

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO  
ESCOLA POLITÉCNICA - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA



**CONTROLE DA OPERAÇÃO DE UM SISTEMA DE TRANSMISSÃO EM  
CORRENTE CONTÍNUA E ALTA TENSÃO**

**Thiago Dutra Gomes**

**Rio de Janeiro, RJ - Brasil**

**FEVEREIRO de 2012**

**CONTROLE DA OPERAÇÃO DE UM SISTEMA DE TRANSMISSÃO EM  
CORRENTE CONTÍNUA E ALTA TENSÃO**

**Thiago Dultra Gomes**

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Orientador: Prof. Sebastião Ércules Melo de Oliveira, D.Sc.

Co-Orientador: Antônio Ricardo C. Dias de Carvalho, M.Sc.

**Rio de Janeiro, RJ - Brasil**

**FEVEREIRO de 2012**

**CONTROLE DA OPERAÇÃO DE UM SISTEMA DE TRANSMISSÃO EM  
CORRENTE CONTÍNUA E ALTA TENSÃO**

Thiago Dultra Gomes

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Aprovado por:

---

Prof. Sebastião Ércules Melo de Oliveira, D.Sc.

(Orientador)

---

Antônio Ricardo Cavalcanti Dias de Carvalho, M.Sc.

(Co - Orientador)

---

Prof. Antonio Carlos Siqueira de Lima, D.Sc.

---

Prof. Robson Francisco da Silva Dias, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

FEVEREIRO de 2012

*Dedico este trabalho de conclusão da graduação ao meu irmão Luciano (in memoriam) e ao meu tio Marivalvo (in memoriam), por todo o carinho, por serem exemplos de caráter e por terem me ensinado que a sabedoria está em pequenas atitudes.*

## AGRADECIMENTO

Aos meus pais por sua capacidade de acreditar em mim, por sempre estarem ao meu lado, querendo o meu melhor e me ajudar. À minha mãe, Marília, por ser uma mãe maravilhosa, por todo o amor e valores transmitidos. Ao meu pai, Paulo, minha referência como pai e engenheiro. Isto não é suficiente para retribuir todo o amor de vocês.

Ao meu irmão Luciano, por ser uma referência de vida e perseverança. Por me acompanhar todos os dias com o seu amor e os seus ensinamentos.

Ao meu irmão Allan, por ser meu eterno companheiro, sempre me ajudando quando eu necessito.

À minha namorada Isabela, minha companheira, a mulher mais linda e sábia, com quem amo partilhar a minha vida. Pelo seu enorme amor e carinho, me acompanhando durante toda a minha jornada. Seu apoio e estímulo foram imprescindíveis para que eu pudesse concluir este trabalho.

Aos professores do curso, que me fizeram compreender o real valor do conhecimento, não só para a realização profissional como para a vida. Em especial ao meu orientador Sebastião Ércules pelo conhecimento transmitido, paciência e dedicação que tanto contribuíram para a elaboração deste trabalho.

Ao meu supervisor Antônio Ricardo, pela orientação, disponibilidade e por todos os seus conselhos. Ao Cepel por permitir a utilização dos softwares para as simulações realizadas neste trabalho, pela confiança e por todo o apoio durante os meses de estágio.

A todos os meus colegas de turma, Fabricio, Renan, Renato Valadão, Renato Ferreira, Flávio, Sylmara, Jardel, Beatriz, Gustavo, João, Márcio e Pedro Sardella com os quais compartilhei esta caminhada. E especialmente ao amigo Leonardo Luiz, por ser um grande amigo e valorizar muito a amizade.

Resumo do Projeto Final em Engenharia Elétrica apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica – UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista:

## **CONTROLE DA OPERAÇÃO DOS SISTEMAS DE TRANSMISSÃO EM CORRENTE CONTÍNUA EM LONGA DISTÂNCIA E ALTA TENSÃO**

Thiago Dultra Gomes

FEVEREIRO de 2011

**Orientador:** Sebastião Ércules Melo de Oliveira, D.Sc.

**Co-Orientador:** Antônio Ricardo Carvalho

**Palavras Chave:** CCAT, Transmissão em Corrente Contínua, Conversor, Controle

O presente trabalho contempla a utilização da transmissão em corrente contínua, apresentando uma análise do desempenho dos seus controles associados, tanto em regime normal de operação, como também, durante perturbações no sistema.

O trabalho, inicialmente, apresenta uma abordagem teórica da transmissão em corrente contínua, uma descrição dos diversos tipos de controle utilizados e, finalmente, resultados de um conjunto de simulações computacionais, utilizando o programa MATLAB. Tais simulações contemplam: desempenho em regime permanente e frente a perturbações na rede tanto do lado CA quanto do lado CC. Para o caso de resposta a faltas, são apresentados resultados de análise de sensibilidade da resposta do elo CC para variação dos ganhos do controlador de corrente.

## FIGURAS

Figura 1 - Diagrama unifilar simplificado de um sistema CCAT.....	2
Figura 2 - Configurações para o elo CCAT.....	6
Figura 3 - Características dos sistemas de transmissão CA e CC. ....	7
Figura 4 - Comparação clássica CA x CC. ....	11
Figura 5 - Ponte de seis pulsos.....	12
Figura 6 - Circuito equivalente durante a comutação do tiristor 1 para o 3. ....	13
Figura 7 - Processo de comutação entre o tiristor 1 e o tiristor 3.....	13
Figura 8 - Comutação natural dos tiristores da ponte de 6 pulsos. ....	15
Figura 9 - Tensão CC para um dado ângulo de disparo. ....	15
Figura 10 - Relação entre as correntes CC e CA com e sem o ângulo de disparo. ....	16
Figura 11 – Potência CC quando de uma falta CA no inversor. ....	20
Figura 12 - Filtros sintonizados.....	24
Figura 13 - Filtros amortecidos.....	24
Figura 14 - Espectro harmônico característico para a ponte de 12 pulsos.....	24
Figura 15 - Configuração dos filtros CA para uma pontes de 12 pulsos.....	25
Figura 16 - Diagrama esquemático.....	27
Figura 17 - Circuito Equivalente.....	27
Figura 18 - Perfil de Tensão.....	27
Figura 19 - Elo CCAT.....	32
Figura 20 - Comportamento da característica frente a variações de $\alpha$ .....	33
Figura 21 - Inversor representado como uma fonte de corrente.....	34
Figura 22 - Controle de $V_d$ frente a variações de $I_d$ .....	34
Figura 23 - Inversor representado como uma fonte de tensão.....	34
Figura 24 - Controle de $I_d$ frente a variações de $V_d$ .....	35
Figura 25 - Modo de operação normal.....	36
Figura 26 - Diagrama de blocos do controle do retificador.....	37
Figura 27 - Característica estática do controle do conversor.....	38
Figura 28 - Diagrama de blocos do controle do inversor.....	39
Figura 29 - Modo de controle de tensão.....	41
Figura 30 – Operação com os dois terminais apresentados os controles de retificador e inversor.....	42
Figura 31 - Filosofia de redução da corrente de ordem.....	43
Figura 32 - Representação.....	45
Figura 33 - Circuito Simulado no Simulink.....	46
Figura 34 - Sistema CA de entrada.....	47
Figura 35 - Sistema CA de saída.....	47
Figura 36 - Estação retificadora.....	48
Figura 37 - Retificador.....	48

<i>Figura 38 - Proteção e Controle do Retificador</i> .....	49
<i>Figura 39 - Estação inversora</i> .....	50
<i>Figura 40 - Inversor</i> .....	50
<i>Figura 41 - Proteção e Controle do Inversor</i> .....	51
<i>Figura 42 - Linha de transmissão CC</i> .....	51
<i>Figura 43 - Filtros CA para os harmônicos de corrente gerados pelo conversor</i> .....	52
<i>Figura 44 – Ângulo de disparo do retificador, no modo de operação normal</i> .....	53
<i>Figura 45 - Ângulo gama do inversor, no modo de operação normal</i> .....	53
<i>Figura 46 - Tensão CC (p.u.) no retificador, no modo de operação normal</i> .....	55
<i>Figura 47 - Corrente CC (p.u.) no retificador, no modo de operação normal</i> .....	55
<i>Figura 48 - Tensão CC (p.u.) no inversor, no modo de operação normal</i> .....	55
<i>Figura 49 - Corrente CC (p.u.) no inversor, no modo de operação normal</i> .....	55
<i>Figura 50 - Tensão CA (p.u.) no retificador, no modo de operação normal</i> .....	56
<i>Figura 51 – Corrente CA (p.u.) no retificador, no modo de operação normal</i> .....	56
<i>Figura 52 - Tensão CA (p.u.) no inversor, no modo de operação normal</i> .....	56
<i>Figura 53 - Corrente CA (p.u.) no inversor, no modo de operação normal</i> .....	56
<i>Figura 54 - Espectro de frequências da corrente CA medida no terminal retificador</i> .....	57
<i>Figura 55 - Correntes CA fornecidas pela rede CA do lado retificador</i> .....	57
<i>Figura 56 - Espectro de frequências da corrente CA medida no terminal inversor</i> .....	58
<i>Figura 57 - Correntes CA consumidas pela rede CA do lado inversor</i> .....	58
<i>Figura 58 - Tensão CC (p.u.) no retificador, para uma queda de tensão de 0,4 p.u. na rede CA do lado retificador</i> .....	59
<i>Figura 59 - Ângulo de disparo do retificador, para uma queda de tensão de 0,4 p.u. na rede CA do lado retificador</i> .....	59
<i>Figura 60 – Tensão CC (p.u.) no inversor, para uma queda de tensão de 0,4 p.u. na rede CA do lado retificador</i> .....	60
<i>Figura 61 – Corrente CC (p.u.) no inversor, para uma queda de tensão de 0,4 p.u. na rede CA do lado retificador</i> .....	60
<i>Figura 62 - Ângulo gama do inversor, para uma queda de tensão de 0,4 p.u. na rede CA do lado retificador</i> .....	60
<i>Figura 63 - Curto CC no lado do retificador</i> .....	61
<i>Figura 64 –Corrente da falta CC no terminal retificador</i> .....	61
<i>Figura 65 - Tensão CC (p.u.) no retificador, para uma falta CC</i> .....	62
<i>Figura 66 - Corrente (p.u.) no retificador, para uma falta CC</i> .....	62
<i>Figura 67 - Ângulo de disparo do retificador, para uma falta CC</i> .....	63
<i>Figura 68 - Ângulo gama do inversor, para uma falta CC</i> .....	63
<i>Figura 69 - Tensão CC (p.u.) no inversor, para uma falta CC</i> .....	63
<i>Figura 70 - Corrente (p.u.) no inversor, para uma falta CC</i> .....	64

<i>Figura 71 - Tensão CA (p.u.) no retificador, para uma falta CC.</i>	64
<i>Figura 72 - Corrente CA (p.u.) no retificador, para uma falta CC.</i>	64
<i>Figura 73 – Tensão CA (p.u.) no inversor, para uma falta CC.</i>	65
<i>Figura 74 - Corrente CA (p.u.) no inversor, para uma falta CC.</i>	65
<i>Figura 75 – Corrente CC (p.u.) no retificador, para um degrau na referência de tensão.</i>	66
<i>Figura 76 - Tensão CC (p.u.) no inversor, para um degrau na referência de tensão.</i>	66
<i>Figura 77 - Ângulo de disparo do retificador, para um degrau na referência de tensão.</i>	67
<i>Figura 78 - Ângulo gama do inversor, para um degrau na referência de tensão.</i>	67
<i>Figura 79 - Corrente da falta CA, para um curto monofásico no terminal inversor.</i>	67
<i>Figura 80 - Tensão CC (p.u.) no retificador, para um curto monofásico no terminal inversor.</i>	68
<i>Figura 81 - Corrente CC (p.u.) no retificador, para um curto monofásico no terminal inversor.</i>	69
<i>Figura 82 - Tensão CC (p.u.) no inversor, para um curto monofásico no terminal inversor.</i>	69
<i>Figura 83 - Corrente CC (p.u.) no inversor, para um curto monofásico no terminal inversor.</i>	69
<i>Figura 84 - Ângulo de disparo do retificador, para um curto monofásico no terminal inversor.</i>	69
<i>Figura 85 - Ângulo gama do inversor, para um curto monofásico no terminal inversor.</i>	70
<i>Figura 86 - Tensão CA (p.u.) no retificador, para um curto monofásico no terminal inversor.</i>	70
<i>Figura 87 - Corrente CA (p.u.) no retificador, para um curto monofásico no terminal inversor.</i>	70
<i>Figura 88 - Tensão CA (p.u.) no inversor, para um curto monofásico no terminal inversor.</i>	71
<i>Figura 89 – Corrente CA (p.u.) no inversor, para um curto monofásico no terminal inversor.</i>	71
<i>Figura 90 - Tensão CC (p.u.) no retificador, para um curto monofásico no terminal inversor, variando os ganhos do retificador.</i>	72
<i>Figura 91 - Corrente CC (p.u.) no retificador, para um curto monofásico no terminal inversor, variando os ganhos do retificador.</i>	73
<i>Figura 92 - Tensão CC (p.u.) no inversor, para um curto monofásico no terminal inversor, variando os ganhos do retificador.</i>	73
<i>Figura 93 - Corrente CC (p.u.) no inversor, para um curto monofásico no terminal inversor, variando os ganhos do retificador.</i>	73
<i>Figura 94 - Ângulo de disparo do retificador, para um curto monofásico no terminal inversor, variando os ganhos do retificador.</i>	74
<i>Figura 95 - Ângulo gama do inversor, para um curto monofásico no terminal inversor, variando os ganhos do retificador.</i>	74
<i>Figura 96 - Tensão CC (p.u.) no retificador, para um curto monofásico no terminal inversor, variando os ganhos do inversor.</i>	75
<i>Figura 97 - Corrente CC (p.u.) no retificador, para um curto monofásico no terminal inversor, variando os ganhos do inversor.</i>	75
<i>Figura 98 - Tensão CC (p.u.) no inversor, para um curto monofásico no terminal inversor, variando os ganhos do inversor.</i>	76

<i>Figura 99 - Corrente CC (p.u.) no inversor, para um curto monofásico no terminal inversor, variando os ganhos do inversor. ....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 100 - Ângulo de disparo do retificador, para um curto monofásico no terminal inversor, variando os ganhos do inversor. ....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 101 - Ângulo gama do inversor, para um curto monofásico no terminal inversor, variando os ganhos do inversor. ....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 102 – Parâmetros - Sistema CA de Entrada.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 103 -Parâmetros - Sistema CA de Saída. ....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 104 - Parâmetros – Transformador abaixador. ....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 105 - Parâmetros – Reator de alisamento.....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 106 -Parâmetros – Ponte trifásica de três níveis.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 107 - Sistema de controle do retificador. ....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 108 - Parâmetros – Transformador elevador. ....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 109 - Sistema de controle do inversor. ....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 110 - Parâmetros - Falta CC.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 111 - Parâmetros - Falta CA. ....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 112 - Parâmetros - Referência de Tensão.....</i>	<i>87</i>

## **TABELAS**

<i>Tabela 1 - Bases de tensão e corrente para as redes CA do sistema.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabela 2 - Bases de tensão e corrente para a rede CC do sistema. ....</i>	<i>54</i>

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 TEMA .....	1
1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO .....	3
1.3 DESCRIÇÃO DO TRABALHO .....	4
<b>2. OS ELOS DE TRANSMISSÃO EM CORRENTE CONTÍNUA .....</b>	<b>6</b>
2.1 COMPARAÇÃO DOS SISTEMAS DE TRANSMISSÃO CA X CC .....	7
2.1.1 Operação de Linhas de Transmissão com Corrente Alternada .....	7
2.1.2 Operação de Linhas de Transmissão com Corrente Contínua .....	8
2.1.3 Conceito de “break even distance” .....	9
<b>3. REPRESENTAÇÃO DO ELO DE CORRENTE CONTÍNUA .....</b>	<b>12</b>
3.1 RELAÇÃO ENTRE AS CORRENTES CA E CC .....	16
3.2 EQUACIONAMENTO MATEMÁTICO .....	17
<b>4. O PROBLEMA DA FALHA DE COMUTAÇÃO .....</b>	<b>20</b>
<b>5. A FUNÇÃO DOS FILTROS DE HARMÔNICOS .....</b>	<b>22</b>
5.1 FILTROS NO LADO CA .....	23
5.2 FILTROS NO LADO CC .....	25
<b>6. AS FUNÇÕES DO SISTEMA DE CONTROLE DOS SISTEMAS CCAT .....</b>	<b>26</b>
6.1 MÉTODOS DE CONTROLE .....	28
6.2 OBJETIVOS DE UM SISTEMA DE CONTROLE APLICADO A ELOS DE TRANSMISSÃO EM CCAT .....	30
6.3 CARACTERÍSTICA ESTÁTICA $V_D \times I_D$ .....	32
6.3.2 Operação Normal .....	35
6.4 CONTROLE DE CORRENTE DO LADO DO RETIFICADOR .....	36
6.5 CONTROLE DE ALFA MÍNIMO .....	37
6.6 CONTROLE DE CORRENTE DO LADO DO INVERSOR .....	38
6.7 CONTROLE DE GAMA MÍNIMO .....	40
6.8 CONTROLE DE POTÊNCIA .....	40
6.9 CONTROLE DE TENSÃO .....	41
6.10 REVERSÃO DE POTÊNCIA .....	41
6.11 VDCOL – VOLTAGE DEPENDENT CURRENT ORDER LIMIT .....	42
6.12 RESUMO DOS PRINCÍPIOS BÁSICOS DO CONTROLE .....	44
<b>7. SIMULAÇÕES REALIZADAS .....</b>	<b>46</b>
7.1 SISTEMA CCAT SIMULADO NO MATLAB .....	46

7.1.1	<i>Sistemas CA</i>	47
7.1.2	<i>Conversores</i>	48
7.1.3	<i>Parte CC do sistema CCAT</i>	51
7.1.4	<i>Filtros CA e banco de capacitores</i>	52
7.2	RESULTADOS	53
7.2.1	<i>Modo de Operação Normal</i>	53
7.2.2	<i>Queda da tensão CA no terminal retificador</i>	58
7.2.3	<i>Falta CC</i>	60
7.2.4	<i>Degrau na referência de tensão</i>	65
7.2.5	<i>Curto monofásico no lado CA do terminal inversor</i>	67
<b>8.</b>	<b>CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>78</b>
8.1	CONCLUSÃO	78
8.2	TRABALHOS FUTUROS	80
8.3	SISTEMA CA DE ENTRADA	83
8.4	SISTEMA CA DE SAÍDA	83
8.5	ESTAÇÃO RETIFICADORA	84
8.5.1	<i>Transformador</i>	84
8.5.2	<i>Reator de Alisamento</i>	84
8.5.3	<i>Ponte Trifásica de Três Níveis (são utilizadas duas para se obter a ponte de 12 pulsos).</i>	85
8.5.4	<i>Sistema de Controle do Retificador</i>	85
8.6	ESTAÇÃO INVERSORA	85
8.6.1	<i>Transformador</i>	86
8.6.2	<i>Sistema de Controle do Inversor</i>	86
8.7	FALTA CC	87
8.8	FALTA CA	87
8.9	REFERÊNCIA DE TENSÃO	87

# Capítulo 1

---

## Introdução

### 1.1 Tema

A transmissão CCAT (Corrente Contínua em Alta Tensão) apresenta vantagens sobre a transmissão em corrente alternada (CA) em determinadas situações. O CCAT surgiu pela primeira vez em siderúrgicas, na fabricação de aço, usando-se válvulas a arco de mercúrio para garantir que a temperatura de fusão não variasse. O interesse na transmissão CCAT cresceu com a procura de aproveitamentos hidroelétricos de grande porte, a longas distâncias das cargas, assim como em travessias submarinas, às vezes associadas à transmissão em longa distância em terra.

As válvulas a arco de mercúrio viabilizaram a primeira aplicação comercial em CCAT, em Gotland (1954) [1]. Em meados dos anos 1960, quando ainda se utilizavam válvulas a arco de mercúrio nos conversores, houve um aumento considerável da tensão utilizada na transmissão CC, o que representou um grande esforço tecnológico para a indústria de equipamentos de potência [2].

Com o advento de conversores de válvulas a tiristores, a transmissão CCAT tornou-se ainda mais atraente. A aplicação inicial da tecnologia de tiristores semicondutores de potência na conversão CA/CC/CA, ocorreu no início da década de 1970, com alguns sistemas já em 500 kV [2].

A utilização, ao final da década de 1970, do nível de tensão de 600 kV no sistema Itaipu, no Brasil, para transmitir 6.300 MW (àquela época) a cerca de 900 km, foi mais um ato de superação tecnológica [1]. Ainda no fim dos anos 70, estes avanços tecnológicos permitiram módulos com número muito menor de componentes, levando a válvulas de construção mais simples, mais econômicas e mais confiáveis. A maioria dos sistemas CCAT existentes hoje utiliza o tiristor como elemento de conversão [2],[3].

Recentemente, tem se verificado um crescimento acentuado na utilização da transmissão em corrente contínua em diversos sistemas ao redor do mundo. Países, como a China, Índia e Brasil estão utilizando esta tecnologia para transferência de grandes blocos de potência a grandes distâncias. A transmissão em corrente contínua

também vem sendo cada vez mais utilizada para a integração de usinas renováveis, notadamente nos sistemas europeus. No sistema brasileiro, em particular, esta tecnologia terá uma aplicação intensa na integração na usinas da região amazônica aos grandes centros de carga. As usinas do Madeira (UHE Santo Antônio e UHE Jirau) e a Usina de Belo Monte já têm definindo a corrente contínua como alternativa para a transferência de suas energias.

Existem, atualmente, duas tecnologias em uso para as conversoras de sistemas CCAT: VSC-Voltage Sourced Converter (Conversor Fonte de Tensão), com base em GTO e IGBT, ou LCC- Line Commuted Converter (também denominado CSC-Current Sourced Converter ou Conversor Fonte de Corrente), com base em tiristores [2].

O CSC é, no momento, o mais utilizado e permite construir conversores de maior potência e tensão, porém o VSC tem muitas vantagens técnicas, como o seu desempenho frente a afundamentos de tensão, e poderá vir a ocupar mais espaço num futuro breve. As duas topologias presentes para o Conversor Fonte de Corrente são: o Conversor CCAT Convencional e o Conversor com Capacitores de Comutação.

No presente trabalho, o Conversor CCAT Convencional, que é foco do trabalho, será simplesmente denominado de CCAT. A Figura 1 mostra o diagrama unifilar simplificado de um sistema CCAT. As estações conversoras são formadas por pontes conversoras, às quais estão associados transformadores, reatores, filtros e equipamentos de suporte de tensão como bancos de capacitores, máquinas síncronas ou compensadores estáticos, além de sistemas de controle, proteção e supervisão das conversoras.

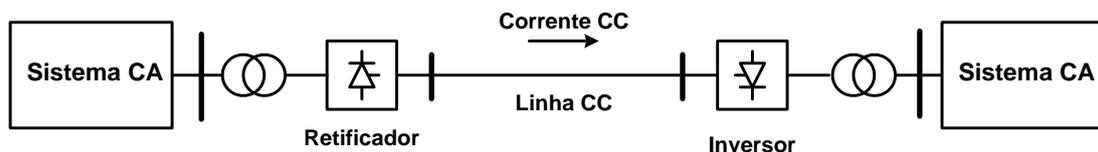


Figura 1 - Diagrama unifilar simplificado de um sistema CCAT.<sup>1</sup>

A utilização de sistemas CCAT ocorre principalmente [1],[3]:

<sup>1</sup> Elaborado com base em [3].

- para a interligação de sistemas remotos onde o custo da linha de transmissão em corrente contínua é menor que o da linha em corrente alternada;
- para a conexão remota de sistemas com frequências nominais distintas;
- para a conexão direta de sistemas assíncronos, sem a necessidade de construção de transmissão em corrente contínua, chamada de back-to-back;
- para transmissão de grandes blocos de energia a grande distância;
- para transmissão submarina com distâncias maiores que 30 km.

Existem diversas situações em que a utilização de transmissão CCAT resulta em benefícios operativos e econômicos. Transmissão submarina em CA é inviável até mesmo para pequenas distâncias (30 km) por causa da elevada capacitância do cabo, necessitando de estações compensadoras [1]. Com o advento da transmissão CCAT, tornou-se possível transmitir energia entre dois pontos sem a necessidade de subestações intermediárias, facilitando a definição do trajeto da linha de transmissão.

Seguramente, a mais complexa destas aplicações refere-se ao acoplamento de sistemas assíncronos, dada a possibilidade de interação entre os sistemas, visto que a conexão direta de redes com frequências distintas é operacionalmente impossível.

Esta tecnologia, que envolve a conversão da corrente alternada em corrente contínua, realizada pela estação retificadora, e a conversão da corrente contínua novamente em corrente alternada, realizada pela estação inversora, permite interligar sistemas elétricos sem estabelecer entre eles qualquer vínculo de tensão, frequência ou sequência de fases. [4]. Destaca-se também que os sistemas, interligados apenas por troncos CCAT, não guardam a necessidade de preservar o sincronismo entre eles.

## **1.2 Objetivos do Trabalho**

O objetivo do presente trabalho é analisar o funcionamento dos controles em operação normal do elo CC e o comportamento dos controles para perturbações típicas do sistema. A fim de avaliar sua resposta, foram simulados os efeitos de curtos CC e CA e da redução da tensão de alimentação CA conectada ao elo CC.

### 1.3 Descrição do Trabalho

O presente trabalho está estruturado da seguinte forma:

- Capítulo 1: “*Introdução*”. Neste capítulo é feita uma breve apresentação do tema que será abordado ao longo do trabalho (isto é, transmissão em corrente contínua), bem como os seus objetivos e organização.
- Capítulo 2: “*Os Elos de Transmissão em Corrente Contínua*”, onde são ilustradas as quatro configurações básicas CCAT (Corrente Contínua a Alta Tensão) usadas em transmissão de energia. Assim como apresentada uma “*Comparação dos Sistemas de Transmissão CA x CC*”, onde são mostradas as características dos sistemas de transmissão em corrente contínua e alternada e também suas vantagens e desvantagens.
- Capítulo 3: “*Representação do Elo de Corrente Contínua*”, em que é descrito o princípio de funcionamento do conversor CSC. Neste capítulo é mostrada a relação entre as correntes contínua e alternada e enunciado o equacionamento matemático que rege o comportamento da transmissão CC em regime permanente.
- Capítulo 4: “*O Problema da Falha de Comutação*”, que apresenta, de forma sucinta, os efeitos da falha de comutação no sistema de transmissão.
- Capítulo 5: “*A Função dos Filtros de Harmônicos*”. Neste capítulo, é feita uma revisão teórica a respeito dos harmônicos de ordem superior e apresentados os problemas deles decorrentes. Descrevem-se, ainda, os filtros que devem ser inseridos nos lados CC e CA de modo a reduzir os efeitos dos harmônicos na rede.
- Capítulo 6 “*As Funções do Controle dos Sistemas CCAT*”. Junto com o capítulo 8, este capítulo forma a parte central do trabalho. Neste capítulo, são enumerados os métodos de controle, a formulação matemática necessária à coordenação dos diferentes tipos de controle e seus principais objetivos.

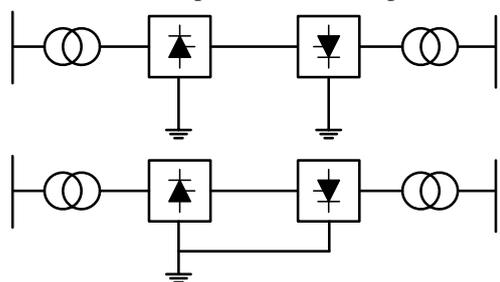
- Capítulo 7: “*Simulações Realizadas*”. Neste capítulo são apresentados o funcionamento do sistema em regime permanente e a aplicação de diferentes tipos de perturbações ao sistema, bem como os resultados obtidos através das simulações realizadas no software Simulink/Matlab dentro da ferramenta SimPowerSystems, a partir de um modelo presente no banco de dados do programa.
- Capítulo 8: “*Conclusão e Sugestões*”, em que são apresentadas, de forma sucinta, as conclusões do trabalho e as propostas de trabalhos futuros.
- “*Referências Bibliográficas*”, com a lista das fontes pesquisadas, consultadas e citadas no trabalho.

# Capítulo 2

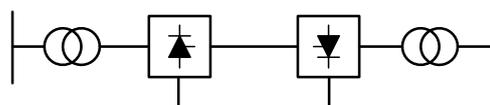
## Os Elos de Transmissão em Corrente Contínua

Com base nas funções e na localização das estações conversoras, principalmente quatro configurações CCAT são usadas em transmissões de energia. Estes quatro configurações CCAT podem ser utilizadas tanto para a topologia VSC quanto para a topologia CSC, contudo sistemas multi-terminais são diferentes entre VSC e CSC.

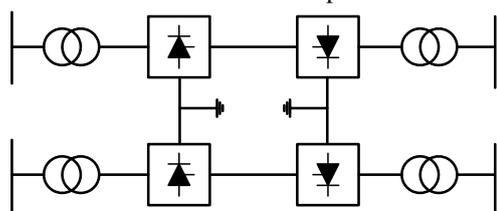
Sistema CCAT monopolar com retorno pela terra ou metálico.



Sistema CCAT back-to-back



Sistema CCAT bipolar.



Sistema CCAT multi-terminal.

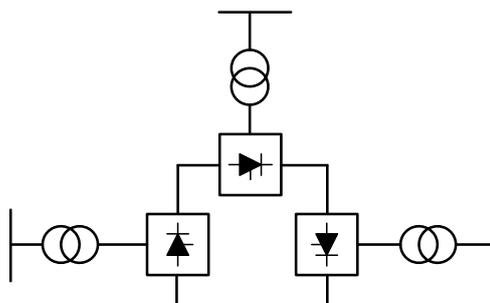


Figura 2 - Configurações para o elo CCAT.

Na configuração monopolar, os dois conversores são separados por um único condutor. Dependendo da aplicação, o retorno pode ser realizado pela terra ou por um condutor metálico. Na configuração bipolar, são utilizados dois condutores, um positivo e o outro negativo. A conexão entre os conversores é aterrada em uma ou em ambas extremidades. O sistema bipolar consiste basicamente de dois sistemas monopolares.

