UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE ESCOLA DE ENGENHARIA MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

AVALIAÇÃO DINÂMICA DE ELOS DE CORRENTE CONTÍNUA EM ALTA FREQUÊNCIA UTILIZANDO FASORES DINÂMICOS

Rodrigo Godim de Azevedo

Niterói Outubro de 2019

UFF - PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

AVALIAÇÃO DINÂMICA DE ELOS DE CORRENTE CONTÍNUA EM ALTA FREQUÊNCIA UTILIZANDO FASORES DINÂMICOS

Rodrigo Godim de Azevedo

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Sergio Gomes Junior, D.Sc. Coorientador: Thiago José Masseran Antunes Parreiras, D.Sc.

> Niterói Outubro de 2019

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE Gerada com informações fornecidas pelo autor

A994a Azevedo, Rodrigo Godim de AVALIAÇÃO DINÂMICA DE ELOS DE CORRENTE CONTÍNUA EM ALTA FREQUÊNCIA UTILIZANDO FASORES DINÂMICOS / Rodrigo Godim de Azevedo ; Sergio Gomes Junior, orientador ; Thiago José Masseran Antunes Parreiras, coorientador. Niterói, 2019. 172 p. : il.
Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2019.
DOI: http://dx.doi.org/10.22409/TPP.2019.m.11622356756
1. Sistemas de potência. 2. Estabilidade a pequenos sinais.
3. Elos de corrente contínua. 4. Fasores dinâmicos. 5. Produção intelectual. I. Gomes Junior, Sergio, orientador. II. Parreiras, Thiago José Masseran Antunes, coorientador. III. Universidade Federal Fluminense. Escola de Engenharia. IV. Título.

Bibliotecária responsável: Fabiana Menezes Santos da Silva - CRB7/5274

RODRIGO GODIM DE AZEVEDO

AVALIAÇÃO DINÂMICA DE ELOS DE CORRENTE CONTÍNUA EM ALTA FREQUÊNCIA UTILIZANDO FASORES DINÂMICOS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações.

Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Sergio Gomes Juffior - Orientador Universidade Federal Fluminense - UFF

up Musserm

Prof. Dr. Thiago José Masseran Antunes Parreiras - Coorientador Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

Prof. Dr. Bruno Soares Moreira Cesar Borba Universidade Federal Fluminense - UFF

Prof. Dr. Luciano de Oliveira Daniel Universidade Federal Fluminense - UFF

hodias Prof. Dr. Robson Francisco da Silva Dias

Prof. Dr. Robson Francisco da Silva Días Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ

Niterói (outubro/2019) Dedicatória

Aos meus pais, Ademair Freres de Azevedo e Carmita Cornélio Godim, meu tio Oracy Godim (in memorium) e minha noiva Ana Clara pelo apoio e suporte ao longo desses anos.

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais Carmita Cornélio de Azevedo e Ademair Freres de Azevedo e ao meu tio Oracy Godim (em memória) por todo o suporte necessário ao longo da vida mesmo nos momentos de dificuldades. Qualquer mérito que há na minha jornada só é possível por ter essa base.

Agradeço a minha querida noiva Ana Clara Andrade da Silveira, pela enorme paciência e companheirismo. Foi de longe a pessoa que acompanhou esse processo mais de perto e foi um porto seguro nos momentos nebulosos. Também sou grato a seu núcleo familiar mais próximo: Otton Teixeira, Ana Maria de Andrade, André Andrade e Aline Sahione.

A todos meus amigos ao longo da vida. Aos amigos de São Gonçalo, representados nominalmente por Diego Barboza, Igor Malamace e Amanda Chagas; do apartamento 702, por Marcos Felipe e Gabriel Pereira; da UFF por Victor Argemil, Augusto Tietz, Rafael Antunes, Tiago Abud e Daniela Coelho. Esses e outros amigos (os quais não caberiam em tão poucas linhas) que são a família que escolhemos, tornam qualquer dificuldade menos árdua e o caminho muito mais aprazível.

Ao CEPEL pelo apoio financeiro e pela estrutura oferecidos.

Ao meu orientador Sergio Gomes Junior, pelo suporte técnico, pelo incentivo, por todos os conhecimentos compartilhados, além é claro da paciência; ao coorientador Thiago José Masseran, um profissional de elevada competência e dedicação, que foi muito mais do que um coorientador, contribuindo sobremaneira na realização desse trabalho. Aos demais pesquisadores do DRE que contribuíram de forma direta e indireta na realização desse trabalho.

Aos amigos do CEPEL Thiago Rocha, Thomas Campello, Milon Pereira, José Guilherme pelas conversas técnicas e filosóficas, além é claro do compartilhamento de conhecimentos.

Ao CEBB, por mostrar o aspecto ilusório, criativo e impermanente de todas as aparências, representado pelo querido Lama Padma Samten e pelo tutor Daniel Leoncini.

"A dúvida é autora das insônias mais cruéis" Nelson Rodrigues

"Entre a força e a técnica, vence a técnica. Se a força e a técnica forem iguais, vence o Espírito" Miyamoto Musashi

Resumo

Neste trabalho é proposto o desenvolvimento de um modelo linearizado do elo de corrente contínua, implementado no programa computacional PacDyn, baseado na utilização dos conceitos de funções de chaveamento e fasores dinâmicos. As funções de chaveamento permitem descrever adequadamente o comportamento dos elementos de chaveamento dos dispositivos de eletrônica de potência, possibilitando a análise de correntes e tensões internas e externas desses componentes. Os fasores dinâmicos, por sua vez, permitem que funções periódicas no tempo em regime permanente sejam descritas através de séries de Fourier por coeficientes constantes das funções seno e cosseno e que, após a aplicação de algum distúrbio, passam a variar no tempo.

Dentre os objetivos do trabalho realizado, estão contempladas avaliações dinâmicas de perturbações a pequenos sinais que são realizadas utilizando análise linear em alta frequência e simulações no domínio do tempo. Os resultados dessas avaliações são comparados com outros dois programas computacionais, que consideram a modelagem não-linear de sistemas de potência: o PSCAD/EMTDC e o ANAHVDC, sendo este último um novo programa computacional, que está em fase de desenvolvimento no CEPEL. Pretende-se também obter uma ferramenta capaz de diagnosticar adequadamente problemas de oscilação em alta frequência envolvendo elos de corrente contínua em alta tensão (CCAT) em sistema de potência e de realizar ajustes de seus controladores.

Casos exemplos são avaliados e seus resultados são apresentados com o intuito de validar o modelo proposto e levantar características importantes sobre o modelo, além de demonstrar a importância da consideração desse modelo em ajuste de controladores, considerando dinâmicas de altas frequências em sistemas de potência.

Palavras-chaves: Sistemas de potência, Estabilidade a pequenos sinais, Elos de corrente contínua, Funções de chaveamento, Fasores dinâmicos.

Abstract

This work proposes the development of a linearized model of HVDC links, implemented in software PacDyn, based on the concepts of switching functions and dynamic phasors. The switching functions allow describing accurately the dynamic behavior of switching elements of power electronic devices, enabling the analysis of internal and external currents and voltages of these components. The dynamic phasors, in its turn, allow describing periodic steady-state functions in time through Fourier series of constant coefficients and, after a disturbance, these coefficients begin to vary in time.

The objectives of this work include dynamic assessment of small signal perturbations that are performed using high frequency linear analysis and time domain simulations. The results of these evaluations will be compared with two other computational programs, which consider the nonlinear modeling of power systems: PSCAD / EMTDC and ANAHVDC, the latter being a new computational program, which is under development at CEPEL. This work intends to obtain a tool capable of properly diagnosing high frequency oscillation problems involving power system High Voltage Direct Current (HVDC) links and controller tuning.

Example cases are evaluated and their results are presented aiming to validate the proposed model and determine important model characteristics, besides showing the importance of this model when tuning controllers, considering high frequency dynamics in electrical power systems.

Keywords: Power systems, Small signal Stability, HVDC links, Switching functions, Dynamic phasors.

Sumário

Resumo	viii	
Abstract	i x	
Sumário) X	
Lista de	Figuras	xii
Lista de	Tabelas	xv
Lista de	Abreviaturas	xvi
Lista de	Símbolos	xvii
Capítulo	1 - Introdução	1
1.1	Motivação	5
1.2	Objetivo	8
1.3	Publicações Originárias da Dissertação	9
1.4	Estrutura do Trabalho	9
Capítulo	2 - Conceituação Teórica	11
2.1	Modelagem de Análise Linear	11
2.1.1	Modelagem por Função de Transferência	12
2.1.2	Espaço de Estados	12
2.1.3	Sistema Descritor	15
2.1.4	Modelagem por matriz Y(s)	17
2.2	Ferramentas de Análise Linear	20
2.2.1	Autovalores e autovetores	23
2.2.2	Formas Modais (Mode Shapes)	24
2.2.3	Fatores de controlabilidade e observabilidade	24
2.2.4	Fatores de Participação	27
2.2.5	Resíduos	27
2.2.6	Ajuste de Controladores	
2.2.7	Lugar das Raízes (Root Locus)	29
2.2.8	Resposta no Tempo	29
2.2.9	Resposta na Frequência	
2.3	Funções de Chaveamento Generalizadas	
2.4	Modelagem por Fasores Dinâmicos	
2.4.1	Exemplo em Circuito RL	
2.5	Modelos de Elos CCAT	
Capítulo	93 - Metodologia	51
		Х

3.1	Modelos dos elos CCAT baseados em Funções de Chaveamento52
3.2	Modelos dos elos CCAT baseados em Funções de Chaveamento e Fasores Dinâmicos 57
3.3	Modelos dos elos CCAT linearizados
Capítul	0 4 - Resultados
4.1	Caso 1 – Elo de Corrente Contínua conectado diretamente na Barra Infinita74
4.1.1	Caso 1 – Influência do controle do inversor87
4.2 circu	Caso 2 – Elo de Corrente Contínua conectado diretamente na Barra Infinita através de to RL
4.2.1	Caso 2 – Influência do controle do inversor101
4.2.2	Caso 2: Variação do circuito RL107
4.3 Eletre	Caso3: Aplicação do Modelo: Comparação entre as análises Eletromecânica e omagnética115
4.4	Caso 4: Aplicação do modelo no Sistema Benchmark de elo CCAT de 14 barras .131
4.5	Caso 5: Aplicação para análise do SIN139
Capítul	9 5 - Conclusão
5.1	Trabalhos Futuros
Capítul	06 - Referências Bibliográficas

Lista de Figuras

Figura 1 – Mapa do SIN	1
FIGURA 2 – RELAÇÃO CUSTOS VERSUS DISTÂNCIA ENTRE SISTEMAS CA X CC	3
FIGURA 3 – TIPOS DE ESTUDOS E SUAS CARACTERÍSTICAS	6
Figura 4 – Equipamentos modelados no programa PacDyn	7
Figura 5 – Proposta da Dissertação	7
FIGURA 6 – CAMINHO PROPOSTO DE SOLUÇÃO	9
FIGURA 7 – LINEARIZAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA	11
Figura 8 – Resumo da Modelagem em Análise Linear	19
Figura 9 – Relação entre as modelagens de análise linear	19
FIGURA 10 – FUNCÃO DE TRANSFERÊNCIA SISTEMA G1(S) NÃO CONTROLÁVEL POR U2(S)	26
FIGURA 11 - FUNCÃO DE TRANSFERÊNCIA SISTEMA G2(S) NÃO OBSERVÁVEL POR Y2(S)	27
FIGURA 12 – EVOLUÇÃO CRONOLÓGICA DAS FUNCÕES DE CHAVEAMENTO	31
FIGURA 13 – FUNCÕES DE EXISTÊNCIA	31
FIGURA 14 – FUNCÕES DE CHAVEAMENTO GENERALIZADAS	31
Figura 15 – Circuito RL no domínio do tempo	
Figura 16 – Circuito RI, no domínio da frequência	
FIGURA 17 – CONVERSOR TIPO FONTE DE CORRENTE - LCC	
FIGURA 18 – CONVERSOR TIPO FONTE DE TENSÃO – VSC	41
FIGURA 19 – ETAPAS DO DESENVOLVIMENTO DO MODELO.	
FIGURA 20 – ETAPAS DO DESENVOLVIMENTO DO MODELO: FUNCÕES DE CHAVEAMENTO	
FIGURA 21 – FUNCÃO DE CHAVEAMENTO DA TENSÃO	54
FIGURA 22 – FUNCÃO DE CHAVEAMENTO GENERALIZADA DA CORRENTE NO RETIFICADOR	55
FIGURA 23 – FUNCÃO DE CHAVEAMENTO GENERALIZADA DA CORRENTE NO INVERSOR	55
FIGURA 24 – ETAPAS DO DESENVOLVIMENTO DO MODELO: FASORES DINÂMICOS	57
FIGURA 25 – FUNCÃO DE CHAVEAMENTO DA TENSÃO COM A COMPONENTE FUNDAMENTAL	58
FIGURA 26 – FUNCÃO DE CHAVEAMENTO DA CORRENTE NO RETIFICADOR COM A COMPONENTE FUNDAMENTAL	58
FIGURA 27 – FUNCÃO DE CHAVEAMENTO DA CORRENTE NO INVERSOR COM A COMPONENTE FUNDAMENTAL	59
FIGURA 28 – DIAGRAMA DE BLOCOS DO <i>Phase-Locked Loop</i>	66
FIGURA 29 – TENSÕES E CORRENTES DESCRITAS POR FASORES DINÂMICOS	67
FIGURA 30 – EVOLUÇÃO DE COMPLEXIDADE DOS CASOS APRESENTADOS	71
FIGURA 31 – MEDIDOR RMS DE TENSÃO NO PSCAD/EMTDC	72
FIGURA 32 – MEDIDOR RMS DE CORRENTE DO PSCAD/EMTDC	73
FIGURA 33 – DESVIO EM RELAÇÃO AO VALOR MÉDIO NO PSCAD	73
FIGURA 34 - DIAGRAMA UNIFILAR NO ANAREDE DO ELO CONECTADO DIRETAMENTE NA BARRA INFINITA	75
FIGURA 35 - DIAGRAMA UNIFILAR NO PSCAD DO ELO CONECTADO DIRETAMENTE NA BARRA INFINITA	75
FIGURA 36 - DIAGRAMA UNIFILAR NO PSCAD DO ELO CCAT	76
FIGURA 37 - TOPOLOGIA DO RETIFICADOR NO PSCAD – POLO S1P1	77
FIGURA 38 - TOPOLOGIA DO INVERSOR NO PSCAD – POLO S2P1	78
FIGURA 39 – IDENTIFICAÇÃO DOS PRINCIPAIS COMPONENTES DO CONVERSOR	79
FIGURA 40 – CONTROLE DE CORRENTE PI DOS RETIFICADORES	80
Figura 41 – Controle gama mínimo dos inversores	80
FIGURA 42 – CASO 1: TENSÃO EM CORRENTE CONTÍNUA NO RETIFICADOR (PSCAD x PACDYN)	82
FIGURA 43 - CASO 1: TENSÃO EM CORRENTE CONTÍNUA NO INVERSOR (PSCAD X PACDYN)	82
FIGURA 44 - CASO 1: ÂNGULO ALFA NO RETIFICADOR (PSCAD X PACDYN)	83
FIGURA 45 - CASO 1: ÂNGULO ALFA NO INVERSOR (PSCAD X PACDYN)	83
FIGURA 46 - CASO 1: CORRENTE CONTÍNUA NA LINHA CC (PSCAD X PACDYN)	84
FIGURA 47 - CASO 1: ÂNGULO GAMA NO INVERSOR (PSCAD X PACDYN)	84
FIGURA 48 – CASO1: TENSÃO EM CORRENTE ALTERNADA NO RETIFICADOR (PSCAD x PACDYN)	85
FIGURA 49 – CASO1: TENSÃO EM CORRENTE ALTERNADA NO INVERSOR (PSCAD x PACDYN)	85
FIGURA 50 – CASO1: CORRENTE ALTERNADA NO RETIFICADOR (PSCAD x PACDYN)	86
FIGURA 51 – CASO1: CORRENTE ALTERNADA NO INVERSOR (PSCAD x PACDYN)	86
Figura 52 – Caso 1 (sem controle do inversor): Tensão em Corrente Contínua no Retificador (PSCAD x PacDyn)	87

FIGURA 54 - CASO 1(SEM CONTROLE DO INVERSOR): ÂNGULO ALFA NO RETIFICADOR (PSCAD X PACDYN)	88
FIGURA 55 - CASO 1(SEM CONTROLE DO INVERSOR): ÂNGULO ALFA NO INVERSOR (PSCAD X PACDYN)	89
FIGURA 56 - CASO 1(SEM CONTROLE DO INVERSOR): CORRENTE CONTÍNUA NA LINHA CC (PSCAD X PACDYN)	89
FIGURA 57 - CASO 1(SEM CONTROLE DO INVERSOR): ÂNGULO GAMA NO INVERSOR (PSCAD X PACDYN)	90
FIGURA 58 – CASO1 (SEM CONTROLE DO INVERSOR) TENSÃO EM CORRENTE ALTERNADA NO RETIFICADOR (PSCAD X PACDYN)	90
FIGURA 59 - CASO1 (SEM CONTROLE DO INVERSOR): TENSÃO EM CORRENTE ALTERNADA NO INVERSOR (PSCAD X PACDYN)	91
FIGURA 60 – CASO1 (SEM CONTROLE DO INVERSOR): CORRENTE ALTERNADA NO RETIFICADOR (PSCAD x PACDYN)	91
FIGURA 61 – CASO1(SEM CONTROLE DO INVERSOR): CORRENTE ALTERNADA NO INVERSOR (PSCAD x PACDYN)	92
FIGURA 62 - DIAGRAMA UNIFILAR NO ANAREDE DO ELO CONECTADO DIRETAMENTE NA BARRA INFINITA ATRAVÉS DE IMPEDÂ	NCIA
RL	93
FIGURA 63 - DIAGRAMA UNIFILAR NO PSCAD DO ELO CONECTADO DIRETAMENTE NA BARRA INFINITA ATRAVÉS DE UMA IMPED	ÂNCIA
RL (R=3,3150Ω ε L=0,08796H)	94
FIGURA 64 – CASO 2: TENSÃO EM CORRENTE CONTÍNUA NO RETIFICADOR (PSCAD X PACDYN)	96
FIGURA 65 - CASO 2: TENSÃO EM CORRENTE CONTÍNUA NO INVERSOR (PSCAD X PACDYN)	96
FIGURA 66 - CASO 2: ÂNGULO ALFA NO RETIFICADOR (PSCAD X PACDYN)	97
FIGURA 67 - CASO 2: ÂNGULO ALFA NO INVERSOR (PSCAD X PACDYN)	97
FIGURA 68 - CASO 2: CORRENTE CONTÍNUA NA LINHA CC (PSCAD x PACDYN)	98
FIGURA 69 - CASO 2: ÂNGULO GAMA NO INVERSOR (PSCAD X PACDYN)	98
FIGURA 70 – CASO2: TENSÃO EM CORRENTE ALTERNADA NO RETIFICADOR (PSCAD X PACDYN)	99
FIGURA 71 - CASO2: TENSÃO EM CORRENTE ALTERNADA NO INVERSOR (PSCAD x PACDYN)	99
FIGURA 72 – CASO2: CORRENTE ALTERNADA NO RETIFICADOR (PSCAD x PACDYN)	100
FIGURA 73 – CASO2: CORRENTE ALTERNADA NO INVERSOR (PSCAD x PACDYN)	100
FIGURA 74 – CASO 2(SEM CONTROLE DO INVERSOR):: TENSÃO EM CORRENTE CONTÍNUA NO RETIFICADOR (PSCAD x PACDYN) 101
FIGURA 75 - CASO 2(SEM CONTROLE DO INVERSOR): TENSÃO EM CORRENTE CONTÍNUA NO INVERSOR (PSCAD X PACDYN)	102
FIGURA 76 - CASO 2(SEM CONTROLE DO INVERSOR): ÂNGULO ALFA NO RETIFICADOR (PSCAD x PACDYN)	102
FIGURA 77 - CASO 2(SEM CONTROLE DO INVERSOR): ÂNGULO ALFA NO INVERSOR (PSCAD x PACDYN)	103
FIGURA 78 - CASO 2(SEM CONTROLE DO INVERSOR): CORRENTE CONTÍNUA NA LINHA CC (PSCAD x PACDYN)	103
FIGURA 79 - CASO 2(SEM CONTROLE DO INVERSOR): ÂNGULO GAMA NO INVERSOR (PSCAD x PACDYN)	104
FIGURA 80 – CASO2 (SEM CONTROLE DO INVERSOR): TENSÃO EM CORRENTE ALTERNADA NO RETIFICADOR (PSCAD X PACDYN)104
FIGURA 81 - CASO2(SEM CONTROLE DO INVERSOR): TENSÃO EM CORRENTE ALTERNADA NO INVERSOR (PSCAD x PACDYN)	105
FIGURA 82 – CASO2(SEM CONTROLE DO INVERSOR): CORRENTE ALTERNADA NO RETIFICADOR (PSCAD x PACDYN)	105
FIGURA 83 – CASO2 (SEM CONTROLE DO INVERSOR): CORRENTE ALTERNADA NO INVERSOR (PSCAD x PACDYN)	106
FIGURA 84 - DIAGRAMA UNIFILAR NO PSCAD DO ELO CONECTADO DIRETAMENTE NA BARRA INFINITA ATRAVÉS DE UMA IMPED	ÂNCIA
(R=3,32Ω ε L=0,12H)	107
FIGURA 85 – CASO 2.1: TENSÃO EM CORRENTE CONTÍNUA NO RETIFICADOR (PSCAD X PACDYN)	110
FIGURA 86 - CASO 2.1: TENSÃO EM CORRENTE CONTÍNUA NO INVERSOR (PSCAD x PACDYN)	110
FIGURA 87 - CASO 2.1: ÂNGULO ALFA NO RETIFICADOR (PSCAD X PACDYN)	111
FIGURA 88 - CASO 2.1: ÂNGULO ALFA NO INVERSOR (PSCAD X PACDYN)	111
FIGURA 89 - CASO 2.1: CORRENTE CONTÍNUA NA LINHA CC (PSCAD x PACDYN)	112
FIGURA 90 - CASO 2.1: ÂNGULO GAMA NO INVERSOR (PSCAD X PACDYN)	112
FIGURA 91 – CASO 2.1: TENSÃO EM CORRENTE ALTERNADA NO RETIFICADOR (PSCAD X PACDYN)	113
FIGURA 92 – CASO 2.1: TENSÃO EM CORRENTE ALTERNADA NO INVERSOR (PSCAD X PACDYN)	113
FIGURA 93 – CASO 2.1: CORRENTE ALTERNADA NO RETIFICADOR (PSCAD X PACDYN)	
FIGURA 94 – CASO2 1: CORRENTE ALTERNADA NO INVERSOR (PSCAD X PACDYN)	114
FIGURA 95 - DIAGRAMA LINIEU AR NO ANAREDE DO ELO FORMADO POR DOIS BIPOLOS	115
FIGURA 96 - DIAGRAMA LINIEU AR NO PSCAD DO FLO FORMADO POR DOIS BIPOLOS	116
FIGURA 97 – CASO 31 OSCILAÇÃO SUSTENTADA NO PSCAD/EMTDO	118
FIGURA 98 - CASO 3: CORRENTES NO RETIFICADOR (EMC X SSC) NO PACDYN	119
FIGURA 99 – CASO 3: EXAMPLES NO RETRICED ON DOI $0.10 + 0.7611 + 183493$	121
FIGURA 100 – CASO3: FORMAS MODAIS DO POLO +0.7611+183493	171
FIGURA 101 – CASO4: RESULTADO DO CÁLCULO DO LUGAR DAS RAÍZES DARA VARIAÇÃO DOS GANHOS KA E KU	177
FIGURA 102 – CASO 3. VARIAÇÃO DA CORRENTE NAS MODELAGENS FMC E SSR	17/
FIGURA 103 – CASO 4: VARIAÇÃO DA CORRENTE NAS MODELAGENS ENICE SUN ASCAD	125
FIGURA 104 - CASO 3' ΤΕΝSÃO ΕΜ CORRENTE CONTÍNUIA NOS RETIFICADORES (DSCAD V DACOVNI)	176
FIGURA 105 – CASO 3. TENSÃO EM CORRENTE CONTÍNUIA NOS RETITICADORES (ESCAD X FACDIN). FIGURA 105 – CASO 3. TENSÃO EM CORRENTE CONTÍNUIA NOS INVERSORES ($PSCAD X PACDYN$)	176
FIGURA 105 - CASO S. TENSAO EN CONNENTE CONTINUA NOS INVERSORES (FSCAD X FACDIN)	120
TIGURA 100 - CASU S. ANGULU ALFA NUS NETIFICADURES (F SCAD X FACDIN)	12/

FIGURA 107 - CASO 3: ÂNGULO ALFA NOS INVERSORES (PSCAD X PACDYN)	127
FIGURA 108 - CASO 3: CORRENTE CONTÍNUA NA LINHAS CC (PSCAD x PACDYN)	128
FIGURA 109 - CASO 3: ÂNGULO GAMA NOS INVERSORES (PSCAD X PACDYN)	128
FIGURA 110 - CASO 3: TENSÃO EM CORRENTE ALTERNADA NO RETIFICADOR (PSCAD X PACDYN)	129
FIGURA 111 – CASO 3: TENSÃO EM CORRENTE ALTERNADA NO INVERSOR (PSCAD x PACDYN)	129
FIGURA 112 - CASO 3: CORRENTE ALTERNADA NO RETIFICADOR (PSCAD x PACDYN)	130
FIGURA 113 - CASO 3: CORRENTE ALTERNADA NO INVERSOR (PSCAD x PACDYN)	130
FIGURA 114 – DIAGRAMA UNIFILAR NO ANAREDE DO SISTEMA BENCHMARK DE 14 BARRAS	133
FIGURA 115 - CASO 4: TENSÃO EM CORRENTE CONTÍNUA NO RETIFICADOR (PSCAD X PACDYN X ANAHVDC)	134
FIGURA 116 - CASO 4: TENSÃO EM CORRENTE CONTÍNUA NO INVERSOR (PSCAD X PACDYN X ANAHVDC)	134
FIGURA 117 - CASO 4: ÂNGULO ALFA NO RETIFICADOR (PSCAD x PACDYN X ANAHVDC)	135
FIGURA 118 - CASO 4: ÂNGULO ALFA NO INVERSOR (PSCAD X PACDYN X ANAHVDC)	135
FIGURA 119 - CASO 4: CORRENTE NA LINHA CC (PSCAD x PACDYN X ANAHVDC)	136
FIGURA 120 - CASO 4: ÂNGULO GAMA NO INVERSOR (PSCAD X PACDYN X ANAHVDC)	136
FIGURA 121 – CASO 4: TENSÃO EM CORRENTE ALTERNADA NO RETIFICADOR (PSCAD X PACDYN X ANAHVDC)	137
FIGURA 122 - CASO 4: TENSÃO EM CORRENTE ALTERNADA NO INVERSOR (PSCAD X PACDYN X ANAHVDC)	137
FIGURA 123 - CASO 4: CORRENTE ALTERNADA NO RETIFICADOR (PSCAD X PACDYN X ANAHVDC)	138
FIGURA 124 - CASO 4: CORRENTE ALTERNADA NO INVERSOR (PSCAD x PACDYN X ANAHVDC)	138
FIGURA 125 – CASO 5: CONTEXTUALIZAÇÃO	139
FIGURA 126 – CASO 5: TENSÃO EM CORRENTE CONTÍNUA EM XINGU (ANAHVDC x PACDYN)	140
FIGURA 127 – CASO 5: TENSÃO EM CORRENTE CONTÍNUA NO TERMINAL RIO (ANAHVDC X PACDYN)	141
FIGURA 128 - CASO 5: ÂNGULO ALFA EM XINGU (ANAHVDC X PACDYN)	141
FIGURA 129 - CASO 5: ÂNGULO ALFA NO TERMINAL RIO (ANAHVDC x PACDYN)	142
FIGURA 130 - CASO 5: CORRENTE CONTÍNUA NA LINHA XINGU – TERMINAL RIO (ANAHVDC x PACDYN)	142
FIGURA 131 - CASO 5: ÂNGULO GAMA NO TERMINAL RIO (ANAHVDC x PACDYN)	143
FIGURA 132 – CASO 5: TENSÃO EM CORRENTE ALTERNADA EM XINGU (ANAHVDC x PACDYN)	143
FIGURA 133 – CASO 5: TENSÃO EM CORRENTE ALTERNADA NO TERMINAL RIO (ANAHVDC x PACDYN)	144
FIGURA 134 – CASO 5: CORRENTE ALTERNADA EM XINGU (ANAHVDC x PACDYN)	144
FIGURA 135 – CASO 5: CORRENTE ALTERNADA NO TERMINAL RIO (ANAHVDC x PACDYN)	145

