

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Tese de Doutorado

Uma Técnica para Detecção de Falhas em Linhas de Transmissão de Corrente Contínua por Meio da Energia da Derivada de Sinais

Yonatha Marques Pereira de Melo

Campina Grande - Paraíba - Brasil

© Yonatha Marques Pereira de Melo, Dezembro de 2018

Uma Técnica para Detecção de Falhas em Linhas de Transmissão de Corrente Contínua por Meio da Energia da Derivada de Sinais

Yonatha Marques Pereira de Melo

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Doutor em Ciências, no domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento da Energia

Washington Luiz Araújo Neves, Ph.D.
Orientador

Damásio Fernandes Júnior, D.Sc.
Orientador

Campina Grande - Paraíba - Brasil

Dezembro de 2018

M528t Melo, Yonatha Marques Pereira de.
Uma técnica para detecção de faltas em linhas de transmissão de corrente contínua por meio da energia da derivada de sinais / Yonatha Marques Pereira de Melo. – Campina Grande, 2018.
98 f.: il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2018.

"Orientação: Prof. Dr. Washington Luiz Araújo Neves, Prof. Dr. Damásio Fernandes Júnior."

Referências.

1. Linhas de transmissão. 2. HVDC. 3. Derivada de sinais. 4. Detecção de faltas. 5. Localização de faltas. 6. Ondas viajantes. I. Neves, Washington Luiz Araújo. II. Fernandes Júnior, Damásio. III. Título.

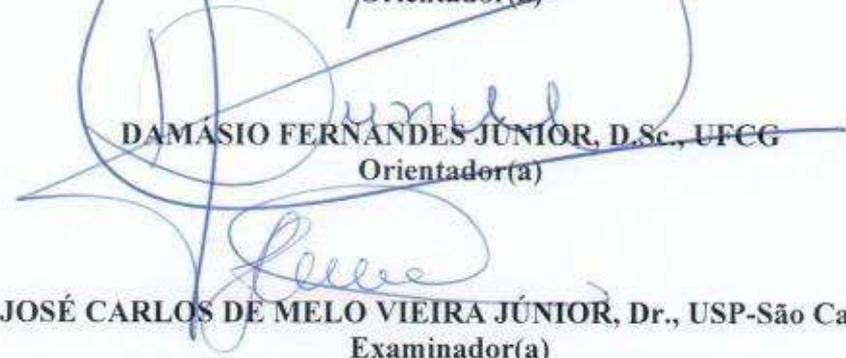
CDU 621.372.2(043)

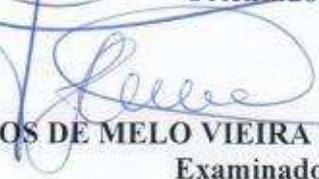
**"UMA TÉCNICA PARA DETECÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DE
CORRENTE CONTÍNUA POR MEIO DA ENERGIA DA DERIVADA DE SINAIS"**

YONATHA MARQUES PEREIRA DE MELO

TESE APROVADA EM 18/12/2018


WASHINGTON LUIZ ARAÚJO NEVES, Ph.D., UFCG
Orientador(a)


DAMÁSIO FERNANDES JUNIOR, D.Sc., UFCG
Orientador(a)


JOSÉ CARLOS DE MELO VIEIRA JÚNIOR, Dr., USP-São Carlos
Examinador(a)

FLÁVIO BEZERRA COSTA, D.Sc., UFRN
Examinador(a)


BENEMAR ALENCAR DE SOUZA, D.Sc., UFCG
Examinador(a)

NUBIA SILVA DANTAS BRITO, D.Sc., UFCG
Examinador(a)


WELLINGTON SANTOS MOTA, Ph.D., UFCG
Examinador(a)

CAMPINA GRANDE - PB

Aos meus pais Bismarck e Clores, à minha irmã Yamê, e à minha avó Albertina (In Memoriam), DEDICO.

AGRADECIMENTOS

A Deus por me dar forças, sabedoria, saúde, persistência e paciência para enfrentar os momentos mais desafiadores, por ter colocado pessoas maravilhosas em meu caminho e animaizinhos que eram repletos de amor e alegria.

Aos meus pais, Bismarck e Clores, e minha irmã Yamê por tanto amor, por toda dedicação, pelas palavras de apoio e incentivo constantes.

A todos os familiares e amigos que já se foram e aos quais serei sempre grata por tantos momentos de alegria, amor e apoio, em especial a minha avó Albertina (*In Memoriam*), a minha tia Iane (*In Memoriam*) e o meu tio William (*In Memoriam*).

À minha tia e madrinha Maria de Lourdes e a todo o restante de minha família: tias, tios, primos e primas por tantos ensinamentos, sorrisos e por tanto apoio.

A Rodrigo por sua calma e leveza, por sempre oferecer o seu melhor e por todo amor.

Ao professor Washington Neves por todos os ensinamentos, pela orientação e pelo apoio em meu trabalho. Ao professor Damásio pela co-orientação e pela confiança em meu potencial.

Aos professores Benemar, Flávio, José Carlos, Núbia e Wellington, pelas críticas e sugestões que buscaram contribuir com o enriquecimento de meu trabalho.

Aos funcionários do DEE, em especial a Ângela e Pedro, pela presteza, pela grande competência e pela atenção a mim dedicada.

A Capes pelo apoio financeiro.

Ao meu amigo e irmão por afinidade, Raphael Tavares e a sua família maravilhosa, que mesmo distante fisicamente, fizeram-se presentes em minha vida sempre me apoiando e alegrando.

A Jeane pelas experiências trocadas, por suas orações, pela sua força e alegria e, especialmente, por sua amizade que é um verdadeiro presente de Deus.

Aos amigos Rafael Ângelo, Deborah, Lígia, Carlos Antônio, José Maurício e demais amigos por tantos momentos de descontração e felicidade.

Às minhas amigas queridas de sala: Alana, Ana Vitória, Daphne, Érica, Jamile e Stefânia, o meu muito obrigada por tanta alegria, força e auxílio na pesquisa.

A Célio Anésio, Felipe Lopes, Hotoniones, Huilman, Raphael Reis e demais colegas que fazem ou que fizeram parte do LARCA e LSP por todo auxílio nas mais variadas etapas deste trabalho.

Agradeço ainda a todos os amigos de graduação do período 2006.1 pela amizade há mais de uma década, em especial aos amigos Mariana e Cabral.

RESUMO

Neste trabalho de tese a transmissão de energia em corrente contínua é estudada e a principal contribuição é o desenvolvimento de um novo algoritmo para a detecção de faltas em linhas de transmissão em corrente contínua. Este método utiliza os dados sincronizados de tensão e corrente, e desta maneira a detecção de faltas é realizada de forma redundante. Além disso, o método atua em conjunto com um método clássico de localização e classificação de faltas em linhas de transmissão, baseado na teoria de ondas viajantes. São simuladas quatro configurações de sistemas de transmissão de energia elétrica em alta tensão e corrente contínua, sendo um sistema monopolar, um sistema bipolar, um sistema híbrido compostos por linhas em corrente contínua e alternada, e um sistema multiterminal. O método de detecção de faltas desenvolvido utiliza o cálculo da derivada de sinais, cálculo da energia de coeficientes e um limiar auto-adaptativo. Os resultados são analisados considerando-se os erros absolutos, percentuais e os erros admissíveis. Por fim, observa-se que os erros percentuais obtidos na localização de faltas não são superiores a 0,33% para o sistema monopolar, 0,82% para o sistema bipolar e 0,56% para o sistema híbrido, ou seja, 0,82% é o erro percentual máximo para todos os 1980 casos de faltas analisados, mesmo para os casos com alto valor de resistência de falta. As faltas são detectadas corretamente em 100% dos casos simulados das faltas nos sistemas monopolar, bipolar e híbrido. O método proposto se destaca por apresentar resultados semelhantes aos de transformadas renomadas, como a *wavelet*, utilizando um limiar auto-adaptativo e a redundância entre os sinais de corrente e tensão.

Palavras-chave: linhas de transmissão; HVDC; derivada de sinais; detecção de faltas; localização de faltas; ondas viajantes.

ABSTRACT

In this work the energy transmission is studied and the main contribution is the development of a new algorithm for fault detection in direct current (DC) transmission lines. This method uses the synchronized voltage and current data, so that fault detection is performed redundantly. In addition, a classical method of fault location and classification on transmission lines is applied together to the proposed detection method. The location method is based on the theory of traveling waves. Three configurations of electric power transmission systems using High Voltage Direct Current (HVDC) technology are simulated: a monopolar system, a bipolar system and a hybrid system composed of alternating current (AC) and DC lines, and a multiterminal system. The developed fault detection method uses the signals derivative calculation, energy calculation of coefficients and a self-adaptive threshold. The results are analyzed considering absolute errors, percentages and admissible errors. Finally, it is observed that the percentage errors obtained in the fault location are not higher than 0.33% for the monopolar system, 0.82% for the bipolar system, and 0.56% for the hybrid system, so, 0.82% is the maximum percentage error for all 1980 cases of analyzed faults, even for cases with high value of fault resistance. Faults are correctly detected at 100% of the simulated cases of faults in monopolar, bipolar and hybrid. The proposed method stands out for presenting similar results to well known transforms, such as wavelet, and using a self-adaptive threshold and redundancy.

Keywords: transmission lines; HVDC; signals derivative; fault detection; fault location; traveling waves.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE TABELAS	xv
Lista de Símbolos	xvii
Glossário	xx
Capítulo 1 – Introdução	1
1.1 Relevância do Trabalho de Tese	3
1.2 Objetivos	3
1.3 Contribuição	4
1.4 Produção Intelectual	4
1.5 Metodologia	5
1.6 Organização do Trabalho	5
Capítulo 2 – Fundamentação Teórica	7
2.1 Vantagens e Desvantagens dos sistemas HVDC	8
2.2 Modelos de Linhas de Transmissão	11
2.3 Esquemas de Transmissão em Corrente Contínua	15
2.3.1 Ponto-a-ponto	15

2.3.1.1	Transmissão Monopolar	15
2.3.1.2	Transmissão Bipolar	16
2.3.1.3	Transmissão Homopolar	17
2.3.2	<i>Back-to-back</i>	17
2.3.3	Multiterminal	18
2.4	Subestações Conversoras	18
2.4.1	Conversor Comutado pela Rede - LCC	19
2.4.2	Conversor por Fonte de Tensão - VSC	20
2.5	Filtros de Harmônicos	21
2.6	Retorno pelo terra	23
2.7	Faltas em Linhas de Transmissão	25
2.8	Sistema de Proteção	26
2.8.1	Disjuntor	27
2.8.1.1	Disjuntor DC Convencional	28
2.8.1.2	Disjuntor DC de Estado Sólido	29
2.8.1.3	Disjuntor DC Híbrido	30
Capítulo 3 – Revisão Bibliográfica		32
3.1	Métodos de Detecção, Classificação e Localização de Faltas em Linhas de Transmissão	32
3.2	Resumo da Revisão Bibliográfica	39
Capítulo 4 – Ferramentas Matemáticas		42
4.1	Derivada de um sinal	42
4.2	Transformada <i>Wavelet</i>	43
4.3	Transformada de Park	47
4.3.1	Detecção pela Transformada de Park para sistema HVAC	47

4.3.2	Detecção pela Transformada de Park para sistema HVDC	49
4.4	Energia de Sinais	51
Capítulo 5 – Método Proposto		53
5.1	Sinais Analisados	53
5.2	Derivada dos sinais	54
5.3	Energia dos coeficientes	55
5.4	Limiar	55
Capítulo 6 – Análise Comparativa entre Métodos		59
6.1	Considerações Sobre as Simulações Realizadas	59
6.1.1	Sistema Monopolar	60
6.1.2	Sistema Bipolar	61
6.2	Métodos Simulados	62
6.3	Resultados da Análise Comparativa	63
Capítulo 7 – Análise da Redundância e atrasos do Método		69
7.1	Sistema monopolar	69
7.2	Sistema bipolar	71
Capítulo 8 – Análise de Sistemas Híbridos		74
8.1	Sistema híbrido	75
8.2	Resultados para o sistema híbrido	77
Capítulo 9 – Conclusões		79
Referências Bibliográficas		81

Apêndice – Dados dos Sistemas Elétricos Analisados	90
i Dados do sistema monopolar	90
ii Dados do sistema bipolar	94
iii Dados do sistema híbrido	97

LISTA DE FIGURAS

1.1	Sistema de transmissão do SIN - Horizonte 2017.	2
2.1	Sistema de transmissão de Belo Monte.	8
2.2	Comparação entre custos e distância de transmissão de sistemas HVDC e HVAC. . .	9
2.3	Estruturas típicas para LT.	11
2.4	Elemento incremental de uma linha.	11
2.5	Esquema ponto-a-ponto.	15
2.6	Esquema de transmissão monopolar.	16
2.7	Esquema de transmissão bipolar.	16
2.8	Esquema de transmissão homopolar.	17
2.9	Esquema <i>back-to-back</i>	18
2.10	Esquema multiterminal.	18
2.11	Conversor do tipo LCC - Ponte conversora de 6 pulsos.	20
2.12	Modelo de um circuito de potência para um conversor do tipo VSC.	21
2.13	Modelo de um sistema elétrico do tipo HVDC-LCC.	22
2.14	Conjunto de um filtro ativo e um filtro passivo, ambos em paralelo.	23
2.15	Conjunto de um filtro ativo em série e um filtro passivo em paralelo.	23
2.16	Instantes de incidência das ondas viajantes nos terminais de uma LT DC.	26
2.17	Disjuntor DC convencional com um circuito ressonante.	29
2.18	Disjuntor DC de estado sólido.	30
2.19	Disjuntor DC híbrido.	30

4.1	Decomposição da <i>wavelet</i> proposta por Mallat (1989).	44
4.2	Diagrama dos eixos referenciais obtidos via TDQ0.	48
4.3	Etapas para a obtenção dos coeficientes C_{dif}	49
4.4	Diagrama dos eixos referenciais obtidos via TDQ0.	50
4.5	Componente de eixo direto da corrente e coeficientes de diferença do corrente.	51
4.6	Energia dos coeficientes de diferença da corrente.	52
5.1	Local de medição dos sinais de tensão e corrente da linha DC.	54
5.2	Exemplo da energia dos coeficientes de derivada para um sinal de tensão DC.	56
5.3	Calibração do fator característico do sistema.	57
5.4	Fluxograma do método proposto.	58
6.1	Sistema Monopolar.	60
6.2	Sistema Bipolar.	61
6.3	Modificações no sinal de tensão provocadas por cada método.	63
6.4	Resultados para o sistema monopolar utilizando-se os dados de corrente.	64
6.5	Resultados para o sistema monopolar utilizando-se os dados de tensão.	65
6.6	Resultados para o sistema bipolar utilizando-se os dados de corrente.	66
6.7	Resultados para o sistema bipolar utilizando-se os dados de tensão.	67
8.1	Lógica da classificação do distúrbio.	74
8.2	Sistema Híbrido.	76
8.3	Média do erro absoluto para a localização das faltas aplicadas nas linhas DC 1 e DC 2.	77
8.4	Média do erro percentual para a localização das faltas aplicadas nas linhas DC 1 e DC 2.	78
i	Sistema Monopolar - MATLAB.	91
ii	Esquema do gerador e as suas impedâncias.	92
iii	Esquema do filtro AC no lado retificador - sistema monopolar.	92

iv	Esquema do filtro AC no lado inversor - sistema monopolar.	93
v	Sistema Monopolar.	94
vi	Sistema Bipolar - MATLAB.	95
vii	Sistema Bipolar.	97
viii	Sistema Híbrido.	98

LISTA DE TABELAS

3.1	Resumo da Revisão Bibliográfica.	40
6.1	Condições de faltas - sistema monopolar.	61
6.2	Condições de faltas - sistema bipolar.	61
6.3	Resumo dos métodos analisados.	62
7.1	Flags de detecção - Sistema monopolar.	69
7.2	Instantes de detecção de faltas em segundos - Sistema monopolar.	70
7.3	Flags de detecção - Sistema bipolar.	71
7.4	Instantes de detecção de faltas em segundos - Sistema bipolar.	72
8.1	Condições de faltas - sistema híbrido.	75
8.2	Resultados em relação à classificação do tipo de faltas.	77
i	Dados dos geradores - sistema monopolar.	90
ii	Dados da impedância em paralelo dos geradores - sistema monopolar.	92
iii	Dados dos filtros para eliminação de harmônicas - sistema monopolar.	93
iv	Dados dos transformadores - sistema monopolar.	94
v	Dados dos enrolamentos do transformador 1 - sistema monopolar.	94
vi	Dados dos enrolamentos do transformador 2 - sistema monopolar.	94
vii	Dados dos geradores - sistema Bipolar.	96
viii	Dados da impedância em paralelo dos geradores - sistema bipolar.	96
ix	Dados dos filtros para eliminação de harmônicas - sistema bipolar.	96

x	Dados dos transformadores - sistema bipolar.	96
xi	Dados dos enrolamentos do transformador 1 - sistema bipolar.	97
xii	Dados dos enrolamentos do transformador 2 - sistema bipolar.	97

LISTA DE SÍMBOLOS

a	- Variável inteira que indica o número de amostras do sinal de entrada.
C	- Capacitância shunt total da linha por unidade de comprimento (F/m).
c_0	- Sinal original.
c_1	- Coeficiente de aproximação da primeira escala da transformada <i>wavelet</i> .
C_{dif}	- Coeficiente de diferença.
C_l	- Capacitância equivalente da linha de transmissão.
C_{Xder}	- Coeficiente de derivada do sinal X .
$C\Delta x$	- Capacitância shunt total da linha (F).
d	- Local de falta.
d_1	- Coeficiente <i>wavelet</i> da primeira escala.
e	- Número natural.
E	- Inteiro que indica a quantidade de coeficientes dos filtros passa-baixa e passa-alta da transformada Wavelet.
E_{Abs}	- Erro absoluto.
E_{Ad}	- Erro admissível.
E_{Perc}	- Erro percentual ou relativo.
F_{CS}	- Fator característico do sistema.
G	- Condutância da linha por unidade de comprimento (U/m).
G_{Coef}	- Ganho.
$g(k)$	- Filtro passa-baixa.

$G\Delta x$	-	Condutância total da linha (\mathcal{U}).
$h(k)$	-	Filtro passa-alta.
I_E	-	Corrente no terminal emissor.
$I_{E,R}$	-	Corrente que flui pela linha no sentido do terminal emissor para o receptor.
I_R	-	Corrente no terminal receptor.
$I_{R,E}$	-	Corrente que flui pela linha no sentido do terminal receptor para o emissor.
k	-	Número inteiro.
l	-	Comprimento total da linha.
L	-	Indutância série da linha por unidade de comprimento (H/m).
$L\Delta x$	-	Indutância série total da linha (H).
L_r	-	Indutância equivalente do reator.
n	-	Número natural.
p	-	Número de pulsos.
R	-	Resistência série da linha por unidade de comprimento (Ω /m).
$R\Delta x$	-	Resistência série total da linha (Ω).
S_a, S_b e S_c	-	Componentes trifásicas, podendo ser tensões ou correntes.
S_d, S_q e S_0	-	Componentes do eixo direto, em quadratura e zero, respectivamente.
S_{dc}	-	Sinal de corrente ou tensão DC.
S_{f_A}, S_{f_B} e S_{f_C}	-	Correntes ou tensões trifásicas fictícias.
V	-	Tensão nominal da linha de transmissão.
v	-	Velocidade de propagação das ondas viajantes.
V_E	-	Tensão no terminal emissor.
V_R	-	Tensão no terminal receptor.
v_{sp}	-	Velocidade de propagação das ondas viajantes em uma linha sem perdas.

t_{11}	- Instante de chegada da primeira onda viajante incidente no primeiro terminal da linha.
t_{11r}	- Instante de chegada da primeira onda viajante refratada no segundo terminal da linha.
t_{12}	- Instante de chegada da primeira onda viajante refletida no primeiro terminal da linha.
t_{21}	- Instante de chegada da primeira onda viajante incidente no segundo terminal da linha.
t_{21r}	- Instante de chegada da primeira onda viajante refratada no primeiro terminal da linha.
t_{22}	- Instante de chegada da primeira onda viajante refletida no segundo terminal da linha.
T_{DF1}	- Instante de detecção da falta no primeiro terminal da linha.
T_{DF2}	- Instante de detecção da falta no segundo terminal da linha.
T_{IF1}	- Instante de incidência da onda viajante da falta no primeiro terminal da linha.
T_{IF2}	- Instante de incidência da onda viajante da falta no segundo terminal da linha.
y	- Parâmetro inteiro.
Z_0	- Impedância de surto da linha.
Δt	- Período de amostragem dos sinais analisados.
Δk_{En}	- Tamanho da janela deslizante para o cálculo da energia janelada.
θ	- Ângulo de fase das grandezas elétricas de eixo direto.
τ	- Tempo de trânsito de uma onda viajante de um terminal ao outro da linha.
ω	- Frequência angular da rede (rad/s).

GLOSSÁRIO

AC	- Alternating Current.
ANEEL	- Agência Nacional de Energia Elétrica.
BMTE	- Belo Monte Transmissora de Energia.
CAPES	- Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.
CHESF	- Companhia Hidrelétrica do São Francisco.
CIGRE	- Conseil International des Grands Réseaux Électriques.
CSC	- Current Source Converter.
DC	- Direct Current.
DEC	- Duração de Interrupção Equivalente por Consumidor.
Eletronorte	- Centrais Elétricas do Norte do Brasil.
EPE	- Empresa de Pesquisa Energética.
EPSR	- Electric Power Systems Research.
ERAC	- Esquema Regional de Alívio de Carga.
FEC	- Frequência de Interrupção Equivalente por Consumidor.
FDWT	- Fast Dyadic Wavelet Transform.
FURNAS	- Furnas Centrais Elétricas.
GPS	- Global Positioning System.
GSE	- Grupo de Sistemas Elétricos.
HVAC	- High Voltage Alternating Current.
HVDC	- High Voltage Direct Current.
IGBT	- Insulated-Gate Bipolar Transistor.

IGCT	- Insulated-Gate Commutated Thyristor.
LCC	- Line Commutated Converter.
LT	- Linha de Transmissão.
MATLAB	- Matrix Laboratory.
MTDC	- Multi-terminal High Voltage Direct Current.
ONS	- Operador Nacional do Sistema Elétrico.
PSCAD	- Power System Computer Aided Design.
PWM	- Pulse Width Modulation.
SIN	- Sistema Interligado Nacional.
SWT	- Stationary Wavelet Transform.
TDQ0	- Transformada de Park.
TF	- Transformada de Fourier.
TW	- Transformada Wavelet.
TWC	- Transformada Wavelet Contínua.
TWD	- Transformada Wavelet Discreta.
TWDR	- Transformada Wavelet Discreta Redundante.
TWP	- Transformada Wavelet Packet.
UFCG	- Universidade Federal de Campina Grande.
UHE	- Usina Hidrelétrica.
VSC	- Voltage Source Converter.

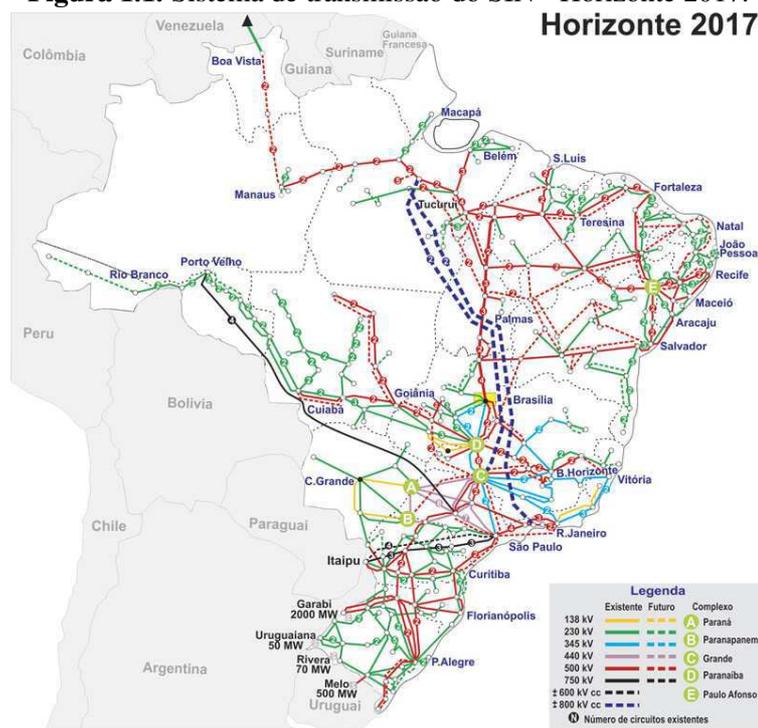
INTRODUÇÃO

A tecnologia utilizada nos sistemas de transmissão se desenvolveu bastante nas últimas décadas, especialmente no tocante aos sistemas de transmissão de energia elétrica em alta tensão e corrente contínua, do inglês High Voltage Direct Current (HVDC). Além disso, ao longo dos anos houve um aumento notório do consumo de energia elétrica em todo o mundo. Portanto, houve um aumento não apenas no número dos sistemas de transmissão, mas também ocorreu um aumento na complexidade destes sistemas.

Até 2012 o Brasil possuía apenas um sistema de transmissão em corrente contínua (DC), do inglês *direct current*, o bipolo de Itaipu, responsável pela interligação de Foz do Iguaçu-PR a Ibiuna-SP. Em 2013 iniciou-se a operação de uma linha de transmissão do tipo HVDC para escoar a energia gerada nas usinas do rio Madeira, Jirau e Santo Antônio, que é chamada de bipolo do Madeira e está localizada na região Amazônica. Esta linha possui 2375 km de extensão, interligando Porto Velho-RO a Araraquara-SP (ESMERALDO *et al.*, 2010). Além destes sistemas de transmissão em HVDC, em dezembro de 2017 entrou em operação o bipolo de Belo Monte. Este último bipolo é responsável pela interligação entre a hidrelétrica de Belo Monte-PA até Ibiraci-MG, possuindo uma extensão de 2076 km (BMTE, 2017). Na Figura 1.1 observa-se o sistema de transmissão brasileiro no horizonte de 2017.

A inserção destas novas linhas acarretou em um aumento, tanto em extensão como em complexidade do sistema interligado nacional (SIN). Logo, demanda-se uma operação ainda mais cuidadosa por parte de todas as concessionárias constituintes do SIN e do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Em 21 de março de 2018 às 15h48 ocorreu uma perturbação no sistema, que atingiu principalmente as regiões Norte e Nordeste do Brasil. Conforme a análise realizada pelo ONS, a perturbação aconteceu quando houve a atuação indevida do disjuntor na subestação Xingu, no Pará. A abertura do disjuntor impediu que a energia da hidrelétrica fosse escoada pelo bipolo. No disjuntor foi instalada indevidamente uma proteção de sobrecorrente, regulada para 4.000 A, valor abaixo da corrente

Figura 1.1. Sistema de transmissão do SIN - Horizonte 2017.



Fonte: (ONS, 2018a).

nominal do equipamento, o que fez com ele abrisse quando o fluxo da linha chegou próximo a 4 mil MW, explicou o diretor-geral do ONS, Luiz Eduardo Barata Ferreira (ONS, 2018b).

Verificou-se ainda que o Sistema Especial de Proteção não atuou desligando as máquinas da usina de Belo Monte com a perda do bipolo, uma vez que sua lógica não foi atualizada para considerar o acionamento do disjuntor. Dessa forma, a região Norte ficou com excesso de geração, o que provocou sobretensão nas linhas de transmissão e seu consequente desligamento. Os fatos levaram ao blecaute na região Norte. Com a perda da interligação, o Nordeste ficou com uma carga maior do que a geração, o que ocasionou queda na frequência. Na ocasião, o Esquema Regional de Alívio de Carga (ERAC) atuou em cinco estágios, cortando 25% da carga e normalizando a frequência em 60 Hz. Em seguida, duas unidades geradoras da hidrelétrica de Paulo Afonso saíram de operação, levando o Nordeste ao blecaute. Nas regiões Sul e Sudeste/Centro-Oeste também houve cortes de carga devido a atuação do primeiro estágio do ERAC, os cortes representavam 5% do total no momento da ocorrência. O sistema só foi completamente restabelecido às 22h20, ou seja mais de seis horas e trinta minutos após o início da perturbação (ONS, 2018b). Logo, é notório o quanto pode ser danosa uma operação indevida do sistema de proteção. Então, torna-se imprescindível a utilização de um método de detecção de faltas que atue rapidamente e que possua boa seletividade e confiabilidade.

1.1 RELEVÂNCIA DO TRABALHO DE TESE

O sistema de transmissão, em especial a linha de transmissão (LT), é de extrema importância para o sistema elétrico de potência pois realiza o transporte de energia elétrica desde a etapa de geração até o sistema de distribuição. As linhas de transmissão podem ser classificadas em linhas em corrente alternada (AC), do inglês *alternating current* ou em corrente contínua.

A transmissão de energia elétrica em corrente contínua é mais utilizada, por ser economicamente mais vantajosa, em duas situações: a interligação de sistemas elétricos com frequências distintas, e no caso em que o sistema de transmissão apresenta longa extensão, seja ele aéreo ou submarino. A situação de interligação de sistemas elétricos com frequências distintas é o caso que ocorre em Itaipu, no qual o Brasil utiliza frequência de rede de 60 Hz e compra energia do Paraguai, que utiliza frequência de rede de 50 Hz.

Nas últimas décadas, os sistemas do tipo HVDC se tornaram muito mais atrativos devido ao desenvolvimento da tecnologia de eletrônica de potência. A maioria dos sistemas de transmissão DC no Brasil são de longa extensão e transportam grandes blocos de energia. Esse fato ocorre pois as linhas DC são uma alternativa de grande relevância para grandes distâncias porque possuem vantagens do ponto de vista econômico, de eficiência e de estabilidade nas tensões (KIM *et al.*, 2009). Entretanto, essas linhas estão suscetíveis às intempéries do ambiente e devem ter as possíveis faltas detectadas, classificadas e localizadas adequadamente, para que o fornecimento de energia possa ser mais rapidamente restabelecido. Porém, em sistemas do tipo HVDC, a velocidade na proteção é ainda mais importante que nos sistemas AC. Visto que, o sistema HVDC possui uma elevada taxa de crescimento da corrente de falta. Logo, a proteção precisa agir com uma velocidade maior que em sistemas AC. A proteção de um sistema HVDC deve atuar em apenas alguns milissegundos para evitar danos no sistema elétrico, especialmente nos conversores.

1.2 OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho de tese é propor um método de detecção de faltas baseado na teoria de ondas viajantes para linhas de transmissão em corrente contínua. O objetivo específico é:

- Desenvolver um método de detecção de faltas em linhas de transmissão para sistemas HVDC.

O método utiliza os dados de tensão e corrente, de forma redundante e limiar auto-adaptativo.

1.3 CONTRIBUIÇÃO

A principal contribuição do trabalho de tese é o desenvolvimento de uma nova técnica para a detecção de faltas em linhas de transmissão em corrente contínua. Este método propõe a utilização de dados sincronizados de tensão e corrente, medidos em transdutores localizados nos dois terminais da linha. O método proposto apresenta uma redundância, que possibilita a detecção de faltas mesmo em situações em que ocorra a perda do recebimento do sinal de tensão ou de corrente. Após a obtenção dos dados de tensão e/ou corrente, calcula-se a derivada dos sinais. Em seguida, obtém-se a energia das derivadas e por último é feito o cálculo do limiar auto-adaptativo. Este limiar é vantajoso por adequar-se a cada tipo de sistema. O método proposto é implementado *offline*, mas a sua lógica possibilita a aplicação em tempo real.

1.4 PRODUÇÃO INTELECTUAL

As publicações abaixo estão relacionadas ao trabalho desenvolvido:

- MELO, Y.; NEVES, W.; FERNANDES Jr, D. Fault Detection and Localization for HVDC Transmission Lines. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)*, Niterói, Brasil, maio 2018;
- MELO, Y.; FERNANDES Jr, D; NEVES, W. Detecção de Faltas em Linhas de Transmissão de um Sistema HVDC. *XVII ERIAC - Decimoséptimo Encuentro Regional Iberoamericano de CIGRÉ*, Ciudad del Este, Paraguay, maio 2017;
- MELO, Y.; LOPES, F.; NEVES, W.; FERNANDES Jr, D. A Comparison of Transmission Line Fault Detection Methods. *International Conference on Power System Transients (IPST)*, Cavtat, Croatia, June 2015;
- MELO, Y.; FERNANDES Jr, D; NEVES, W. Análise em Tempo Real de Métodos de Localização de Faltas em Linhas de Transmissão. *XVI ERIAC - Encuentro Regional Iberoamericano de CIGRÉ*, Puerto Iguazu, Argentina, maio 2015.

1.5 METODOLOGIA

O trabalho de tese será desenvolvido nas seguintes etapas:

- Avaliar as principais diferenças entre os sistemas em corrente alternada e em corrente contínua;
- Levantamento dos principais algoritmos existentes de detecção, classificação e localização de faltas em linhas de transmissão em sistemas elétricos de potência do tipo HVDC;
- Realizar a modelagem de sistemas elétrico do tipo HVDC, com variadas configurações;
- Desenvolver um método de detecção de faltas em linhas em corrente contínua;
- Comparar o método proposto a outros métodos de detecção;
- Analisar o desempenho do método proposto em conjunto com um método clássico de localização de faltas, baseado na teoria das ondas viajantes;
- Avaliar o método proposto atuando em conjunto com um método de classificação para classificar as faltas em internas ou externas a linha protegida.