Na configuração back-to-back, as duas estações conversoras são colocadas no mesmo local e não há transmissão de energia a grandes distâncias. Esta configuração é utilizada, por exemplo, para interligar dois sistemas CA com frequências diferentes. Um sistema multi-terminal consiste de três ou mais estações conversoras, algumas

trabalhando como inversores e as demais, como retificadores. O arranjo das subestações conversoras pode ser em paralelo ou em série. Na Figura 2, só é ilustrado o arranjo série.

## 2.1 Comparação dos Sistemas de Transmissão CA x CC

A rápida controlabilidade através do controle do conversor da potência da linha CC permite uma série de vantagens não alcançadas com sistemas de transmissão em corrente alternada, incluindo interconexões assíncronas entre sistemas CA e controle de fluxo de potência.

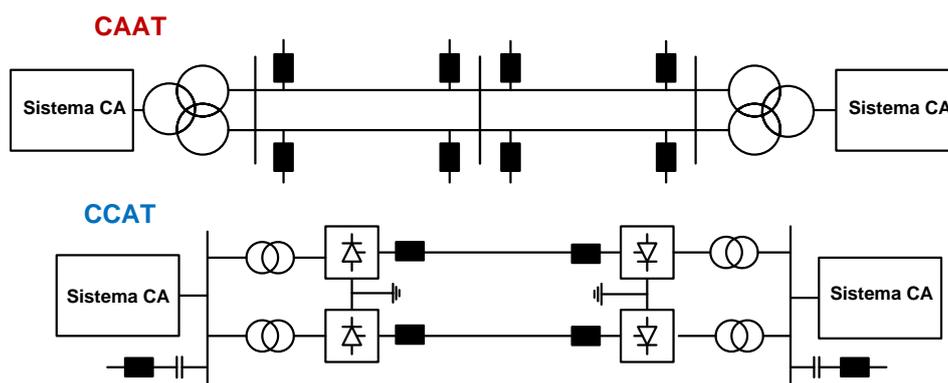


Figura 3 - Características dos sistemas de transmissão CA e CC.<sup>2</sup>

### 2.1.1 Operação de Linhas de Transmissão com Corrente Alternada

A transmissão em corrente alternada apresenta algumas características importantes, a saber[5], [4]:

- Pode ocorrer efeito Ferranti acentuado, função da frequência e do comprimento da linha, que pode exigir “compensação” paralela.
- O fluxo total de energia, na composição das três fases, se dá em modo contínuo, sendo o fluxo de potência função das defasagens angulares das barras e das impedâncias.
- A distribuição de fluxo de potência reativa ao longo do sistema, função da distância e do carregamento da linha.

<sup>2</sup> Elaborado com base em [5].

### 2.1.2 Operação de Linhas de Transmissão com Corrente Contínua

A transmissão em corrente contínua apresenta algumas vantagens importantes em relação à transmissão em corrente alternada, a saber[5], [4]:

- O nível de potência pré-falta pode ser mantido mesmo com queda permanente de um pólo se a linha CC tiver capacidade adequada de sobrecarga e os conversores do pólo falhado puderem ser colocados em paralelo com os conversores do pólo são.
- A injeção e a extração de potência na linha CC se dão com fator de potência unitário. No entanto, como será visto adiante, os processos de retificação e inversão promovem defasagens entre tensão e corrente CA, impondo compensação reativa nos barramentos das estações conversoras. Para um mesmo nível de tensão e condutores idênticos, a linha CC é capaz de transmitir a mesma potência com dois condutores que uma linha CA com 3 condutores.
- O fluxo de potência em CC será determinado e controlado em um valor desejado, independente de impedâncias e defasagens angulares, permitindo operação assíncrona e controlabilidade. A energia flui em modo contínuo nos condutores e a corrente é integralmente aproveitada para transferência de energia para a carga.
- A natureza assíncrona de um elo CC permite interligação com diferentes frequências nominais. Manter estável uma conexão CA fraca entre dois sistemas grandes e independentes é tecnicamente difícil, mas elos CCAT podem superar este inconveniente.
- Distintamente da corrente alternada, a transmissão CC não apresenta fluxo e intercâmbio de reativos. Portanto, teoricamente não há limite de distância para transmissão. Em função destas características, uma das maiores aplicações da transmissão CCAT é em cabos submarinos com distâncias superiores a 100 km.

A transmissão em corrente contínua apresenta algumas desvantagens, a saber:

- Os conversores CA/CC e CC/CA absorvem potência reativa da rede CA durante o seu processo de comutação.
- O processo natural de conversão CA/CC e CC/CA gera harmônicos na rede. Consequentemente são necessários filtros nos terminais do sistema CCAT.
- Geralmente, os conversores CA/CC apresentam baixa capacidade de sobrecarga contínua em termos de corrente, normalmente 110% da corrente nominal. Para valores maiores, definidos durante o projeto do elo CC, há um aumento no custo das conversoras.
- Falta de Disjuntores CC em Alta Tensão para operação de elos CC com Multiterminais.
- O sistema CCAT pode vedrificar o solo, já que o solo sofre indução devido a linha de transmissão.
- O aterramento necessita de um solo com baixa resistividade, o que leva muitas a se ter o eletrodo de aterramento a grandes distâncias do terminal conversor.
- Redução do desempenho do sistema CCAT para uma redução da relação de curto-circuito.

### **2.1.3 Conceito de “break even distance”**

O investimento financeiro de uma linha de transmissão inclui torres, cabos, isolamento e equipamentos nos terminais. A princípio, a transmissão em corrente contínua seria mais barata por apresentar um número menor de condutores e uma torre menos robusta, quando comparada à transmissão em corrente alternada.

Para um mesmo nível de tensão e condutores idênticos, a linha CC é capaz de transmitir a mesma potência com dois condutores (transmissão bipolar) que uma linha CA com 3 condutores [6]. Contudo, existem custos elevados envolvendo as pontes conversoras nos terminais retificador e inversor (transformadores, aterramento, filtros e o sistema de controle).

O conversor é o principal equipamento de uma estação e tem peso importante nos custos de um sistema de transmissão CCAT. As estações conversoras são, portanto, os elementos mais importantes na comparação econômica entre os sistemas de transmissão CA e CC. A Figura 4 apresenta uma comparação entre as duas formas de transmissão, indicando, no ponto inicial, os custos referentes aos terminais dos dois sistemas de transmissão em discussão. O investimento inicial no sistema CCAT é consideravelmente maior que o investimento inicial no sistema CAAT. Contudo, com o aumento da distância da transmissão o investimento necessário em CAAT se torna mais elevado.

Para um sistema CA, o custo da linha predomina e o custo das estações é pequeno. Por outro lado, para o sistema CC, o custo da linha é pequeno, enquanto o custo das estações é alto [7]. Comparada com a linha CA, a linha CC apresenta uma redução significativa na utilização de cabos e torres de transmissão, além da redução na faixa de servidão. Além disso, um aspecto do sistema de transmissão CA é a necessidade de subestações intermediárias de controle e de manobra a cada 300 ou 400 km, sendo o motivo dos incrementos verticais de custo na Figura 4.

Para distâncias maiores que a *Break Even Distance*, a transmissão em corrente contínua é mais econômica que a transmissão em corrente alternada. Para linha aéreas, a *Break Even Distance* é da ordem de 800 km [6].

Um fator importantíssimo nos sistemas de transmissão em longas distâncias, tanto para sistemas CCAT quanto CAAT, são as perdas ôhmicas. Em sistemas CCAT, as linhas CC, quando comparados aos sistemas CA atuais, apresentam perdas menores e rápido controle do fluxo potência. Quando as perdas no sistema de transmissão CA são consideradas, o custo total CA aumenta. As perdas na linha CC também aumentam o custo total CC, mas numa proporção menor [7],[6].

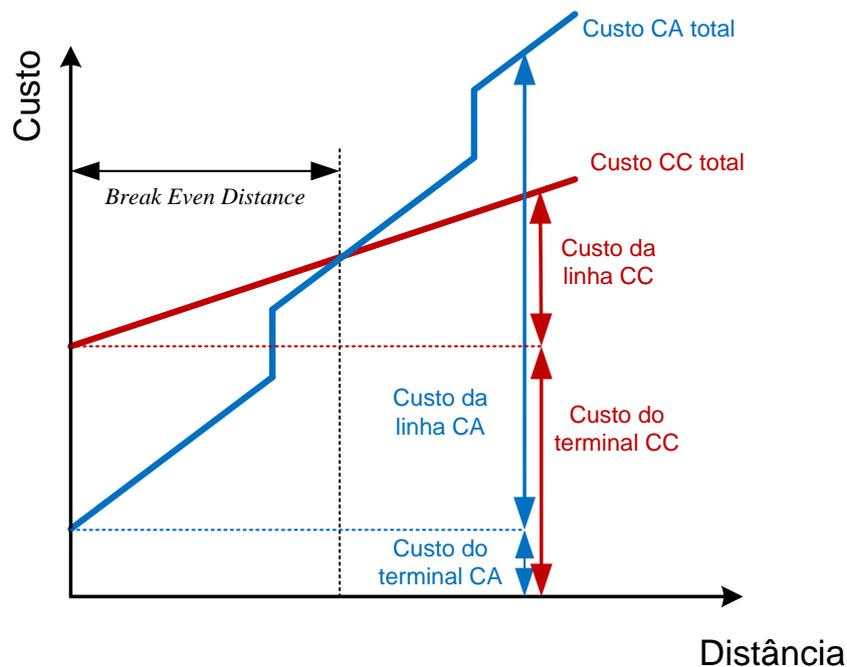


Figura 4 - Comparação clássica CA x CC.<sup>3</sup>

A *Break Even Distance* é muito menor para cabos submarinos (geralmente cerca de 50 km) do que para linhas de transmissão aéreas. A distância depende de vários fatores (tanto para linhas e cabos) e uma análise deve ser feita para cada caso. A importância do conceito de *Break Even Distance* não deve ser superestimada, uma vez que vários outros fatores, tais como a controlabilidade, perdas nos conversores e perdas nas linhas de transmissão, são importantes na seleção entre CCAT ou CAAT [8]. O desempenho de sistemas CA conectados, durante quedas de tensão, perda de capacidade de transmissão e perda de compensação reativa, pode ser reforçado pela presença de elos CCAT. O elo CCAT pode ajudar a controlar a variação de frequência, melhorar a estabilidade do sistema CA e fornecer um controle de potência de interligação (controle preciso do fluxo de energia).

<sup>3</sup> Elaborado com base em [9].

# Capítulo 3

## Representação do Elo de Corrente Contínua

Neste capítulo procura-se descrever o princípio de funcionamento do conversor CSC. Apesar das estações conversoras poderem ser configuradas de várias maneiras, pontes conversoras com configurações de seis ou doze pulsos são utilizadas em sistemas CCAT. O número de pulsos de um conversor é o número de pulsações ou ciclos de onda por ciclo de tensão alternada.

Na Figura 5, é mostrada uma ponte CSC de 6 pulsos a partir da qual pode-se entender o funcionamento desse tipo de conversor. O circuito é composto das fontes CA, das reatâncias de comutação  $X_c$ , dos tiristores e do reator de alisamento. O tiristor, também chamado de SCR (*Silicon Controlled Rectifier*) tem como característica o fato de realizar comutação natural, uma vez que o tiristor é uma chave que não controla a interrupção de corrente.

O ângulo de disparo  $\alpha$  corresponde a um atraso no tempo para o tiristor começar a conduzir depois que ele se encontra polarizado diretamente, ou seja, é o ângulo elétrico correspondente ao intervalo de tempo entre o instante em que a tensão sobre o tiristor torna-se positiva e a aplicação do pulso de disparo em seu gate, instante em que este começa a conduzir. O ângulo de disparo é limitado a  $180^\circ$ . Se  $\alpha$  excede esse valor, o tiristor, mesmo sendo ativado pelo pulso, não conduz. Isso porque no momento do disparo a tensão sobre o SCR é reversa, fazendo com que o catodo fique com potencial positivo com relação ao anodo, impossibilitando a condução de corrente [9].

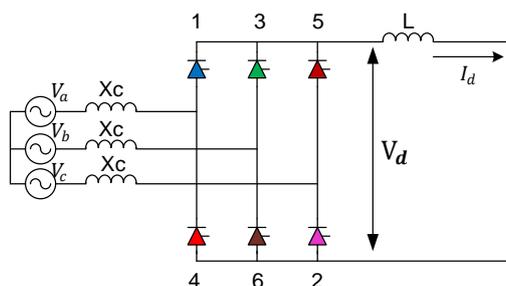


Figura 5 - Ponte de seis pulsos.<sup>4</sup>

<sup>4</sup> Elaborado com base em [2].

A Figura 6 apresenta o circuito equivalente do circuito que ilustra o processo de comutação entre o tiristor 1 e o tiristor 3. E Figura 7 apresente a relação entre os ângulos para a ponte conversora. Considerando a operação do conversor com condução inicial de um tiristor da ponte superior (por exemplo, o tiristor 1) e um da ponte inferior (por exemplo, o tiristor 2), inserindo na linha a tensão fase-fase da fonte CA trifásica. Passado um tempo, relativo ao ângulo de disparo  $\alpha$ , o tiristor 3 começa a conduzir, e o tiristor 1 começa a bloquear.

Passado mais um tempo, chamado intervalo de comutação (representado pelo ângulo de *overlap*  $\mu$ ), o tiristor assume integralmente a corrente CC, enquanto o tiristor 1 deixa de conduzir. Durante este intervalo, os dois tiristores envolvidos na comutação (tiristores 1 e 3) conduzem simultaneamente e as fontes  $V_a$  e  $V_b$  são curto-circuitadas pela reatância de comutação. Este processo é conhecido como comutação. A área "A", indicada na Figura 7, é necessária para o processo de comutação.

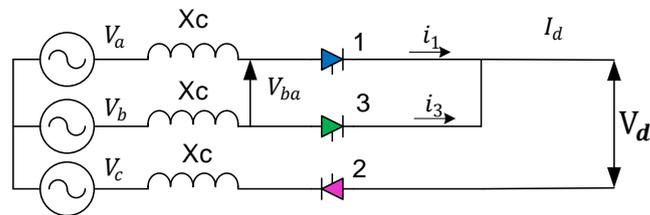


Figura 6 - Circuito equivalente durante a comutação do tiristor 1 para o 3.

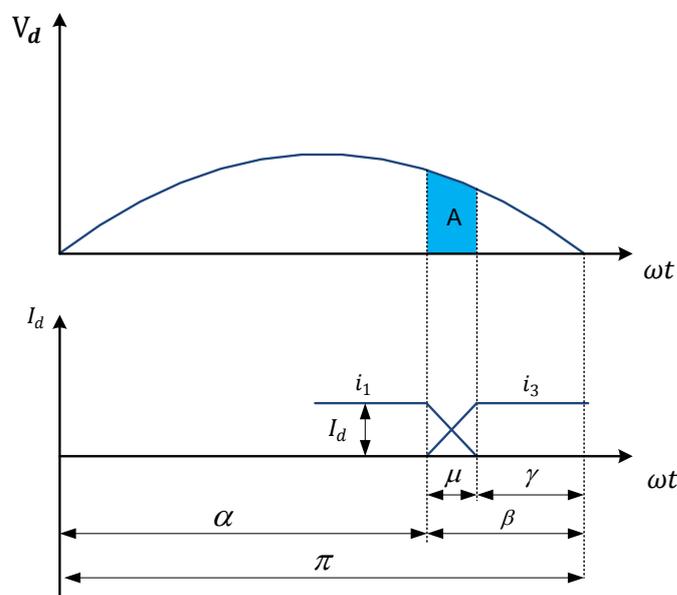


Figura 7 - Processo de comutação entre o tiristor 1 e o tiristor 3.

Durante o intervalo de comutação ( $\mu$ ), a corrente total  $I_d$  é transferida do tiristor 1 para o tiristor 3. Durante todo este intervalo:

$$I_d = i_1 + i_3 \quad (3.1)$$

E durante o intervalo  $\alpha < \omega t < \alpha + \mu$ :

$$i_3 = \frac{I_d(\cos \alpha - \cos \omega t)}{\cos \alpha - \cos(\alpha + \mu)} \quad (3.2)$$

Em circunstâncias normais, a tensão através do tiristor a ser desligado tem de permanecer negativa durante um certo período após a extinção da sua corrente (denotado pelo ângulo de extinção  $\gamma$ ) de modo que o tiristor consiga ficar bloqueado quando o SCR ficar positivamente polarizado. No caso da tensão sobre o tiristor tornar-se positiva prematuramente, o tiristor pode ligar mesmo sem o disparo de  $\alpha$ , resultando em um fracasso do processo de comutação. O ângulo de extinção  $\gamma$  é o ângulo elétrico entre os tempos correspondente ao final da comutação e a próxima interseção das tensões CA que acabaram de comutar, e depende do ângulo de avanço  $\beta$  e do ângulo de *overlap*  $\mu$ , sendo determinado por:

$$\gamma = \beta - \mu \quad (3.3)$$

O ângulo de avanço  $\beta$  é relacionado com o ângulo de disparo em graus por:

$$\beta = 180^\circ - \alpha \quad (3.4)$$

Na Figura 8, é mostrada a sequência para comutação natural dos tiristores, para  $\alpha = 0$ , desconsiderando-se a queda de tensão nas reatâncias de comutação, ou seja, para  $\gamma = 0$ , destacando-se a tensão CC média  $V_{do}$ .

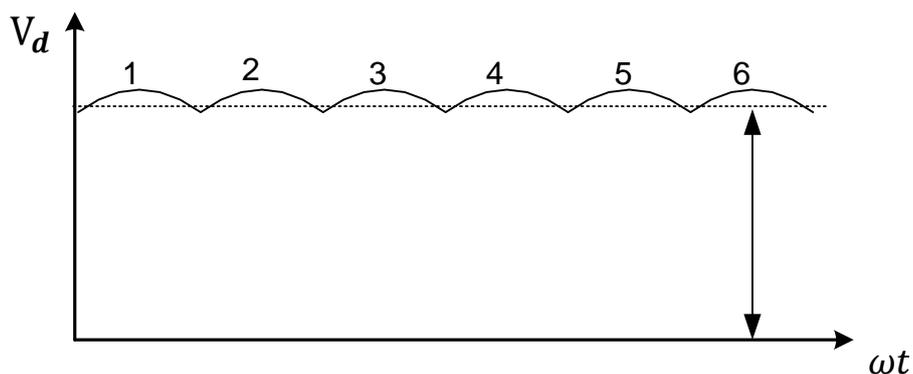


Figura 8 - Comutação natural dos tiristores da ponte de 6 pulsos.<sup>5</sup>

Atrasando a injeção de sinal na porta do tiristor por um tempo  $\alpha$ , muda-se a forma de onda de tensão aplicada à linha CC e, assim, pode-se controlar o valor da tensão CC. O efeito deste atraso no início da condução é o de reduzir o valor da tensão média pelo fator  $\cos \alpha$ , conforme ilustrado na Figura 9. Nesta figura, a reatância de comutação é considerada desprezível e, portanto, a onda real é um pouco diferente da onda da Figura 9 no intervalo da comutação. Como  $\alpha$  pode variar de  $0^\circ$  até  $180^\circ$ ,  $\cos \alpha$  pode variar de 1 até -1. Portanto, o valor médio da tensão pode assumir um valor positivo ou negativo, dependendo do ângulo de disparo alfa. O valor negativo representa o efeito de inversão, oposto ao de retificação [2],[9].

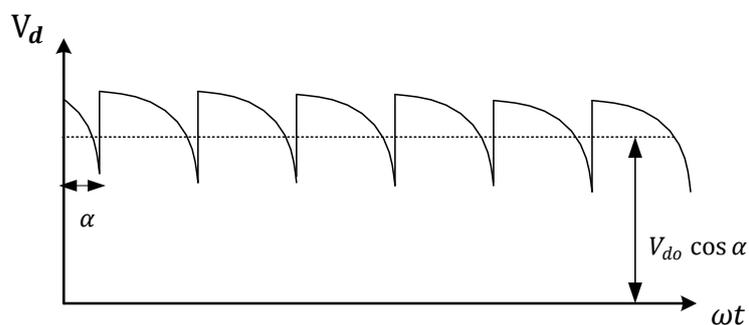


Figura 9 - Tensão CC para um dado ângulo de disparo.<sup>6</sup>

<sup>5</sup> Elaborado com base em [2].

<sup>6</sup> Elaborado com base em [2].

### 3.1 Relação entre as correntes CA e CC

A corrente nas fases do transformador do conversor tem uma forma retangular, uma vez que a corrente  $I_d$  (na linha CC) é praticamente constante, sendo positiva ou negativa dependendo do tiristor em condução na fase. Quando  $\alpha$  é igual a  $0^\circ$ , a componente fundamental da corrente está em fase com a tensão na fase a, a potência ativa é positiva e a potência reativa é igual a zero. Com o aumento de  $\alpha$ , a corrente de linha fica atrasada em relação à tensão, resultando no consumo de potência reativa.

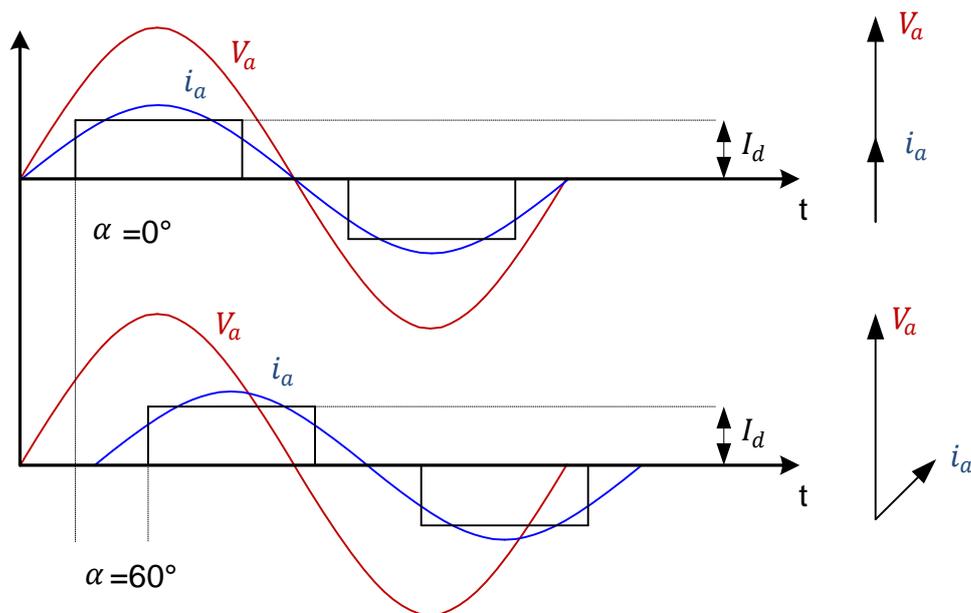


Figura 10 - Relação entre as correntes CC e CA com e sem o ângulo de disparo.

Conforme  $\alpha$  aumenta de  $0^\circ$  até  $90^\circ$ , a potência ativa decresce e a potência reativa aumenta. Para  $\alpha$  igual a  $90^\circ$  a potência ativa é zero e a potência reativa é máxima. Conforme  $\alpha$  varia de  $90^\circ$  até  $180^\circ$  a potência ativa aumenta em módulo e passa a ter um valor negativo, enquanto a potência reativa se mantém positiva, porém começando a diminuir em módulo. Quando  $\alpha$  é igual a  $180^\circ$ , a potência ativa é máxima (em módulo) negativa e a potência reativa é zero [9].

## 3.2 Equacionamento Matemático

O estabelecimento das relações matemáticas correspondentes à ligação em corrente contínua em regime permanente é bastante longo. Como este material encontra-se bem documentado na literatura técnica [4], [1] e [10], optou-se pela enumeração destas relações, sem deixar de comentar, no entanto, as hipóteses e limitações impostas no seu estabelecimento.

As equações que regem o comportamento da transmissão em corrente contínua em regime permanente são baseadas nas seguintes suposições [4]:

- Fonte alternada balanceada e senoidal em série com a rede representada por indutâncias também balanceadas;
- Reator de alisamento (“smoothing reactor”) com indutância suficiente para que a corrente na linha seja considerada constante e sem ondulação (“ripple”);
- As válvulas apresentam resistência nula quando diretamente polarizadas (queda de tensão interna nula) e infinita quando inversamente polarizadas;
- As válvulas são disparadas em intervalos iguais de  $60^\circ$  (ponte de 6 pulsos) ou  $30^\circ$  (ponte de 12 pulsos).

A primeira suposição é satisfeita com razoável precisão quando se considera a barra primária do transformador conversor como sendo a fonte de tensão. Os equipamentos de suporte de tensão e filtros proporcionam formas de onda senoidais. Os desequilíbrios da rede CA não são considerados em estudos de fluxo de potência e de estabilidade [4].

A ondulação na forma de onda da corrente contínua é desprezível, porém a indutância do reator de alisamento deve ser levada em consideração na modelagem do elo por limitar a taxa de variação da corrente contínua durante os transitórios ocasionados por faltas internas ou externas ao elo. A terceira suposição é satisfeita quando se leva em conta que a queda de tensão interna é da ordem de 0,12% por ponte de 6 pulsos. A corrente inversa é da ordem de miliampères e existe apenas durante o transitório de extinção da válvula. A quarta hipótese é satisfeita apenas se a tensão CA

constituir um regime simétrico e equilibrado de tensões trifásicas e a defasagem entre os disparos for exatamente igual a 60 graus [4].

A análise do circuito elétrico formado durante a comutação e da forma de onda da tensão no elo, também durante a comutação, permite a dedução das equações (3.1) a (3.8), desenvolvidas em [4], [1] e [10]:

a) Para o retificador

$$V_{dr} = V_{dor} \times \cos \alpha - \frac{3}{\pi} \times X_{cr} \times I_d \quad (3.5)$$

$$V_{dr} = \frac{V_{dor}}{2} \times (\cos \alpha - \cos \delta) \quad (3.6)$$

$$\delta = \alpha + \mu_r \quad (3.7)$$

b) Para o inversor:

$$V_{di} = V_{doi} \times \cos \gamma - \frac{3}{\pi} \times X_{ci} \times I_d \quad (3.8)$$

$$V_{di} = \frac{V_{doi}}{2} \times (\cos \gamma - \cos \beta) \quad (3.9)$$

$$\beta = \gamma + \mu_i \quad (3.10)$$

Onde:

$V_{dr}$ : tensão contínua no retificador [kV]

$V_{dor}$ : tensão contínua ideal em vazio, no retificador [kV]

$\alpha$ : ângulo de ignição das válvulas do retificador [graus]

$I_d$ : corrente na linha de corrente contínua [kVA]

$\delta$ : ângulo de extinção das válvulas do retificador [graus]

$\mu_r$ : ângulo de comutação das válvulas do retificador [graus]

$X_{cr}$ : a reatância de comutação vista pelo retificador [ohm]

$V_{di}$ : tensão contínua no inversor [kV]

$V_{doi}$ : tensão contínua ideal em vazio, no inversor [kV]

$\alpha_i$ : ângulo de ignição das válvulas do inversor [graus]

$\gamma$ : ângulo de avanço de extinção das válvulas do inversor [graus]

$\mu_i$ : ângulo de comutação das válvulas do inversor [graus]

$\beta$ : ângulo de avanço de disparo das válvulas do inversor [graus]

$X_{ci}$ : a reatância de comutação vista pelo inversor [ohm]

Os índices  $r$ ,  $i$  e  $d$  representam, respectivamente, retificador, inversor e elo CC.

Ainda de [4], [1] e [10]:

$$\mu_r = \cos^{-1} \left( \cos \alpha - \frac{2 X_c I_d}{V_{dor}} \right) - \alpha \quad (3.7)$$

$$\cos \varphi = \frac{\cos \alpha - \cos(\alpha + \mu_r)}{2} \quad (3.8)$$

$\alpha$ : ângulo de ignição das válvulas do retificador [graus]

$\cos \varphi$ : fator de potência

# Capítulo 4

## O Problema da Falha de Comutação

Quando há uma súbita queda de tensão no barramento CA do inversor, a sequência normal de comutação dos tiristores é perturbada. A potência de saída do elo CCAT é alterada e se parece com aquela mostrada na Figura 11.

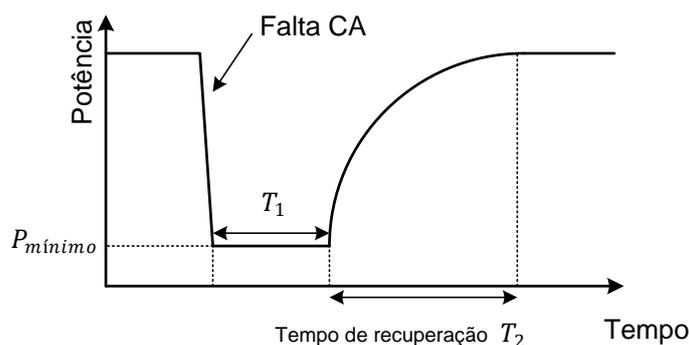


Figura 11 – Potência CC quando de uma falha CA no inversor.<sup>7</sup>

Como pode ser observado, há uma redução de potência durante  $T_1$  e o sistema se recupera durante  $T_2$ . Esses valores dependem do ajuste do sistema de controle. Valores típicos são:  $T_1=100\text{ms}$  e  $T_2=200\text{ms}$ . Esse desempenho é influenciado pelo suporte de potência relativa transitória nas conversoras identificadas pela SCR - SHORT CIRCUIT RATIO (relação de curto-circuito: igual à relação entre a potência de curto-circuito e a potência transmitida). Quando o SCR é maior que 3, o desempenho do sistema tenderá a ser bom. Quando o SCR é menor (sistemas mais fracos), os controles devem ser ajustados para obter um desempenho aceitável, sendo que para valores inferiores a 2 este ajuste será muito difícil (ou até mesmo, impossível). Em algumas destas últimas situações, mesmo uma pequena queda de tensão no barramento CA do inversor pode causar falha de comutação [2].

As falhas de comutação ocorrem em geral como resultado de subtensões no lado CA, naturais ou devido a curtos-circuitos no lado CA.

<sup>7</sup> Elaborado com base em [2].

A falha de comutação naturalmente implica na interrupção momentânea da transmissão pelo conversor. A tensão CC durante a falha de comutação apresenta  $\frac{dV}{dt}$  elevados, caracterizando-se como um curto-circuito no lado CC.