Lista de Tabelas

TABELA 1 – RELAÇÃO DOS AUTOVETORES E DO FATOR DE PARTICIPAÇÃO	
TABELA 2 – COMPARAÇÃO ENTRE AS TECNOLOGIAS LCC E VSC	
TABELA 3 - PRINCIPAIS EQUAÇÕES DO RETIFICADOR E INVERSOR	
TABELA 4 - EQUAÇÕES DAS FUNÇÕES DE CHAVEAMENTO DE TENSÃO E CORRENTE POR TRECHOS	56
TABELA 5 – COMPONENTES REAL E IMAGINÁRIA DAS TENSÕES E DA FUNÇÃO DE CHAVEAMENTO	63
TABELA 6 – DESCRIÇÃO DOS CASOS	71
TABELA 7 – CASO 1: DADOS DO RETIFICADOR	
TABELA 8 – CASO 1: DADOS DO INVERSOR	
TABELA 9 – CASO 2: DADOS DO RETIFICADOR	94
TABELA 10 – CASO 2: DADOS DO INVERSOR	94
TABELA 11 – CASO 2.1: DADOS DO RETIFICADOR	108
TABELA 12 – CASO 2.1: DADOS DO INVERSOR	108
TABELA 13 – CASO 3: DADOS DO RETIFICADOR (IPU9MQ)	116
TABELA 14 – CASO 3: DADOS DO INVERSOR (CS-3MQ)	117
TABELA 15 – CASO 3: DADOS DO INVERSOR (EQV. SYST.)	117
TABELA 16 – CASO 3: PRINCIPAIS MODOS DE OSCILAÇÃO DO SISTEMA ANTES DO AJUSTE (EMC)	120
TABELA 17 – CASO 3: PRINCIPAIS MODOS DE OSCILAÇÃO DO SISTEMA ANTES DO AJUSTE (SSR)	120
TABELA 18 – CASO 3: GANHOS OBTIDOS COM O CÁLCULO DO LUGAR DAS RAÍZES	123
TABELA 19 – CASO 3: PRINCIPAIS MODOS DE OSCILAÇÃO DO SISTEMA DEPOIS DO AJUSTE (EMC)	123
TABELA 20 – CASO 3: PRINCIPAIS MODOS DE OSCILAÇÃO DO SISTEMA DEPOIS DO AJUSTE (SSR)	124

Lista de Abreviaturas

SIN	-	Sistema Interligado Nacional
CA	-	Corrente Alternada
CC	-	Corrente Contínua
CAG		Controladores Automáticos da Geração
FACTS	-	Flexible AC Transmission Systems
CCAT	-	Corrente Contínua em Alta Tensão
HVDC	-	High Voltage Direct Current
PacDyn	-	<i>Software</i> desenvolvido pelo CEPEL para análises lineares de sistemas de potência e ajuste de sistemas de controles
CEPEL	-	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
ANAHVDC	-	<i>Software</i> em desenvolvimento no CEPEL para sistemas de potência considerando dinâmicas de altas frequências
SISO	-	Single-Input, Single-Output
SLIT	-	Sistema Linear Invariante no Tempo
LCC	-	Line Commutaded Converter
VSC	-	Voltage Source Converter
ANATEM	-	<i>Software</i> desenvolvido pelo CEPEL para análises de estabilidade eletromecânica de sistemas de potência
ANAREDE	-	<i>Software</i> desenvolvido pelo CEPEL para análises de fluxo de carga ou de regime permanente de sistemas de potência
PLL	-	Phase Locked Loop
ONS	-	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PAR	-	Plano de Ampliações e Reforços (ONS)

Lista de Símbolos

L	-	Transformada de Laplace
x(t)	-	Vetor de variáveis de estado
$\dot{x}(t)$	-	Vetor de derivadas das variáveis de estado
u(t)	-	Vetor de variáveis de entrada
y(t)	-	Vetor de variáveis de saída
A	-	Matriz de estado do sistema
В	-	Matriz de entrada do sistema
С	-	Matriz de saída do sistema
D	-	Matriz de transmissão direta do sistema
Ι	-	Matriz identidade
G(s)	-	Função de transferência
Т	-	Matriz identidade expandida
λ	-	Autovalores da matriz A
v	-	Autovetores à esquerda
W	-	Autovetores à direita
ϕ_i	-	Autovetor à esquerda
ψ_i	-	Autovetor à direita
Λ	-	Nova matriz de estado do sistema
B'	-	Nova matriz de entrada do sistema
С′	-	Nova matriz de saída do sistema
R _{cr}	-	Resistência de comutação do retificador
R _{ci}	-	Resistência de comutação do inversor
X _{cr}	-	Reatância de comutação do retificador
X _{ci}	-	Reatância de comutação do inversor
k	-	Constante dos conversores

V _{ccr}	-	Tensão CC do retificador
V _{cci}	-	Tensão CC do inversor
Vacr	-	Tensão CA do retificador
V _{aci}	-	Tensão CA do inversor
а	-	Relação de tape do transformador
Vac	-	Tensão fase-fase no lado CA
X_{tr}	-	Reatância do transformador
I _{cc}	-	Corrente contínua no elo CCAT
V _{fn}	-	Tensão fase-neutro secundária do transformador
α	-	Ângulo de disparo
μ	-	Atraso de comutação
Р	-	Potência ativa
Q	-	Potência reativa
θ	-	Ângulo do fator de potência
V _{re}	-	Componente real da tensão em corrente alternada
V _{im}	-	Componente imaginária da tensão em corrente alternada
L _{CC}	-	Indutância da linha em corrente contínua
R _{CC}	-	Resistência da linha em corrente contínua
dI _{cc} dt	-	Taxa de variação da corrente contínua no tempo
Vcc	-	Tensão em corrente contínua
V_a	-	Tensão em corrente alternada na fase a
V_b	-	Tensão em corrente alternada na fase b
V_c	-	Tensão em corrente alternada na fase c
S_{V_a}	-	Função de chaveamento da tensão na fase a
S_{V_b}	-	Função de chaveamento da tensão na fase b
S_{V_c}	-	Função de chaveamento da tensão na fase c

- I_a Corrente alternada na fase a
- I_b Corrente alternada na fase b
- I_c Corrente alternada na fase c
- S_{I_a} Função de chaveamento da corrente na fase a
- S_{I_b} Função de chaveamento da corrente na fase b
- S_{I_c} Função de chaveamento da corrente na fase c

Capítulo 1 - Introdução

O Brasil, país de dimensões continentais, possui um sistema de transmissão interligado, complexo e de grande porte, capaz de transportar energia elétrica a diversas localidades do país. Além disso, a matriz energética é predominantemente hidráulica, com usinas geralmente de grande porte e localizadas em regiões muitas vezes remotas, longe dos grandes centros de carga. Assim, o sistema de transmissão é majoritariamente de longa distância. O Mapa do Sistema Interligado Nacional (SIN), ilustrando o sistema de transmissão da rede básica, extraído do site do ONS, em outubro de 2019, está apresentado na Figura 1.



Figura 1 – Mapa do SIN

Um fenômeno recente que vem ocorrendo no SIN é a mudança da composição da matriz energética, com crescimento principalmente das fontes renováveis. Essa mudança impacta diretamente no sistema de transmissão. Por exemplo, em relação à energia eólica, os locais mais adequados podem ser em pontos com menor capacidade de escoamento da rede elétrica, exigindo reforços. Portanto, isso pode levar a um aumento da complexidade desse sistema.

Outros fatores relevantes também devem ser levados em consideração como, por exemplo, os ciclos sazonais de determinadas regiões, os perfis de cargas, a demanda, dentre outros. Todas essas questões trazem cada vez mais à tona a importância das interligações do sistema elétrico brasileiro, que devem ser planejadas através de alternativas econômicas e com adequado nível de confiabilidade.

Uma possível alternativa que leva em consideração a questão da complexidade do sistema e de sua distância é o uso de elos de corrente contínua. Em geral, a escolha entre transmissão em corrente contínua ou alternada pondera aspectos de natureza técnica e econômica [1], [2]. Entre as vantagens técnicas referentes ao uso de transmissão em corrente contínua estão o aumento da estabilidade do sistema, a possibilidade de interligação entre sistemas assíncronos, a possibilidade de controle de fluxo de potência, enquanto que o critério econômico está correlacionado ao nível de tensão utilizado no sistema de transmissão e à distância pela qual a energia deve ser transmitida e ao próprio custo da instalação.

Tendo em vista a necessidade de expansão do sistema, o aumento da complexidade do mesmo e de sua interligação faz com que o investimento nas linhas de transmissão ganhe relevância. Nesse âmbito, a tomada de decisão adequada sobre a utilização de sistemas em corrente alternada ou corrente contínua se torna cada vez mais importante.

Historicamente, a corrente alternada (CA) tem sido utilizada de forma predominante. Entretanto, com o avanço da eletrônica de potência, os sistemas em corrente contínua (CC) têm se tornado cada vez mais viáveis do ponto de vista técnico e econômico. Pode-se dizer que a viabilidade de sistemas CC em relação aos sistemas CA é dada principalmente em função do comprimento da linha de transmissão. Essa relação está apresentada na Figura 2.



Figura 2 – Relação Custos versus Distância entre sistemas CA x CC

Conforme pode ser visto na Figura 2, um dos principais parâmetros na escolha do tipo de sistema é a distância entre a geração e a carga. Quanto maior for a linha de transmissão em corrente alternada, maior será a necessidade de compensação de reativos para operá-la adequadamente. Desse modo, em distâncias superiores a 400 km, o custo total para construir e operar essas linhas se torna considerável, quando comparado ao custo de uma linha de transmissão em corrente contínua. Isso porque, em sistemas de corrente contínua, o custo com compensação de reativos está relacionado com a utilização de conversores CA/CC e não com a distância através da qual a energia elétrica será transmitida, como ocorre em transmissão em corrente alternada [3].

Analisando os sistemas dentro da perspectiva do custo dos equipamentos e considerando um mesmo nível de potência, um sistema CC pode transportar energia fazendo uso de dois condutores, enquanto que o mesmo sistema CA necessita de três condutores [4]. Logo, um sistema CC possui menos linhas e torres, sendo este mais simples e, como uma consequência, haverá uma redução dos custos de condutores e isoladores. Já o sistema CA equivalente além de mais complexo, necessita de banco de reatores para compensar reativos, representando assim um custo adicional em seu projeto.

Por outro lado, as estações conversoras (retificadoras e inversoras), são mais caras que esses mesmos terminais equivalentes em corrente alternada. Desses custos considerados há um ponto de equilíbrio denominado distância de equilíbrio, ou ainda, "*breakeven distance*".

O ponto de equilíbrio se situa em torno de 800 km para linhas aéreas, e entre 25 km a 50 km para cabos subterrâneos ou aquáticos [4] e [5].

Ainda devem ser consideradas as perdas em ambos os sistemas. Os sistemas CC apresentam perdas elétricas menores quando comparados aos sistemas em CA equivalentes. A Figura 2 apresenta a comparação CA x CC sem considerar as perdas com as linhas tracejadas e considerando as perdas através de linhas contínuas.

Outros parâmetros também são considerados na escolha entre sistemas em corrente alternada ou contínua. Em determinadas situações, os critérios técnicos podem prevalecer sobre os critérios de ordem econômica. Entre as questões técnicas encontradas em sistemas em corrente alternada que são superados pela corrente contínua estão:

- <u>Limite de estabilidade eletromecânica</u>: O limite de estabilidade eletromecânica em sistemas CA é inversamente proporcional à distância, o que se deve ao fato de existir uma abertura angular das tensões. O sistema CC, por sua vez, não apresenta problema de limite de estabilidade angular;
- <u>Controle de tensão</u>: Existe a necessidade de controle de potência reativa em sistemas CA para manter a tensão nos terminais em níveis aceitáveis. Os sistemas CC necessitam de potência reativa apenas no lado CA das estações conversores, devido à injeção de harmônico que esse sistema exporta para a rede elétrica e para manter o nível de tensão de forma que os conversores funcionem adequadamente;
- <u>Interconexão de sistemas CA assíncronos</u>: Nos sistemas CA é preciso haver sincronismo, no qual todos os componentes da rede elétrica devem operar em uma determinada frequência nominal, que é obtida através dos Controladores Automáticos de Geração (CAG). Já nos sistemas CC, a utilização da conversão de CA em CC faz com que seja possível a conexão de dois subsistemas CA de frequências diferentes.

1.1 Motivação

Devido ao uso cada vez maior de equipamentos FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*) e, em especial ao uso de elos de corrente contínua (elos HVDC ou CCAT), a análise de interações desses equipamentos entre si com a rede elétrica na qual estão instalados se torna cada vez mais importante. Existem programas computacionais, de uso comercial, desenvolvidos para a realização de simulações de comportamento dinâmico de redes elétricas e de seus componentes, que consideram modelos de equipamentos na faixa de frequência eletromecânica e de alta frequência dentro do espectro eletromagnético. Porém, ainda há uma lacuna quanto aos modelos de elos CCAT que consideram dinâmicas de frequências mais elevadas (na modelagem proposta consiste em frequências maiores que 5 Hz, ou seja, aquelas superiores ao espectro eletromecânico) como, por exemplo, a ressonância subsíncrona ou mesmo alguns fenômenos na faixa de transitórios eletromagnéticos.

No contexto de análise de sistemas de controle de elos CCAT são utilizados métodos exaustivos, baseado no processo de tentativa e erro, para se encontrar um ajuste adequado. Com a ampliação dos equipamentos controláveis na rede elétrica, essa análise passa a ser cada vez mais crítica. A solução automatizada para essa questão se encontra no âmbito de programas como o PacDyn [6], que por meio de análise linear frente a pequenas perturbações, possibilita o ajuste e o projeto de controladores [7], através da análise modal. Atualmente, o PacDyn possui modelo de elo CCAT para estudos de transitórios eletromecânicos. Estudos envolvendo sinais estabilizadores em elos de corrente contínua com este modelo eletromecânico são apresentados em [8], [9]. Nesta dissertação, foi implementado no programa PacDyn o modelo proposto para elos de corrente contínua, que considera dinâmicas de altas frequências (a exemplo do PLL), ampliando assim o rol de modelos contemplados por esse programa.

Na análise de desempenho dinâmico do SIN são utilizadas ferramentas de transitórios eletromecânicos (a exemplo do PSS®E e do ANATEM), as quais tem a dinâmica do sistema bem representada, com seus modelos de máquinas e respectivos controladores, contudo, têm modelos simplificados no que tange a detecção de falha de comutação, por exemplo. Por outro lado, os programas dedicados a transitórios eletromagnéticos (a exemplo do ATP e do PSCAD/EMTDC) são adequados para a detecção de falha de comutação, entretanto,

necessitam de redes equivalentes (estática e dinâmica) reduzidas, cuja preparação normalmente requer grande esforço por parte do usuário, além de poder trazer imprecisões para as análises realizadas. Nesse sentido, o uso combinado dessas ferramentas torna a análise muito dispendiosa do ponto de vista computacional e temporal. Essas características destacadas são representadas esquematicamente na Figura 3.



Figura 3 – Tipos de Estudos e suas características

Portanto, a principal motivação deste trabalho consiste em suprir essa lacuna, desenvolvendo um modelo de elos em corrente contínua que contemple dinâmicas de alta frequência e implementando esse modelo em programas computacionais capazes de realizar avaliações dinâmicas adequadas, considerando esses fenômenos de frequências mais elevadas, como as de alguns transitórios eletromagnéticos. Essas implementações computacionais visam à obtenção de ferramentas de diagnóstico de problemas de oscilação e de ajustes de controladores mais robustas e eficazes. A Figura 4 apresenta alguns dos equipamentos modelados no PacDyn e a respectiva lacuna de modelagem que foi considerada no âmbito de desenvolvimento desse trabalho.



Figura 4 – Equipamentos modelados no programa PacDyn

Assim, reforça-se que o foco principal desse trabalho se trata da implementação do modelo do elo de corrente contínua em altas frequências no PacDyn. Contudo serão apresentados também alguns resultados desse modelo em um ambiente não linear. Esse ambiente não linear se refere ao programa ANAHVDC, software em desenvolvimento no CEPEL. Esse programa possui a vantagem de ter uma representação adequada da dinâmica eletromecânica do sistema (tal qual programas destinados a faixa eletromecânica), além de um modelo conveniente de detecção de falha de comutação (tal qual programas destinados a faixa eletromagnética). Essa proposta está apresentada de forma esquemática na Figura 5.



Figura 5 – Proposta da Dissertação

1.2 Objetivo

O objetivo desse trabalho consiste no desenvolvimento de um modelo de elo de corrente contínua considerando dinâmicas de alta frequência, tendo como principal foco, o diagnóstico e correção de parâmetros de controle de elos CCAT. Em suma, trata-se de uma ferramenta que vai possibilitar o ajuste de controladores em ferramentas de transitórios eletromagnéticos através de ferramentas de análise linear.

Dessa forma, o modelo proposto possibilita um melhor ajuste de controladores de elos CCAT, através de técnicas de controle clássico, e consequentemente, trazendo ganhos em produtividade, através de um diagnóstico mais automatizado e de forma mais eficiente.

Serão apresentados resultados obtidos com o modelo desenvolvido no trabalho e implementados no PacDyn, que serão comparados com os resultados obtidos nos programas computacionais PSCAD/EMTDC [10] e ANAHVDC [11], sendo esse último um programa em desenvolvimento pelo CEPEL.

Como se trata de um modelo linearizado, baseado em fasores dinâmicos representados apenas através de sua componente fundamental, o presente trabalho também se propõe a delimitar a abrangência de uso além de possíveis limitações do modelo proposto. Essas ponderações serão apresentadas ao longo do desenvolvimento dos casos exemplos.

A Figura 6 exemplifica um tipo de situação na qual pode ser utilizada a modelagem proposta para detectar e mitigar ou solucionar eventuais problemas de oscilação. Assim, inicialmente é verificado algum problema de oscilação em uma ferramenta de análise não linear. Posteriormente o caso com problema é linearizado no PacDyn para que sejam utilizadas ferramentas de análise linear a fim de identificar e diagnosticar problemas de oscilação e para posterior ajuste de controladores. Por fim, com o problema solucionado, os ajustes dos controladores propostos são avaliados no ambiente não linear.



Figura 6 - Caminho proposto de solução

1.3 Publicações Originárias da Dissertação

No âmbito do trabalho desenvolvido nesta dissertação, já foi aprovado um artigo que será apresentado no XXV SNPTEE 2019 [12]. Os desenvolvimentos matemáticos realizados na dissertação contribuíram ainda para a implementação do modelo de elo CCAT no novo programa ANAHVDC, que vem sendo desenvolvido no CEPEL, na qual houve a participação em coautoria dos seguintes trabalhos aprovados para o mesmo XXV SNPTEE 2019: [11] e [13]. Pretende-se ainda preparar uma nova publicação a ser submetida a um periódico internacional utilizando os últimos desenvolvimentos e resultados obtidos nesta dissertação.

1.4 Estrutura do Trabalho

O desenvolvimento dessa dissertação está estabelecido da seguinte forma:

- Capítulo 1 Introdução: neste capítulo foi feita uma introdução do tema da dissertação, incluindo a motivação, o objetivo, a propostas, além das publicações originárias da Dissertação.
- Capítulo 2 Conceituação Teórica: são apresentados conceitos de modelagem e de ferramentas de análise linear, das funções de chaveamento, dos fasores dinâmicos e dos elos de corrente contínua.

- Capítulo 3 Metodologia: é apresentada a metodologia abordada nesse trabalho, seu desenvolvimento analítico e as implementações realizadas.
- Capítulo 4 Resultados: São apresentados os resultados das simulações dos casos exemplos no PacDyn, comparando-os com os programas PSCAD/EMTDC e ANAHVDC.
- Capítulo 5 Conclusões: são apresentadas as conclusões do trabalho desenvolvido, os resultados das análises e demais considerações.

Capítulo 2 - Conceituação Teórica

Neste capítulo são apresentados os conceitos teóricos relativos a esta dissertação, tais como definições e revisões bibliográficas dos tópicos mais importantes relacionados à estabilidade de sistemas de potência, funções de chaveamento, fasores dinâmicos e do modelo de elo CCAT desenvolvido.

2.1 Modelagem de Análise Linear

Neste tópico são apresentados os conceitos básicos da análise linear, cujo conjunto de ferramentas é utilizado na análise de estabilidade a pequenas perturbações.

Entretanto, antes de entrar propriamente na modelagem e análise linear, cabe ressaltar que o sistema elétrico de potência é de natureza não linear, sendo necessário linearizar esse dado sistema em torno de um ponto de operação. Após a linearização, pode-se enfim utilizar a modelagem linear e análise modal. Esse processo de linearização segue ilustrado na Figura 7.



Figura 7 - Linearização do Sistema Elétrico de Potência

Entre as metodologias disponíveis na literatura para as modelagens de sistemas de potência, visando à análise de estabilidade a pequenos sinais, encontram-se a modelagem por função de transferência, a formulação através da representação em espaço de estados, a modelagem via sistemas descritores [7], [14], e a representação no domínio s (Modelagem Y(s) [15]-[18]).

2.1.1 Modelagem por Função de Transferência

A função de transferência é utilizada para caracterizar relações entrada-saída de sistemas lineares invariáveis no tempo (SLIT) [19]. Seu conceito se aplica a sistemas invariáveis no tempo, ou em sistemas de controle não lineares em situações particulares (através de sua linearização em torno de um determinado ponto de operação). Desse modo, a função de transferência é definida como a relação entre a transformada de Laplace do sinal de saída (função resposta) e a transformada de Laplace do sinal de entrada (função excitação), supondo todas as condições iniciais nulas. Assim, sua formulação em equações diferenciais é dada pela equação em (1), com $n \leq m$:

$$a_0 y^{(n)} + a_1 y^{(n-1)} + \dots + a_{n-1} \dot{y} = b_0 x^{(m)} + b_1 x^{(m-1)} + \dots + b_{m-1} x + b_m$$
(1)

Aplicando-se a Transformada de Laplace conforme exposto de forma genérica em (2), tem-se a relação obtida em (3):

Função de Transferência =
$$G(s) = \frac{\mathcal{L}[saída]}{\mathcal{L}[entrada]}\Big|_{condições iniciais=0}$$
 (2)

$$G(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} \dots + b_{m-1} s + b_m}{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} \dots + a_{n-1} s + a_n}$$
(3)

Logo, conhecendo-se a função de transferência de um dado SLIT e dada uma determinada entrada (distúrbio), é possível obter a saída de um sistema.

2.1.2 Espaço de Estados

A modelagem por espaço de estados consiste na modelagem clássica de sistemas dinâmicos linearizados em torno de um ponto de operação, contendo a informação sobre a dinâmica do sistema. Nessa abordagem, é conveniente a definição prévia de alguns conceitos [19], [26]:

- <u>Estado</u>: o estado de um determinado sistema dinâmico consiste no menor conjunto de variáveis (entrada e variáveis de estado) capazes de descrever o comportamento do sistema para qualquer instante de tempo t ≥ t₀.
- <u>Variáveis de estado</u>: O menor conjunto de variáveis (x₁(t), x₂(t), ..., x_n(t)) capazes de descrever o comportamento dinâmico do sistema. Essas variáveis podem ser grandezas físicas mensuráveis ou observáveis, ou ainda qualquer representação dinâmica, ainda que somente analítica.
- <u>Vetor de estado</u>: Corresponde ao conjunto de variáveis de estado que descrevem o comportamento dinâmico do sistema. $\mathbf{x}(t) = [x_1(t), x_2(t), ..., x_n(t)]^T$
- Espaço de estados: Espaço n-dimensional cujos eixos de coordenadas são os eixos das variáveis de estado (x₁(t), x₂(t), ..., x_n(t)) o qual constituem o espaço de estados.

Seu sistema de equações que descreve a modelagem por espaço de estados é dado pela equação (4), conforme [16], e [19].

$$\dot{x}(t) = A x(t) + B u(t)$$

$$y(t) = C x(t) + D u(t)$$
(4)

Sendo:

- *x*(*t*), corresponde ao vetor de variáveis de estado;
- $\dot{x}(t)$, são as derivadas em relação ao tempo do vetor de variáveis de estado;
- u(t), é o vetor de variáveis de entrada;
- *y*(*t*), é o vetor de variáveis de saída;
- *A*, consiste na matriz de estados do sistema;
- *B*, consiste na matriz de entrada do sistema;
- *C*, consiste na matriz de saída do sistema;
- *D*, consiste na matriz de transmissão direta do sistema.

A seguir é apresentada a relação entre a modelagem por espaço de estados por funções de transferência. Aplicando a transformada de Laplace em (4) acima, obtém-se:

$$sX(s) - x(0) = A.X(s) + B.U(s)$$

 $Y(s) = C.X(s) + D.U(s)$
(5)

Em sistemas linearizados em torno de um determinado ponto de operação, as variáveis representam desvios, sendo as condições iniciais desse desvio nulas. Aplicando essa condição e isolando o vetor X(s), obtém-se:

$$sX(s) = A.X(s) + B.U(s)$$

$$sX(s) - A.X(s) = B.U(s)$$

$$sIX(s) - A.X(s) = B.U(s)$$

$$(sI - A).X(s) = B.U(s)$$

$$X(s) = (sI - A)^{-1}.B.U(s)$$

(6)

Por sua vez, usando (6) em (5), a saída será dada:

$$Y(s) = C.(sI - A)^{-1}.B.U(s) + D.U(s)$$
(7)

Evidenciando U(s) se obtêm relações diretas entre as variáveis entradas de um sistema dinâmico e as suas variáveis de saídas:

$$Y(s) = [C.(sI - A)^{-1}.B + D].U(s)$$
(8)

Essas relações entre entradas e saídas do sistema são definidas por uma matriz de funções de transferência G(s):

$$G(s) = [C.(sI - A)^{-1}.B + D] \to Y(s) = G(s).U(s)$$
(9)

2.1.3 Sistema Descritor

De forma análoga ao sistema em espaço de estados, tem-se o sistema descritor, também denominado de sistema de equações algébricas e diferenciais. A distinção entre as modelagens se apresenta através da matriz T, que é uma matriz quadrada diagonal que possui o valor "1" nos elementos diagonais referentes às variáveis de estado e valor "0" nos elementos diagonais referentes às variáveis algébricas. Essa matriz multiplica o vetor de derivadas das variáveis de estado $\dot{x}(t)$, que, nesse caso, x(t) representa-se o vetor das variáveis do sistema (variáveis algébricas e de estado). Caso o vetor T assuma a identidade, tem-se a formulação em espaço de estados, no qual apenas as variáveis de estado estão contidas no vetor x(t).