1.6 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho de tese está organizado de acordo com a seguinte estrutura: no Capítulo 2, apresenta-se a fundamentação teórica do tema a ser desenvolvido, onde são abordados alguns dos principais conceitos sobre as linhas de transmissão, assim como sobre as subestações conversoras e inversoras. E ainda, são indicados quais os tipos de sistemas de transmissão em corrente contínua e são feitos comentários sobre as análises requeridas pelo método proposto.

No Capítulo 3, apresenta-se uma revisão bibliográfica de publicações relevantes no âmbito de detecção, classificação e localização de faltas em LTs dos sistemas de transmissão do tipo HVDC.

No Capítulo 4 são descritas algumas das ferramentas matemáticas que podem ser utilizadas em sistemas elétricos para a análise em regime transitório. No capítulo seguinte, o Capítulo 5, explica-se como foi desenvolvido o método proposto para a detecção de faltas em linhas de transmissão em sistemas do tipo HVDC. Além de ilustrar como foi realizada a classificação e a localização de faltas por métodos clássicos.

No Capítulo 6, apresenta-se uma análise comparativa na etapa de detecção de faltas entre o método

proposto e outros métodos e formas de detecção de faltas, avaliando também como a detecção de faltas nas linhas influencia na localização de faltas. Essas análises são realizadas por meio de simulações de um sistema monopolar e um sistema bipolar.

No Capítulo 7 é avaliado um sistema híbrido, composto de duas linhas de transmissão AC interligadas a duas linhas DC. Logo, são aplicadas faltas em cada uma das linhas para analisar a detecção através do método proposto e da classificação das faltas em internas ou externas às linhas em corrente contínua protegidas.

Por fim, no Capítulo 8 são apresentadas as considerações finais deste trabalho de tese e as sugestões de trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

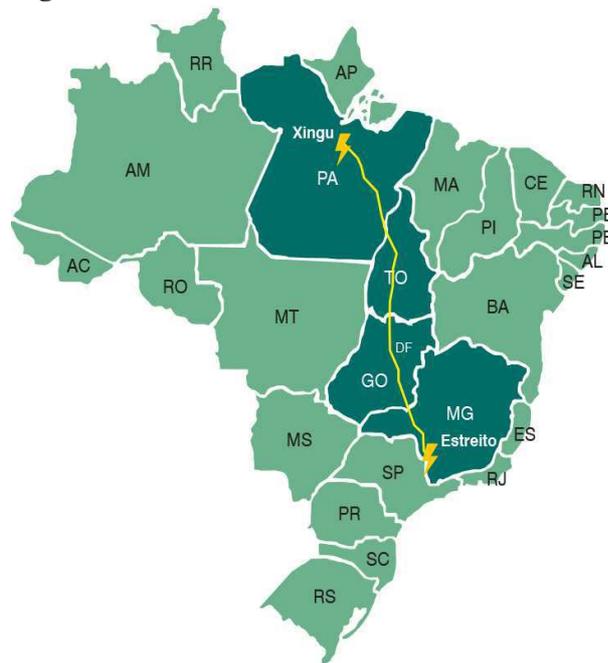
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O sistema de transmissão é um segmento importante do sistema elétrico de potência, em especial no Brasil, um país de grandes dimensões e que a maior parte da sua geração está distante dos consumidores finais. Nesse contexto, o projeto da usina hidrelétrica (UHE) Belo Monte, no rio Xingu, foi uma das melhores opções para a ampliação do parque gerador brasileiro, pois possibilitou grande produção de energia elétrica e apresentou uma condição muito favorável de integração com o sistema elétrico nacional (ELETROBRAS, 2018). Em fevereiro de 2018 já estavam em operação comercial as unidades geradores 3,4,5,6,7 e 8 da casa de força principal, totalizando mais de 5,1 mil MW de potência instalada, (NORTE ENERGIA S.A., 2018). A operação da UHE Belo Monte, assim como foi realizada a construção, é realizada pela Norte Energia S.A.

Da mesma forma que o sistema de geração, o sistema de transmissão brasileiro está em constante desenvolvimento, e em dezembro de 2017 o bipolo de Belo Monte foi conectado ao SIN. Essa LT é a primeira de dois bipolos de corrente contínua previstos para levar a energia gerada pela usina hidrelétrica de Belo Monte para a região sudeste. Com mais de dois mil quilômetros de extensão, a LT intercepta 65 municípios de quatro estados: Pará, Tocantins, Goiás e Minas Gerais (BMTE, 2018). Na Figura 2.1 observava-se o local onde este bipolo foi instalado.

A LT 800 kV DC Xingu/Estreito e Instalações Associadas foram construídas e serão operadas pela Belo Monte Transmissora de Energia (BTME). A BMTE é formada pela associação da chinesa State Grid, com 51% das ações, e a Eletrobras, através de Furnas Centrais Elétricas (FURNAS) e Centrais Elétricas do Norte do Brasil (Eletronorte) com 49% (BMTE, 2018).

A escolha desta configuração do sistema de transmissão ocorreu após diversos estudos que chegaram a conclusão de que um sistema em corrente contínua seria a melhor alternativa pois apresentava vantagens em relação ao sistema de transmissão em corrente alternada. Estes estudos foram realizados por diversas empresas, entre elas: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Eletronorte, Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), FURNAS e Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

Figura 2.1. Sistema de transmissão de Belo Monte.

Fonte: (BMTE, 2018).

Neste contexto, observou-se que os sistemas HVDC são viáveis e em condições específicas possuem muitas vantagens quando comparados aos sistemas HVAC. A seguir serão retratadas estas vantagens e desvantagens.

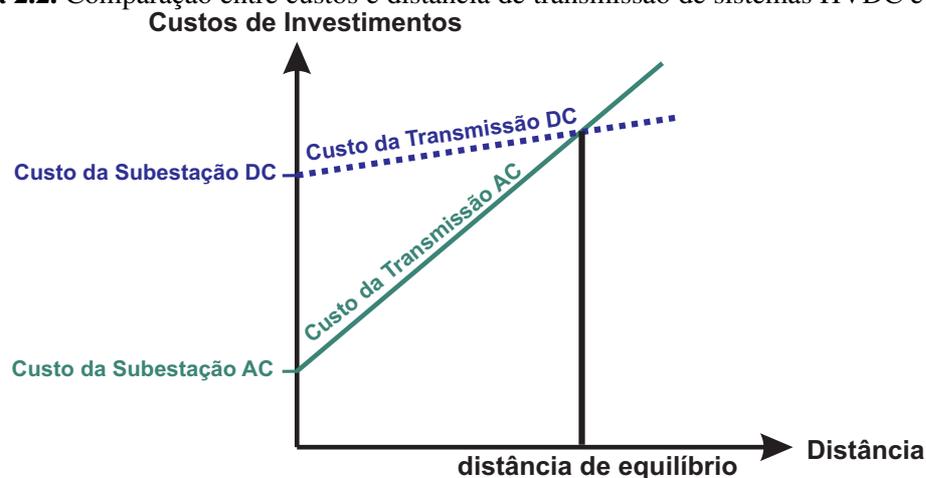
2.1 VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS SISTEMAS HVDC

Como foi mencionado, o sistema elétrico de transmissão em alta tensão e em corrente contínua ou *High Voltage Direct Current* (HVDC) no caso do Bipolo de Belo Monte apresentou vantagens em relação à transmissão em corrente alternada ou *High Voltage Alternating Current* (HVAC). Pois, quando a transmissão é realizada a longas distâncias o sistema HVDC possui um menor custo. Um sistema de transmissão é considerado longo quando é superior a 700 km para linhas aéreas e 30 km em cabos subterrâneos e submarinos, (CAMARGO, 1984). Estas distâncias limites são chamadas de distância de equilíbrio e na Figura 2.2, observa-se a relação entre os custos de um sistema HVDC e um sistema HVAC comparados com a extensão do sistema.

A transmissão por meio de um sistema HVDC é economicamente mais atrativa a partir da distância de equilíbrio, mesmo sendo necessária a presença de duas subestações conversoras, inexistentes na transmissão em corrente alternada. Uma subestação é responsável pela retificação e a outra pela

inversão da corrente, para que a sua distribuição e consumo sejam realizados em corrente alternada. A redução do custo de implantação ocorre porque a quantidade de cabos para transmitir a mesma quantidade de energia é reduzida em 1/3, quando comparada à transmissão em corrente alternada. Além disto, as torres têm sua estrutura reduzida devido à diminuição da quantidade dos condutores. Outro fator é a redução das perdas, além da melhoria da estabilidade do sistema elétrico e da confiabilidade. A estabilidade do sistema melhora devido à sua capacidade de controlar rapidamente o fluxo de potência em seus conversores.

Figura 2.2. Comparação entre custos e distância de transmissão de sistemas HVDC e HVAC.



Fonte: Próprio autor.

O sistema de transmissão em corrente contínua apresenta muitas vantagens em relação à transmissão em corrente alternada. Uma das principais vantagens é o fato de que após a conversão para corrente contínua a LT não possui potência reativa. Portanto, não há nenhum limite técnico na distância de transmissão, ou seja, não há nenhum limite técnico em razão do comprimento máximo de linhas ou cabos.

Conforme apresentado por Kimbark (1971) e Wang & Redfern (2010), o sistema HVDC apresenta as principais vantagens:

- Maior potência por condutor;
- Maior simplicidade na construção linha de transmissão;
- A possibilidade de utilização do retorno pelo terra;
- Cada circuito pode ser tratado como um circuito independente;
- Ausência do efeito pelicular;

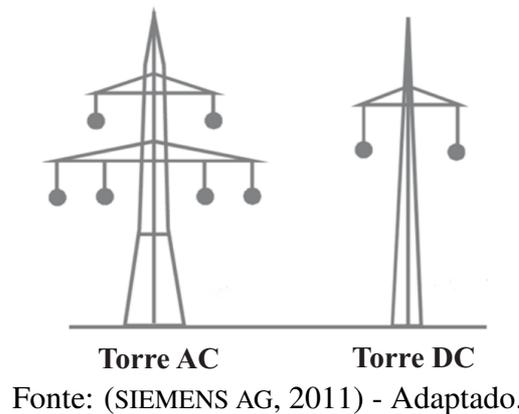
- Os condutores podem operar a tensões de gradiente muito elevadas;
- O fator de potência da linha é unitário e as linhas não necessitam de compensação reativa;
- Menor efeito corona e rádio interferência;
- Não requer uma operação síncrona;
- Possibilita a interconexão de sistemas de corrente alternada de frequências distintas ou de diferentes ângulos de fase;
- Para longas distâncias, a transmissão em corrente contínua é mais barata que em corrente alternada;
- Maior economia na construção das LT e na manutenção dos equipamentos;
- Boa performance na transmissão de energia em massa, inclusive na transmissão realizada por cabos submarinos;

As principais desvantagens deste tipo de transmissão são listadas a seguir:

- Alto custo dos conversores;
- Os conversores inserem harmônicos no sistema, diminuindo a qualidade da energia, o que torna necessário o uso de filtros;
- Os filtros de harmônicos em corrente alternada podem causar um aumento significativo nas tensões na ocorrência de faltas;
- Os conversores apresentam baixa capacidade de operar em sobrecarga.

O sistema HVDC diminui os danos ao meio ambiente em relação ao sistema de transmissão em corrente alternada, pois a redução do tamanho das torres permite o uso de um espaço menor e com mais eficiência (SIEMENS AG, 2011). Como se sabe, a faixa de servidão está diretamente associada com o custo das linhas de transmissão aéreas. Além disto, há uma diminuição da poluição visual, em relação à transmissão em corrente alternada, e possibilidade de uso do espaço resultante para aumentar a capacidade de transmissão. Na Figura 2.3 são ilustradas as estruturas de duas torres equivalentes, uma de um sistema HVAC e outra de um sistema HVDC.

O sistema HVDC apresenta alguns problemas nas estações conversoras que devem ser considerados, sendo os principais: presença de ruído audível, impacto visual e compatibilidade eletromagnética.

Figura 2.3. Estruturas típicas para LT.

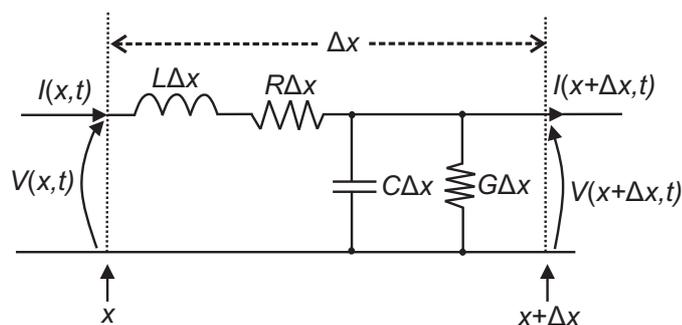
Fonte: (SIEMENS AG, 2011) - Adaptado.

Na seção seguinte serão apresentados modelos matemáticos para representar as linhas de transmissão.

2.2 MODELOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

De modo geral, não existe um modelo para linhas de transmissão capaz de representá-las em todas as situações. Os modelos exatos de linhas foram desenvolvidos para casos específicos. Casos distintos destes utilizam soluções aproximadas dos modelos desenvolvidos (AMETANI, 2007). Desta maneira, há várias formas de se obter uma solução aceitável.

Os modelos mais utilizados para representar as LT baseiam-se na solução das equações de onda de tensão e corrente. Na Figura 2.4 é mostrado o circuito equivalente para um elemento incremental de uma linha de transmissão monofásica. Caso a LT fosse considerada sem perdas, R e G teriam valores iguais a zero.

Figura 2.4. Elemento incremental de uma linha.

Fonte: Próprio autor.

Sendo: R a resistência série da linha por unidade de comprimento (Ω/m); $R\Delta x$ a resistência série total da linha (Ω); G a condutância da linha por unidade de comprimento (U/m); $G\Delta x$ a condutância total da linha (U); L a indutância série da linha por unidade de comprimento (H/m); $L\Delta x$ a indutância série total da linha (H); C a capacitância shunt total da linha por unidade de comprimento (F/m); $C\Delta x$ a capacitância shunt total da linha (F).

Esse modelo refere-se a uma linha de transmissão com parâmetros distribuídos ao longo da sua extensão. Qualquer perturbação gerada por chaveamentos ou descargas atmosféricas, resulta na propagação de ondas ao longo da linha (ARAÚJO; NEVES, 2005). Logo, o efeito de uma variação de tensão ou corrente em um dos terminais da linha só será sentido pelo outro terminal quando ondas eletromagnéticas geradas por essa mudança percorrerem toda a extensão da linha. Então, observa-se que as ondas levam um determinado tempo de propagação para alcançar a outra extremidade da linha:

$$V(x + \Delta x, t) - V(x, t) = \Delta V(x, t) = -R \cdot \Delta x \cdot I(x, t) - L \cdot \Delta x \cdot \frac{\partial I(x, t)}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$I(x + \Delta x, t) - I(x, t) = \Delta I(x, t) = -G \cdot \Delta x \cdot V(x, t) - C \cdot \Delta x \cdot \frac{\partial V(x, t)}{\partial t}. \quad (2.2)$$

No qual pode-se obter as equações de ondas da tensão e da corrente, também chamadas de "equações telegráficas", que podem ser utilizadas em qualquer local da linha de transmissão. O termo equações telegráficas se deve ao seu propósito inicial, que foi representar os fenômenos referentes à transmissão de pulsos telegráficos.

Em seguida, tomando-se as Equações (2.1) e (2.2) dividindo-as por Δx e fazendo Δx tender a zero, tem-se:

$$\frac{\partial V(x, t)}{\partial x} = -R \cdot I(x, t) - L \cdot \frac{\partial I(x, t)}{\partial t}, \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial I(x, t)}{\partial x} = -G \cdot V(x, t) - C \cdot \frac{\partial V(x, t)}{\partial t}. \quad (2.4)$$

A dedução das Equações (2.3) e (2.4) não requer nenhuma premissa especial, de forma que elas descrevem completamente as relações de tensão e corrente e de suas derivadas (DOMMEL, 1969; FREITAS, 2013). A obtenção de uma solução precisa para essas equações é o problema principal da modelagem de LT. As Equações (2.3) e (2.4) são ditas equações telegráficas para uma única linha. No caso de múltiplas linhas, $V(x, t)$ e $I(x, t)$ tornam-se vetores de variáveis e os coeficientes tornam-se

matrizes de coeficientes. Além disso, as funções $V(x, t)$, $I(x, t)$, $\frac{\partial V(x, t)}{\partial x}$, $\frac{\partial I(x, t)}{\partial x}$ devem ser contínuas em relação à x .

Os modelos das LT são divididos em dois grupos principais, os modelos no domínio do tempo e os modelos no domínio da frequência. Nos modelos no domínio da frequência, o tempo é considerado como uma variável independente e pode ser removido das equações do modelo e das condições iniciais. Nos modelos no domínio do tempo, a variável tempo não pode ser removida e as condições iniciais são em função do tempo.

O modelo de LT realizado no domínio do tempo é o mais utilizado mundialmente e foi proposto por (DOMMEL, 1969). Logo, neste trabalho de tese será utilizado o modelo de Bergeron. O desenvolvimento deste modelo faz uso das Equações (2.3) e (2.4) e é feita uma aproximação para uma LT sem perdas.

- Bergeron

O modelo de Bergeron utiliza um método matemático chamado de "método de características" que é usado para resolução de equações diferenciais parciais e, como citado anteriormente, foi proposto por (DOMMEL, 1969). Considerando-se uma LT sem perdas e com uma indutância L e uma capacitância C por unidade de comprimento, então em um ponto x ao longo da linha e num instante t , as tensões e as correntes são dadas por:

$$\frac{\partial V(x, t)}{\partial x} = -L \frac{\partial I(x, t)}{\partial t}, \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial I(x, t)}{\partial x} = -C \frac{\partial V(x, t)}{\partial t}. \quad (2.6)$$

A solução das Equações (2.5) e (2.6) é obtida pela transformação para o plano $x - t$, fazendo que sejam obtidas um par de equações diferenciais ordinárias:

$$V(x, t) = Z_0(f_1(x - vt) - f_2(x + vt)), \quad (2.7)$$

$$I(x, t) = f_1(x - vt) + f_2(x + vt). \quad (2.8)$$

As funções f_1 e f_2 nas Equações (2.7) e (2.8) representam ondas que se propagam na linha de transmissão com sentidos opostos. Admite-se que f_1 propaga-se no sentido de x positivo e é denominada de onda progressiva ou incidente, e f_2 irá se propagar no sentido oposto, chamada de onda

regressiva ou refletida. Em seguida, multiplicando-se a Equação (2.8) por Z_0 e somando pela Equação (2.7), tem-se que:

$$V(x,t) + Z_0 I(x,t) = 2Z_0 f_1(x - vt). \quad (2.9)$$

O processo da multiplicação foi repetido e, em seguida, subtraiu-se da equação 2.7, dando origem à:

$$V(x,t) - Z_0 I(x,t) = -2Z_0 f_2(x + vt), \quad (2.10)$$

em que: $Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$ é denominada de impedância de surto da LT. Além disto, tem-se que a velocidade de propagação das ondas pode ser obtida por $v = \sqrt{\frac{1}{LC}}$.

Tem-se ainda que na Equação (2.9), a expressão $V(x,t) + Z_0 I(x,t)$ possui um valor constante, quando o termo $(x - vt)$ for constante. Na Equação (2.10) ocorre de maneira análoga, a expressão $V(x,t) - Z_0 I(x,t)$ terá um valor constante quando o termo $(x + vt)$ for constante. Considerando-se que o tempo para sair de um terminal, denominado de emissor, até o outro terminal da LT, chamado de receptor é dado por: $\tau = \frac{l}{v}$, em que l é o comprimento da linha. Logo, sabendo que E é a posição do terminal emissor e R é a posição do terminal receptor, se na posição $x = E$ o tempo for igual a $t - \tau$, quando a posição for modificada para $x = R$, o tempo será igual a t . Portanto:

$$V_E(t - \tau) + Z_0 I_{E,R}(t - \tau) = V_R(t) + Z_0 (-I_{R,E}(t)), \quad (2.11)$$

em que: V_R é a tensão no terminal receptor, V_E é a tensão no terminal emissor, I_R é a corrente no terminal receptor, I_E é a corrente no terminal emissor, $I_{E,R}$ é a corrente que flui pela LT no sentido do terminal emissor para o receptor e $I_{R,E}$ é a corrente que flui pela LT no sentido do terminal receptor para o emissor. Conforme mencionado, o método de características utiliza algumas simplificações. Entretanto, ele também pode ser adaptado para linhas com perdas, acrescentando-se parâmetros concentrados de perda.

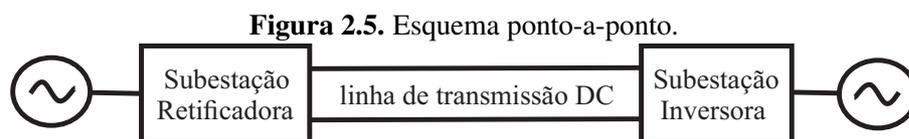
De maneira geral, os estudos comparativos entre resultados obtidos em campo e em simulações mostraram que quando consideram-se a natureza distribuída dos parâmetros e a dependência da frequência os resultados das simulações se aproximam mais dos resultados obtidos em campo, (DOMMEL, 1996; MARTI, 1982; NAIDU, 1985).

2.3 ESQUEMAS DE TRANSMISSÃO EM CORRENTE CONTÍNUA

Os sistemas do tipo HVDC podem ser classificados em: transmissão ponto-a-ponto, transmissão *back-to-back* e multiterminal, (KUNDUR, 1994; BAHRMAN; JOHNSON, 2007; VASCONCELOS, 2014).

2.3.1 Ponto-a-ponto

O sistema HVDC deste tipo apresenta somente um emissor para um receptor. Geralmente, o receptor e o emissor estão separados por uma grande extensão. Este é o tipo de ligação utilizado para o transporte de grandes quantidades de energia por meio de longas linhas de transmissão em corrente contínua, que suprem cargas distantes das unidades geradoras de energia elétrica.



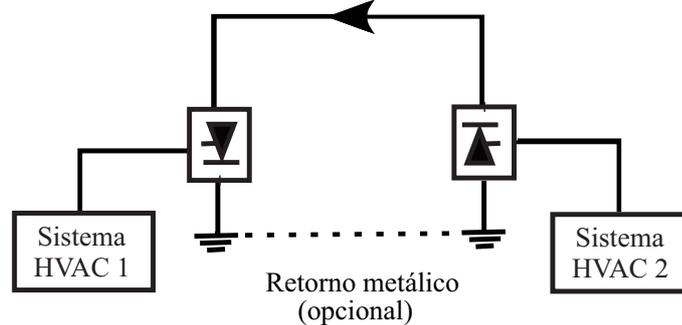
Fonte: Próprio autor.

De acordo com Kundur (1994) e Fuchs (2015), a transmissão DC do tipo ponto-a-ponto pode ser dividida nos três tipos seguintes: a transmissão monopolar, a bipolar e a homopolar. A seguir cada um destes esquemas serão apresentados.

2.3.1.1 Transmissão Monopolar

A transmissão monopolar é a forma mais simples, possuindo somente um polo e o seu retorno pode ser realizado pelo solo. Um condutor de retorno pode ser utilizado nas situações em que o solo possui alta resistividade ou para evitar interferência em condutores subterrâneos ou subaquáticos. Na maioria dos casos, a polaridade negativa é adotada, por resultar em menor efeito corona quando comparada com a polaridade positiva, (KUNDUR, 1994). Como consequência de sua simplicidade, esta configuração requer o menor investimento para as linhas e apresenta a mesma confiabilidade que uma linha AC a um circuito, (FUCHS, 2015). Em sua maioria, as conexões realizadas por cabos submarinos utilizam sistemas HVDC do tipo monopolar (FLOURENTZOU *et al.*, 2009). A seguir, observa-se a Figura 2.6 que ilustra a configuração monopolar.

Figura 2.6. Esquema de transmissão monopolar.
Polo (-)

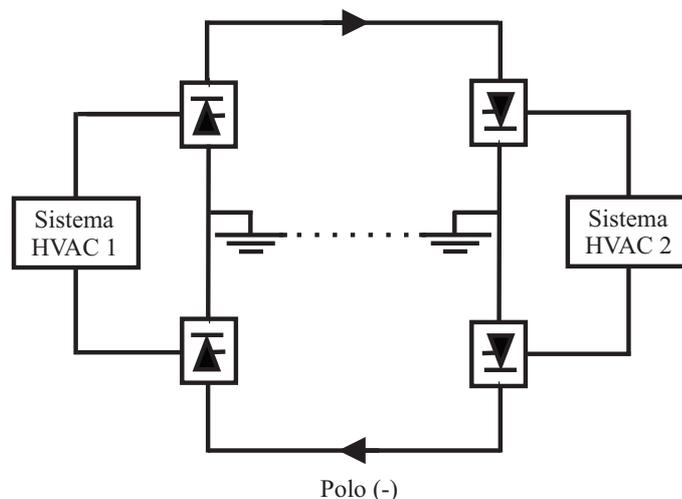


Fonte: Próprio autor.

2.3.1.2 Transmissão Bipolar

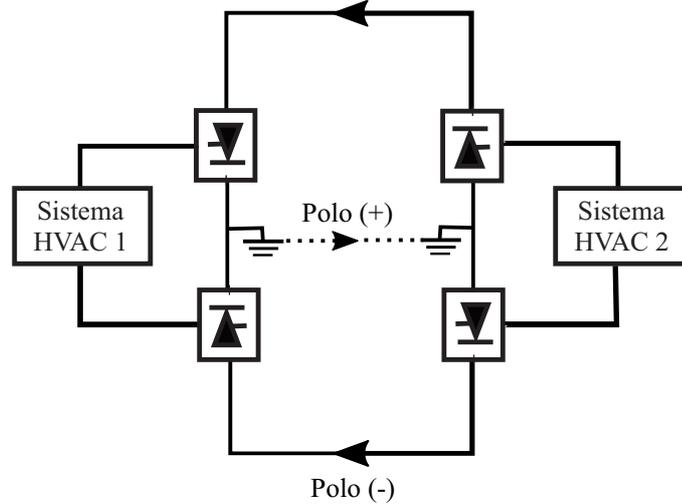
A transmissão bipolar possui dois condutores metálicos com polaridades distintas, sendo um para cada polo. Além de dois condutores, a configuração bipolar possui em cada um dos seus terminais, no lado DC, dois conversores ligados em série. Os pontos neutros dos conversores podem ser aterrados ou não. Caso os pontos neutros estejam aterrados, cada um dos polos podem operar de maneira independente do outro, transmitindo metade da potência total. Em situações de contingências essa característica torna-se muito importante. Portanto, em relação a confiabilidade este esquema é equivalente a uma LT em corrente alternada a circuito duplo, (FUCHS, 2015). A seguir, retrata-se na Figura 2.7 um esquema bipolar.

Figura 2.7. Esquema de transmissão bipolar.
Polo (+)



Fonte: Próprio autor.

Figura 2.8. Esquema de transmissão homopolar.
Polo (-)



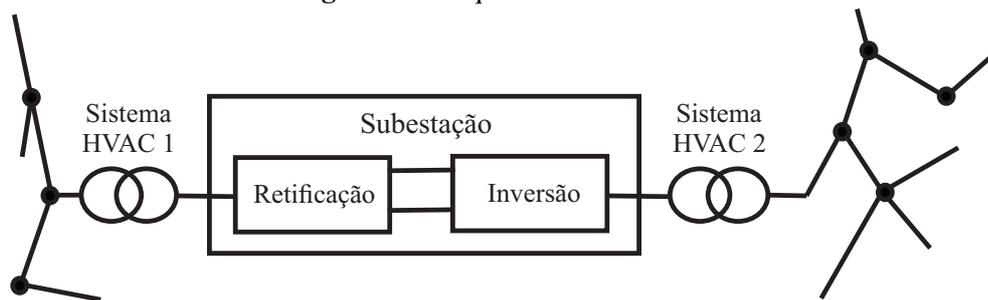
Fonte: Próprio autor.

2.3.1.3 Transmissão Homopolar

O esquema de transmissão homopolar é formado por dois ou mais condutores metálicos de mesma polaridade, que utilizam o solo como retorno. Numa situação de falta de um dos condutores, o conversor inteiro permanece disponível para operar utilizando-se os condutores restantes, que devem ter capacidade de sobrecarga e podem operar com mais da metade da potência total (FUCHS, 2015). Caso não ocorram restrições quanto à permanência da corrente no solo, este esquema apresenta vantagem sobre as configurações anteriores. Na Figura 2.8 é ilustrado um esquema homopolar.

2.3.2 Back-to-back

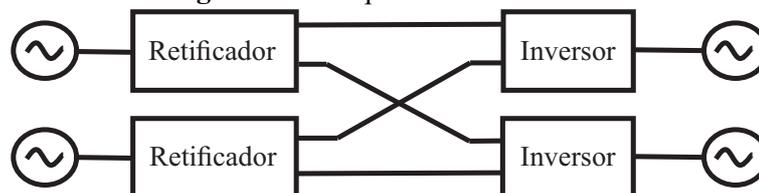
A configuração *back-to-back* é utilizada quando há necessidade de interligação de dois sistemas elétricos de potência AC com frequências distintas ou assíncronos. O uso desta configuração de sistema HVDC possibilita o controle de fluxo de potência bidirecional entre esses sistemas elétricos. Geralmente, para esta configuração, os dois conversores estão localizados na mesma subestação e não há transmissão de energia em uma LT em corrente contínua de longa distância.

Figura 2.9. Esquema *back-to-back*.

Fonte: Próprio autor.

2.3.3 Multiterminal

O esquema multiterminal é caracterizado por possuir uma interligação entre mais de dois terminais. Atualmente, é um dos tipos mais raros de configuração devido à sua grande complexidade. Este tipo de sistema também é conhecido por sistema MTDC, do inglês *Multi-terminal High Voltage Direct Current*.

Figura 2.10. Esquema multiterminal.

Fonte: Próprio autor.

Os sistemas do tipo MTDC devem ser desenvolvidos num futuro próximo, como o caso da Supergrid. A Supergrid é um projeto que irá criar um grande e complexo sistema em corrente contínua interligando fontes renováveis de energia, em especial a energia eólica, solar e hidrelétrica, e vários países europeus, como: Bélgica, Dinamarca, Espanha, França, Holanda, entre outros (PINTO *et al.*, 2016).

2.4 SUBESTAÇÕES CONVERSoras

Como mencionado, as duas situações principais nas quais a transmissão DC é utilizada são: quando é necessária a interligação de dois sistemas de corrente alternada com frequências distintas, e quando é necessário o transporte de grandes quantidades de energia a longas distâncias. Portanto, é

necessária a presença de subestações conversoras, visto que a energia gerada pelas hidrelétricas, que são a principal fonte de energia elétrica brasileira, é em corrente alternada. Além de que, a energia também deve ser distribuída em corrente alternada, pois o consumo é feito nesta forma. Logo, devem estar presentes ao menos duas subestações conversoras, sendo a primeira uma subestação retificadora e a segunda uma subestação inversora.

Os conversores são dispositivos baseados em eletrônica de potência, em sistemas HVDC são responsáveis pela conversão dos sinais da rede em corrente alternada para transmissão em corrente contínua, e vice versa. Existem diversas tecnologias e abordagens distintas aplicadas aos conversores que os conferem características operativas diferenciadas. Desta forma, estes podem ser classificados de acordo com os dispositivos utilizados na comutação ou com a forma com que o sinal é retificado, (BERTHO Jr., 2017).

Os tiristores são os dispositivos semicondutores mais utilizados. Este fato deve-se por serem dispositivos com grande capacidade de se adequar ao sistema de alta tensão em corrente contínua, por serem econômicos e robustos, e apresentarem baixa perda por chaveamento quando comparado a outros equipamentos de chaveamento (KIM *et al.*, 2009).

Um tiristor apresenta vários tipos de perdas, entre elas as perdas devido à condução, ao chaveamento, ao bloqueio e ao armazenamento do *gate*. Nas aplicações na frequência de 60 Hz, as perdas por condução prevalecem, enquanto que nas aplicações em altas frequências, as perdas por chaveamento se destacam.

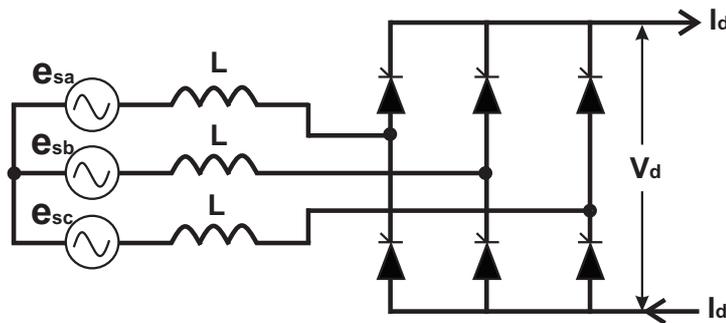
A transmissão DC pode ser classificada em dois tipos: a LCC (*Line Commutated Converter*) ou CSC (*Current Source Converter*) e a VSC (*Voltage Source Converter*). O primeiro tipo também é denominado de conversor comutado pela rede, enquanto que o segundo é denominado de conversor por fonte de tensão.

