primeira coluna “Evento” são indicados os eventos detectados, na segunda coluna “Indicador” são especificados os indicadores utilizados por “ $\max(\text{Indice}_{mag} - P1PY)$ ” (ponte do transformador conversor YY, polo 1), “ $\max(\text{Indice}_{mag} - P1PD)$ ” (ponte do transformador conversor YD, polo 1), “ $\max(\text{Indice}_{mag} - P2PY)$ ” (ponte do transformador conversor YY, polo 2) e “ $\max(\text{Indice}_{mag} - P2PD)$ ” (ponte do transformador conversor, polo 1), na coluna restante é indicado o valor do indicador. Se o valor do indicador violar o limiar de 0.01 pu^2 , é identificado desbalanço entre os fasores das correntes de fase e a célula na coluna

“valor”, é assinalada em vermelho; caso contrário, não há desbalanço e a célula é assinalada em azul.

Tabela 12 – Resultados caso 2 - 2ª etapa de identificação de falsos positivos - AG2 - Terminal Inversor.

Evento	Indicador	Valor
1	$\max(\text{Indice}_{mag} - P1PY)$	0.218
	$\max(\text{Indice}_{mag} - P1PD)$	0.073
	$\max(\text{Indice}_{mag} - P2PY)$	0.215
	$\max(\text{Indice}_{mag} - P2PD)$	0.075
2a	$\max(\text{Indice}_{mag} - P1PY)$	0.227
	$\max(\text{Indice}_{mag} - P1PD)$	0.553
	$\max(\text{Indice}_{mag} - P2PY)$	0.228
	$\max(\text{Indice}_{mag} - P2PD)$	0.551
2b	$\max(\text{Indice}_{mag}) - P1PY$	0.423
	$\max(\text{Indice}_{mag}) - P1PD$	0.376
	$\max(\text{Indice}_{mag}) - P2PY$	0.067
	$\max(\text{Indice}_{mag}) - P2PD$	0.064

Nos resultados da 2ª etapa de detecção de falsos positivos dos eventos 1 e 2 ocorreu violação do valor limiar de $0.01pu^2$, onde, por construção, indiretamente foram dissociados os eventos 2a e 2b. Ressalta-se que foi possível obter valores de Indice_{mag} relativos aos eventos sucessivos por causa do tamanho da janela utilizada na 2ª etapa de detecção de falsos positivos.

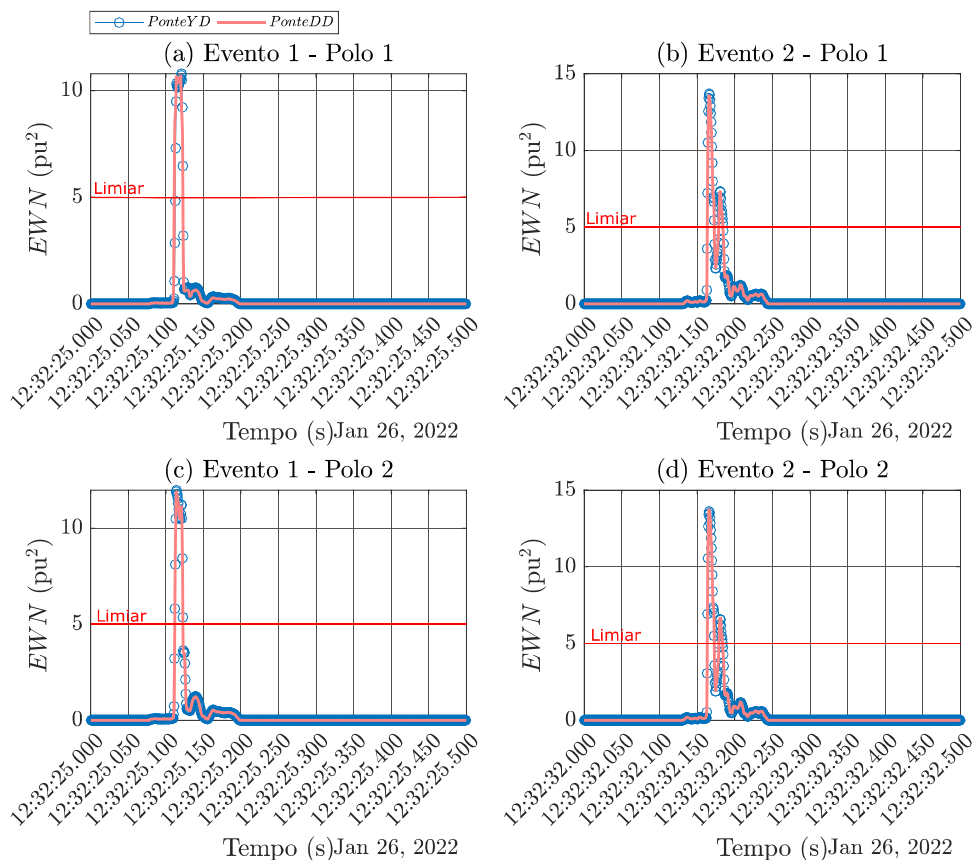
Nas etapas da abordagem foram violados os valores limiares, nos resultados da abordagem são indicados 3 eventos. Desse modo, constata-se que os resultados da abordagem correspondem a ocorrência de FC conforme apresentado na descrição do registro de campo anteriormente.