Tem se verificado, em alguns países, casos de elos de corrente contínua chegando em uma mesma área elétrica. Resultando numa interação entre os mesmos durante distúrbios. Nestes cenários, a falha de comutação em um sistema CCAT pode resultar em problemas no desempenho em outro elo CCAT.

# Capítulo 5

---

## A Função dos Filtros de Harmônicos

Harmônico é a componente de uma onda periódica cuja frequência é um múltiplo inteiro da frequência fundamental.

- ❖ para sistemas de 50Hz: 11º harmônico é 550Hz e o 13º harmônico é 650 Hz
- ❖ para sistemas de 60Hz: 11º harmônico é 660Hz e o 13º harmônico é 780 Hz

A geração de harmônicos constitui um fenômeno contínuo, diferente de fenômenos de curta duração, que duram apenas alguns ciclos. Transitórios, perturbações elétricas, picos de sobretensão e subtensão não são harmônicos.

Os conversores geram harmônicos de tensão e de corrente que, por sua vez, serão introduzidos nos sistemas CC e CA, respectivamente. São gerados tanto harmônicos característicos como não característicos.

Os harmônicos característicos são os gerados sob condições normais de operação. Estes harmônicos estão relacionados com o número de pulsos do conversor. O número de pulsos de um conversor é o número de pulsações (ciclos de *ripple*) da tensão CC por ciclo da tensão CA [11]. Demonstrado por KIMBARK [10], para uma ponte de N pulsos, a ordem dos harmônicos é dada por:

- ❖ **Tensão CC:** harmônicos de ordem  $Nk$ , para  $k=1,2,3..$
- ❖ **Corrente CA:** harmônicos de ordem  $Nk \pm 1$ , para  $k=1,2,3..$

Onde,  $k$  é um número inteiro.

Ainda de KIMBARK [10], quanto maior o número de pulsos, mais elevadas as frequências dos harmônicos de menor ordem. E quanto maior o número de pulsos, menor a amplitude pico a pico da ondulação. Além disso, quanto maior a frequência e

menor a amplitude de um harmônico, mais fácil de amortecer-lo substancialmente através da filtragem. Portanto, quanto maior o número de pulsos de um conversor, melhor do ponto de vista de harmônicos. Contudo, isto implica também no aumento da complexidade das conexões do transformador.

Os conversores também são responsáveis pela presença de harmônicos não característicos. Os harmônicos não característicos são os demais, sua presença se deve a diversas causas, como saturação dos núcleos dos transformadores, desequilíbrios das tensões CA, assimetria das impedâncias das fases do transformador do conversor, assimetria de disparo, efeito de sistema de transmissão sem transposição etc. [11]

Os harmônicos geram uma série de problemas: Aquecimento e Perdas (Máquinas Rotativas, Transformadores e Capacitores); Distorção da Tensão nos Barramentos dos Conversores; Interferências (Circuitos de Telefonia e Circuitos de Sinalização Ferroviária); Efeitos no Sistema de Controle (Amplificação ou Instabilidade Harmônica) [11], [12]. A eliminação dos harmônicos de maior ordem por meio de filtros é necessária para evitar distorção de maiores amplitudes na tensão, perdas extras e interferência em serviços externos.

## **5.1 Filtros no lado CA**

No lado CA os filtros são do tipo shunt, projetados para fornecer parte da potência reativa absorvida pelos conversores e para tornar a tensão de comutação tão próxima quanto possível de uma onda senoidal ao reduzir as correntes harmônicas nos sistemas CA drenando estas correntes para o terra.

A maioria das aplicações em CCAT usa projetos de filtros do tipo sintonizados para supressão dos harmônicos inferiores ( $5^{\circ}, 7^{\circ}, 11^{\circ}, 13^{\circ}$ ) e de amortecimento para as superiores ( $23^{\circ}, 25^{\circ}, \dots$  até  $49^{\circ}$ ) [9]. Na Figura 12 e na Figura 13 são indicados os gráficos de impedância em função da frequência para diversos tipos de filtros.

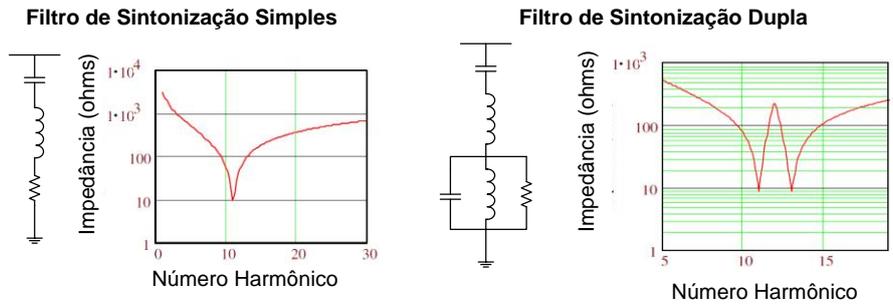


Figura 12 - Filtros sintonizados.<sup>8</sup>

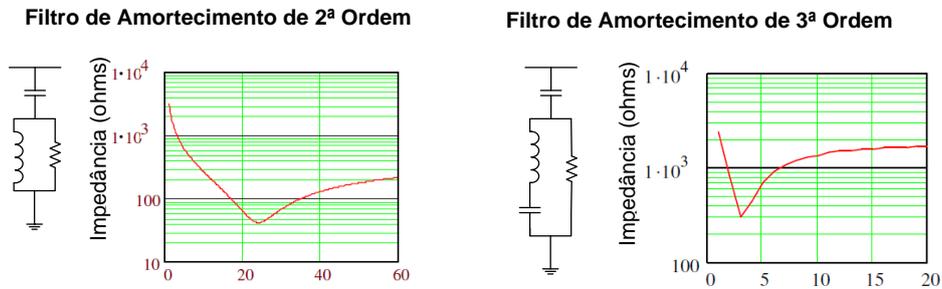


Figura 13 - Filtros amortecidos.<sup>9</sup>

Os filtros de amortecimento são também denominados filtros passa-alta, pela característica indicada na Figura 13, o de 2ª ordem é o filtro passa-alta e o de 3ª ordem é o filtro passa-alta tipo C.

Para uma ponte de 12 pulsos, são utilizados dois transformadores, gerando um defasamento entre as tensões do secundário, suavizando a forma de onda da corrente que alimenta o transformador pelo primário. A operação das pontes conversoras gera harmônicos para a rede.

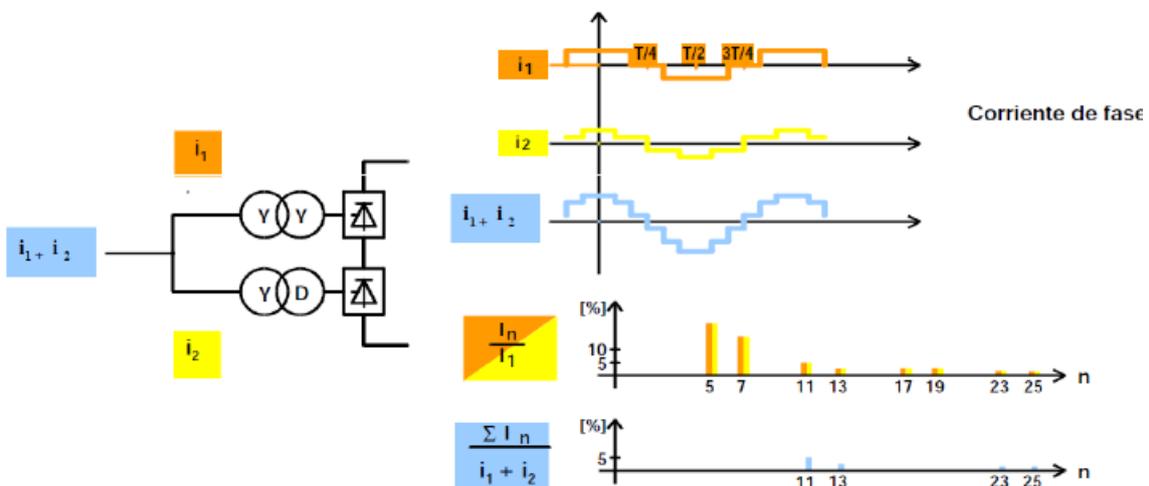


Figura 14 - Espectro harmônico característico para a ponte de 12 pulsos.<sup>10</sup>

<sup>8</sup> Elaborado com base em [12].

<sup>9</sup> Elaborado com base em [12].

Com a utilização de válvulas a 12 pulsos, conforme visto na Figura 14, o primeiro harmônico CA característico é o 11º harmônico. A filtragem para conversores de 12 pulsos é normalmente dada por dois filtros sintonizados (para os harmônicos 11º e 13º) e um passa-alta (para os harmônicos de ordem elevada) [11], conforme ilustrado Figura 15.

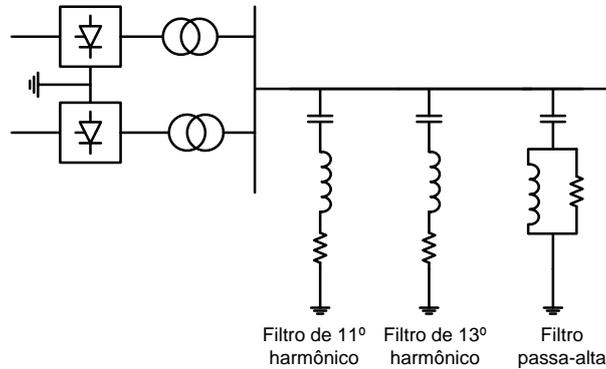


Figura 15 - Configuração dos filtros CA para uma pontes de 12 pulsos.<sup>11</sup>

## 5.2 Filtros no lado CC

Os harmônicos de tensão no lado CC geram harmônicos de corrente que dependem dos ângulos de disparo e de extinção, do *overlap* e da impedância do circuito CC. No lado CC, reatores série colocados na saída da subestação são funcionalmente elementos amortecedores de harmônicos de corrente. Como não transmitem potência na frequência fundamental, têm poucas perdas. [9]

Em alguns sistemas, no entanto, há necessidade adicional de filtros shunt, também no lado CC, para que os harmônicos de tensão gerados estejam dentro de valores admissíveis. Os filtros no lado CC não precisam prover potência reativa e têm de suportar, no capacitor principal, a tensão pólo/neutro.

<sup>10</sup> Fonte [5]

<sup>11</sup> Elaborado com base em [11].

# Capítulo 6

---

## As Funções do Sistema de Controle dos Sistemas CCAT

O controle do fluxo de potência numa linha de transmissão de corrente contínua apresenta problemas diferentes dos encontrados em redes CA. O controle dos conversores é essencial para a operação normal do elo de corrente contínua e responsável também pela eliminação de faltas nos próprios conversores e na linha de transmissão. A transmissão CC possui certas características que possibilitam uma maior flexibilidade e estabilidade quando comparada ao sistema CA. Uma das vantagens operativas é a facilidade e rapidez que oferece para controle da potência transmitida [1],[9].

Conforme KUNDUR [1], um sistema de transmissão CCAT é altamente controlável. Sua eficácia depende da utilização adequada desta controlabilidade, para assegurar o desempenho desejado do sistema de energia. Com o objetivo de proporcionar uma operação eficiente, estável e maximizando a flexibilidade de controle de potência sem comprometer a segurança dos equipamentos, vários níveis de controle são usados de uma maneira hierárquica.

Para o controle dos conversores modela-se um circuito equivalente que, em última análise, representa a rede CC e o efeito dos transformadores e destes conversores. Para a aproximação por um circuito equivalente, algumas suposições são necessárias, a saber [6]:

- ❖ Todas as pontes conectadas em série e transformadores em paralelo nas estações conversoras são idênticas;
- ❖ Os ângulos de disparo são idênticos;
- ❖ O número de pontes em série nos terminais retificador e inversor é igual.

Verifica-se em [1] e [13] a representação utilizada para um elo de transmissão CC básico. A Figura 16 apresenta o diagrama esquemático de um elo monopolar ou de

um dos pólos de um elo bipolar. O circuito equivalente correspondente e o perfil de tensão podem ser vistos, respectivamente, na Figura 17 e na Figura 18.

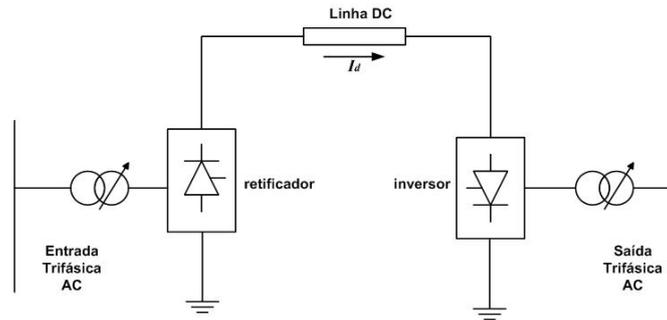


Figura 16 - Diagrama esquemático.<sup>12</sup>

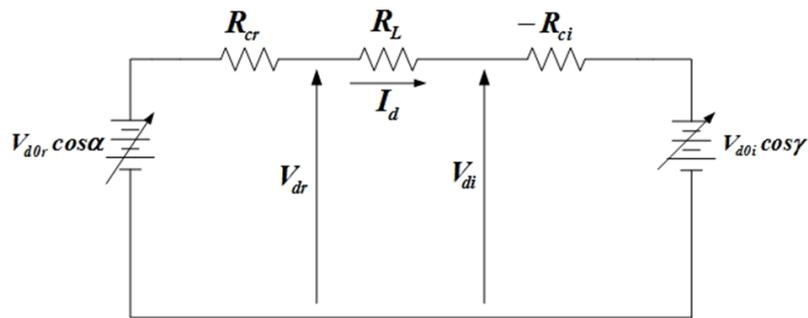


Figura 17 - Circuito Equivalente.<sup>13</sup>

Onde:

$R_{cr}$ : a resistência de comutação do retificador [ohm]

$R_L$ : resistência da linha CC [ohm]

$R_{ci}$ : resistência de comutação do inversor [ohm]

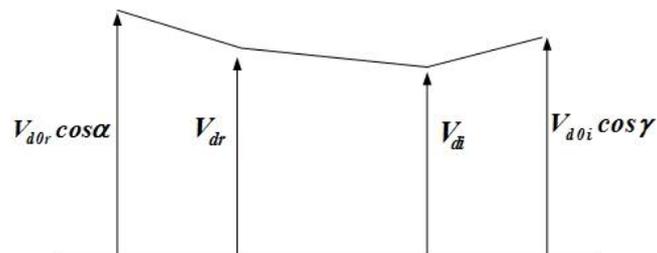


Figura 18 - Perfil de Tensão.<sup>14</sup>

<sup>12</sup> Elaborado com base em [1].

<sup>13</sup> Elaborado com base em [1].

<sup>14</sup> Elaborado com base em [1].

A corrente de regime permanente  $I_d$ , apresentada na equação (6.1), fluindo, naturalmente da estação retificadora para a inversora e é definida por [1]:

$$I_d = \frac{V_{dor} \cos \alpha - V_{doi} \cos \gamma}{R_{cr} + R - R_{ci}} \quad (6.1)$$

Como na prática a resistência da linha é constante, a corrente  $I_d$  é proporcional à diferença entre as duas tensões internas e, portanto, controlável por estas tensões. Ambas as tensões internas do elo CC, no lado do retificador e no lado do inversor, podem ser controladas de duas formas: pelo ângulo de disparo dos tiristores e pela tensão alternada, cujo valor é determinado pela posição do tape no secundário do transformador conectado ao conversor.

Devido à característica unidirecional das válvulas, a reversão de potência é obtida pela reversão da polaridade das tensões internas do elo CC, invertendo o sentido do fluxo de potência ativa na linha de transmissão CC.

## 6.1 Métodos de controle

Corrente CC é definida pela equação (6.1). Referindo as tensões CC da equação para o lado CA:

$$I_d = \frac{\frac{V_{acr}}{T_r} \cos \alpha - \frac{V_{aci}}{T_i} \cos \gamma}{R_{cr} + R - R_{ci}} \quad (6.2)$$

Onde:

$V_{ac}$ : tensão de CA (fase-fase) no primário do transformador [kV]

$T_r$  e  $T_i$ : RTC do transformador

Os índices  $r$ ,  $i$  e  $d$  representam, respectivamente, retificador, inversor e elo CC

É nítido, observando as equações (6.1) e (6.2), que as variáveis de controle são:  $V_{dor}$ ,  $V_{doi}$ ,  $\alpha$  e  $\gamma$ . Isso significa que a potência CC pode ser regulada pelo controle do ângulo de disparo  $\alpha$  do retificador ou pelo ângulo de extinção  $\gamma$  do inversor ou pelo controle da tensão CA pela alteração do tape do transformador.

Os controles atuam de forma coordenada. O controle do ângulo de disparo ( $\alpha$  para o retificador e  $\gamma$  para o inversor) é utilizado inicialmente para uma ação rápida (1 a 10ms), seguido da mudança do tape do transformador (2 segundos por tape), de forma a restabelecer os ângulos do conversor ( $\alpha$  para o retificador e  $\gamma$  para o inversor) para a sua faixa normal[1].

O controle do ângulo de disparo do conversor que determina os instantes dos disparos de cada uma das válvulas determina o valor da tensão nominal do elo. A entrada do sistema de disparo pode ser a saída do controle de corrente, do controle de tensão, do controle de alfa mínimo, do controle de gama mínimo ou do controle da margem de comutação mínima [14]. A saída que prevalece determina o modo de operação.

O sistema de controle contribui decisivamente para a estabilidade e desempenho durante perturbações. Ainda de [14], a variação dos instantes exatos em que as válvulas disparam implica em vantagens relacionadas à proteção rápida para defeitos nos sistemas CA e CC, a saber:

- Minimização das sobretensões nas válvulas;
- Redução das correntes de curto-circuito através das válvulas e das linhas de transmissão;
- Redução do consumo de potência reativa;
- Mitigação da ocorrência de falhas repetidas de comutação.

## 6.2 Objetivos de um sistema de controle aplicado a elos de transmissão em CCAT

Em [10] e [15], são apresentadas considerações que influenciam na seleção das características do controle:

- Manter o efetivo controle da potência transmitida;
- Limitar a máxima corrente CC, para fins de proteção das válvulas;
- Manter o fator de potência o mais alto possível;
- Minimizar o risco de ocorrência de falhas de comutação;
- Prevenir grandes flutuações na corrente CC devido a variações na tensão da rede CA;
- Manter um nível de corrente CC (ou potência) requerida ;
- Assegurar tensão direta suficiente nos terminais da válvula para garantir seu disparo.

KUNDUR, em [1], apresenta diversas razões para manter o fator de potência elevado, tais como: minimização dos requisitos de suprimento de potência reativa às pontes conversoras; minimização das quedas de tensão nos terminais CA devido ao aumento deste carregamento; redução do nível de estresse nas válvulas; minimização das perdas . Operar com fator de potência elevado significa operar com os menores ângulos de disparo  $\alpha$  (no retificador), conforme a equação (6.3), e de extinção  $\gamma$  (no inversor) possíveis, com a restrição de que não aumente o risco de falhas de comutação, essencialmente no terminal inversor.

$$\cos \phi = 0,5[\cos \alpha + \cos(\alpha + \mu_r)] = 0,5[\cos \gamma + \cos(\gamma + \mu_r)] \quad (6.3)$$

O retificador, no entanto, apresenta uma limitação de alfa num valor mínimo em torno de  $5^\circ$ , de modo a assegurar uma tensão adequada sobre a válvula antes do disparo. A tensão positiva sobre cada tiristor antes do disparo é utilizada para carregar o circuito

de alimentação, que fornece o pulso de energia para o disparo do tiristor. Portanto, não é possível que ocorra o disparo antes de  $\alpha$  aproximadamente igual a  $5^\circ$ . Conseqüentemente, o retificador opera normalmente com  $\alpha$  na faixa de  $15^\circ$  a  $20^\circ$ , de modo a permitir o aumento da tensão do retificador numa eventual necessidade de se controlar o fluxo de potência [1].

Para limitar rapidamente as flutuações de corrente, é necessário que, em regime permanente, o ângulo de ignição da retificadora permaneça acima do mínimo. Uma solução de compromisso é atingida mantendo-se o ângulo de disparo entre limites definidos através do controle dos taps do transformador da estação retificadora.

O objetivo do controle é assegurar uma operação estável em toda a faixa de operação. Para o funcionamento adequado do inversor é sempre desejado minimizar o risco de ocorrência de falhas de comutação. Isto implica numa operação segura no inversor, com a menor possibilidade de falha de comutação, mesmo com tensões CA distorcidas, por exemplo, devido a curtos assimétricos.

No caso de um inversor, é necessário manter um determinado ângulo de extinção mínimo para evitar falhas de comutação. É importante assegurar que a comutação seja completada com uma margem suficiente, para permitir a deionização antes de  $(\beta - \mu_{min})$ , com o *overlap*  $\mu$  dependente de  $I_d$  e da tensão de comutação. Devido à possibilidade de mudanças em corrente contínua e tensão alternada, mesmo depois da comutação já ter começado, a margem de comutação suficiente acima do valor mínimo de  $\gamma_{min}$  deve ser mantida. Tipicamente, o valor de  $\gamma$  com margem aceitável é de  $15^\circ$  para sistemas de 50Hz e de  $18^\circ$  para sistema de 60Hz [1].

O controle rápido dos conversores de forma a prevenir grandes flutuações na corrente contínua é um requisito importante para operação satisfatória de um *elo* CCAT. Como as resistências da linha e de comutação do conversor são pequenas, uma pequena alteração nas tensões internas resulta numa grande variação de  $I_d$ . Logo, se  $\alpha$  e  $\gamma$  forem mantidos constantes, a corrente  $I_d$  pode variar largamente com pequenas variações da tensão CA em qualquer um dos terminais. Este tipo de variação é normalmente inaceitável para uma performance satisfatória do sistema de potência. Além disso, a corrente pode atingir valores suficientemente altos a ponto de danificar as válvulas e outros equipamentos. Portanto, é essencial para uma operação apropriada do sistema

utilizar o controle rápido dos conversores de modo a prevenir flutuações da corrente  $I_d$ . Sem este tipo de controle, o sistema CCAT seria inviável [1].

O controle de  $\alpha$  em valores pequenos também possibilita reduzir a quantidade de harmônicos CC característicos, gerados pelos conversores (reduzindo a interferência na telecomunicação).

### 6.3 Característica estática $V_d \times I_d$

O Diagrama  $V_d \times I_d$  é uma fotografia da operação do elo CCAT num dado instante e referido para um ponto do sistema (retificador, meio da linha ou inversor). Em regime permanente, o elo CC deve ainda satisfazer a equação (6.1).

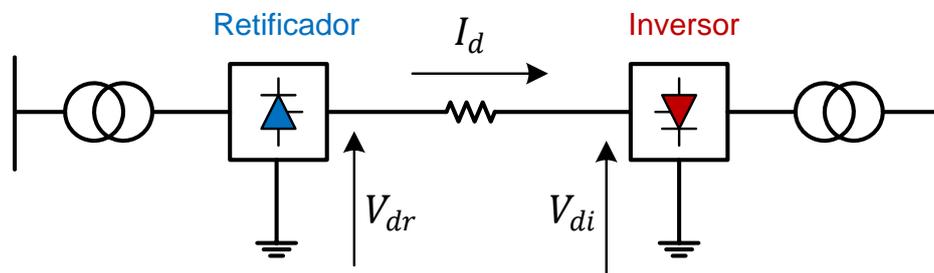


Figura 19 - Elo CCAT.

A característica unidirecional de condução das válvulas garante que a corrente e, portanto, a diferença de potencial na linha, seja sempre positiva, vide equação (6.1). Para o terminal retificador a tensão é definida pela equação (3.1).

Considerando  $V_{dor}$  constante, o comportamento da característica  $V_d \times I_d$  frente a variações de  $\alpha$  é caracterizado por retas paralelas entre si, conforme ilustrado na Figura 20, onde  $\alpha_3 > \alpha_2 > \alpha_1 > \alpha_0$ . Considerando  $\alpha$  constante e  $V_{dor}$  variando, o comportamento é semelhante. O coeficiente linear da reta está associado ao primeiro termo da equação (6.6) e, portanto, reduzindo com o aumento de  $\alpha$  ou com a redução de  $U_{ac}$ . Enquanto o coeficiente angular da reta está associado ao segundo termo (resistência de comutação) da equação (6.6).

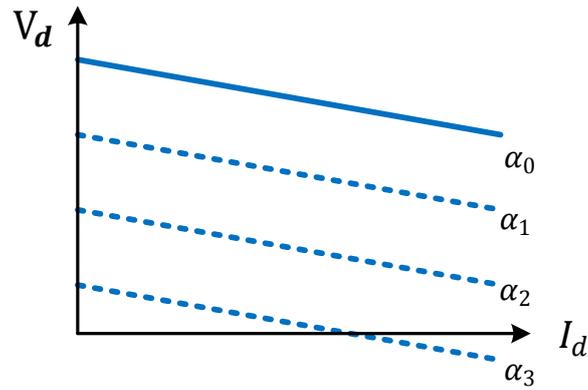


Figura 20 - Comportamento da característica frente a variações de  $\alpha$ .

As tensões internas nos dois conversores são sensíveis a curtos-circuitos ou outros tipos de distúrbios na rede CA, assim como a falhas nos conversores. O sistema de controle do elo CC é responsável por manter a operação normal na linha de transmissão CC, respeitando o alcance do controle.

A operação do sistema de transmissão CC pode ser realizada de duas formas:

**Controle de Tensão:** A tensão é mantida constante, enquanto a corrente varia com a variação da potência transmitida.

**Controle de Corrente:** A corrente é mantida constante, enquanto a tensão varia com a variação da potência transmitida.

### 6.3.1.1 Controle de $V_d$ frente a variações de $I_d$

Na Figura 20, consideram-se as tensões CA como constantes e o inversor representado como uma fonte de corrente, impondo a corrente do circuito. Para variações na corrente consumida pelo inversor, conforme ilustrado na Figura 22, o controle do ângulo de disparo  $\alpha$  permite manter a tensão num valor constante. O ponto de operação do conversor será definido pela interseção da equação (3.1), para um dado valor de  $\alpha$ , com o valor  $I_d$  exigido pela fonte de corrente.

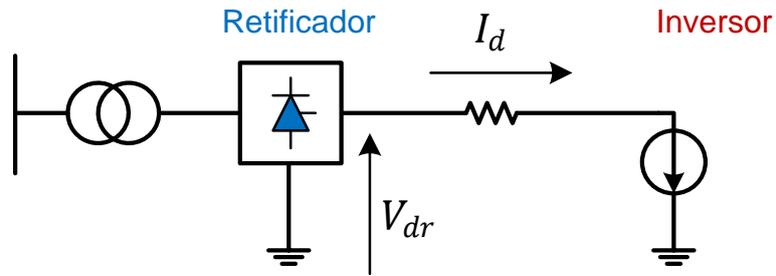


Figura 21 - Inversor representado como uma fonte de corrente.

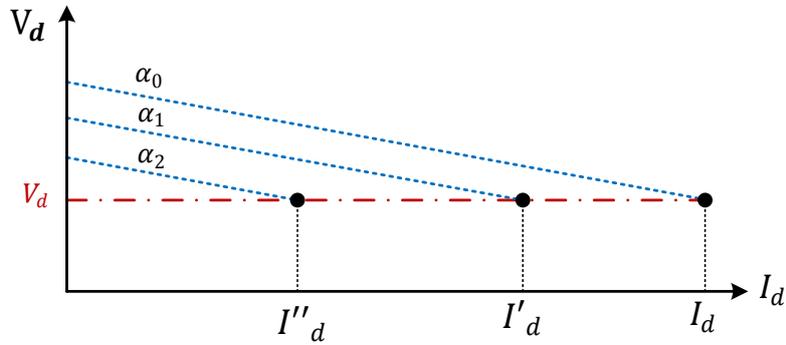


Figura 22 - Controle de  $V_d$  frente a variações de  $I_d$ .<sup>15</sup>

### 6.3.1.2 Controle de $I_d$ frente a variações de $V_{di}$

Na Figura 22, consideram-se as tensões CA como constantes e o inversor representado como uma fonte de tensão. Para variações na tensão interna do inversor, pela equação (6.1) percebe-se que a corrente CC também será alterada, conforme ilustrado na Figura 24. O controle do ângulo de disparo  $\alpha$  permite manter a corrente num valor constante.

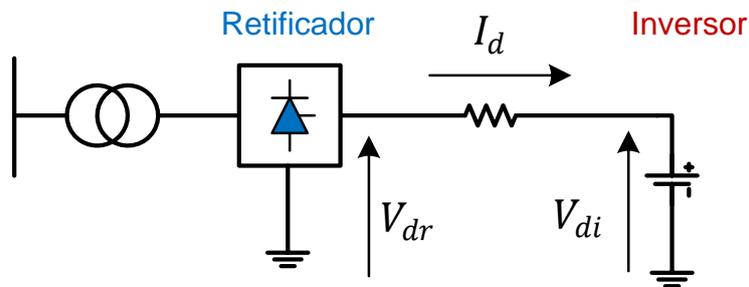


Figura 23 - Inversor representado como uma fonte de tensão.

<sup>15</sup> Elaborado com base em [22].

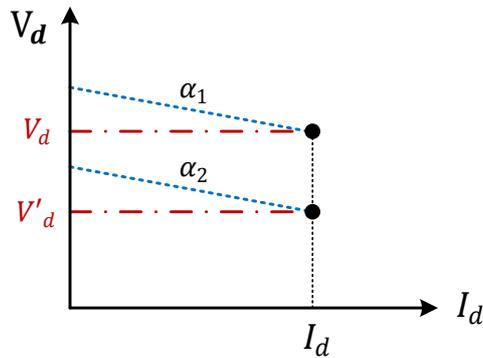


Figura 24 - Controle de  $I_d$  frente a variações de  $V_d$ .<sup>16</sup>

Alguns modos de operação são adotados como uma forma de limite para a faixa de operação do controle de corrente. Operação com ângulo alfa mínimo no retificador e operação com ângulo de extinção mínimo são para o controle de corrente. [15] O ângulo de disparo no terminal retificador e o ângulo de extinção no terminal inversor influenciam fortemente a performance do sistema CCAT.

### 6.3.2 Operação Normal

De modo a satisfazer os objetivos apontados, a regulação de corrente e a regulação de tensão são realizadas separadamente e designadas a terminais distintos.