2.4.1 Conversor Comutado pela Rede - LCC

A tecnologia LCC baseia-se no uso de tiristores e é utilizada na maioria dos empreendimentos de transmissão no mundo (ARRUDA, 2012). A grande utilização desta tecnologia está relacionada ao seu custo reduzido e a sua baixa perda de potência, quando comparados a tecnologia VSC. Na Figura 2.11 apresenta-se uma configuração do tipo LCC. Os tiristores que pertencem ao conversor do tipo LCC

devem ser associados em série para que possam ser utilizados em altos níveis de tensão. Além disto, é interessante ressaltar que a corrente nesta configuração é sempre unidirecional. Caso seja necessária uma reversão no fluxo de potência, a polaridade do conversor deve ser invertida, o que torna este tipo de conversor inutilizável em redes do tipo multiterminal.

Figura 2.11. Conversor do tipo LCC - Ponte conversora de 6 pulsos.



Fonte: Próprio autor.

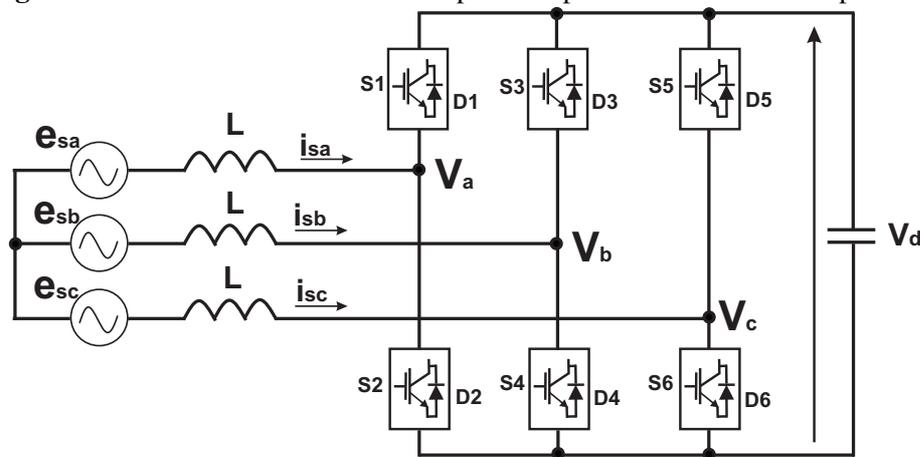
2.4.2 Conversor por Fonte de Tensão - VSC

Os conversores por fonte de tensão exercem um papel fundamental nos projetos de redes multiterminais. Este fato ocorre pois os VSC possibilitam transferências bidirecionais de energia entre os sistemas AC e DC com alto grau de eficiência além de, permitirem a inversão de fluxo entre terminais HVDC sem necessitar da inversão de polaridade. Logo, os VSC apresentam como principal vantagem em relação aos LCC, o seu alto grau de flexibilidade, possibilitando não apenas a capacidade de controlar a potência ativa, mas também a potência reativa. Este tipo de conversor é denominado por fonte de tensão devido ao nível de tensão nas LTs permanecer constante pela presença de capacitores. Diferentemente dos LCC, os conversores do tipo VSC baseiam-se na utilização de dispositivos semicondutores com bloqueio de corrente controlado.

Os conversores do tipo VSC podem ser dispostos em várias configurações. Na Figura 2.12 é retratado um modelo de um circuito para o VSC, na qual $S1, S2, S3, S4, S5$ e $S6$ representam as chaves. Os VSC podem operar a níveis de frequência bastante elevados e utilizar a modulação do tipo PWM (*Pulse Width Modulation*). Portanto, não são utilizados os tiristores clássicos, pois estes apresentam limitações na velocidade de comutação. Logo, os tiristores retificadores foram utilizados de 1975 até 2000, quando foram substituídos pelo IGBT (*Insulated-Gate Bipolar Transistor*), (FREITAS, 2013) e

ainda pelo IGCT (*Insulated-Gate Commutated Thyristor*).

Figura 2.12. Modelo de um circuito de potência para um conversor do tipo VSC.



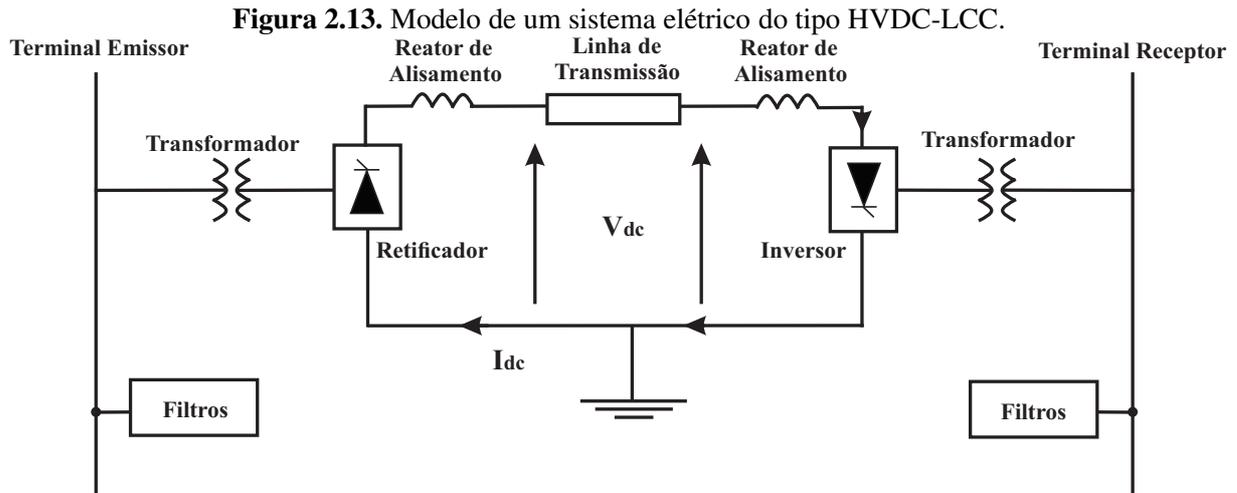
Fonte: Próprio autor.

Resumidamente, pode-se afirmar que as principais vantagens da tecnologia VSC em relação à LCC são: possibilidade do controle de potência ativa e reativa; e, rápida resposta no tempo devido à elevada frequência de chaveamento.

2.5 FILTROS DE HARMÔNICOS

Na Figura 2.13 é ilustrado um sistema completo para transmissão em corrente contínua do tipo LCC-HVDC. Todo sistema HVDC possui características em comum, entre elas: a necessidade de filtros harmônicos, as subestações conversoras e a possibilidade de utilização do retorno pelo solo, seja em condições normais de operação ou em situações de contingências. Além destas características, possuem os chamados reatores de alisamento ou reatores DC, denominados desta forma por estarem sempre no lado DC do sistema. Estes reatores são utilizados para diminuir as tensões e correntes harmônicas do lado DC e para limitar a crista de onda da corrente de falta no conversor. Além destes fatores, o reator de alisamento tem um papel fundamental para suavizar a ondulação da corrente contínua para evitar que a corrente se torne descontínua com cargas leves (KUNDUR, 1994).

Os filtros utilizados para a mitigação dos harmônicos no sistema HVDC necessitam da informação do número de pulsos dos conversores. Esta informação é requerida pois, a relação entre o número de pulsos dos conversores e a ordem harmônicos é diretamente proporcional. A medida que o número de pulsos aumenta, diversas desvantagens surgem. O sistema HVDC moderno consiste de um conversor



Fonte: Próprio autor.

de 12 pulsos formados por duas pontes de 6 pulsos. O conversor de um sistema HVDC opera como uma fonte de correntes harmônicas no lado do sistema em que a corrente é alternada e como uma fonte de tensões harmônicas no lado do sistema em que a corrente é contínua. Visto que o excesso de correntes harmônicas resulta em uma distorção na tensão, em um aumento das perdas, aquecimento e sobretudo em interferências, estas correntes harmônicas devem ser limitadas (KIM *et al.*, 2009).

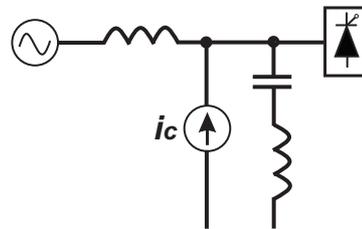
Os filtros de harmônicos instalados no terminal de um sistema HVDC atuam com duas funções: compensação da potência reativa absorvida pelos conversores e para limitar a níveis aceitáveis a distorção da corrente, provocada pelos harmônicos na conversão. Entretanto, devido à baixa impedância composta por capacitores e indutores que entram em ressonância nas frequências selecionadas, os filtros também exercem um papel importante na amplitude e nas formas de onda das tensões no regime transitório no lado do barramento AC.

Geralmente, as características harmônicas são relacionadas com o número de pulsos do conversor. Logo, os harmônicos são da ordem $K \cdot p \pm 1$ no lado AC e da ordem $K \cdot p$ para o lado DC, onde p é o número de pulsos e K é um inteiro. Portanto, para um conversor de 12 pulsos são encontrados harmônicos de 11^a, 13^a, 23^a e 25^a ordens no lado AC e de 12^a e 24^a ordens no lado DC.

Como mencionado, a maneira mais utilizada para correção de harmônicos é a inserção de filtros no sistema, os quais podem ser passivos ou ativos. A vantagem dos filtros passivos, que geralmente, consistem de filtros LC sincronizados, é a facilidade de uso e de projeto. Porém, o filtro passivo não é adaptável, ou seja, é necessário um filtro distinto para cada componente harmônico. Com o grande avanço dos dispositivos eletrônicos, como o IGBT, estes filtros foram substituídos pelos filtros ativos

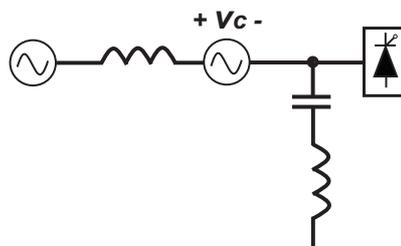
(KIM *et al.*, 2009). Estes filtros ativos podem ser do tipo série ou paralelo, conforme mostrado nas Figuras 2.14 e 2.15. O filtro ativo retratado na Figura 2.14 é a fonte de corrente e na Figura 2.15 é a fonte de tensão.

Figura 2.14. Conjunto de um filtro ativo e um filtro passivo, ambos em paralelo.



Fonte: Próprio autor.

Figura 2.15. Conjunto de um filtro ativo em série e um filtro passivo em paralelo.



Fonte: Próprio autor.

A função do filtro ativo na configuração da Figura 2.14 é a compensação harmônica, enquanto que, para na Figura 2.15, o filtro ativo possibilita a isolamento dos harmônicos da fonte e da carga. Atualmente, ambas estruturas de filtros ativos são aplicadas nos sistemas HVDC.

2.6 RETORNO PELO TERRA

Grande parte das linhas de transmissão em corrente contínua utilizam o retorno pelo terra, sejam em situações de contingências ou regularmente. O caminho pelo terra, se for modelado adequadamente, apresenta uma baixa resistência e uma baixa perda de potência em comparação com as linhas que utilizam condutores metálicos de mesmo custo e mesmo comprimento. A baixa resistência no terra ocorre porque a corrente contínua em regime permanente, diferentemente do regime transitório e da situação em corrente alternada, não segue um caminho como os de um condutor metálico, mas se espalha tanto em profundidade como em largura, apresentando uma área muito grande de secção

reta. Portanto, o sistema HVDC possibilita o retorno pelo terra e apresenta duas vantagens principais. Estas vantagens são mencionadas a seguir:

- A possibilidade de utilização da linha quando ainda em construção, caso a fase inicial exija um valor igual ou menor que a metade da potência total;
- O retorno pelo terra permite, no caso de uma contingência de uma das duas linhas bipolares, que temporariamente metade da energia continue sendo transmitida pela outra LT.

Desta forma, um sistema de transmissão bipolar consegue manter o mesmo nível de confiabilidade que um sistema de transmissão com circuito duplo e trifásico. Ou seja, o sistema em corrente contínua permite um nível de confiabilidade semelhante com apenas dois condutores, enquanto que para o sistema de transmissão em corrente alternada se torna necessário seis condutores. Entretanto, conforme Kimbark (1971), a utilização do retorno pelo solo também possui desvantagens, entre elas pode-se citar:

- É necessária a modelagem do solo para baixa resistência e baixos custos de instalação e manutenção;
- A localização e o rastreamento dos eletrodos de forma que as correntes de aterramento provoquem uma corrosão eletrolítica desprezíveis, além de tensões de passo e toque seguras;
- Prevenção da interferência da corrente de aterramento em outros serviços em operação.

Como mencionado, o retorno pelo solo possibilita que parte da transmissão de energia elétrica continue, mesmo quando ocorre uma falta em uma das LTs.

A importância do retorno pelo terra é tamanha que um erro de projeto pode ocasionar em grandes prejuízos, como o caso do bipolo do Madeira. Segundo o ONS (2017), os dois bipolos que escoam a energia da UHE Santo Antônio e da UHE Jirau para o sudeste, juntas teriam capacidade para transmitir 6.300 MW. Porém, foi verificado um problema no eletrodo de terra do bipolo 2, o que fez com que o ONS impusesse restrições no escoamento da energia das usinas através dos bipolos e o escoamento de energia total pelas linhas de transmissão ficou limitado a 4.700 MW (ONS, 2017). Verificou-se que o eletrodo de terra do bipolo 2 foi construído em local inadequado, o que compromete suas funções.

2.7 FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

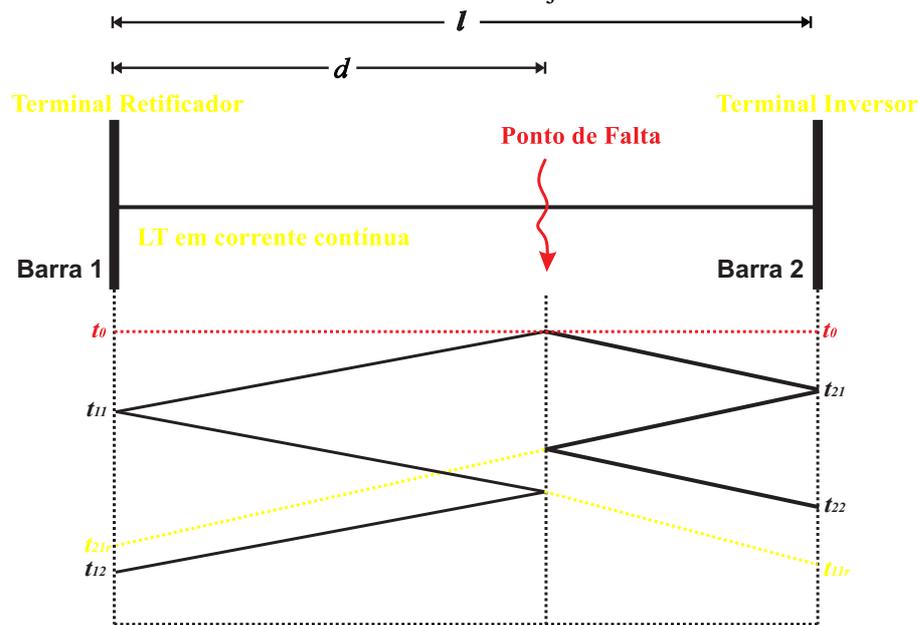
A utilização de LT aéreas em sistemas HVDC é semelhante ao uso em sistemas HVAC. Contudo, a capacidade de transmissão por condutor nos sistemas HVDC é superior aos sistemas HVAC. Pois, devido ao efeito pelicular, a corrente alternada tende a fluir na superfície do condutor e, desta maneira, não utiliza a maior parte do condutor. Enquanto que, a corrente contínua possibilita o uso de toda a área do condutor. Porém, as LTs em corrente contínua são mais susceptíveis à ocorrência de interrupção nos isoladores provocada pela polarização do ar ao redor dos condutores e pela presença de poeira.

Quando ocorre qualquer perturbação numa LT, haverá uma propagação de ondas eletromagnéticas denominadas de ondas viajantes, independentemente da causa deste distúrbio. As ondas viajantes se propagam até que sua energia seja dissipada pela resistência da linha. Estas chamadas ondas viajantes sofrem reflexões e refrações sempre que encontrarem uma descontinuidade, (GREENWOOD, 1991). As descontinuidades em linhas são definidas como mudanças súbitas da relação entre tensão e corrente em algum ponto. Terminais abertos, curto-circuitos, junções de linhas diferentes são exemplos de tais descontinuidades (ARAÚJO; NEVES, 2005). A onda que se direciona à descontinuidade é denominada de onda incidente e as duas ondas oriundas desta descontinuidade são: a onda refletida, que segue o sentido inverso da onda viajante original, e a onda refratada, que é a onda transmitida no mesmo sentido que a onda original. Estas ondas formadas nas descontinuidades seguem os princípios da conservação de energia, as equações diferenciais das linhas de transmissão e as leis de Kirchhoff, (BEWLEY, 1963).

A proteção através da teoria das ondas viajantes é um tópico bastante estudado em sistemas elétricos de potência por possibilitar uma extinção extremamente rápida da falta (COURY *et al.*, 2007). A velocidade que estas ondas se propagam nas LTs aéreas varia de acordo com as condições climáticas, com as características mecânicas e elétricas das LT.

Na Figura 2.16 são ilustrados os instantes que estas ondas viajantes incidem nos terminais da LT na condição de falta.

Pela Figura 2.16, tem-se que: t_{11} é o instante de chegada da primeira onda incidente à Barra 1; t_{21} é o instante de chegada da primeira onda incidente à Barra 2; t_{12} e t_{22} são os instantes de chegada das segundas ondas refletidas no ponto da falta para a Barra 1 e a Barra 2, respectivamente; t_{21r} e t_{11r} são

Figura 2.16. Instantes de incidência das ondas viajantes nos terminais de uma LT DC.

Fonte: Próprio autor.

os instantes de chegada das ondas refratadas no ponto da falta à Barra 1 e 2, respectivamente. Logo, quando uma falta numa LT é detectada, na realidade, são obtidos estes instantes em que as ondas viajantes incidem nos terminais da LT. Estas informações são muito importantes para o sistema de proteção.

Deve-se observar que tanto as ondas incidentes como as refletidas possuem sinal, ou seja, são polarizadas. Em cada ponto ao longo de uma linha e em qualquer instante, o valor da tensão ou da corrente será sempre igual ao valor da soma algébrica das ondas incidentes e refletidas de tensão e corrente, respectivamente, (FUCHS, 1977).

2.8 SISTEMA DE PROTEÇÃO

Os princípios básicos de um sistema de proteção são comuns a todos os diferentes tipos de sistemas elétricos, são eles:

- Proteção dos operadores, dos usuários do sistema e de animais;
- Retirar de operação um equipamento ou trecho do sistema defeituoso;
- Melhorar a continuidade do serviço e, em consequência, melhorando índices como o DEC (duração de interrupção equivalente por consumidor) e FEC (frequência de interrupção equivalente

por consumidor);

- Prevenir ou minimizar danos materiais, reduzindo também os custos com a manutenção corretiva.

As principais propriedades de um sistema de proteção são semelhantes para os sistemas elétricos de potência DC e AC, são elas: confiabilidade, seletividade, velocidade e sensibilidade. A confiabilidade pode ser definida como a probabilidade do sistema de proteção atuar adequadamente e com segurança, tanto em regime permanente como em situações de contingências. A seletividade é uma propriedade muito importante, pois possibilita reconhecer quais os dispositivos devem operar e, somente quando for realmente necessário. Enquanto que, a sensibilidade é uma propriedade referente à margem de tolerância entre a operação ou não, dos dispositivos do sistema de proteção. Esta tolerância deve ter a menor margem possível, para que se tenha uma maior sensibilidade e sejam evitadas atuações indevidas. O uso de múltiplos critérios de detecção também aumenta a sensibilidade da proteção. Por fim, tem-se que a velocidade é uma propriedade que promove a atuação da proteção no menor tempo possível. Entretanto, no sistema HVDC, esta propriedade é ainda mais importante. Visto que, o sistema HVDC possui uma elevada taxa de crescimento da corrente de falta. Logo, a proteção deve agir com uma velocidade maior que em sistemas AC. A proteção de um sistema HVDC deve atuar em apenas alguns milissegundos.

Os relés exercem um papel fundamental no sistema de proteção, pois eles realizam a detecção de distúrbios em um sistema elétrico de potência e transmitem um sinal de atuação para o disjuntor associado. Nos sistemas HVDC existem casos em que são utilizados os disjuntores no trecho AC e quando estes atuam, toda a parte DC é retirada de operação.

2.8.1 Disjuntor

Nos sistemas AC os disjuntores atuam na passagem por zero das correntes de forma natural, até mesmo nas condições de faltas. Entretanto, nos sistemas HVDC isto não ocorre naturalmente, tornando a abertura e o fechamento dos disjuntores processos muito mais complexos. Conforme Franck (2011), os disjuntores aplicados diretamente nos trechos do sistema elétrico DC devem realizar as seguintes funções:

- Criação da passagem de corrente por zero, para possibilitar a sua interrupção;

- Ser bidirecional tanto na condução, como na interrupção;
- Capacidade de realizar o religamento;
- Dissipação da energia armazenada em indutâncias do sistema elétrico;
- Suportabilidade da tensão transitória seguinte à interrupção de corrente.

Dentre estas funções citadas anteriormente, a criação da passagem de corrente por zero é a mais complexa no desenvolvimento de um disjuntor DC.

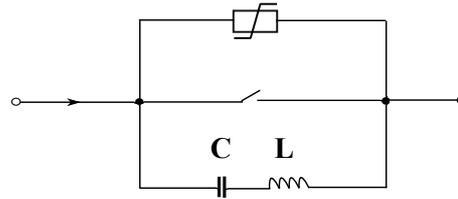
A crescente demanda pelo desenvolvimento de sistemas MTDC tornou os disjuntores DC equipamentos ainda mais necessários (MOKHBERDORAN *et al.*, 2014). Pois, com o aumento de dimensões e interligações dos sistemas HVDC tornou-se inviável retirar todo o sistema de transmissão DC. Uma característica que dificulta que a isolação do sistema faltoso pelo disjuntor é a elevada taxa de crescimento da corrente de falta devido às baixas indutâncias da LT DC, (KOLDBY; HYTTINEN, 2009). Devido à esta elevada taxa de crescimento da corrente de falta, os disjuntores DC são desafiados a interromper a corrente faltosa em até 5 ms, (NORUM, 2016).

Conforme Mokhberdorán *et al.* (2014), Tahata *et al.* (2015) e Norum (2016), os disjuntores utilizados nos sistemas HVDC podem ser de três tipos: disjuntores convencionais ou mecânicos, que podem ser auxiliados por resistores, capacitores ou circuitos ressonante, disjuntores de estado sólido e disjuntores híbridos.

Os disjuntores DC convencionais começaram a ser muito estudados na década de 80, (PAULI *et al.*, 1988; FRANCK, 2011; NORUM, 2016). Apesar destes estudos dos disjuntores DC serem realizados há mais de 3 décadas, os disjuntores específicos para a utilização em corrente contínua ainda estão em fase de desenvolvimento e, somente em novembro de 2012 foi anunciado o primeiro disjuntor comercial para utilização em linhas HVDC (ABB, 2012).

2.8.1.1 Disjuntor DC Convencional

A estrutura do disjuntor DC convencional é formada, geralmente, por três trechos em paralelo: o primeiro é para a passagem da corrente nominal, o segundo é para a corrente de comutação e o terceiro é para a absorção/dissipação de energia. A estrutura mais tradicional deste tipo de equipamento pode ser observada na Figura 2.17.

Figura 2.17. Disjuntor DC convencional com um circuito ressonante.

Fonte: Próprio autor.

Caso o disjuntor receba um comando de interrupção, a chave mecânica será aberta e o arco ocorrerá e a corrente começará a comutar para o trecho do varistor. Nesta fase, são geradas as oscilações. A queda de tensão do arco contribui para gerar oscilações de corrente devido ao trecho de comutação que irá fornecer a passagem de corrente zero e, eventualmente, extinguir o arco. Posteriormente, a corrente fluirá para o trecho de absorção, a fim de dissipar a energia magnética residual (NORUM, 2016).

O estado da arte indica que o tempo de atuação para esses tipos disjuntores é da ordem de 60 ms, sendo portanto necessário um estudo em cada sistema para garantir que esse tempo seja aceitável (KOLDBY; HYTTINEN, 2009; MOKHBERDORAN *et al.*, 2014). Apesar deste ser o disjuntor DC, conceitualmente, mais antigo e possuir o maior tempo de atuação, pesquisas continuam sendo desenvolvidas para melhoria deste equipamento, visto que este disjuntor DC possui um menor custo e maior simplicidade (WU *et al.*, 2018)

2.8.1.2 Disjuntor DC de Estado Sólido

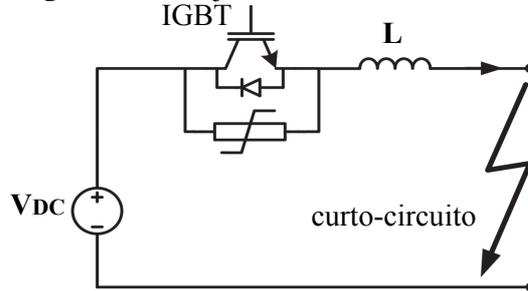
Os disjuntores DC de estado sólido atuam mais rápido que os de qualquer outra topologia, chegando a atuar num tempo inferior a 1 ms (MOKHBERDORAN *et al.*, 2014).

Estes disjuntores são compostos por dispositivos semicondutores com diferentes combinações de chaves e circuitos auxiliares. Geralmente, estes disjuntores de estado sólido puro, são formados por IGBTs, IGCTs ou outras chaves baseadas em semicondutores que são conectados em série e paralelo para suportar a tensão e corrente do sistema durante o regime permanente e durante as condições de falta. Na Figura 2.18 está ilustrada uma topologia de disjuntor DC de estado sólido.

Os disjuntores DC de estado sólido utilizam dispositivos de eletrônica de potência e as pesquisas em busca de melhorias no desempenho destes equipamentos continuam, em especial na diminuição

das perdas na condução em regime permanente (ALMUTAIRY; ASUMADU, 2018).

Figura 2.18. Disjuntor DC de estado sólido.



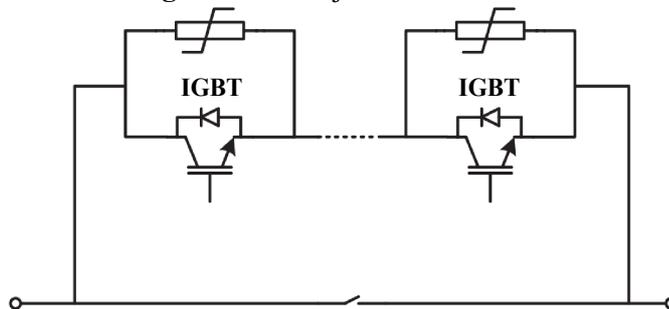
Fonte: (MOKHBERDORAN *et al.*, 2014) - Adaptado.

2.8.1.3 Disjuntor DC Híbrido

Os disjuntores DC híbridos possuem um tempo de atuação intermediário, quando comparado com as outras duas topologias. A atuação dos disjuntores DC híbridos fica em torno de 2 ~ 30 ms, (MOKHBERDORAN *et al.*, 2014). Estes tipos de disjuntores DC combinam características das duas topologias anteriores, como a rápida atuação, quando comparada com os disjuntores convencionais, e as menores perdas (SONG *et al.*, 2018). Diversos estudos estão sendo realizados no desenvolvimento e aprimoramento desta topologia, (KIM; KIM, 2017; WEI *et al.*, 2017; SONG *et al.*, 2018).

Na figura 2.19 observa-se uma dentre as diversas possibilidades de configurações para os disjuntores DC híbridos.

Figura 2.19. Disjuntor DC híbrido.



Fonte: (MOKHBERDORAN *et al.*, 2014) - Adaptado.

Neste capítulo foram retratadas algumas características do sistema de transmissão HVDC, como: as vantagens e desvantagens destes sistemas, modelos de linha, as topologias do sistema HVDC e o sistema de proteção.

No Capítulo 3 será apresentada uma revisão bibliográfica sobre alguns dos métodos de detecção, classificação e localização de faltas mais relevantes disponíveis na literatura.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados alguns dos principais métodos existentes de detecção, classificação e localização de faltas em linhas de transmissão em sistemas HVDC. A detecção é o processo de determinar os instantes iniciais nos quais ocorrem os distúrbios em uma LT. Esta detecção é realizada por meio das alterações nos dados de tensões e/ou correntes do sistema, provocadas pelos transitórios eletromagnéticos. Enquanto que, a localização de uma falta é o procedimento de determinação do local em que a falta ocorreu na LT e a classificação é o processo de identificar qual o condutor faltoso.

3.1 MÉTODOS DE DETECÇÃO, CLASSIFICAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Os métodos de detecção, localização e classificação de faltas, de maneira geral, podem ser classificados em quatro grupos: os métodos baseados em componentes fundamentais de frequência, os métodos baseados em componentes de alta frequência, os métodos baseados em inteligência artificial e os métodos baseados na teoria de ondas viajantes (SAHA *et al.*, 2010). Entretanto, para sistemas do tipo HVDC, não há uma frequência considerada fundamental, desta forma, os métodos do primeiro grupo citado anteriormente devem ser adaptados para a sua utilização nos sistemas DC (FREITAS, 2013). Também é válido ressaltar que, os principais métodos utilizados para a localização de faltas em LTs dos sistema HVDC são os baseados na teoria das ondas viajantes. O maior uso deste grupo de métodos ocorre pois são os mais rápidos na detecção de faltas.

Um dos métodos de localização de faltas mais importantes é um método clássico baseado na teoria de ondas viajantes proposto por Gale *et al.* (1993), no qual foram descritos equacionamentos para a localização de faltas em LT utilizando-se dados de dois terminais e dados de apenas um terminal. Entretanto, não foi explicitado qual o método para detecção da falta foi utilizado. Portanto, esse método de localização é utilizado como um parâmetro para os métodos de detecção de faltas baseados

na teoria das ondas viajantes. Desta maneira, os grupos dos métodos de detecção baseados na teoria das ondas viajantes serão divididos em métodos que utilizam dados de apenas um terminal ou métodos que utilizam dados de dois terminais.

O método proposto para a localização de faltas que usa dados de apenas um terminal da LT utiliza a equação 3.1 e tem a sua compreensão facilitada pela observação da Figura 2.16.

$$d = \frac{(t_{12} - t_{11}) \cdot v}{2}, \quad (3.1)$$

em que: d é o local de falta, t_{11} é o instante de chegada da primeira onda viajante incidente no primeiro terminal da LT, t_{12} é o instante de chegada da primeira onda viajante refletida no primeiro terminal da LT, e v é a velocidade de propagação das ondas viajantes. Os dados das ondas viajantes referentes ao primeiro terminal da LT podem ser substituídos pelos dados referentes ao segundo terminal da LT. Logo, é evidente a necessidade da obtenção dos instantes de chegada das ondas viajantes em um dos terminais da linha.

Em seguida, tem-se a equação para a localização realizada com dados de dois terminais da LT como segue:

$$d = \frac{l + (t_{11} - t_{21}) \cdot v}{2}. \quad (3.2)$$

Em que o instante de chegada da primeira onda viajante no segundo terminal da LT é t_{21} e l é o comprimento total da linha. Logo, para os métodos em que são utilizados dados de dois terminais das LT, não são necessários os instantes de chegada das ondas refletidas e a detecção do início dos transitórios é realizada por meio apenas dos instantes de chegada das primeiras ondas incidentes nos terminais. Então, os métodos que utilizam dados de dois terminais possuem a implementação mais simples. Entretanto, este grupo de métodos necessita de um canal de comunicação e do sincronismo de dados, que é realizado por GPS (*Global Positioning System*).

Enquanto, os métodos de um terminal requerem a detecção dos instantes de chegada da onda viajante secundária, o que torna o trabalho de detecção do método mais complexo, mas evitam a utilização do GPS e do canal de comunicação. É importante frisar ainda que, a frequência de amostragem influencia diretamente na precisão da detecção das faltas, tanto dos métodos que utilizam dados de

um terminal, como nos que utilizam dados de dois terminais.

No trabalho de Murthy *et al.* (2008) foi proposto um método para detecção e localização de faltas em na linha de transmissão de um sistemas HVDC monopolar. Foram simuladas três situações de operação. A primeira foi uma falta aplicada na linha DC do sistema, a segunda condição foi uma falta aplicada no lado AC, no lado da subestação inversora. E por fim, foi observado um caso de operação normal, para ser utilizado como caso de referência. A taxa de amostragem das simulações do sistema HVDC foi igual a $12,5\mu s$, o que representa uma frequência de amostragem igual a 80 kHz.