5.2.2.2.2 Bipolo SE Xingu - SE Estreito

Como pode ser visto na Figura 54, tem-se o perfil energético da EWN na SE Estreito 500 kV das pontes dos transformadores conversores dos polos em AG3 da detecção preliminar, representada a ponte do transformador conversor YD em linha azul com marcador circular e a ponte do transformador conversor YY em linha rosa. Nessa etapa, detectou-se 2 eventos, dado que nas ambas as pontes dos transformadores conversores foi violado o valor limiar de $5pu^2$ com comportamentos sobrepostos nos seus respectivos eventos.

O perfil energético da EWSM pode ser visto conforme a Figura 55, os eventos detectados são retratados em linhas da seguinte forma: evento 1 na ponte do transformador conversor YY do polo 1 (P1Y) em linha azul, evento 1 na ponte do transformador conversor YD do polo 1 (P1D) em linha vermelha com marcador circular, evento 1 na ponte do transformador conversor YY do polo 2 (P2Y) em linha amarela, evento 1 na ponte do transformador conversor YD do polo 2 (P2D) em linha roxa com marcador

Figura 54 – Caso 2 - Etapa de detecção preliminar - EWN - SE Estreito 500 kV - AG3 - Terminal Inversor.

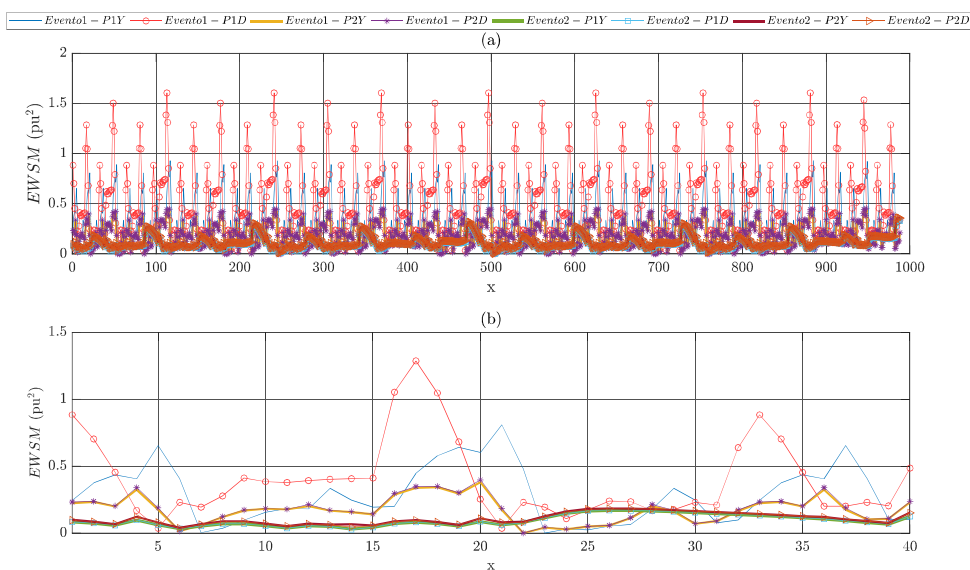


asterisco, evento 2 em P1Y me linha verde, evento 2 em P1D em linha azul com marcador quadrado, evento 2 em P2Y em linha vermelho escuro e evento 2 em P2D em linha azul com marcador “x”.