Logo, a modelagem por sistemas descritores é mais geral do que a espaço de estados, podendo haver equações algébricas além das equações diferenciais. Um problema na formulação de espaço de estados consiste na possibilidade de ocorrência de estados redundantes, que aparecem como combinação linear de outros estados, nem sempre de fácil identificação e remoção. Já em sistemas descritores a eliminação dessas redundâncias não é necessária. Essa modelagem apresenta a vantagem de possuir estruturas formadas com matrizes esparsas, as quais são computacionalmente mais eficientes se comparadas com a formulação em espaço de estados. Essa vantagem se torna mais aparente em sistemas de grande porte [16].

Seu sistema de equações, portanto, é dado por (10)

$$T \dot{x}(t) = A.x(t) + B.u(t)$$

 $y(t) = C.x(t) + D.u(t)$
(10)

Sendo:

• *T*, uma matriz denominada identidade expandida. Assume valor "1" na diagonal principal referente às variáveis de estado e "0" nos elementos da diagonal principal relacionadas às variáveis algébricas.

De acordo com [16], a matriz T possui elementos constantes e não é necessariamente inversível quando se considera o caso geral. O caso mais geral considerado é composto por equações envolvendo termos diferenciais e equações algébricas.

Na situação particular na qual a matriz T é diagonal e composta apenas de elementos nulos e unitários, as equações são de dois tipos: de estado e algébricas.

$$T = \begin{bmatrix} I & 0\\ 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{11}$$

Onde:

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$
(12)

Dessa forma, é possível concluir que a dimensão da matriz identidade corresponde ao número de estados do sistema, desde que não haja redundância de estados, ou seja, que as linhas da parte da matriz *A* relativas às equações diferenciais, sejam linearmente independentes entre si.

É possível, ainda, separar as equações algébricas e diferenciais, chegando-se ao seguinte modelo:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 \\ A_3 & A_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x(t) \\ r(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_x \\ B_r \end{bmatrix} \cdot u(t)$$
(13)

A seguir a formulação de sistemas descritores é relacionada com a de espaço de estados. Se a matriz A_4 for inversível, pode-se reescrever:

$$A_3.x(t) + A_4.r(t) + B_r.u(t) = 0$$
(14)

Então:

$$r(t) = -A_4^{-1} A_3 x(t) - A_4^{-1} B_r u(t)$$
(15)

Usando (15) em (13), tem-se:

$$\dot{x}(t) = A_1 \cdot x(t) + A_2 \cdot \{-A_4^{-1} \cdot A_3 \cdot x(t) - A_4^{-1} \cdot B_r \cdot u(t)\} + B_r \cdot u(t)$$
(16)

$$y(t) = C_x \cdot x(t) + C_r \cdot \{-A_4^{-1} \cdot A_3 \cdot x(t) - A_4^{-1} \cdot B_r \cdot u(t)\} + D \cdot u(t)$$
(17)

16

Reagrupando os termos multiplicados por x(t) e os termos multiplicados por u(t):

$$\dot{x}(t) = (A_1 - A_2 \cdot A_4^{-1} \cdot A_3) \cdot x(t) + (B_r - A_2 \cdot A_4^{-1} \cdot B_r) \cdot u(t)$$
(18)

$$y(t) = (C_x - C_r \cdot A_4^{-1} \cdot A_3) \cdot x(t) + (D - C_r \cdot A_4^{-1} \cdot B_r) \cdot u(t)$$
(19)

O sistema descritor degenera então em um sistema modelado no espaço de estados, podendo-se escrever:

$$\dot{x}(t) = A'.x(t) + B'.u(t)$$
(20)

$$y(t) = C'.x(t) + D'.u(t)$$
(21)

Sendo as matrizes correspondentes a:

$$A' = (A_1 - A_2 \cdot A_4^{-1} \cdot A_3)$$

$$B' = (B_r - A_2 \cdot A_4^{-1} \cdot B_r)$$

$$C' = (C_x - C_r \cdot A_4^{-1} \cdot A_3)$$

$$D' = (D - C_r \cdot A_4^{-1} \cdot B_r)$$

(22)

2.1.4 Modelagem por matriz Y(s)

A modelagem por matriz Y(s) é uma formulação não convencional realizada diretamente no domínio *s* em que os elementos da matriz são de forma geral não lineares com *s* [16]. Em [15] foi proposta a sua utilização para análise dinâmica de elementos não lineares na rede utilizando o método da secante para cálculo de polos e em [18] foi utilizada com o método de polos dominantes inicialmente para análise de transitórios eletromagnéticos em redes lineares com linhas de transmissão com modelo de parâmetros distribuídos. Em [16] é proposto o desenvolvimento dos diversos métodos numéricos para análise linear nesta formulação e aplicações em ressonância subsíncrona, transitórios eletromagnéticos e harmônicos.

Publicações posteriores complementam os desenvolvimentos e aplicações. Em [20] apresentam-se resultados consolidados da aplicação desta formulação na análise de transitórios eletromagnéticos. Em [21] é proposta a versão final do algoritmo de cálculo sequencial dos polos dominantes e resíduos de funções de transferência nesta formulação.
Em [22] é apresentada de forma didática a modelagem de redes elétricas utilizando a formulação por sistemas descritores e Y(s), comparando-as. Além disto, em [23] é apresentada aplicação em ressonância subsíncrona, em [24] aplicação em análise de harmônicos pela análise modal das ressonâncias da rede e em [25] análise de sistemas contendo atrasos de transporte.

Partindo-se do sistema descritor e utilizando a transformada de Laplace, considerando condições iniciais nulas, obtém-se (23).

$$s T x(s) = A.x(s) + B.u(s)$$

 $y(s) = C.x(s) + D.u(s)$
(23)

A equação (23) ainda pode ser reescrita como apresentado em (24).

$$(s T - A) x(s) = B.u(s)$$

 $y(s) = C.x(s) + D.u(s)$
(24)

Pode-se definir a matriz (s T - A) conforme nomenclatura estabelecida em [6] consiste na "modelagem no domínio *s*", é dada por (25):

$$Y(s) = (s T - A) \tag{25}$$

Assim, tem-se a relação obtida em (26), utilizando uma matriz Y(s), no qual, de forma geral os seus elementos são funções não lineares de *s*, embora Y(s) também possa possuir elementos funções lineares de *s*, ou mesmo constantes como é o caso particular dos sistemas descritores ou modelados no espaço de estados [16].

$$Y(s) x(s) = B.u(s)$$

 $y(s) = C.x(s) + D.u(s)$
(26)

Tem-se então uma modelagem ainda mais generalizada, com modelos matemáticos mais concisos que possibilitam uma melhor descrição de equipamentos no domínio da frequência, como por exemplo, a linha de transmissão (longas, principalmente), além da

representação de sistemas de ordem infinita, os quais possuem infinitos polos [16]-[18], [20]-[22], [24], [25].

Portanto, de forma generalizada a modelagem por função de transferência pode ser obtida a partir da modelagem em espaços de estados que por sua vez é um caso particular de sistemas modelados através da representação por sistemas descritores, que por fim, são degenerações da modelagem em Y(s), que é matematicamente a mais abrangente dessas modelagens. Essas inter-relações estão graficamente na Figura 9.



Figura 8 - Resumo da Modelagem em Análise Linear



Figura 9 - Relação entre as modelagens de análise linear

2.2 Ferramentas de Análise Linear

Nessa seção serão apresentadas as ferramentas de análise linear utilizadas em estudos de estabilidade a pequenas perturbações. Essas ferramentas são de utilidade em diversas áreas da engenharia e permitem a obtenção de informações sobre a dinâmica de sistemas, a partir de técnicas de controle clássico, tais como análise de polos e zeros, lugar das raízes, resíduos de funções de transferência, dentre outras.

A estabilidade a pequenos sinais é definida como a capacidade de um determinado sistema de potência de conseguir manter o sincronismo e/ou apresentar oscilações decrescentes no tempo, quando submetido a pequenas perturbações. Nessa perspectiva, uma pequena perturbação é aquela obtida caso as equações que descrevem a resposta resultante do sistema possam ser linearizadas de acordo com o propósito da análise.

Essas informações obtidas através da análise de estabilidade são úteis, uma vez que permite descrever as características dinâmicas intrínsecas de sistemas de energia.

O conceito de estado de um determinado sistema é o mínimo de informação sobre esse mesmo sistema em qualquer instante de tempo t_0 , para que seu comportamento futuro seja determinado sem qualquer referência para uma entrada anterior a t_0 .

Assim, um conjunto de variáveis linearmente independentes pode ser utilizado para descrever o estado desse sistema. A essas variáveis é dado o nome de variáveis de estado, sendo suficientes para descrever completamente o comportamento dinâmico desse sistema.

Quanto à natureza das variáveis de estado, essas podem ser físicas quando representam grandezas físicas tais como tensão, ângulo, velocidade, ou podem ser abstratas quando se referem a variáveis associadas a equações diferenciais necessárias para a modelagem matemática completa do sistema.

A escolha do conjunto de variáveis de estado, em geral não é singular. Ou seja, é possível que outro conjunto de variáveis de estado seja capaz de descrever dinamicamente o mesmo sistema. A composição desse sistema de variáveis resulta no denominado espaço de estados.

Matematicamente, o vetor de estados pode ser descrito por (27):

$$\dot{x} = f(x, u, t) \tag{27}$$

O vetor de saída do sistema pode ser descrito em (28)

$$y = g(x, u, t)$$

Um sistema dinâmico pode ser linear ou não linear. Em um sistema linear, a estabilidade desse sistema independe do distúrbio aplicado na entrada do sistema. Já em um sistema não linear, a estabilidade é determinada pelo tipo e magnitude da perturbação aplicada na entrada do sistema e pelo seu estado inicial, sendo dividido em determinadas categorias dependendo do espaço de estados em que o vetor de estados varia [2], [19].

- <u>Estabilidade local</u>: Ocorre quando um sistema é submetido a uma pequena perturbação e permanece em torno do ponto de equilíbrio.
- <u>Estabilidade finita</u>: Ocorre quando um sistema é submetido a uma perturbação e permanece em torno de uma determinada Região R.
- <u>Estabilidade global</u>: Ocorre quando um sistema é submetido a uma perturbação e permanece em torno de uma determinada Região R que tende ao infinito.

O PacDyn é uma ferramenta computacional voltada para análises considerando estabilidade local utilizando análise linear, enquanto o PSCAD/EMTDC considera a análise dos três tipos de estabilidade pela simulação no domínio do tempo. Uma forma de compatibilizar as ferramentas no mesmo horizonte quanto à estabilidade é através de aplicação de pequenas perturbações. Uma forma matemática de descrever sistemas não lineares através de ferramentas de análise linear ocorre por meio da linearização do sistema através da Série de Taylor.

A premissa inicial para linearizar um sistema é partir de um ponto de operação em equilíbrio. Matematicamente, esse ponto pode ser descrito, da seguinte forma:

$$\dot{x_0} = f(x_0, u_0) = 0 \tag{29}$$

Considerando uma pequena variação nas variáveis do sistema tem-se:

(28)

$$\begin{aligned} x &= x_0 + \Delta x \\ u &= u_0 + \Delta u \end{aligned} \tag{30}$$

Reescrevendo-se (29), através da consideração em (30) tem-se:

$$\dot{x_0} + \Delta \dot{x} = f(x_0 + \Delta x, u_0 + \Delta u) \tag{31}$$

Onde, pode-se escrever:

$$\Delta \dot{x} = A \,\Delta x + B \,\Delta u \tag{32}$$
$$\Delta y = C \,\Delta x + D \,\Delta u$$

Aplicando a transformada de Laplace nas equações, tem-se:

$$s\Delta x(s) - \Delta x(0) = A\Delta x(s) + B\Delta u(s)$$

$$\Delta y(s) = C\Delta x(s) + D\Delta u(s)$$
(33)

Reagrupando as equações

$$\Delta x(s) = \frac{adj(sI - A)}{det(sI - A)} [\Delta x(0) + B\Delta u(s)]$$
(34)

Logo:

$$\Delta y(s) = C \frac{adj(sI - A)}{det(sI - A)} [\Delta x(0) + B \Delta u(s)] + D \Delta u(s)$$
(35)

Os polos do sistema em análise são as raízes da equação característica:

$$det(sI - A) = 0 \tag{36}$$

Os valores que satisfazem à equação anterior são os autovalores da matriz de estado *A*. Tendo em vista a importância desse conceito, nas próximas subseções serão revisados os conceitos básicos correspondentes às ferramentas de análise linear, a saber: autovalores e autovetores, formas modais, fatores de participação, fatores de controlabilidade, observabilidade e resíduos.

2.2.1 Autovalores e autovetores

Dado o sistema linear de equações em (37) e (38), são definidos autovalores da matriz de estado A o conjunto de escalares λ que solucionam o sistema linear para solução diferente da trivial (v = 0) e (w = 0). O conjunto de soluções v e w são denominados autovetores à direita e à esquerda da matriz A, respectivamente, associados ao autovalor λ .

$$Av = \lambda v \tag{37}$$

$$wA = w\lambda \tag{38}$$

Cada autovalor λ_i corresponde a um modo de oscilação. Essas informações, por sua vez, definem o comportamento dinâmico, representando características das oscilações naturais desse sistema [19], [26], e [27]. Relacionando com a modelagem de um sistema de potência, as oscilações eletromecânicas correspondem a um polo cuja parte real define o seu grau de amortecimento (quanto mais negativa, mais amortecido) e a parte imaginária, a sua frequência angular em rad/s.

Reescrevendo a equação (37), tem-se:

$$Av - \lambda v = 0 \tag{39}$$

$$(A - \lambda I)v = 0 \tag{40}$$

A equação (38), por sua vez, resulta em:

$$wA - w\lambda = 0 \tag{41}$$

 $w(A - \lambda I) = 0 \tag{42}$

Seja em relação aos autovetores à esquerda ou aos autovetores à direita, a condição para que o sistema apresente solução distinta da trivial ((v = 0) e (w = 0)) é dada por (43):

Dessa forma, é possível calcular os autovalores da matriz de estados *A*, que determinam o comportamento dinâmico do sistema modelado.

2.2.2 Formas Modais (Mode Shapes)

A partir de uma transformação linear é possível obter uma nova matriz de estados com os modos de oscilação dispostos na diagonal principal, caso os autovalores sejam linearmente independentes. Nessa situação, cada autovalor está associado a um autovetor. Ou seja, cada modo de oscilação está relacionado a cada variável do estado modal.

Assim, as formas modais mostram como as variáveis se comportam em relação ao modo de oscilação em análise. Graficamente, essas formas modais são representadas pelos autovetores à direita do sistema relacionados a um determinado modo de oscilação [27].

A título de exemplificação, dentro de uma perspectiva eletromecânica, através das formas modais é possível identificar as características de oscilação dos modos, tais como: intra-planta, local, inter-área e multi-máquinas.

2.2.3 Fatores de controlabilidade e observabilidade

Através de uma transformação linear é possível obter um novo modelo para o sistema elétrico. Assim, partindo-se de (44).

$\dot{\Delta x} = A \Delta x + B \Delta u$	(44)
$\Delta y = C \Delta x + D \Delta u$	(++)

Utilizando (45):

$$\begin{aligned} \Delta x &= \Phi z \\ z &= \Psi \Delta x \end{aligned} \tag{45}$$

E sabendo que:

$$\Phi = \Psi^{-1}$$

$$\Psi \Phi = I$$
(46)

Tem-se então a equação disposta em (47):

$$(\dot{\Phi\Delta z}) = A (\Phi z) + B \Delta u$$

$$\Delta y = C(\Phi z) + D\Delta u$$
(47)

Reescrevendo (47), tem-se:

$$\Phi \Delta \dot{z} = A \, \Phi z + B \, \Delta u \tag{48}$$
$$\Delta y = C \Phi z + D \Delta u$$

Multiplicando (48) por Ψ , obtém-se:

$$\Psi \Phi \Delta \dot{z} = (\Psi A \ \Phi) z + (\Psi B) \ \Delta u$$

$$\Delta y = C \Phi z + D \Delta u$$
(49)

Ou ainda:

$$\dot{\Delta z} = Az + B' \Delta u$$

$$\Delta y = C'z + D\Delta u$$
Onde: (50)

$$x = \phi z$$

$$\Lambda = \phi^{-1} A \phi$$

$$B' = \phi^{-1} B$$

$$C' = C \phi$$
(51)

Essa transformação linear resulta em uma nova matriz de entradas B'e uma nova matriz de saídas C'.

De forma conceitual, o fator de controlabilidade quantifica a capacidade que uma determinada variável de entrada possui de excitar um determinado modo de oscilação do sistema.

Um modo de sistema pode ser denominado não controlável quando a matriz B' do sistema apresenta a linha relativa a esse sistema nula.

$$B' = \phi^{-1}B \tag{52}$$

Para a compreensão teórica desse conceito a Figura 10 mostra um sistema que possui uma parte da planta que não é controlável por $u_2(s)$. Nesse sistema simplificado a entrada em particular $u_2(s)$ não é capaz de sensibilizar os modos de oscilação em $G_1(s)$.



Figura 10 – Função de Transferência Sistema G₁(s) não controlável por u₂(s)

O fator de observabilidade, por sua vez, quantifica a capacidade que uma determinada variável de saída possui de observar e refletir as oscilações advindas de um determinado modo de oscilação do sistema.

Um modo de sistema pode ser denominado não observável quando a matriz C' do sistema apresenta a coluna relativa a esse sistema nula.

$$C' = C\phi \tag{53}$$

Para a compreensão teórica desse conceito a Figura 11 mostra um sistema que possui uma parte da planta que não é observável por $y_2(s)$. Nesse sistema simplificado a saída em particular $y_2(s)$ não é capaz de ser observada pelos modos de oscilação em $G_2(s)$.



Figura 11 - Função de Transferência Sistema G₂(s) não observável por y₂(s)

2.2.4 Fatores de Participação

Os fatores de participação, por sua vez, quantificam a influência de cada variável no aparecimento de um determinado modo de oscilação. Sua determinação analítica consiste no produto entre os autovetores à direita e à esquerda, relacionados às variáveis de estado do modelo do sistema.

Os fatores de participação são úteis em determinar a origem dos modos de oscilação do sistema. Um modo de oscilação pode ser oriundo do sistema elétrico, do sistema mecânico ou do sistema de controle.

A Tabela 1 tem o objetivo de apresentar sucintamente a relação entre os autovetores e o fator de participação.

Autovetores e Fator de Participação		
Variável	x_k	
Modo	i	
Autovetor à direita relativo ao modo i	ϕ_i	
Autovetor à esquerda relativo ao modo i	ψ_i	
Fator de Participação da variável j no modo i	$\phi_{ji}.\psi_{ij}$	

Tabela 1 - Relação dos autovetores e do fator de participação

2.2.5 Resíduos

Os resíduos quantificam a influência das oscilações de um determinado modo no comportamento dinâmico de uma determinada variável de saída do sistema, quando o modo

é excitado por uma determinada variável de entrada. O resíduo também é igual à sensibilidade de modo ou de um polo em relação a um ganho infinitesimal ao de uma realimentação fictícia da função de transferência em análise [16].

Do ponto de vista matemático, o cálculo dos resíduos leva em consideração tanto os fatores de controlabilidade como de observabilidade, como visto em (54), onde é possível obter uma matriz de resíduos, que considera as possíveis funções de transferência obtidas pelas combinações das variáveis de entrada e de saída do sistema.

$$R_i = (F.O.).(F.C.) = C'.B'$$
(54)

Considerando um sistema do tipo SISO (single-input, single-output), tem-se:

$$R_i(SISO) = c\phi_i\psi_i b \tag{55}$$

Outra interpretação possível acerca dos resíduos consiste no fato que esses ponderam cada parcela da resposta natural no tempo. Dessa forma a chamada resposta homogênea de uma determinada equação diferencial pode ser dada por:

$$x(t) = \sum_{i=1}^{n} R_i e^{\lambda_i t}$$
(56)

Sendo:

- λ_i , corresponde aos autovalores;
- *R_i*, são os resíduos;
- *n*, é a ordem do sistema.

2.2.6 Ajuste de Controladores

No que se refere ao ajuste de controladores, a principal ferramenta disponibilizada no PacDyn se trata do diagrama de Nyquist com amortecimento [7].

O diagrama de Nyquist consiste em uma ferramenta de resposta em frequência na qual seu gráfico é apresentado em coordenadas polares, com a frequência variando de zero a infinito [19]. No caso do Nyquist com amortecimento, varia-se a frequência complexa ao longo de uma reta no plano s com fator de amortecimento constante com o objetivo de realizar o projeto de um estabilizador para o reposicionamento de polos indesejáveis [7].

2.2.7 Lugar das Raízes (Root Locus)

O gráfico do lugar das raízes apresenta a variação das posições do conjunto de polos através de variações gradativas no valor de ganho de um ou mais parâmetros [19]. Dessa forma, é possível avaliar o efeito de um controlador pela variação dos seus ganhos. Geralmente esses ganhos são excursionados de zero até o valor nominal.

2.2.8 Resposta no Tempo

A ferramenta da resposta no tempo permite a inspeção visual do comportamento das variáveis, sua respectiva validação e também que sejam comparados resultados considerando análise linear x não linear.

2.2.9 Resposta na Frequência

A resposta na frequência representada pelo diagrama de Bode corresponde ao gráfico de módulo e ângulo de uma determinada função de transferência em função da frequência [19]. Essa ferramenta pode ser utilizada para estimativas de polos e zeros, de forma que no gráfico de módulo, as frequências com os máximos correspondem as frequências dos polos, enquanto que as frequências com os mínimos correspondem as frequências dos zeros. Assim, com o digrama de Bode, é possível ter uma visualização geral dos efeitos dos polos e zeros de uma função de transferência [19].

2.3 Funções de Chaveamento Generalizadas

As funções de chaveamento são funções matemáticas que descrevem a atuação dos dispositivos semicondutores utilizados em equipamentos de eletrônica de potência, possibilitando a modelagem desses equipamentos através de equações analíticas, relacionando suas correntes e tensões internas e externas.

Historicamente, foram introduzidas em 1976 por Guygyi e Pelly [28], com as então chamadas "funções de existência". Nesse primeiro momento, as funções de existência destinavam-se a descrever a forma de onda dos cicloconversores através de uma formulação mais geral e que não considerava a operação em regime permanente. Basicamente as funções de existência definem a sequência de chaveamento nas matrizes de chaveamentos, as quais são associadas a uma função matemática que determina a lei de formação das correntes CA e da tensão CC do sistema.

Em 1983, o trabalho de Oppenheim descreveu o fenômeno de Gibbs [29], fenômeno esse que impacta diretamente nos segmentos descontínuos existentes nas funções de existência. Esse fenômeno ocorre quando se representa uma função por série de Fourier, a qual possui um número finito de descontinuidades ao longo do seu período.

O desenvolvimento das funções de chaveamento teve continuidade no trabalho de Wood em 1984 [30] através do uso e exploração da modelagem de equipamentos chaveados. Sequencialmente, Pilotto, em 1994, [31] amplificou o conceito através da incorporação de segmentos de funções entre os valores discretos. Essa generalização das funções de chaveamento permitiu que fosse atenuado o fenômeno de Gibbs, e teve seu uso aplicado na modelagem de pontes conversoras de Corrente Contínua em Alta Tensão.

As funções de chaveamento generalizadas consistem, então, em uma extensão natural da teoria desenvolvida nas funções de chaveamento, permitindo remover as restrições oriundas do efeito de Gibbs. Tal generalização consiste na incorporação analítica de particularidades de cada tipo de conversor permitindo assim, uma avaliação precisa dos equipamentos tanto no domínio do tempo como da frequência [32]. Tal formulação proposta por Pilotto recebeu o nome de função de chaveamento generalizada. Ainda no que refere ao aspecto cronológico, em Alves [33] a função de chaveamento generalizada foi aplicada em reatores controlados a tiristores.

A Figura 12 apresenta a linha do tempo com os principais eventos referentes à modelagem das funções de chaveamento.



Figura 12 – Evolução cronológica das Funções de Chaveamento

A fim de ilustrar a diferença entre funções de existência e funções de chaveamento generalizadas são apresentadas as figuras a seguir. Na Figura 13 está destacado o comportamento observado pelas funções de existência: comportamento por válvula, em valores discretos.



Figura 13 - Funções de Existência

A Figura 14 representa a função de chaveamento generalizada que consiste no comportamento equivalente de cada conversor.



Figura 14 - Funções de Chaveamento Generalizadas

2.4 Modelagem por Fasores Dinâmicos

Uma forma de onda periódica no domínio do tempo pode ser representada em um determinado intervalo de frequência através da série de Fourier. Sendo a forma de onda periódica, os coeficientes de Fourier são invariantes no tempo.

Durante condições transitórias, o sistema deixa de assumir um estado puramente periódico e passa a um estado não periódico. Para manter a representação dessa forma de onda através de séries de Fourier é preciso que os coeficientes outrora constantes passem a ser dependentes do tempo.

Dessa forma o conceito de fasor dinâmico, inicialmente proposto em [34] com uma interpretação de uma operação de média ponderada, passa a englobar essa situação mais geral, na qual em regime permanente é a própria Série de Fourier com coeficientes constantes e em transitórios passam a ter seus coeficientes variantes no tempo.

Assim, os fasores dinâmicos são modelos matemáticos que permitem descrever funções não periódicas no tempo através de coeficientes de suas séries de Fourier. Esses coeficientes são dependentes do tempo. Em alguns trabalhos os fasores são calculados por integrais definidas ao longo do período do sinal utilizando o conceito de janela deslizante [34]-[38], em outros, utiliza-se uma transformação instantânea que varia no tempo por funções harmônicas senoidais e cossenoidais [39]-[44]. Pela transformação instantânea é possível a reprodução de transitórios eletromagnéticos sem perda de precisão [39], [45].

Em [39], [17] são propostos modelos de fasores dinâmicos de SVC e TCSC para simulação e análise linear em redes elétricas com transitórios eletromagnéticos. Em [40], [41] estes modelos são aplicados para ajuste coordenado de controladores destes equipamentos e em [42] para análise linear de ressonância subsíncrona. Em [44] e [45] é proposto um algoritmo para simulação eficiente dos transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência com linhas de parâmetros distribuídos contendo elementos FACTS utilizando fasores dinâmicos. Em [43] é feita a exposição conceitual da metodologia.

Como sequência dos trabalhos apresentados está sendo desenvolvida, pelo CEPEL, uma versão comercial de um simulador em linguagem C++ denominado ANAHVDC [11], cuja principal característica é a realização de estudos de simulação de desempenho dinâmico de múltiplos elos de corrente contínua considerando os transitórios eletromagnéticos e eletromecânicos simultaneamente. No ANAHVDC utilizou-se um modelo não linear de elo de corrente contínua equivalente ao modelo linearizado desenvolvido neste trabalho, conforme dado em [12]. No ANAHVDC pretende-se identificar e simular falhas de comutações em inversores, conforme resultados preliminares em [13]. Pretende-se ainda considerar o sistema de controle de forma detalhada e simulado eficientemente utilizando geração automatizada de código fonte dos controladores seguida de compilação [46], além de modelagem trifásica com possibilidade de aplicação de distúrbios desbalanceados como curto circuito fase-terra, fechamento e abertura de disjuntores com dispersão de polos e religamento monopolar.

Em uma definição sintetizada, fasores dinâmicos nada mais são do que fasores variantes no tempo tanto em amplitude como em fase. Eles se comportam como fasores convencionais em regime permanente e variam em situações transitórias, tais como distúrbios no sistema, podendo ser utilizados para modelar redes elétricas para análise de transitórios eletromagnéticos, por exemplo. A modelagem pode levar em consideração apenas a componente fundamental, o que pode apresentar resultados satisfatórios em determinadas situações, como, por exemplo, em sistemas com baixo nível de conteúdo harmônico, ou em sistemas lineares.