O método proposto por Murthy *et al.* (2008) utilizou a tensão reversa das ondas viajantes, que foi calculada pelos valores de tensão e corrente DC, além da impedância característica da linha. Portanto, os dados das tensões e correntes DC e da tensão reversa das ondas viajantes foram utilizados como os dados de entrada dos filtros da Transformada *Wavelet* Discreta (TWD). Assim, o método mostra-se susceptível a erros devido às medições tanto de tensões, correntes como da impedância característica da LT. Após a detecção, foi realizada a localização das faltas por meio da equação proposta por Gale *et al.* (1993) para métodos com dados de apenas um terminal, conforme a equação 3.1. Os autores afirmaram que o método apresentou uma precisão da ordem de 99,3% de eficiência na localização das faltas em sistemas do tipo HVDC, porém não explicitaram qual foi o limiar utilizado na etapa de detecção de faltas. Ademais, não foram analisadas situações de falta com elevados valores de resistências de faltas e não foi avaliado o desempenho do método para situações com conversores do tipo VSC, ou sistemas HVDC do tipo bipolar ou multiterminal.

No trabalho proposto por Suonan *et al.* (2010) foi apresentado um método de localização de faltas em sistemas HVDC utilizando-se dados de pós-falta de tensão e corrente dos dois terminais da LT. A LT analisada no trabalho possuía uma estrutura bipolar e foi utilizado o modelo de Bergeron. Em seguida, foram calculadas as curvas de distribuição da tensão. Após a obtenção da função que regia a distribuição de tensão, a função foi minimizada e o local de falta foi obtido.

De maneira geral, os resultados obtidos no trabalho de Suonan *et al.* (2010) foram considerados satisfatórios mesmo para situações com elevadas resistências de falta. Na simulação foi utilizada uma frequência de amostragem de 100 kHz e foram necessários 12 ms para ser efetuada a localização da falta. Além disso, por utilizar dados pós-falta, o método não poderia ser implementado em tempo real. Também foram realizadas análises com dados de campo, neste caso a frequência de amostra utilizada foi de 6,4 kHz e, para esta, foi obtido um atraso de 30 ms para a localização da falta.

Em 2011 foi proposto por Kerf *et al.* (2011) um método para detectar faltas em linhas de um sistema HVDC multiterminal. Este método de detecção foi baseado na Transformada *Wavelet* Discreta Rápida ou FDWT, do inglês *Fast Dyadic Wavelet Transform*, cuja *wavelet* mãe utilizada foi a Haar. O método é composto por um conjunto de três condições independentes, sendo necessárias apenas duas destas condições para a detecção do distúrbio, ou seja, o método faz uso de redundância no processo de detecção. A primeira condição foi a detecção de falta utilizando os coeficientes *wavelet* com os dados da tensão e a segunda condição foi usando os coeficientes *wavelet* com os dados da corrente. Enquanto que a terceira e última condição foi realizar a detecção utilizando a derivada e a magnitude da tensão. Porém, uma desvantagem do método é que mesmo utilizando redundância, ele só possui uma detecção confiável se os dados de tensão forem obtidos corretamente. Logo, o método de detecção não tolera erros de medição da tensão, mesmo utilizando a redundância na detecção.

O método desenvolvido por Kerf *et al.* (2011) apresentou resultados satisfatórios, identificando inclusive em qual dos condutores ocorreu o distúrbio. Além disto, concluíram que para a detecção ser realizada de maneira mais rápida foi necessário utilizar uma menor quantidade de amostras. Para os casos simulados, a detecção ocorreu em um tempo inferior a 1 ms, entretanto foram simulados apenas curtos-circuitos com 0,01 Ω . Logo, não foi comprovado um funcionamento adequado do método para faltas com elevadas resistências de falta.

Em Nanayakkara *et al.* (2012a) foi proposto um algoritmo de localização de faltas baseado na teoria de ondas viajantes. O sistema HVDC analisado neste trabalho era composto por três trechos, duas LT aéreas conectadas por um cabo subterrâneo e todos utilizaram o modelo com os parâmetros distribuídos e dependentes da frequência. Os dados obtidos de tensão e corrente do terminal retificador e do terminal inversor estavam sincronizados pelo GPS. A Transformada *Wavelet* Contínua (TWC), com a *wavelet* mãe Haar foi utilizada para a obtenção dos instantes de chegada das ondas viajantes nos terminais da LT. Após a detecção da falta, o método de localização proposto por (GALE *et al.*, 1993) foi aplicado. Os resultados obtidos para os dados de corrente foram semelhantes aos obtidos pelos dados de tensão. A frequência de amostragem utilizada foi muito elevada e igual 2 MHz e para esta taxa de amostragem a precisão do método variou em torno de ± 400 m, para um valor menor de frequência de amostragem este erro provavelmente seria mais elevado. Uma das vantagens deste método foi o seu bom desempenho mesmo para faltas de alta impedância, além da possibilidade de adaptação para uma implementação em tempo real. Em seguida, Nanayakkara *et al.* (2012b) desen-

volveram um adaptação para a aplicação do método em sistema multiterminal do tipo radial. Porém, em ambos os métodos foi adotado um limiar fixo para a realização da detecção.

No trabalho proposto por Arruda (2012) foi desenvolvido um método de detecção de faltas em linhas de transmissão de um sistema HVDC baseado na Transformada *wavelet* Discreta Estacionária, do inglês *Stationary Wavelet Transform* (SWT). O sistema elétrico foi modelado e simulado no *software* PSCAD, em seguida foram obtidos dados de tensão e corrente, analisados com três frequências de amostragem distintas: 25 kHz, 50 kHz e 100 kHz. A localização foi realizada por quatro formas, todas baseadas no algoritmo proposto por Gale *et al.* (1993). A primeira estimou o local de faltas por meio de dados de tensão de dois terminais de um cabo e a segunda estimou o local da falta utilizando dados de tensão de somente um terminal do cabo. A terceira e quarta maneiras de detecção foram análogas à primeira e segunda, entretanto, utilizando os dados de corrente.

Os resultados do trabalho desenvolvido por Arruda (2012) mostraram que a detecção realizada por meio dos métodos que utilizaram dados de tensão e de corrente de apenas um terminal não foi satisfatória para faltas aplicadas nos terminais do condutor. Portanto, as faltas aplicadas nas subestações conversoras, independentemente da impedância de falta e da frequência de amostragem analisadas, não foram detectadas corretamente. Este fato já era esperado, visto que, não há reflexão de onda quando a falta ocorre na própria subestação. O método não apresentou um bom desempenho para faltas de alta impedância e nem mesmo para situações de faltas com valores de resistências de falta superiores a 10 Ω . Este fato ocorreu provavelmente porque foi analisado um modelo de cabo submarino, cuja impedância de surto era relativamente baixa, além de utilizar limiares fixos na etapa de detecção. Dentre as situações analisadas, o método que apresentou o melhor desempenho dentre os quatro métodos analisados, sendo este considerado satisfatório foi o método em que foram utilizados os dados de corrente de dois terminais da LT. Entretanto, o método não avaliou sistemas HVDC do tipo bipolar e multiterminal.

Em Freitas (2013) foi implementado um método de localização de faltas baseado no cálculo de impedâncias da linha por meio de proteção de distância, utilizando-se um novo modelo de linha proposto pelo autor com os parâmetros distribuídos e dependentes da frequência. Os dados de tensão e corrente foram obtidos dos dois terminais da LT e foram realizadas simulações do sistema HVDC bipolar no *software* Simulink/MATLAB. O método foi proposto como uma alternativa para os métodos baseados em ondas viajantes, que são os métodos mais utilizados comercialmente em sistemas

HVDC. Entretanto, estes métodos são mais susceptíveis às faltas de alta impedância. Neste trabalho foram simuladas faltas, cujas impedâncias de falta foram variadas de 0Ω até 400Ω , sendo aumentadas num passo de 20Ω . Portanto, a principal vantagem do método foi obter resultados de localização com boa precisão até mesmo para faltas com resistências de falta elevadas. O autor, realizou a detecção por meio do método de sobrecorrente com um limiar fixo e afirmou que para a detecção, onde há necessidade de atuação mais rápida, pode-se considerar os métodos baseados em ondas viajantes. Este fato pode ser contraditório, uma vez que a utilização destes métodos baseados em ondas viajantes trariam uma maior vulnerabilidade nos casos de faltas de alta impedância e fariam com que o método de localização não atuasse corretamente. Além dos dados de tensão e corrente das amostras em que o distúrbio iniciou, foram armazenados outros dados faltosos consequentes para que a aplicação da formulação proposta fosse possível. O método de localização apresentou um ótimo desempenho, entretanto foram analisados casos de faltas em apenas um sistema bipolar com conversores do tipo LCC.

Hassan (2014) propôs um método de localização de faltas em LTs de sistemas HVDC monopolares mistos com conversores do tipo VSC. Os sistemas analisados eram monopolares, entretanto, continham tanto linhas aéreas como cabos. O sistema composto por dois condutores distintos possuía linhas com 600 km de extensão e o composto por três condutores apresentava linhas com um comprimento total de 900 km. Os maiores erros obtidos para os casos simulados foram 0,23% para o sistema com dois segmentos e 0,15% para o sistema formado por três segmentos. O algoritmo localizador foi uma adaptação do método proposto por (GALE *et al.*, 1993) e a detecção de falta foi realizada pelo dispositivo denominado de bobina de Rogowski.

Marten *et al.* (2015) propuseram um método de detecção de faltas em sistemas multiterminais em que não há a necessidade de comunicação e que é baseada na variação dos valores de correntes e tensões. A detecção completa é constituída de três etapas. A primeira é uma definição prévia do local em que o distúrbio ocorreu, se foi numa linha DC ou na própria subestação conversora. Em seguida, verifica-se em qual linha está localizada a falta, e por fim a proteção de retaguarda que avalia as faixas de operação das correntes de linha e das tensões entre os polos e a terra. Todos os casos simulados consideraram resistências de faltas iguais a 6Ω . Logo, não se sabe se este método teria um bom desempenho para casos de faltas com valores elevados de resistência de falta.

No trabalho realizado por Hossam-Eldin *et al.* (2016) foi proposto um método de localização de

faltas em linhas de transmissão de um sistema multiterminal. O método foi baseado na teoria de ondas viajantes e utilizou a c Discreta e a lógica *fuzzy*. O método é constituído por três etapas: a detecção; a classificação; e, a localização de faltas. A detecção da linha faltosa ocorreu devido ao cálculo dos valores dos coeficientes *wavelet*, por meio das correntes das linhas, sendo a *wavelet* mãe utilizada a daubechies 4 ou a db4. Então, estas informações foram repassadas para o sistema *fuzzy*, onde seriam tomadas as decisões. As funções de pertinência do sistema *fuzzy* devem informar se ocorreu uma falta, qual a LT faltosa, e qual o tipo de falta, se ocorreu uma falta do polo positivo para o terra, do negativo para o terra ou do positivo para o negativo. Em seguida, a localização foi realizada conhecendo-se os instantes em que da primeira onda incidente e da onda refletida, conforme a equação 3.1 proposta por (GALE *et al.*, 1993). Foram obtidos resultados muito satisfatórios para os sete casos, porém, a velocidade de propagação utilizada foi a exata, o que afeta diretamente no desempenho positivo do método.

No trabalho de Bertho Jr. (2017) foi desenvolvido um algoritmo de proteção para redes multiterminais. O método utilizou diversas etapas após o processo de detecção de faltas: cálculo da Transformada *Wavelet Packet* (TWP), cálculo da energia, transformação do sistema e redução da dimensão pela Análise de Componentes Principais, do inglês *Principal Component Analysis* (PCA), classificação da falta em interna ou externa pelo sistema genético-*fuzzy*. A principal vantagem deste algoritmo é não necessitar de comunicação e apresentar uma boa seletividade mesmo para uma baixa frequência de amostragem, 2 kHz. Entretanto, ele é um método com diversas etapas e necessita configurar muitos parâmetros, além de utilizar um limiar fixo para a detecção de faltas e não atuar adequadamente para faltas com resistências elevadas.

No trabalho desenvolvido por Silva *et al.* (2018) foi feita a detecção e classificação de faltas em linhas de transmissão de um sistema bipolar do tipo HVDC-VSC. A análise foi realizada por meio da aplicação da SWT no sinal de corrente da linha HVDC. A SWT foi aplicada com a *wavelet* mãe db4, por não exigir grande esforço computacional e não inserir atrasos na detecção. O método fez uso de um limiar auto-adaptativo composto por informações da média e do desvio-padrão dos coeficientes *wavelet* do sinal de corrente em regime permanente. A principal vantagem deste método é utilizar apenas dados de um terminal e desta forma, não necessitar de um canal de comunicação. As simulações foram realizadas com uma frequência de amostragem igual a 200 kHz e foram simulados casos de faltas nas linha DC e no lado AC do inversor e do retificador, em que as resistências de falta

variaram entre 0 Ω a 1000 Ω . A principal desvantagem é que o método não apresenta redundância. Além desta desvantagem, tem-se o fato do limiar mesmo sendo auto-adaptativo, não pode ser utilizado para sistemas distintos diretamente porque é necessário avaliar a distribuição da função densidade de probabilidade do sistema e a adequar para o cálculo do limiar que faz uso do desvio padrão.

3.2 RESUMO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir é observado um resumo da revisão bibliográfica de alguns dos principais trabalhos de detecção, classificação e localização de faltas em sistemas HVDC, incluindo o método proposto, conforme a Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Resumo da Revisão Bibliográfica.

Referência	Função do Método	Classificação do Método	Dados			Tipos de Sistemas	LAA	FAR	RD	ACOM
			V	I	LT					
Gale <i>et al.</i> (1993)	LF	OV	✓	✓	–	MON, BIP e MTDC	–	–	–	–
Murthy <i>et al.</i> (2008)	DF e LF*	OV e TW	✓	✓	✓	MON	–	–	–	✓
Suonan <i>et al.</i> (2010)	LF	MDT	✓	✓	✓	BIP	–	✓	–	–
Kerf <i>et al.</i> (2011)	DF e CF	OV e TW	✓	✓	✓ [◇]	MTDC	–	–	✓*	–
Nanayakkara <i>et al.</i> (2012a)	DF e LF*	OV e TW	✓	✓	✓ [◇]	MON	–	✓	–	–
Nanayakkara <i>et al.</i> (2012b)	DF e LF*	OV e TW	✓	✓	✓ [◇]	MTDC	–	✓	–	–
Arruda (2012)	DF e LF*	OV e TW	✓	✓	✓ [◇]	MON	–	–	–	–
Freitas (2013)	LF	MIL	✓	✓	✓	BIP	–	✓	–	–
Hassan (2014)	DF e LF*	OV e MBR	✓	✓	–	MON	–	–	–	–
Marten <i>et al.</i> (2015)	DF e LF	OV, ΔI , ΔV e MAGI	✓	✓	–	MTDC	–	–	–	✓
Hossam-Eldin <i>et al.</i> (2016)	DF, CF e LF*	OV, TW e LFUZ	–	✓	✓ [◇]	MTDC	–	–	–	✓
Bertho Jr. (2017)	DF e CF	OV, TW, EN, PCA e LFUZ	–	✓	✓	MTDC	–	✓	–	✓
Silva <i>et al.</i> (2018)	DF e CF	OV e TW	–	✓	–	BIP	✓	✓	–	✓
Método Proposto	DF, CF* e LF*	OV, DER e EN	✓	✓	✓ [◇]	MON e BIP	✓	✓	✓	–

Fonte: Próprio autor.

CF* realiza a classificação de faltas baseada no tempo de trânsito das ondas viajantes

LF* realiza a localização de faltas pelo método proposto por (GALE *et al.*, 1993) ou por alguma variação do mesmo

✓[◇] o valor da linha é utilizado apenas para calcular a velocidade de propagação das ondas viajantes

✓* apesar de possuir redundância, a detecção só será realizada caso o sinal tensão seja conhecido

Legenda:

ACOM: Ausência de comunicação;

BIP: Sistema bipolar;

CF: Método de classificação de faltas;

DER: Derivada de sinais;

DF: Método de detecção de faltas;

EN: Método utiliza o cálculo da energia de um sinal;

FAR: Falta com alta resistência;

I: Sinal de corrente;

LAA: Limiar auto-adaptativo;

LF: Método de localização de faltas;

LFUZ: Método baseado na lógica fuzzy;

LT: Método utiliza os dados da linha de transmissão;

MAGI: Método utiliza a magnitude da corrente;

MBR: Método da bobina de Rogowski;

Legenda (Continuação):

MDT: Método de minimização da função de distribuição de tensão;
MIL: Método baseado no cálculo de impedâncias da linha de transmissão;
MON: Sistema monopolar;
MTDC: Sistema multiterminal;
OV: Métodos baseados na teoria de ondas viajantes;
PCA: Método realiza a Análise de Componentes Principais;
RD: Redundância de dados utilizados;
TW: Método que utiliza a transformada *Wavelet*;
V: Sinal de tensão;
 ΔI : Método utiliza a variação do sinal de corrente;
 ΔV : Método utiliza a variação do sinal de tensão.

Na Tabela 3.1, observam-se alguns métodos baseados na teoria das ondas viajantes que realizam a detecção, a classificação e a localização de faltas. Em todos esses métodos, a localização foi realizada pelo equacionamento proposto por (GALE *et al.*, 1993) ou uma adaptação do mesmo. Além disso, deve-se notar que os métodos de Gale *et al.* (1993), Nanayakkara *et al.* (2012a), Nanayakkara *et al.* (2012b), Arruda (2012) e Hassan (2014) podem ser realizados com os dados de tensão ou corrente, não sendo necessário o uso dos dois sinais.

É interessante ressaltar também que, quando é mencionado o parâmetro de falta de alta resistência, não implica que os trabalhos não mencionados não possuam um resultado satisfatório, obrigatoriamente. Ou seja, a ausência do item pode indicar duas situações: o método mencionado não apresentou resultados satisfatórios para a falta com elevado valor de resistência, ou ainda, que o trabalho não analisou faltas com esta característica.

Deve-se observar que o método de Gale *et al.* (1993) foi proposto inicialmente para análises em sistemas AC, porém a sua formulação pode ser aplicada em todos os tipos de sistemas HVDC, conforme inserido Tabela 3.1.

No Capítulo 4 serão descritas algumas das principais ferramentas matemáticas que podem ser utilizadas para facilitar detecção de distúrbios em linhas de transmissão HVDC.

FERRAMENTAS MATEMÁTICAS

Neste capítulo serão retratadas algumas ferramentas e transformadas matemáticas que podem ser utilizadas para facilitar o procedimento de detecção de faltas em linhas de transmissão.

4.1 DERIVADA DE UM SINAL

A primeira ferramenta matemática analisada será a derivada de um sinal, que é uma formulação matemática que possibilita a solução para problemas de diversas áreas (CAUMO, 2006). Dentre estas situações e problemas, possibilita a detecção de faltas em linhas de transmissão de forma rápida e pode ser aplicada tanto aos sinais de corrente, como de tensão. Em Kerf *et al.* (2011) o método foi aplicado ao sinal de tensão na análise de estratégias de proteção de um sistema MTDC.

A definição da derivada de uma função $f(t)$ é:

$$\frac{df(t)}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{f(t + \Delta t) - f(t)}{\Delta t} \approx \frac{f(t + \Delta t) - f(t)}{\Delta t}, \quad (4.1)$$

Considerando-se que os sinais serão obtidos de forma discreta e que não se pode considerar que Δt tende a zero, a derivada de um sinal $x(k)$ é descrita conforme a seguinte equação:

$$C_{Xder}(k) = \frac{X(k) - X(k - 1)}{\Delta t}, \quad (4.2)$$

em que: $C_{Xder}(k)$ é o coeficiente de derivada do sinal X para a amostra K , Δt é o período de amostragem, que nos sistemas analisados neste trabalho foi igual a $50\mu s$. Nota-se também que esse período de amostragem é o que separa a amostra $X(k)$ da amostra $X(K - 1)$ e que quanto menor o valor de Δt , mais precisa deve ser esta aproximação.

Esta técnica possui uma rápida velocidade de atuação, porém apresenta como maior dificuldade

à atenuação da magnitude das ondas viajantes quando as faltas são de alta impedância ou quando ocorrem em locais muito distantes dos pontos de medição (NAIDOO; IJUMBA, 2005).

Assim como a derivada de um sinal, serão retratadas a transformada *Wavelet*, a transformada de Park e a energia de um sinal.

4.2 TRANSFORMADA WAVELET

A transformada *Wavelet* (TW) é uma ferramenta matemática muito utilizada e que pode ser aplicada nas mais variadas áreas, dentre as quais se destacam a detecção dos transitórios eletromagnéticos em sistemas elétricos em sistemas HVDC e HVAC, (JIAN *et al.*, 1998; ELHAFFAR; LEHTONEN, 2004; COSTA, 2010; KERF *et al.*, 2011; ARRUDA, 2012; HOSSAM-ELDIN *et al.*, 2016; BERTHO Jr., 2017; SILVA *et al.*, 2018). O termo *wavelet* significa "onda pequena" no intuito caracterizar a sua natureza oscilatória, sua curta duração e energia finita, (SILVA, 2008; CRUZ, 2010).

As *wavelets* podem ser definidas como funções matemáticas que separam dados em suas diferentes componentes de frequência, e extraem cada componente com uma resolução adequada à sua escala. Elas têm vantagens em relação à análise de Fourier, pois esta última analisa o sinal como um todo, acarretando numa representação mais pobre para sinais que contêm descontinuidades e variações bruscas, (LIRA, 2004). Logo, a transformada *Wavelet* pode ser utilizada para decompor os dados de corrente e tensão de um sistema elétrico e possibilitar a detecção dos instantes de incidência dos transitórios.

Sabe-se que a TW é um método consolidado de detecção de faltas em linhas de transmissão e pode ser dividida em Transformada *Wavelet* Contínua (TWC) ou Discreta (TWD). Define-se a TWC de uma função $f(t)$ como o produto interno entre $f(t)$ e as funções *wavelet* filhas, que são obtidas a partir da *wavelet* mãe $\psi(t)$.

A TWD pode ser implementada em relés digitais e baseando-se na análise de multirresolução, Mallat (1989) propôs uma forma que pode ser analisada como um conjunto de filtros e os coeficientes de aproximação e *wavelet* da primeira escala são apresentados por 4.3 e 4.4.

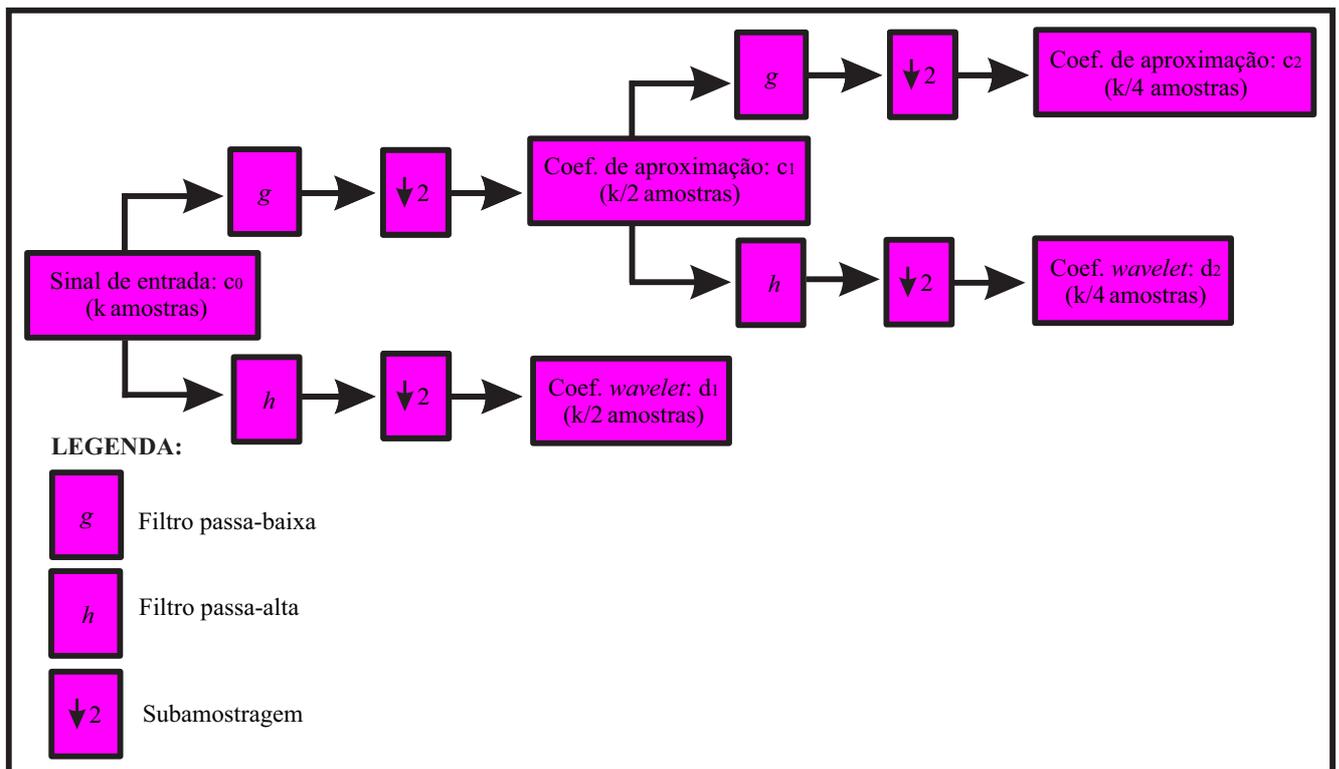
$$c_1(k) = \sum_n g(n-2k) \cdot c_0(n), \quad (4.3)$$

$$d_1(k) = \sum_n h(n-2k) \cdot c_0(n), \quad (4.4)$$

em que c_0 é o sinal de entrada; c_1 e d_1 são os coeficientes de aproximação e *wavelet* da primeira escala, respectivamente; $g(k)$ e $h(k)$ são os filtros passa-baixa e passa-alta, respectivamente.

A análise multirresolução é utilizada para descrever as etapas de decomposição de um sinal em diversos níveis. Esta decomposição hierárquica é formada por um conjunto de aproximações (baixa frequência) e detalhes (alta frequência), em que essa decomposição é realizada considerando-se uma potência de dois. O algoritmo de decomposição proposto por Mallat (1989) utiliza filtros passa-alta e passa-baixa pode ser observado na Figura 4.1.

Figura 4.1. Decomposição da *wavelet* proposta por Mallat (1989).



Fonte: Próprio autor.

As seguintes propriedades devem ser satisfeitas pelos filtros $g(n)$ e $h(n)$ da TWD, (PERCIVAL; WALDEN, 2000):

$$\sum_{e=1}^E g(e) = \sqrt{2}, \sum_{e=1}^E g^2(e) = 1, \sum_{e=-\infty}^{+\infty} g(e)g(e+2n) = 0, \quad (4.5)$$

$$\sum_{e=1}^E h(e) = 0, \sum_{e=1}^E h^2(e) = 1, \sum_{e=-\infty}^{+\infty} g(e)g(e+2n) = 0, \quad (4.6)$$

em que E é a quantidade de coeficientes dos filtros passa-baixa e passa-alta, n é um número natural e $e = 1, 2, 3, \dots, E$.

Outra propriedade é que os filtros são espelhados em quadratura, conforme as equações 4.7 e 4.8.

$$g(e) = (-1)^{e+1}h(E - e - 1), \quad (4.7)$$

$$h(e) = (-1)^e g(E - e - 1). \quad (4.8)$$

A obtenção dos coeficientes *wavelet* e de aproximação, além de ambos os filtros, dependem da *wavelet* mãe utilizada. Usando db4 como a *wavelet* mãe, pode-se obter (DAUBECHIES, 1992):

$$g(1) = \frac{1 + \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, g(2) = \frac{3 + \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, g(3) = \frac{3 - \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, g(4) = \frac{1 - \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}. \quad (4.9)$$

Então, matematicamente, teremos:

$$h(1) = g(4), h(2) = -g(3), h(3) = g(2), h(4) = g(1). \quad (4.10)$$

Substituindo 4.9 em 4.10, obtemos:

$$h(1) = \frac{1 - \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, h(2) = \frac{-3 + \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \quad (4.11)$$

$$h(3) = \frac{3 + \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, h(4) = \frac{-1 - \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}. \quad (4.12)$$

A *wavelet* mãe Haar é a mais simples dentre todas as famílias de *wavelet* mãe e pode ser considerada como a daubechies mais simples, logo:

$$g(1) = \frac{1}{2}, g(2) = \frac{1}{2}, \quad (4.13)$$

$$h(1) = \frac{1}{2}, h(2) = -\frac{1}{2}. \quad (4.14)$$

Há ainda uma variação da TWD, chamada de Transformada *Wavelet* Discreta Redundante (TWDR). A TWDR difere da Transformada *Wavelet* Discreta Clássica por não realizar subamostragem por 2 e por poder ser aplicada a qualquer número de amostras, diferentemente da TWD clássica que requer que o número de amostras seja uma potência de 2. A TWDR apresenta, de forma geral, um melhor desempenho na detecção de faltas que a TWD clássica para sistemas HVAC, conforme apresentado por Costa (2010). Neste trabalho foi utilizada a *wavelet* mãe haar e a daubechies 4 (db4). A *wavelet* mãe db4 foi escolhida por ser largamente conhecida como a mais adequada para as aplicações de sistema de potência, (KIM; AGGARWAL, 2001) e a haar pela sua simplicidade e rápida atuação.

Os filtros da TWDR são denominados de $\tilde{g}(l)$ e $\tilde{h}(l)$ e podem ser obtidos de acordo com os correspondentes filtros da TWD, (PERCIVAL; WALDEN, 2000).

$$\tilde{g}(e) = \frac{g(e)}{\sqrt{2}}, \quad (4.15)$$

$$\tilde{h}(e) = \frac{h(e)}{\sqrt{2}}. \quad (4.16)$$

Então:

$$\tilde{h}(1) = \tilde{g}(4), \tilde{h}(2) = -\tilde{g}(3), \tilde{h}(3) = \tilde{g}(2), \tilde{h}(4) = -\tilde{g}(1). \quad (4.17)$$

Portanto, teremos:

$$\tilde{g}(1) = \frac{1 + \sqrt{3}}{8}, \tilde{g}(2) = \frac{3 + \sqrt{3}}{8}, \tilde{g}(3) = \frac{3 - \sqrt{3}}{8}, \tilde{g}(4) = \frac{1 - \sqrt{3}}{8}, \quad (4.18)$$

$$\tilde{h}(1) = \frac{1 - \sqrt{3}}{8}, \tilde{h}(2) = \frac{-3 + \sqrt{3}}{8}, \tilde{h}(3) = \frac{3 + \sqrt{3}}{8}, \tilde{h}(4) = \frac{1 - \sqrt{3}}{8}. \quad (4.19)$$

Neste trabalho estão apresentadas as equações para obtenção dos coeficientes de aproximação e *wavelet*, conforme 4.20 e 4.21. Entretanto, apenas os coeficientes *wavelet* serão utilizados nesta análise da TWDR.

$$c_1(k) = \sum_{e=1}^E \tilde{g}(e) \cdot x(k+e-E), \quad (4.20)$$

$$d_1(k) = \sum_{e=1}^E \tilde{h}(e) \cdot x(k+e-E), \quad (4.21)$$

em que E é o número de amostras dos filtros.

Os conceitos básicos referentes à transformada de Park são explanados a seguir.

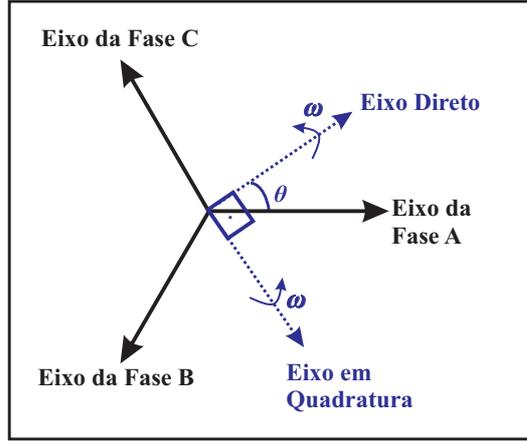
4.3 TRANSFORMADA DE PARK

A Transformada de Park (TDQ0) foi desenvolvida por R. H. Park e seus associados nos Estados Unidos. A TDQ0 foi inicialmente proposta para facilitar a análise das máquinas elétricas síncronas. A principal vantagem desta transformada é que, embora cada uma das fases do estator veja uma indutância variável no tempo devido às saliências do rotor, as grandezas transformadas giram com o rotor e veem caminhos magnéticos constantes. Em resumo, pode-se dizer que a TDQ0 decompõe as grandezas de armadura de uma máquina síncrona em duas componentes girantes, sendo uma delas alinhada com o eixo do enrolamento de campo, que é a componente de eixo direto S_d , e a outra em quadratura com este mesmo eixo, chamada de componente de eixo em quadratura S_q (FITZGERALD *et al.*, 2006).

4.3.1 Detecção pela Transformada de Park para sistema HVAC

A detecção de distúrbios transitórios em linhas de transmissão em sistemas trifásicos pela transformada de Park foi proposta por Lopes (2011). Então, na condição de regime permanente, os eixos direto e em quadratura giram em sincronismo com a frequência do sistema trifásico. Ou seja, a velocidade angular relativa entre os fasores trifásicos e os de eixos direto e em quadratura é nula. Entretanto, quando em regime transitório a velocidade relativa entre os fasores passa a ser diferente de zero, o que faz com que os sinais gerados possuam amplitudes não nulas e comportamento oscilatório. Observa-se na Figura 4.2 o diagrama dos eixos referenciais obtidos via TDQ0.