Entre os perfis energéticos da EWSM, apenas P1Y e P1D referente ao evento 1 não se encontram-se sobrepostas e tem maior valor energético. As demais pontes dos transformadores conversores referente aos eventos 1 e 2 estão sobrepostas e com variação abaixo de $0.5pu^2$. No entanto, verifica-se que P2Y e P2D do evento 1 tem maior valor energético que os perfis energéticos do evento 2.

Os resultados da 1ª e 2ª etapa de detecção de falsos positivos na SE Estreito 500 kV das pontes dos transformadores conversores dos polos em AG3 podem ser visto na Tabela 13. Nas colunas superiores “1ª etapa de detecção de falsos positivos” e “2ª etapa de detecção de falsos positivos” é indicado os resultados das etapas de falsos positivos da metodologia. Na primeira coluna inferior “Evento” é indicado o evento detectado, nas colunas inferiores “Indicador” e “Valor” é indicado a métrica de avaliação e o valor da etapa. As métricas da avaliação σ e $max(Indice_{mag})$ utilizados na 1ª e 2ª etapa de identificação de falsos positivos, respectivamente, especificado para polo 1 nas pontes dos transformadores conversores YY (P1PY) e YD (P1PD) e polo 2 nas pontes dos transformadores conversores YY (P2PY) e YD (P2PD). Se o valor do limiar

Figura 55 – Caso 2 - 1ª etapa de identificação de falsos positivos - EWN - SE Estreito 500 kV - AG3 - Terminal Inversor.



estabelecido das etapas for ultrapassado na coluna “Valor”, é indicado um possível caso de “FC” na ponte conversora, e caso contrário assinalado em azul. Nas colunas superiores “Etapa Final de Análise Lógica de Falsos Positivos” e “Diagnóstico Real” é indicado os diagnósticos da metodologia e real. Na coluna superior “Etapa Final de Análise Lógica de Falsos Positivos”, se o valor do indicador em algumas ultrapassar o valor limiar em ambas as pontes conversores, o diagnóstico é FC no conversor de 12 pulsos (“FC-2P”) e a célula é assinalada em vermelho, se o valor limiar ultrapassado em apenas uma das pontes conversoras, o diagnóstico é FC no conversor de 6 pulsos (“FC-1P”) e a célula é assinalada em vermelho, se o valor limiar não for ultrapassado em nenhuma das pontes conversoras, o diagnóstico é “-” que não houve FC e a célula é assinalada em azul.

Tabela 13 – Resultados caso 2 - 1ª e 2ª etapa de identificação de falsos positivos - SE Estreito 500 kV - AG3.

Evento	1ª Etapa de Identificação de Falsos Positivos		2ª Etapa de Identificação de Falsos Positivos		Etapa Final de Análise Lógica de Falsos Positivos	Diagnóstico Real
	Indicador	Valor	Indicador	Valor		
1	σ - P1PY	0.447	$\max(\text{Indice}_{mag} - P1PY)$	0.277	FC-1P	FC-1P
	σ - P1PD	0.302	$\max(\text{Indice}_{mag} - P1PD)$	0.007		
	σ - P2PY	0.195	$\max(\text{Indice}_{mag} - P2PY)$	0.007	FC-1P	-
	σ - P2PD	0.189	$\max(\text{Indice}_{mag} - P2PD)$	0.011		
2	σ - P1PY	0.103	$\max(\text{Indice}_{mag} - P1PY)$	0.004	-	-
	σ - P1PD	0.104	$\max(\text{Indice}_{mag} - P1PD)$	0.004		
	σ - P2PY	0.118	$\max(\text{Indice}_{mag} - P2PY)$	0.004	-	-
	σ - P2PD	0.118	$\max(\text{Indice}_{mag} - P2PD)$	0.004		