Por outro lado, é possível modelar conteúdo harmônico através de fasores dinâmicos. Essa abordagem é mais robusta e complexa, porém com maior grau de exigência computacional, e se justifica em ambientes com a presença de elementos não lineares e de outros elementos, como dispositivos FACTS ([43], [44] e [45]) e os próprios elos CCAT, que injetam componentes harmônicas em sistemas de potência.

Quanto ao aspecto prático, uma das vantagens dessa ferramenta é a possibilidade de integração com outras ferramentas de análise fasorial já consolidadas e em uso no setor elétrico, como por exemplo, as ferramentas de análises de rede utilizadas no CEPEL. Outras aplicações possíveis no que se refere à abordagem por fasores dinâmicos são [47]:

- Esquemas de proteção;
- Transmissão em Corrente Contínua;
- Modelagem de equipamentos FACTS;
- Modelagem de máquinas em corrente alternada em condições desbalanceadas;
- Modelagem de equipamentos fotovoltaicos;
- Entre outros.

Neste trabalho, uma aplicação desse conceito de fasores dinâmicos, considerando apenas as suas componentes fundamentais, será utilizada no programa PacDyn, para a implementação de um modelo do elo HVDC, considerando dinâmicas de frequências mais altas do que as de análise de estabilidade eletromecânica (limitadas a poucos Hz), podendose chegar a frequências de transitórios eletromagnéticos, na faixa de dezenas de kHz, dependendo dos modelos dos componentes de redes adotados.

No que tange sua metodologia de modelagem seu equacionamento é analítico e não diretamente numérico [38], permitindo sua utilização integrada com métodos de análise linear, como os utilizados no programa PacDyn.

Assim, quanto ao desenvolvimento analítico, uma dada função x(t) variante no tempo, periódica, que representa o regime permanente de um sistema não linear com excitação senoidal, pode ser descrita através de uma série de Fourier, conforme indicado em (57). Os coeficientes $X_{k_{re}} e X_{k_{im}}$ são as componentes real e imaginária, respectivamente, do fasor convencional, usualmente apresentado em livros tradicionais de circuitos elétricos [48].

$$x(t) = \sum_{k \ge 0} X_{k_{re}} \cos(k\omega t) - X_{k_{im}} \operatorname{sen}(k\omega t)$$
(57)

Reescrevendo a equação de modo a explicitar a componente média, tem-se:

$$x(t) = X_0 + \sum_{k \ge 1} X_{k_{re}} \cos(k\omega t) - X_{k_{im}} \operatorname{sen}(k\omega t)$$
(58)

Sabendo-se que:

$X_0 \rightarrow$ Representa o valor médio

Para k = 1, tem-se a representação da componente fundamental;

Para k > 1, tem-se a representação das componentes harmônicas.

A modelagem considerada nesse trabalho adotou a componente fundamental, ou sejak = 1.

Definindo o fasor convencional como \tilde{X}_k , a equação (57) também pode ser escrita, de forma mais compacta, na forma complexa:

$$x(t) = \mathcal{R}\left[\sum_{k\geq 0} \tilde{X}_k \ e^{jk\omega t}\right]$$
(59)

Sendo X_0 dado por:

$$X_0 = X_{0_{Re}} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt$$
(60)

E em regime permanente para cada X_k , tem-se que:

$$X_{k} = X_{k_{Re}} + jX_{k_{Im}} = \frac{2}{T} \int_{0}^{T} x(t)e^{-jk\omega t}dt$$
(61)

O fasor convencional para o sinal senoidal à frequência fundamental pode ser definido da seguinte forma:

$$x(t) = \mathcal{R}\left[\tilde{X}_1 e^{jk\omega t}\right] = \frac{\tilde{X}_1 e^{jk\omega t} + \tilde{X}_1^* e^{jk\omega t}}{2}$$
(62)

A título de representação, o sobrescrito * indica o valor complexo conjugado e o símbolo ~ por sua vez indica fasor [16], [17], [38]).

Conforme apresentado, os fasores convencionais podem representar sinais periódicos para cálculo de regime permanente em sistemas com ou sem a presença de harmônicos. Ao considerar um transitório, o sinal deixa de ser periódico, sendo que neste caso, a representação em (59) deixa de ser válida. Pode-se então adotar a seguinte generalização para representação fasorial de sinais não periódicos:

$$x(t) = \mathcal{R}\left[\sum_{k\geq 0} \tilde{X}_k(t) e^{jk\omega t}\right]$$
(63)

Numa acepção mais genérica pode ser assumido que o fasor $\tilde{X}_k(t)$ varia no tempo. Durante um transitório onde o sinal x(t) deixa de ser periódico, os fasores

que representam este sinal não serão constantes e, portanto, podem ser chamados de fasores dinâmicos.

De forma análoga à série de Fourier, os fasores dinâmicos podem ser obtidos através de integrais definidas. Essas integrais definidas, por sua vez, são chamadas de operações médias, pois se trata de integração ao longo de um período definido por uma janela deslizante ponderada por exponencial complexa relativa a cada harmônico [34]-[38].

$$x(\tau) = \mathcal{R}\left[\sum_{k\geq 0} \tilde{X}_k(t) e^{-jk\omega t}\right], t - T < \tau \le t$$
(64)

De forma que cada fasor dinâmico pode ser obtido através da relação.

$$\tilde{X}_k(t) = \frac{2}{T} \int_{t-T}^t x(\tau) e^{-jk\omega t} d\tau$$
(65)

O operador $\langle x \rangle_k(t)$ representa uma operação de média calculada pela integração da função, ponderada por uma exponencial complexa, através de uma janela deslizante.

$$\widetilde{X}_{k}(t) = \langle x \rangle_{k}(t) \tag{66}$$

Para $t = \tau$ em particular

$$x(t) = \mathcal{R}\left[\sum_{k\geq 0} \tilde{X}_k(t) e^{jk\omega t}\right]$$
(67)

O uso dessa formulação permite então uma solução unívoca [34]-[38]. No entanto, durante o período transitório, necessita de infinitos harmônicos para uma representação exata, impossibilitando a modelagem de transitórios eletromagnéticos por fasores fundamentais.

Por este motivo a representação feita em [39]-[44], também adotada neste trabalho, não utiliza uma transformação inversa com uma integral definida ao longo de uma janela deslizante, apenas realiza a modelagem analítica no domínio fasorial, relacionando as grandezas tensões e correntes por tensores [49], [16], [17]. Faz então uma integração numérica das equações fasoriais resultantes, possibilitando a simulação dos fasores ao longo

do tempo. Para a obtenção de grandezas instantâneas, utiliza-se então (59), que pode ser particularizada para o valor único de k = 1 no caso de modelagem por fasor fundamental.

Se por um lado, a transformação adotada para conversão de um sinal instantâneo em fasorial pode ser realizada de infinitas formas, por outro, a transformação de fasorial para instantâneo é única, dada em (59). Nesta relação a derivada do sinal pode ser relacionada com o sinal fasorial da seguinte forma:

$$\frac{dx(t)}{dt} = \mathcal{R}\left[\sum_{k\geq 0} \left(\frac{d\tilde{X}_k(t)}{dt} + jk\omega\tilde{X}_k(t)\right)e^{jk\omega t}\right]$$
(68)

2.4.1 Exemplo em Circuito RL

De modo a ilustrar uma aplicação é realizada a modelagem de um circuito RL (Figura 15) através de fasores dinâmicos [11], [50]. O desenvolvimento para um circuito RLC um pouco mais genérico é dado em [43], [45], não sendo aqui repetido.



Figura 15 - Circuito RL no domínio do tempo

O circuito RL pode ser descrito no tempo conforme (69).

$$v(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt}$$
(69)

Sendo:

- *R*, é a resistência do circuito;
- *L*, é a indutância;
- i(t), é a corrente que percorre o circuito variando no tempo;
- v(t), é a tensão do circuito variando no tempo.

Esse mesmo circuito pode ser descrito em fasor dinâmico:

Para a tensão, conforme (70):

$$v(t) = V_{re}(t)\cos(\omega t) - V_{im}(t)\sin(\omega t)$$
(70)

Para a corrente, conforme (71):

$$i(t) = I_{re}(t)\cos(\omega t) - I_{im}(t)\sin(\omega t)$$
(71)

Substituindo e reagrupando os termos, tem-se:

$$V(t)_{re} = RI_{re}(t) - \omega LI_{im}(t) + L \frac{dI_{re}(t)}{dt}$$

$$\tag{72}$$

$$V(t)_{im} = RI_{im}(t) + \omega LI_{re}(t) + L \frac{dI_{im}(t)}{dt}$$
(73)

Reescrevendo na forma matricial, obtém:

$$\begin{bmatrix} V_{re} \\ V_{im} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & -\omega L \\ \omega L & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{re} \\ I_{im} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{re} \\ \dot{I}_{im} \end{bmatrix}$$
(74)

_ _

Reescrevendo, tem-se:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{re} \\ \dot{I}_{im} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/L & 0 \\ 0 & 1/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{re} \\ V_{im} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -R/L & \omega \\ -\omega & -R/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{re} \\ I_{im} \end{bmatrix}$$
(75)

Essa equação pode ser reescrita em termos de sistemas descritores, equivalente a:

$$T.\dot{I}(t) = A.I(t) + B.V(t)$$
 (76)

O sistema resultante no domínio fasorial pode então ser resolvido por integração numérica, como, por exemplo, o método trapezoidal, e as grandezas instantâneas podem então ser recuperadas pela transformação dadas em (70) e (71). Para análise linear aplica-se as diversas ferramentas diretamente na forma analítica obtida em (76). Os coeficientes que

multiplicam as partes real e imaginária das correntes e tensões são tensores [49], representados por matrizes 2 x 2.

O exemplo apresentado pode ser apresentado sobre outra formulação em fasores dinâmicos, no domínio da frequência. Considerando os fasores dinâmicos de corrente e tensão dados por (77) e (78), respectivamente:

$$\tilde{I}(t) = I_{k_{re}}(t) + jI_{k_{im}}(t)$$
(77)

$$\tilde{V}(t) = V_{k_{re}}(t) + jV_{k_{im}}(t)$$
(78)

Pode-se reescrever a equação dinâmica do circuito RL como:

$$\tilde{V}(t) = R\tilde{I}(t) + L\frac{d\tilde{I}(t)}{dt} + j\omega L\tilde{I}(t)$$
(79)

Aplicando a transformada de Laplace no circuito tem-se:



Figura 16 - Circuito RL no domínio da frequência

Aplicando a transformada de Laplace na equação (79) tem-se:

$$\tilde{V}(s) = R\tilde{I}(s) + sL\tilde{I}(s) + j\omega L\tilde{I}(s)$$
(80)

A impedância equivalente desse circuito é dada por:

$$Z(s) = (s + j\omega)L \tag{81}$$

Sendo:

- *sL*, a componente do fasor dinâmico transitória;
- $j\omega L$, a componente do fasor dinâmico de regime permanente.

Por fim, pode-se reescrever:

$$\tilde{V}(s) = [R + Z(s)]\tilde{I}(s) \tag{82}$$

2.5 Modelos de Elos CCAT

As tecnologias existentes para transmissão em corrente contínua podem ser separadas, de forma simplificada, em dois tipos distintos, os quais terão apresentados maiores explicações a seguir:

• <u>HVDC LCC</u>: São sistemas de transmissão em alta tensão em corrente contínua que utilizam conversores do tipo fonte de corrente (Figura 17).



Figura 17 – Conversor tipo fonte de corrente - LCC

 <u>HVDC VSC</u>: São sistemas de transmissão em alta tensão em corrente contínua que utilizam conversores do tipo fonte de tensão (Figura 18)



Figura 18 - Conversor tipo fonte de tensão - VSC

Essas tecnologias fundamentalmente atendem ao mesmo objetivo, sendo que a escolha de uma em detrimento da outra ocorre por fatores de natureza técnica e econômica.

Os conversores mais utilizados atualmente em transmissão de grandes blocos de energia a longas distâncias são os baseados em comutação natural (*Line Commutaded Converters* - LCC). São utilizados tiristores como elementos de comutação permitindo, portanto, que se excursione o fluxo de potência em ambos os sentidos. Contudo o fluxo de reativos, por sua vez, é unidirecional, sempre do sistema CA para o sistema CC [1].

Os conversores utilizados nessa tecnologia são baseados na ponte de 6 pulsos, denominada ponte de Graetz, que em geral, são associados de forma a obter pontes de 12 pulsos. A ponte de 12 pulsos possui melhor desempenho do ponto de vista de injeção de componentes harmônicas na rede, possuindo harmônicos característicos mais afastados da frequência fundamental do sistema.

Os conversores do tipo *Voltage Source Converters* (VSC) utilizam chaves semicondutoras autocomutadas, tais como GTOs e IGBTs com controle do instante da condução e do bloqueio. O chaveamento de cada um dos componentes pode ser realizado com período fundamental ou em frequência elevada, usualmente utilizando a modulação por largura de pulsos (PWM). No atual estado da arte, utiliza chaveamento em menor frequência com múltiplos módulos, denominados de conversores modulares multiníveis, com a sigla inglesa MMC (Modular Multilevel Converter) [50], [51], [52]. O objetivo é reduzir as perdas

do chaveamento PWM de alta frequência convencional, mantendo baixo nível de distorção harmônica injetada na rede.

A Tabela 2 apresenta uma comparação entre as tecnologias LCC e VSC apresentando algumas características, vantagens e desvantagens. Cabe ressaltar que algumas características são limitadas pelo critério econômico. Por exemplo, a tecnologia VSC não possui uma capacidade de sobrecarga mais fraca de forma inerente. Contudo, se for considerado sistemas equivalentes à tecnologia VSC possui uma capacidade de sobrecarga mais fraca relativamente menor quando comparado a tecnologia LCC.

Assim, a Tabela 2 apresenta uma comparação relativa entre as duas tecnologias LCC e VSC equivalentes. Além disso, quando se refere à tecnologia VSC está se referindo a qualquer VSC.

Line Commutaded Converters - LCC	Voltage Source Converters - VSC
Maior capacidade de potência	Menor capacidade de potência
Maior capacidade de sobrecarga	Menor capacidade de sobrecarga
Requer sistemas CA fortes	Opera em sistemas CA mais fracos
Alto conteúdo harmônico, necessidade de filtros CA e CC	Baixo nível de conteúdo harmônico
Área maior, devido principalmente aos filtros harmônicos	Área mais compacta, em torno de 50 a 60% do equivalente em LCC
Custos mais baixos	Custos mais altos
Fluxo de potência invertido pela mudança de polaridade dos conversores	Fluxo de potência invertido pela mudança do fluxo de potência atual

Tabela 2 – Comparação entre as tecnologias LCC e VSC

De forma geral, um sistema CCAT é composto de subestações conversoras, retificadora e inversora, pelos seus transformadores conversores, filtros com função de atenuar o conteúdo harmônico e de fornecer suporte de reativos, além da linha em corrente contínua que interliga essas subestações.

O equacionamento do modelo convencional de elos de corrente contínua é aquele utilizado em estudos de transitórios eletromecânicos de sistemas de potência, no qual diversas simplificações são realizadas, levando-se em consideração a faixa de frequência de oscilações eletromecânicas. Nesse contexto, é desprezada a injeção de harmônicas que os conversores colocam no sistema elétrico. Outra consideração diz respeito ao valor médio das variáveis do sistema, tais como em suas tensões e correntes.

De acordo com [1] são definidos os seguintes parâmetros:

$$R_{cr} = \frac{3X_{cr}}{\pi} \tag{83}$$

• R_{cr} , é chamada de resistência de comutação do retificador.

$$R_{ci} = -\frac{3X_{ci}}{\pi} \tag{84}$$

• *R_{ci}*, é chamada de resistência de comutação do inversor, cuja convenção adotou o sinal negativo.

$$k = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \tag{85}$$

• *k*, é chamada de constante dos conversores.

A tensão do retificador é obtida através da integral da forma de onda da tensão em corrente contínua na saída do retificador, chegando-se a seguinte expressão em (86):

$$V_{ccr} = ka_r V_{acr} \frac{\cos(\alpha) + \cos(\alpha + \mu)}{2}$$
(86)

A equação é válida em uma operação em regime permanente do retificador, quando apenas duas válvulas estão envolvidas simultaneamente na comutação. Em outras palavras, para ângulos de comutação menores que 60°.

Levando em consideração o fenômeno da comutação entre as válvulas do retificador, a expressão abaixo é obtida:

$$\cos(\alpha + \mu) = \cos(\alpha) - \frac{2R_{cr}I_{cc}}{ka_r V_{acr}}$$
(87)

Essa equação não leva em consideração a existência de *ripple* na corrente contínua, mas apenas seu valor médio.

Tem-se também a relação entre os ângulos de disparo (α), de extinção (γ) e de comutação (μ), dada pela expressão:

$$\alpha + \mu + \gamma = \pi \tag{88}$$

Essa relação angular pode ser adequadamente reescrita como:

$$\alpha + \mu = \pi - \gamma \tag{89}$$

Ou ainda:

$$\cos(\alpha + \mu) = \cos(\pi - \gamma) = -\cos(\gamma) \tag{90}$$

Fazendo-se as devidas substituições, ou seja, usando (87) em (86):

$$V_{ccr} = ka_r V_{acr} \left[\frac{\cos(\alpha) + \cos(\alpha) - \frac{2R_{cr}I_{cc}}{ka_r V_{acr}}}{2} \right]$$
(91)

Que resulta em:

$$V_{ccr} = ka_r V_{acr} \left[\frac{2\cos(\alpha) - \frac{2R_{cr}I_{cc}}{ka_r V_{acr}}}{2} \right]$$
(92)

$$V_{ccr} = ka_r V_{acr} \cos(\alpha) - ka_r V_{acr} \frac{R_{cr} I_{cc}}{ka_r V_{acr}}$$
(93)

$$V_{ccr} = ka_r V_{acr} \cos(\alpha) - R_{cr} I_{cc}$$
(94)

Sabendo que:

$$\cos(\alpha + \mu) = \cos(\alpha) - \frac{2R_{cr}I_{cc}}{ka_r V_{acr}}$$
(95)

$$\cos(\alpha + \mu) = -\cos(\gamma) \tag{96}$$

44

Logo, tem-se que:

$$\cos(\alpha) - \frac{2R_{cr}I_{cc}}{ka_r V_{acr}} = -\cos(\gamma)$$
(97)

$$\cos(\alpha) = -\cos(\gamma) + \frac{2R_{cr}I_{cc}}{ka_r V_{acr}}$$
(98)

Assim:

$$V_{ccr} = ka_r V_{acr} \left[\frac{-\cos(\gamma) + \frac{2R_{cr}I_{cc}}{ka_r V_{acr}} - \cos(\gamma)}{2} \right]$$
(99)

$$V_{ccr} = ka_r V_{acr} \left[\frac{-2\cos(\gamma) + \frac{2R_{cr}I_{cc}}{ka_r V_{acr}}}{2} \right]$$
(100)

$$V_{ccr} = ka_r V_{acr} \left[-\cos(\gamma) + \frac{R_{cr} I_{cc}}{ka_r V_{acr}} \right]$$
(101)

$$V_{ccr} = -ka_r V_{acr} \cos(\gamma) + ka_r V_{acr} \frac{R_{cr} I_{cc}}{ka_r V_{acr}}$$
(102)

Resultando em:

$$V_{ccr} = -ka_r V_{acr} \cos(\gamma) + R_{cr} I_{cc}$$
(103)

Assim, a relação entre a tensão do lado de corrente contínua e a tensão do lado de corrente alternada dos conversores de elos CCAT, pode ser dada através da equação obtida em (104).

$$V_{ccr} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} a_r V_{ca} \cos(\alpha) - \frac{3}{\pi} X_{tr} I_{cc}$$
(104)

Sendo:

- *a*, corresponde à relação de tape do transformador;
- V_{ca} , corresponde à tensão fase-fase no lado CA;
- X_{tr} , corresponde à reatância do transformador;
- *I_{cc}*, corresponde à corrente contínua no Elo.

O ângulo de atraso de comutação pode ser obtido através de sua formulação de regime permanente, podendo ser calculado através da equação (105)

$$\mu = a\cos\left(\cos(\alpha) - \frac{2X_{tr}I_{cc}}{\sqrt{6}V_{fn}}\right) - \alpha$$
(105)

Sendo:

- α , é o ângulo de disparo;
- X_{tr}, é a reatância do transformador;
- I_{cc}, é a corrente contínua no elo;
- V_{fn}, é a tensão fase-neutro secundária do transformador.

A seguir são expressas as correntes CA em suas componentes de eixo direto e em quadratura, na equação (106) e (107), respectivamente [1]:

$$I_p = I_{acr}\cos(\phi) = \frac{\sqrt{6}}{\pi} a_r I_{cc} \left\{ \frac{\cos(2(\alpha + \mu)) - \cos(2\alpha)}{4[\cos(\alpha) - \cos(\alpha + \mu)]} \right\}$$
(106)

$$I_q = I_{acr} \operatorname{sen}(\phi) = \frac{\sqrt{6}}{\pi} a_r I_{cc} \left\{ \frac{2\mu + \operatorname{sen}(2\alpha) - \operatorname{sen}(2(\alpha + \mu))}{4[\cos(\alpha) - \cos(\alpha + \mu)]} \right\}$$
(107)

O ângulo do fator de potência, que representa a defasagem entre a tensão e a corrente do lado CA, pode ser obtido através de sua formulação de regime permanente, utilizando (106) e (107), chegando a equação (108)

$$tan(\phi) = \frac{2\mu + sen(2\alpha) - sen(2(\alpha + \mu))}{cos(2\alpha) + cos(2(\alpha + \mu))}$$
(108)

Sendo:

- α , é o ângulo de disparo;
- μ, é o ângulo de comutação.

Desprezando as perdas do conversor, a potência ativa injetada é igual ao sinal negativo da potência de saída do conversor dada a partir da equação (109):

$$P = -V_{ccr}I_{cc} \tag{109}$$

A expressão em (109) pode ser reescrita em termos da corrente injetada:

$$P = \sqrt{3} \, V_{acr} I^*_{ac} \cos(\phi) \tag{110}$$

Que consiste em:

$$P = \sqrt{3}V_{acr}I_P \tag{111}$$

Assim, tem-se:

$$P = \sqrt{3}aV_{ccr}\frac{\sqrt{6}}{\pi}a_{r}I_{cc}\left\{\frac{\cos(2(\alpha+\mu)) - \cos(2\alpha)}{4[\cos(\alpha) - \cos(\alpha+\mu)]}\right\}$$
(112)

Substituindo (86) em (112):

$$P = \sqrt{3} \left\{ \frac{2V_{ccr}}{ka_r [\cos(\alpha) - \cos(\alpha + \mu)]} \right\} \frac{\sqrt{6}}{\pi} a_r I_{cc} \left\{ \frac{\cos(2(\alpha + \mu)) - \cos(2\alpha)}{4[\cos(\alpha) - \cos(\alpha + \mu)]} \right\}$$
(113)

Simplificando a expressão (113), tem-se:

$$P = -\frac{3\sqrt{2}}{\pi} \frac{V_{ccr}I_{cc}}{k} \left\{ \frac{\cos(2(\alpha + \mu)) - \cos(2\alpha)}{2[\cos^2(\alpha + \mu) - \cos^2(\alpha)]} \right\}$$
(114)

(110)

Utilizando a expressão trigonométrica em (115):

$$\cos^2(\alpha) = \frac{1 + \cos(2\alpha)}{2} \tag{115}$$

$$P = -\frac{3\sqrt{2}}{\pi} \frac{V_{ccr}I_{cc}}{k} \tag{116}$$

Substituindo convenientemente o valor de k, tem-se.

$$P = -V_{ccr}I_{cc} \tag{117}$$

Sendo:

- V_{ccr} , é a tensão em corrente contínua do retificador;
- I_{cc} , é a corrente contínua.

A potência aparente é dada pela expressão em (118):

$$S = P + jQ = \sqrt{3}V_{acr}I_{acr}^* = \sqrt{3}|V_{acr}I_{acr}|e^{-j\theta} = |S|(\cos(\theta) - jsen(\theta))$$
(118)

Ou ainda, pode-se escrever:

$$P = |S|\cos(\theta) \tag{119}$$

$$Q = -|S| \operatorname{sen}(\theta) = -P \tan(\theta) \tag{120}$$

Sendo:

- *P*, é a potência ativa;
- ϕ , é o ângulo de fator de potência do elo

A partir da relação obtida para a potência ativa, pode-se chegar a equação que descreve a potência reativa injetada na rede em (121):

$$Q = V_{ccr}I_{cc}\tan(\theta) \tag{121}$$

А

Tabela 3 sintetiza as principais equações tanto para o lado do retificador como do lado do inversor.

rubblu 5 Timelpuis equições do reintendor e inversor		
Principais equações do retificador	Principais equações do inversor	
$V_{ccr} = ka_r V_{acr} \cos(\alpha) - R_{cr} I_{cc}$	$-V_{cci} = ka_i V_{aci} \cos(\alpha) - R_{ci} I_{cc}$	
$V_{ccr} = -ka_r V_{acr} \cos(\gamma) + R_{cr} I_{cc}$	$-V_{cci} = -ka_i V_{aci} \cos(\gamma) + R_{ci} I_{cc}$	
$\tan(\theta) = \frac{2\mu + sen(2\alpha) - sen(2(\alpha + \mu))}{cos(2\alpha) + cos(2(\alpha + \mu))}$	$\tan(\theta) = \frac{2\mu + sen(2\alpha) - sen(2(\alpha + \mu))}{cos(2\alpha) + cos(2(\alpha + \mu))}$	
$P = -V_{ccr}I_{cc}$	$P = V_{cci}I_{cc}$	
$Q = V_{ccr}I_{cc}\tan(\theta)$	$Q = V_{cci}I_{cc}\tan(\theta)$	

Tabela 3 - Principais equações do retificador e inversor

O fasor da componente fundamental da corrente de linha do lado em corrente alternada pode ser obtido através da potência aparente consumida pelo elo HVDC e por sua tensão em corrente alternada terminal, como apresentado na (122):

$$I_{ca} = \left(\frac{P + jQ}{\sqrt{3}(V_{re} + jV_{im})}\right)^* \tag{122}$$

Sendo:

- *P*, é a potência ativa;
- *Q*, é a potência reativa;
- V_{re} , é a componente real da tensão em corrente alternada;
- V_{im} , é a componente imaginária da tensão em corrente alternada.

O equacionamento da rede de corrente contínua, considerando que a linha de transmissão é modelada de forma simplificada, através de uma resistência e de uma indutância em série, pode ser observado na equação (123)

$$V_{ccr} - V_{cci} - R_{cc}I_{cc} - L_{cc}\frac{dI_{cc}}{dt} = 0$$
(123)

Sendo:

- V_{ccr} , é a tensão em corrente contínua no lado do retificador;
- V_{cci} , é a tensão em corrente contínua no lado do inversor;
- L_{cc} , é a indutância equivalente, considerando a linha em corrente contínua e os reatores de alisamento utilizados no sistema CC;
- R_{cc} , é a resistência da linha de transmissão em corrente contínua;
- *I_{cc}*, é a corrente contínua;
 dI_{cc}, é a taxa de variação da corrente contínua no tempo.

Capítulo 3 - Metodologia

Neste capítulo são apresentados os modelos de elos CCAT, seus equacionamentos e o desenvolvimento do modelo proposto no escopo do programa computacional PacDyn. O fluxograma resumido que representa as etapas do procedimento da modelagem do elo CCAT considerando dinâmicas de altas frequências é mostrado na Figura 19. Toda a parte conceitual necessária ao desenvolvimento do modelo foi apresentada no Capítulo 2. O desenvolvimento que se segue está dividido em duas etapas: Modelos dos Elos utilizando funções de chaveamento e, posteriormente, a aplicação dos conceitos de fasores dinâmicos no equacionamento do modelo proposto.