O equacionamento da transformada de Park é indicado nas equações 4.22 e 4.23. Ressalta-se que a transformada de Park pode ser utilizada tanto para os sinais de tensão, como para os sinais de corrente.

Figura 4.2. Diagrama dos eixos referenciais obtidos via TDQ0.

Fonte: Próprio autor.

$$\begin{bmatrix} S_d \\ S_q \\ S_0 \end{bmatrix} = T_{dq} \cdot \begin{bmatrix} S_a(k) \\ S_b(k) \\ S_c(k) \end{bmatrix}, \quad (4.22)$$

$$T_{dq} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\phi) & \cos(\phi - 120^\circ) & \cos(\phi + 120^\circ) \\ -\text{sen}(\phi) & -\text{sen}(\phi - 120^\circ) & -\text{sen}(\phi + 120^\circ) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}, \quad (4.23)$$

em que k é um número inteiro e a k -ésima amostra do sinal analisado; S_a , S_b e S_c são as componentes trifásicas do sistema em estudo, podendo ser tensões ou correntes; S_d , S_q e S_0 são as componentes do eixo direto, em quadratura e zero, respectivamente; $\phi = k\omega\Delta t + \theta$; ω é a frequência angular das tensões e correntes da rede; θ é o ângulo de fase da corrente do eixo direto; e Δt é o período de amostragem dos sinais analisados. Então, por meio dos componentes de eixo direto, podem ser obtidos os coeficientes de diferenças, conforme a equação 4.24.

$$C_{dif}(k) = G_{Coef} \cdot [S_d(k) - S_d(k-1)], \quad (4.24)$$

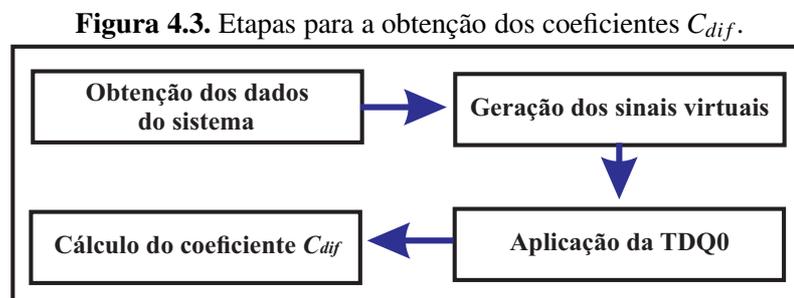
sendo G_{Coef} o ganho aplicado aos coeficientes C_{dif} e com valor igual a 1000 e $S_d(k)$ é a k -ésima amostra do sinal S_d . O ganho G_{Coef} utilizado por (LOPES *et al.*, 2013) nos sistemas em CA não exerce influência direta sobre o desempenho do algoritmo, ele é utilizado somente para garantir que os valores de energia C_{dif} muito baixos durante o regime permanente não sejam aproximados erroneamente

por zero. O estudo da transformada de Park em sistemas em corrente alternada proposto por Lopes (2011) foi a base para a aplicação desta transformada em sistemas do tipo HVDC.

4.3.2 Detecção pela Transformada de Park para sistema HVDC

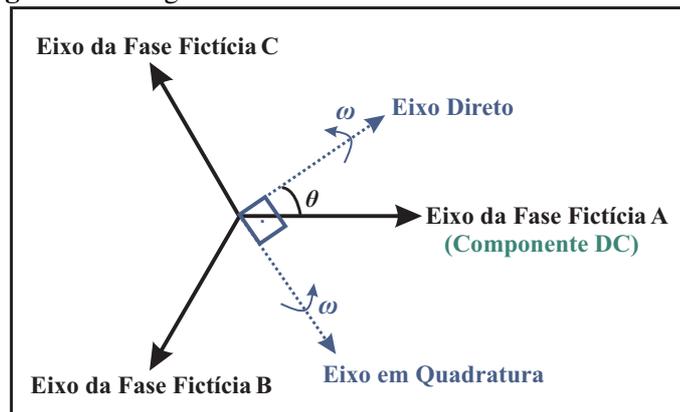
Diferentemente da utilização da transformada de Park em sistemas HVAC, o seu uso em sistemas do tipo HVDC requer que ocorra a criação de componentes fictícios. Logo, para as linhas de transmissão monopolares é necessária a criação de duas componentes fictícias para cada sinal, seja de corrente ou tensão. Enquanto que, conforme Hassan (2014), um sistema bipolar qualquer pode ser tratado como um sistema bifásico, portanto só seria necessária a criação de uma componente fictícia. Porém, como para o trabalho de tese deseja-se analisar diversos tipos de sistemas HVDC e busca-se um método mais generalista, torna-se necessário a criação de duas componentes fictícias para cada um dos polos da linha, conforme Lopes *et al.* (2014).

As etapas para a obtenção dos coeficientes C_{dif} que possibilitam a detecção de faltas em linhas de sistemas elétricos do tipo HVDC são ilustradas na Figura 4.3.



Fonte: Próprio autor.

De acordo com a Figura 4.3, tem-se que a primeira etapa é a obtenção dos dados do sistema, sendo estes dados formados pelos sinais sincronizados de corrente e tensão dos dois terminais da linha. Logo, é necessário um canal de comunicação. A etapa seguinte é a geração dos sinais fictícios por meio dos dados do sistema. Os sinais fictícios são utilizados como uma forma de, por meio de sinal de corrente ou tensão DC, simular um sistema trifásico para que a TDQ0 possa ser aplicada. Nas equações 4.25, 4.26 e 4.27 são indicados os sinais trifásicos fictícios, que também estão ilustrados na Figura 4.4.

Figura 4.4. Diagrama dos eixos referenciais obtidos via TDQ0.

Fonte: Próprio autor.

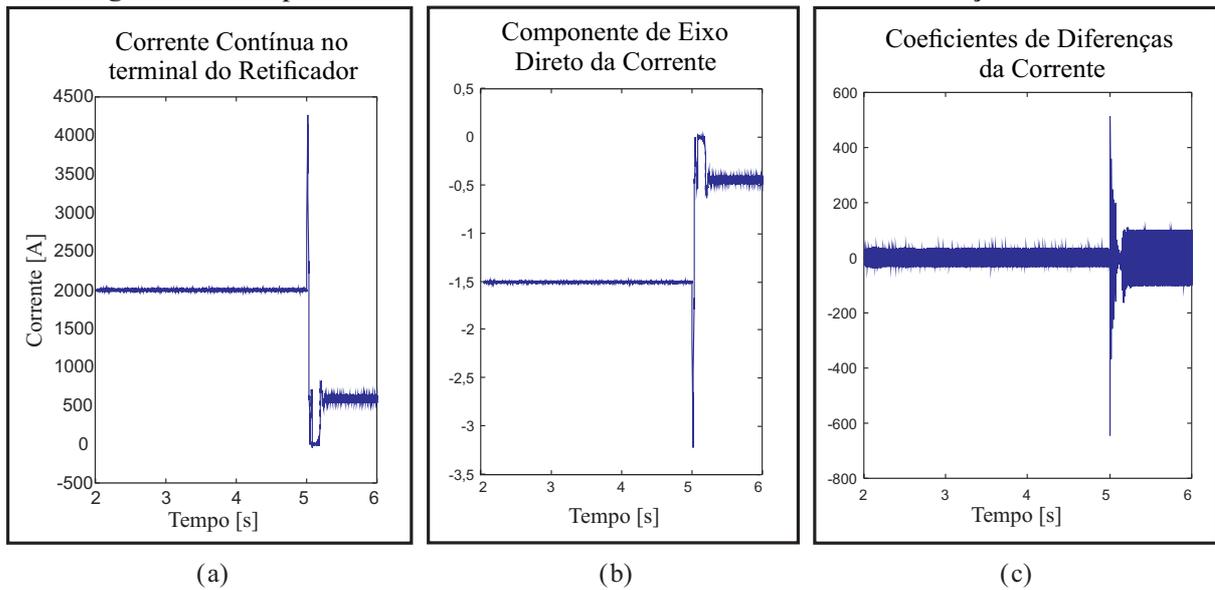
$$S_{f_A}(k) = \text{abs}(S_{dc(k)}) \cdot (\cos(\theta_{S_{dc}(k)})), \quad (4.25)$$

$$S_{f_B}(k) = \text{abs}(S_{dc(k)}) \cdot (\cos(\theta_{S_{dc}(k)} - 120^\circ)), \quad (4.26)$$

$$S_{f_C}(k) = \text{abs}(S_{dc(k)}) \cdot (\cos(\theta_{S_{dc}(k)} + 120^\circ)), \quad (4.27)$$

em que $S_{f_A}(k)$, $S_{f_B}(k)$ e $S_{f_C}(k)$ são as correntes ou tensões trifásicas fictícias, $\theta_{S_{dc}(k)}$ é o ângulo de fase da corrente I_{dc} ou da tensão V_{dc} , visto que a ideia é formar três sinais trifásicos fictícios a partir do sinal I_{dc} ou V_{dc} . Após a geração dos sinais fictícios por meio dos sinais de correntes e tensões DC $S_{dc(k)}$, a transformada de Park é aplicada nos sinais fictícios admitindo-se que a frequência da rede fosse igual a 0,05 Hz. Conforme indicado anteriormente e pelas equações 4.22, 4.23 e 4.24, podem ser obtidos os componentes de eixo direto e os coeficientes de diferenças C_{dif} , respectivamente.

Um caso de um sinal de corrente contínua medida no terminal retificador da linha de transmissão de um sistemas HVDC monopolar é ilustrado na Figura 4.5 (a). O período transitório assim que o sistema inicia a operação (0 - 2segundos) foi retirado do gráfico para evidenciar apenas o período transitório devido ao curto-circuito. O transitório nos primeiros instantes foi oriundo do sistema de controle dos conversores. Em seguida, a geração dos sinais virtuais é realizada e a transformada de Park é aplicada, conforme a 4.5 (b). Com a aplicação da transformada de Park, obtém-se a componente de eixo direto da corrente e os coeficientes de diferenças, presentes na Figura 4.5 (c).

Figura 4.5. Componente de eixo direto da corrente e coeficientes de diferença do corrente.

Fonte: Próprio autor.

4.4 ENERGIA DE SINAIS

A energia de um sinal facilita a avaliação do nível dos transitórios em sistemas elétricos de potência. A energia pode ser calculada para quaisquer sinais, sejam eles os sinais de tensão e corrente, como para coeficientes wavelet c_1 , coeficientes de aproximação d_1 , coeficientes de derivada C_{Xder} e o coeficiente de diferenças C_{dif} . A energia total para um sinal contínuo $x(t)$ é calculada pela equação 4.28.

$$\xi_x^{Total}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)|^2 dt, \quad (4.28)$$

em que $\xi_x^{Total}(t)$ é a energia total do sinal $x(t)$. No caso de um sinal discreto $x(k)$, a energia total pode ser calculada pela equação 4.29.

$$\xi_x^{Total}(k) = \sum_{-\infty}^{+\infty} |x(k)|^2. \quad (4.29)$$

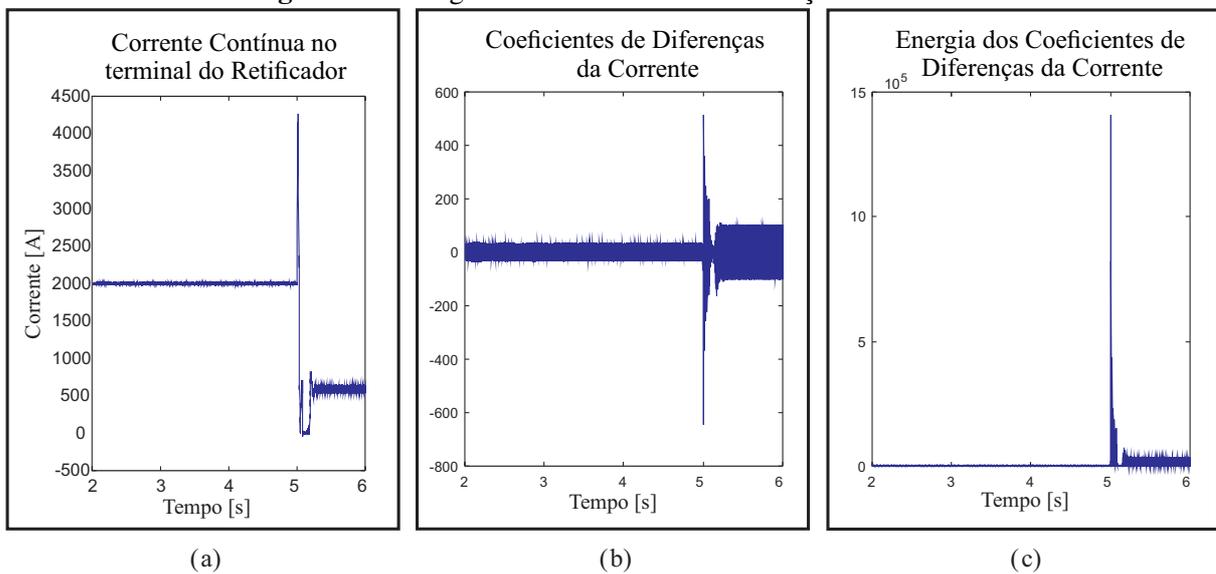
A energia também pode ser obtida de forma janelada, que é calculada conforme a equação 4.30.

$$\xi_x(k) = \sum_{n=k+1-\Delta k_{En}}^{k_2} [x(n)]^2, \quad (4.30)$$

em que $\xi_x(k)$ é a energia da k -ésima janela, Δk_{En} é o tamanho da janela deslizante.

Na Figura 4.6 é ilustrado um exemplo da corrente contínua, dos coeficientes de diferenças e da energia janelada aplicada a partir dos coeficientes de diferenças, obtidos após a aplicação da transformada de Park.

Figura 4.6. Energia dos coeficientes de diferença da corrente.



Fonte: Próprio autor.

O capítulo a seguir fornece as informações sobre o método proposto.

MÉTODO PROPOSTO

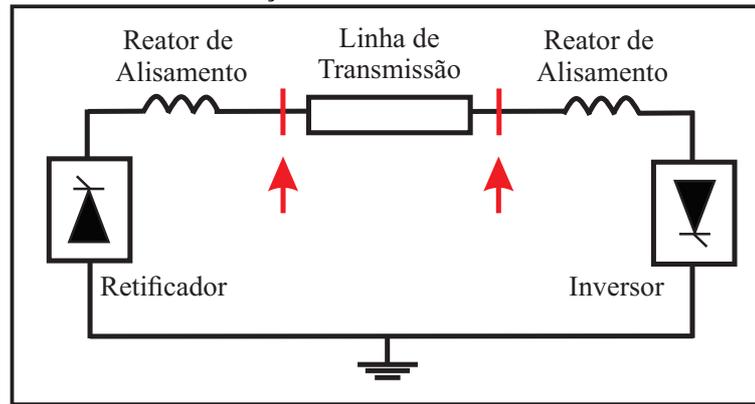
O método proposto neste trabalho de tese é referente à detecção de transitórios em linhas de transmissão. A localização de faltas propriamente dita também será realizada, porém por meio de um método clássico baseado na teoria das ondas viajantes. Já a classificação de faltas nas linhas de transmissão em sistemas HVDC fará uso dos instante de tempo em que as faltas foram detectadas nos dois terminais da linha.

Todas as etapas deste trabalho de tese foram desenvolvidas de maneira *offline*, entretanto, o método pode ser implementado em tempo real desde que o código esteja de acordo com a linguagem de programação do simulador em tempo real a ser utilizado.

A detecção de faltas necessitará da obtenção dos sinais de tensão e corrente, do cálculo da derivada dos sinais, do cálculo da energia dos coeficientes e do limiar.

5.1 SINAIS ANALISADOS

No método proposto são obtidos e analisados os dados de tensão e corrente sincronizados via GPS, que estão localizados nos dois terminais de uma linha DC, conforme a Figura 5.1. Os dados de tensão e corrente passarão pelas mesmas etapas de maneira que ambos possibilitem a detecção correta da falta, de forma a garantir uma redundância no processo de detecção. Não foram considerados atrasos ou distorções devido aos equipamentos de medição, que não foram modelados e admitiu-se que eram transdutores ideais. Também foram desprezados os atrasos no canal de comunicação, sendo estes da ordem de 1 ms para se propagar por 200 km pela fibra ótica, (MARTEN *et al.*, 2015).

Figura 5.1. Local de medição dos sinais de tensão e corrente da linha DC.

Fonte: Próprio autor.

5.2 DERIVADA DOS SINAIS

A derivada dos sinais foi utilizada por sua simplicidade de implementação e pela rapidez na detecção de distúrbios. O coeficiente associado a essa função pode ser definido conforme a equação 5.1, que foi ilustrada no capítulo anterior:

$$C_{Xder}(k) = \frac{X(k) - X(k-1)}{\Delta t}, \quad (5.1)$$

A equação pode ser reescrita em termos dos sinais de corrente e tensão, respectivamente:

$$C_{Ider}(k) = \frac{I(k) - I(k-1)}{\Delta t}, \quad (5.2)$$

$$C_{Vder}(k) = \frac{V(k) - V(k-1)}{\Delta t}, \quad (5.3)$$

em que: C_{Ider} é o coeficiente de derivada do sinal de corrente para a amostra k , $I(k)$ é a amostra k do sinal de corrente, C_{Vder} é o coeficiente de derivada do sinal de tensão para a amostra k e $V(k)$, é a amostra k do sinal de tensão. Sabendo-se que os sinais de tensão e corrente obtidos são dos terminais inversor e retificador para cada linha simulada e analisada, serão obtidos dois coeficientes de derivada de tensão e dois coeficientes de derivada de corrente para cada linha HVDC.

Observa-se que o equacionamento da derivada de um sinal se assemelha bastante ao equacionamento da TWD com a *wavelet* mãe Haar, a qual difere apenas pelo termo Δt , que na TWD Haar

é igual a 2. Ou seja, o termo resultante que multiplica a diferença das amostras dos sinais é maior para a derivada dos sinais, fator este que evidencia a diferença entre o regime permanente e o regime transitório na derivada dos sinais.

5.3 ENERGIA DOS COEFICIENTES

Esta etapa consiste no cálculo da energia dos coeficientes de derivada de tensão e corrente, que é obtida conforme a equação 5.4.

$$\xi_{C_{Xder}}(k) = \sum_{n=k+1-\Delta k_{En}}^k C_{Xder}^2(n), \quad (5.4)$$

em que Δk_{En} é o tamanho da janela deslizante e como foi indicado C_{Xder} pode ser o coeficiente de derivada de tensão e corrente.

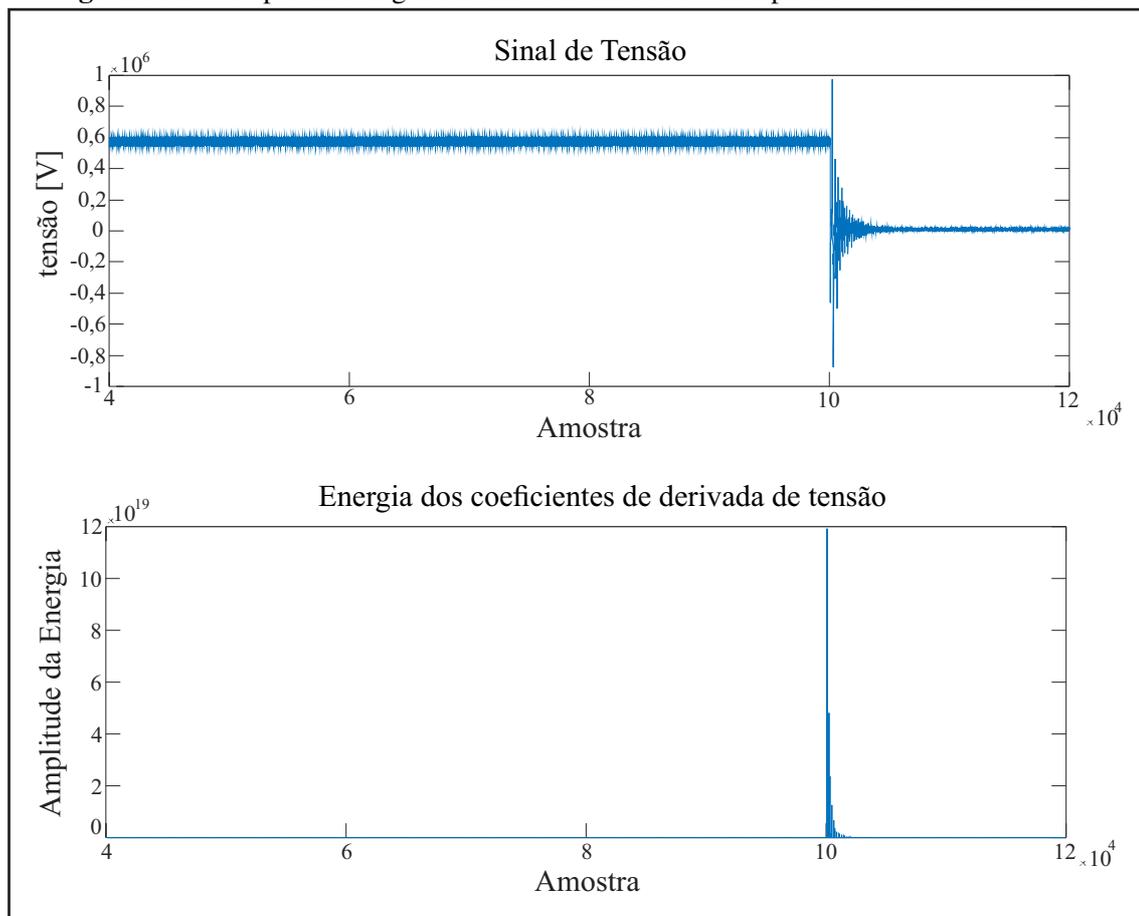
Na Figura 5.2 pode ser observado um exemplo de um sinal de tensão DC em regime transitório e a energia dos coeficientes de derivada deste sinal de tensão.

A utilização da energia também garante que todos os valores que serão obtidos no final possuam valores positivos, desta forma, não é necessária a utilização de dois limiares, um superior e um inferior. Então, por fim, a última etapa consiste no cálculo do limiar para que seja realizada a comparação com a energia dos coeficientes de derivada $\xi_{C_{Xder}}$ e a falta seja detectada adequadamente.

5.4 LIMIAR

O limiar desenvolvido neste trabalho é auto-adaptativo e é constituído de duas etapas. Um parâmetro é o desvio padrão, que deve ser obtido em um intervalo de amostras no qual seja garantido que o sistema esteja operando em regime permanente. Esse intervalo deve ser da ordem de 100 milissegundos (MELO *et al.*, 2018). Portanto, o método de detecção de faltas só funcionará corretamente se os parâmetros do limiar estiverem calibrados adequadamente.

O outro parâmetro utilizado é um fator característico do sistema, F_{CS} , que é obtido pela razão entre o valor máximo da energia dos coeficientes e a média da energia dos coeficientes, conforme a Figura 5.3, este fator se assemelha ao fator de sensibilidade desenvolvido no trabalho de (LOPES, 2014). O

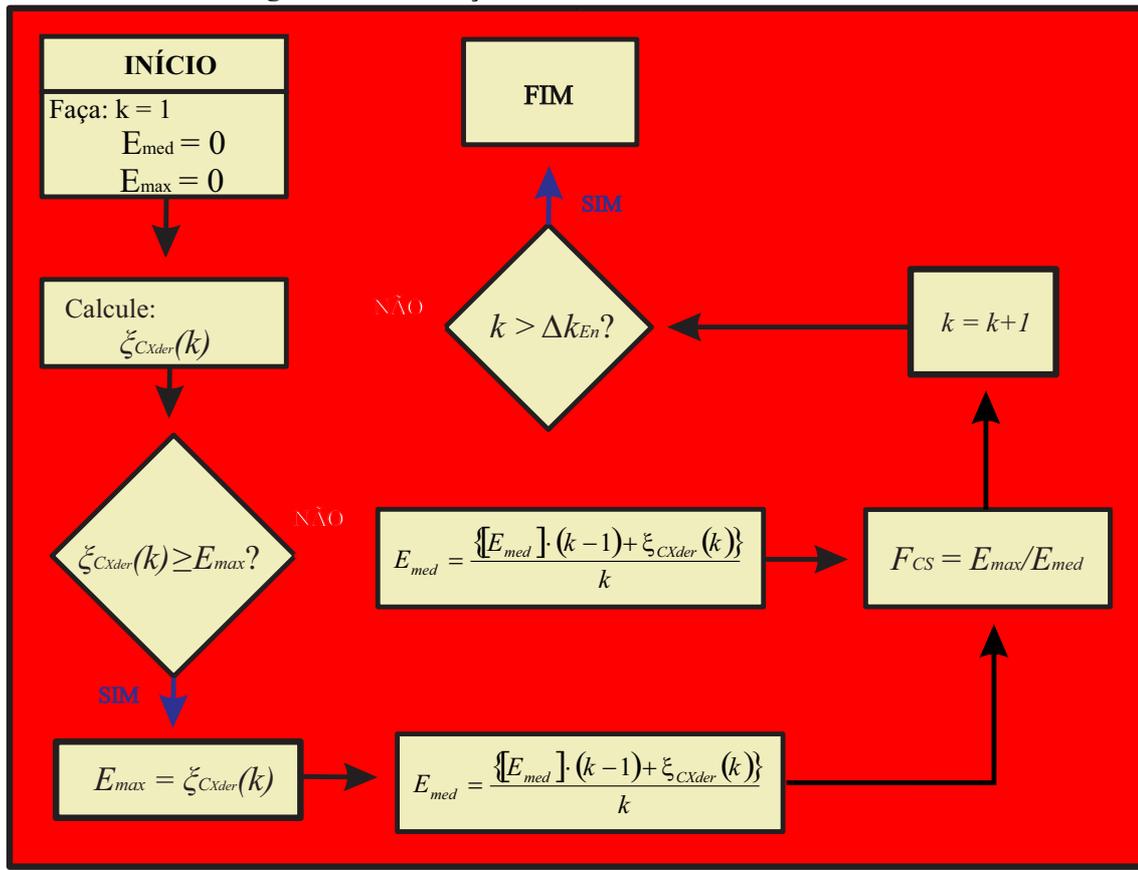
Figura 5.2. Exemplo da energia dos coeficientes de derivada para um sinal de tensão DC.

Fonte: Próprio autor.

valor do fator característico permanecerá o mesmo até que ocorra uma nova calibração. Sugere-se realizar uma nova calibração após mudanças na configuração do sistema HVDC, para que o limiar do método de detecção de faltas possa se adequar às novas características do sistema, como os níveis dos ruídos. Nesta etapa de calibração, as amostras também devem estar em regime permanente, no mesmo intervalo utilizado para a obtenção do desvio padrão. Quanto maior esse intervalo para a calibração do coeficiente característico do sistema, melhor será a calibração. Entretanto, quanto menor for esse intervalo, maior é a garantia do sistema estar em regime permanente na etapa de calibração. O instante de calibração de 100 milissegundos foi utilizado para todos os casos de faltas analisados, incluindo sistemas de transmissão HVDC com configurações distintas.

O fator característico do sistema, F_{CS} , irá se adequar, automaticamente, às características do sistema. Os valores calculados de F_{CS} para os sistemas monopolar, bipolar e o sistema com linhas AC e DC foram da ordem de 1,5 e 6. As informações do desvio padrão e do fator característico do sis-

Figura 5.3. Calibração do fator característico do sistema.



Fonte: Próprio autor.

tema são suficientes para a obtenção de uma detecção correta e não é necessário nenhum parâmetro empírico para cada configuração distinta do sistema.

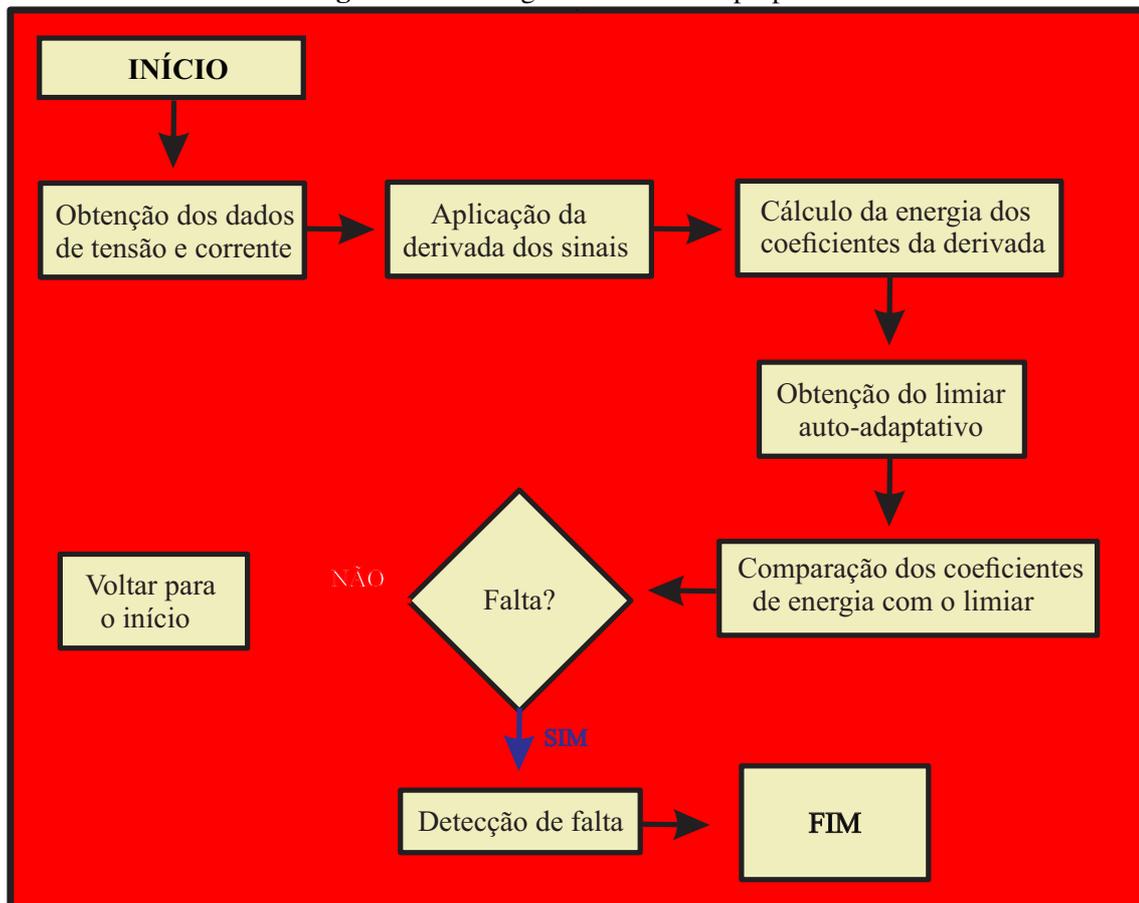
Logo, o limiar utilizado é dado pela equação 5.5.

$$\text{limiar} = (\xi_{C_{Xder}}(k-1) + \text{desvio}) \cdot (F_{CS}), \quad (5.5)$$

em que: $\xi_{C_{Xder}}(k-1)$ é a amostra da energia dos coeficientes de derivada, do sinal de tensão ou corrente, anterior à amostra energia dos coeficientes de derivada analisada, *desvio* é o desvio padrão da energia durante um curto período de tempo em que o fator característico do sistema foi calibrado e no qual foi garantido que o sistema estava em regime permanente e o F_{CS} é calculado conforme ilustrado na Figura 5.3. Portanto, quando a amostra atual da energia dos coeficientes de derivada $\xi_{C_{Xder}}(k)$ de um parâmetro for maior que o limiar, um *flag* referente a este parâmetro é ativado para indicar que uma falta foi detectada.

Na Figura 5.4 tem-se um fluxograma com todas as etapas do método proposto.

Figura 5.4. Fluxograma do método proposto.



Fonte: Próprio autor.

Após a detecção das faltas pelo método proposto, a localização foi realizada conforme o método desenvolvido por Gale *et al.* (1993) para métodos com dados de dois terminais da linha.

No Capítulo 6 serão ilustrados 1620 casos de faltas aplicadas em um sistema monopolar e bipolar. Os resultados do método proposto serão comparados com outras técnicas de detecção.

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MÉTODOS

Neste capítulo são avaliados o desempenho de variados métodos de detecção e um método clássico de localização de faltas em linhas de transmissão DC. Foram analisados seis métodos de detecção de faltas, em que três métodos utilizaram a transformada *wavelet* e suas variações, um método que utilizou a transformada de Park e dois métodos que fizeram uso da derivada de sinais, sendo um destes métodos o proposto que é composto pela derivada de sinal em conjunto com a energia de coeficientes.

Os resultados dos métodos foram avaliados considerando-se o desempenho no que concerne às etapas de detecção e localização de faltas em LTs por meio de dados sincronizados de dois terminais.