Quantos aos resultados da 1ª etapa de identificação de falsos positivos, verifica-se que todos os resultados obtidos ultrapassaram o valor limiar estabelecido. Desse modo, esses eventos em AG3 são caracterizados como possíveis casos de FC na

etapa. O evento 1 e 2 foram classificados de forma incorreta, em razão de como visto nos sinais de potência (Figura 50(a)), no evento 1 ocorreu FC apenas na ponte do transformador conversor YY do polo 1. O mesmo ocorre para evento 1 no polo 2 e o evento 2 porque foram identificados como possíveis FC visto que na Figura 50(b),(c) e (d) não tiveram ultrapassagem da potência no eixo zero, sendo estes possíveis falsos positivos.

O resultado da 1ª etapa de detecção de falsos positivos está coerente ao observado nos sinais de potência ativa como pode ser visto na Figura 50, pois detecta alto padrão de descida na SE Estreito 500 kV do elo HVDC de AG3. No evento 2 apesar de não ter ocorrido uma possível FC, apresenta variação no sinal de potência em torno de 250 GW em 20 ms que é considerável decaimento suficiente para ser captado pela etapa. Observou-se que, embora os resultados de σ_{EWSM} para o evento 2 tenham se aproximado do limiar, esta etapa de identificação de falsos positivos não foi suficiente para descartar a detecção preliminar realizada (como não FC).

Acerca dos resultados da 2ª etapa de identificação de falsos positivos, referente ao evento 1, no polo 1 o diagnóstico alcançado via abordagem (representado pela etapa “Etapa Final de Análise Lógica de Falsos Positivo”) foi o mesmo do obtido no “Diagnóstico Real”, onde ambos apontaram o resultado “FC-1P”. No entanto, no polo 2 o diagnóstico alcançado via abordagem foi obtido “FC-1P” correspondendo a um falso positivo, pois divergiu do “Diagnóstico Real” que foi obtido “-”.

Assim sendo, foram detectados 2 eventos de FC em apenas uma das pontes conversoras, apesar de um desses não corresponder ao visto na descrição do registro. Considera-se os resultados da abordagem como positivos por conta da complexidade de detecção quando da ocorrência de FC em apenas uma das pontes do transformador conversor do polo.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo, conclusões e propostas de sugestões de trabalhos futuros são apresentados.

6.1 CONCLUSÕES

Neste trabalho, buscou-se o desenvolvimento de uma abordagem para a identificação de FCs em sistemas HVDC multi-infeed com base em dados de PMUs, visando a criação de instrumentos que permitam o monitoramento contínuo, a detecção e a avaliação da severidade das FCs, simples e simultâneas. A principal conclusão do trabalho é que existem indícios concretos da viabilidade de se detectar, com alguma margem de erro, a ocorrência de fenômenos rápidos como as FCs por meio de dados de medição de sincrofasores.

Foram analisados casos de simulação em PSCAD/EMTDC e dados de medição de campo, os quais indicaram a eficácia da abordagem desenvolvida. Quantitativamente, nas 13 simulações realizadas, foi possível analisar um total de 65 possíveis casos de ocorrência de FC em terminais dos elos HVDC do SIN. Desses, 32 casos de terminais com ocorrência de FC em ambas as pontes dos transformadores conversores YY e YD, 6 casos de terminais com ocorrência de FC em apenas uma das pontes dos transformadores conversores e 27 casos terminais sem FC. As quantificações dos diagnósticos da abordagem foram as seguintes: nos terminais com ocorrência de FC em ambas as pontes dos transformadores conversores YY e YD, todos os casos foram corretamente detectados; nos terminais com FC em apenas uma das pontes, 2 casos não foram detectados corretamente (“SE ARA 500 kV - AG4” e “SE ARA2 440 kV - AG4”); e todos os casos sem FC foram corretamente detectados. Em percentual, a abordagem teve detecção correta em 95,38% dos casos de simulação analisados. Qualitativamente, constatou-se, para os casos de simulação, uma adequada especificação do limiar para a detecção preliminar, na qual foram obtidos os instantes iniciais dos eventos para as etapas seguintes. Na 1ª etapa de detecção de falsos positivos, foi possível discernir a ocorrência de FC em ambas as pontes dos transformadores conversores YY e YD em que não existiram FC em ambas as pontes. Na 2ª etapa de detecção de falsos positivos, mostrou-se possível a detecção dos casos de FC em apenas uma das pontes, com alguma margem de erro.