Figura 19 - Etapas do desenvolvimento do modelo

3.1 Modelos dos elos CCAT baseados em Funções de Chaveamento

Nesta seção os modelos de elos CCAT baseados em função de chaveamento serão apresentados. A Figura 20 destaca essa etapa.



Figura 20 – Etapas do desenvolvimento do modelo: Funções de Chaveamento

É importante observar que, no que tange a análise de comportamento dinâmico de elos de corrente contínua em alta frequência, surge a necessidade de utilização de um modelo que seja capaz de representar sua dinâmica no regime transitório. Em outras palavras, mesmo com a simplificação do modelo (componente fundamental), o uso de funções de chaveamento (que consideram o regime permanente) os resultados devem apresentar uma dinâmica coerente com aquelas observadas na modelagem completa (a exemplo do PSCAD/EMTDC).

Uma das consequências das considerações de frequências mais elevadas diz respeito à dinâmica de chaveamento das válvulas dos conversores, assim como a sincronização da fase utilizada e a consideração dos elementos passivos (capacitores e indutores).

Nessa modelagem, serão utilizadas funções de chaveamento que representam matematicamente os conversores de seis pulsos de forma individualizada. Estas funções poderiam ser utilizadas para desenvolvimentos de modelos não lineares desbalanceados, no entanto, no âmbito deste trabalho baseado na análise linear de elos CCAT, considera-se a linearização em um ponto de operação balanceado e, consequentemente, os modelos desenvolvidos são equivalentes de sequência positiva, representando o conjunto de válvulas do conversor.

Portanto, essas funções constituem, no âmbito dessa dissertação, um conjunto de ferramentas matemáticas que permitirão cumprir essa tarefa de estabelecer um modelo de elo CCAT para altas frequências.

Analiticamente, a tensão em corrente contínua de forma generalizada pode ser escrita em relação às funções de chaveamento e das tensões em corrente alternada, conforme (124):

$$V_{cc} = S_{V_a} v_a + S_{V_b} v_b + S_{V_c} v_c \tag{124}$$

Sendo:

- v_a, v_b, v_c , são as tensões nas fases a, b e c;
- $S_{V_a}, S_{V_b}, S_{V_c}$, são as funções de chaveamento das tensões nas fases a, b e c.
A função de chaveamento da tensão é definida em patamares constantes, conforme disposto na Figura 21. Como pode ser visto, esta função possui descontinuidades.



Figura 21 - Função de Chaveamento da Tensão

Quanto à corrente alternada, essa pode ser desenvolvida com o uso de funções de chaveamento e da corrente contínua, conforme (125):

$$i_{a} = S_{I_{a}}I_{cc}$$

$$i_{b} = S_{I_{b}}I_{cc}$$

$$i_{c} = S_{I_{c}}I_{cc}$$
(125)

Sendo:

- i_a, i_b, i_c , são as correntes nas fases a, b e c;
- $S_{I_a}, S_{I_b}, S_{I_c}$, são as funções de chaveamento das correntes nas fases a, b e c;
- I_{cc} , é a corrente contínua no elo CCAT.

A função de chaveamento generalizada da corrente é definida por segmentos constantes e funções contínuas. Suas formas de onda estão graficamente dispostas na Figura 22 para o retificador e na Figura 23 para o inversor.



Figura 22 - Função de Chaveamento Generalizada da Corrente no Retificador



Figura 23 - Função de Chaveamento Generalizada da Corrente no Inversor

Cada um dos trechos indicados na Figura 22 e Figura 23 é descrito por valores constantes e trechos de funções analíticas que dependem do ângulo de disparo (α), do ângulo de comutação (μ) e do instante de aplicação. Os valores e funções estão detalhados na Tabela 4. A função de chaveamento da tensão tem patamares constantes enquanto que a função de chaveamento da corrente é descrita por trechos constantes e por trechos de funções analíticas, no qual as formas de onda assumirão as formas apresentadas na Figura 22 e Figura 23 pela própria variação do ângulo de disparo α .

Tracho	Largura do	Função de chaveamento de	Função de chaveamento de	
Trecho	trecho	tensão	corrente	
т	μ	0,5	$\cos(\alpha) - \cos(\omega t)$	
1			$\overline{\cos(\alpha) - \cos(\alpha + \mu)}$	
II	$2\pi/3 - \mu$	1,0	1,0	
III	μ	0,5	$1,0 - \frac{\cos(\alpha) - \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)}{\cos(\alpha) - \cos(\alpha + \mu)}$	
IV	$\pi/3 - \mu$	0,0	0,0	
V	μ	-0,5	$-\frac{\cos(\alpha)-\cos(\omega t-\pi)}{\cos(\alpha)-\cos(\alpha+\mu)}$	
VI	2π/3 — μ	-1,0	-1,0	
VII	μ	-0,5	$-1,0 + \frac{\cos(\alpha) - \cos\left(\omega t - \frac{5\pi}{3}\right)}{\cos(\alpha) - \cos(\alpha + \mu)}$	
VIII	$\pi/3 - \mu$	0,0	0,0	

Tabela 4 - Equações das funções de chaveamento de tensão e corrente por trechos

O ângulo de comutação μ é calculado em função do tempo através da fórmula de regime permanente, apresentada em (105). Ainda no que tange às funções de chaveamento, o equacionamento mostrado anteriormente possui como premissa uma operação normal dos conversores, com o ângulo μ assumindo valores de 0° até 60°.

3.2 Modelos dos elos CCAT baseados em Funções de Chaveamento e Fasores Dinâmicos

Nesta seção os modelos de elos CCAT baseados em função de chaveamento generalizadas e em fasores dinâmicos serão apresentados. A Figura 25 destaca essa etapa de desenvolvimento.



Figura 24 – Etapas do desenvolvimento do modelo: Fasores Dinâmicos

A presente seção se destina a aplicar os conceitos de fasores dinâmicos nos equacionamentos das funções de chaveamento obtidos na seção anterior. Observa-se que, dentro do escopo do trabalho, apenas as componentes fundamentais para as variáveis em corrente alternada e os valores médios para corrente contínua serão consideradas.

A função de chaveamento da tensão é definida em patamares constantes. Sua forma de onda e a componente fundamental estão graficamente dispostas na Figura 25.



Figura 25 – Função de Chaveamento da Tensão com a componente fundamental

A função de chaveamento da corrente é definida por segmentos constantes e funções contínuas. Sua forma de onda e a sua componente fundamental estão graficamente dispostas na Figura 26 para o retificador e na Figura 27 para o inversor.



Figura 26 – Função de Chaveamento da Corrente no Retificador com a componente fundamental



Figura 27 – Função de Chaveamento da Corrente no Inversor com a componente fundamental

Considerando as componentes fundamentais da função de chaveamento generalizada da tensão, pode-se obter uma nova relação entre a tensão do lado de corrente contínua e a tensão do lado de corrente alternada dos conversores.

Conforme visto na seção anterior a tensão em corrente contínua pode ser descrita como:

$$V_{cc} = S_{V_a} v_a + S_{V_b} v_b + S_{V_c} v_c \tag{126}$$

Cada uma das componentes da função de chaveamento ou da tensão pode ser descrita em coordenadas retangulares (componente real e imaginária), ou através de fasores dinâmicos.

$$S_{a} = S_{a_{re}} + jS_{a_{im}}$$

$$S_{a} = S_{a_{re}}cos(\omega t) + jS_{a_{im}}sen(\omega t)$$
(127)

Adotando a convenção de fasores dinâmicos para a componente (128) fundamental, reescreve-se (126) como:

$$\begin{aligned} V_{cc} &= \left(S_{a_{re}} cos(\omega t) - S_{a_{im}} sen(\omega t) \right) \times \left(V_{a_{re}} cos(\omega t) - V_{a_{im}} sen(\omega t) \right) \\ &+ \left(S_{b_{re}} cos(\omega t) - S_{b_{im}} sen(\omega t) \right) \\ &\times \left(V_{b_{re}} cos(\omega t) - V_{b_{im}} sen(\omega t) \right) \\ &+ \left(S_{c_{re}} cos(\omega t) - S_{c_{im}} sen(\omega t) \right) \\ &\times \left(V_{c_{re}} cos(\omega t) - V_{c_{im}} sen(\omega t) \right) \end{aligned}$$

Realizando a operação distributiva, tem-se:

$$V_{cc} = \left(S_{a_{re}}V_{a_{re}}\cos^{2}(\omega t) - S_{a_{im}}V_{a_{re}}sen(\omega t)cos(\omega t) - S_{a_{re}}V_{a_{im}}cos(\omega t)sen(\omega t) + S_{a_{im}}V_{a_{im}}sen^{2}(\omega t)\right) + \left(S_{b_{re}}V_{b_{re}}\cos^{2}(\omega t) - S_{b_{im}}V_{b_{re}}sen(\omega t)cos(\omega t) - S_{b_{re}}V_{b_{im}}cos(\omega t)sen(\omega t) + S_{b_{im}}V_{b_{im}}sen^{2}(\omega t)\right) + \left(S_{c_{re}}V_{c_{re}}\cos^{2}(\omega t) - S_{c_{im}}V_{c_{re}}sen(\omega t)cos(\omega t) - S_{c_{re}}V_{c_{re}}cos(\omega t)sen(\omega t) + S_{c_{im}}V_{c_{im}}sen^{2}(\omega t)\right)$$

$$(129)$$

Utilizando as seguintes identidades trigonométricas:

$$\cos^{2}(\omega t) = \frac{1}{2} [1 + \cos(2\omega t)]$$

$$\sin^{2}(\omega t) = \frac{1}{2} [1 - \cos(2\omega t)]$$

$$sen(\omega t) \cos(\omega t) = \frac{1}{2} [sen(2\omega t)]$$

$$V_{cc} = \left(S_{a_{re}}V_{a_{re}}\frac{1}{2} [1 + \cos(2\omega t)] - S_{a_{im}}V_{a_{re}}\frac{1}{2} [sen(2\omega t)] - S_{a_{re}}V_{a_{im}}\frac{1}{2} [sen(2\omega t)] + S_{a_{im}}V_{a_{im}}\frac{1}{2} [1 - \cos(2\omega t)]\right)$$

$$+ \left(S_{b_{re}}V_{b_{re}}\frac{1}{2} [1 + \cos(2\omega t)] - S_{b_{im}}V_{b_{re}}\frac{1}{2} [sen(2\omega t)] - S_{b_{re}}V_{b_{im}}\frac{1}{2} [sen(2\omega t)] + S_{b_{im}}V_{b_{im}}\frac{1}{2} [1 - \cos(2\omega t)]\right)$$

$$+ \left(S_{c_{re}}V_{c_{re}}\frac{1}{2} [1 + \cos(2\omega t)] - S_{c_{im}}V_{c_{re}}\frac{1}{2} [sen(2\omega t)] - S_{c_{re}}V_{c_{re}}\frac{1}{2} [sen(2\omega t)] + S_{c_{im}}V_{c_{im}}\frac{1}{2} [1 - \cos(2\omega t)]\right)$$

$$+ \left(S_{c_{re}}V_{c_{re}}\frac{1}{2} [sen(2\omega t)] + S_{c_{im}}V_{c_{im}}\frac{1}{2} [1 - \cos(2\omega t)] - S_{c_{re}}V_{c_{im}}\frac{1}{2} [sen(2\omega t)] + S_{c_{im}}V_{c_{im}}\frac{1}{2} [1 - \cos(2\omega t)]\right)$$

A componente em corrente contínua apresenta somente os valores médios. Assim sendo, são desprezados os termos com dependência da frequência angular.

$$V_{cc} = \left(S_{a_{re}}V_{a_{re}}\frac{1}{2} + S_{a_{im}}V_{a_{im}}\frac{1}{2}\right) + \left(S_{b_{re}}V_{b_{re}}\frac{1}{2} + S_{b_{im}}V_{b_{im}}\frac{1}{2}\right) + \left(S_{c_{re}}V_{c_{re}}\frac{1}{2} + S_{c_{im}}V_{c_{im}}\frac{1}{2}\right)$$
(131)

$$2V_{cc} = \left(S_{a_{re}}V_{a_{re}} + S_{a_{im}}V_{a_{im}}\right) + \left(S_{b_{re}}V_{b_{re}} + S_{b_{im}}V_{b_{im}}\right) + \left(S_{c_{re}}V_{c_{re}} + S_{c_{im}}V_{c_{im}}\right)$$
(132)

É ainda possível simplificar a expressão através de desenvolvimento analítico considerando as transformações trigonométricas. Em um sistema trifásico equilibrado, as seguintes relações são satisfeitas:

$$v_b = v_a \times e^{-j\theta}$$

$$v_c = v_a \times e^{j\theta}$$
(133)

Sendo:

$$\theta = \frac{2\pi}{3} \tag{134}$$

Essas mesmas relações valem paras as funções de chaveamento, em que:

$$S_b = Sa \times e^{-j\theta}$$

$$S_c = Sa \times e^{j\theta}$$
(135)

Logo, reescrevendo em coordenadas retangulares, tem-se:

$$v_{a} = (V_{a_{re}} + jV_{a_{im}})$$

$$v_{b} = (V_{a_{re}} + jV_{a_{im}}) \times e^{-j\theta}$$

$$v_{c} = (V_{a_{re}} + jV_{a_{im}}) \times e^{j\theta}$$
(136)

Decompondo-se em função de senos e cossenos:

$$v_{a} = (V_{a_{re}} + jV_{a_{im}})$$

$$v_{b} = (V_{a_{re}} + jV_{a_{im}}) \times (\cos(-\theta) + jsen(-\theta))$$

$$v_{c} = (V_{a_{re}} + jV_{a_{im}}) \times (\cos(\theta) + jsen(\theta))$$
(137)

Sabendo que a função cosseno é par e a função seno ímpar, vale a seguinte relação:

$$cos(\theta) = cos(-\theta)$$

 $sen(\theta) = -sen(-\theta)$

Dessa forma, as tensões nas fases $a, b \in c$, em relação à fase a ficam:

$$v_{a} = (V_{a_{re}} + jV_{a_{im}})$$

$$v_{b} = (V_{a_{re}} + jV_{a_{im}}) \times (\cos(\theta) - jsen(\theta))$$

$$v_{c} = (V_{a_{re}} + jV_{a_{im}}) \times (\cos(\theta) + jsen(\theta))$$
(138)

Realizando a operação distributiva para v_b e v_c tem-se:

$$v_{b} = V_{a_{re}} \cos(\theta) + jV_{a_{im}} \cos(\theta) - jV_{a_{re}} \sin(\theta) + V_{a_{im}} sen(\theta)$$

$$v_{c} = V_{a_{re}} \cos(\theta) + jV_{a_{im}} \cos(\theta) + jV_{a_{re}} \sin(\theta) - V_{a_{im}} sen(\theta)$$
(139)

Reagrupando os termos na parte real e imaginária:

$$v_{b} = \left(V_{a_{re}}\cos(\theta) + V_{a_{im}}sen(\theta)\right) + j\left(V_{a_{im}}\cos(\theta) - V_{a_{re}}sen(\theta)\right)$$

$$v_{c} = \left(V_{a_{re}}\cos(\theta) - V_{a_{im}}sen(\theta)\right) + j\left(V_{a_{im}}\cos(\theta) + V_{a_{re}}sen(\theta)\right)$$
(140)

Analogamente para as funções de chaveamento, tem-se:

$$S_{b} = \left(S_{a_{re}}\cos(\theta) + S_{a_{im}}sen(\theta)\right) + j\left(S_{a_{im}}\cos(\theta) - S_{a_{re}}\sin(\theta)\right)$$

$$S_{c} = \left(S_{a_{re}}\cos(\theta) - S_{a_{im}}sen(\theta)\right) + j\left(S_{a_{im}}\cos(\theta) + S_{a_{re}}\sin(\theta)\right)$$
(141)

Logo,

Variável	Componente Real	Componente Imaginária
v_a	V _{are}	$V_{a_{im}}$
v_b	$V_{a_{re}}\cos(\theta) + V_{a_{im}}sen(\theta)$	$V_{a_{im}}\cos(\theta) - V_{a_{re}}\sin(\theta)$
v_c	$V_{a_{re}}\cos(\theta) - V_{a_{im}}sen(\theta)$	$V_{a_{im}}\cos(\theta) + V_{a_{re}}\sin(\theta)$
S _a	S _{are}	S _{aim}
S_b	$S_{a_{re}}\cos(\theta) + S_{a_{im}}sen(\theta)$	$S_{a_{im}}\cos(\theta) - S_{a_{re}}\sin(\theta)$
S _c	$S_{a_{re}}\cos(\theta) - S_{a_{im}}sen(\theta)$	$S_{a_{im}}\cos(\theta) + S_{a_{re}}\sin(\theta)$

Tabela 5 – Componentes real e imaginária das tensões e da função de chaveamento

A partir da relação abaixo:

$$2V_{cc} = \left(S_{a_{re}}V_{a_{re}} + S_{a_{im}}V_{a_{im}}\right) + \left(S_{b_{re}}V_{b_{re}} + S_{b_{im}}V_{b_{im}}\right) + \left(S_{c_{re}}V_{c_{re}} + S_{c_{im}}V_{c_{im}}\right)$$
(142)

Tem-se que:

$$2V_{cc} = \left[S_{a_{re}}V_{a_{re}} + S_{a_{im}}V_{a_{im}}\right] \\ + \left[\left(S_{a_{re}}\cos(\theta) + S_{a_{im}}sen(\theta)\right) \times \left(V_{a_{re}}\cos(\theta) + V_{a_{im}}sen(\theta)\right) \\ + \left(S_{a_{im}}\cos(\theta) - S_{a_{re}}\sin(\theta) \times \left(V_{a_{im}}\cos(\theta) - V_{a_{re}}\sin(\theta)\right)\right)\right] \\ + \left[\left(S_{a_{re}}\cos(\theta) - S_{a_{im}}sen(\theta)\right) \times \left(V_{a_{re}}\cos(\theta) - V_{a_{im}}sen(\theta)\right) \\ + \left(S_{a_{im}}\cos(\theta) + S_{a_{re}}\sin(\theta)\right) \times \left(V_{a_{im}}\cos(\theta) + V_{a_{re}}\sin(\theta)\right)\right]$$
(143)

Realizando a operação distributiva em todos os termos:

$$2V_{cc} = S_{a_{re}}V_{a_{re}} + S_{a_{im}}V_{a_{im}} + S_{a_{re}}V_{a_{re}}\cos^{2}(\theta) + S_{a_{im}}V_{a_{re}}sen(\theta)\cos(\theta) + S_{a_{re}}V_{a_{im}}sen(\theta)\cos(\theta) + S_{a_{im}}V_{a_{im}}sen^{2}(\theta) + S_{a_{im}}V_{a_{im}}\cos^{2}(\theta) - S_{a_{re}}V_{a_{im}}sen(\theta)\cos(\theta) - S_{a_{im}}V_{a_{re}}sen(\theta)\cos(\theta) + S_{a_{re}}V_{a_{re}}sen^{2}(\theta) + S_{a_{re}}V_{a_{re}}\cos^{2}(\theta) - S_{a_{im}}V_{a_{re}}sen(\theta)\cos(\theta) + -S_{a_{re}}V_{a_{im}}sen(\theta)\cos(\theta) + S_{a_{im}}V_{a_{im}}sen^{2}(\theta) + S_{a_{im}}V_{a_{im}}\cos^{2}(\theta) + S_{a_{re}}V_{a_{im}}sen(\theta)\cos(\theta) + +S_{a_{im}}V_{a_{im}}\cos^{2}(\theta) + S_{a_{re}}V_{a_{re}}sen^{2}(\theta)$$

$$(144)$$

Os termos em função de $sen(\theta) cos(\theta)$ se cancelam, de modo que resta:

$$2V_{cc} = S_{a_{re}}V_{a_{re}} + S_{a_{im}}V_{a_{im}} + S_{a_{re}}V_{a_{re}}\cos^{2}(\theta) + S_{a_{im}}V_{a_{im}}sen^{2}(\theta) + S_{a_{im}}V_{a_{im}}\cos^{2}(\theta) + S_{a_{re}}V_{a_{re}}sen^{2}(\theta) + S_{a_{re}}V_{a_{re}}\cos^{2}(\theta) + S_{a_{im}}V_{a_{im}}sen^{2}(\theta) + S_{a_{im}}V_{a_{im}}\cos^{2}(\theta) + S_{a_{re}}V_{a_{re}}sen^{2}(\theta)$$
(145)

Reescrevendo em termos das componentes real e imaginária:

$$2V_{cc} = S_{a_{re}}V_{a_{re}} + S_{a_{im}}V_{a_{im}} + S_{a_{re}}V_{a_{re}}\cos^{2}(\theta) + S_{a_{re}}V_{a_{re}}\cos^{2}(\theta) + S_{a_{re}}V_{a_{re}}sen^{2}(\theta) + S_{a_{re}}V_{a_{re}}sen^{2}(\theta)S_{a_{im}}V_{a_{im}}\cos^{2}(\theta) + S_{a_{im}}V_{a_{im}}\cos^{2}(\theta) + S_{a_{im}}V_{a_{im}}sen^{2}(\theta) + S_{a_{im}}V_{a_{im}}sen^{2}(\theta)$$
(146)

Simplificando, tem-se:

$$2V_{cc} = S_{a_{re}}V_{a_{re}} + S_{a_{im}}V_{a_{im}} + 2S_{a_{re}}V_{a_{re}}\cos^{2}(\theta) + 2S_{a_{re}}V_{a_{re}}sen^{2}(\theta) 2S_{a_{im}}V_{a_{im}}\cos^{2}(\theta) + 2S_{a_{im}}V_{a_{im}}sen^{2}(\theta)$$
(147)

De modo que se obtém a relação:

$$2V_{cc} = S_{a_{re}}V_{a_{re}} + S_{a_{im}}V_{a_{im}} + 2S_{a_{re}}V_{a_{re}}[\cos^{2}(\theta) + sen^{2}(\theta)]2S_{a_{im}}V_{a_{im}}[\cos^{2}(\theta) + sen^{2}(\theta)]$$
(148)

Utilizando a relação trigonométrica fundamental:

$$sen^2(\theta) + \cos^2(\theta) = 1$$

Os termos passam a ser reagrupados em:

$$2V_{cc} = S_{a_{re}}V_{a_{re}} + S_{a_{im}}V_{a_{im}} + 2S_{a_{re}}V_{a_{re}} + 2S_{a_{im}}V_{a_{im}}$$
(149)

$$2V_{cc} = 3S_{a_{re}}V_{a_{re}} + 3S_{a_{im}}V_{a_{im}}$$
(150)

Considerando que a tensão CC é descrita por seu valor médio e, as tensões CA, assim como as funções de chaveamento são descritas por seus valores RMS, a seguinte relação entre essas tensões pode ser obtida:

$$2V_{cc} = 3\left(\sqrt{2}S_{a_{re}}\sqrt{2}V_{a_{re}} + \sqrt{2}S_{a_{im}}\sqrt{2}V_{a_{im}}\right)$$
(151)

$$2V_{cc} = 3 \times 2 \left(S_{a_{re}} V_{a_{re}} + S_{a_{im}} V_{a_{im}} \right)$$
(152)

Logo, obtém:

$$V_{cc} = 3S_{a_{re}}V_{a_{re}} + 3S_{a_{im}}V_{a_{im}}$$
(153)

Considerando que os programas do CEPEL representam o sistema monofásico equivalente em sequência positiva, simplificou-se o equacionamento para ser representado a partir da sua fase *a*.

No que se refere à corrente, conforme visto na seção anterior a corrente alternada por fase pode ser descrita como:

$$i_{a} = S_{I_{a}}I_{cc}$$

$$i_{b} = S_{I_{b}}I_{cc}$$

$$i_{c} = S_{I_{c}}I_{cc}$$
(154)

Cada uma das componentes da função de chaveamento ou da tensão pode ser descrita em coordenadas retangulares (componente real e imaginária), ou através de fasores dinâmicos.

$$S_{I_{a}} = S_{I_{a_{re}}} + jS_{I_{a_{im}}}$$

$$S_{I_{a}} = S_{I_{a_{re}}} cos(\omega t) - S_{I_{a_{im}}} sen(\omega t)$$
(155)

Adotando a convenção de fasores dinâmicos, reescreve-se (154) como

$$I_{a_{re}} = S_{I_{a_{re}}}I_{cc}$$

$$I_{a_{im}} = S_{I_{a_{im}}}I_{cc}$$
(156)

Analogamente, para a fase *b*.

$$I_{b_{re}} = S_{I_{b_{re}}} I_{cc}$$

$$I_{b_{im}} = S_{I_{b_{im}}} I_{cc}$$
(157)

Por fim, para a fase *c*.

$$I_{c_{re}} = S_{I_{c_{re}}} I_{cc}$$

$$I_{c_{im}} = S_{I_{c_{im}}} I_{cc}$$
(158)

Além das equações apresentadas, deve ser incluído o comportamento dinâmico do PLL de cada conversor para sincronização da fase utilizada nos disparos da válvula, que impactam de forma considerável no comportamento dinâmico nos elos CCAT.



Figura 28 – Diagrama de Blocos do Phase-Locked Loop

Assim, a faixa de frequência para transitórios eletromagnéticos pode variar de centenas de Hz até alguns, kHz. Na seção destinada aos resultados, será apresentado um caso considerando a dinâmica do PLL.

$$\widetilde{V}_s = V_{s_{re}} + j V_{s_{im}} \tag{159}$$

O ângulo da tensão foi adicionado de 90 graus posto que o ângulo de referência para fasores é baseado em cosseno. Utilizando identidade trigonométrica, vem que:

$$\frac{V_{s_{im}}}{V_{s_{re}}} = \frac{sen\left(\theta_s - \frac{\pi}{2}\right)}{cos\left(\theta_s - \frac{\pi}{2}\right)}$$
(160)

As equações do modelo simplificado são:

$$\dot{V}_{aux} = K_{P_{PLL}} \theta_{ref} - K_{I_{PLL}} \tag{161}$$

$$\Delta \dot{\theta}_{PLL} = V_{aux} + K_{P_{PLL}} \theta_{ref} - K_{P_{PLL}} \theta_{PLL}$$
(162)

$$V_{at_{re}}\cos(\theta_{ref}) + V_{at_{im}}\sin(\theta_{ref}) = 0$$
(163)

Dessa forma, completa-se a modelagem utilizada neste trabalho para o modelo proposto de elos de corrente contínua, considerando dinâmicas de alta frequência, que deve ser utilizado quando se deseja estudar fenômenos eletromagnéticos e relacionados à ressonância subsíncrona.

A Figura 29 resume as equações da tensão e corrente em fasores dinâmicos, considerando uma ponte de seis pulsos. Para se obter os coeficientes para uma ponte de doze pulsos, multiplica-se os coeficientes obtidos da ponte de seis pulsos por dois (situação válida quando se considera a modelagem apenas da componente fundamental).



Ponte de 12 pulsos = 2 x Ponte de 6 pulsos

Figura 29 - Tensões e correntes descritas por fasores dinâmicos

O cálculo dos coeficientes da série de Fourier considerando uma ponte de seis pulsos foi obtido através do Matlab. Na sequência são apresentados os coeficientes reais e imaginários para a tensão e corrente, respectivamente.

$$S_{V_{a_{re}}} = \frac{\sqrt{3/2}}{\pi} \left[\cos(\alpha - \theta_{PLL}) + \cos(\alpha + \mu - \theta_{PLL}) \right]$$
(164)

$$S_{V_{a_{im}}} = -\frac{\sqrt{3/2}}{\pi} [\operatorname{sen}(\alpha - \theta_{PLL}) + \operatorname{sen}(\alpha + \mu - \theta_{PLL})]$$
(165)

$$S_{I_{a_{re}}} = -\frac{\sqrt{3/2}}{\pi} \frac{\left[\frac{\cos(2\alpha - 2\theta_{PLL})}{2} + \frac{\cos(2\alpha + 2\mu - \theta_{PLL})}{2} + \mu sen(\theta_{PLL})\right]}{\left[\cos(\alpha + \mu) - \cos(\alpha)\right]}$$
(166)

$$S_{I_{a_{im}}} = \frac{\sqrt{3/2} \left[\frac{\sec(2\alpha - 2\theta_{PLL})}{2} + \frac{\sin(2\alpha + 2\mu - \theta_{PLL})}{2} + \mu \cos(\theta_{PLL}) \right]}{\left[\cos(\alpha + \mu) - \cos(\alpha) \right]}$$
(167)

3.3 Modelos dos elos CCAT linearizados

Nesta seção os modelos de elos CCAT baseados em função de chaveamento e em fasores dinâmicos serão apresentados com seus equacionamentos linearizados. Essa linearização consiste no passo final do equacionamento para inclusão do modelo proposto no programa de análise linear PacDyn.