Existem várias metodologias aplicadas no controle de elos CC de um sistema CCAT. Os métodos mais importantes são: *Constant Extinction Angle (CEA)* e *Constant Current (CC) Control* [1]. Em operação normal, o retificador está em controle de corrente e o inversor procura preservar o ângulo de extinção. Nesta configuração, a estação retificadora é responsável pelo controle de corrente e o inversor é utilizado para regular a tensão CC. Na Figura 25, é ilustrado o modo de operação normal, com a tensão medida no retificador e a queda de tensão incluída na característica do inversor.

<sup>16</sup> Elaborado com base em [22].

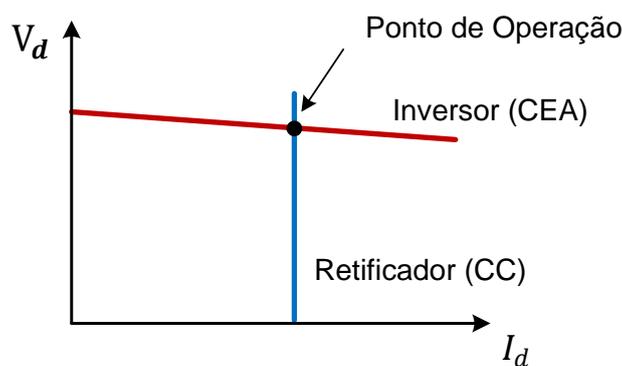


Figura 25 - Modo de operação normal.

A presença do segundo conversor resulta num ponto de operação definido pelas equações do retificador e do inversor, que deve satisfazer as características do retificador e do inversor, sendo definido pela interseção das duas características.

Resumidamente, o retificador atua controlando a corrente CC ( $I_{ordem}$  – *Corrente de ordem*), através da regulação da tensão CC ( $V_{dr}$ ), por meio da variação do ângulo de disparo  $\alpha$ . O inversor define a operação em  $\gamma_{min}$ , mantendo a tensão CC ( $V_{di}$ ) diretamente dependente da tensão CA.

As tensões  $V_{dr}$  e  $V_{di}$  estão relacionadas pela corrente  $I_d$ , conforme equação (6.5). Para um distúrbio na rede CA do terminal inversor de modo a reduzir a tensão  $V_{doi}$ , assim como  $V_{di}$ , se  $V_{dr}$  for mantido constante,  $I_d$  aumenta. Para manter o mesmo  $I_d$ ,  $V_{dr}$  deve ser diminuído.

Normalmente, o retificador controla a corrente de um valor de referência  $I_{ordem}$  e o inversor controla a tensão no valor de referência  $V_d$  [1],[2].

#### 6.4 Controle de corrente do lado do retificador

O controle de corrente, o mais fácil de entender e fundamental para o sistema, será descrito primeiramente. O retificador normalmente controla a corrente contínua, através da alteração do ângulo de disparo  $\alpha$ .

A característica do retificador pode ser transladada horizontalmente pelo ajuste da corrente de ordem. Se a corrente medida for menor que a de ordem, o regulador avança o disparo pela diminuição de  $\alpha$ . O diagrama de blocos do controle é apresentado na Figura 26.  $F(s)$  é uma função de controle do tipo proporcional-integral (PI). Valores típicos são  $\alpha_{min} = 5 \text{ graus}$  e  $\alpha_{max} = 100 \text{ graus}$  [2].

Na prática, a característica da corrente constante não é exatamente vertical, dependente do regulador de corrente. Com um controlador proporcional, a reta apresenta um elevado coeficiente angular negativo devido ao ganho finito do regulador de corrente. Com o regulador PI, a característica de controle de corrente é praticamente vertical [1]. O controlador de tape do retificador atua de modo a trazer  $\alpha$  para uma faixa desejável, garantindo um fator de potência elevado e espaço adequado para a atuação do controle.

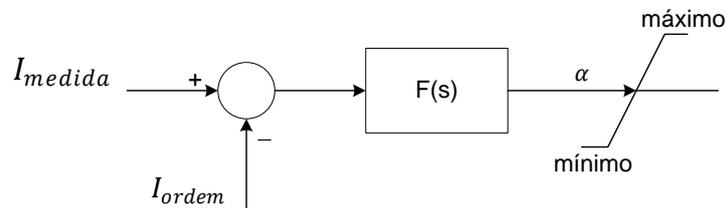


Figura 26 - Diagrama de blocos do controle do retificador.

## 6.5 Controle de alfa mínimo

É o mais difícil de satisfazer, e tem resultado na parte mais complicada do sistema de controle. O retificador normalmente controla a corrente contínua, através da alteração do  $\alpha$ . Entretanto,  $\alpha$  não pode ser menor que o seu valor mínimo ( $\alpha_{min}$ ). Uma vez alfa mínimo atingido, não é mais possível aumentar a tensão pela alteração de  $\alpha$ , e o retificador passa a operar com controle de  $\alpha_{min}$ . Portanto, a característica do retificador apresenta dois segmentos (AB e FA), ilustrados na Figura 27. O segmento FA corresponde ao  $\alpha_{min}$ , ou modo de controle CIA (Constant Ignition Angle). O segmento AB representa o controle normal de corrente constante. A característica completa do retificador na operação normal é definida por FAB. Com tensão reduzida, a característica se desloca, como indicado em F'A'B. [1]

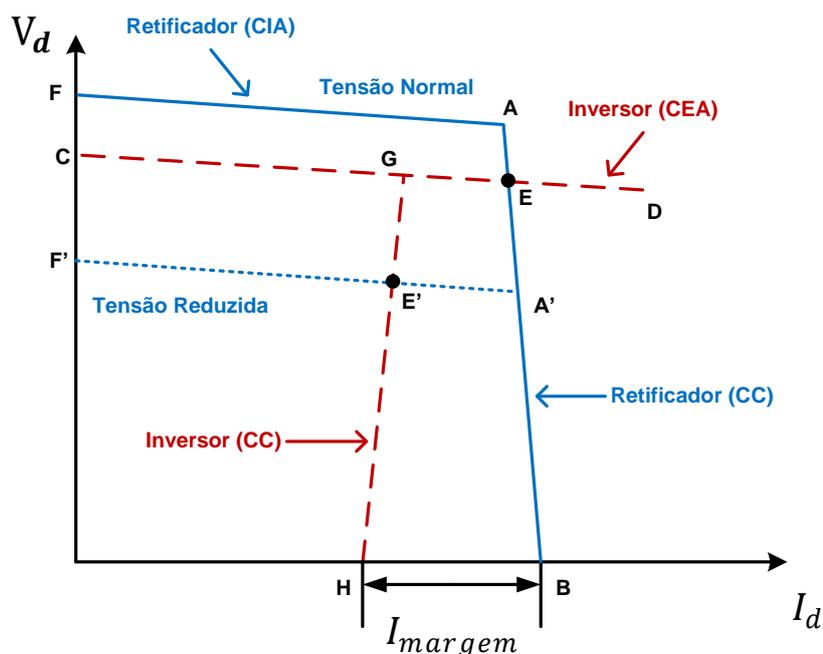


Figura 27 - Característica estática do controle do conversor.<sup>17</sup>

O controle de alfa mínimo significa um alfa limite mínimo. O objetivo deste valor mínimo para o ângulo de disparo é garantir que exista tensão suficiente sobre a válvula antes da ocorrência do disparo. Caso contrário, ocorreria falha de disparo. No modo de controle de corrente um regulador realimentado controla o ângulo de disparo e, logo, a corrente CC num valor desejado. Caso a corrente medida seja menor que o valor de referência, o ângulo de disparo será diminuído e vice versa. O controle da mudança de tape do transformador do conversor é utilizado para manter o alfa dentro de uma faixa aceitável, geralmente entre  $10^\circ$  e  $20^\circ$  [13].

## 6.6 Controle de corrente do lado do inversor

O controle do inversor é composto pelo *Constant Extinction Angle* (CEA) e *Constant Current* (CC). O retificador normalmente opera com controle de corrente constante (CC) e o inversor com controle CEA. Contudo, pode existir uma necessidade de transferir o controle de corrente para o inversor quando a tensão CA é reduzida no

<sup>17</sup> Elaborado com base em [1].

retificador, de forma a prevenir o desligamento do *elo* CC em caso de o controle do retificador atingir o seu limite mínimo. Se a tensão CA for reduzida, o ângulo de disparo do retificador também decairá de modo a manter a tensão CC alta. Quando  $\alpha$  atingir  $\alpha_{min}$ , a característica do controle CEA do inversor pode não interceptar a característica do retificador para tensão reduzida, representada por F'A'B [13], [1].

Para contornar este problema, o retificador alterna para o controle de alfa mínimo e o inversor vai se responsabilizar pelo controle de corrente. Isto implica que o controle de corrente também precisa ser providenciado no inversor além do controle CEA para que a transição do CEA para o CC, ou vice versa, seja realizada mais facilmente quando a corrente do *elo* CC começar a cair. A característica completa do inversor pode ser observada na Figura 27, indicada por DGH, um segmento para o controle CEA e outro segmento para o controle CC.

A corrente de referência no inversor é mantida abaixo da do retificador por um valor denominado “margem de corrente”, de modo a prevenir um cruzamento entre as correntes dos controles, conforme a Figura 28.  $G(s)$  é uma função de controle do tipo proporcional-integral (PI). Valores típicos são  $\gamma_{min} = 17 \text{ graus}$ ,  $\gamma_{max} = 100 \text{ graus}$  – [2]. Na Figura 27 são apresentadas as características do retificador e do inversor [6].

Denotado por  $I_{margem}$ , a margem de corrente é usualmente ajustada de 10 a 15% da corrente nominal de modo a assegurar que as duas características de corrente não se cruzem devido a erros de medidas ou qualquer outra causa [1].

Supondo um aumento da tensão CA do inversor, se o aumento for sensível, então  $\alpha$  vai para  $\alpha_{min}$  e, assim como descrito anteriormente, a função de controle deve ser trocada para: controle de alfa mínimo no retificador e controle de corrente no inversor [2].

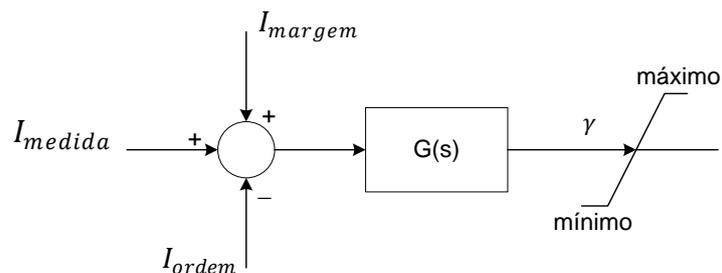


Figura 28 - Diagrama de blocos do controle do inversor.

## 6.7 Controle de gama mínimo

O requisito de operação segura do inversor sem falhas de comutação se refere principalmente à operação com ângulo de extinção mínimo. Além disso, o inversor com controle de ângulo de extinção mínimo que permite o menor consumo de reativo no inversor [15].

A característica do inversor pode ser trasladada verticalmente pela alteração do tape do transformador. Quando o controle do tape é movido, o regulador CEA rapidamente restaura o  $\gamma$  desejado. Como resultado, a corrente contínua muda, sendo rapidamente restaurada pelo regulador de corrente do retificador. Para operar o conversor com gama constante, o disparo da válvula é controlado considerando variações instantâneas da tensão e da corrente.

No modo CEA existe um compromisso entre um baixo risco de falhas de comutação (caso  $\gamma$  seja grande) e baixo consumo de potência reativa (caso  $\gamma$  seja pequeno) que geralmente resulta num valor de gama em torno de  $15^\circ$  [13].

Em condições de operação normais o retificador controla a corrente contínua e o inversor, a tensão contínua. Com tensão CA reduzida, provavelmente devido a curto circuitos nos terminais, o elo CC passa a operar em condições reduzidas. O inversor assume o controle de corrente e o retificador estabiliza a tensão contínua. Neste modo de operação, denominado modo reduzido, os papéis do retificador e do inversor estão invertidos. A transferência de um modo de operação para o outro é denominada *mode shift* [1].

## 6.8 Controle de potência

Quando o retificador está operando com controle de potência constante, o controlador de potência normalmente ajusta a ordem de corrente de modo que a potência desejada seja atingida.

Nesta técnica, a potência de ordem é dividida pela tensão do retificador. A diferença de potencial entre o retificador e o inversor é controlável e, como a corrente do *elo* CC é controlável, a potência CC transmitida é controlável. Para o controle de

potência constante, a técnica utilizada depende da referência de potência constante que determina o valor referência para a corrente CC, e o controle de corrente controla o ângulo de disparo do retificador [13].

## 6.9 Controle de tensão

O controle de tensão é uma variação do controle CEA, apresentando algumas vantagens. Em vez de regular  $\gamma$  num valor fixo (CEA), um controle de tensão realimentado pode ser utilizado para manter a tensão constante num determinado ponto da linha CC, normalmente no terminal inversor.

Comparado ao controle de gama constante (com uma característica de queda de tensão), o controle de tensão apresenta a vantagem da característica do inversor ser uma reta horizontal, como ilustrado na Figura 29. Além disso, o controle de tensão conduz a um valor um pouco maior de  $\gamma$ , menos suscetível a falhas de comutação. Normalmente o controle de tensão mantém um  $\gamma$  maior que  $18^\circ$ [1].

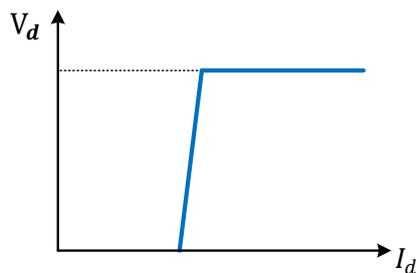


Figura 29 - Modo de controle de tensão.

## 6.10 Reversão de Potência

A reversão de potência não pode ser realizada pela simples troca da direção do fluxo de corrente, uma vez que as válvulas conversoras apresentam uma característica unidirecional em corrente. A reversão de potência é obtida pela reversão da polaridade das tensões dos polos do Elo CC, invertendo o sentido do fluxo de potência ativa na linha de transmissão CC. Este novo ponto de operação, apresentado na Figura 30, é

obtido pela operação com as características definidas pelas linhas pontilhadas, resultantes da reversão da margem de corrente. A corrente  $I_{margem}$  é retirada do controle do inversor e inserida no do retificador. O terminal retificador passa a atuar como o inversor e o inversor como retificador.

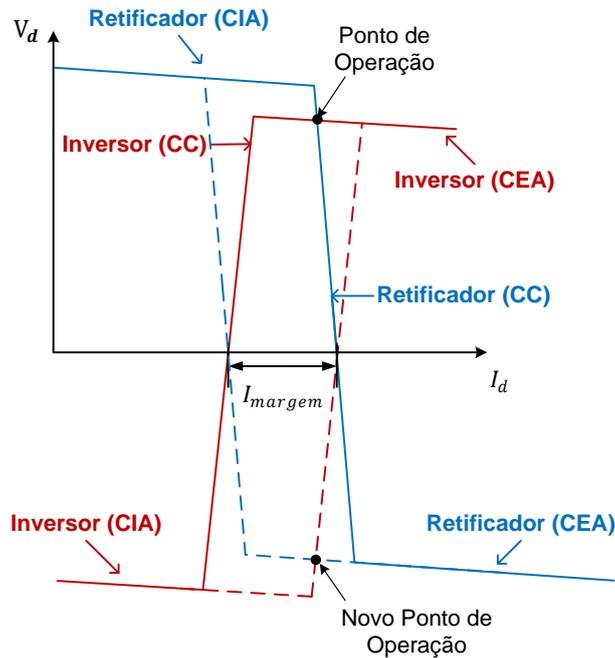


Figura 30 – Operação com os dois terminais apresentados os controles de retificador e inversor.

### 6.11 VDCOL – Voltage Dependent Current Order Limit

Quando um distúrbio reduz a tensão CA próxima ao conversor, haverá redução da potência transferida. Devido a isso VDCOL é inserido no sistema de controle. Sua função é limitar  $I_{ordem}$  na proporção da queda de tensão CC. Limitando a  $I_{ordem}$ , quando a tensão CC cai (por queda de tensão CA), o controle alivia temporariamente o consumo de reativos consumidos pelo conversor e, desta forma, contribui para a estabilização da tensão, bem como procura reduzir o risco de falhas de comutação. A sintonia do VDCOL é uma importante tarefa porque implica mais ou menos compensação reativa [2],[16].

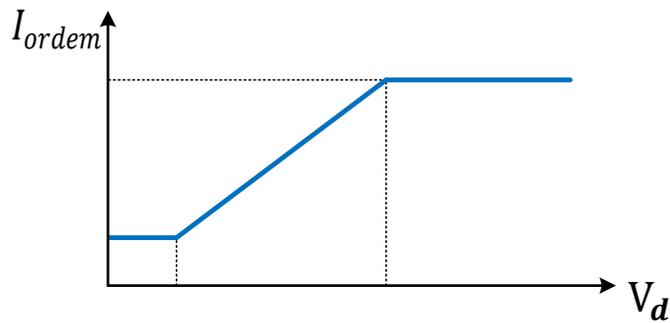


Figura 31 - Filosofia de redução da corrente de ordem.<sup>18</sup>

O VDCOL não funciona a menos que o conversor esteja operando em modo de controle de corrente. Uma vez que a operação em modo de controle constante começa, VDCOL amostra a tensão CC após o reator de alisamento através de um elemento de tempo de retardo de primeira ordem. Quando este valor atinge um valor menor que o especificado, o VDCOL começa a operar [17].

O valor de  $I_{ordem}$  é modificado em função da tensão CC, conforme ilustrado na Figura 31, sendo este valor a entrada para o bloco de controle  $\frac{G(s)}{1+sT_{VDCOL}}$ . A constante de tempo  $T_{VDCOL}$  tem um valor diferente quando  $I_{ordem}$  está aumentando ( $T_{up}$ ) ou diminuindo ( $T_{dn}$ ), sendo a constante de tempo  $T_{up}$  consideravelmente maior que  $T_{dn}$  [2].

- ✓ Durante a falta (constante de tempo rápida -  $T_{dn}$ ):

Se  $V_d$  diminui,  $I_d$  também diminui.

- ✓ Durante a recuperação (constante de tempo lenta -  $T_{up}$ ):

Se  $V_d$  aumenta,  $I_d$  também aumenta.

O controle realizado pelo VDCOL é importante na recuperação pós-falta, para evitar falhas de comutação. O VDCOL altera  $I_d$  conforme a variação de  $V_d$ , de forma a manter a minimizar variações de  $\mu$ .

<sup>18</sup> Elaborado com base em [9].

Observando as equações (3.7) e (3.8), pode-se concluir que o aumento de  $I_d$ , assim como a redução de  $V_{dor}$ , aumenta  $\mu$  e reduz o fator de potência, aumentando o risco de falhas de comutação e o consumo de potência reativa. Portanto, sendo a redução de tensão uma provável causa de falha de comutação, reduzindo-se a  $I_{ordem}$  se protege a válvula que está conduzindo contra desgastes exagerados.

## 6.12 Resumo dos princípios básicos do controle

O sistema CCAT Convencional é basicamente composto de controle de corrente por dois motivos básicos: Limitação da sobrecorrente e minimização dos danos causados por curto circuitos; Prevenção do desligamento do sistema devido à flutuações da tensão CA [1].

Alguns aspectos significativos do sistema de controle básico são [1]:

- O retificador é provido do controle de corrente e do controle de  $\alpha_{min}$ . O valor de  $\alpha_{min}$  é ajustado de modo que uma tensão positiva suficiente exista sobre a válvula no instante do disparo, assegurando a comutação. No modo de controle de corrente, um regulador realimentado controla o ângulo de disparo e, portanto, a tensão CC para manter a corrente contínua igual à corrente de ordem. O Controle de variação do tape do transformador do conversor traz  $\alpha$  para a faixa de desejada. Um tempo de atraso é utilizado para prevenir alterações desnecessárias do tape durante a excursão do  $\alpha$ .
- O inversor é provido com um controle de ângulo de extinção mínimo (CEA) e um controle de corrente. No modo CEA,  $\gamma$  é regulado para um valor, que representa um balanço entre consumo aceitável de reativo e pequeno risco de falha de comutação. Enquanto o controle CEA é o usual, existem variações que incluem controle de tensão. Controle de variação do tape é utilizado para trazer  $\gamma$  para perto da faixa desejada.
- Em condições normais de operação, o retificador está em modo de corrente constante e o inversor em modo de controle CEA. Se ocorre uma redução da tensão CA no terminal retificador, o ângulo de disparo do retificador diminui até

atingir o limite  $\alpha_{min}$ . Neste ponto, o retificador comuta para controle de  $\alpha_{min}$  e o inversor vai assumir o controle de corrente.

Na Figura 27 é apresentada a característica  $V_d \times I_d$  na sua forma mais simples, com as tensões e correntes próximas a região de operação nominal. Diante de faltas no sistema CA que possam causar largas excursões das tensões, a característica deve ser apresentada de uma forma mais completa, na qual estaria representada de forma detalhada, toda a filosofia de controle e proteção do elo CC. Esta característica é indicada na Figura 32.

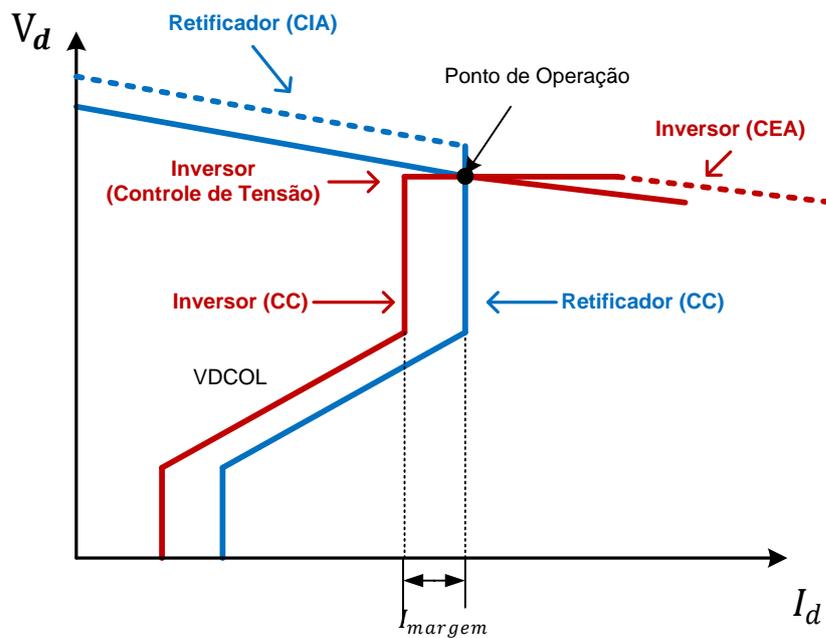


Figura 32 - Representação<sup>19</sup>

<sup>19</sup> Elaborado com base em [16], [6], [1].

# Capítulo 7

## Simulações Realizadas

Neste capítulo serão apresentados o funcionamento do sistema em regime permanente e a aplicação de diferentes tipos de perturbações ao sistema, como curto-circuito monofásico, curto-circuito CC e queda de tensão CA. O objetivo é verificar o comportamento do sistema e o funcionamento dos controles.

### 7.1 Sistema CCAT simulado no Matlab

O sistema modelado no software Simulink/Matlab dentro da ferramenta SimPowerSystems é apresentado na Figura 33. Esse modelo teve como base inicial o modelo presente no banco de dados do Simulink/Matlab [18]. As simulações com o Simulink/Matlab foram realizadas no Cepel, com a versão oficial do programa disponível no próprio Cepel. No Anexo 1, são apresentados os parâmetros utilizados para as simulações. Nos Apêndices 1,2 e 3, são apresentadas as rotinas utilizadas para rodar cada uma das simulações.

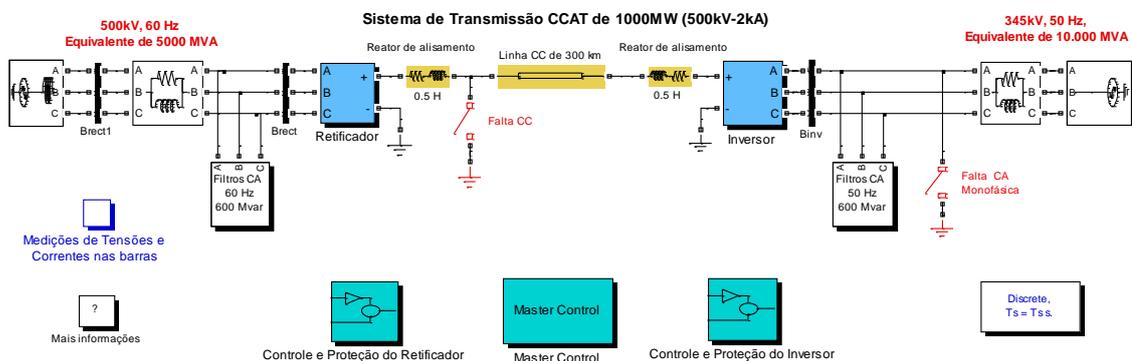


Figura 33 - Circuito Simulado no Simulink.

O sistema apresentado na Figura 33 está dividido nos seguintes componentes:

### 7.1.1 Sistemas CA

As redes CA, do retificador e do inversor, são modeladas como barras infinitas separadas do sistema por impedâncias. As impedâncias são representados como uma indutância em série com um sistema RL paralelo. Os ângulos das impedâncias dos dois sistemas são selecionados para ser de 80 graus. Durante regime permanente, o retificador está operando em um ângulo de disparo nominal de 16 graus e o inversor com gama em 22 graus.

➤ **Sistema CA de entrada:**

O sistema de entrada foi considerado como uma barra infinita de tensão 500kV e frequência 60Hz, fornecendo a potência demandada pela carga/sistema. Uma impedância é conectada a fonte limitando a potência de curto-circuito em 5000 MVA. Essa modelagem está apresentada na Figura 34.

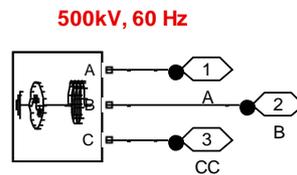


Figura 34 - Sistema CA de entrada.

➤ **Sistema CA de saída:**

O sistema de saída foi considerado como uma barra infinita de tensão 345kV e frequência 50Hz, consumindo potência. Uma impedância é conectada a fonte limitando a potência de curto-circuito em 10000 MVA. Essa modelagem está apresentada na Figura 35.

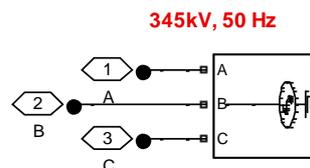


Figura 35 - Sistema CA de saída.

## 7.1.2 Conversores

### ➤ Estação Retificadora

A estação retificadora é apresentada na Figura 36 e na Figura 37. Ela é composta de um transformador de entrada de 1200MVA, um transformador de 3 enrolamentos. O transformador é utilizado para uma melhor conversão da tensão, e o arranjo delta-estrela é uma necessidade da ponte de 12 pulsos, devido a defasagem de  $30^\circ$ .

A estação conversora também é composta de uma ponte conversora de 12 pulsos, conforme apresentado na Figura 37. Os pulsos de disparo dessa ponte conversora são gerados pelo controle dedicado para esta estação conversora. Além disso, um reator de alisamento de 0.5H é conectado em série com o terminal do polo, para amenizar o ripple de corrente da conversão de tensão CA em CC.

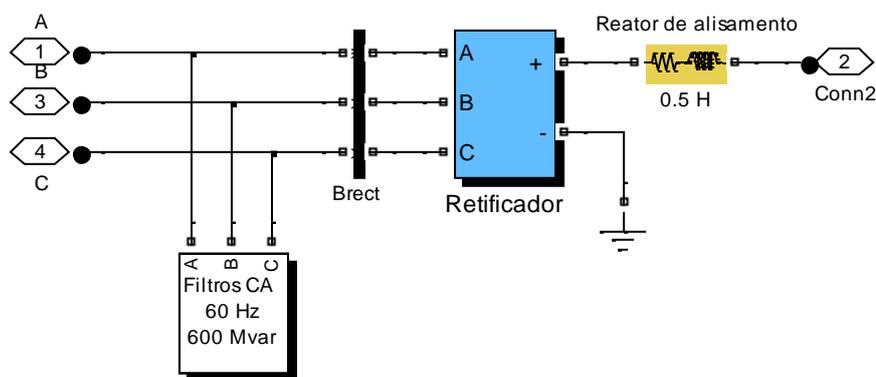


Figura 36 - Estação retificadora.

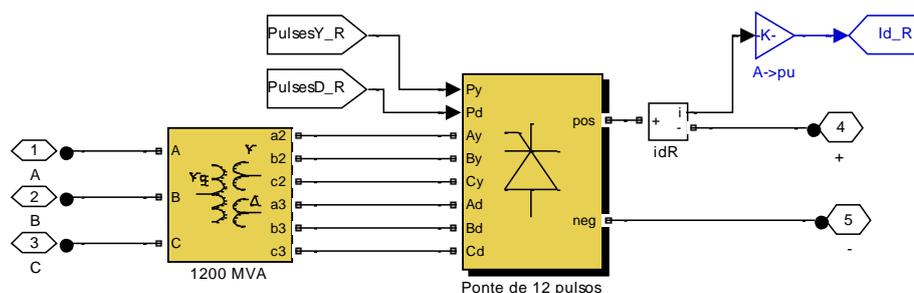


Figura 37 - Retificador.

## ➤ Sistema de Controle da Estação Retificadora

O sistema de controle do retificador e do inversor utilizam o mesmo bloco para controle de um sistema CCAT de 12 pulsos, disponível na biblioteca do Simulink/Matlab. A Figura 38 apresenta não somente o bloco controle do retificador, como também os blocos de proteção do retificador e de comando dos disparos da ponte conversora. O referencial de mínimo  $\alpha$  é ajustado para  $5^\circ$ .

O bloco de proteção mede as tensões CC e CA do terminal retificador, de forma a indentificar, numa queda de tensão, se a ocorrência se trata de uma falta CC ou CA. Uma vez indentificado o defeito, este bloco, juntamente com o bloco de controle, toma medidas para extinguir o defeito. Para um defeito CC, o ângulo de disparo do retificador é forçado em  $165^\circ$ , invertendo a tensão CC no terminal retificador, invertendo o sentido do fluxo de potência no retificador e, portanto, retirando energia do defeito no elo CC.