Nas medições de campo referente a ocorrência de FC em 16/01/2020, foram detectados corretamente 4 eventos na SE CPV 500 kV e 3 eventos na SE Estreito 500 kV, tendo em conta as etapas de detecção preliminar e 1ª etapa de detecção de falsos positivos. Para esse caso, os limiares definidos a partir de simulação foram apropriados também às medições de campo. Nas medições de campo da ocorrência de FC em 26/01/2022, foi possível realizar todas as etapas da abordagem. Nos resultados,

obteve-se apenas a detecção errada do polo 1 do elo HVDC de AG3 na SE Estreito 500 kV, onde o diagnóstico da abordagem foi indicado como FC na ponte do transformador conversor YD, enquanto o diagnóstico real corresponde a ausência de FC em ambas as pontes. Apesar da detecção incorreta, entende-se que as ocorrências das FCs em apenas uma das pontes dos transformadores conversores correspondem a casos menos comuns, onde a diminuição do limiar da 2ª etapa de detecção FC de falsos positivos pode ser uma potencial ação conservadora para viabilizar a detecção.

6.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

As seguintes propostas de sugestões de trabalhos futuros podem ser enumeradas:

1. Avaliação de indicadores de severidade sistêmicos desenvolvidos neste estudo de modo a contribuir na avaliação e análise dos efeitos da FC na estabilidade dinâmica do SEE;
2. Desenvolver técnicas e métodos da utilização da magnitude e ângulos da corrente na detecção da FC, para possivelmente melhorar a precisão na detecção de FC em apenas uma das pontes do elo HVDC;
3. Aprofundar abordagens e mecanismos de detecção de FCs simultâneas e sucessivas considerando implementação em ambiente de detecção *on-line*;

REFERÊNCIAS

- AHMED, Ashfaq. **Power Electronics for Technology**. Estados Unidos: Pearson Prentice Hall, 1999. Disponível em: <https://www.amazon.com/Power-Electronics-Technology-Ashfaq-Ahmed/dp/0132310694>.
- ALSTOM. **HVDC for Beginners and Beyond**. Reino Unido, 2018.
- AQUINO, A. F. C. **Medição Fasorial - Aplicações em Análise de Perturbações”, Material Didático do Curso de Pós-graduação em Proteção de Sistemas Elétricos**. Brasil: IME-ONS, 2022. Cooperação IME-ONS.
- ARRILLAGA, Jos. **High Voltage Direct Current Transmission**. 2. ed. Reino Unido: The Institution of Engineering e Technology - London, 1998. v. 29. (IET Power and Energy). ISBN 0 85296 941 4,978-0-85296-941-0.
- CALDERON, Alejandro Belinchón. **Detection and location of HVDC commutation faults from PMU data**. 2018. Diss. (Mestrado) – Lund University, Faculty of Engineering.
- DAVIES, Brett. **Systems with Multiple DC Infeed**. Canada: CIGRÉ ELECTRA, 2007.
- DECKER, Ildemar Cassana. **Identificação de eventos relativos a elos HVDC em configuração Multi-Infeed com base em PMU (Projeto Multi-Infeed) – Visão geral dos desenvolvimentos realizados em 2020**. Brasil: FEESC, 2020. Relatório de projeto FEESC-ONS.
- DU, Zixuan *et al.* Influence of Load Models on Commutation Failure in HVDC Transmission Systems. *In*: 2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). Estados Unidos: IEEE, 2018. P. 1–5. DOI: 10.1109/EI2.2018.8582068.
- FERREIRA, José Rafael Batista Lebre. **Transmissão em Corrente Contínua com Conversor Multinível Modular em Ponte Semicompleta**. 2014. Diss. (Mestrado) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia.
- INSTITUTO DE ENGENHARIA DE SISTEMAS E COMPUTADORES, PESQUISA E DESENVOLVIMENTO DO BRASIL (INESC P&D BRASIL). **Projeto Multi-infeed: Identificação de Falhas de Comutação em Configuração Multi-Infeed**. Brasil, 2022.
- JUN, Zhou; CHONG, Liu; JIANJUN, Zhao. Simulation analysis of commutation failure in a multi-infeed HVDC system. *In*: 2016 China International Conference on Electricity Distribution (CICED). Estados Unidos: IEEE, 2016. P. 1–6. DOI: 10.1109/CICED.2016.7575975.