Aplicando nas relações de tensão (168) e corrente (169), respectivamente, tem-se:

$$\Delta V_{CC} = 3 \times \left[\Delta S_{V_{are}} V_{a_{re}} + S_{V_{are}} \Delta V_{a_{re}} + \Delta S_{V_{a_{im}}} V_{a_{im}} + S_{V_{a_{im}}} \Delta V_{a_{im}} \right]$$
(168)

$$\Delta I_{a_{re}} = \Delta S_{I_{a_{re}}} I_{CC} + S_{I_{a_{re}}} \Delta I_{CC}$$

$$\Delta I_{a_{im}} = \Delta S_{I_{a_{im}}} I_{CC} + S_{I_{a_{im}}} \Delta I_{CC}$$
(169)

De forma análoga, as equações linearizadas que descrevem a dinâmica do PLL são apresentadas em (170), (171) e (172), respectivamente.

$$\Delta \dot{V}_{aux} = K_{P_{PLL}} \Delta \theta_{ref} - K_{I_{PLL}} \tag{170}$$

$$\Delta \dot{\theta}_{PLL} = \Delta V_{aux} + K_{P_{PLL}} \Delta \theta_{ref} - K_{P_{PLL}} \Delta \theta_{PLL}$$
(171)

$$V_{at_{re}} \cos(\theta_{ref}) \Delta \theta_{ref} + \sin(\theta_{ref}) \Delta V_{at_{re}} + V_{at_{im}} \sin(\theta_{ref}) \Delta \theta_{ref} + \cos(\theta_{ref}) \Delta V_{at_{im}} = 0$$
(172)

Cabe ressaltar que também foram considerados os equacionamentos do ângulo de comutação μ (105) e do sistema CC (123). Essas equações são linearizadas a partir do modelo eletromecânico.

Capítulo 4 - Resultados

O capítulo de resultados é composto de casos exemplos, que são apresentados de forma gradual, dos mais simplificados até os mais complexos, do ponto de vista da rede elétrica e dos elos CCAT representados. Todos os casos se destinam a apresentar a viabilidade do uso do modelo e um caso específico amplia a análise para uma possível aplicação de sua utilização.

O primeiro caso consiste na representação do modelo através de um elo conectado a barra infinita sem impedância tanto do lado do retificador como do lado do inversor. O segundo caso, por sua vez, pode ser compreendido como uma evolução do caso 1, no qual são inseridas impedâncias nos terminais do retificador e do inversor. Há ainda uma variação do caso 2, em que a impedância do lado inversor é aumentada, provocando assim, um efeito de diminuir a relação de curto-circuito do sistema.

O terceiro caso é representado através de dois bipolos conectados a barras infinitas através de impedâncias em ambos os lados. Nesse caso, além da validação do modelo também são avaliadas as interações dinâmicas entre os elos CCAT e considerações sobre os modos de oscilação locais. Esse caso também demonstra a utilidade do modelo no ajuste de controladores visando à solução de problemas de oscilação mal amortecida do sistema elétrico de potência representado no PSCAD/EMTDC e no PacDyn.

O quarto caso apresenta um sistema de referência ou sistema *benchmark* de 14 barras proposto em [53] e [54]. Nesse caso, as simulações são realizadas, no PSCAD/EMTDC, PacDyn e também no programa ANAHVDC. Trata-se de um caso um pouco mais completo, aproximando-se mais de um caso real.

O quinto e último caso se trata de uma aplicação do modelo em sistemas de grande porte. Assim foi utilizado um ponto de operação estudado no Plano de Ampliações e Reforços (PAR) do ONS para o horizonte de 2023, disponível do site do ONS. A descrição sucinta dos casos apresentados, dos programas utilizados e dos eventos aplicados está na Tabela 6.

Casos	Descrição	Programas Utilizados	Evento Aplicado
1	Monopolo conectado à barra infinita sem impedância.	PSCAD/EMTDC e PacDyn	Degrau de -1,9% na ordem de corrente do retificador.
2	Monopolo conectado à barra infinita com impedância.	PSCAD/EMTDC e PacDyn	Degrau de -1,9% na ordem de corrente do retificador.
3	Ajuste do controle PI em um bipolo, comparando ajuste entre modelagens EMC e EMT.	PSCAD/EMTDC e PacDyn	Degrau de -1% na ordem de corrente dos retificadores.
4	Sistema benchmark com 14 barras e bipolo.	PSCAD/EMTDC, PacDyn e ANAHVDC	Degrau de -1% na fonte de tensão da barra 3.
5	Caso do PAR2023-SIN com múltiplos elos de corrente contínua.	PacDyn e ANAHVDC	Degrau de -5% na fonte de tensão em Angra I.

Tabela 6 – Descrição dos Casos

A Figura 30 apresenta a evolução dos casos em termos de complexidade do sistema avaliado. Basicamente inicia com um caso ideal, no qual o elo segue conectado diretamente em barras infinitas. Depois são incluídas impedâncias de ambos os lados (retificador e inversor). Na sequência é apresentado uma aplicação do modelo, em um sistema equivalentado. Depois, uma aplicação em sistema de referência composto de 14 barras e por fim, o caso de grande porte, no SIN.



Figura 30 - Evolução de complexidade dos casos apresentados

Contudo, antes de entrar propriamente na análise de cada caso devem ser realizadas algumas considerações a respeito das premissas adotadas. Tendo-se em vista que os programas utilizados são de naturezas distintas, faz-se necessária a conversão em uma convenção que seja comum. No programa PacDyn as variáveis são calculadas através do desvio do valor de cada variável em relação ao seu ponto de operação, calculado em valores quadráticos médios (RMS) e em por unidade (pu), considerando a componente de sequência positiva. O PSCAD/EMTDC por sua vez representa a modelagem trifásica instantânea em suas grandezas físicas originais. O programa ANAHVDC utiliza cálculo em valores quadráticos médios (RMS) e em por unidade (pu).

Logo, a primeira consideração a ser feita está na necessidade de exportar as variáveis do PSCAD/EMTDC em pu. No que se refere à conversão de bases, para as medições de tensão, o próprio PSCAD/EMTDC disponibiliza um bloco que realiza essa conversão, conforme pode ser visto na Figura 31. Quanto ao cálculo da corrente RMS a representação está na Figura 32. O procedimento consiste em medir a variável de interesse, nas fases a, b e c, e posteriormente, proceder a soma quadrática dos valores de fase, extraindo a raiz quadrada e dividindo pela base para ter a grandeza em pu.



Figura 31 - Medidor RMS de Tensão no PSCAD/EMTDC



Figura 32 - Medidor RMS de Corrente do PSCAD/EMTDC

Isto posto, convencionou-se utilizar a notação do PacDyn para as variáveis medidas no PSCAD/EMTDC. Essa conversão das variáveis no PSCAD/EMTDC é realizada em relação ao seu desvio médio das variáveis já convertidas em pu. Dessa forma, para o cálculo do desvio médio utilizou-se a média dos primeiros 1000 valores obtidos. Esse valor foi obtido de forma empírica, tomando-se o cuidado de não estar situado após o período de aplicação do evento e de representar o valor médio da variável em regime permanente.

Esse cálculo pode ser visualizado de forma gráfica na Figura 33. A variável x(t), representada pela cor azul corresponde a variável já convertida em pu no PSCAD/EMTDC; a variável $x_{médio}$, na cor vermelha, é a média das 1000 primeiras medições; o ponto $x_0(t)$, na cor verde, é o valor inicial compensado pela média; e por fim, x(t)', na cor roxa, é a medição da variável compensada pela média apresentada.



Figura 33 - Desvio em relação ao valor médio no PSCAD

Analiticamente, tem-se esse procedimento da seguinte forma:

$$x(t)' = x(t) - x_{médio}$$
⁽¹⁷³⁾

$$x_{m\acute{e}dio} = \frac{\sum_{t=0}^{t=1000dt} x(t)}{1000}$$
(174)

As conversões visam facilitar a comparação entre os programas, mesmo essas sendo ferramentas de aplicações distintas. Portanto, a base foi compatibilizada, contudo com pequenas diferenças no comportamento observado. Pode-se citar que as variáveis do PSCAD/EMTDC devido à formulação mais completa, que levam em consideração as três fases na sua forma de onda original, apresentam comportamento mais oscilatório. Logo, a convenção adotada para a validação é baseada em três parâmetros: verificar se o ponto de operação inicial é o mesmo entre os programas, se o ponto de operação final também é o mesmo e se a dinâmica (transitório) segue um comportamento similar.

Considerando esses aspectos mencionados como diretrizes utilizadas para a validação, os pontos de operação foram ajustados considerando-se o disparo do ângulo alfa do retificador e do inversor, a corrente contínua na linha e as tensões em corrente contínua nos conversores. Como o PSCAD/EMTDC possui uma representação mais detalhada do sistema, em certas situações o ponto de operação pode apresentar pequenas diferenças. Entretanto, são diferenças inerentes à modelagem, as quais não inviabilizam nem comprometem as análises.

4.1 Caso 1 – Elo de Corrente Contínua conectado diretamente na Barra Infinita

O primeiro caso consiste em um elo de corrente contínua conectado de forma direta (sem impedância) na barra infinita tanto do lado do retificador, como do lado do inversor.

O diagrama unifilar desse primeiro caso representado no programa ANAREDE está na Figura 34. Entre as barras 10 e 1 e as barras 20 e 2 foi inserida uma linha de transmissão com impedância muito baixa com o objetivo de poder medir a injeção de corrente alternada do elo.



Figura 34 - Diagrama Unifilar no ANAREDE do Elo conectado diretamente na Barra Infinita

A Figura 35 apresenta o mesmo sistema representado no programa PSCAD/EMTDC. As fontes têm sua referência angular em 90° no PSCAD/EMTDC para serem compatibilizadas com a referência cossenoidal do programa ANAREDE. A representação de sistemas elétricos e de controles no PSCAD/EMTDC pode ser feita em camadas, através de caixas que facilitam a visualização e modularização do sistema. Assim, todos os elementos do elo de corrente contínua estão inseridos internamente na caixa "Elo CCAT".



Figura 35 - Diagrama Unifilar no PSCAD do Elo conectado diretamente na Barra Infinita

Desse modo, os elementos internos da caixa "Elo CCAT" estão na Figura 36, que correspondem aos conversores (retificador e inversor), linha em corrente contínua e medidores. Da mesma forma cada conversor é representado por uma caixa que internamente estão representados seus elementos constituintes.



Figura 36 - Diagrama Unifilar no PSCAD do Elo CCAT

Assim, a caixa "Polo S1P1" consiste na representação do retificador, conforme pode ser visto na Figura 37, e analogamente a caixa "Polo S2P1" é a representação do inversor, conforme Figura 38. Nessa representação podem ser visualizados os transformadores em delta e em estrela (utilizadas por pontes de 12 pulsos) e das estações conversoras assim como o próprio modelo da ponte conversora, onde está acoplado o controle de sincronismo do PLL.



Figura 37 - Topologia do Retificador no PSCAD – Polo S1P1



Figura 38 - Topologia do Inversor no PSCAD - Polo S2P1



Figura 39 - Identificação dos principais componentes do conversor

Avançando para o controle implementado, tem-se que do lado do retificador foi utilizado um controle proporcional-integral (PI), conforme Figura 40.



Figura 40 – Controle de corrente PI dos retificadores

O controle do lado do inversor, por sua vez, é do tipo gama mínimo, conforme pode ser visualizado na Figura 41.



Figura 41 - Controle gama mínimo dos inversores

Com o objetivo de validar as simulações, parte-se da premissa que os programas estão no mesmo ponto de operação. Além disso, é necessário que seja representado o mesmo sistema, isto é, os mesmos elementos elétricos, de controle e de medição.

Para a inicialização do PacDyn é preciso que se parta de um caso de fluxo de carga convergido no ANAREDE. Já no PSCAD/EMTDC costuma-se deixar a simulação evoluir no tempo até que se chegue ao regime permanente. Uma vez obtido esse regime permanente no PSCAD/EMTDC costuma-se fazer uso da ferramenta de "*snapshot*", a qual guarda o estado das variáveis do sistema, deslocando ficticiamente o tempo para zero novamente em um posterior uso do programa.

Desta forma, o ponto de operação foi obtido através dos valores apresentados na Tabela 7 do lado do retificador e da Tabela 8 para o inversor.

Retificador			
Rede Elétrica			
V _{ret}	507,3 V		
$ heta_{ret}$	90 °		
tap	1,029		
Controle PI			
K _P	120		
K_I	6500		
PLL			
K _P	20		
K _I	200		

Tabela 7 - Caso 1: Dados do Retificador

Tabela 8 - Caso 1: Dados do Inversor

Inversor		
Rede Elétrica		
V_{inv}	500 V	
$ heta_{inv}$	90 °	
tap	0,99	
Controle Gama		
Mínimo		
Yref	17,5	
2dx	0,175	
PLL		
K _P	20	
K _I	200	

Para o caso 1, o evento aplicado consiste em um degrau de -1,9% na ordem de corrente do retificador. Os resultados obtidos seguem nas próximas figuras.

A Figura 42 apresenta o resultado da simulação para a variável de tensão em corrente contínua do lado do retificador. Pode ser visto que os resultados dos programas PacDyn e PSCAD são aderentes. Em ambos os programas, o sistema volta a operar em um ponto de equilíbrio e apresenta o comportamento dinâmico similar.



Figura 42 – Caso 1: Tensão em Corrente Contínua no Retificador (PSCAD x PacDyn)

A Figura 43 apresenta o resultado da simulação para a variável de tensão em corrente contínua do lado do inversor. Assim como no caso do retificador, os resultados são aderentes. O sistema volta a operar em um ponto de equilíbrio e apresenta o comportamento dinâmico similar.



Figura 43 - Caso 1: Tensão em Corrente Contínua no Inversor (PSCAD x PacDyn)

A Figura 44 apresenta o resultado da simulação para o ângulo alfa do retificador. Os resultados estão qualitativamente próximos. Como se trata de modelo aproximado verificouse uma pequena diferença dinâmica (em torno de 0,1°). Essa diferença, contudo, é considerada aceitável, por se tratar de um comportamento dinâmico bastante similar.



Figura 44 - Caso 1: Ângulo Alfa no Retificador (PSCAD x PacDyn)

A Figura 45 apresenta o resultado da simulação para o ângulo alfa do inversor. Os resultados seguem bem próximos.



Figura 45 - Caso 1: Ângulo Alfa no Inversor (PSCAD x PacDyn)

A Figura 46 apresenta o resultado da simulação para a corrente contínua no elo. Os resultados seguem qualitativamente próximos.



Figura 46 - Caso 1: Corrente Contínua na linha CC (PSCAD x PacDyn)

A Figura 47 apresenta o resultado da simulação para o ângulo gama do inversor. Novamente aqui, verifica-se aderência entre os resultados.



Figura 47 - Caso 1: Ângulo Gama no Inversor (PSCAD x PacDyn)

As tensões e correntes alternadas também foram objetos de validação. A Figura 48 mostra as tensões no lado do retificador enquanto que a Figura 49 mostra as tensões no lado do inversor. Uma vez que se trata de barras infinitas conectadas diretamente sem impedância aos elos HVDC, as tensões terminais desses equipamentos não variam.



Figura 48 - Caso1: Tensão em Corrente Alternada no Retificador (PSCAD x PacDyn)



Figura 49 – Caso1: Tensão em Corrente Alternada no Inversor (PSCAD x PacDyn)

A Figura 50 mostra as correntes CA no lado do retificador e a Figura 51 mostra as correntes CA no lado do inversor. Ambos os resultados se mostram adequados.



Figura 50 - Caso1: Corrente Alternada no Retificador (PSCAD x PacDyn)



Figura 51 – Caso1: Corrente Alternada no Inversor (PSCAD x PacDyn)

De forma geral, os resultados se mostraram satisfatórios, uma vez que as curvas apresentaram comportamentos bem próximos. Nessa perspectiva o modelo linearizado conseguiu representar bem a dinâmica observada no modelo não linear.

Com o objetivo de continuar testando a aplicabilidade do modelo algumas análises se mostram interessantes. Uma das análises que será apresentada na próxima subseção é a retirada do controle do inversor. O lado do inversor possui um controle com pouca dinâmica, ou seja, é predominantemente algébrico. Será analisado, portanto, o impacto da retirada do controle do inversor no âmbito do caso 1.

4.1.1 Caso 1 – Influência do controle do inversor

Essa seção destina-se a apresentar os resultados obtidos através da eliminação do controle de gama mínimo. Para realizar essa simulação observou-se o valor em regime permanente do ângulo de disparo α do inversor forçando esse valor ser constante durante a simulação. Ressalta-se que toda a rede elétrica, parâmetros de controle, variáveis de medição não foram alterados em relação ao caso 1 apresentado.

A Figura 52 apresenta o resultado da simulação para a tensão em corrente contínua do lado do retificador. Nota-se que o resultado continua compatível.



Figura 52 – Caso 1 (sem controle do inversor): Tensão em Corrente Contínua no Retificador (PSCAD x PacDyn)

A Figura 53 apresenta o resultado da simulação para a variável de tensão em corrente contínua do lado do inversor. Assim como no caso do retificador, os resultados são aderentes.



Figura 53 - Caso 1(sem controle do inversor): Tensão em Corrente Contínua no Inversor (PSCAD x PacDyn)

A Figura 54 apresenta o resultado da simulação para o ângulo alfa do retificador. Os resultados estão qualitativamente próximos. Não há um acoplamento dinâmico totalmente sobreposto, mas seguem comportamentos bem próximos. A diferença observada está na ordem de $0,1^{\circ}$



Figura 54 - Caso 1(sem controle do inversor): Ângulo Alfa no Retificador (PSCAD x PacDyn)

A Figura 55 apresenta o resultado da simulação para o ângulo alfa do inversor. Como se trata do controle que foi desabilitado, os resultados são efetivamente coincidentes (o ângulo fica em seu valor inicial).



Figura 55 - Caso 1(sem controle do inversor): Ângulo Alfa no Inversor (PSCAD x PacDyn)

A Figura 56 apresenta o resultado da simulação para a corrente contínua no elo HVDC. Os resultados seguem qualitativamente próximos.



Figura 56 - Caso 1(sem controle do inversor): Corrente Contínua na linha CC (PSCAD x PacDyn)
A Figura 57 apresenta o resultado da simulação para o ângulo gama do inversor o qual apresenta resultados bem próximos.



Figura 57 - Caso 1(sem controle do inversor): Ângulo Gama no Inversor (PSCAD x PacDyn)

As tensões e correntes alternadas também foram objetos de validação. A Figura 58 mostra as tensões no lado do retificador enquanto que a Figura 59 mostra as tensões no lado do inversor. Como são barras infinitas conectadas diretamente sem impedância as suas tensões não variam, permanecendo com seus valores (RMS) iniciais.



Figura 58 – Caso1(sem controle do inversor) Tensão em Corrente Alternada no Retificador (PSCAD x PacDyn)



Figura 59 – Caso1(sem controle do inversor): Tensão em Corrente Alternada no Inversor (PSCAD x PacDyn)

A Figura 60 mostra as correntes no lado do retificador enquanto que a Figura 61 mostra as correntes no lado do inversor.



Figura 60 – Caso1(sem controle do inversor): Corrente Alternada no Retificador (PSCAD x PacDyn)



Figura 61 – Caso1(sem controle do inversor): Corrente Alternada no Inversor (PSCAD x PacDyn)

Portanto, os resultados nessa análise com o controle do inversor desabilitado se mostraram compatíveis e um pouco mais próximos quando comparados ao mesmo caso com o controle habilitado. Conclui-se, então que há impacto nos resultados decorrente do controle de gama mínimo, com melhores resultados quando este está desligado. Isso ocorre porque no PacDyn as medições utilizadas no controle não possuem harmônicos considerados, enquanto que, no PSCAD, as variáveis medidas e utilizadas no controle possuem harmônicos que interferem no comportamento do controlador.

4.2 Caso 2 – Elo de Corrente Contínua conectado diretamente na Barra Infinita através de circuito RL

O segundo caso consiste em um elo de corrente contínua conectado diretamente na barra infinita através de uma impedância RL tanto do lado do retificador, como do lado do inversor. Do ponto de vista topológico não representa uma grande alteração quando comparado ao caso 1. Entretanto, a inclusão de uma impedância permite maiores análises dos resultados obtidos. Nessa situação, por exemplo, é possível observar a atuação dinâmica do PLL. Além disso, a inexistência de impedância no caso 1 tornava a relação de curtocircuito tendendo a infinito, situação que não ocorre quando as impedâncias do lado do retificador e do inversor são incluídas.

O diagrama unifilar desse caso representado no programa ANAREDE está na Figura 62. A impedância assume o valor de $R = 1,66 \Omega$ e de L = 0,044013 H para o retificador, entre as barras 10 e 1, e de R = 3,315 Ω e de L = 0,08796 H para o inversor, entre as barras 20 e 2.



Figura 62 - Diagrama Unifilar no ANAREDE do Elo conectado diretamente na Barra Infinita através de impedância RL

A Figura 63 apresenta o mesmo sistema representado no programa PSCAD/EMTDC. Assim como no caso 1 a representação de sistemas elétricos e controles no PSCAD pode ser feita em camadas, através de caixas que facilitam a visualização e modularização do sistema. Então, todos os elementos do Elo CCAT estão inseridos internamente na caixa "Elo CCAT". Ressalta-se que os componentes internos são os mesmos apresentados na seção 4.1.



Figura 63 - Diagrama Unifilar no PSCAD do Elo conectado diretamente na Barra Infinita através de uma impedância RL (R=3,3150Ω e L=0,08796H)

Devido à inclusão da impedância nos terminais do elo um novo ponto de operação é obtido, e seus valores estão na Tabela 9 para o retificador e Tabela 10 para o inversor.

Retificador		
Rede Elétrica		
V _{ret}	494,5 V	
$ heta_{ret}$	90 °	
tap	1,015	
R 1,66 Ω		
L 0,044013 H		
Controle PI		
K _P	120	
K _I	6500	
PLL		
K _P	20	
K	ζ _τ 200	

Tabela 9 - Caso 2: Dados do Retificador

Tabela 10 - Caso 2: Dados do Inversor

Inversor		
Rede	Rede Elétrica	
V_{inv}	500 V	
θ_{inv}	90 °	
tap	0,99	
R	3,315 Ω	
L 0,08796H		
Controle Gama		
Mínimo		
Yref	17,5	
2 <i>dx</i> 0,175		
PLL		
K _P	20	
K _I	200	

Uma consideração relevante nesse caso é o cálculo da relação de curto-circuito do lado do inversor. Para tal, inicialmente a reatância indutiva é calculada.

$$X_{L} = \omega L = 2\pi f L$$

$$X_{L} = 2\pi \times 60 \times 0,08796 = 33,160\Omega$$
(175)

Na sequência, calcula-se a impedância correspondente:

$$Z = \sqrt{X_L^2 + R^2}$$

$$Z = \sqrt{33,160^2 + 3,315^2} = 33,325\Omega$$
(176)

Converte-se para pu, tendo a informação da base do sistema.

$$Z_{BASE} = \frac{V_{BASE}^2}{S_{BASE}}$$

$$Z_{BASE} = \frac{500^2}{100} = 2500\Omega$$

$$z_{pu} = \frac{Z}{Z_{BASE}} = \frac{33,325\Omega}{2500\Omega} = 0,0133$$
(177)

Calcula-se a Potência de curto-circuito:

$$S_C = \frac{1}{Z_{pu}} = \frac{1}{0,0133} = 75,392 \tag{178}$$

Por fim, a relação de curto-circuito obtida:

$$SCR = \frac{S_C}{\left(\frac{P_{CC_{BASE}}}{S_{BASE}}\right)} = \frac{75,392}{\left(\frac{1500}{100}\right)} = 5,026$$
(179)

O evento aplicado no caso 2 consiste em um degrau de -1,9% na ordem de corrente do retificador. Os resultados obtidos seguem nas próximas figuras.

A Figura 64 apresenta o resultado da simulação para a variável de tensão em corrente contínua do lado do retificador. Pode ser visto que os resultados dos programas PacDyn e PSCAD são aderentes. Em ambos os programas, o sistema volta a operar em um ponto de equilíbrio e apresenta o comportamento dinâmico similar.



Figura 64 – Caso 2: Tensão em Corrente Contínua no Retificador (PSCAD x PacDyn)

A Figura 65 apresenta o resultado da simulação para a variável de tensão em corrente contínua do lado do inversor. Nota-se que os resultados estão bem próximos.



Figura 65 - Caso 2: Tensão em Corrente Contínua no Inversor (PSCAD x PacDyn)

A Figura 66 apresenta o resultado da simulação para o ângulo alfa do retificador. Os resultados estão qualitativamente próximos. Em comparação com o caso 1 o resultado está um pouco mais distante, devido a inclusão de impedância nos terminais do elo.



A Figura 67 apresenta o resultado da simulação para o ângulo alfa do inversor. Os resultados seguem bem próximos, porém com uma pequena diferença dinâmica.



Figura 67 - Caso 2: Ângulo Alfa no Inversor (PSCAD x PacDyn)

A Figura 68 apresenta o resultado da simulação para a corrente contínua no elo. Os resultados seguem qualitativamente próximos.



Figura 68 - Caso 2: Corrente Contínua na linha CC (PSCAD x PacDyn)

A Figura 69 apresenta o resultado da simulação para o ângulo gama do inversor. Os resultados seguem coerentes.



Figura 69 - Caso 2: Ângulo Gama no Inversor (PSCAD x PacDyn)

A Figura 70 mostra as tensões no lado do retificador enquanto, as quais seguem com o mesmo comportamento dinâmico.



Figura 70 – Caso2: Tensão em Corrente Alternada no Retificador (PSCAD x PacDyn)

A Figura 71 mostra as tensões no lado do inversor, com mesmo comportamento tanto no PSCAD como no PacDyn.



Figura 71 - Caso2: Tensão em Corrente Alternada no Inversor (PSCAD x PacDyn)

A Figura 72 e a Figura 73 mostram as tensões no lado do retificador e inversor, respectivamente, apresentando um comportamento dinâmico bem próximos nas simulações.



Figura 72 – Caso2: Corrente Alternada no Retificador (PSCAD x PacDyn)



Figura 73 – Caso2: Corrente Alternada no Inversor (PSCAD x PacDyn)

Portanto, conclui-se que o caso 2, em geral, assume resultados próximos ao caso 1, porém devido à inclusão das impedâncias entre os geradores e os terminais do elo HVDC, a presença de harmônicos passa a influenciar o comportamento dinâmico do sistema.

Com o objetivo de continuar testando o intervalo de aplicabilidade do modelo nesse caso 2 serão feitas mais duas considerações nas próximas subseções:

- Considerar a influência do controle do inversor;
- Variar a impedância do lado do inversor.