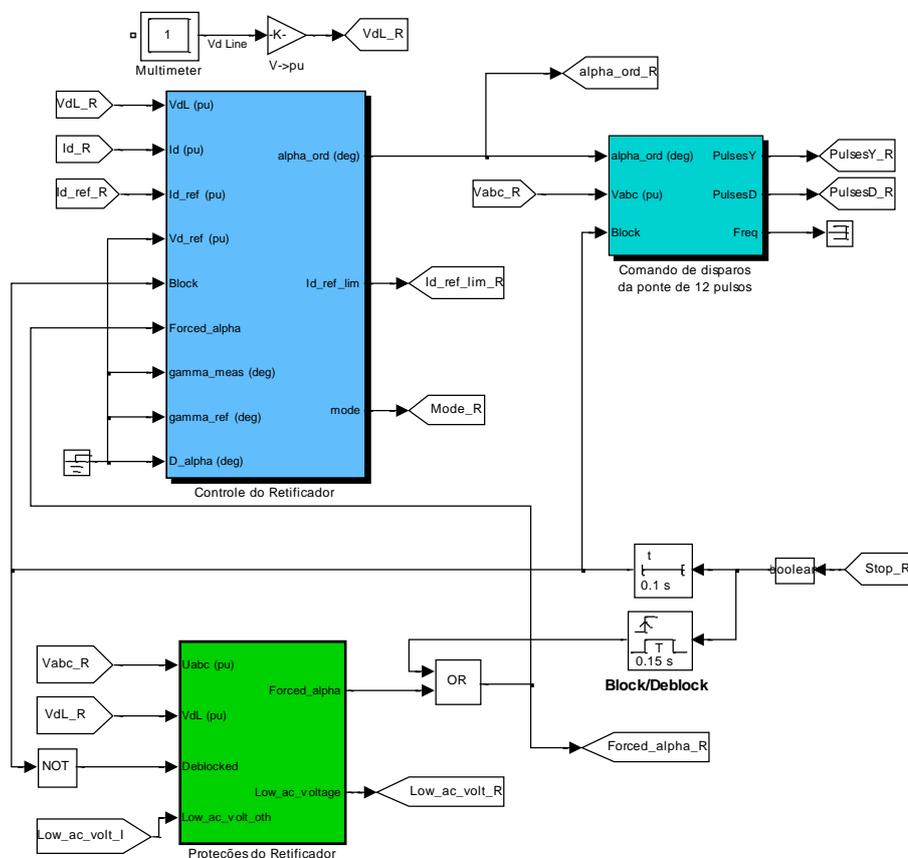


Figura 38 - Proteção e Controle do Retificador

O bloco de comando dos disparos, é responsável por medir a tensão CA e, com base no valor do ângulo de disparo determinado pelo controle, enviar o sinal de disparo para cada uma das chaves da ponte conversora no instante correto.

### ➤ Estação Inversora

Esta estação é semelhante a estação retificadora, e é apresentada na Figura 39 e na Figura 40. Os filtros CA, reatores de alisamento e o conversor são exatamente os mesmos apresentados para a estação retificadora. O transformador desta estação conversora abaixa a tensão para 345kV.

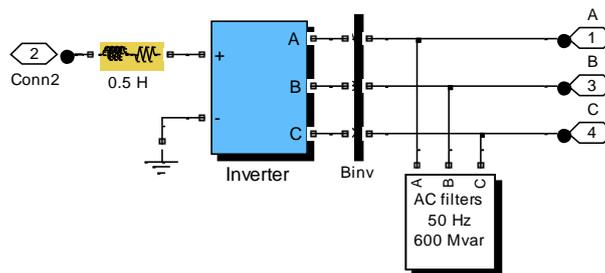


Figura 39 - Estação inversora.

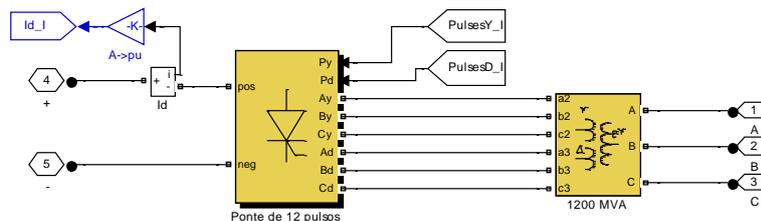


Figura 40 - Inversor.

### ➤ Sistema de Controle da Estação Inversora

Os blocos de proteção e de comando de disparos do inversor são semelhantes aos apresentados para o retificador. No caso do inversor, o bloco é composto dos controles de tensão, corrente e gama mínimo. O bloco também permite desabilitar somente o controle de tensão ou o de gama mínimo.

Quando atuando em controle de tensão, o inversor controla com base num valor referência de tensão. Além disso, na estação inversor é medido o valor de gama. Quando atuando em controle de gama mínimo, um sinal de erro é gerado da diferença entre o valor referência de gama e o valor medido de gama. Este erro serve como entrada para um controlador PI no bloco de controle do inversor, que gera alfa, o qual controla os impulsos de disparo para os tiristores. No modo CEA,  $\gamma$  é regulado para um valor em torno de  $18^\circ$ .

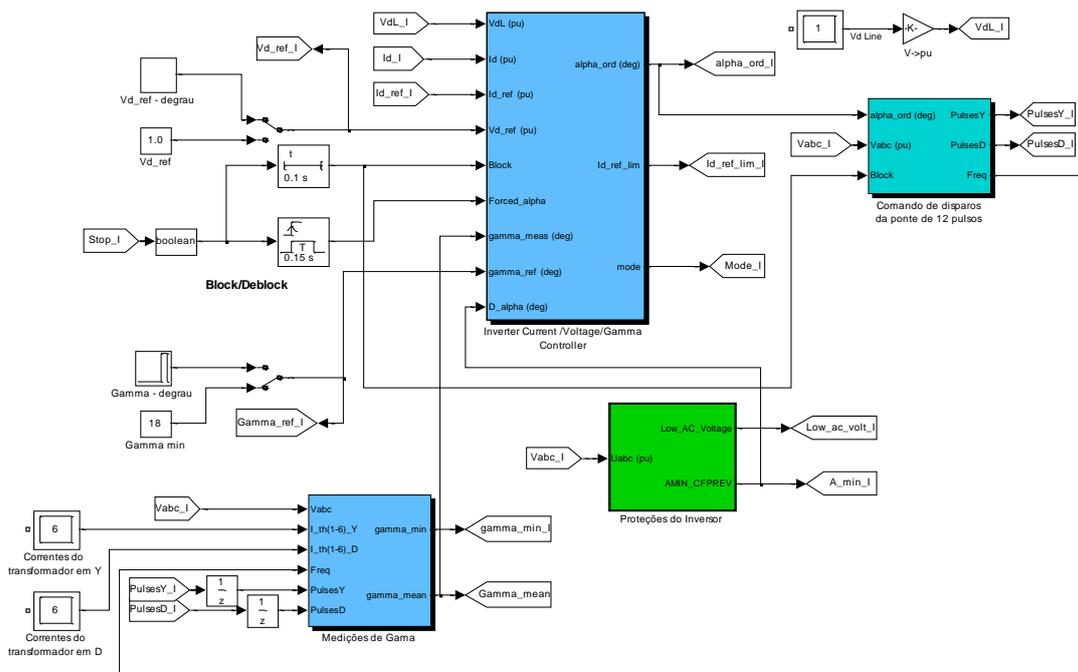


Figura 41 - Proteção e Controle do Inversor.

### 7.1.3 Parte CC do sistema CCAT

A parte CC do sistema CCAT, apresentada na Figura 42, consiste de uma linha de transmissão CC. A linha CC é modelada através de parâmetros distribuídos.

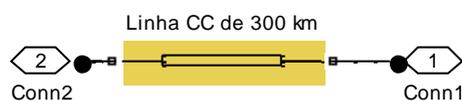
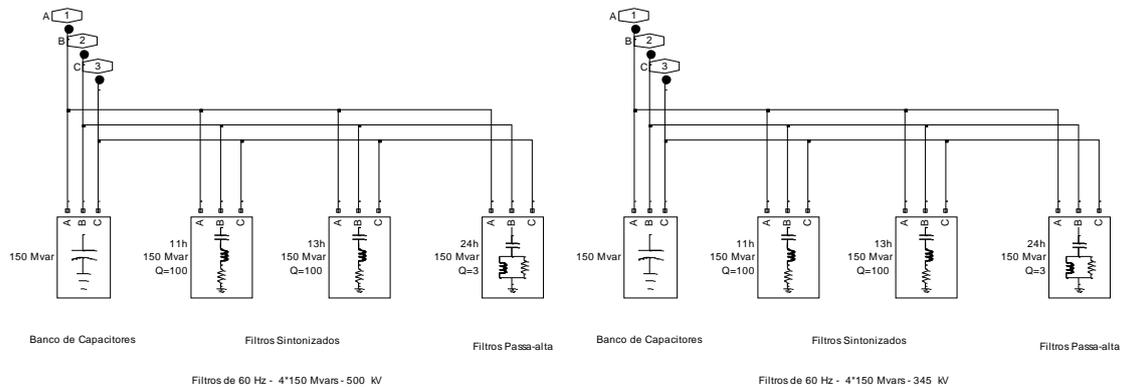


Figura 42 - Linha de transmissão CC.

### 7.1.4 Filtros CA e banco de capacitores

Conforme apresentado nos componentes do sistema, para manter o sistema dentro de níveis toleráveis de harmônicos, diversos filtros são introduzidos no modelo. Esses filtros foram conectados como elementos em paralelo, tanto do lado CA do sistema, instalados de modo a limitar as componentes harmônicas da corrente CA em valores aceitáveis.



**Figura 43 - Filtros CA para os harmônicos de corrente gerados pelo conversor.**

Estes filtros também servem como grandes capacitores na frequência fundamental, proporcionando fornecimento de potência reativa demandada pelo conversor. Para um ângulo de disparo de 30 graus, a potência reativa demandada pelo conversor é aproximadamente 60% da potência transmitida em plena carga. Os bancos de capacitores também são responsáveis pelo fornecimento da potência reativa consumida.

## 7.2 Resultados

### 7.2.1 Modo de Operação Normal

Nesta primeira etapa, para certificar-se que o modelo CCAT está funcionando corretamente, será realizada uma simulação sem a aplicação de qualquer tipo de falha, atingindo o estado de regime permanente após o período de inicialização do caso.

Para análise dos resultados em regime permanente, foi feita uma simulação com duração de 3 segundos. Dos resultados obtidos e apresentados no intervalo da Figura 46 até a Figura 53, pode-se afirmar que após 1 segundos de inicialização, o sistema entra em regime permanente. O retificador controla a corrente e o inversor controla a tensão, uma vez que o regime permanente é atingido o sistema é projetado de tal forma que os ângulo de disparo do retificador seja 16 e o ângulo gama do inversor 22 graus, conforme apresentado na Figura 44 e na Figura 45. Uma vez que o sistema atinge o regime permanente, permanece no estado de regime permanente desde que não haja alguma perturbação.

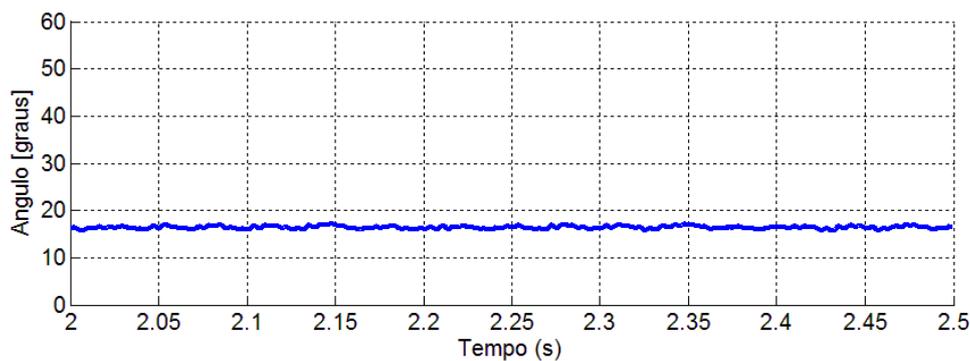


Figura 44 – Ângulo de disparo do retificador, no modo de operação normal.

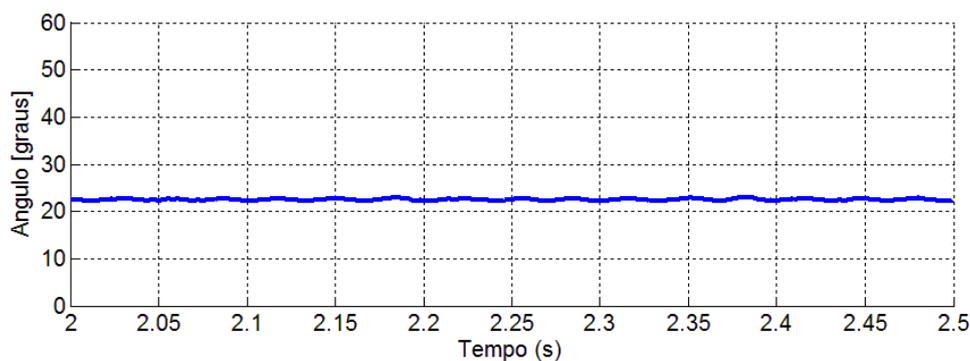


Figura 45 - Ângulo gama do inversor, no modo de operação normal.

A Figura 46 e a Figura 47 representam a tensão da linha CC e corrente CC no retificador, respectivamente, em condições normais de operação. Pode-se observar que a tensão CC no retificador é estável e está variando entre 0,98 pu para 1,04 pu. A corrente CC do retificador, durante a condição de operação normal, varia entre 0,99 pu para 1,02 pu. Para todos os casos simulados são utilizadas as mesmas bases para as tensões e correntes do sistemas, estas bases são apresentadas na Tabela 1 e na Tabela 2.

**Tabela 1 - Bases de tensão e corrente para as redes CA do sistema.**

	Tensão	Corrente	Potência
<b>Retificador</b>	500 kV	115,5 A	100 MVA (trifásico)
<b>Inversor</b>	345 kV	167,4 A	100 MVA (trifásico)

**Tabela 2 - Bases de tensão e corrente para a rede CC do sistema.**

Tensão	Corrente	Potência
<b>500 kV</b>	2 kA	1000 MW

A Figura 48 e a Figura 49 representam a tensão terminal CC e corrente no terminal inversor, respectivamente, durante o funcionamento normal. Observa-se que a tensão da linha CC está em 0,96 pu para 1,03 pu e a corrente CC do inversor é estável. Isto é coerente uma vez que o retificador está atuando com controle de corrente enquanto o inversor com controle de tensão. Além disso, num circuito CC o sentido do fluxo de potência é determinado pela diferença entre as tensões, logo o esperado era uma tensão CC no terminal retificador maior que a tensão CC do inversor.

A Figura 50 e a Figura 51 são as formas de onda de tensão e corrente CA nos terminais de entrada do retificador quando o sistema CCAT é executado sob condição de operação normal.

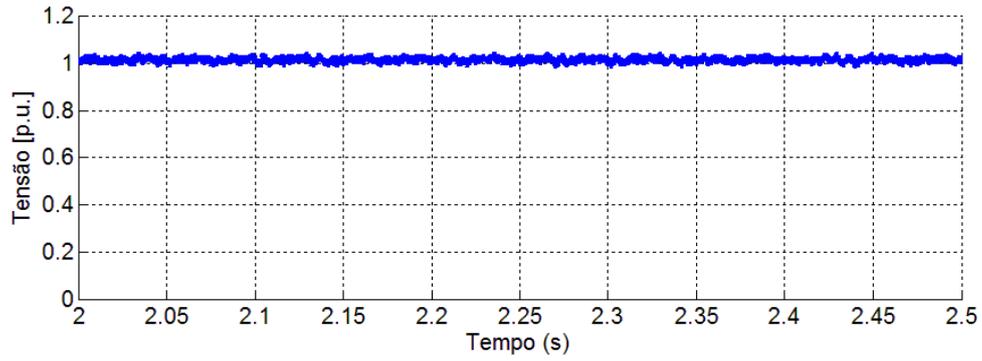


Figura 46 - Tensão CC (p.u.) no retificador, no modo de operação normal.

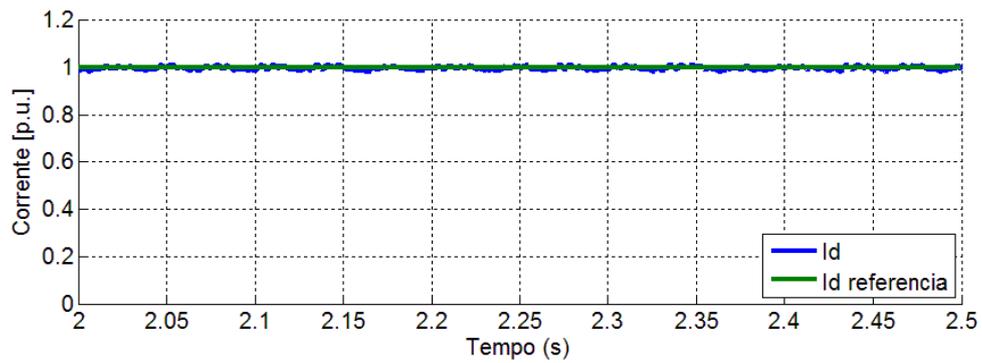


Figura 47 - Corrente CC (p.u.) no retificador, no modo de operação normal.

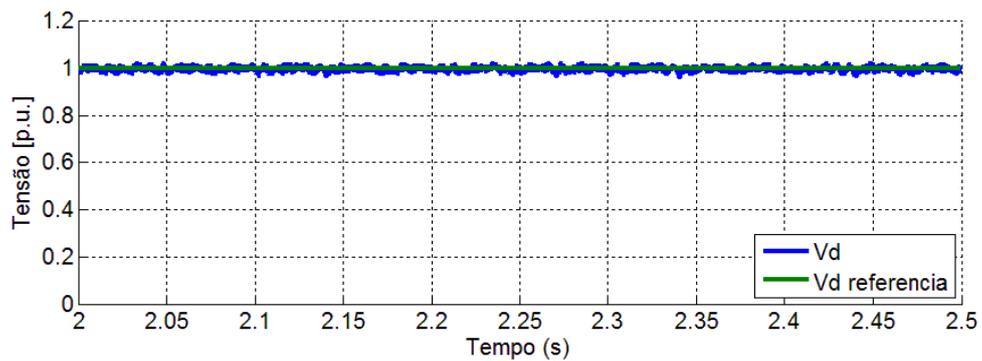


Figura 48 - Tensão CC (p.u.) no inversor, no modo de operação normal.

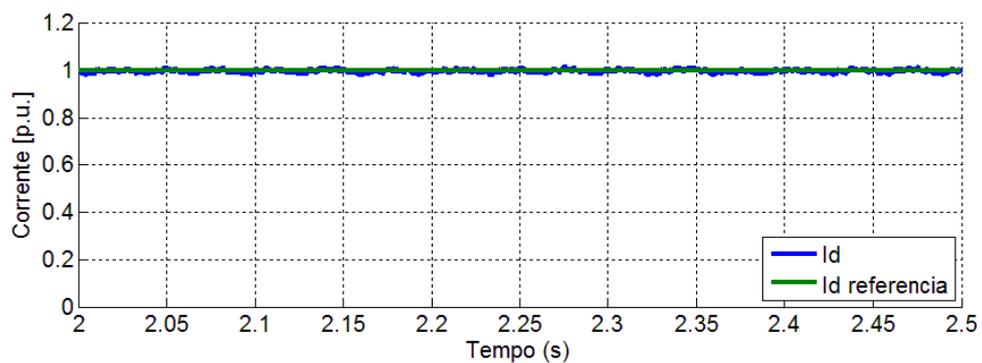


Figura 49 - Corrente CC (p.u.) no inversor, no modo de operação normal.

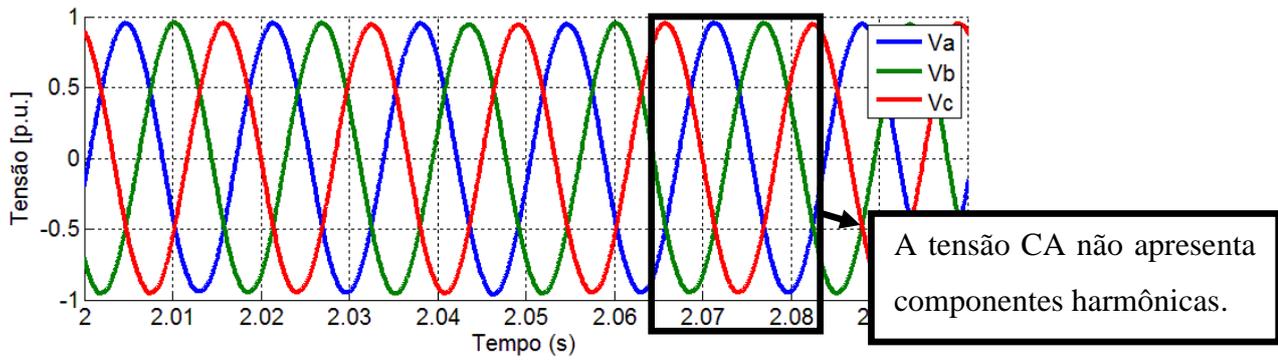


Figura 50 - Tensão CA (p.u.) no retificador, no modo de operação normal.

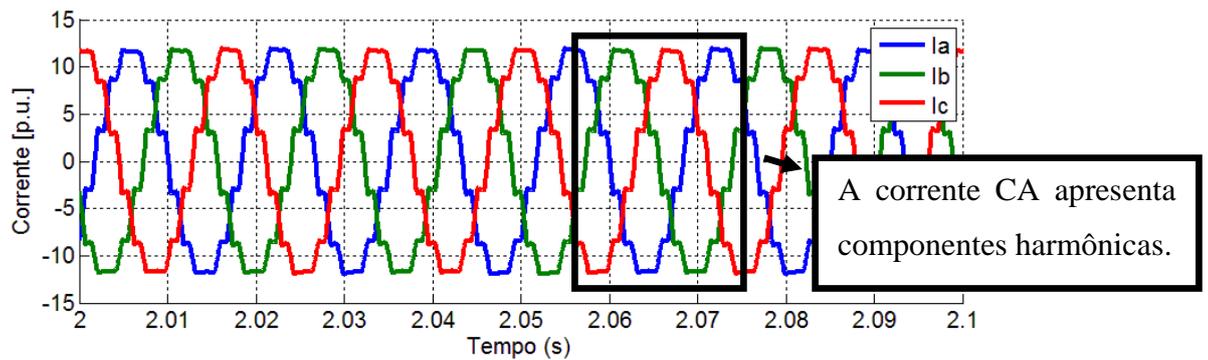


Figura 51 - Corrente CA (p.u.) no retificador, no modo de operação normal.

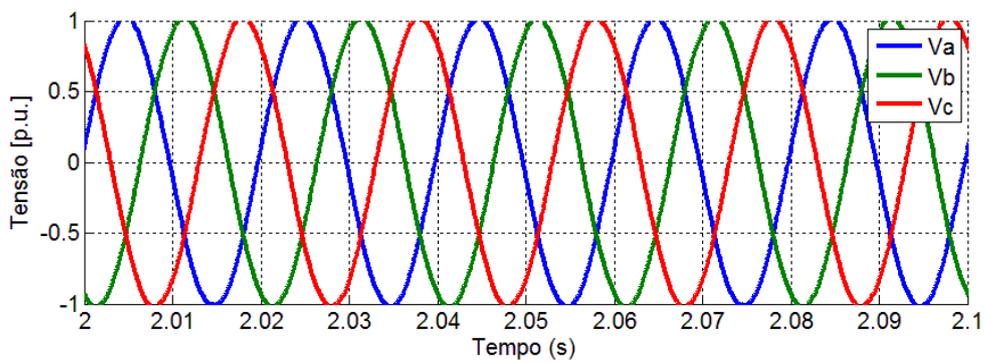


Figura 52 - Tensão CA (p.u.) no inversor, no modo de operação normal.

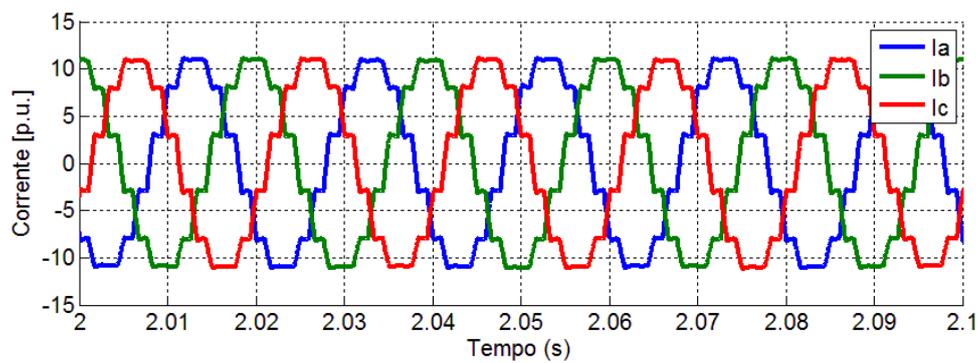


Figura 53 - Corrente CA (p.u.) no inversor, no modo de operação normal.

A Figura 51 apresenta a forma de onda das correntes CA no terminal retificador do elo CCAT. Aplicando a transformada de Fourier na corrente CA medida no terminal retificador do circuito no Simulink, pode-se perceber que a corrente apresenta harmônicos de décima primeira ordem e de décima terceira ordem, conforme apresentado na Figura 54, assim como esperado para uma ponte conversora de 12 pulsos.

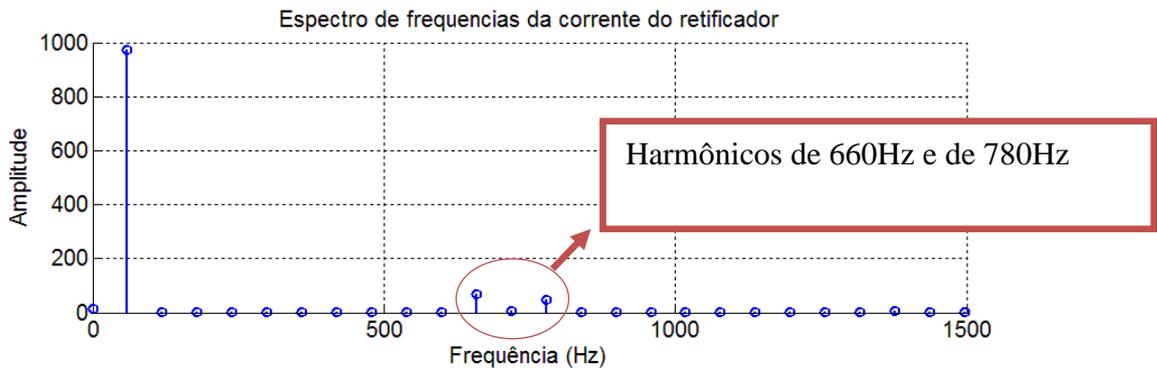


Figura 54 - Espectro de frequências da corrente CA medida no terminal retificador.

A Figura 55 apresenta as formas de onda das correntes fornecidas pela rede CA do lado retificador, está onda foi medida no circuito do Simulink. O sinal é puramente senoidal como esperado, devido a presença dos filtros.

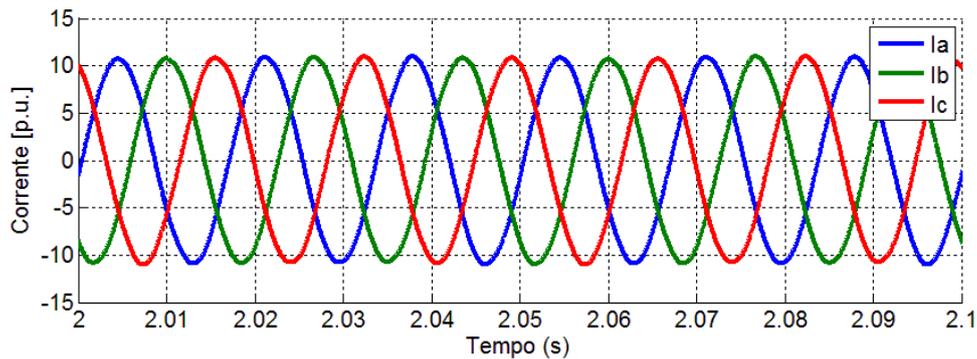


Figura 55 - Correntes CA fornecidas pela rede CA do lado retificador.

A Figura 53 apresenta a forma de onda das correntes CA no terminal inversor do elo CCAT. Aplicando a transformada de Fourier na corrente CA pode-se perceber que a corrente apresenta harmônicos de décima primeira ordem e de décima terceira ordem, conforme apresentado na Figura 56, assim como esperado para uma ponte conversora de 12 pulsos.

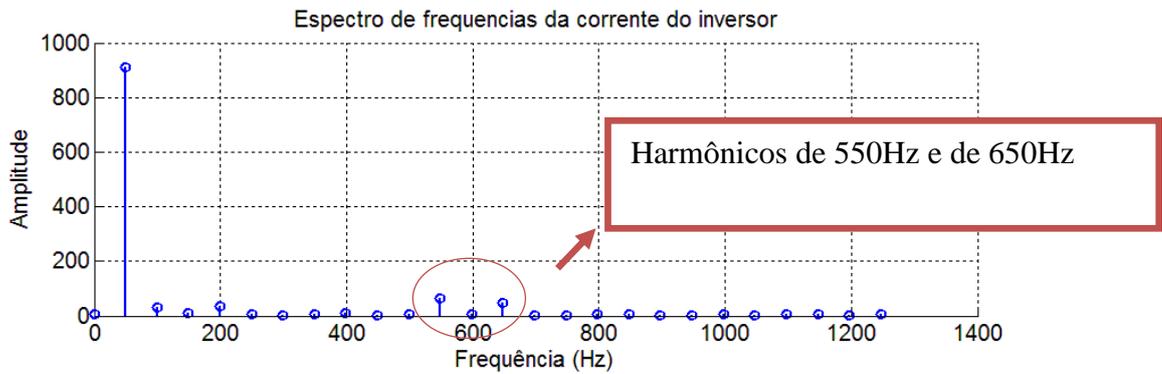


Figura 56 - Espectro de frequências da corrente CA medida no terminal inversor.

A Figura 57 apresenta as formas de onda das correntes consumidas pela rede CA do lado inversor. O sinal, embora com um pequeno desbalanço, é puramente senoidal como esperado, devido a presença dos filtros.