KIM, Do-In *et al.* Wavelet-based event detection method using PMU data. *In*: 2017 IEEE Power Energy Society General Meeting. Estados Unidos: IEEE, 2017. P. 1–1. DOI: 10.1109/PESGM.2017.8274161.

KIMBARK, E.W. **Direct Current Transmission - Volume I**. Estados Unidos: IEEE Press, 1971.

KUNDUR, PRABHA. **Power System Stability and control**. Estados Unidos: McGraw-Hill, 1994.

LI, Gen *et al.* Studies of commutation failures in hybrid LCC/MMC HVDC systems. **Global Energy Interconnection**, v. 3, n. 3, p. 193–204, 2020. ISSN 2096-5117. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloe.2020.07.001>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2096511720300694>.

LI, Tan *et al.* The mechanism and solution of the anomalous commutation failure of multi-infeed HVDC transmission systems. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 114, p. 105400, 2020. ISSN 0142-0615. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105400>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061518328734>.

LIN, Tao *et al.* Novel Detection Method for Consecutive DC Commutation Failure Based on Daubechies Wavelet with 2nd-Order Vanishing Moments. **Energies**, v. 11, n. 2, 2018. ISSN 1996-1073. DOI: 10.3390/en11020261. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/2/261>.

MA, Jing; LIU, Chen; CHENG, Peng. A detection method for HVDC commutation failure based on the variation rate of commutation inductance energy. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 16, n. 10, p. 1914–1929, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1049/gtd2.12403>. eprint: <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1049/gtd2.12403>. Disponível em: <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1049/gtd2.12403>.

MIRSAEIDI, S. *et al.* A Predictive Control Strategy for Mitigation of Commutation Failure in LCC-Based HVDC Systems. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 34, n. 1, p. 160–172, jan. 2019. ISSN 1941-0107. DOI: 10.1109/TPEL.2018.2820152.

MUKHOPADHYAY, Prithwish *et al.* Case study on fault analysis using PMU. *In*: 2014 Eighteenth National Power Systems Conference (NPSC). Estados Unidos: IEEE, 2014. P. 1–6. DOI: 10.1109/NPSC.2014.7103778.

OKETCH, Innocent. **Commutation Failure Prevention for HVDC Improvement in algorithm for commutation failure prevention in LCC HVDC**. Suécia: CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2016.

OLIVEIRA JÚNIOR, José Vicente de. **Reatores para Controle do Fluxo de Potência e suas Consequências para a Qualidade de Energia**. Brasil: Universidade Federal de Minas Gerais, 2012. Monografia.

ONS. **Sobre SIN - Sistema em números**. 2023. Disponível em:
<https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA. **DPL/REL-027/2020 - Relatório de Síntese Gerencial: Perturbações Ocorridas no Sistema Interligado Nacional**. Rio de Janeiro, 2020.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA. **IDENTIFICAÇÃO DO FENÔMENO DA FALHA DE COMUTAÇÃO NA OPERAÇÃO DOS BIPOLOS DO SIN - ANO 2020: AVALIAÇÃO DE CONFIGURAÇÃO MULTI-INFEED**. Rio de Janeiro, 2019.

PADIYAR, K. R. **HVDC Power Transmission Systems**. Estados Unidos: Wiley–Blackwell, 2011.