4.2.1 Caso 2 – Influência do controle do inversor

Essa seção destina-se a apresentar os resultados obtidos através da eliminação do controle de gama mínimo para o caso 2. Assim como foi feito no caso 1 foi observado o valor em regime permanente do ângulo de disparo α do inversor, utilizando esse valor como uma constante durante a simulação. Toda a rede elétrica, parâmetros de controle, variáveis de medição não foram alterados em relação ao caso 1 apresentado.

A Figura 74 apresenta o resultado da simulação para a tensão em corrente contínua do lado do retificador.



Figura 74 – Caso 2(sem controle do inversor):: Tensão em Corrente Contínua no Retificador (PSCAD x PacDyn)

A Figura 75 apresenta o resultado da simulação para a variável de tensão em corrente contínua do lado do inversor. Assim como no caso do retificador, os resultados são aderentes.



Figura 75 - Caso 2(sem controle do inversor): Tensão em Corrente Contínua no Inversor (PSCAD x PacDyn)

A Figura 76 apresenta o resultado da simulação para o ângulo alfa do retificador. Os resultados estão qualitativamente próximos.



Figura 76 - Caso 2(sem controle do inversor): Ângulo Alfa no Retificador (PSCAD x PacDyn)

A Figura 77 apresenta o resultado da simulação para o ângulo alfa do inversor. Como se trata do controle que foi desabilitado, os resultados são efetivamente coincidentes.



Figura 77 - Caso 2(sem controle do inversor): Ângulo Alfa no Inversor (PSCAD x PacDyn)

A Figura 78 apresenta o resultado da simulação para a corrente contínua no elo. Os resultados seguem qualitativamente próximos do ponto de vista de comportamento dinâmico.



Figura 78 - Caso 2(sem controle do inversor): Corrente Contínua na linha CC (PSCAD x PacDyn)

A Figura 79 apresenta o resultado da simulação para o ângulo gama do inversor. Novamente aqui, verifica-se aderência entre os resultados.



Figura 79 - Caso 2(sem controle do inversor): Ângulo Gama no Inversor (PSCAD x PacDyn)

A Figura 80 mostra as tensões no lado do retificador.



Figura 80 – Caso2(sem controle do inversor): Tensão em Corrente Alternada no Retificador (PSCAD x PacDyn)

A Figura 81 apresenta as tensões no lado do inversor.



Figura 81 - Caso2(sem controle do inversor): Tensão em Corrente Alternada no Inversor (PSCAD x PacDyn)

A Figura 82 mostra as correntes no lado do retificador enquanto que a Figura 83 mostra as correntes no lado do inversor.



Figura 82 – Caso2(sem controle do inversor): Corrente Alternada no Retificador (PSCAD x PacDyn)



Figura 83 – Caso2 (sem controle do inversor): Corrente Alternada no Inversor (PSCAD x PacDyn)

Assim sendo, os resultados nessa análise sem o controle do inversor se mostraram bem similares aos resultados obtidos com o controle habilitado. Contudo, é possível notar que a presença de harmônico na rede elétrica possui certa influência no controle, principalmente, do inversor, que é basicamente algébrico (além do atraso de algumas medições). Isso faz com que os resultados do PacDyn para o caso sem o controle no inversor fiquem ainda mais próximos dos resultados do PSCAD/EMTDC, quando considerados os resultados obtidos com o controle de gama mínimo no inversor.

4.2.2 Caso 2: Variação do circuito RL

Essa seção consiste em uma variação do caso 2, por meio da variação dos valores dos parâmetros RL. O objetivo aqui é observar o impacto do aumento da impedância RL no lado do inversor. Nesse contexto o aumento da impedância pode ser interpretado de duas formas: aumento do conteúdo harmônico do modelo e diminuição da potência de curto circuito.

Quanto ao primeiro efeito mencionado, aumentar o conteúdo harmônico em certa medida evidencia as simplificações do modelo de elo HVDC proposto. Deve-se observar, no entanto, que não se trata de uma limitação do uso das ferramentas de funções de chaveamento ou fasores dinâmicos, mas do truncamento do modelo matemático em sua componente fundamental. Ou seja, é possível descrever as componentes harmônicas através da modelagem em fasores dinâmicos. Essa modelagem, contudo, será truncada em algum número n de componentes harmônicas.

Em relação ao segundo efeito a relação de curto circuito costuma ser um fator determinante na avaliação do desempenho dinâmico de elos de CCAT. Essa relação costuma apresentar maior grau de criticidade no lado do inversor.

O diagrama unifilar desse caso representado no PSCAD está na Figura 84. A impedância assume o valor de $R = 1,66\Omega$ e de L = 0,044013H para o retificador, entre as barras 10 e 1, e de $R = 3,32\Omega$ e de L = 0,12H para o inversor, entre as barras 20 e 2.



Figura 84 - Diagrama Unifilar no PSCAD do Elo conectado diretamente na Barra Infinita através de uma impedância (R=3,32Ω e L=0,12H)

A Tabela 11 apresenta o ponto de operação do lado do retificador, e a Tabela 12 para o inversor.

Retificador		
Rede Elétrica		
V _{ret}	500,5 V	
$ heta_{ret}$	90 °	
tap	1,015	
R 1,66 Ω		
L 0,044013 H		
Controle PI		
K _P	120	
K _I	6500	
PLL		
K _P	20	
K	200	

Tabela 11 - Caso 2.1: Dados do Retificador

Tabela 12 – Caso 2.1: Dados do Inversor

Inversor	
Rede Elétrica	
Vinv	500 V
$ heta_{inv}$	90 °
tap	0,99
R 3,32 Ω	
<i>L</i> 0,12H	
Controle Gama	
Mínimo	
γ _{ref} 17,5	
2dx	0,175
PLL	
K _P	20
K _I	200

Para o cálculo da relação de curto-circuito, inicialmente calculamos a reatância indutiva.

$$X_L = \omega L = 2\pi f L$$

$$X_L = 2\pi \times 60 \times 0.12 = 45,239\Omega$$
(180)

Na sequência, a impedância correspondente:

$$Z = \sqrt{X_L^2 + R^2}$$

$$Z = \sqrt{45,239^2 + 3,315^2} = 45,361\Omega$$
(181)

Converte-se para pu, tendo a informação da base do sistema.

$$Z_{BASE} = \frac{V_{BASE}^2}{S_{BASE}}$$

$$Z_{BASE} = \frac{500^2}{100} = 2500\Omega$$

$$z_{pu} = \frac{Z}{Z_{BASE}} = \frac{45,361\Omega}{2500\Omega} = 0,0181$$
(182)

Calcula-se a potência de curto-circuito:

$$S_C = \frac{1}{Z_{pu}} = \frac{1}{0,0181} = 55,262 \tag{183}$$

Por fim, a relação de curto-circuito obtida:

$$SCR = \frac{S_C}{\left(\frac{P_{CC_{BASE}}}{S_{BASE}}\right)} = \frac{55,262}{\left(\frac{1500}{100}\right)} = 3,684$$
(184)

Nota-se, então, que a aumentar a impedância da barra infinita corresponde à diminuição da relação de curto-circuito.

Dando seguimento às análises gráficas, na Figura 85 apresenta o resultado da simulação para a variável de tensão em corrente contínua do lado do retificador. Pode ser observado que os resultados começam a se diferenciar.





A Figura 86 apresenta o resultado da simulação para a variável de tensão em corrente contínua do lado do inversor. Assim como no caso do retificador, os resultados passam a ter uma pequena diferença.



Figura 86 - Caso 2.1: Tensão em Corrente Contínua no Inversor (PSCAD x PacDyn)

A Figura 87 apresenta o resultado da simulação para o ângulo alfa do retificador. Nessa comparação as diferenças se acentuam inclusive no que se refere ao novo ponto de operação.



Figura 87 - Caso 2.1: Ângulo Alfa no Retificador (PSCAD x PacDyn)

A Figura 88 apresenta o resultado da simulação para o ângulo alfa do inversor. Os resultados retornam ao mesmo ponto de operação, contudo a diferença dinâmica é percebida com mais clareza, embora se mantenha qualitativamente adequado.



Figura 88 - Caso 2.1: Ângulo Alfa no Inversor (PSCAD x PacDyn)





Figura 89 - Caso 2.1: Corrente Contínua na linha CC (PSCAD x PacDyn)

A Figura 90 apresenta o resultado da simulação para o ângulo gama do inversor. Novamente aqui, verifica-se aderência entre os resultados.



Figura 90 - Caso 2.1: Ângulo Gama no Inversor (PSCAD x PacDyn)

A Figura 91 mostra as tensões no lado do retificador enquanto que a Figura 92 mostra as tensões no lado do inversor.



Figura 91 – Caso 2.1: Tensão em Corrente Alternada no Retificador (PSCAD x PacDyn)



Figura 92 - Caso 2.1: Tensão em Corrente Alternada no Inversor (PSCAD x PacDyn)

A Figura 93 e Figura 94 mostram a corrente no lado do retificador e inversor, respectivamente:



Figura 93 – Caso2.1: Corrente Alternada no Retificador (PSCAD x PacDyn)



Figura 94 - Caso2.1: Corrente Alternada no Inversor (PSCAD x PacDyn)

Os resultados das simulações evidenciaram que o aumento da impedância impacta negativamente na qualidade dos resultados. Isso significa que quanto maior a impedância, maior é o impacto da presença de harmônicos na rede elétrica e no comportamento do modelo de elo HVDC proposto. Isso fica aparente na comparação de algumas variáveis que passam a apresentar uma diferença um pouco mais acentuada.

Porém, as diferenças observadas não inviabilizam o uso do modelo proposto, devendo-se reforçar que o principal foco desse trabalho se trata do desenvolvimento de um modelo de elos HVDC, que considerem dinâmicas de altas frequências, para a realização de diagnósticos e ajustes de controladores.

4.3 Caso3: Aplicação do Modelo: Comparação entre as análises Eletromecânica e Eletromagnética

O terceiro caso consiste em um elo de corrente contínua formado por dois bipolos. O diagrama unifilar desse caso representado no programa ANAREDE está na Figura 95.



Figura 95 - Diagrama Unifilar no ANAREDE do Elo formado por dois bipolos

A Figura 96 apresenta o sistema representado no programa PSCAD/EMTDC. Os retificadores estão representados pelas caixas S1P1, S1P2, S1P3 e S1P4, enquanto que os inversores estão identificados pelas caixas S2P1, S2P2, S2P3 e S2P4.

No lado dos retificadores, há uma fonte de tensão com amplitude 525 kV e 0° de fase. No lado do inversor, existe uma fonte representando um compensador síncrono de amplitude 520 kV e 24° de fase e uma fonte equivalente de 575 kV e 0° de fase.



Figura 96 - Diagrama Unifilar no PSCAD do Elo formado por dois bipolos

Os sistemas de controle utilizados se mantêm os mesmos: controlador proporcionalintegral para o retificador e gama mínimo no inversor.

O ponto de operação desse caso está resumido na Tabela 13 para o retificador (IPU9MQ) e nas Tabela 14 (CS-3MQ) e Tabela 15 (EQV. SYST.) para o inversor.

Retificador - IPU9MQ		
Rede	Elétrica	
Vret	525	
θret	90 °	
tap	0,942	
R	R 1,625	
L	L 0,0203 H	
Controle PI		
K _P	K _P 4,584	
K _I	6875 <i>,</i> 49	
PLL		
K _P	20	
K	200	

Tabela 13 – Caso 3: Dados do Retificador (IPU9MQ)

Inversor - CS-3MQ		
Rede Elétrica		
Vinv	520	
θinv	24	
tap	1,01	
R	2,375 Ω	
L	<i>L</i> 0,0622H	
Controle Gama		
Mínimo		
γ_{ref}	17	
2dx	2 <i>dx</i> 0,172	
Р	LL	
K _P	20	
K,	200	

Tabela 14 – Caso 3: Dados do Inversor (CS-3MQ)

Tabela 15 – Caso 3: Dados do Inversor (EQV. SYST.)

Inversor - EQV. SYST.		
Rede Elétrica		
Vinv	500V	
θinv	90 °	
tap	1,01	
R	1,875 Ω	
L	L 0,0513H	
Controle Gama		
Mínimo		
γ_{ref}	17	
2dx	0,172	
PLL		
K_P	20	
K _I	200	

Para o Caso 3 foram utilizados os ganhos $K_P = 0,5$ (proporcional) e $K_I = 200,0$ (integral) no controle de corrente de todos os retificadores. Já no PLL de todos os conversores (retificadores e inversores) os ganhos utilizados foram $K_{PPLL} = 200,0$ (proporcional) e $K_{IPLL} = 20,0$ (integral).

Para se realizar simulações no ambiente do PSCAD é comum fazer uso do recurso do *snapshot*, que consiste em realizar uma simulação sem aplicar qualquer perturbação, de modo que o sistema se estabilize em um determinado ponto de operação. Em determinadas situações pode ser necessário utilizar fontes de inicialização para auxiliar na obtenção do

snapshot. Contudo, a obtenção da estabilização em torno de um ponto de operação pode demandar esforços como mudança de tape dos transformadores e ajuste dos ganhos de controladores, e, ainda assim, não há garantias que esse esforço reflita no resultado esperado.

Dessa forma, uma vez que se atinja um determinado ponto de equilíbrio satisfatório, o PSCAD/EMTDC grava em um arquivo de extensão *.snp o estado de todas as variáveis do sistema modelado. Assim, tem-se a obtenção de um caso em regime permanente o qual pode ser utilizado como ponto de partida na análise de perturbações no sistema que se deseja estudar.

Tendo isso em vista, buscou-se no caso apresentado gerar um "*snapshot*" para posteriormente aplicar uma perturbação na ordem de corrente dos retificadores. Entretanto, foi verificada uma oscilação mal amortecida sustentada (Figura 97), inviabilizando, portanto, a obtenção de um ponto de operação. Esse tipo de situação apresentada pode ser solucionado através de um ajuste de controles. Então, esse mesmo caso foi levado ao contexto do PacDyn, que não apresenta tal problema de inicialização, uma vez que esse ocorre de forma automática a partir da solução de um caso de fluxo de potência executado previamente no programa ANAREDE.



Figura 97 - Caso 3: Oscilação sustentada no PSCAD/EMTDC

Dessa forma, foi aplicado, no PacDyn, uma perturbação do tipo degrau na ordem de corrente de todos os retificadores dos bipolos do elo no valor de -0,01 pu e foram comparados os resultados obtidos através de duas modelagens: o modelo tradicional eletromecânico (EMC) e o modelo desenvolvido para altas frequências (SSR), ambas na Figura 98.

Observando a figura é notório que os resultados obtidos são diferentes. O modelo tradicional, na faixa de frequência eletromecânica, apresenta um comportamento mal

amortecido, porém estável. Já o modelo de alta frequência apresenta uma oscilação com amplitude crescente, portanto instável.

Logo, a situação analisada nesse caso se apresenta particularmente interessante uma vez que fornece três interpretações distintas. No PSCAD apresenta-se como uma oscilação sustentada, e no PacDyn, ora se apresenta como baixo amortecimento na modelagem tradicional ou instável na modelagem em altas frequências.

Essa diferença entre os modelos reforça a importância de que sejam consideradas as dinâmicas de alta frequência, principalmente quando se esteja lidando com simulações de equipamentos que envolvam eletrônica de potência, tais como FACTS e elos CCAT. Afinal, esses tipos de equipamentos possuem dinâmicas em faixas de frequência mais elevadas, as quais extrapolam a faixa observável pelo espectro eletromecânico.



Figura 98 - Caso 3: Correntes no Retificador (EMC x SSC) no PacDyn

O cálculo dos polos do sistema apresentado é realizado via método QR para o modelo eletromecânico (EMC) e via método QZ para o modelo de alta frequência (SSR) [6].

Os principais modos de interesse obtidos através dessa ferramenta estão devidamente listados na Tabela 16 (caso EMC) e Tabela 17 (caso SSR).

	Modelo Tradicional (EMC)		
Número°	Modo de Oscilação	Fator de Amortecimento (%)	Frequência (Hz)
1	+2,047+j83,309	-2,441	13,339
2	+2,047+j83,309	-2,441	13,339
3	+2,047+j83,309	-2,441	13,339
4	-1,377+j91,720	1,501	14,597

(EMC)

Tabela 16 – Caso 3: Principais modos de oscilação do sistema antes do ajuste

Tabela 17 – Caso 3: Principais	modos de oscilação	do sistema	antes do	ajuste
	(SSR)			

	Modelo de Alta Frequência (SSR)		
Número°	Modo de Oscilação	Fator de Amortecimento (%)	Frequência (Hz)
1	+2,047+j83,309	-2,441	13,339
2	+2,047+j83,309	-2,441	13,339
3	+2,047+j83,309	-2,441	13,339
4	+0,761+83,493	-0,912	13,288
5	-2,338+j1032,4	0,227	164,32
6	-61,699+j1734,6	3,555	276,07
7	-65,082+j1619,6	4,015	257,77
8	-127,12+j2567,1	4,9646	408,56

A Tabela 16 e Tabela 17 reforça ainda mais a diferença entre as modelagens. Pode ser observado ainda que a faixa de frequência entre 160 e 450 Hz está relacionada à dinâmica do PLL, no que se refere ao modelo SSR. Observa-se 3 polos iguais a 2,047 + j83,809 nos dois modelos, polos esses que corresponde aos modos intraplanta do sistema. Busca-se melhorar os fatores de amortecimento do polo intraplanta e do polo que representa a oscilação entre o sistema e o elo CCAT. A dinâmica sistema-elo CCAT apresenta o polo de valor -1,377+j91,72 (estável) para o modelo EMC, e o polo de valor 0,7611+j83,493 (instável) para o modelo SSR.

Devido à diferença entre os resultados, sendo o modelo EMC estável e o modelo SSR instável, o ajuste deve ser realizado a luz da modelagem mais completa, no caso a do SSR. Assim, prossegue-se na análise modal buscando a identificação do modo de oscilação que está gerando o problema de amortecimento e sua respectiva solução.

Entre as ferramentas destinadas a análise modal estão os fatores de participação e as formas modais (*mode shapes*). Calculando o fator de amortecimento para o polo de interesse 0,7611+j83493 (com 13,288 Hz de frequência e -0,912% de fator de amortecimento) percebe-se, através do cálculo dos fatores de participação, que os controladores do elo têm grande influência na sua existência, conforme está mostrado na Figura 99. Dessa forma, serão esses os controladores que serão ajustados.

Entre as ferramentas disponibilizadas no PacDyn, o cálculo das formas modais (*mode shapes*) para a corrente contínua são visualizadas as oscilações entre elo-sistema, ilustrado na Figura 100.



Figura 99 - Caso3: Fatores de Participação do polo +0,7611+j83493



Figura 100 – Caso3: Formas Modais do polo +0,7611+j83493

Considerando que os controles de corrente dos retificadores possuem grande influência sobre o polo avaliado, uma estratégia de solução é obtida por meio do cálculo do Lugar das Raízes (*Root-Locus*), no qual serão variados os ganhos K_P e K_I desses

controladores. Além do Lugar das Raízes, o PacDyn possui a ferramenta de ajuste automático utilizando o diagrama de Nyquist com Amortecimento [7] que, no entanto, não foi explorada neste trabalho, mas foi utilizada na estabilização de elos CCAT com modelos eletromecânicos em [8], [9], assim como outras ferramentas de análise linear.

A Figura 101 apresenta o resultado considerando que o ganho Kp excursionou entre 100% e 2000% e o ganho K_I excursionou entre 100% e 10%. Outras trajetórias poderiam ter sido definidas, contudo, através das simulações realizadas foi observado que o comportamento dos controladores apresenta melhores desempenhos ao se aumentar o ganho K_P e diminuir o ganho K_I . Logo, a trajetória coordenada foi estabelecida como parâmetro de variação no lugar das raízes.

A Figura 101 enfatiza como o polo de interesse se desloca ao longo do plano imaginário. O polo parte de 100% na região de instabilidade (lado direito do semi-plano complexo) e avança na região de estabilidade, aumentando sistematicamente o amortecimento. Embora um alto grau de amortecimento seja desejado, é preciso observar como outros polos se deslocam, pois, é possível que com o avanço do lugar das raízes outros polos passem a assumir comportamentos com baixa oscilação ou até mesmo instáveis.



Figura 101 – Caso4: Resultado do cálculo do Lugar das Raízes para variação dos ganhos Kp e Ki

Por conseguinte, o resultado mostrado na Figura 101 permite escolher um intervalo de pares coordenados de ganhos (K_P e K_I) que podem ser utilizados de tal forma que o problema de amortecimento seja resolvido. Entre o conjunto de opções disponíveis foram utilizados os ganhos conforme a Tabela 18.

Ganhos Originais	Ganhos da Solução
$K_P = 0,5$	$K_P = 5,10606$
$K_I = 200,0$	$K_I = 112,7273$

Tabela 18 - Caso 3: Ganhos obtidos com o cálculo do Lugar das Raízes

Assim, em posse desses ganhos, calculam-se novamente os polos do sistema via método QR para o modelo EMC e via método QZ para o modelo SSR, de modo a se obter os principais modos de oscilação do sistema. Esses modos são apresentados na Tabela 19 (EMC) e Tabela 20 (SSR). Observa-se, que os modos de oscilação entre os modelos EMC e SSR ainda são distintos, porém ambos estáveis. Para o modelo eletromecânico (EMC) o polo intraplanta assume o valor de -63,098+j159,77 e o polo do modo local assume o valor de -73,647+j482,75. Por sua vez, no modelo de altas frequências (SSR) o polo intraplanta assume o valor de -73,647+j185,75 e o polo do modo local assume o valor de -65,098+j161,27. Nota-se, ainda que todos os fatores de amortecimento foram aumentados.

Tabela 19 - Caso 3: Principais modos de oscilação do sistema depois do ajuste

(EMC)

Número	Modelo Tradicional (EMC)			
	Modo de Oscilação	Fator de Amortecimento (%)	Frequência (Hz)	
1	36,731	25,429	-63,098+j159,77	
2	36,731	25,429	-63,098+j159,77	
3	36,731	25,429	-63,098+j159,77	
4	36,858	29,562	-73,647+j185,75	

Número	Modelo de Alta Frequência (SSR)			
	Modo de Oscilação	Fator de Amortecimento (%)	Frequência (Hz)	
1	36,731	25,429	-63,098+j159,77	
2	36,731	25,429	-63,098+j159,77	
3	36,731	25,429	-63,098+j159,77	
4	37,755	25,666	-65,753+j161,27	
5	0,228	164,62	-2,359+j1034,3	
6	3,589	274,66	-61,969+j1725,7	
7	4,033	257,82	-65,380+j1621,2	
8	4,933	409,33	-127,02+j2571,9	

Tabela 20 – Caso 3: Principais modos de oscilação do sistema depois do ajuste

A Figura 102 exibe uma comparação entre os resultados dos modelos EMC e SSR considerando os ganhos dos controles reajustados. As curvas se apresentam praticamente sobrepostas o que denota que em situações com um ajuste adequado as modelagens são bem aderentes entre si.





Figura 102 - Caso 3: Variação da corrente nas modelagens EMC e SSR

Entretanto, a análise de maior relevância é realizada confrontando com o PSCAD/EMTDC, o que pode ser visualizado na Figura 103.

Em suma, o ajuste obtido pelo cálculo do lugar das raízes promoveu uma melhoria no comportamento dinâmico observado inicialmente. Na Figura 103 a oscilação observada na simulação do PSCAD corresponde à presença de frequências geradas pela combinação de harmônicos no sistema.



Figura 103 - Caso 4: Variação da corrente nas modelagens SSR e no PSCAD

Conclui-se então que apesar das simplificações utilizadas no modelo de elos CCAT, os resultados são qualitativamente compatíveis, habilitando o PacDyn como ferramenta capaz de mitigar problemas de oscilação mal amortecida observados no PSCAD/EMTDC. Em suma, o modelo disponibiliza ao PacDyn uma ferramenta de diagnóstico e de ajustes de controladores considerando dinâmicas de alta frequências presentes nesses tipos de equipamentos.

Assim, pode ser observado que o problema foi resolvido para o amortecimento da corrente. Com a finalidade de confirmar a validade da solução, outras variáveis PSCAD/EMTDC x PacDyn são verificadas, assim como foi realizado nas seções anteriores.

A tensão em corrente contínua no lado do retificador consta na Figura 104. Como o distúrbio foi aplicado simultaneamente em todos os retificadores, verifica-se a oscilação coerente de todos os modos de forma análoga a um sistema equivalente.


Figura 104 – Caso 3: Tensão em Corrente Contínua nos Retificadores (PSCAD x PacDyn)

Da mesma forma, a tensão em corrente contínua no lado do inversor está na Figura 105. Todos os polos são representando em conjunto, apresentando mesmo comportamento dinâmico.



Figura 105 - Caso 3: Tensão em Corrente Contínua nos Inversores (PSCAD x PacDyn)

O ângulo de disparo alfa do retificador segue na Figura 106. Apesar de o PSCAD apresentar uma medição com maior conteúdo harmônico, portanto, mais ruidosa, a variação dinâmica e os pontos de operação entre os programas estão compatíveis.



Figura 106 - Caso 3: Ângulo Alfa nos Retificadores (PSCAD x PacDyn)

O ângulo de disparo alfa do inversor segue na Figura 107 seguindo em curvas quase sobrepostas.



Figura 107 - Caso 3: Ângulo Alfa nos Inversores (PSCAD x PacDyn)

A corrente na linha em corrente contínua, conforme já visto, segue reapresentada na Figura 108. A pequena variação dinâmica pode ser compreendida como um reflexo da diferença existente do ângulo alfa. Apesar de haver uma pequena variação observada, o comportamento segue qualitativamente próximo.



Figura 108 - Caso 3: Corrente Contínua na linhas CC (PSCAD x PacDyn)

O ângulo gama do inversor segue na Figura 109. Essa variável se ajustou em um ponto de operação um pouco distinto, porém com magnitude em torno de $0,2^{\circ}$ de diferença entre os pontos de operação.



Figura 109 - Caso 3: Ângulo Gama nos Inversores (PSCAD x PacDyn)

As tensões em corrente contínua no lado do retificador e do inversor seguem na Figura 110 e Figura 111, respectivamente. Devido ao caráter um pouco mais oscilatório observado no PSCAD/EMTDC a variação não parece ser muito expressiva, porém segue com o mesmo comportamento.



Figura 110 – Caso 3: Tensão em Corrente Alternada no Retificador (PSCAD x PacDyn)



Figura 111 – Caso 3: Tensão em Corrente Alternada no Inversor (PSCAD x PacDyn)

A corrente alternada no lado do retificador está na Figura 112 e do inversor na Figura 113, respectivamente. Nota-se que a corrente observada no PacDyn parece ser a componente média daquela observada no PSCAD/EMTDC.



Figura 112 – Caso 3: Corrente Alternada no Retificador (PSCAD x PacDyn)



Figura 113 – Caso 3: Corrente Alternada no Inversor (PSCAD x PacDyn)

Os resultados das simulações ilustram que a aplicabilidade do modelo segue válida. Os resultados seguem qualitativamente bons. Esse caso em particular teve uma abordagem um pouco mais completa.

Inicialmente se partiu de um caso oscilatório no PSCAD, o qual não foi possível chegar a um regime permanente para o *snapshot* gerado. Além disso, o modelo PacDyn apresentou comportamentos distintos nas modelagens EMC e SSR. O primeiro passo consistia então em tornar o sistema estável através do ajuste de parâmetros de controle. As ferramentas de análise linear contempladas no PacDyn permitiram que esses novos ganhos

fossem obtidos. Depois de diagnosticado e ajustado no PacDyn, o próximo passo consistia em verificar se o mesmo efeito poderia ser obtido no PSCAD/EMTDC.

Portanto, com posse dos parâmetros ajustados foram comparados os resultados e verificado que as curvas seguem bem próximas, mantendo a fidedignidade da comparação e se mostrando adequados.