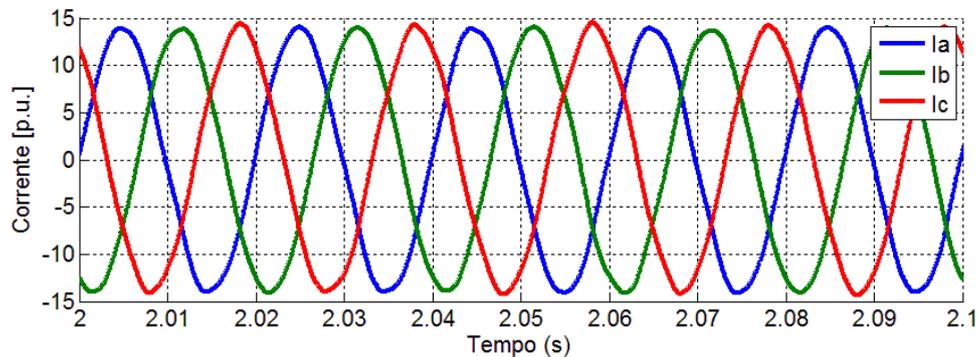
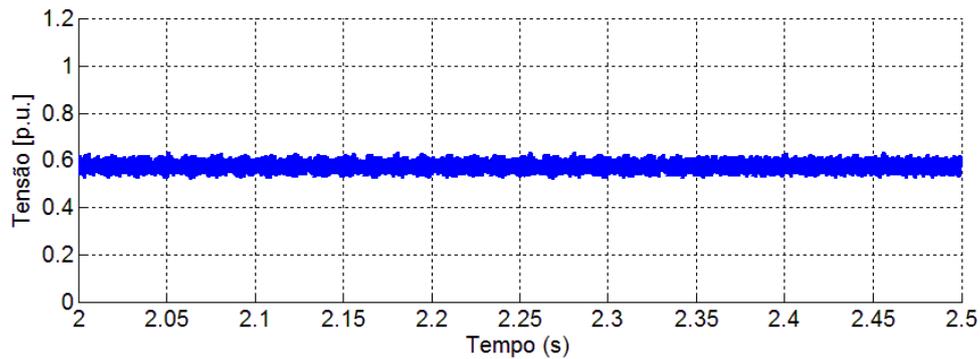


Figura 57 - Correntes CA consumidas pela rede CA do lado inversor.

## 7.2.2 Queda da tensão CA no terminal retificador

Para essa simulação, foi aplicada uma queda de tensão trifásica de 40%. Esse ajuste foi feito na fonte de tensão controlada presente na rede CA do lado do terminal retificador. O objetivo é observar o comportamento dos controles.

Com a queda da tensão que alimenta o retificador, que normalmente opera controlando a corrente, a tensão CC no terminal retificador ficará reduzida, conforme apresentado na Figura 58. Como a tensão CC do inversor é mantida constante, resultando num diferença de potência pequena entre os terminais, a corrente CC ficará reduzida. O controle de corrente do retificador atuará, diminuindo o valor de alfa, de forma a obter novamente corrente inicial. Contudo, uma vez atingida a condição limite de alfa mínimo o controle não consegue mais elevar o valor da tensão CC.



**Figura 58 - Tensão CC (p.u.) no retificador, para uma queda de tensão de 0,4 p.u. na rede CA do lado retificador.**

Neste caso, o retificador passa a controlar somente o ângulo alfa (vide Figura 59) e a responsabilidade do controle de corrente é do terminal inversor, conforme apresentado na Figura 61.



**Figura 59 - Ângulo de disparo do retificador, para uma queda de tensão de 0,4 p.u. na rede CA do lado retificador.**

A Figura 60 apresenta a tensão CC no terminal inversor, reduzida de forma a obter o valor de corrente desejado. A corrente CC atingida é menor que 1 p.u., devido a presença da corrente de margem, controlando a corrente em um valor menor que o controlado pelo terminal retificador. Para tanto, gama é aumentado de até 56 graus (Figura 62). Em operação normal gama era 22 graus (Figura 45).

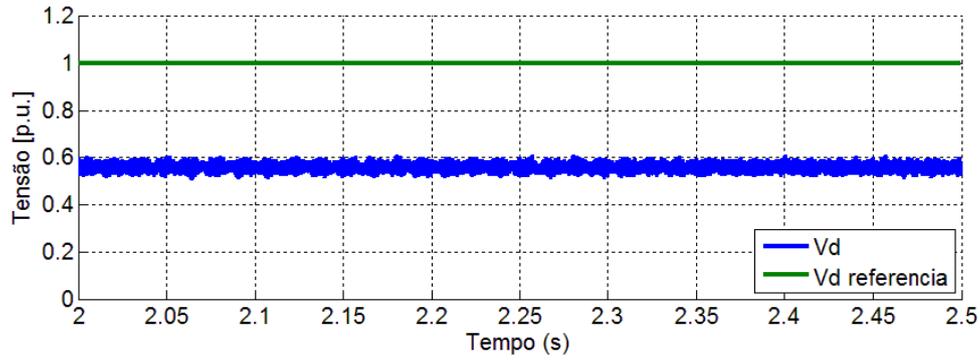


Figura 60 – Tensão CC (p.u.) no inversor, para uma queda de tensão de 0,4 p.u. na rede CA do lado retificador.

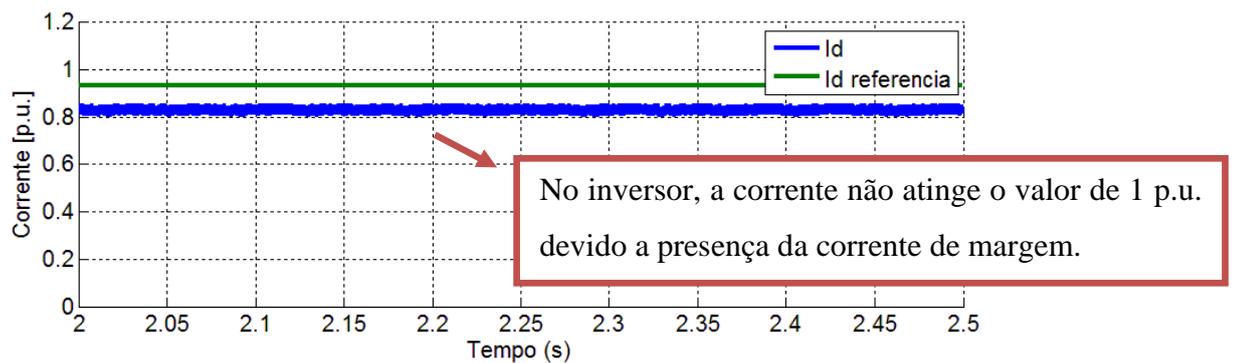


Figura 61 – Corrente CC (p.u.) no inversor, para uma queda de tensão de 0,4 p.u. na rede CA do lado retificador.

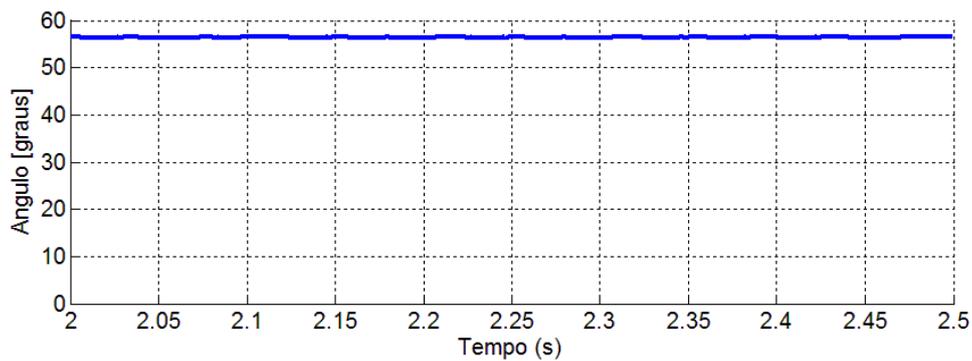


Figura 62 - Ângulo gama do inversor, para uma queda de tensão de 0,4 p.u. na rede CA do lado retificador.

### 7.2.3 Falta CC

Agora será simulada uma falta CC no terminal retificador do elo de corrente contínua, através da aplicação de um curto franco entre o reator de alisamento e a linha CC, conforme apresentado na Figura 63. A duração da falta na linha CC é de 100 ms e o

instante em que ocorre a falta é 2,0 segundos. Na Figura 64 é apresentada a corrente do curto CC simulado.

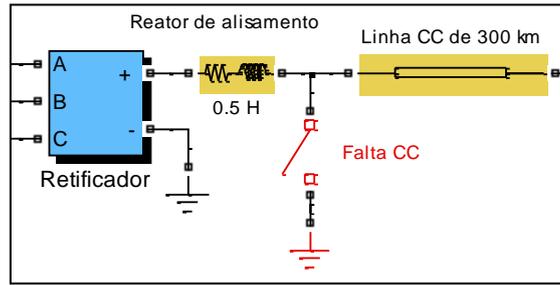


Figura 63 - Curto CC no lado do retificador.

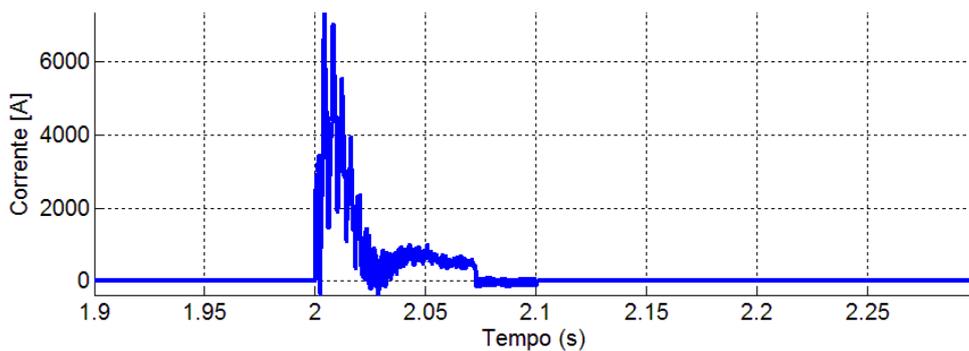


Figura 64 –Corrente da falta CC no terminal retificador.

A Figura 65 e a Figura 66 representam a tensão da linha CC e corrente CC no terminal retificador durante uma falta CC aplicada no terminal retificador. No instante em que a falta é aplicada ( $t = 2,0s$ ), a corrente CC no retificador aumenta rapidamente para 2,3 pu. A tensão da linha CC no terminal retificador reduz imediatamente para zero após a ocorrência da falta e permanece em zero até a falta ser eliminada.

Esta queda de tensão CC é vista pelo VDCOL, que reduz a corrente de referência para 0,3 pu no retificado. O aumento do ângulo de disparo faz com que a corrente reduza até a nova referência, a diminuição da tensão CC no terminal retificador reduz a diferença de tensão entre os dois terminais do elo, reduzindo o valor da corrente CC. Contudo, uma corrente CC ainda continua a circular para o terra, o sistema CA de entrada mantém o fluxo de potência alimentando o curto.

Então, em  $t = 2,75$  segundos, o ângulo de disparo  $\alpha$  do retificador é forçado a 165 graus, conforme a Figura 67. O retificador opera agora no modo inversor. A tensão da linha CC torna-se negativo e a a corrente permanece positiva, fazendo com que a

energia armazenada na linha seja devolvida à rede CA, causando uma rápida extinção da corrente de falta no seu próximo cruzamento da corrente em zero. A proteção dos conversores é responsável por detectar a ocorrência da falta, assim como perceber se a mesma ocorre na parte CA ou CC do sistema. Um vez detectada, a proteção força o ângulo de disparo em 165 graus. Na Figura 67 é possível observar o comportamento dos controles do retificador, que sofrem uma mudança temporária do controle entre aproximadamente 2,07 e 2,12 segundos.

O Inversor também avança o ângulo gama do inversor, ilustrado na Figura 68. Ambos conversores estão operando como inversor, descarregando a linha o mais rápido possível, extinguindo a falta.

Então,  $\alpha$  é liberado em  $t = 2,1$  segundos e após a falta ser extinta, a tensão CC e a corrente CC nominais são recuperadas em cerca de 0,025 segundos. Devido ao controle sobre o ângulo de disparo a corrente foi reduzida a zero em menos de 0,08 segundos. Durante a recuperação do elo, após a eliminação da falta, o VDCOL altera a referência de corrente conforme o aumento da tensão CC, até atingir novamente 1 p.u. Assim como visto na teoria, durante a falta a constante de tempo do VDCOL é rápida, e durante a recuperação é lenta.

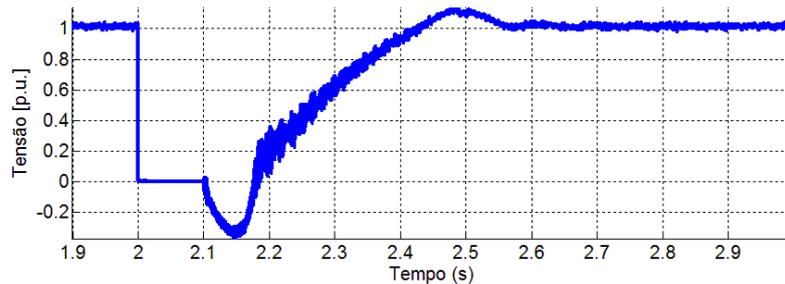


Figura 65 - Tensão CC (p.u.) no retificador, para uma falta CC.

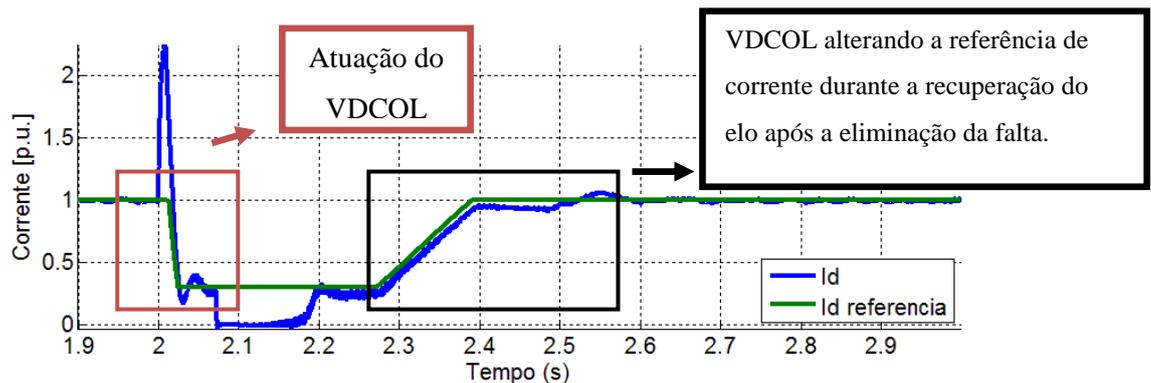


Figura 66 - Corrente (p.u.) no retificador, para uma falta CC.

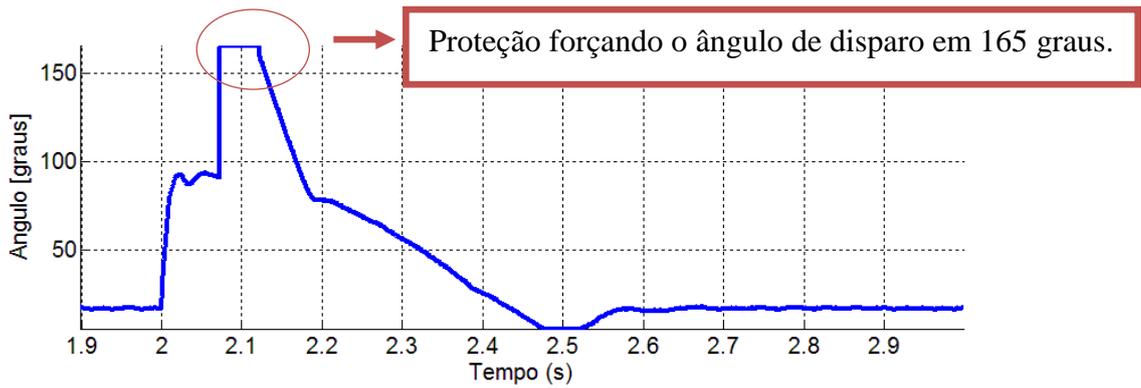


Figura 67 - Ângulo de disparo do retificador, para uma falta CC.

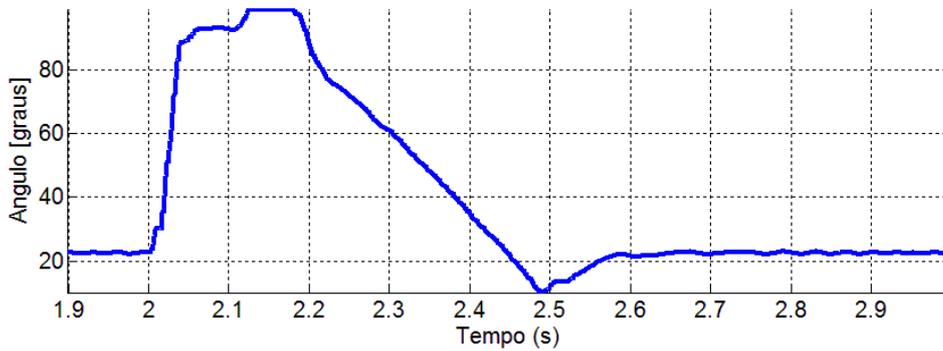


Figura 68 - Ângulo gama do inversor, para uma falta CC.

Quando o modelo CCAT é simulado para a falta CC no terminal retificador, observa-se que a tensão da linha CC no inversor retificador sofre grandes oscilações. A tensão CC oscila entre -1 e 1,5, como mostrado na Figura 69.

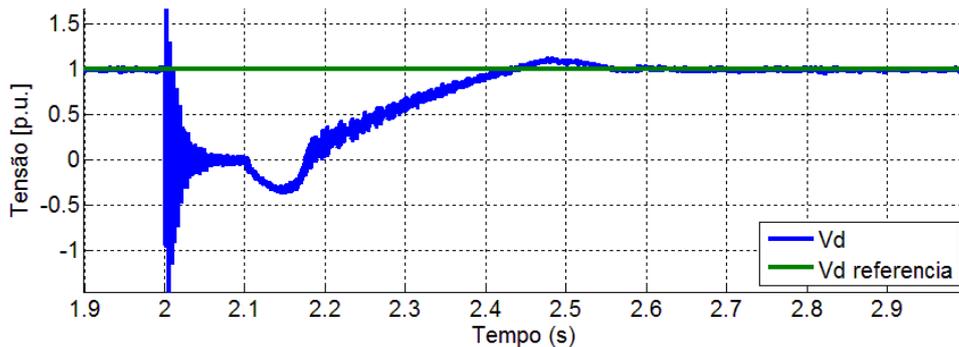


Figura 69 - Tensão CC (p.u.) no inversor, para uma falta CC.

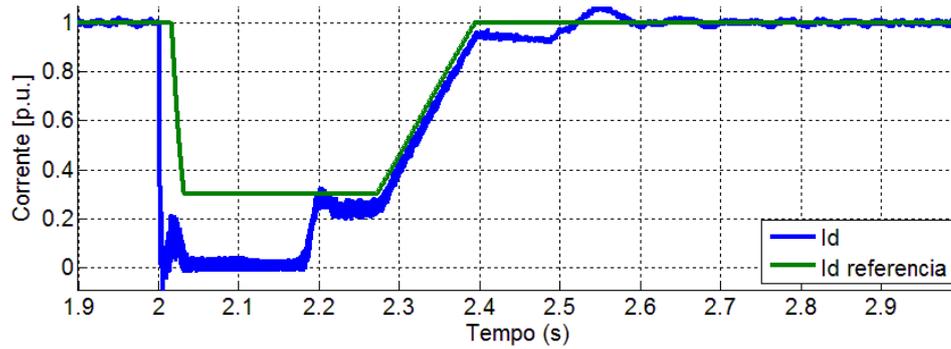


Figura 70 - Corrente (p.u.) no inversor, para uma falta CC.

A Figura 71 e a Figura 72 representam a tensão CA e corrente CA nos terminais de entrada do retificador. E, a Figura 73 e a Figura 74 representam a tensão CA e corrente CA nos terminais do inversor durante a falta na linha CC. Tanto no lado CA do retificador e no lado inversor que a tensão sofre uma mudança considerável. Durante a falta, a tensão no lado retificador cai de 0,6 pu e a tensão no lado inversor aumenta de 0,1 pu.

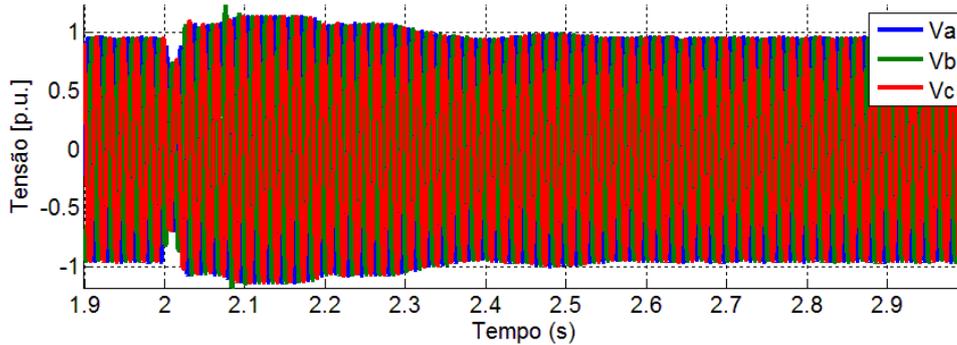


Figura 71 - Tensão CA (p.u.) no retificador, para uma falta CC.

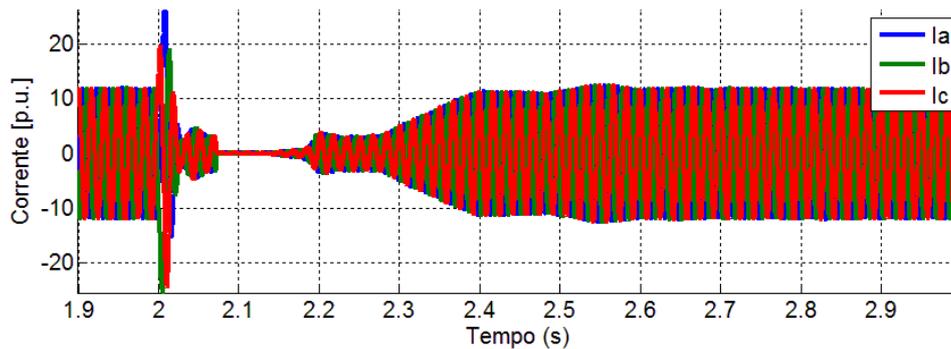


Figura 72 - Corrente CA (p.u.) no retificador, para uma falta CC.

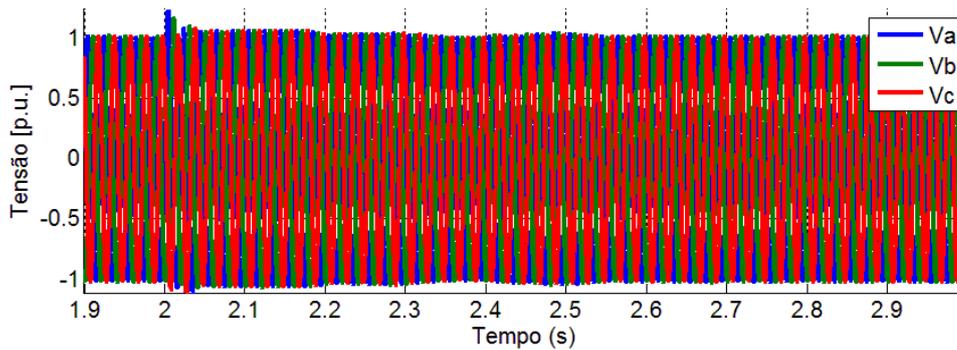


Figura 73 – Tensão CA (p.u.) no inversor, para uma falta CC.

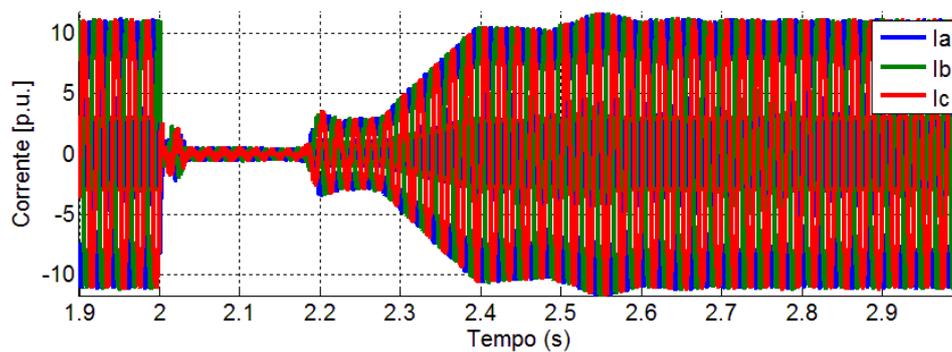


Figura 74 - Corrente CA (p.u.) no inversor, para uma falta CC.

A falta na linha CC tem um grande impacto nas correntes de linha CA em ambos os lados. As correntes de CA no lado inversor, chegam a zero no instante em que a falta ocorre. As correntes no lado CA do retificador chegam ao dobro do valor nominal em menos de 0,01 segundos a partir do momento de ocorrência de falta.

#### 7.2.4 Degrau na referência de tensão

Em  $t = 2,7$  segundos, um degraú de 10% é aplicado durante 100 ms na referência de tensão. A Figura 75 e a Figura 76 apresentam as tensões CC dos terminais retificador e inversor, respectivamente, para o degraú de 10% na referência de tensão, a resposta ao degraú é bem controlada e estável. A tensão no terminal inversor rastreia efetivamente a

nova referência de tensão, enquanto o terminal retificador permanece com a mesma referência de corrente.

Quando a tensão no inversor é reduzida pelo aumento do ângulo gama (Figura 78), a diferença de tensão entre os terminais retificador e inversor torna-se maior, resultando no aumento da corrente CC. Contudo o controle do retificador reduz o valor da corrente novamente para o seu valor nominal através do aumento do ângulo de disparo, conforme apresentado na Figura 77. A corrente atinge e permanece em 1 p.u. após 0,05 segundos.

O comportamento do elo CCAT frente a esta perturbação caracteriza um elo CCAT operando em controle de corrente, ou seja, mantendo a corrente CC sempre em seu valor nominal. Caso o elo CCAT operasse em controle de potência, o controle do elo atuaria com o intuito de garantir uma potência nominal e, portanto, aumentaria a referência de corrente, de forma a manter o produto de tensão e corrente.

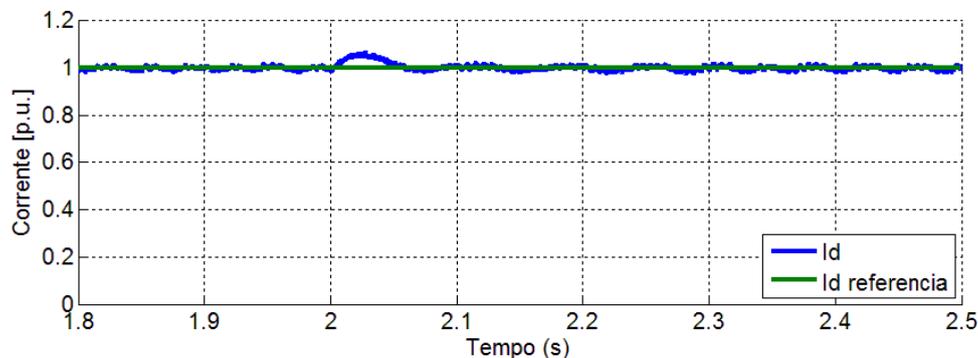


Figura 75 – Corrente CC (p.u.) no retificador, para um degrau na referência de tensão.

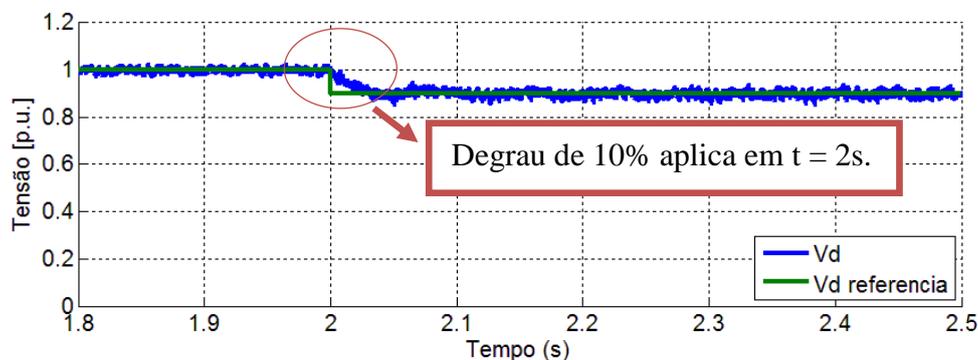


Figura 76 - Tensão CC (p.u.) no inversor, para um degrau na referência de tensão.

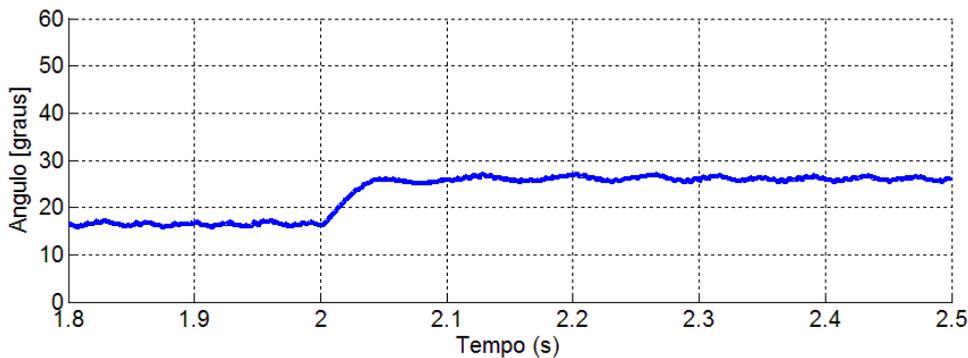


Figura 77 - Ângulo de disparo do retificador, para um degrau na referência de tensão.