RAHIMI, Ebrahim *et al.* Commutation Failure Analysis in Multi-Infeed HVDC Systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 26, n. 1, p. 378–384, 2011. DOI: 10.1109/TPWRD.2010.2081692.

RUDERVALL, R.; CHARPENTIER, J.; SHARMA, R. **High Voltage Direct Current (HVDC) Transmission Systems Technology Review Paper**. [S.l.: s.n.], 2000.

SILVA JÚNIOR, Francisco Canindé da. **Proteção de Linhas de Transmissão Aéreas de Sistemas LCC-HVDC Monopolares Baseada em Ondas Viajantes Utilizando um Terminal Francisco**. 2018. Diss. (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

SOOD, Vijay K. 31 - HVDC Transmission. *In*: RASHID, Muhammad H. (Ed.). **Power Electronics Handbook**. Third Edition. Boston: Butterworth-Heinemann, 2011. P. 823–849. ISBN 978-0-12-382036-5. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382036-5.00031-8>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123820365000318>.

SOUSA, Milene Oliveira de. **Análise de Faltas em um Sistema HVDC**. Brasil: Universidade Federal de Campina Grande, 2020. Monografia (Bacharel em Engenharia Elétrica).

SOUZA, Marcos Jorge Araujo. **Estudo da Contribuição de um VSC-HVDC Aplicado a Configuração DC-Multi-infeed Híbrida**. Brasil: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2020. Monografia (Bacharel em Engenharia Elétrica).

SOUZA, Yuri Rosenblum. **Análise da Interação entre Elos de Corrente Contínua em Redes Eletricamente Próximas**. 2014. Diss. (Mestrado) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia.

STEFAN, Gunnarsson; LIN, Jiang; ANDERS, Petersson. Active Filters in HVDC Transmissions. *In: COLLOQUIUM on Role of HVDC, FACTS and Emerging Technologies in Evolving Power Systems*. Bangalore: Indian Journals, 2006. P. 90–104. ISBN 0021-1672. Disponível em:
<http://www.indianjournals.com/ijor.aspx?target=ijor:wea&volume=16&issue=2&article=abs108>.

VAZ, Rodrigo *et al.* Event detection and classification through wavelet-based method in low voltage wide-area monitoring systems. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 130, p. 106919, 2021. ISSN 0142-0615. DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.106919>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061521001599>.

WEI, Zhanhong; FANG, Wanliang; LIU, Jun. A criterion for accurate identification of commutation failure in HVDC systems. **Electric Power Systems Research**, v. 184, p. 106338, 2020. ISSN 0378-7796. DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106338>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779620301449>.

WEI, Zhanhong; LIU, Jun *et al.* Commutation Failure analysis in single- and multi-infeed HVDC systems. *In: 2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*. Estados Unidos: IEEE, 2016. P. 2244–2249. DOI: 10.1109/APPEEC.2016.7779887.

XIA, Chengjun *et al.* Analytical Calculation for Multi-Infeed Interaction Factors Considering Control Modes of High Voltage Direct Current Links. **Energies**, 2018.

ZHANG, Guohui; JING, Liuming *et al.* A IMPORTÂNCIA DOS ELETRODOS DE ATERRAMENTO PARA O SISTEMA HVDC. *In: II Encontro de Iniciação Científica e Tecnológico*. Brasil: Instituto Federal de São Paulo, 2018.

ZHANG, Guohui; JING, Liuming *et al.* An Improved Continuous Commutation Failure Mitigation Method in High Voltage Direct Current Transmission System. *In: 2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*. Estados Unidos: IEEE, 2018. P. 1132–1136. DOI: 10.1109/CICED.2018.8592449.

ZHANG, Lidong; DOFNAS, L. A novel method to mitigate commutation failures in HVDC systems. *In: PROCEEDINGS. International Conference on Power System Technology*. Estados Unidos: IEEE, 2002. 51–56 vol.1. DOI: 10.1109/ICPST.2002.1053503.

ZHOU, Hongyu *et al.* Comprehensive review of commutation failure in HVDC transmission systems. **Electric Power Systems Research**, v. 205, p. 107768, 2022. ISSN 0378-7796. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107768>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779621007495>.