4.4 Caso 4: Aplicação do modelo no Sistema Benchmark de elo CCAT de 14 barras

O caso 4 passou a contar com mais uma ferramenta de simulação, um programa computacional que vem sendo desenvolvido no CEPEL, denominado ANAHVDC [11]. O ANAHVDC realiza simulações de respostas no tempo, considerando a modelagem completa do sistema de potência, com seus componentes representados através de modelos utilizados para análises de altas frequências (isto é, representa bem o comportamento eletromecânico e eletromagnético dos componentes da rede elétrica). O ANAHVDC possui inicialização automática, tendo como ponto de partida um caso de fluxo de potência convergido no ANAREDE. Os dados dos componentes da rede são lidos em parte do ANATEM (dados de modelos dinâmicos) e, futuramente, em parte do ANAFAS (dados de sequência zero). Um dos principais objetivos do ANAHVDC é sua utilização nos estudos dinâmicos, substituindo o ANATEM e o PSCAD quando o foco se concentra na interação dinâmica entre múltiplos elos e sistemas de grande porte, tal como o SIN, com uma abordagem que considera de forma simultânea tanto os transitórios eletromecânicos como os eletromagnéticos.

O caso 4 consiste no sistema benchmark composto por 14 barras proposto em [53], [54]. Um sistema *benchmark* é um sistema de referência. A constituição desse sistema de referência geralmente é realizada por uma equipe do tipo força-tarefa composta por especialistas na área. Além disso, normalmente o sistema *benchmark* passa por validações mais rigorosas, tornando assim esse modelo mais confiável, sendo de grande utilidade no estudo do sistema e dos possíveis eventos que possam ser submetidos. Outro uso de sistemas *benchmark* é servir de parâmetro de validação em relação ao desenvolvimento de novos modelos e programas que consideram o mesmo sistema. Por exemplo, um sistema benchmark desenvolvido no âmbito do PSCAD/EMTDC pode ser a base para uma mesma implementação no programa ATP, ambos considerando transitórios eletromagnéticos. Podese inclusive utilizar em programas de natureza distinta desde que feitas as considerações necessárias. Trata-se, portanto de um caso um pouco mais completo e dessa forma mais próximo de um sistema real.

Então, os resultados além de contemplarem então um modelo um pouco mais completo, também serão apresentados no contexto dessa nova ferramenta computacional, o ANAHVDC.

O diagrama unifilar desse primeiro caso representado no programa ANAREDE está na Figura 114. O elo está representado entre as barras 7 e 8. Do lado do retificador o sistema é composto por duas máquinas, enquanto no inversor o sistema está representado por três máquinas síncronas.

Cabe ressaltar que na análise desse caso específico as máquinas foram representadas com o modelo de barra infinita. Isso significa dizer que a dinâmica das máquinas, bem como dos seus respectivos controladores (regulador de tensão, estabilizador de sistema de potência e regulador de velocidade) não foram representadas, e, portanto, seus modos de oscilação não serão observados nessa análise.



Figura 114 – Diagrama Unifilar no ANAREDE do Sistema Benchmark de 14 barras

A Figura 115 apresenta a tensão em corrente contínua no lado do retificador. Os resultados observados nos três programas estão bem próximos, com os mesmos pontos de operação (antes e depois do evento) e com a mesma dinâmica.



Figura 115 – Caso 4: Tensão em Corrente Contínua no Retificador (PSCAD x PacDyn x ANAHVDC)

A Figura 116 apresenta a tensão em corrente contínua no lado do inversor. As considerações sobre os resultados são as mesmas das realizadas para o lado do retificador.



Figura 116 - Caso 4: Tensão em Corrente Contínua no Inversor (PSCAD x PacDyn x ANAHVDC)

O ângulo de disparo no retificador nos três programas está na Figura 117. Nota-se que a proximidade entre os resultados dinâmicos. Nesse caso, o PacDyn e ANAHVDC são visualmente mais próximos.



Figura 117 - Caso 4: Ângulo Alfa no Retificador (PSCAD x PacDyn x ANAHVDC)

O ângulo de disparo no inversor nos três programas está na Figura 118. Nota-se que a proximidade entre os resultados dinâmicos.



Figura 118 - Caso 4: Ângulo Alfa no Inversor (PSCAD x PacDyn x ANAHVDC)

A corrente contínua na linha está na Figura 119. Apesar do PSCAD/EMTDC apresentar variação mais oscilatória é possível observar a proximidade dos resultados.



Figura 119 - Caso 4: Corrente na linha CC (PSCAD x PacDyn x ANAHVDC)

O ângulo gama no inversor está na Figura 120. Nessa situação há maior proximidade entre o PacDyn e o ANAHVDC.



Figura 120 - Caso 4: Ângulo Gama no Inversor (PSCAD x PacDyn x ANAHVDC)

As tensões medidas nos terminais do elo, do lado do retificador e inversor, estão, respectivamente, na Figura 121 e Figura 122. Devido à oscilação observada no PSCAD/EMTDC a variação da tensão aparece de forma um pouco mais sutil. Contudo, representam a mesma dinâmica.



Figura 121 – Caso 4: Tensão em Corrente Alternada no Retificador (PSCAD x PacDyn x ANAHVDC)



Figura 122 – Caso 4: Tensão em Corrente Alternada no Inversor (PSCAD x PacDyn x ANAHVDC)

As correntes medidas nos terminais do elo, do lado do retificador e inversor, estão, respectivamente, na Figura 123 e Figura 124. Os resultados seguem bem próximos.



Figura 123 – Caso 4: Corrente Alternada no Retificador (PSCAD x PacDyn x ANAHVDC)



Figura 124 – Caso 4: Corrente Alternada no Inversor (PSCAD x PacDyn x ANAHVDC)

O caso apresentado permitiu duas considerações interessantes: a análise um caso com mais elementos, representando um caso mais próximo de um sistema real e; introduziu a análise por mais uma ferramenta: o ANAHVDC. Para a perturbação aplicada os resultados observados se mantiveram próximos no que diz respeito ao ponto de operação e dinâmica. Pode-se concluir que os resultados se mostram satisfatórios, uma vez que se trata de simulações de programas distintos, mas que possuem comportamentos dinâmicos qualitativamente próximos na análise a pequenas perturbações.

No caso 3 já foi demonstrado que o PacDyn é capaz de diagnosticar e ajustar controladores subsidiando estudos no PSCAD/EMTDC. Em outras palavras, é possível usar

o PacDyn para resolver problemas observados em ferramentas de transitórios eletromagnéticos tais como PSCAD/EMDC. O caso 4 amplia essa consideração para a aplicação do ANAHVDC. Deve ser feita uma observação a respeito do modelo do elo HVDC nos programas computacionais PacDyn e ANAHVDC. O modelo do PacDyn é o próprio modelo do ANAHVDC linearizado. Por isso, como esperado há um alto grau de concordância entre o ANAHVDC e o PacDyn.

4.5 Caso 5: Aplicação para análise do SIN

Nesse caso foi utilizado um ponto de operação estudado no Plano de Ampliação e Reforços (PAR) do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) para o horizonte 2023, disponível no site do ONS. O sistema possui 6.973 barras CA, 10.088 circuitos CA e 6 bipolos com 24 conversores HVDC equivalentes. Por questão de simplicidade, todas as gerações foram convertidas para fontes de tensão.



Figura 125 - Caso 5: Contextualização

Os seguintes elos de corrente contínua foram modelados:

- Itaipu;
- Santo Antônio;
- Jirau;
- Xingu-Estreito;
- Xingu-Terminal Rio.

O evento aplicado foi um degrau de -5% na fonte de tensão em Angra I, com as linhas de transmissão sendo representadas por modelo π .

Dessa forma, os resultados obtidos nos programas PacDyn e ANAHVDC são apresentados a seguir. O PSCAD/EMTDC não foi utilizado devido à dificuldade de representação do SIN, necessitando assim de representações através de equivalentes de rede. Além disso, a simulação no PSCAD se torna mais lenta à medida que o sistema aumenta, e muitas vezes de difícil obtenção do ponto de operação em regime permanente.

Pode-se pensar que esse caso representa uma quase validação indireta do ANAHVDC. Em outras palavras, o modelo PacDyn nos casos apresentados obteve um comportamento próximo ao observado no PSCAD. No entanto, não se tratou propriamente de uma validação, mas de uma verificação da adequação do modelo. Assim, se o comportamento do modelo no PacDyn se aproxima do modelo no PSCAD, e esse mesmo modelo simplificado tem resultado próximo ao ANAHVDC, pode-se extrapolar que o modelo ANAHVDC está qualitativamente próximo do modelo PSCAD. Nessa comparação, o lado do retificador é o lado de Xingu, enquanto que o lado do inversor está no Terminal Rio. Tendo por base essa consideração, a nomenclatura dos gráficos segue uma denominação um pouco distinto dos demais casos.

A tensão em corrente contínua em Xingu está na Figura 126. Os resultados entre os programas PacDyn e ANAHVDC seguem bem próximos.



Figura 126 – Caso 5: Tensão em Corrente Contínua em Xingu (ANAHVDC x PacDyn)

A tensão em corrente contínua no lado do Terminal Rio está na Figura 127. Os resultados entre os programas PacDyn e ANAHVDC estão praticamente coincidentes.



Figura 127 – Caso 5: Tensão em Corrente Contínua no Terminal Rio (ANAHVDC x PacDyn)

O ângulo de disparo no retificador (Xingu) está na Figura 128. Há uma pequena diferença quanto ao ponto de operação no novo regime permanente, contudo os programas apresentam a mesma dinâmica. Nota-se que apesar de haver uma diferença, essa mesma é de magnitude menor que 0,2°, o que em geral pode ser considerada aceitável.



Figura 128 - Caso 5: Ângulo Alfa em Xingu (ANAHVDC x PacDyn)

O ângulo de disparo no inversor (Terminal Rio) está na Figura 129. Verifica-se que os programas apresentam praticamente a mesma dinâmica.



Figura 129 - Caso 5: Ângulo Alfa no Terminal Rio (ANAHVDC x PacDyn)

A corrente contínua na linha está na Figura 130. Manteve o ponto de operação e apresentou dinâmica com comportamento bem próximo.



Figura 130 - Caso 5: Corrente Contínua na linha Xingu – Terminal Rio (ANAHVDC x PacDyn)

O ângulo gama dos dois programas está na Figura 131, que também apresentou comportamentos praticamente aderentes.



Figura 131 - Caso 5: Ângulo Gama no Terminal Rio (ANAHVDC x PacDyn)

As tensões medidas nos terminais do elo estão respectivamente na Figura 132 para o lado de Xingu e na Figura 133 para o lado do Terminal Rio.



Figura 132 – Caso 5: Tensão em Corrente Alternada em Xingu (ANAHVDC x PacDyn)



Figura 133 – Caso 5: Tensão em Corrente Alternada no Terminal Rio (ANAHVDC x PacDyn)

As correntes medidas nos terminais do elo estão respectivamente na Figura 134 para o lado de Xingu e na Figura 135 para o lado do Terminal Rio



Figura 134 – Caso 5: Corrente Alternada em Xingu (ANAHVDC x PacDyn)



Figura 135 – Caso 5: Corrente Alternada no Terminal Rio (ANAHVDC x PacDyn)

Esse caso mostrou a validade da simulação considerando o Sistema Interligado Nacional. Do ponto de vista da rede elétrica representada, trata-se do caso mais completo. Os resultados obtidos frente aos dois programas se mostraram compatíveis. Há certo descolamento em alguns resultados, que são considerados de magnitude aceitável, os quais não comprometem as análises nem a aplicabilidade quanto ao diagnóstico e ajuste de controladores.

Capítulo 5 - Conclusão

Neste trabalho, foi mencionada a importância da utilização de Elos CCAT em sistemas elétricos de potência, onde foram levantadas algumas de suas vantagens quando comparados a linhas de transmissão tradicionais em corrente alternada. Também foi mencionado como esses equipamentos vêm sendo cada vez mais utilizados no planejamento e na operação de sistemas de potências.

Para que se possa garantir uma operação adequada desses sistemas, é necessário que se tenha um bom entendimento do funcionamento dos Elos CCAT e de seus conversores, bem como das possíveis interações dinâmicas que podem ocorrer entre os próprios Elos de Corrente Contínua e entre equipamentos desse tipo e com outros componentes da rede elétrica.

Logo, foi desenvolvido e implementado no programa PacDyn, do CEPEL, um modelo de Elos HVDC baseado na utilização de funções de chaveamento generalizadas e de fasores dinâmicos, que considera as dinâmicas de altas frequências desses equipamentos. Foram realizados estudos de seis casos exemplos (mais alguns subcasos) para verificar e validar esse modelo de Elo de Corrente Contínua em questão.

Para isso, foram realizadas simulações nos programas PSCAD/EMTDC, PacDyn e ANAHVDC, em que o objetivo consistia na comparação de resultados para validação do modelo de elo HVDC proposto neste trabalho, além de identificar e resolver eventuais problemas de oscilação relacionados a Elos de Corrente Contínua no PSCAD/EMTDC.

Apesar das aproximações e simplificações utilizadas no modelo desenvolvido, os resultados obtidos no programa PacDyn foram considerados qualitativamente bons, apresentando problemas de oscilação semelhantes aos observados no programa PSCAD/EMTDC. Realizando as análises modais necessárias através do PacDyn, foi possível solucionar os problemas de oscilação encontrados em ambos os casos analisados. Após a solução dos problemas, os resultados obtidos nos programas PSCAD/EMTDC e PacDyn foram bastante coerentes.

Cabe enfatizar que a abordagem por fasores dinâmicos se mostra vantajosa, uma vez que permite a inicialização automática do ponto de operação e integração com os programas

do pacote CEPEL. A inicialização automática permite que o sistema consiga partir de um determinado ponto de operação em regime permanente. A título de comparação, no PSCAD/EMTDC, por exemplo, o sistema se inicia desenergizado e deve-se realizar a simulação do transitório de energização por um período suficientemente longo para atingir o regime permanente antes da aplicação do evento desejado, o que muitas vezes torna a simulação muito demorada ou até mesmo inviável quando o sistema é instável. A integração permite que seja compartilhada a mesma base de dados de elementos de rede do programa ANAREDE e das componentes de sequência do programa ANAFAS.

Por essa razão, é possível dizer que o modelo desenvolvido e implementado no PacDyn para Elos HVDC, que considera dinâmicas de altas frequências, funcionou de forma adequada, apresentando simulações coerentes com o programa PSCAD/EMTDC e sendo capaz de ser utilizado para resolver problemas de oscilação em alta frequência que podem ocorrer devido a interação entre esses próprios equipamentos e entre eles e a rede elétrica do sistema de interesse. Esse foi, exatamente, o objetivo do presente trabalho.

Uma vantagem do modelo apresentado consiste no fato de que os resultados obtidos no domínio do tempo são muito próximos àqueles obtidos em programas de transitórios eletromagnéticos, contudo estão dispostos em uma forma adequada no que se refere ao uso da teoria de controle e da análise modal. Sendo assim, essa modelagem se mostra útil na resolução de problemas relacionados a:

- Ressonâncias subsíncronas;
- Interação adversa entre elos CCAT e rede elétrica;
- Projeto de Controladores;
- Entre outros.

5.1 Trabalhos Futuros

Como proposta para trabalhos futuros está a inclusão de componentes harmônicas no modelo do elo de corrente contínua. Através da inclusão das componentes harmônicas no modelo, espera-se que os resultados sejam mais aderentes, principalmente no que se refere a sistemas com baixa relação de curto circuito. Com isso, há um ganho na precisão do modelo, porém com comprometimento parcial no desempenho computacional. Outra proposta de melhoria quanto aos trabalhos futuros está no cálculo do ângulo de comutação dinamicamente. O ângulo de comutação representa o instante em que pelo menos duas válvulas estão conduzindo de forma simultânea. O modelo aproximado considerou o cálculo desse ângulo através da formulação em regime permanente. Trata-se de uma hipótese de simplificação aceitável, em um universo que considera o modelo linearizado e de componente fundamental e de pequenas perturbações, mas que pode trazer imprecisões na simulação, principalmente durante o período transitório. Logo, realizar o cálculo do ângulo de comutação de forma dinâmica pode ajudar a melhorar a resposta do modelo.

Outro trabalho futuro que poderia ser proposto é a extensão da metodologia utilizada neste trabalho para a modelagem de outros tipos de elos HVDC e de conversores, tais como os conversores CCC (*Capacitor Commutated Converters*) e os conversores do tipo VSC (*Voltage Source Converters*).

Capítulo 6 - Referências Bibliográficas

- [1] KIMBARK, E. W. Direct current transmission, John Wiley & Sons, 1971.
- [2] KUNDUR, P. S. Power System Stability and Control. 4 ed. New York, McGraw-Hill, 1994.
- [3] OLIVEIRA, J. D. A. Avaliação da operação do sistema HVDC de interligação do complexo do Rio Madeira à Região Sul do sistema elétrico brasileiro. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.
- [4] RASHID, M. H. Eletrônica de Potência-Dispositivos, circuitos e aplicações. Tradução de L. Abramowicz, 2014.
- [5] SOOD, V. K. HVDC and FACTS controllers: applications of static converters in power.
- [6] CEPEL, PacDyn Program of Small Signal Stability Analysis and Control -Version 9.9.3 - User's Manual, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2019.
- [7] GOMES, S., GUIMARÃES; C.H.C.; MARTINS, N.; TARANTO, G.N. Damped Nyquist Plot for a pole placement design of power system stabilizers. Electric Power Systems Research, v. 158, p. 158-169, 2018.
- [8] DANIEL, L. O.; GOMES, S.; GRANDER, L. O.; LIRIO, F. L. Small Signal Analysis of HVDC Systems Using Computational Program PacDyn In: CIGRÉ CE B4 Colloquium - HVDC and Power Eletronics to Boost Network Performance, 2013, Brasília.
- [9] DANIEL, L. O.; GOMES, S. Amortecimento de Modos Eletromecânicos Utilizando Estabilizadores em Elos HVDC Considerando-se Diferentes Estratégias de Controle In: XXIV SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2017, Foz do Iguaçu.
- [10] MANITOBA, PSCAD Program of Electromagnetic Transient Simulation -Versão 4.2.0 - User's Manual, 2005.
- [11] GOMES, S.; ALMEIDA, L. P.; LIRIO, F. L.; PARREIRAS, T. J. M. A.; DANIEL, L. O.; AMARAL, T. S.; ROCHA, T. J. B.; AZEVEDO, R. G. O novo Programa Computacional ANAHVDC para Simulação dos Múltiplos Elos HVDC do SIN considerando Transitórios Eletromecânicos e Eletromagnéticos XXV SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2019, Belo Horizonte.
- [12] AZEVEDO, R. G.; PARREIRAS, T. J. M. A.; GOMES, S. Simulação e análise linear em alta frequência de sistemas contendo elos HVDC. XXV SNPTEE -Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2019, Belo Horizonte.
- [13] ALMEIDA, L. P.; GOMES, S.; PARREIRAS, T. J. M. A.; AZEVEDO, R. G. Identificação de falhas de comutação em elos de corrente contínua modelados

por fasores dinâmicos. XXV SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2019, Belo Horizonte.

- [14] MARTINS, N.; LIMA, L T. G.; PINTO, H. J.C.P. Computing dominant poles of power system transfer functions. IEEE Transactions on Power Systems, v. 11, n. 1, p. 162-170, 1996.
- [15] SEMLYEN, A. I. S-domain methodology for assessing the small signal stability of complex systems in nonsinusoidal steady state. IEEE Transactions on Power Systems, v. 14, n. 1, p. 132-137, 1999.
- [16] GOMES, S. Modelagem e Métodos Numéricos para a Análise Linear de Estabilidade Eletromecânica, Ressonância Subsíncrona, Transitórios Eletromagnéticos e Desempenho Harmônico de Sistemas de Potência. 2002. Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ.
- [17] LIRIO, F. L. Modelagem Tensorial de SVC e TCSC no Domínio s para Análise Linear de Transitórios Eletromagnéticos e Harmônicos. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, 2007.
- [18] GOMES, S.; MARTINS, N.; PORTELA, C. Modal analysis applied to sdomain models of AC networks In: 2001 Winter Meeting of the IEEE Power Engineering Society, Columbus.
- [19] OGATA, K.; YANG, Y. Modern control engineering. Prentice-Hall, 2002.
- [20] GOMES, S.; MARTINS, N.; VARRICCHIO, S. L.; PORTELA, C. M. J. C M. Modal Analysis of Electromagnetic Transients in ac Networks Having Long Transmission Lines. IEEE Transactions on Power Delivery, Estados Unidos, v. 20, n.4, p. 2623-2630, 2005.
- [21] GOMES, Sergio; MARTINS, N.; PORTELA, C. M. J. C M. Sequential Computation of Transfer Function Dominant Poles of s-Domain System Models. IEEE Transactions on Power Systems, v. 24, p. 776-784, 2009.
- [22] VARRICCHIO, S. L.; GOMES, S. Electrical network dynamic models with application to modal analysis of harmonics. Electric Power Systems Research, v. 154, p. 433-443, 2018.
- [23] GOMES, S.; QUINTÃO, P. E. M.; MARTINS, N. Subsynchronous Resonance Results Obtained with a Comprehensive Small Signal Stability Program In: IX Symposim of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning - IX SEPOPE, 2004, Rio de Janeiro.
- [24] VARRICCHIO, S. L.; GOMES, Sergio; MARTINS, N. Modal Analysis of Industrial System Harmonics Using the s-Domain Approach. IEEE Transactions on Power Delivery., v.19, p.1232 - 1237, 2004.
- [25] MACHADO, J. G. S.; GOMES, S.; PARREIRAS, T. J. M. A. Linear analysis of systems containing transport delays. In: 2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE), 2018, Niteroi. 2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE), 2018. p. 1.

- [26] CHEN, C. T., Linear System Theory and Design. 2 ed. New York, CBS College Publishing, 1984.
- [27] PARREIRAS, T. J. M. A. Metodologia E Implementação Computacional Para Análise Da Estabilidade A Pequenos Sinais Em Múltiplos Cenários. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.
- [28] GYUGYI, L.; PELLY, B. R. Static power frequency changers: theory, performance, and application. John Wiley & Sons, 1976.
- [29] OPPENHEIM, A. V. Willsky As signals and systems, 1983.
- [30] WOOD, P. Switching Power Converters, Robert E. Krieger Publishing Company, Malabar, Florida, 1984..
- [31] PILOTTO, L. A. S. Modelagem Avançada de Sistemas CA/CC, Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ, 1994.
- [32] PILOTTO, L. A. S.; ALVES, J. E. R.; WATANABE, E. H. High frequency eigenanalysis of HVDC and FACTS assisted power systems. In: 2000 Power Engineering Society Summer Meeting (Cat. No. 00CH37134). IEEE, 2000. p. 823-829.
- [33] ALVES, J. E .R. Modelagem de Reatores Controlados por Tiristores Baseada em Funções de Chaveamento Generalizadas, Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ, 1999.
- [34] SANDERS, S. R.; NOWOROLSKI, J. M.; LIU, X. Z.; VERGHESE G. C., Generalized averaging method for power conversion circuits, IEEE Trans. Power Electron., vol. 6, pp. 251–259, Apr. 1991.
- [35] STANKOVIĆ, A.M.; AYDIN, T., Analysis of Asymmetrical Faults in Power Systems Using Dynamic Phasors, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, No. 3, pp. 1062-1068, 2000.
- [36] STANKOVIĆ, A.M.; MATTAVELLI, P.; CALISKAN, V.; VERGHESE, G.C., Modeling and Analysis of FACTS Devices with Dynamic Phasors, IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2000.
- [37] STANKOVIĆ, A. M.; SANDERS, S. R.; AYDIN, T., Dynamic phasors in analysis of unbalanced polyphase AC machines, IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 17, pp. 107–113, 2002.
- [38] MATTAVELLI P., VERGHESE G. C., STANKOVIC A. M. Phasor dynamics of thyristor controlled series capacitor. IEEE Trans Power Syst 1997;12(3):1259–67.
- [39] GOMES, S.; MARTINS, N.; STANKOVIĆ, A. M. Improved Controller Design Using New Dynamic Phasor Models of SVCs Suitable For High Frequency Analysis In: 2005/2006 PES TD, Dallas. 2005/2006 PES TD. IEEE, 2006.

- [40] LIRIO, F. L.; GOMES, S.; WATANABE, E. H. Coordinated Controller Design of Multiples SVCs Using Detailed s-Domain Modeling: IEEE Power Engineering Society General Meeting, Tampa, 2007.
- [41] GOMES, S.; LIRIO, F. L. Ferramenta Computacional para Ajuste de Múltiplos FACTS (SVC e TCSC) considerando possíveis Interações Dinâmicas Adversas In: XI Simposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning - SEPOPE, 2009, Belém.
- [42] JUSAN, F C.; GOMES, S.; TARANTO, G. N.. SSR results obtained with a dynamic phasor model of SVC using modal analysis. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, v. 32, p. 571-582, 2010.
- [43] DANIEL, L. O.; GOMES, S.; WATANABE, E. H. Utilização de Fasores Dinâmicos para Modelagem de Transitórios Eletromecânicos e Eletromagnéticos. In: XVII ERIAC, 2017, Ciudad Del Este. Proceedings of XVII ERIAC. Paris: Cigré, 2017. v. 1. p. 1-9.
- [44] DANIEL, L. O.; GOMES, S.; WATANABE, E. H. Novo simulador de transitórios eletromagnéticos baseado em fasores dinâmicos. In: XVIII ERIAC, 2019, Foz do Iguaçu.
- [45] DANIEL, L. O., Simulador de Transitórios Eletromagnéticos utilizando Fasores Dinâmicos para Análise Não-linear de Redes Elétricas com Equipamentos FACTS, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2018.
- [46] ROCHA, T. J. B.; AMARAL, T. S.; GOMES, S.; ALMEIDA, L. P.; OLIVEIRA, L. A. A. Simulação eficiente de controladores definidos pelo Usuário utilizando compilação em tempo real. XXV SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2019, Belo Horizonte.
- [47] KOTIAN, S. M.; SHUBHANGA, K. N. Dynamic phasor modelling and simulation. In: 2015 Annual IEEE India Conference (INDICON). IEEE, 2015. p. 1-6.
- [48] CLOSE, C.M., Circuitos Lineares, 2 edição, LTC S.A., 1975.
- [49] PORTELA, C. M., Análise de Redes Elétricas Algumas Aplicações, Edição subsidiada pelo Instituto de Alta Cultura, Lisboa, Portugal, 1970.
- [50] SILVA, M. P. Modelos de Conversor Modular Multinível para Simulações de Desempenho Dinâmico. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense, Niteroi, 2019.
- [51] LEBRE, J.; WATANABE, E. H. Análise de Conversor Multinível Modular em Ponte Semicompleta Frente a Curto-Circuito na Linha CC. In: XX Congresso Brasileiro de Automática, 2014, Belo Horizonte - MG. XX Congresso Brasileiro de Automática, 2014.

- [52] PAUCAR, B. C.; WATANABE, E. H. Dynamic Performance of a Back-to-Back HVDC Based on MMC Switched at Line Frequency. In: PCIM South America 2014, 2014, São Paulo. PCIM South America 2014.
- [53] ALMEIDA, L. P.; LIRIO, F. L.; GOMES, S.; LUZ, G. S. Sistema Benchmark no PSCAD e ATP contendo Elo de Corrente Contínua e Máquinas In: XIII SEPOPE - Symposium Of Specialists In Electric Operational And Expansion Planning, 2014, Foz do Iguaçu.
- [54] ALMEIDA, L. P.; LIRIO, F. L.; GOMES, S.; LUZ, G. S.; CARVALHO, A. R.
 C. D. Avaliação do Esforço Computacional em Programas de Transitórios Eletromagnéticos In: XXIII SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2015, Foz do Iguaçu.