6.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE AS SIMULAÇÕES REALIZADAS

Os sistemas do tipo HVDC foram modelados no MATLAB[®], assim como os métodos de detecção e o de localização. O MATLAB/Simulink é um *software* utilizado em diversos trabalhos para a modelagem de sistemas HVDC (FREITAS, 2013; JINGXIN, 2013; SANJEEVIKUMAR *et al.*, 2014; CUI; TU, 2015).

Os resultados foram analisados por meio dos erros absoluto, relativo e admissível. O erro absoluto é simplesmente a diferença entre o local estimado e o real local da falta. Enquanto que, o erro relativo ou percentual é proporcional à razão entre o erro absoluto e o comprimento da LT. O erro relativo é indicado para uma análise mais generalista, pois independe do comprimento da LT. Estes dois tipos de erros estão ilustrados nas equações 6.1 e 6.2.

$$E_{Abs} = | D_{real} - D_{estimada} |, \quad (6.1)$$

$$E_{Perc} = \frac{E_{Abs} \cdot 100}{l}, \quad (6.2)$$

em que E_{Abs} é o erro absoluto, D_{real} é o local exato em que a falta foi aplicada, $D_{estimada}$ é o local

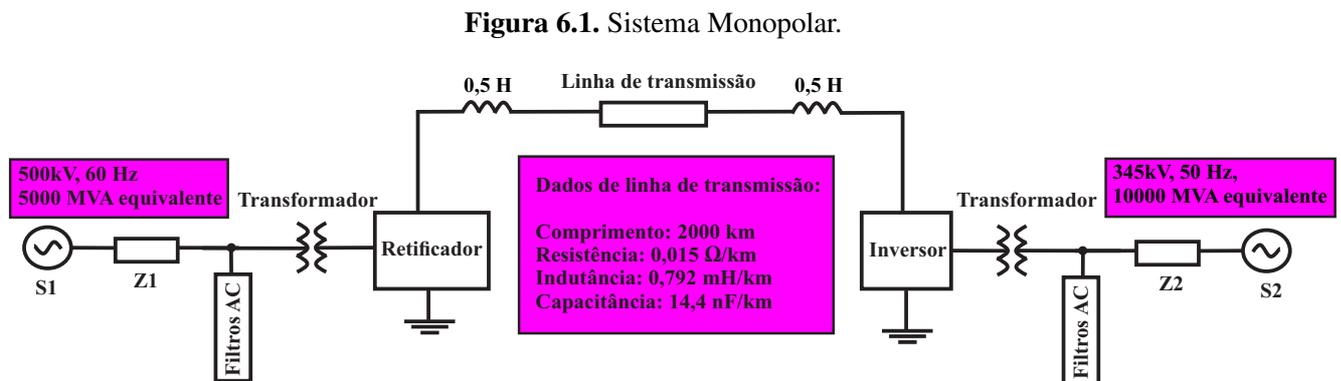
estimado pelo algoritmo localizador, E_{perc} é o erro percentual ou relativo e l é o comprimento total da linha de transmissão. Além destes dois tipos de erro, tem-se o erro admissível que é um erro utilizado para os métodos baseados na teoria das ondas viajantes, pois estes apresentam limitações devido aos dispositivos físicos. Ou seja, é o erro que é admissível devido à frequência de amostragem utilizada pelos conversores analógico-digital (conversores A/D). O erro máximo esperado para as localizações de faltas em LT, em módulo, é proporcional à metade do período de amostragem, de acordo com a equação 6.3, (RTDS TECHNOLOGIES INC., 2008).

$$E_{Ad} \approx \frac{\Delta t \times v_c}{2}, \quad (6.3)$$

em que v_c é a velocidade da luz ($\approx 300.000 \text{ km/s}$) e Δt é o período de amostragem. Como estas simulações foram realizadas com um período de amostragem igual a $50 \mu\text{s}$, tem-se que o erro admissível é igual a 7,5 km, em módulo.

6.1.1 Sistema Monopolar

O primeiro sistema do tipo HVDC analisado foi o monopolar, modelado conforme a Figura v. O sistema monopolar modelado foi um sistema fictício com 1000 MW, 500 kV, 2 kA e uma LT com 2000 km de extensão. O modelo de Bergeron foi utilizado para a modelagem da LT.



No Apêndice serão indicados os demais dados utilizados para simular tanto o sistema monopolar, como o bipolar.

Foram analisadas 90 condições de faltas, que podem ser observadas na Tabela 6.1.

Tabela 6.1. Condições de faltas - sistema monopolar.

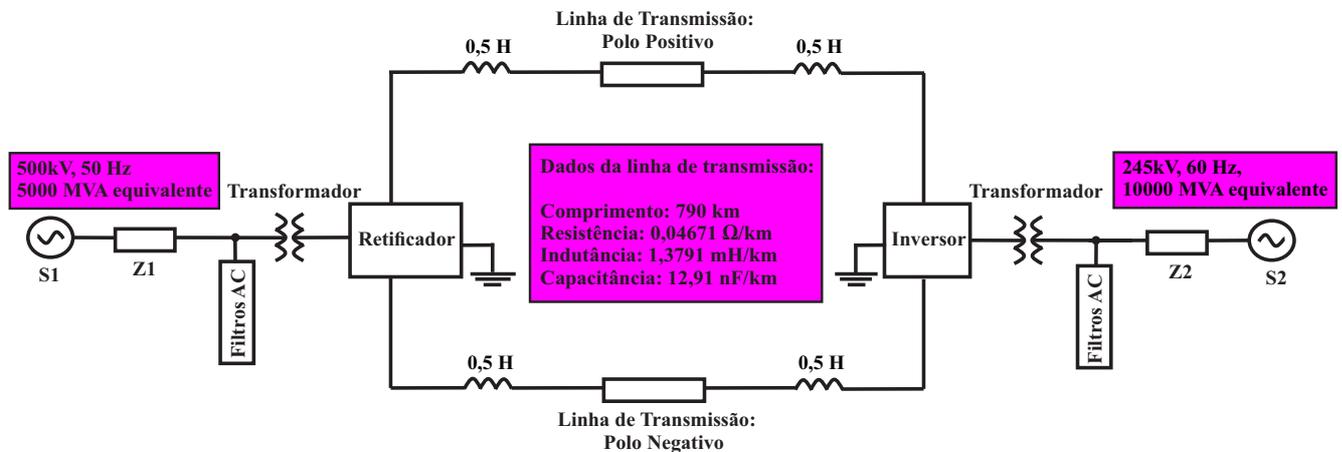
Resistência [Ω]	0, 1; 0, 2; 0, 5; 1; 3; 5; 10; 30; 50 e 100
Local de Falta [km]	200; 400; 600; 800; 1000; 1200; 1400; 1600 e 1800

Fonte: Próprio autor.

6.1.2 Sistema Bipolar

O sistema bipolar analisado foi modelado conforme a Figura vii. Esse sistema bipolar utilizado foi um sistema fictício que simulou o sistema de Furnas, a ligação entre Foz do Iguaçu e Ibiuna. Este sistema de transmissão é de ± 600 kV e com extensão de 790 km. Observa-se que as condições de faltas analisadas para este sistema estão indicadas na Tabela 6.2 e totalizam 1530 situações de faltas para o sistema bipolar.

Figura 6.2. Sistema Bipolar.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 6.2. Condições de faltas - sistema bipolar.

Resistência [Ω]	0, 1; 0, 2; 0, 5; 1; 3; 5; 10; 30; 50 e 100
Local de Falta [km]	15; 20; 25; 30; ...; 760; 765; 770 e 775

Fonte: Próprio autor.

6.2 MÉTODOS SIMULADOS

Neste capítulo foram avaliados seis métodos de detecção de faltas em linhas de transmissão DC, conforme mencionado anteriormente. A escolha dos métodos que utilizaram variações da transformada *wavelet* ocorreu devido ao seu grande uso e bom desempenho que é bastante recorrente na literatura. Quanto ao método proposto que utiliza a TDQ0, ele foi escolhido por apresentar excelentes resultados na detecção de faltas em sistemas HVAC. O algoritmo baseado na derivada de um sinal foi analisado por apresentar uma perspectiva de bons resultados sem necessitar de grandes esforços computacionais.

O primeiro método simulado fez uso da TWD haar e utilizou os sinais de tensão e corrente e um limiar fixo. O segundo método implementado utilizou a TWD com a *wavelet* mãe db4 e também foi usado um limiar de valor fixo. Em seguida, foi analisado um método que é numa variação da TWD, a TWDR cuja *wavelet* mãe utilizada também foi a db4. O quarto método simulado usou a derivada dos sinais de tensões e correntes. O quinto método usou a TDQ0, a derivada e o cálculo da energia de coeficientes, além de utilizar um limiar auto-adaptativo. Por fim, o último método fez uso da derivada dos sinais de tensão e corrente e do cálculo da energia, e assim como o quinto método, utilizou-se de um limiar auto-adaptativo.

Os métodos analisados podem ser resumidos de acordo com a Tabela 6.3.

Tabela 6.3. Resumo dos métodos analisados.

Método	Ferramenta Matemática	Limiar
Método 1	TWD Haar	fixo
Método 2	TWD db4	fixo
Método 3	TWDR db4	fixo
Método 4	Derivada do sinal	fixo
Método 5	TDQ0, Derivada do sinal e Energia	Auto-adaptativo
Método 6	Derivada do sinal e Energia	Auto-adaptativo

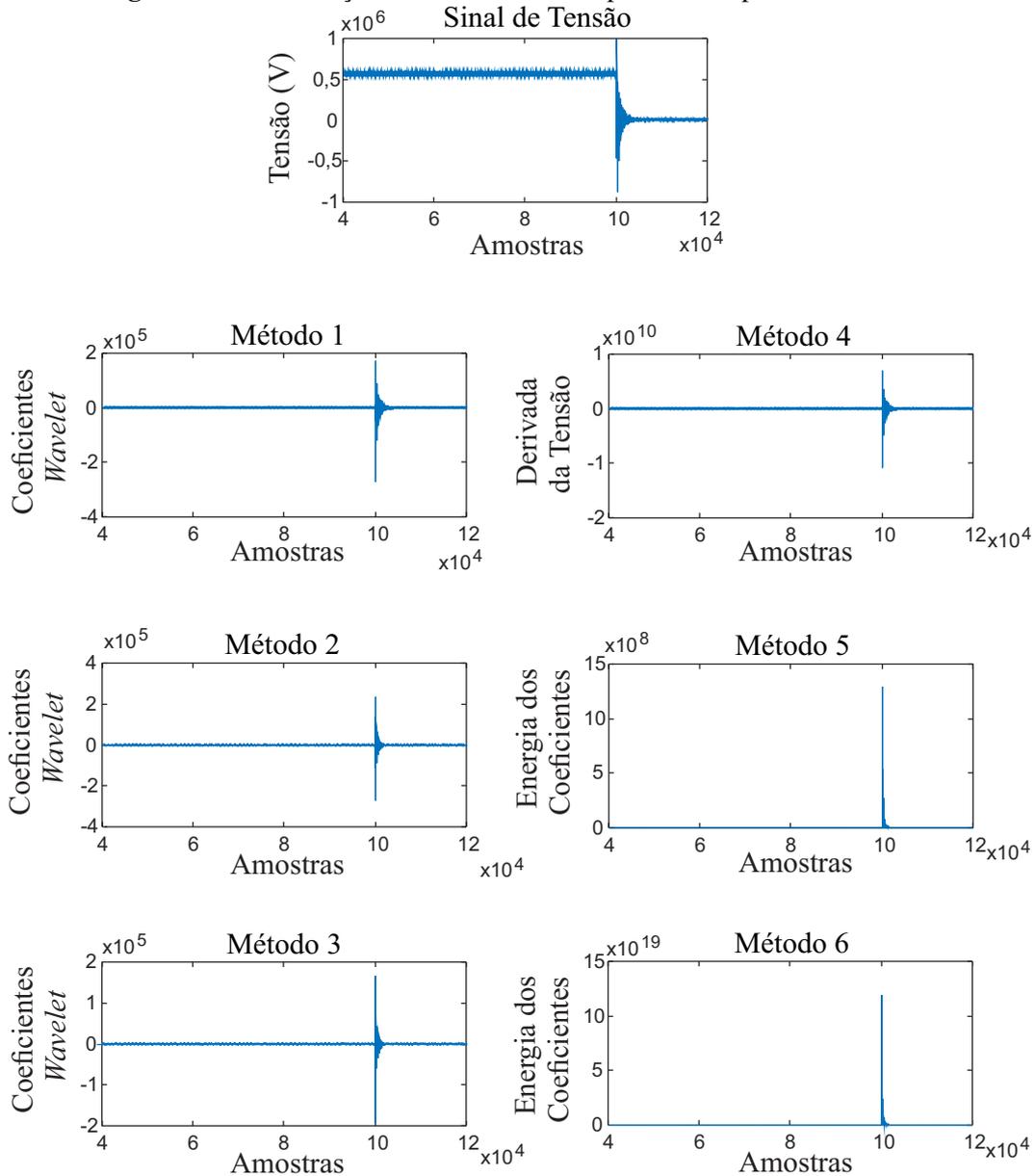
Fonte: Próprio autor.

A seguir é ilustrado na Figura 6.3 um exemplo com um sinal de tensão e o resultado deste sinal após a aplicação de cada um dos métodos de detecção de faltas. Observa-se que quando utiliza-se a energia dos coeficientes, pode-se utilizar um limiar apenas positivo. Logo, nestas situações não é necessária a utilização de dois limiares para a análise de uma só variável.

Após a detecção de faltas pelos seis métodos indicados na tabela 6.3 e na Figura 6.3, utilizou-se de

um método clássico para a localização de faltas. O método clássico utilizado foi proposto por (GALE *et al.*, 1993) e é baseado na teoria das ondas viajantes. Em seguida, após a detecção e localização das faltas, foram calculados os erros absolutos e relativos para cada caso de falta.

Figura 6.3. Modificações no sinal de tensão provocadas por cada método.

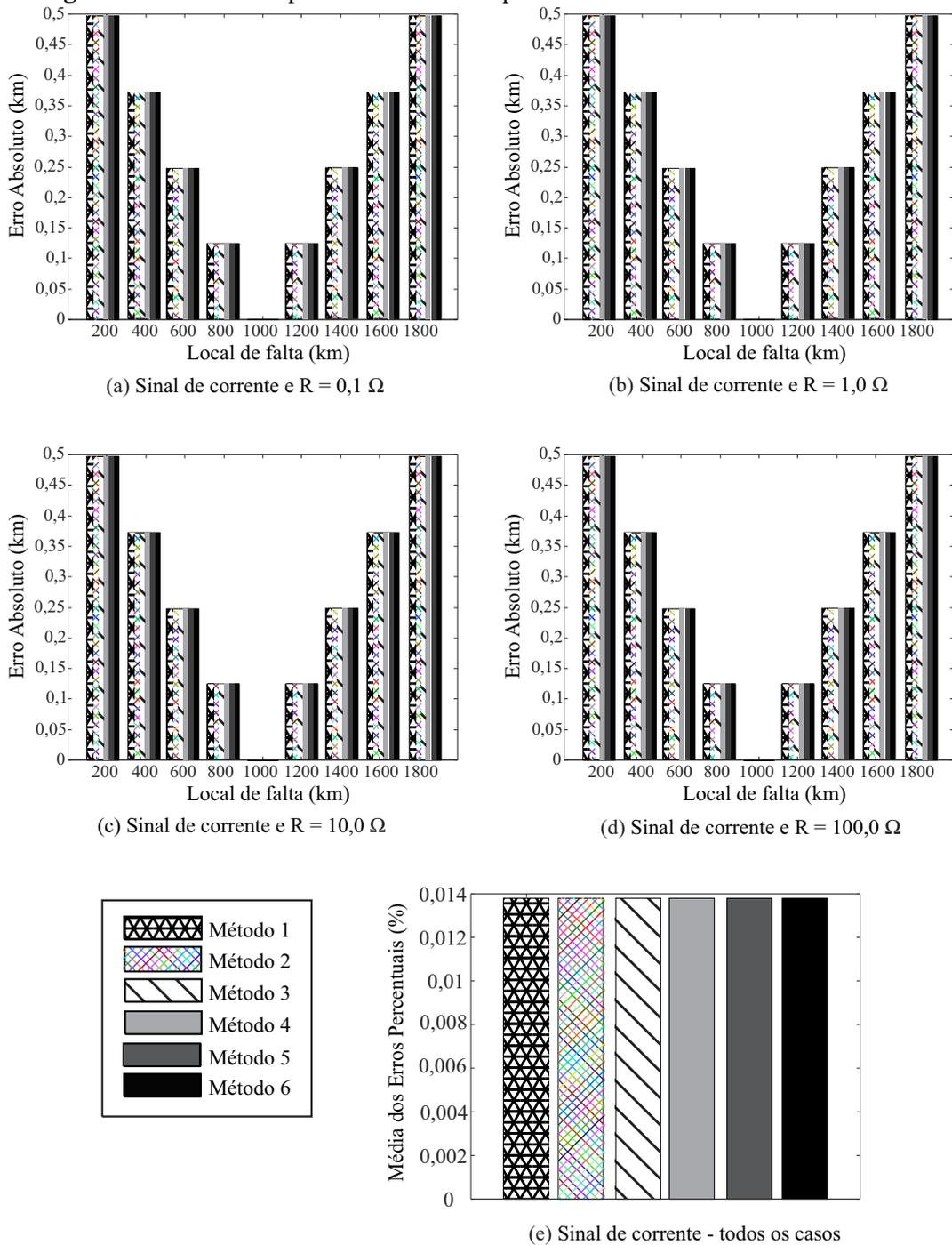


Fonte: Próprio autor.

6.3 RESULTADOS DA ANÁLISE COMPARATIVA

Nas figuras 6.4 e 6.5 estão ilustrados os erros absolutos para alguns casos de faltas e a média dos erros relativos para todos os casos de falta dos métodos de detecção do sistema monopolar analisado.

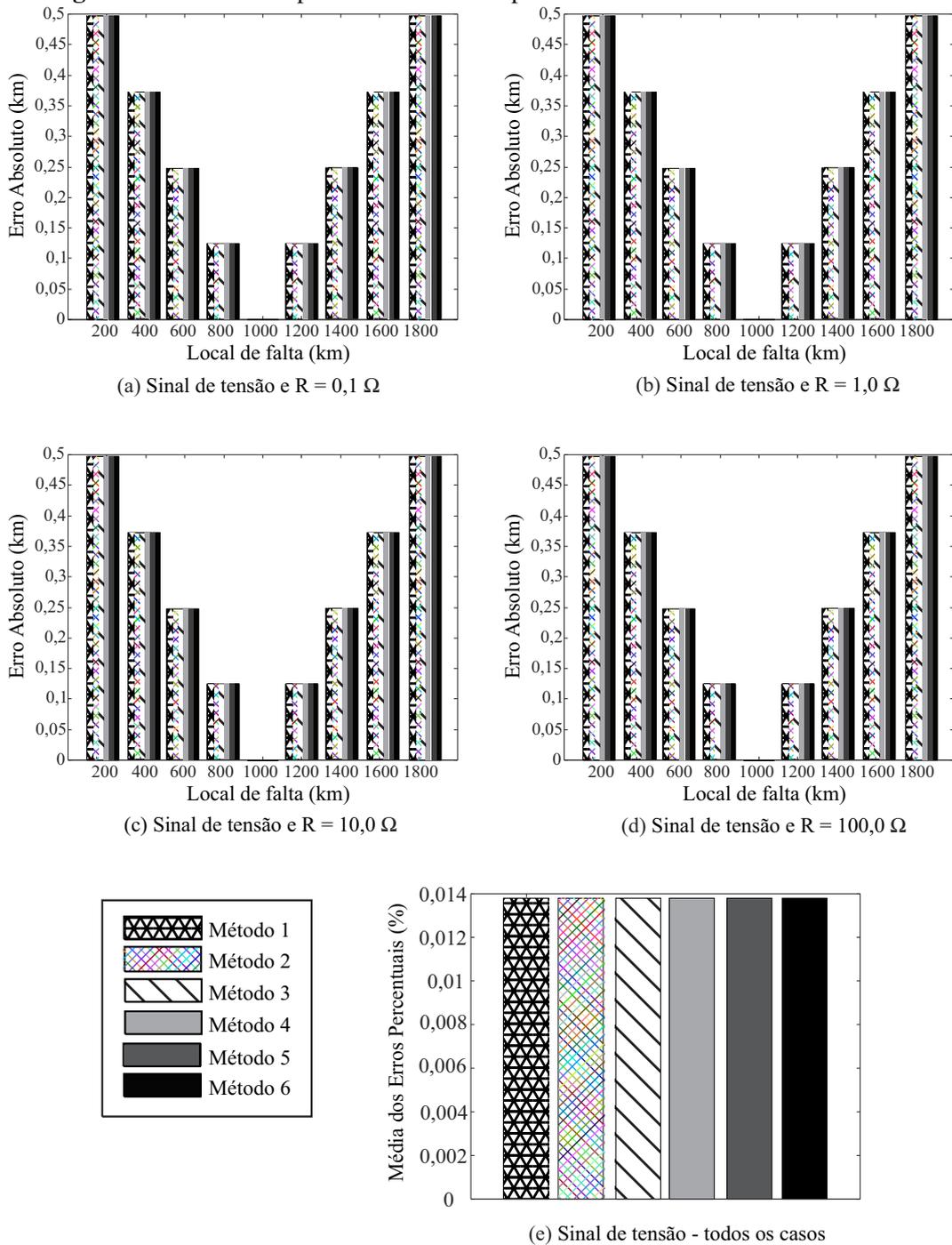
Figura 6.4. Resultados para o sistema monopolar utilizando-se os dados de corrente.



Fonte: Próprio autor.

Observou-se que, a mudança nas resistências de falta não exerceu mudança na localização, nem mesmo para as faltas com alto valor de resistência. Esta característica é muito importante, visto que a maioria dos métodos baseados na teoria das ondas viajantes possui dificuldades para realizar a detecção e localização nestas condições.

Figura 6.5. Resultados para o sistema monopolar utilizando-se os dados de tensão.

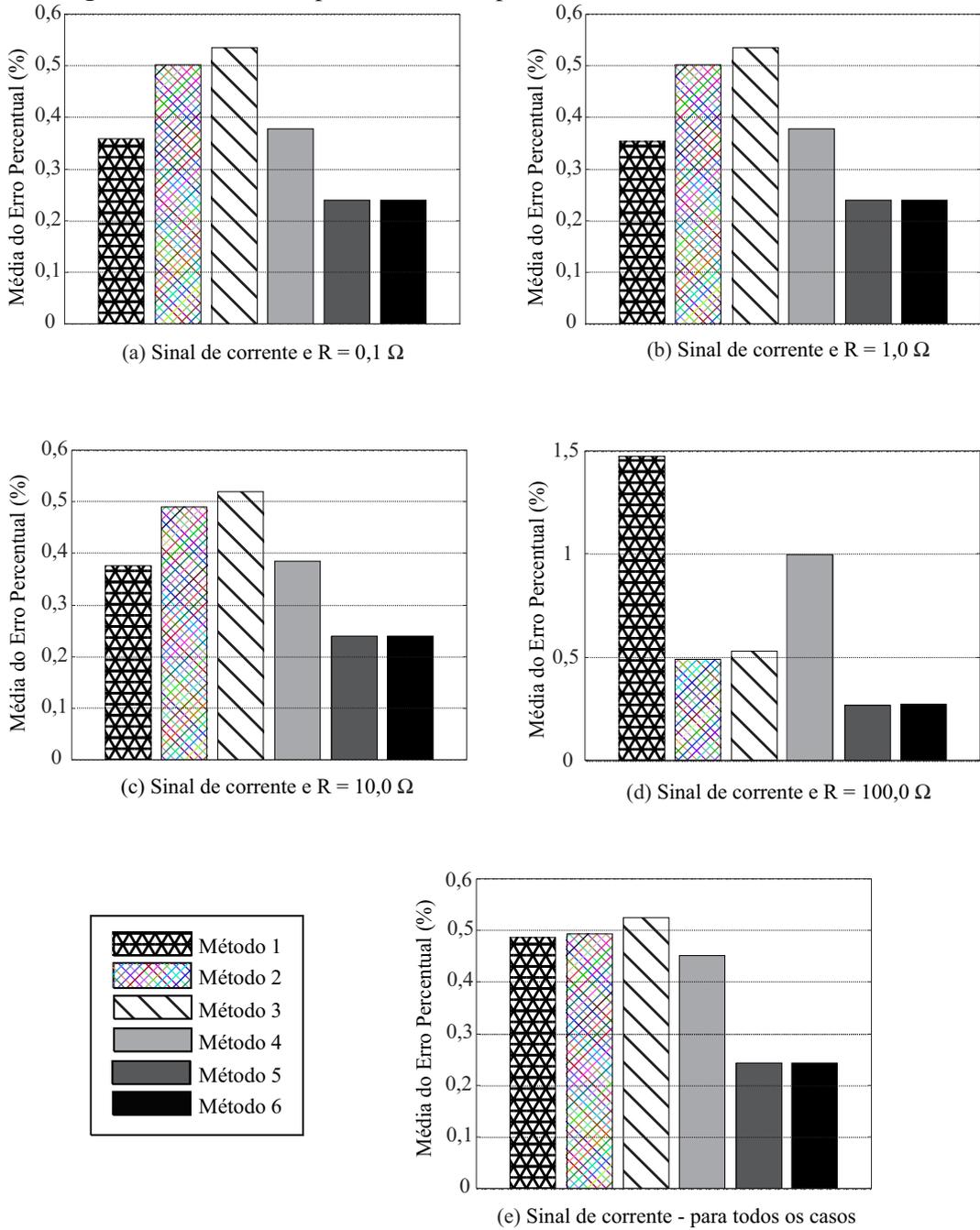


Fonte: Próprio autor.

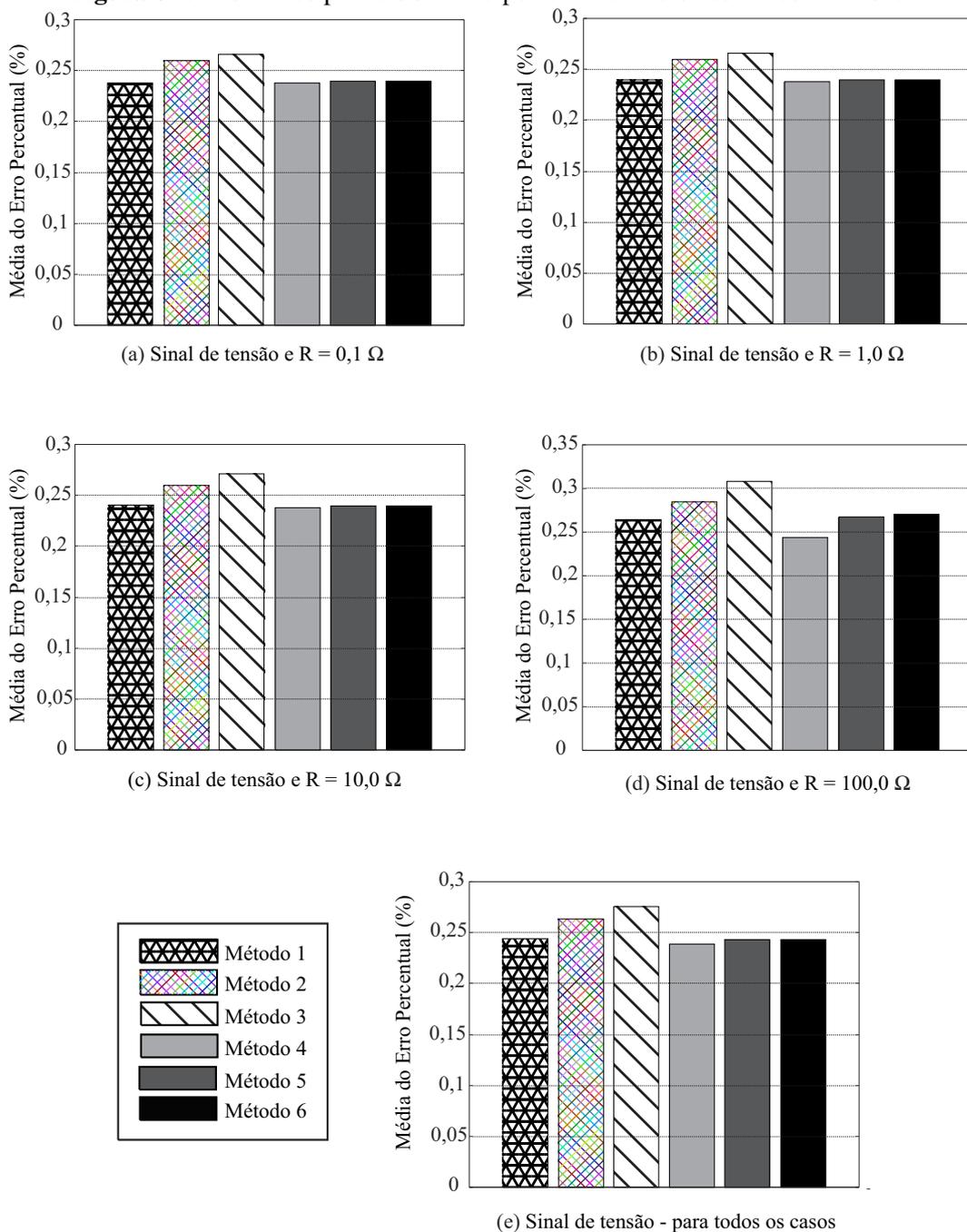
Nos resultados para os 90 casos de faltas aplicadas no sistema monopolar, notou-se que todos os métodos de detecção apresentaram o mesmo desempenho e possibilitaram a detecção correta em 100% dos casos, tanto quando tomou-se como base o sinal de corrente quanto o sinal de tensão. Ademais, a média para os erros relativos foram iguais a 0,0138 %.

Nas figuras 6.6 e 6.7 estão indicadas as médias dos erros relativos para alguns casos de faltas e a média dos erros relativos para todos os casos de falta dos métodos de detecção do sistema bipolar analisado.

Figura 6.6. Resultados para o sistema bipolar utilizando-se os dados de corrente.



Fonte: Próprio autor.

Figura 6.7. Resultados para o sistema bipolar utilizando-se os dados de tensão.

Fonte: Próprio autor.

Nos casos analisados do sistema bipolar, o desempenho dos seis métodos foram distintos. Quando analisados os sinais de corrente, os métodos 5 e 6 apresentaram um melhor desempenho com um erro relativo médio total de 0,243%, para os 1530 casos de falta. Porém, quando foram analisados os sinais de tensão, o melhor desempenho foi do método 4 que obteve um erro relativo médio igual a 0,238%. Entretanto, isso só foi possível devido à escolha do limiar fixo apropriado conforme um

estudo empírico específico deste sistema HVDC. De maneira geral, observou-se o bom desempenho dos métodos propostos 5 e 6. Em especial o método 6 por ser de maior simplicidade, apresentar um bom desempenho, com erro médio total para o sistema monopolar aproximado de 0,014% e 0,243% para o sistema bipolar. Ambos os métodos propostos possuem um algoritmo de cálculo de limiar auto-adaptativo adequado para diferentes sistemas e condições de falta, além de apresentarem uma redundância e funcionarem apenas com os sinais de corrente ou sinais de tensão.

No capítulo a seguir serão indicados os atrasos do método proposto para os sistemas monopolar e bipolar. Também será observado o desempenho para a redundância dos sinais de tensão e corrente.

ANÁLISE DA REDUNDÂNCIA E ATRASOS DO MÉTODO

Neste capítulo é realizada a análise da redundância do método para os sistema monopolar e bipolar e também a obtenção dos atrasos na detecção de faltas pelo método proposto.

7.1 SISTEMA MONOPOLAR

Para o sistema monopolar, com uma linha com 2000 km de extensão, as faltas foram aplicadas variando-se o local de falta em: 200 km, 400 km, 600 km, 800 km, 1000 km, 1200 km, 1400 km, 1600 km, 1800 km, ou seja foram nove casos de faltas atrelados a cada valor de resistência de falta. Sabendo-se disso, tem-se a Tabela 7.1 que indica a quantidade de *flags* ativados conforme o valor das resistências de falta e a característica de redundância do método de detecção proposto.

Tabela 7.1. Flags de detecção - Sistema monopolar.

Resistência [Ω]	Sinal I_{Ret}	Sinal I_{Inv}	Sinal V_{Ret}	Sinal V_{Inv}
0,1	9	9	9	9
0,2	9	9	9	9
0,5	9	9	9	9
1,0	9	9	9	9
3,0	9	9	9	9
5,0	9	9	9	9
10,0	9	9	9	9
30,0	9	9	9	9
50,0	9	9	9	9
100,0	9	9	9	9
TOTAL	90	90	90	90

Fonte: Próprio autor.

Portanto, pela Tabela 7.1 observa-se que para os casos de faltas analisados, há uma redundância em todos os casos, ou seja, a falta poderia ser detectada perfeitamente apenas pelos dados de corrente ou pelos dados de tensão. A seguir tem-se a Tabela 7.2 que indica os instantes de incidência da falta nos terminais retificador e inversor, T_{IF1} e T_{IF2} , respectivamente. Além destes instantes, na Tabela 7.2

também estão indicados os instantes de detecção de falta em nos dois terminais, T_{DF1} e T_{DF2} , sendo todos os instantes obtidos em segundos.