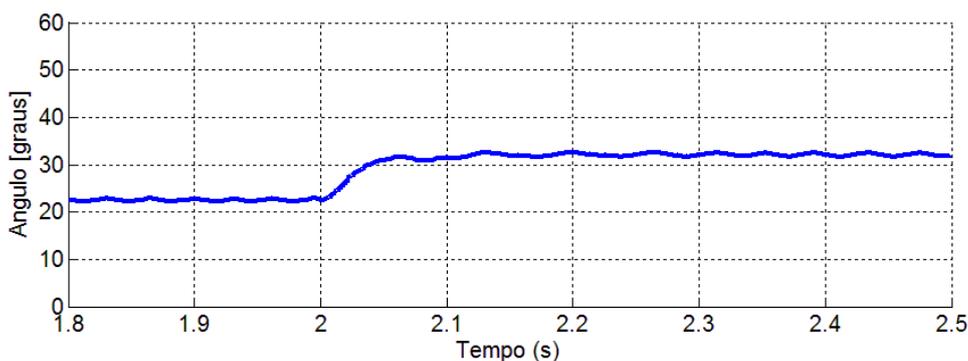


Figura 78 - Ângulo gama do inversor, para um degrau na referência de tensão.

### 7.2.5 Curto monofásico no lado CA do terminal inversor

Neste caso, será simulado um curto circuito monofásico franco no lado CA do terminal inversor, aplicado no instante de tempo  $t = 2,0$  segundos, com duração de 100 ms. A Figura 79 à Figura 89 mostram o comportamento do sistema após a aplicação da falta e a resposta do sistema após a eliminação da falta.

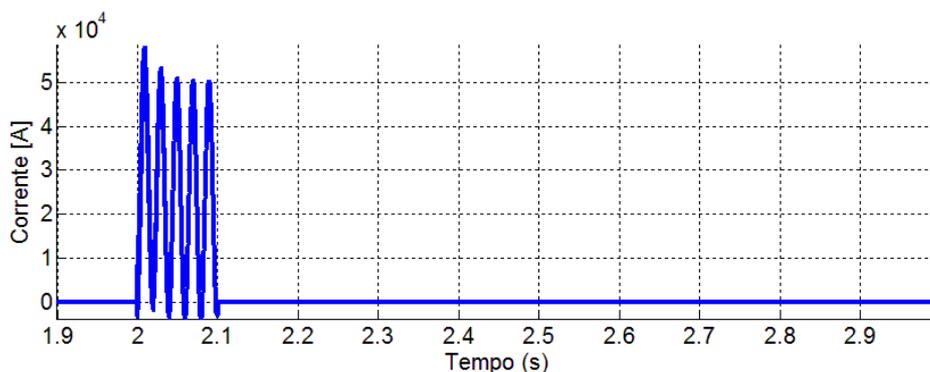


Figura 79 - Corrente da falta CA, para um curto monofásico no terminal inversor.

As respostas da corrente CC e da tensão CC nos terminais do retificador são apresentadas na Figura 80 e na Figura 81, respectivamente. As respostas da corrente CC e da tensão CC nos terminais do inversor são apresentadas na Figura 82 e na Figura 83, respectivamente.

Quando a falta é aplicada (em  $t = 2,0$  segundos), devido a redução da tensão CA no barramento inversor, no instante inicial da falta uma falha de comutação inevitável ocorre no terminal inversor. Como resultado, a tensão CC entra em colapso e a corrente CC atinge 2 p.u., em ambos os terminais. A corrente CC atinge 2 p.u. antes da atuação do controlador controle de forma a reduzir-la.

O controlador de corrente do retificador tenta reduzir a corrente através do aumento do ângulo de disparo e, portanto, o retificador entra na região de inversor, conforme apresentado na Figura 84. A queda de tensão é vista pelo VDCOL, que reduz a corrente de referência para 0,3 p.u., reduzindo o valor da corrente CC.

Durante o período da falta o conversor apresenta falhas de comutação, observadas pelo pico de corrente e pela queda de tensão próximos de 2,1 segundo. Após a falta ser eliminada, em  $t = 2,1$  segundos, o VDCOL opera e eleva a referência de corrente novamente para 1 p.u., com uma constante de tempo na recuperação muito menor que a constante de tempo durante a falta. Após o período de extinção do curto-circuito, pode-se perceber que em menos de 0,35 segundos o sistema volta às suas condições normais de operação. As tensões CC são invertidas por alguns momentos, mas se recuperam rapidamente após a falta ser removida.

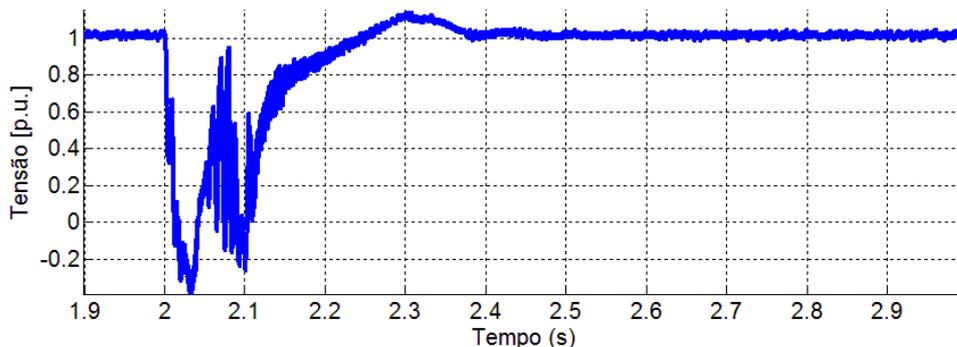


Figura 80 - Tensão CC (p.u.) no retificador, para um curto monofásico no terminal inversor.

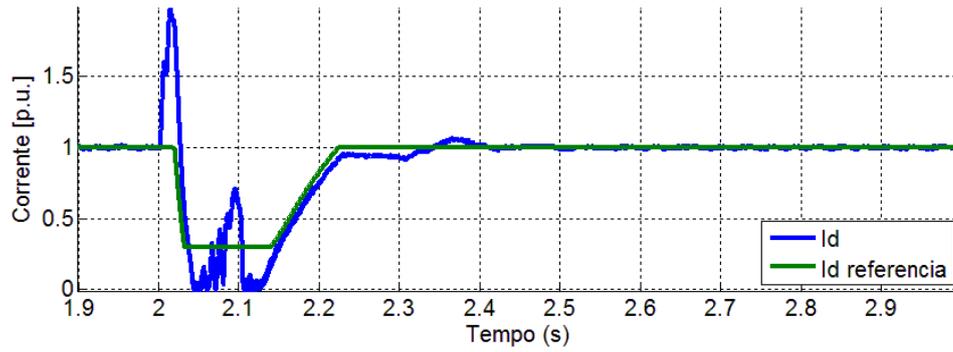


Figura 81 - Corrente CC (p.u.) no retificador, para um curto monofásico no terminal inversor.

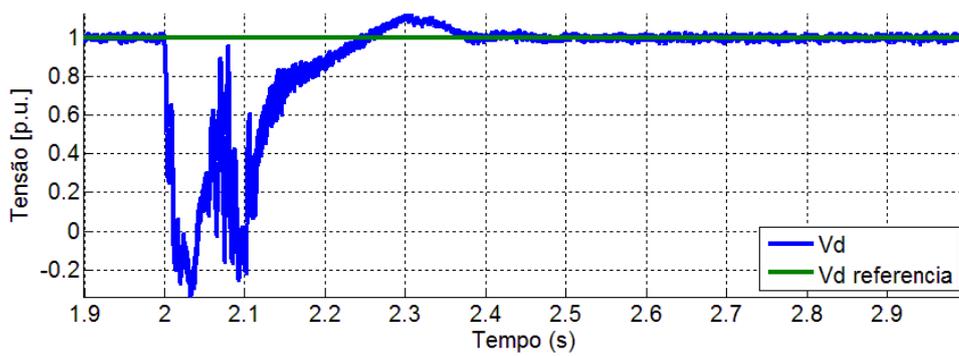


Figura 82 - Tensão CC (p.u.) no inversor, para um curto monofásico no terminal inversor.

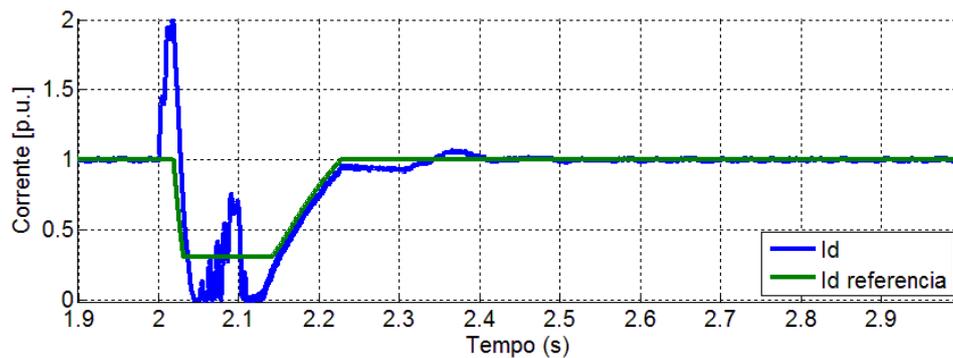


Figura 83 - Corrente CC (p.u.) no inversor, para um curto monofásico no terminal inversor.

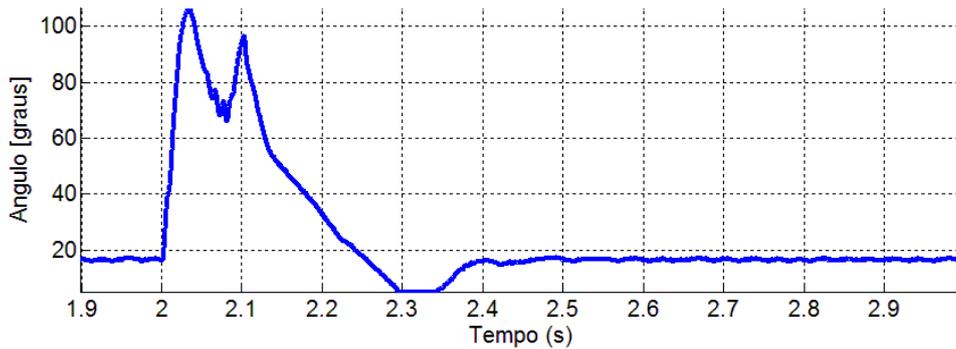


Figura 84 - Ângulo de disparo do retificador, para um curto monofásico no terminal inversor.

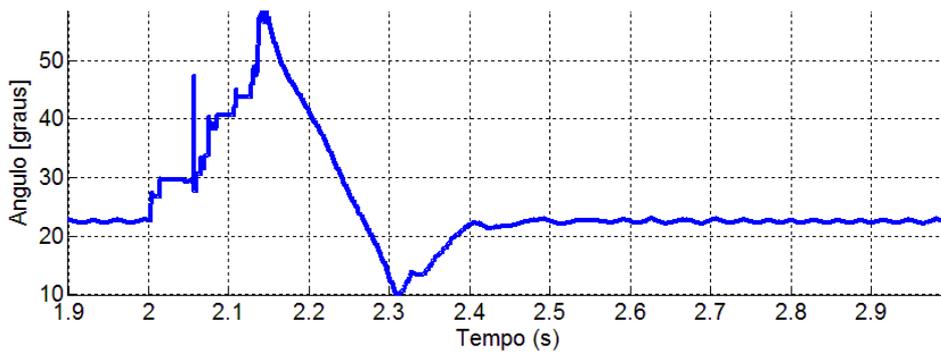


Figura 85 - Ângulo gama do inversor, para um curto monofásico no terminal inversor.

A Figura 86 e a Figura 88 são as formas de onda de tensão CA dos terminais de entrada do retificador e do inversor quando o sistema CCAT é executado sob condição de um curto monofásico no terminal inversor. As tensões CA nos lado inversor e retificador são restauradas ao normal após a eliminação da falta.

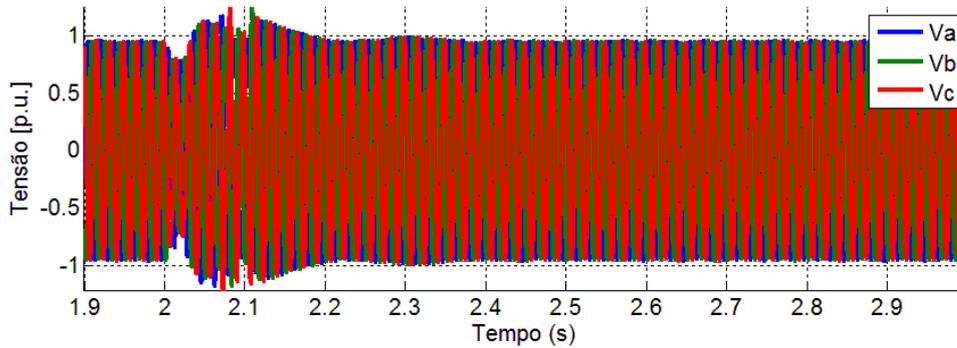


Figura 86 - Tensão CA (p.u.) no retificador, para um curto monofásico no terminal inversor.

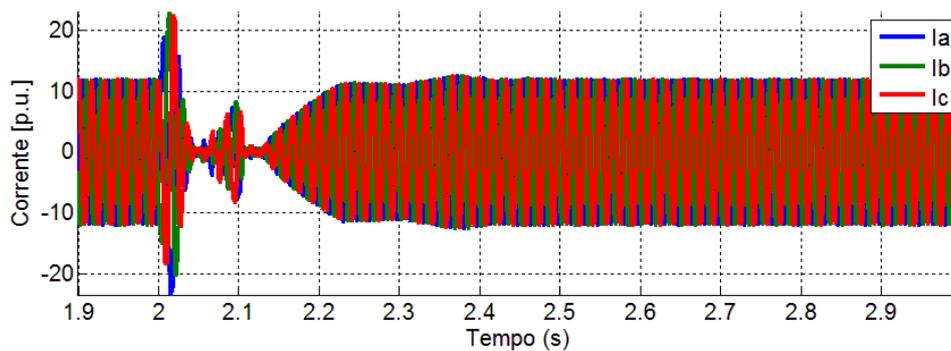


Figura 87 - Corrente CA (p.u.) no retificador, para um curto monofásico no terminal inversor.

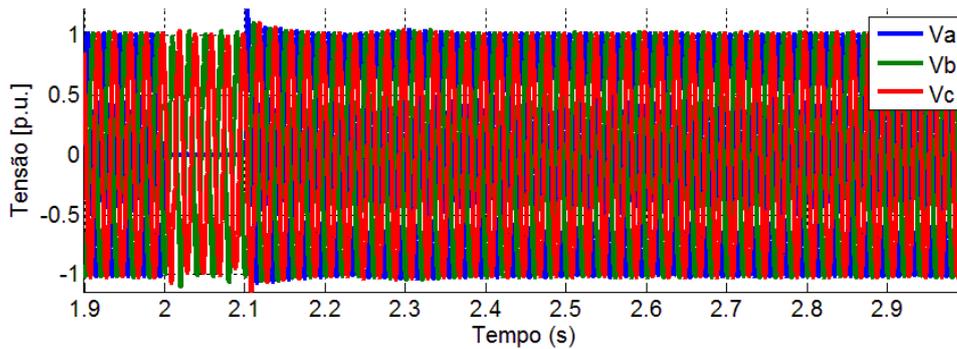


Figura 88 - Tensão CA (p.u.) no inversor, para um curto monofásico no terminal inversor.

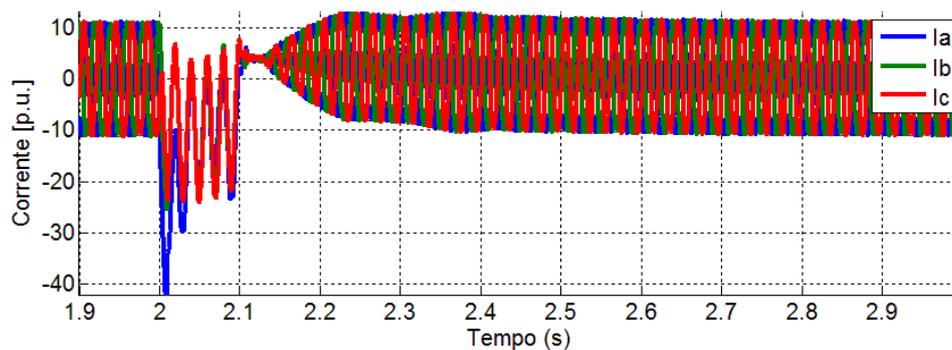


Figura 89 – Corrente CA (p.u.) no inversor, para um curto monofásico no terminal inversor.

### 7.2.5.1 Efeito de diferentes ajustes do controle de corrente

#### ➤ Efeito de diferentes ajustes no controle de corrente do retificador

Da Figura 90 até a Figura 95 são apresentados os resultados para o mesmo curto monofásico realizado no item anterior, mas adotando ajustes diferentes nos ganhos do controle de corrente do retificador, a saber:

- Ganho originais:  $k_p = 45$  ;  $k_i = 4500$
- Ganho maiores:  $k_p = 3 \times 45$  ;  $k_i = 3 \times 4500$
- Ganho menores:  $k_p = 45/3$  ;  $k_i = 4500/3$

Verifica-se que o ajuste com ganhos maiores promoveu uma recuperação mais rápida, atingindo 1 p.u. em menos de 50 ms após a eliminação da falta em 2,1 segundos. O ajuste reduziu o valor do pico de corrente inicial de 2.0 p.u., consequente da aplicação do curto monofásico, para 1,5 p.u.. Para este ajuste, o conversor consegue controlar efetivamente a corrente durante o período da falta, mantendo a corrente no valor de referência especificado pelo VDCOL. Além disso, não ocorrem falhas de comutação durante o período de recuperação. Contudo, pode-se observar que este ajuste resulta num comportamento mais oscilatório das correntes CC (Figura 91), comprometendo o seu desempenho. Este comportamento também pode ser observado pelo ângulo de disparo do retificador (Figura 94).

Investigou-se também a adoção de um ajuste com ganhos menores, o sistema não apresenta mais o perfil oscilatório, contudo a corrente atinge um pico inicial de aproximadamente 2,5 p.u., conforme a Figura 91. Para este ajuste, o conversor não consegue controlar efetivamente a corrente durante o período de falta, apagando antes de 2,1 segundos. Além disso recuperação do sistema é lenta, mesmo 350 ms após a eliminação do defeito a corrente CC ainda não atingiu o valor de 1p.u..

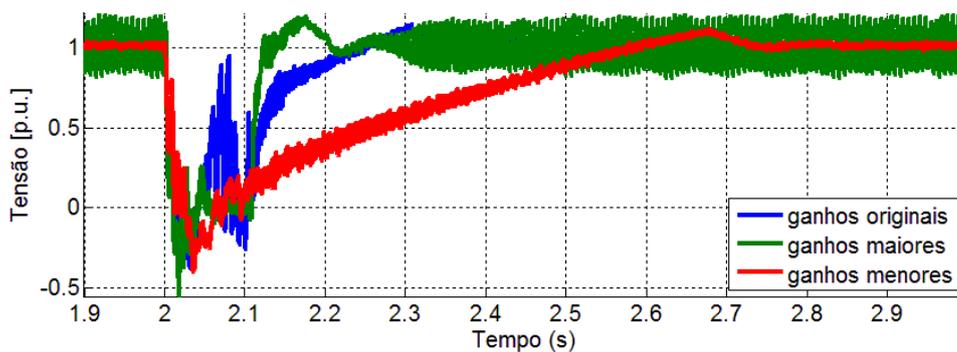


Figura 90 - Tensão CC (p.u.) no retificador, para um curto monofásico no terminal inversor, variando os ganhos do retificador.

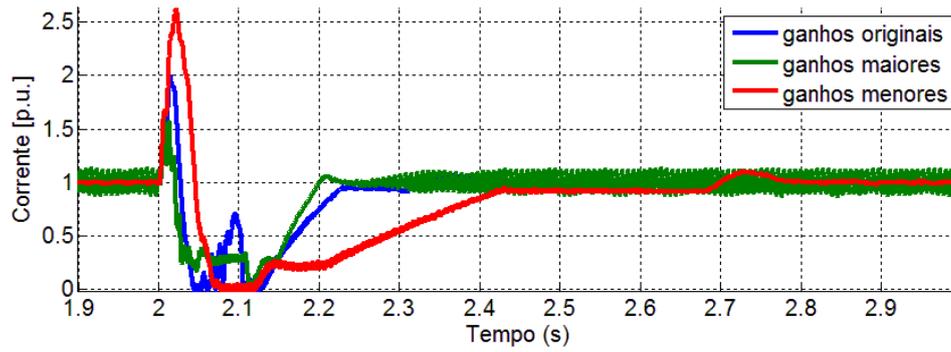


Figura 91 - Corrente CC (p.u.) no retificador, para um curto monofásico no terminal inversor, variando os ganhos do retificador.

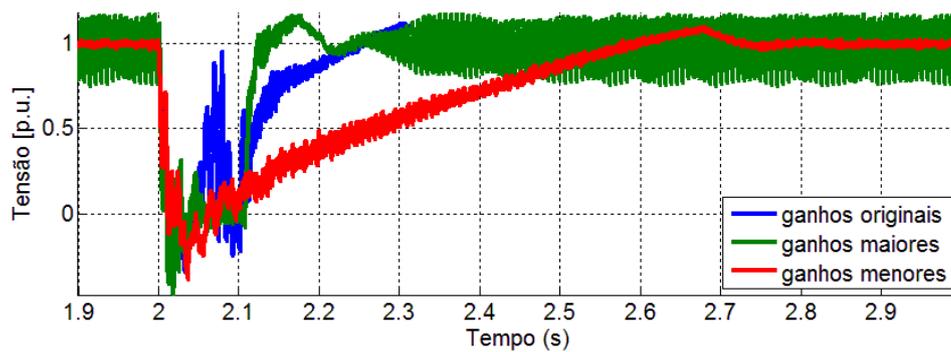


Figura 92 - Tensão CC (p.u.) no inversor, para um curto monofásico no terminal inversor, variando os ganhos do retificador.

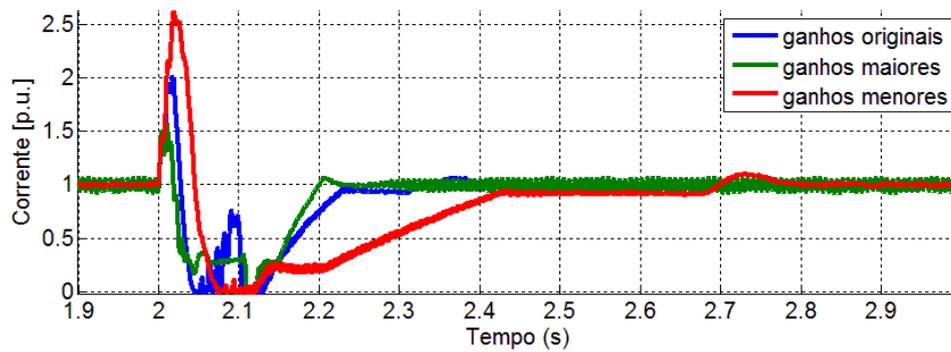


Figura 93 - Corrente CC (p.u.) no inversor, para um curto monofásico no terminal inversor, variando os ganhos do retificador.

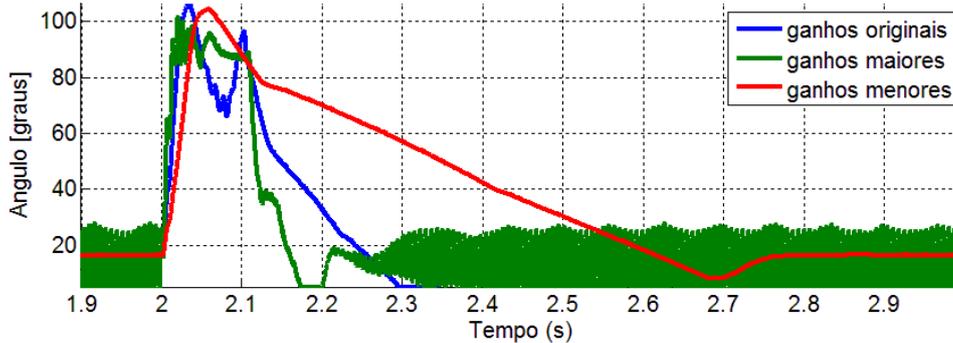


Figura 94 - Ângulo de disparo do retificador, para um curto monofásico no terminal inversor, variando os ganhos do retificador.

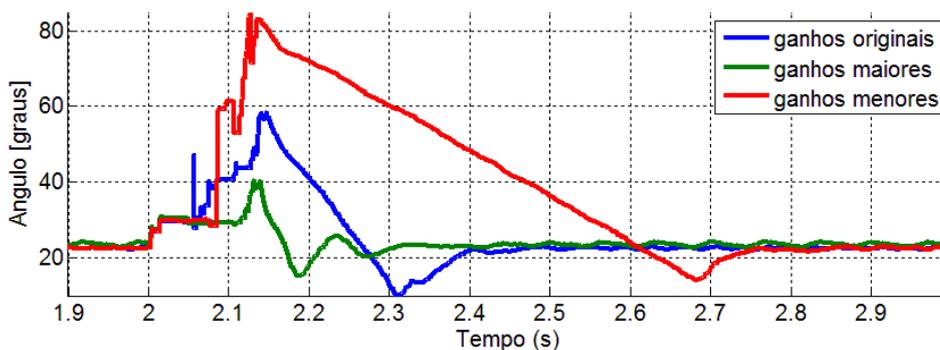


Figura 95 - Ângulo gama do inversor, para um curto monofásico no terminal inversor, variando os ganhos do retificador.

➤ *Efeito de diferentes ajustes no controle de corrente do inversor*

Da Figura 96 até a Figura 101 são apresentados os resultados para o mesmo curto monofásico realizado no item anterior, mas adotando ajustes diferentes nos ganhos do controle de corrente do inversor, a saber:

**Ganho originais:**  $k_p = 92$  ;  $k_i = 4500$

**Ganho maiores:**  $k_p = 3 \times 92$  ;  $k_i = 3 \times 4500$

**Ganho menores:**  $k_p = 92/3$  ;  $k_i = 4500/3$

Verifica-se que os ajustes dos ganhos não promoveram diferenças significativas durante o período da duração da falta. No período de recuperação, o ajuste com ganho

maiores resultou em falhas de comutação, verificadas pelos picos de correntes na Figura 99 e pelas quedas de tensão na Figura 98. Pode-se observar na Figura 101, que para o ajuste com ganhos maiores o valor de gama varia mais rapidamente do que para os outros ajustes. No instante da ocorrência da falha, o valor de gama para o ajuste com ganhos maiores estava menor que os demais. Um valor de gama menor implica numa margem de comutação menor, resultando neste caso na ocorrência da falha de comutação.

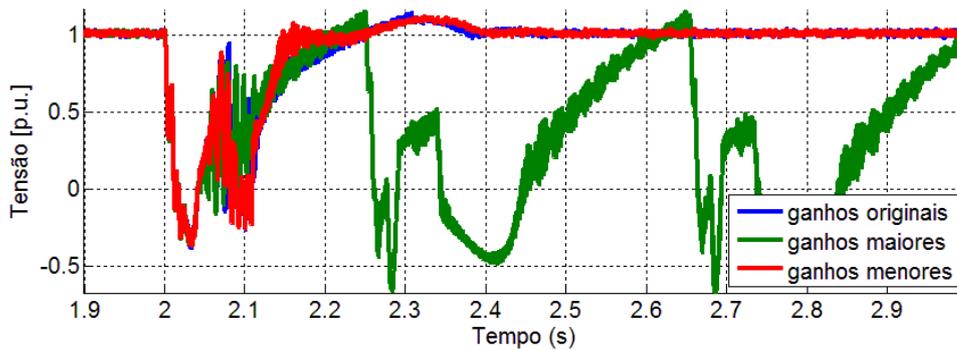


Figura 96 - Tensão CC (p.u.) no retificador, para um curto monofásico no terminal inversor, variando os ganhos do inversor.

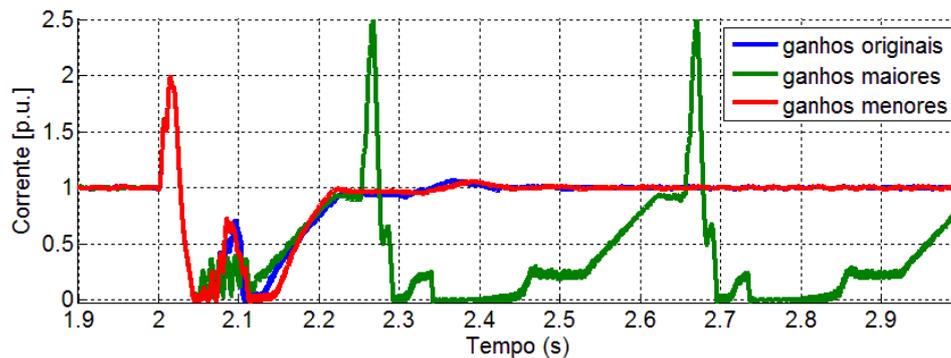


Figura 97 - Corrente CC (p.u.) no retificador, para um curto monofásico no terminal inversor, variando os ganhos do inversor.

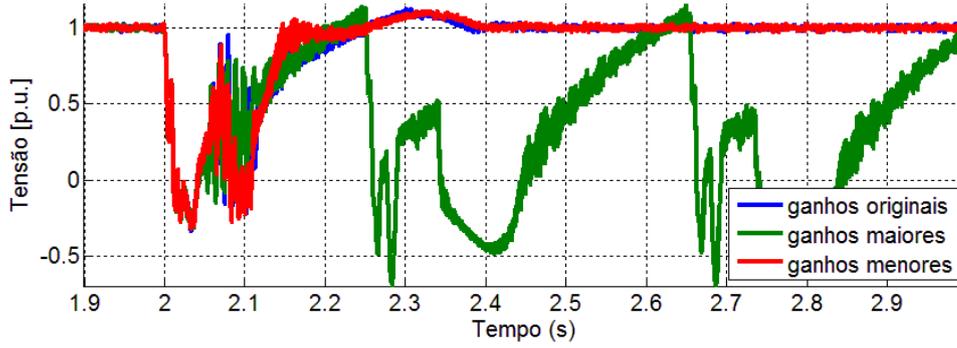


Figura 98 - Tensão CC (p.u.) no inversor, para um curto monofásico no terminal inversor, variando os ganhos do inversor.