Tabela 7.2. Instantes de detecção de faltas em segundos - Sistema monopolar.

RF [Ω] LF[km]	0,1	0,5	1	10	100
200	$T_{IF1} = 5,00065$				
	$T_{IF2} = 5,00605$				
	$T_{DF1} = 5,00070$				
	$T_{DF2} = 5,00610$				
400	$T_{IF1} = 5,00135$				
	$T_{IF2} = 5,00540$				
	$T_{DF1} = 5,00140$				
	$T_{DF2} = 5,00545$				
600	$T_{IF1} = 5,00200$				
	$T_{IF2} = 5,00470$				
	$T_{DF1} = 5,00205$				
	$T_{DF2} = 5,00475$				
800	$T_{IF1} = 5,00270$				
	$T_{IF2} = 5,00405$				
	$T_{DF1} = 5,00275$				
	$T_{DF2} = 5,00410$				
1000	$T_{IF1} = 5,00335$				
	$T_{IF2} = 5,00335$				
	$T_{DF1} = 5,00340$				
	$T_{DF2} = 5,00340$				
1200	$T_{IF1} = 5,00405$				
	$T_{IF2} = 5,00270$				
	$T_{DF1} = 5,00410$				
	$T_{DF2} = 5,00275$				
1400	$T_{IF1} = 5,00470$				
	$T_{IF2} = 5,00200$				
	$T_{DF1} = 5,00475$				
	$T_{DF2} = 5,00205$				
1600	$T_{IF1} = 5,00540$				
	$T_{IF2} = 5,00135$				
	$T_{DF1} = 5,00545$				
	$T_{DF2} = 5,00140$				
1800	$T_{IF1} = 5,00605$				
	$T_{IF2} = 5,00065$				
	$T_{DF1} = 5,00610$				
	$T_{DF2} = 5,00070$				

Fonte: Próprio autor.

Na Tabela 7.2 observaram-se atrasos iguais a $50 \mu\text{s}$, o que equivale a uma amostra. Porém, estes atrasos não afetaram na localização das faltas, visto que estas são obtidas pela diferença dos instantes

de detecção nos dois terminais, portanto, desde que os atrasos sejam idênticos nos dois terminais, não serão inseridos erros devidos à detecção.

7.2 SISTEMA BIPOLAR

No sistema bipolar as faltas foram aplicadas variando-se o local de falta em: 15 km, 20 km, 25 km, 30 km, 35 km, 40 km, 45 km, ..., 750 km, 755 km, 760 km, 765 km, 770 km e 775 km, logo foram 153 casos de faltas associados à cada valor de resistência de falta. Portanto, na Tabela 7.3 é indicada a quantidade de *flags* ativados conforme o valor das resistências de falta e a característica de redundância do método de detecção proposto.

Tabela 7.3. Flags de detecção - Sistema bipolar.

Resistência [Ω]	Sinal I_{Ret}	Sinal I_{Inv}	Sinal V_{Ret}	Sinal V_{Inv}
0,1	153	153	153	153
0,2	153	153	153	153
0,5	153	153	153	153
1,0	153	153	153	153
3,0	153	153	153	153
5,0	153	153	153	153
10,0	153	153	153	153
30,0	153	153	153	153
50,0	153	153	153	153
100,0	139	153	153	153
TOTAL	1516	1530	1530	1530

Fonte: Próprio autor.

Na Tabela 7.3 observou-se que a redundância estava presente para todos os casos de faltas com valores de resistência de falta iguais ou inferiores a 50 Ω . Porém, nos casos de faltas com resistências de falta iguais a 100 Ω , a redundância atingiu 90,85% dos casos. No geral, considerando-se todos os casos de faltas analisados para o sistema bipolar, 99,08% dos casos apresentaram redundância.

Para realizar uma análise dos atrasos na detecção similar ao sistema monopolar, foram selecionados nove locais de faltas e cinco valores de resistência de faltas de acordo com a Tabela 7.4.

Tabela 7.4. Instantes de detecção de faltas em segundos - Sistema bipolar.

RF [Ω]					
LF[km]	0,1	0,5	1	10	100
15	$T_{IF1} = 5,00005$				
	$T_{IF2} = 5,00325$				
	$T_{DF1} = 5,00010$				
	$T_{DF2} = 5,00330$				
100	$T_{IF1} = 5,00040$				
	$T_{IF2} = 5,00290$				
	$T_{DF1} = 5,00045$				
	$T_{DF2} = 5,00295$				
200	$T_{IF1} = 5,00080$				
	$T_{IF2} = 5,00245$				
	$T_{DF1} = 5,00085$				
	$T_{DF2} = 5,00250$				
300	$T_{IF1} = 5,00125$				
	$T_{IF2} = 5,00205$				
	$T_{DF1} = 5,00130$				
	$T_{DF2} = 5,00210$				
395	$T_{IF1} = 5,00165$				
	$T_{IF2} = 5,00165$				
	$T_{DF1} = 5,00170$				
	$T_{DF2} = 5,00170$				
500	$T_{IF1} = 5,00210$				
	$T_{IF2} = 5,00120$				
	$T_{DF1} = 5,00215$				
	$T_{DF2} = 5,00125$				
600	$T_{IF1} = 5,00250$				
	$T_{IF2} = 5,00080$				
	$T_{DF1} = 5,00255$				
	$T_{DF2} = 5,00085$				
700	$T_{IF1} = 5,00295$				
	$T_{IF2} = 5,00350$				
	$T_{DF1} = 5,00300$				
	$T_{DF2} = 5,00040$				
775	$T_{IF1} = 5,00325$				
	$T_{IF2} = 5,00005$				
	$T_{DF1} = 5,00330$				
	$T_{DF2} = 5,00010$				

Fonte: Próprio autor.

De forma semelhante à Tabela 7.2 observou-se atrasos iguais a $50 \mu s$ na Tabela 7.4. Como foi dito anteriormente, os atrasos não originaram erros na localização das faltas, pois a localização é calculada pela diferença dos instantes de detecção nos dois terminais e os atrasos nos dois terminais foram iguais.

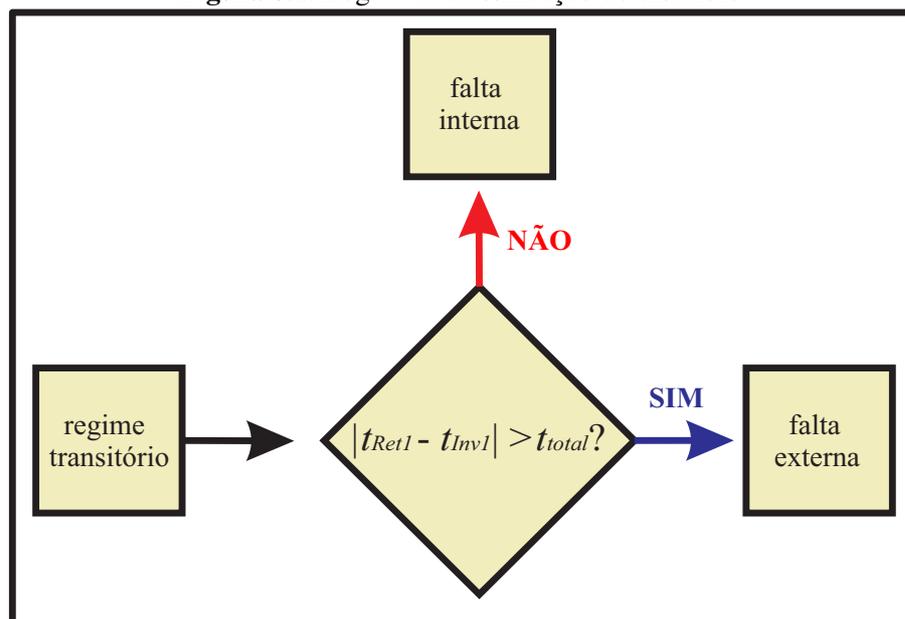
No capítulo seguinte será realizada a análise de um sistema fictício híbrido, formado tanto por linhas de transmissão AC como DC.

ANÁLISE DE SISTEMAS HÍBRIDOS

A análise de um sistema que possui tanto a transmissão AC como DC é realizada neste capítulo. São aplicadas faltas em ambas partes do sistema para avaliar o desempenho do método de detecção proposto. A localização de faltas também é obtida por meio do método proposto por Gale *et al.* (1993). E a classificação das faltas em internas ou externas também é realizada.

A classificação das faltas em internas ou externas a linha DC é realizada comparando-se o tempo de trânsito com os instantes de falta nos dois terminais da linha. Estes instantes de falta são obtidos pelo método de detecção. Já o tempo de trânsito é o tempo total que uma onda viajante levaria para ir de um terminal retificador ao inversor, (SCHWEITZER III *et al.*, 2015, 2016; SILVA Jr., 2018). Este tempo de trânsito τ pode ser calculado conhecendo-se o comprimento l da linha e a velocidade aproximada de propagação das ondas viajantes v_{sp} . Logo, a lógica da classificação pode ser observada na Figura 8.1.

Figura 8.1. Lógica da classificação do distúrbio.



Fonte: Próprio autor.

Pela Figura 8.1, tem-se que: t_{Total} , também conhecido como tempo de trânsito τ , é o tempo total que uma onda viajante levaria para ir do terminal retificador ao inversor, t_{Ret1} é o tempo da primeira onda incidente no terminal retificador e t_{Inv1} é o tempo da primeira onda incidente no terminal inversor.

8.1 SISTEMA HÍBRIDO

O sistema foi modelado de acordo com a Figura 8.2, no qual são observadas duas linhas DC de um sistema bipolar e duas linhas trifásicas, sendo uma interligada ao terminal inversor e outra ao terminal retificador. Então, aplicaram-se curtos-circuitos nas duas linhas DC do sistema bipolar e na fase C da linha AC conectada ao terminal retificador e na fase A da linha AC conectada ao terminal inversor.

No total foram 360 casos de curto-circuitos, que foram dispostos de acordo com a Tabela 8.1

Tabela 8.1. Condições de faltas - sistema híbrido.

Resistência [Ω]	0, 1; 0, 2; 0, 3; 0, 6; 1; 3; 6; 10; 30 e 60
Local de Falta [%]	10; 20; 30; 40; 50; 60; 70; 80 e 90

Fonte: Próprio autor.

Os demais dados deste sistema elétrico podem ser encontrados no Apêndice.

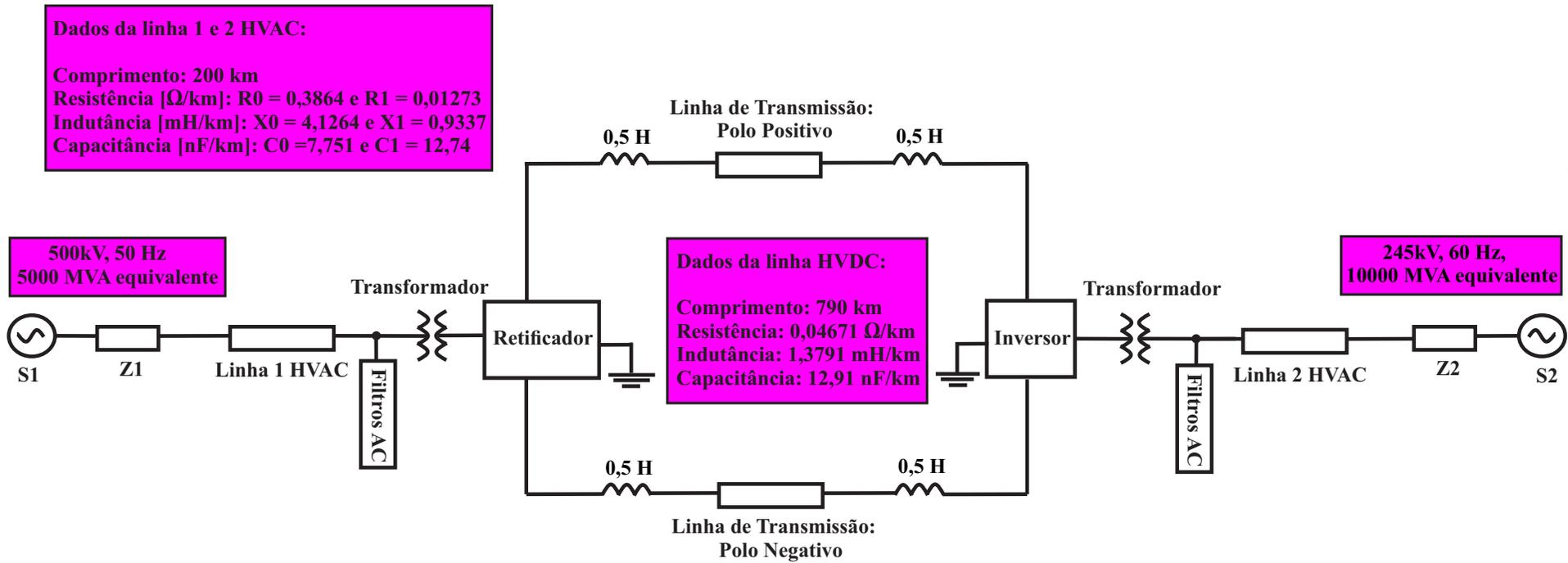


Figura 8.2. Sistema Híbrido.

8.2 RESULTADOS PARA O SISTEMA HÍBRIDO

O método proposto atuou corretamente, conforme a Figura 8.1, e não detectou, nos terminais das linhas DC, os curto-circuitos aplicados nas linhas AC para nenhum dos 180 casos, de acordo com a Tabela 8.2. Ou seja, nos 90 casos em que a falta foi aplicada na linha AC 1, foram detectadas 87 faltas externas e para os 90 casos em que a falta foi aplicada na linha AC 2, nenhuma falta foi detectada nos terminais da linha DC. Enquanto isso, as faltas aplicadas na linha DC foram detectadas corretamente, sendo determinada inclusive qual o polo da linha DC faltosa.

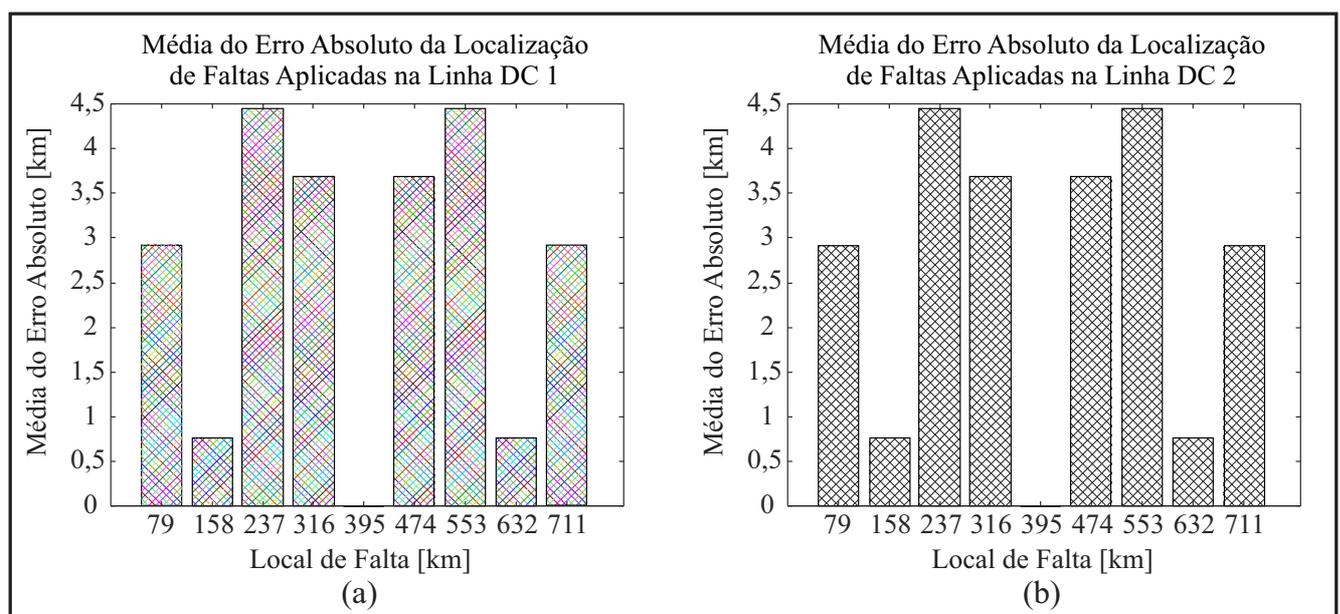
Tabela 8.2. Resultados em relação à classificação do tipo de faltas.

Aplicação de faltas nas linhas	Deteção de faltas internas (DC)	Deteção de faltas externas (AC)
AC 1	0	87
AC 2	0	0
DC 1(Polo Positivo)	90	0
DC 2(Polo Negativo)	90	0

Fonte: Próprio autor.

Os erros absolutos e percentuais do método de detecção e classificação, atuando em conjunto com o método de localização de (GALE *et al.*, 1993) estão ilustrados nas Figuras 8.3 e 8.4.

Figura 8.3. Média do erro absoluto para a localização das faltas aplicadas nas linhas DC 1 e DC 2.

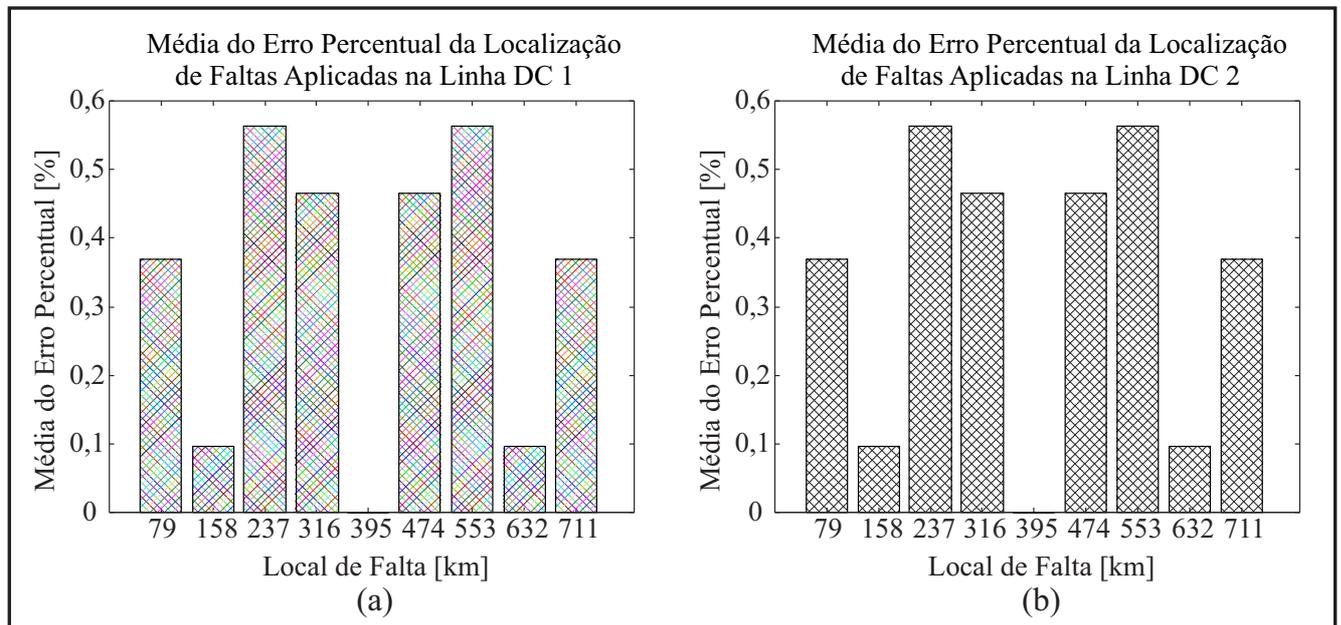


Fonte: Próprio autor.

A Figura 8.3 (a) ilustra o erro absoluto obtido na localização de faltas aplicadas na linha DC 1

(Polo Positivo) e a 8.3 (b) o erro absoluto para faltas aplicadas na linha DC 2 (Polo Negativo).

Figura 8.4. Média do erro percentual para a localização das faltas aplicadas nas linhas DC 1 e DC 2.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 8.4 (a) é mostrado o erro percentual na localização de faltas na linha DC 1 e na (b) para faltas aplicadas na linha DC 2. Obteve-se pelas simulações dos 180 casos de faltas nas linhas DC que a média geral dos erro percentuais na localização de faltas foi igual a 0,3323 % e foi o mesmo valor para os dois polos do sistema bipolar. As simulações mostraram que os resultados de localização variam apenas com o local da falta, ou seja, a mudança nos valores das impedâncias de faltas, não acarretaram em mudanças nos erros de localização. Observou-se também que para todos os casos o erro absoluto máximo igual a 4,4463 km, foi inferior ao erro máximo admissível de 7,5 km, o erro admissível está relacionado à frequência de amostragem, que para as simulações realizadas com este sistema foi igual a 20 kHz.

Pelo exposto neste capítulo, pode-se concluir que o método proposto não deve ser utilizado para a detecção nas linhas AC, quando for utilizado apenas os dados de tensão e corrente da linha DC. Entretanto, o método proposto possibilita a detecção correta nos casos de curto-circuitos nas linhas DC e permite classificação de qual a linha DC faltosa, diferenciando faltas internas e externas. Além disso, o método apresenta bons resultados na localização de faltas.

No Capítulo 9 são feitas as conclusões e as sugestões de trabalhos futuros.

CONCLUSÕES

Neste trabalho de tese, foi proposto um novo método de detecção de faltas em linhas de transmissão em sistemas do tipo HVDC. O método de detecção de faltas foi baseado na derivada dos sinais de corrente e tensão e fez uso de um limiar auto-adaptativo. Os dados de corrente e tensão foram utilizados de forma redundante para garantir a detecção adequada automaticamente, mesmo quando ocorresse a perda de um dos dados, de corrente ou de tensão. Os dados sincronizados de tensão e corrente foram medidos nos dois terminais da linha DC. Após a medição dos sinais de tensão e corrente, a derivada dos sinais foi calculada. Na sequência, calculou-se a energia das derivadas e obteve-se o limiar auto-adaptativo. Por fim, foi feita a comparação para determinar se o sistema estava em regime permanente ou faltoso.

Em seguida, realizou-se a estimação do local das faltas por um método clássico baseado na teoria das ondas viajantes. Foram avaliados 1980 casos de faltas para três sistemas distintos, sendo: um sistema monopolar, um sistema bipolar e um sistema híbrido com um sistema bipolar conectado a linhas AC. Estes sistemas tiveram configurações e dados de linhas de transmissão distintos. Porém, todos os sistemas utilizaram os conversores do tipo LCC com taxa de amostragem igual a $50 \mu s$. Já as condições de faltas variaram de acordo com o local e a resistência de faltas.

Os resultados indicaram erros relativos médios iguais a $0,014 \%$ na localização das faltas, para os 90 casos de faltas aplicados no sistema monopolar e as faltas foram detectadas adequadamente em todos os casos analisados. Na análise do sistema bipolar foram simulados 1530 casos de curto-circuitos e a média dos erros percentuais foi igual a $0,243 \%$. Realizou-se também uma comparação do método proposto com outros métodos, que fizeram uso da derivada dos sinais, das transformadas *wavelet* e TDQ0. O método proposto apresentou erros médios gerais, quando considerou-se dados de tensão e corrente, iguais ou inferiores aos demais métodos. Um método baseado na TDQ0 também foi analisado e apresentou erros idênticos ao método proposto, porém demandou um maior esforço computacional.

Além de todos os erros serem inferiores ao erro máximo admissível, os atrasos na detecção de faltas no sistema monopolar e bipolar foram no máximo uma amostra, ou $50 \mu s$. Observou-se também que a redundância foi de 100% para o sistema monopolar e 99,085% para o bipolar. Portanto, o método proposto conciliou simplicidade com um excelente desempenho nestes casos.

Para o sistema híbrido, que é composto por linhas AC e DC, foram avaliados 360 casos de faltas, sendo 90 casos de faltas para cada linha. Obteve-se uma detecção e classificação correta das faltas para as linhas DC. Entretanto, o método proposto não atuou corretamente para a detecção das faltas nas linhas AC, fato este que é aceitável visto que os sinais medidos nos terminais das linhas DC são atenuados pelas subestações conversoras. Porém, nos 180 casos de faltas aplicadas nas linhas DC, o algoritmo detectou corretamente e apresentou erros médios na localização das faltas iguais a 0,332%.

De maneira geral, conclui-se que o método proposto é simples, rápido e versátil, por se adequar a diversas configurações de sistemas. O método proposto apresentou um bom desempenho detectando corretamente 100% dos 1800 casos de faltas em linhas DC simulados e com atrasos de no máximo uma amostra.

Como sugestão para trabalhos futuros tem-se:

- Analisar a influência dos para-raios, transdutores e disjuntores no método proposto;
- Realizar simulações em tempo real;
- Realizar testes para diferentes frequências de amostragem e com a perda de sincronismo dos dados;
- Realizar simulações considerando o atraso do canal de comunicação;
- Avaliar o desempenho do método em sistemas multiterminais;
- Evoluir para aplicações em relés.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABB. Abb solves 100-year-old electrical puzzle - new technology to enable future dc grid. November 2012. Acesso em 23 de abril de 2018. Disponível em: <<http://www.abb.com/cawp/seitp202/e84e6cf2b5200c57c1257aaf003cb9dd.aspx>>.
- ALMUTAIRY, I.; ASUMADU, J. A novel dc circuit breaker design using a magnetically coupled-inductor for dc applications. *2018 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, p. 1–5, January 2018.
- AMETANI, A. The history of transient analysis and the recent trend. *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, v. 2, n. 5, p. 497 – 503, 2007.
- ARAÚJO, A. E. A.; NEVES, W. L. A. *Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Energia*. Belo Horizonte, MG - Brasil: Editora UFMG, 2005.
- ARRUDA, F. O. M. *Localização de Falhas em Sistemas de Transmissão em Corrente CONTínua (HVDC) Utilizando Transformada Wavelet*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de São João Del-Rei e CEFET-MG, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, 2012.
- BAHRMAN, M. P.; JOHNSON, B. K. The abcs of hvdc transmission technologies. *IEEE Power and Energy Magazine*, v. 5, n. 2, p. 32 – 44, 2007.
- BERTHO Jr., R. *Um Novo Algoritmo de Proteção para Redes HVDC Multiterminais*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, Brasil, 2017.
- BEWLEY, L. V. *Travelling Waves on Transmission Systems*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1963.
- BMTE. Belo monte transmissora de energia realizou a cerimônia de inauguração da primeira linha de transmissão de energia de ± 800 kv uhvdc da América latina. 2017. Acesso em junho de 2018.

- Disponível em: <<http://www.bmte.com.br/belo-monte-transmissora-de-energia-realizou-no-dia-21-de-dezembro-de-2017-em-ibiraci-mg-a-cerimonia-de-inauguracao-a-primeira-linha-de-transmissao-de-energia-de-±800-kv-uhvdc-ultrahigh-volta/>>.
- BMTE. Belo Monte Transmissora de Energia (BMTE) - A Empresa. 2018. Acesso em 07 de junho de 2018. Disponível em: <<http://www.bmte.com.br/the-company/>>.
- CAMARGO, C. C. de B. *Transmissão de energia elétrica: Aspectos Fundamentais*. Florianópolis, Brasil: Editora da UFSC/Eletróbrás, 1984.
- CASORIA, S. Thyristor-based hvdc transmission system. 2015. Acesso em 20 de março de 2018. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/thyristor-based-hvdc-transmission-system-detailed-model.html>>.
- CAUMO, L. *Aplicação e Cálculo da Derivada de Sinais de Processos Industriais*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil, 2006.
- COSTA, F. B. *Uma Técnica de Diagnóstico em Tempo Real de Distúrbios Transitórios Baseada na Transformada Wavelet Para Uso em Registradores Digitais de Perturbação*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, julho 2010.
- COURY, D. V.; OLESKOVICZ, M.; GIOVANNI, R. *Proteção Digital de Sistemas Elétricos de Potência: dos Relés Eletromecânicos aos Microprocessados Inteligentes*. São Carlos: Edgard USP, 2007.
- CRUZ, M. C. S. da. *Localização de Faltas em Linhas de Transmissão de Múltiplos Terminais a partir de Registros Oscilográficos Sincronizados Via Transformada Wavelet*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Rio Grande do Norte, Brasil, agosto 2010.
- CUI, H.; TU, N. Hvdc transmission line fault localization base on rbf neural network with wavelet packet decomposition. *12th International Conference on Service Systems and Service Management (ICSSSM)*, p. 1–4, 2015.
- DAUBECHIES, I. Ten lectures on wavelets. *CBMSNSF Regional Conference Series, SIAM*, 1992.

- DOMMEL, H. W. Digital computer solution of electromagnetic transients in single-and multiphase networks. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-88, n. 4, p. 388–399, 1969.
- DOMMEL, H. W. *Electromagnetic Transients Program Reference Manual: EMTP Theory Book*. Portland, Oregon: BPA, 1996.
- ELETROBRAS. Belo monte. 2018. Acesso em 07 de junho de 2018. Disponível em: <<http://eletrobras.com/pt/Paginas/Belo-Monte.aspx>>.
- ELHAFFAR, A.; LEHTONEN, M. Travelling waves based earth fault location in 400 kv transmission network using single end measurement. *Large Engineering Systems Conference on Power Engineering*, v. 1, p. 53– 56, 2004.
- ESMERALDO, P. C. V.; ARAÚJO, E. M. A.; CARVALHO Jr., D. S. HvdC madeira transmission system - planning development and final design. *CIGRE Paper - B4-306-2010*, Paris, France, 2010.
- FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY Jr., C. K. J.; UMANS, S. D. *Máquinas Elétricas*. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil: Editora Bookman, 2006.
- FLOURENTZOU, N.; AGELIDIS, V. G.; DEMETRIADES, G. D. Vsc-based hvdc transmission systems: An overview. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 24, p. 592–602, May 2009.
- FRANCK, C. M. HvdC circuit breakers: A review identifying future research needs. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 26, n. 2, p. 998–1007, 2011.
- FREITAS, L. de Andrade de. *Time-Domain Impedance-Based Fault Location for HVDC Transmission Lines*. Tese (Doutorado) — Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013.
- FUCHS, R. D. *Transmissão de Energia Elétrica Linhas Aéreas - Volume 1*. Rio de Janeiro, Brasil: LTC/EFEL, 1977.
- FUCHS, R. D. *Transmissão de Energia Elétrica Linhas Aéreas - Volume 1*. Uberlândia, Brasil: EDUFU, 2015.

- GALE, P. F.; CROSSLEY, P. A.; BINGYIN, X.; YAOZHONG, G.; CORY, B. J.; BARKER, J. R. G. Fault location based on travelling waves. *1993 Fifth International Conference on Developments in Power System Protection*, p. 54–59, March 1993.
- GREENWOOD, A. *Electrical Transients in Power Systems*. 2a. ed. USA: John Wiley & Sons, Inc., 1991.
- HASSAN, H. A. M. A. *Fault Location Identification For a VSC-HVDC System with a Long Hybrid Transmission Medium*. Dissertação (Mestrado) — University of Pittsburgh, Pittsburgh, Pennsylvania, United States of America, March 2014.
- HOSSAM-ELDIN, A.; LOTFY, A.; ELGAMAL, M.; EBEED, M. Combined traveling wave and fuzzy logic based fault location in multi-terminal hvdc systems. p. 1–6, June 2016.
- JIAN, Q.; XIANGXUN, C.; JIANCHAO, Z. Travelling wave fault location of transmission line using wavelet transform. *International Conference on Power System Technology, 1998 (POWERCON '98)*, v. 1, p. 533–537, 1998.
- JINGXIN, J. Protection of hvdc transmission lines based on wavelet transformation and analysis of energy spectrum. *2nd International Symposium on Instrumentation and Measurement, Sensor Network and Automation (IMSNA)*, p. 180–185, December 2013.
- KERF, K. D.; SRIVASTAVA, K.; REZA, M.; BEKAERT, D.; COLE, S.; HERTEM, D. V.; BELMANS, R. Wavelet-based protection strategy for dc faults in multi-terminal vsc hvdc systems. *IET Generation, Transmission Distribution*, v. 5, n. 4, p. 496–503, April 2011. ISSN 1751-8687.
- KIM, C. H.; AGGARWAL, R. Wavelet transforms in power systems. ii. examples of application to actual power system transients. *Power Engineering Journal*, v. 15, n. 4, p. 193 –202, August 2001. ISSN 0950-3366.
- KIM, C.-K.; SOOD, V. K.; JANG, G.-S.; LIM, S.-J.; LEE, S.-J. *HVDC Transmission Power Conversion Applications in Power Systems*. 1. ed. Singapore: John Wiley & Sons, 2009.
- KIM, Y. J.; KIM, H. Arc extinguishment for dc circuit breaker by pptc device. *2017 IEEE International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS)*, p. 1–5, Dec 2017.

- KIMBARK, E. W. *Direct Current Transmission - Volume 1*. Portland, Oregon: John Wiley & Sons, Inc., 1971.
- KOLDBY, E.; HYTTINEN, M. Challenges on the road to an offshore hvdc grid. *Nordic Wind Power Conference*, Bornholm, Denmark, p. 1–8, September 2009.
- KUNDUR, P. *Power System Stability and Control/ ERPI-Power System Engineering Series*. USA: McGraw-Hill, 1994.
- LIRA, M. M. da S. *Wavelets na Compactação e Processamento de Sinais de Distúrbios em Sistemas de Potência Classificados Via Redes Neurais Artificiais*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil, 2004.
- LOPES, F.; FERNANDES Jr., D.; NEVES, W. Classificação de faltas em linhas de transmissão via transformada de park. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, Foz do Iguaçu, Brasil, abril 2014.
- LOPES, F. V. *Localização de Faltas em Linhas de Transmissão Baseada em Ondas Viajantes*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brasil, março 2011.
- LOPES, F. V. *Localização de Faltas em Tempo Real Baseada na Teoria das Ondas Viajantes Usando Dados Não Sincronizados de Dois Terminais*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, 2014.
- LOPES, F. V.; FERNANDES Jr., D.; NEVES, W. L. A. A traveling-wave detection method based on Park's transformation for fault locators. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 28, n. 3, p. 1626–1634, 2013. ISSN 0885-8977.
- MALLAT, S. G. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, v. 11, n. 7, 1989.
- MARTEN, A. K.; TROITZSCH, C.; WESTERMANN, D. Non-telecommunication based dc line fault detection methodology for meshed hvdc grids. *11th IET International Conference on AC and DC Power Transmission*, p. 1–8, Feb 2015.

- MARTI, J. R. Accurate modelling of frequency-dependent transmission lines in electromagnetic transients simulations. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-101, n. 1, p. 147 – 157, 1982.
- MELO, Y.; NEVES, W.; FERNANDES Jr, D. Fault detection and localization for hvdc transmission lines. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)*, Niterói, Brasil, maio 2018.
- MOKHBERDORAN, A.; CARVALHO, A.; LEITE, H.; SILVA, N. A review on hvdc circuit breakers. *Renewable Power Generation Conference (RPG 2014)*, 3rd, Naples, Italy, p. 1–6, September 2014.
- MURTHY, P. K.; AMARNATH, J.; KAMAKSHIAH, S.; SINGH, B. P. Wavelet transform approach for detection and location of faults in hvdc system. *2008 IEEE Region 10 and the Third international Conference on Industrial and Information Systems*, p. 1–6, Dec 2008. ISSN 2164-7011.
- NAIDOO, D.; IJUMBA, N. M. A protection system for long hvdc transmission lines. *2005 IEEE/PES Conference and Exposition in Africa*, p. 1–6, July 2005.
- NAIDU, S. R. *Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência*. Campina Grande, Brasil: Grafset, 1985.
- NANAYAKKARA, O. M. K. K.; RAJAPAKSE, A. D.; WACHAL, R. Location of dc line faults in conventional hvdc systems with segments of cables and overhead lines using terminal measurements. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 27, n. 1, p. 279–288, January 2012. ISSN 0885-8977.
- NANAYAKKARA, O. M. K. K.; RAJAPAKSE, A. D.; WACHAL, R. Traveling-wave-based line fault location in star-connected multiterminal hvdc systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 27, n. 4, p. 2286 – 2294, October 2012. ISSN 0885-8977.
- NORTE ENERGIA S.A. UHE Belo Monte - Histórico. 2018. Acesso em 07 de junho de 2018. Disponível em: <<http://www.norteenergiasa.com.br/pt-br/uhe-belo-monte/historico>>.
- NORUM, E. Ødegaard. *Design and Operation Principles of DC Circuit Breakers*. Dissertação (Mestrado) — Norwegian University of Science and Technology, January 2016.

- ONS. Nota à Imprensa - Bipolo do Madeira. outubro 2017. Acesso em 26 de março de 2018. Disponível em: <<http://ons.org.br/Paginas/Noticias/20171023-bipolodomadeira.aspx>>.
- ONS. Mapa do Sistema de Transmissão - Horizonte 2017. 2018. Acesso em maio de 2018. Disponível em: <<http://ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/mapas>>.
- ONS. ONS Atualiza resultados da análise da ocorrência que afetou o Norte e o Nordeste. 2018. Acesso em 6 de abril de 2018. Disponível em: <<http://ons.org.br/Paginas/Noticias/20180506-analiseocorrencianorteenordeste.aspx>>.
- PAULI, B.; MAUTHE, G.; RUOSS, E.; ECKLIN, G.; PORTER, J. Development of a high current hvdc circuit breaker with fast fault clearing capability. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Oct 1988.
- PERCIVAL, D. B.; WALDEN, A. T. *Wavelet Methods for Time Series Analysis*. New York, USA: Cambridge University Press, 2000.
- PINTO, R. T.; LEON-RAMIREZ, A. C.; ARAGUES-PENALBA, M.; SUMPER, A.; SORRENTINO, E. A fast methodology for solving power flows in hybrid ac/dc networks: The european north sea supergrid case study. *PCIM Europe*, Nuremberg, Germany, May 2016.
- RTDS TECHNOLOGIES INC. *Real Time Digital Simulator Tutorial Manual: RSCAD Version*. Winnipeg, Manitoba, Canada, March 2008.
- SAHA, M. M.; IZYKOWSKI, J.; ROSOŁOWSKI, E. *Fault Location on Power Networks*. London: Ed. Springer, 2010. (Power Systems). ISBN 978-1-84882-885-8.
- SANJEEVIKUMAR, P.; PAILY, B.; BASU, M.; CONLON, M. Classification of fault analysis of hvdc systems using artificial neural network. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, p. 1–5, September 2014.
- SCHWEITZER III, E. O.; KASZTENNY, B.; GUZMÁN, A.; SKENDZIC, V.; MYNAM, M. Speed of line protection - can we break free of phasor limitations? *68th Annual Conference for Protective Relay Engineers*, March 2015.

- SCHWEITZER III, E. O.; KASZTENNY, B.; MYNAM, M. V. Performance of time-domain line protection elements on real-word faults. *70th Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference*, Georgia, USA, April 2016.
- SIEMENS AG. *High Voltage Direct Current Transmission*. Erlangen, Germany, 2011.
- SILVA, D. M.; COSTA, F. B.; FRANÇA, R. L. S.; SILVA Jr, F. C. Method for fault detection on transmission lines of hvdc-vsc systems using high-frequency transients. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)*, Niterói, Brasil, maio 2018.
- SILVA Jr., F. C. da. *Proteção de Linhas de Transmissão Aéreas de Sistemas LCC-HVDC Monopolares Baseada em Ondas Viajantes Utilizando um Terminal*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Rio Grande do Norte, Brasil, agosto 2018.
- SILVA, M. da. *Implementação de um Localizador de Falhas Híbrido para Linhas de Transmissão com Três Terminais Baseado na Transformada Wavelet*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, Brasil, 2008.
- SONG, Q.; ZENG, R.; YU, Z.; LIU, W.; HUANG, Y.; YANG, W.; LI, X. A modular multilevel converter integrated with dc circuit breaker. *IEEE Transactions on Power Delivery*, p. 1–10, March 2018. ISSN 0885-8977.
- SUONAN, J.; GAO, S.; SONG, G.; JIAO, Z.; KANG, X. A novel fault-location method for hvdc transmission lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 25, n. 2, p. 1203–1209, April 2010. ISSN 0885-8977.
- TAHATA, K.; OUKAILI, S. E.; KAMEI, K.; YOSHIDA, D.; KONO, Y.; YAMAMOTO, R.; ITO, H. HvdC circuit breakers for hvdc grid applications. *11th IET International Conference on AC and DC Power Transmission*, Birmingham, UK, p. 1–9, Feb 2015.
- VASCONCELOS, L. A. *Metodologia para Representação de Sistemas de Transmissão em Corrente Contínua Multiterminais no Problema de Fluxo de Potência*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, 2014.
- WANG, H.; REDFERN, M. The advantages and disadvantages of using hvdc to interconnect ac networks. *Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2010 45th International*, Cardiff, Wales, 2010.

- WEI, T.; YU, Z.; ZENG, R.; CHEN, Z.; ZHANG, X.; WEN, W.; HUANG, Y. A novel hybrid dc circuit breaker for nodes in multi-terminal dc system. *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, p. 633–638, Oct 2017.
- WU, Y.; HU, Y.; WU, Y.; RONG, M.; YI, Q. Investigation of an active current injection dc circuit breaker based on a magnetic induction current commutation module. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 33, n. 4, p. 1809–1817, March 2018. ISSN 0885-8977.

APÊNDICE

DADOS DOS SISTEMAS ELÉTRICOS ANALISADOS

Neste apêndice é exposto os dados dos sistemas monopolar, bipolar e híbrido.

I DADOS DO SISTEMA MONOPOLAR

Na Figura i é ilustrado o sistema elétrico monopolar modelado utilizando o Simulink/MATLAB. O sistema monopolar apresenta uma linha com 2000 km de extensão e em cada extremidade da linha tem-se um reator de alisamento com indutância igual a 0,5 H.

O sistema LCC-HVDC do CIGRÉ, do francês *Conseil International des Grands Réseaux Électriques* e um exemplo do MATLAB intitulado *Thyristor-Based HVDC Transmission System (Detailed Model)*, (CASORIA, 2015) foram utilizados como base para modelagem do sistema monopolar. Logo, o sistema monopolar utilizado possui 500 kV-1000 MW com conversores compostos por tiristores e comutados por linha de 12 pulsos, em ambos os conversores, ou seja, no retificador e no inversor. Porém, o sistema elétrico modelado não é idêntico ao modelo do CIGRÉ e foi adotado o modelo de Bergeron para a linha de transmissão com o intuito de se obter um modelo mais realista e que melhor represente as propagações das ondas viajantes ao longo da linha.

Além da LT, dois geradores, filtros AC e o retificador e inversor, ambos utilizando a tecnologia LCC, foram simulados.

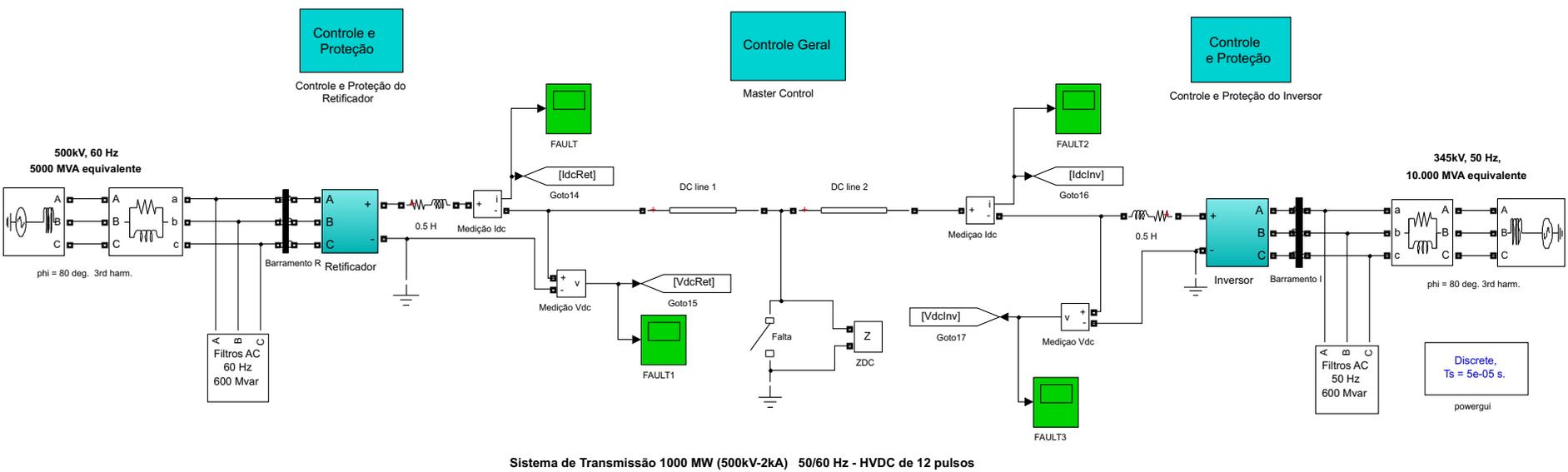
Os dados dos geradores e de suas impedâncias em paralelo são indicados nas Tabelas i e ii.

Tabela i. Dados dos geradores - sistema monopolar.

Geradores	Tensão[V]	Frequência[Hz]	Resistência[Ω]	Indutância[mH]
Gerador 1	500	60	0,0	98,03
Gerador 2	345	50	0,0	28,0

Fonte: Próprio autor.

Figura i. Sistema Monopolar - MATLAB.



Fonte: Próprio autor.

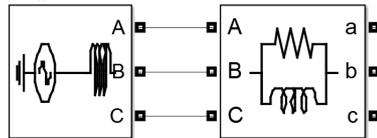
Tabela ii. Dados da impedância em paralelo dos geradores - sistema monopolar.

Impedância em paralelos de geradores	Resistência[Ω]	Indutância[mH]
Z_{G1}	26,07	48,86
Z_{G2}	6,205	13,96

Fonte: Próprio autor.

Com o intuito de facilitar a compreensão dos dados da Tabela ii, tem-se a representação do modelo do gerador pela Figura ii.

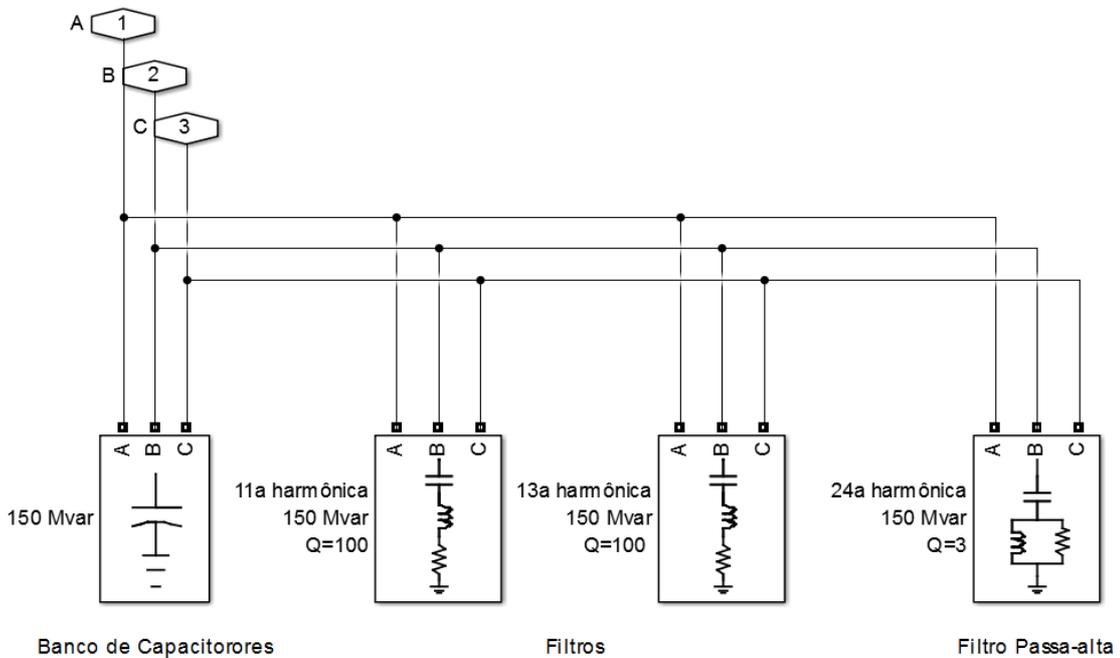
Figura ii. Esquema do gerador e as suas impedâncias.



Fonte: Próprio autor.

Já nas Figuras iii e iv são observados os filtros AC do sistema monopolar. A potência reativa capacitiva dos bancos de capacitores tanto do lado do retificador quanto do lado do inversor é igual a 150 Mvar.

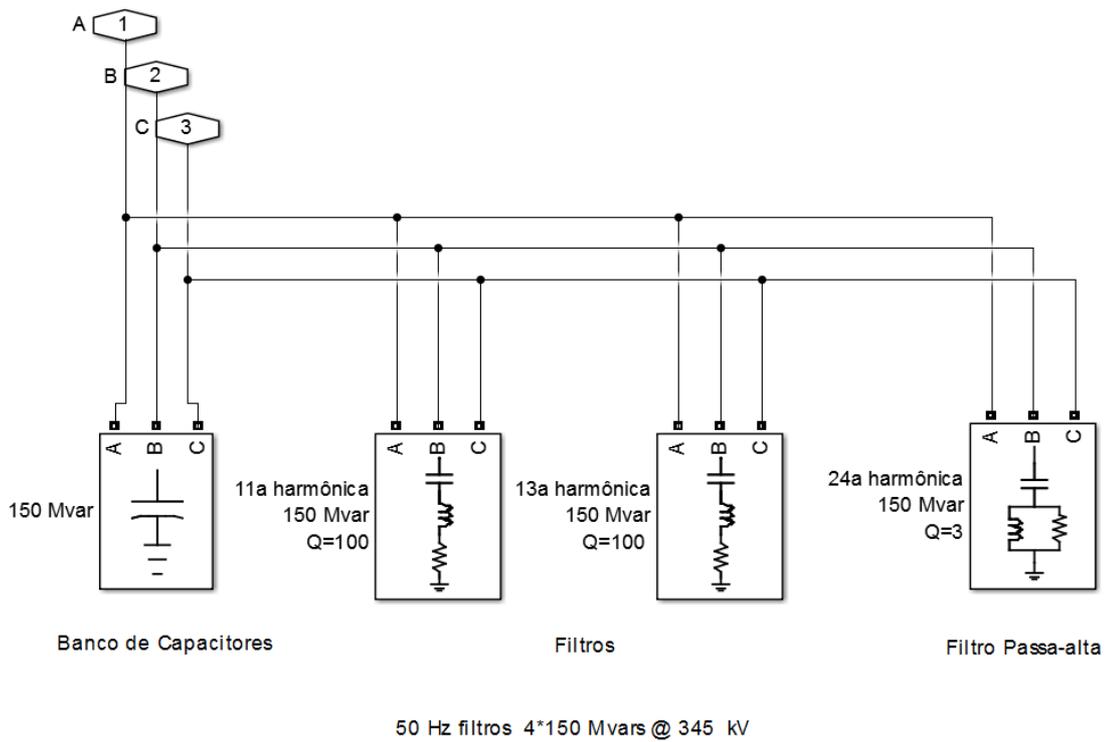
Figura iii. Esquema do filtro AC no lado retificador - sistema monopolar.



60 Hz filtros 4*150 Mvars @ 500 kV

Fonte: Próprio autor.

Figura iv. Esquema do filtro AC no lado inversor - sistema monopolar.



Fonte: Próprio autor.

As configurações dos filtros próximos ao terminal retificador, denominados de AC1, e dos filtros próximos ao terminal inversor, chamados de AC2, podem ser observadas na Tabela iii.

Tabela iii. Dados dos filtros para eliminação de harmônicas - sistema monopolar.

Filtros	Tensão nominal [kV]	Freq[Hz]	Potência reativa [Mvar]	Freq. de sincron. [Hz]	Fator de qualidade [Q]
Filtros AC1 para 11 ^a	500	60	150	660	100
Filtros AC2 para 11 ^a	345	50	150	550	100
Filtros AC1 para 13 ^a	500	60	150	780	100
Filtros AC2 para 13 ^a	345	50	150	650	100
Filtros AC1 para 24 ^a	500	60	150	1440	3
Filtros AC2 para 24 ^a	345	50	150	1200	3

Fonte: Próprio autor.

Os dados dos transformadores de três enrolamentos podem ser observados nas Tabelas iv, v e vi. O transformador 1 é o que está mais próximo ao retificador e o transformador 2 está mais próximo do inversor.

Os dados das linhas DC foram retratados no Capítulo 6 mas também serão indicados aqui, conforme a Figura v, para que este apêndice contemple todos os dados do sistema elétrico simulado.

Tabela iv. Dados dos transformadores - sistema monopolar.

Transformador	Potência nominal [MVA]	Frequência[Hz]	Resistência de magnetização [pu]	Indutância de magnetização [pu]
Transformador 1	1200	60	500	500
Transformador 2	1200	50	500	500

Fonte: Próprio autor.

Tabela v. Dados dos enrolamentos do transformador 1 - sistema monopolar.

Enrolamento - Fase A			Enrolamento - Fase B			Enrolamento - Fase C		
V[kV]	R[pu]	L[pu]	V[kV]	R[pu]	L[pu]	V[kV]	R[pu]	L[pu]
450	0,0025	0	200	0,0025	0,24	200	0,0025	0,24

Fonte: Próprio autor.

Tabela vi. Dados dos enrolamentos do transformador 2 - sistema monopolar.

Enrolamento - Fase A			Enrolamento - Fase B			Enrolamento - Fase C		
V[kV]	R[pu]	L[pu]	V[kV]	R[pu]	L[pu]	V[kV]	R[pu]	L[pu]
331,2	0,0025	0	200	0,0025	0,24	200	0,0025	0,24

Fonte: Próprio autor.

Figura v. Sistema Monopolar.



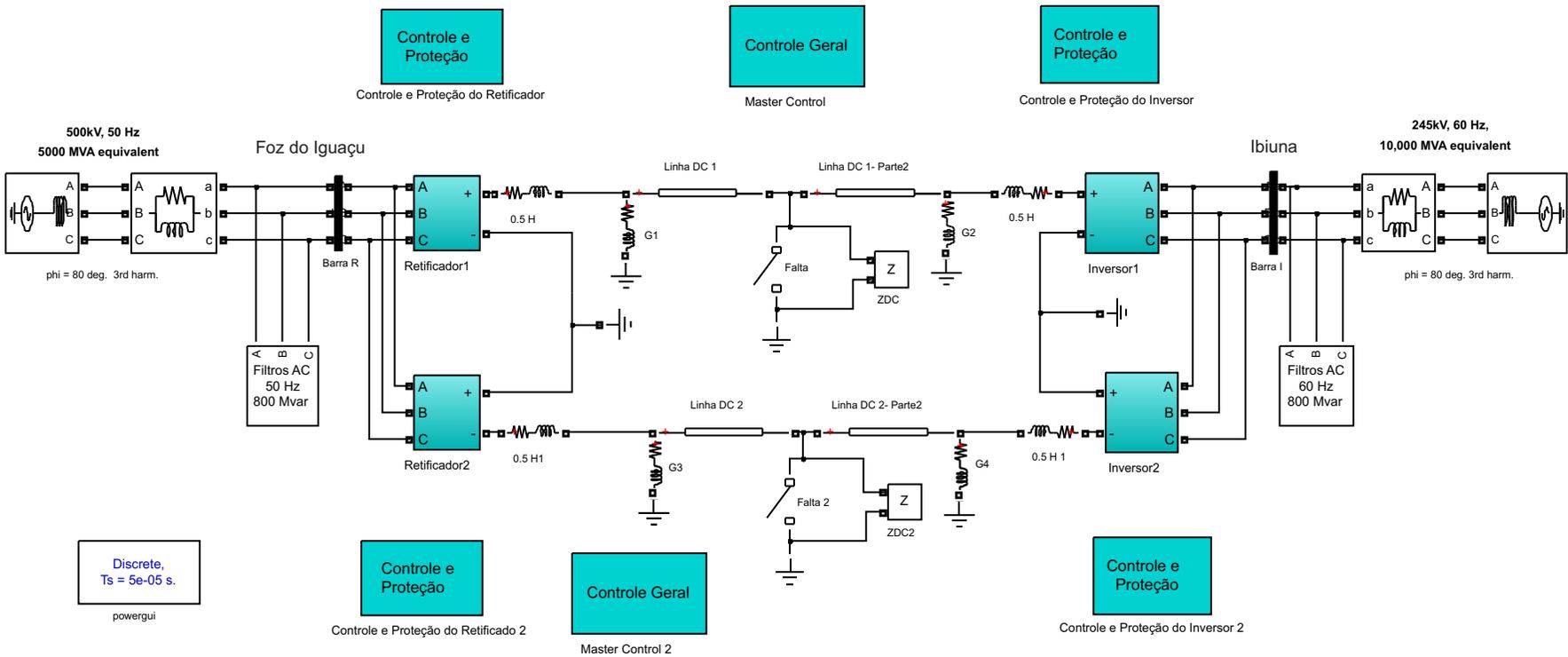
Fonte: Próprio autor.

Na seção seguinte são informados os dados do sistema bipolar.

II DADOS DO SISTEMA BIPOLAR

O sistema bipolar, assim como o monopolar é formado por dois geradores, filtros AC e retificadores e inversores, ambos utilizando a tecnologia LCC, foram simulados, conforme a Figura vi.

Figura vi. Sistema Bipolar - MATLAB.



Fonte: Próprio autor.

Discrete,
Ts = 5e-05 s.
powergui

Os dados dos geradores do sistema bipolar e de suas impedâncias em paralelo são observados nas Tabelas vii e viii.

Tabela vii. Dados dos geradores - sistema Bipolar.

Geradores	Tensão[V]	Frequência[Hz]	Resistência[Ω]	Indutância[mH]
Gerador 1	500	50	0,0	98,03
Gerador 2	245	60	0,0	28,0

Fonte: Próprio autor.

Tabela viii. Dados da impedância em paralelo dos geradores - sistema bipolar.

Impedância em paralelos de geradores	Resistência[Ω]	Indutância[mH]
Z_{G1}	26,07	48,86
Z_{G2}	6,205	13,96

Fonte: Próprio autor.

Assim como no sistema monopolar, potência reativa capacitiva de ambos os bancos de capacitores do sistema bipolar é igual a 150 Mvar. Já na Tabela ix tem-se as configurações dos filtros próximos ao terminal retificador, AC1, e dos filtros próximos ao terminal inversor, AC2.

Tabela ix. Dados dos filtros para eliminação de harmônicas - sistema bipolar.

Filtros	Tensão nominal [kV]	Freq[Hz]	Potência reativa [Mvar]	Freq. de sincron. [Hz]	Fator de qualidade [Q]
Filtros AC1 para 11 ^a	500	50	150	550	100
Filtros AC2 para 11 ^a	245	60	150	660	100
Filtros AC1 para 13 ^a	500	50	150	650	100
Filtros AC2 para 13 ^a	245	60	150	780	100
Filtros AC1 para 24 ^a	500	50	150	1200	3
Filtros AC2 para 24 ^a	245	60	150	1440	3

Fonte: Próprio autor.

Os dados dos transformadores de três enrolamentos podem ser observados nas Tabelas x, xi e xii. O transformador 1 é o que está mais próximo ao retificador e o transformador 2 está mais próximo do inversor.

Tabela x. Dados dos transformadores - sistema bipolar.

Transformador	Potência nominal [MVA]	Frequência[Hz]	Resistência de magnetização [pu]	Indutância de magnetização [pu]
Transformador 1	1200	50	500	500
Transformador 2	1200	60	500	500

Fonte: Próprio autor.

Como mencionado para o sistema monopolar, os dados das linhas DC do sistema bipolar foram retratados no Capítulo 6 mas também serão retratados aqui novamente, conforme a Figura vii.

Tabela xi. Dados dos enrolamentos do transformador 1 - sistema bipolar.

Enrolamento - Fase A			Enrolamento - Fase B			Enrolamento - Fase C		
V[kV]	R[pu]	L[pu]	V[kV]	R[pu]	L[pu]	V[kV]	R[pu]	L[pu]
450	0,0025	0	200	0,0025	0,24	200	0,0025	0,24

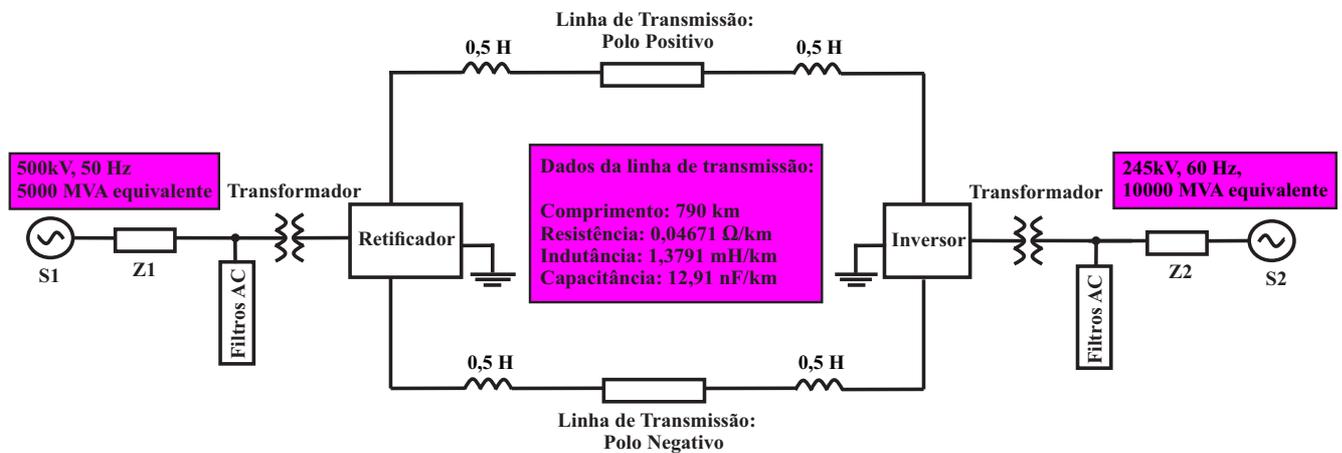
Fonte: Próprio autor.

Tabela xii. Dados dos enrolamentos do transformador 2 - sistema bipolar.

Enrolamento - Fase A			Enrolamento - Fase B			Enrolamento - Fase C		
V[kV]	R[pu]	L[pu]	V[kV]	R[pu]	L[pu]	V[kV]	R[pu]	L[pu]
235,2	0,0025	0	200	0,0025	0,24	200	0,0025	0,24

Fonte: Próprio autor.

Figura vii. Sistema Bipolar.



Fonte: Próprio autor.

Por fim, tem-se os dados do sistema híbrido composto por linhas AC e linhas DC.

III DADOS DO SISTEMA HÍBRIDO

O sistema híbrido possui dados idênticos ao sistema bipolar anterior, sendo acrescido a este duas linhas trifásicas, estando localizada cada linha trifásica após os geradores. Os dados das linhas sistema híbrido já foram ilustradas no Capítulo 8. Entretanto, serão repetidas para que esta seção contenha todos os dados do sistema, conforme a Figura viii.

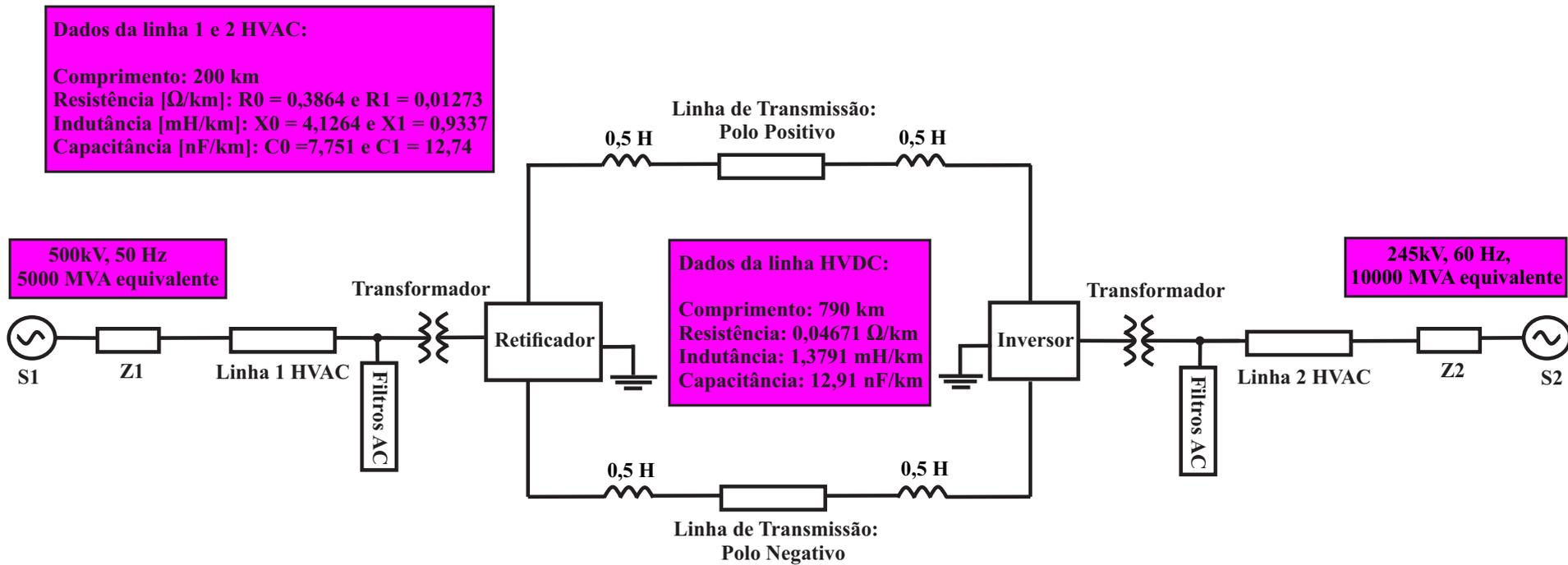


Figura viii. Sistema Híbrido.

Fonte: Próprio autor.