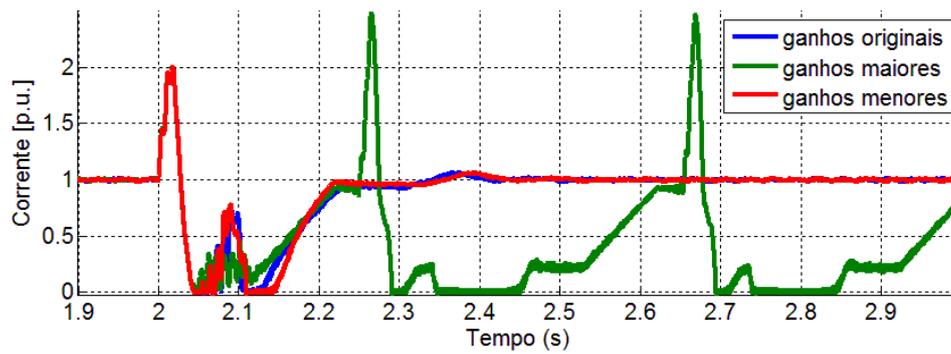


Figura 99 - Corrente CC (p.u.) no inversor, para um curto monofásico no terminal inversor, variando os ganhos do inversor.

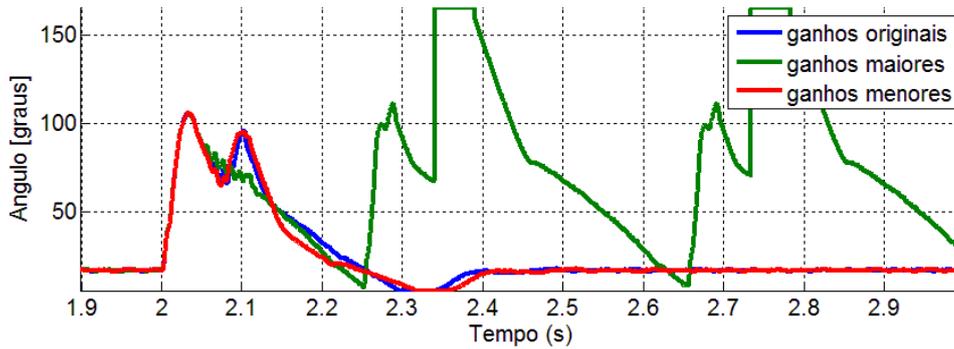
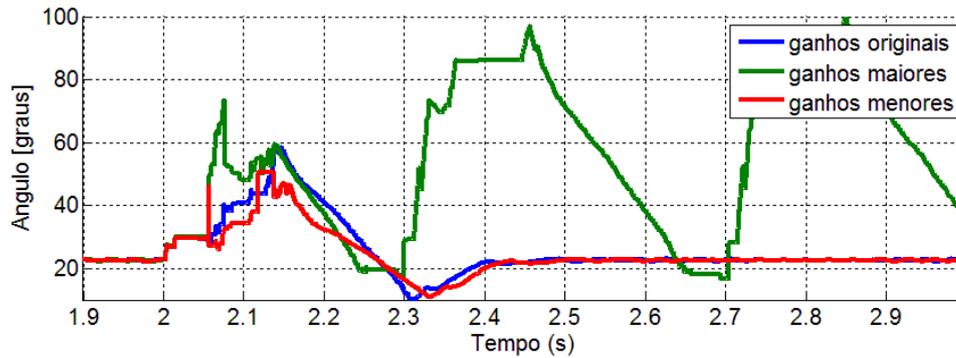


Figura 100 - Ângulo de disparo do retificador, para um curto monofásico no terminal inversor, variando os ganhos do inversor.



**Figura 101 - Ângulo gama do inversor, para um curto monofásico no terminal inversor, variando os ganhos do inversor.**

Para o caso de um curto-circuito monofásico no terminal inversor, foi observado a sensibilidade dos ganhos do controlador de corrente. A partir das simulações, pode-se concluir que é possível ter diferentes desempenhos pela alteração dos ajustes dos ganhos do controlador de corrente. Contudo, não é possível afirmar que o aumento ou a diminuição dos ganhos implica necessariamente num sistema com um desempenho melhor. As condições operativas que ditaram os valores dos ganhos, tanto para o retificador quanto para o inversor, a serem implementados.

# Capítulo 8

---

## Conclusão e Trabalhos Futuros

### 8.1 Conclusão

Como um tema que está em relevância nos dias de hoje, a transmissão em corrente contínua em alta tensão é uma tecnologia que precisa ser difundida e aprofundada. De forma a realizar uma análise do comportamento do sistema CCAT e se o seu controle atua de forma satisfatória, o sistema de transmissão desse trabalho foi simulado para as seguintes condições operacionais:

- ✓ Condição de operação normal.
- ✓ Falta na linha CC no terminal retificador.
- ✓ Falta CA monofásica no lado CA do terminal inversor.
- ✓ Queda de tensão na fonte alimentadora.

Após o estudo realizado sobre os controles do elo de corrente contínua, o presente trabalho permitiu chegar as seguintes conclusões:

No que diz respeito ao controle da corrente, o sistema CCAT consegue manter a corrente em seu valor nominal, mesmo com uma eventual queda da tensão CA que alimenta o elo de corrente contínua. Em condição de operação normal, o retificador controla a corrente no seu valor nominal pelo ajuste do ângulo de disparo. No caso de uma queda de tensão elevada, o terminal inversor se torna o responsável pelo controle da corrente. Neste caso, o valor de referência de corrente utilizado pelo controlador de corrente é alterado pelo valor da margem de corrente. Logo, o controle de corrente consegue manter a corrente no valor desejado, que é menor que o nominal.

De uma forma geral, pode-se observar que o sistema de transmissão em corrente contínua possui uma rápida resposta a essas perturbações. O VDCOL tem um papel

importante na recuperação do sistema CCAT de falhas de comutação, alterando o valor da referência de corrente durante a ocorrência da falta e durante a recuperação da falta.

O circuito apresenta proteções associadas a cada terminal conversor, que identificam a ocorrência de faltas e o tipo de falta. Uma vez identificadas, medidas são tomadas. No caso de uma falta CC aplicada no terminal retificador, o ângulo de disparo do retificador é forçado em 165 graus, de modo a fazer com que o retificador atue como um inversor, alterando o sentido do fluxo de potência na entrada do elo CC e, portanto, eliminando o defeito CC.

No caso da resposta a faltas CA, é feita uma análise da sensibilidade da resposta do elo CC associada a variação dos ganhos do controlador de corrente. Como na falta CA a queda de tensão é elevada, o controle de corrente em atuação é o do retificador. Assim sendo, é de se esperar que a resposta do sistema seja mais sensível a variações nos ganhos do controlador de corrente presente no retificador, como de fato foi observado pelas simulações. Para ganhos proporcional e integral maiores no retificador, a corrente de falta é limitada num valor menor que a corrente de falta para os ganhos originais. Neste caso, a corrente rastreia rapidamente o valor da referência de corrente, atingindo o regime permanente, após a eliminação da falta, em menos tempo que o caso original. Contudo, em regime permanente o sistema apresenta uma característica oscilatória, a corrente oscila entre 1,1 p.u. e 0,9 p.u., que é um comportamento indesejado e insatisfatório para o sistema.

A simulação com um degrau aplicado na referência de corrente comprova que não é feito o controle de potência do elo de corrente contínua. Quando o retificador está operando com controle de potência contante, o controlador de potência ajusta a ordem de corrente de modo que a potência desejada seja atingida. Para o sistema simulado, em regime permanente a corrente é mantida no seu valor nominal, independente da alteração do valor da referência de tensão.

## 8.2 Trabalhos Futuros

Como sugestão de estudos que não foram abordados neste trabalho, pode-se citar:

- Que estudos similares sejam realizados utilizando o software PSCAD, envolvendo a análise de sensibilidade de outros controles do elo de corrente contínua.
- Novos estudos considerando-se uma configuração de um bipolo ou de dois bipolos para o elo de corrente contínua

# Referências Bibliográficas

---

- [1] KUNDUR, P. **Power System Stability and Control**. New York, McGraw-Hill Inc, 1994.
- [2] ETT, G. et al. **Alternativas Não Convecionais para Transmissão de Energia Elétrica**. Brasília, Programa de P&D da ANEEL - Projeto Transmitir, 2011.
- [3] CARNEIRO JR., S. et al. “MODELAGEM DO ELO DE CORRENTE CONTÍNUA NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA EM SISTEMAS ASSÍNCRONOS DESEQUILIBRADOS”. *Revista Controle & Automação*, v. 20, Outubro, Novembro e Dezembro 2009.
- [4] LOPES, J. C. **Modelagem de Ligações em Corrente Contínua**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1982.
- [5] SZECHTMAN, M. “Parte I - Aspectos Gerais”. *HVDC - Transmissão em Corrente Contínua - Módulo I*. Rio de Janeiro, Curso Mais Valor, 2011.
- [6] SHENG, L. W.; RAZANI, A.; PRABHAKARAN, N. “Control of High Voltage Direct Current (HVDC) Bridges for Power Transmission Systems”, *IEEE Student Conference on Research and Development (SCoReD)*, 2010, p. 430-435.
- [7] GUARINI, P. D. C. *Alternativas de Planejamento para Inserção do Complexo Teles Pires no Sistema Interligado Nacional*. Dissertação de M.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.
- [8] ABB, *HVDC transmission for lower investment cost*. Disponível em: <http://www.abb.com/industries/db0003db004333/678bb83d3421169dc1257481004a4284.aspx> >. Acesso em: 26 Novembro 2011, 16:30:30.
- [9] CEPEL. **Curso Sobre Tópicos Básicos de Transmissão CCAT**. Brasília, 1988.
- [10] KIMBARK, E. W. **Direct Current Trasmission**. New York, Wiley-Interscience, 1975.
- [11] ARRILLAGA, J. **High Voltage Direct Current Transmission**. IEE Power Engineering Series 6, 1983.
- [12] GUARINI, A. D. P. “Harmônicos, Compensação Reativa e Filtros CA”. *HVDC - Transmissão em Corrente Contínua - Módulo I*. Rio de Janeiro, Curso Mais Valor, 2011.

- [13] ABDULLA, A. M.; EL-DIN, A. A. H.; ABBAS, A. “Investigation of HVDC link under Constant Power Control”. *Eleventh International Middle East Power Systems Conference*, 2006, p. 447-451.
- [14] MUTHUSAMY, A., *Selection of Dynamic performance Control Parameters for Classic HVDC in PSS/E - Otimization of CCA and VDCOL parameters*. Dissertação de M.Sc., Chalmers University of Technology, Goteborg, 2010.
- [15] EKSTROM, A.; LISS, G. “A Refined HVDC Control System”. *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, 1970, p. 723-732.
- [16] SZECHTMAN, M. “Parte II - Operação Interligada CA/CC/CA: Princípios de Controle, Regimes Permanente e Dinâmico”. *HVDC - Transmissão em Corrente Contínua - Módulo I*. Rio de Janeiro, Curso Mais Valor, 2011.
- [17] PADIYAR, K. R. et al. “Study of HVDC Controls Through Efficient Dynamic Digital Simulation of Converters”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 4, n. 4, p. 2171-2178, Outubro 1989.
- [18] SimPowerSystems™, **THYRISTOR-BASED HVDC LINK**. Disponível através do software do Matlab®.
- [19] FILHO, X. V. et al. “Experiência Brasileira na Execução de Estudos de Estabilidade utilizando Modelos de Elo de Corrente Contínua”. *Encontro Argentino-Brasileiro sobre Estabilidade de Sistema de Potência*. Foz do Iguaçu, Eletrobrás/Furnas, 1985.
- [20] CEPEL. **Curso Sobre Tópicos Básicos de Transmissão CCAT**. CEPEL, Rio de Janeiro, 2011.

# ANEXO 1 –Parâmetros Utilizados na Simulação

---

Neste anexo serão apresentados os parâmetros que utilizados no programa simulado.

## 8.3 Sistema CA de Entrada

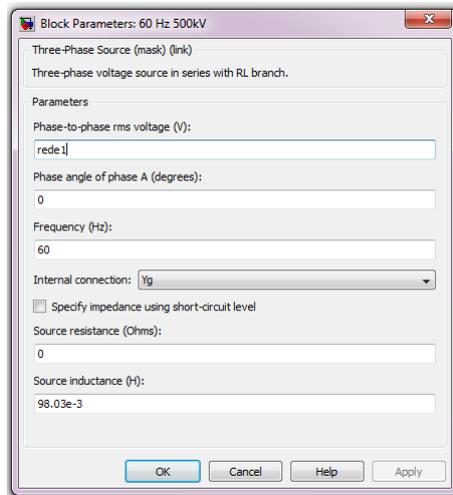


Figura 102 – Parâmetros - Sistema CA de Entrada.

## 8.4 Sistema CA de Saída

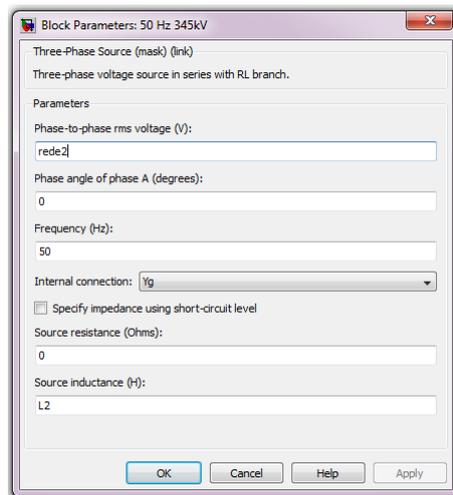


Figura 103 -Parâmetros - Sistema CA de Saída.

## 8.5 Estação Retificadora

### 8.5.1 Transformador

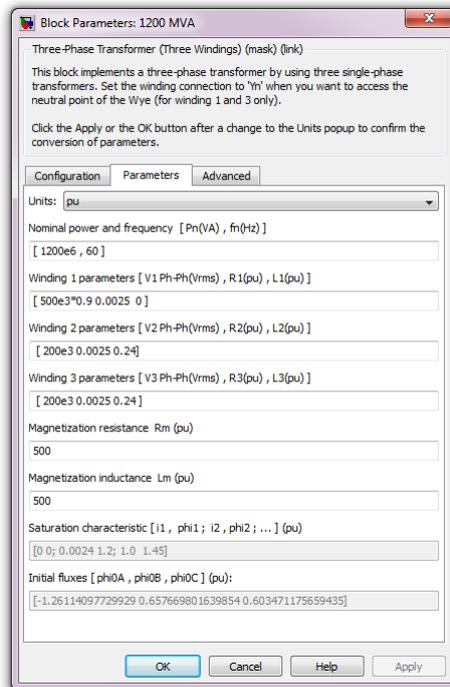


Figura 104 - Parâmetros – Transformador abaixador.

### 8.5.2 Reator de Alisamento

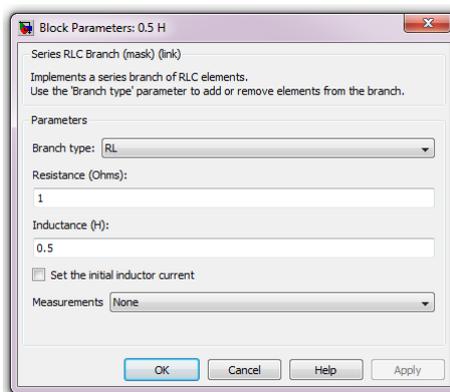


Figura 105 - Parâmetros – Reator de alisamento.

### 8.5.3 Ponte Trifásica de Três Níveis (são utilizadas duas para se obter a ponte de 12 pulsos).

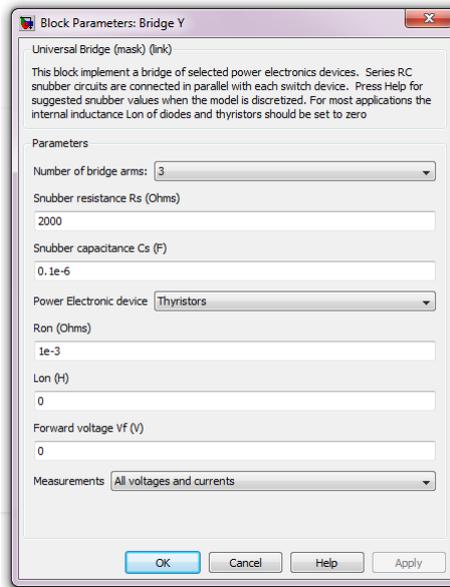


Figura 106 -Parâmetros – Ponte trifásica de três níveis

### 8.5.4 Sistema de Controle do Retificador

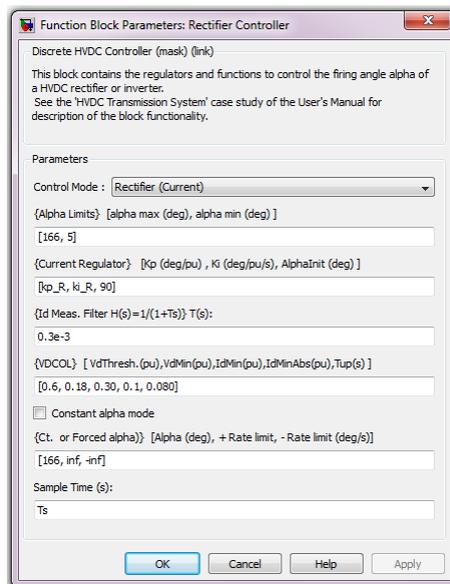


Figura 107 - Sistema de controle do retificador.

## 8.6 Estação Inversora

Essa estação possui os mesmos parâmetros da estação retificadora, com exceção ao transformador e do controle.

## 8.6.1 Transformador

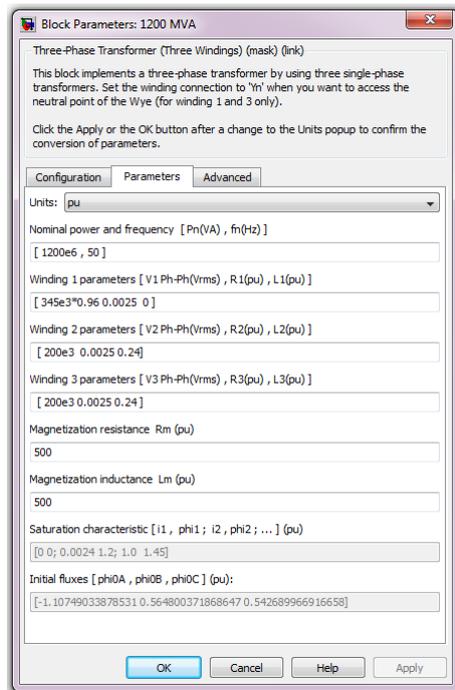


Figura 108 - Parâmetros – Transformador elevador.

## 8.6.2 Sistema de Controle do Inversor

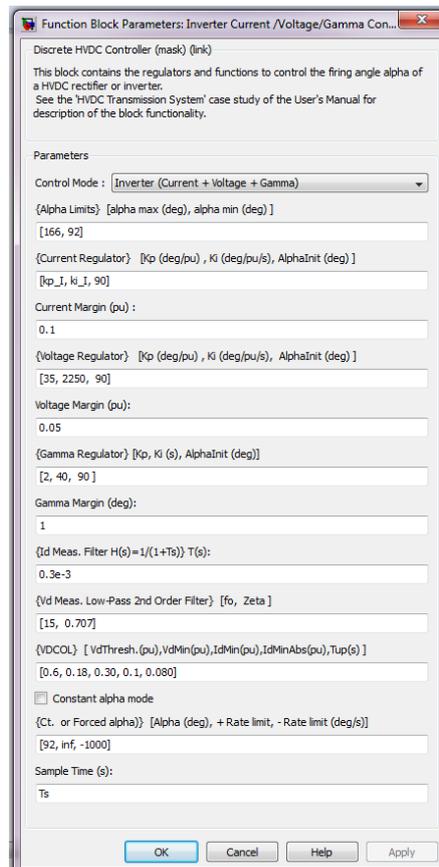


Figura 109 - Sistema de controle do inversor.

## 8.7 Falta CC

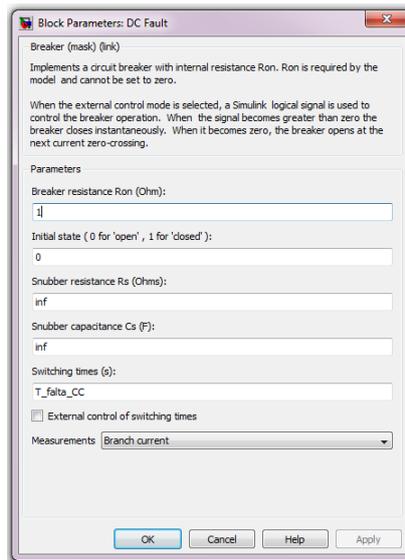


Figura 110 - Parâmetros - Falta CC.

## 8.8 Falta CA

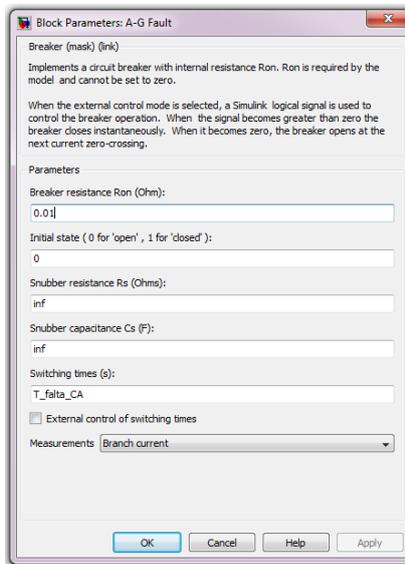


Figura 111 - Parâmetros - Falta CA.

## 8.9 Referência de Tensão

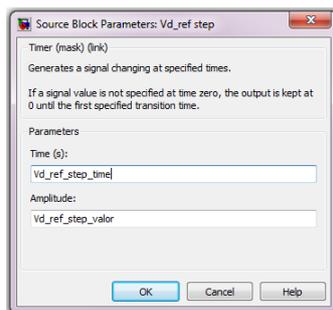


Figura 112 - Parâmetros - Referência de Tensão.

# APÊNDICE 1 - Rotina para Simular os Casos

---

```
clear all;
clc;

% Parâmetros para falta CA (tempos de chaveamento)
T_falta_CA=[2 2.1]*100; % *100 para não realizar a operação
% Parâmetros para falta CC (tempos de chaveamento)
T_falta_CC=[2 2.1]*100; % *100 para não realizar a operação

% Ganhos do controle de corrente do inversor (analisar o efeito da variação
% no desempenho do elo CC, analisar todos os casos para um curto mono
% fasico franco no terminal inversor, serão variados os ganhos no inversor
% e depois no retificador
kp_R=45;
ki_R=4500;
kp_I=92;
ki_I=4500;

% Para SCR=10
R=6.205; L1=13.96e-3; L2=28.0e-3;

% Tensões das redes CA, reduzindo o valor da tensão na rede 1 pode-se
% observar a troca dos controle, com o inversor controlando a corrente e o
% retificador controlando alfa minimo. Tentar identificar se existe
% operação para um ponto na parte quebrada.
rede1=500e3;
rede2=345e3;

% Referência da corrente, em 0,6s o sistema atinge o regime permanente com
% a referência em 1 pu, podendo ser alterada, 1+Id_ref_step_valor
Id_ref_step_time=0;
Id_ref_step_valor=0;

% Referência da tensão CC
Vd_ref_step_time=0;
Vd_ref_step_valor=1;

% Tempo de Simulação
Tsimu=3.0;

% Plotando os sinais%*****
% Intervalo de tempo dos gráficos
Tinicial=2.0;
Tfinal=2.5;
% Eixo dos gráficos
Yu=1.2;
Yd=0;
Zu=1.2;
Zd=0;
% Linhas
line=3;
% Tamanho da fonte para os gráficos
fonte=15;
```

```

% *****
% Operacao Normal

sim('power_hvdc12pulse_projeto') % Arquivo do Simulink com o sistema CCAT
caso='operacao_normal_';

angd=0; angu=60;
Tinicial=2.0;
Tfinal=2.5;
plot_projeto2; % Rotina que plota os gráficos

fourier_projeto; % Rotina que aplica a série de Fourier no lado CA do retificador
fourier_projeto1; % Rotina que aplica a série de Fourier no lado CA do inversor

% *****
% Operacao com tensão reduzida no retificador

rede1=300e3;
sim('power_hvdc12pulse_projeto')
caso='rede1_300e3_';

angd=0; angu=60;
Tinicial=2.0;
Tfinal=2.5;
plot_projeto2;

rede1=500e3;
% *****
% Alterando o valor da referencia do controle de tensao

Vd_ref_step_time=[0 2.0];
Vd_ref_step_valor=[1 0.9];
sim('power_hvdc12pulse_projeto')
caso='Vd_ref_09_2segundos_';

tempo=0;
Tinicial=1.8;
Tfinal=2.5;
angd=0; angu=60;
plot_projeto2;

Vd_ref_step_time=0;
Vd_ref_step_valor=1;
% *****
% Curto CC no terminal retificador
T_falta_CC=[2 2.1];

sim('power_hvdc12pulse_projeto')
caso='faltaCC_2_21_';

Tinicial=1.9;
Tfinal=3.0;
plot_projeto;

T_falta_CC=[2 2.1]*100; % *100 para não realizar a operação

```

```

% *****
% Variando os ganhos dos controles de corrente do retificador e do inversor
% para um curto monofasico na fase A da rede 2
kp_R=45; ki_R=4500; kp_I=92; ki_I=4500;

Tinicial=1.9;
Tfinal=3.0;

% Caso 1
T_falta_CA=[2 2.1];
sim('power_hvdc12pulse_projeto')
caso='faltaCA_2_21_';
plot_projeto;

VdL_R1=VdL_R;
Id_R1=Id_R;
Id_ref_R1=Id_ref_R;
alpha_ord_R1=alpha_ord_R;
Mode_R1=Mode_R;
VdL_I1=VdL_I;
Vd_ref_I1=Vd_ref_I;
Id_I1=Id_I;
Id_ref_I1=Id_ref_I;
alpha_ord_I1=alpha_ord_I;
Mode_I1=Mode_I;
gamma1=gamma;
Ia_I1=Ia_I;

% Caso 2
kp_R=45*3; ki_R=4500*3;
sim('power_hvdc12pulse_projeto')
caso='faltaCA_2_21_3CC_R_';
plot_projeto;

VdL_R2=VdL_R;
Id_R2=Id_R;
Id_ref_R2=Id_ref_R;
alpha_ord_R2=alpha_ord_R;
Mode_R2=Mode_R;
VdL_I2=VdL_I;
Vd_ref_I2=Vd_ref_I;
Id_I2=Id_I;
Id_ref_I2=Id_ref_I;
alpha_ord_I2=alpha_ord_I;
Mode_I2=Mode_I;
gamma2=gamma;
Ia_I2=Ia_I;

% Caso 3
kp_R=45; ki_R=4500; kp_I=92*3; ki_I=4500*3;
sim('power_hvdc12pulse_projeto');
caso='faltaCA_2_21_3CC_I_';
plot_projeto;

VdL_R3=VdL_R;
Id_R3=Id_R;
Id_ref_R3=Id_ref_R;
alpha_ord_R3=alpha_ord_R;
Mode_R3=Mode_R;

```

```

VdL_I3=VdL_I;
Vd_ref_I3=Vd_ref_I;
Id_I3=Id_I;
Id_ref_I3=Id_ref_I;
alpha_ord_I3=alpha_ord_I;
Mode_I3=Mode_I;
gamma3=gamma;
Ia_I3=Ia_I;

%Caso4
kp_R=45; ki_R=4500; kp_I=92/3; ki_I=4500/3;
sim('power_hvdc12pulse_projeto');
caso='faltaCA_2_21_1_3CC_I';
plot_projeto;

```

```

VdL_R4=VdL_R;
Id_R4=Id_R;
Id_ref_R4=Id_ref_R;
alpha_ord_R4=alpha_ord_R;
Mode_R4=Mode_R;
VdL_I4=VdL_I;
Vd_ref_I4=Vd_ref_I;
Id_I4=Id_I;
Id_ref_I4=Id_ref_I;
alpha_ord_I4=alpha_ord_I;
Mode_I4=Mode_I;
gamma4=gamma;
Ia_I4=Ia_I;

```

```

%Caso5
kp_R=45/3; ki_R=4500/3; kp_I=92; ki_I=4500;
sim('power_hvdc12pulse_projeto');
caso='faltaCA_2_21_1_3CC_R';
plot_projeto;

```

```

VdL_R5=VdL_R;
Id_R5=Id_R;
Id_ref_R5=Id_ref_R;
alpha_ord_R5=alpha_ord_R;
Mode_R5=Mode_R;
VdL_I5=VdL_I;
Vd_ref_I5=Vd_ref_I;
Id_I5=Id_I;
Id_ref_I5=Id_ref_I;
alpha_ord_I5=alpha_ord_I;
Mode_I5=Mode_I;
gamma5=gamma;
Ia_I5=Ia_I;

```

```

caso='faltaCA_2_21_todos_os_ganhos_R';
plot_projeto_ganhos;
caso='faltaCA_2_21_todos_os_ganhos_I';
plot_projeto_ganhos1;

```

```

T_falta_CA=[2 2.1]*100;
%*****

```

## APÊNDICE 2 - Rotina para Plotar as Curvas dos Casos

---

```
% *****
% Rotina para plotar os gráficos
% *****
tempo=0;
% Obtendo o tempo
time=AC_RETIFICADOR.time;

% Obtendo as tensoes CA no terminal retificador
Va=AC_RETIFICADOR.signals(1).values(:,1);
Vb=AC_RETIFICADOR.signals(1).values(:,2);
Vc=AC_RETIFICADOR.signals(1).values(:,3);

% Obtendo as correntes CA no terminal retificador
Ia=AC_RETIFICADOR.signals(2).values(:,1);
Ib=AC_RETIFICADOR.signals(2).values(:,2);
Ic=AC_RETIFICADOR.signals(2).values(:,3);

% Obtendo as tensoes CA no terminal inversor
Va_I=VI_abc_inv.signals(1).values(:,1);
Vb_I=VI_abc_inv.signals(1).values(:,2);
Vc_I=VI_abc_inv.signals(1).values(:,3);

% Obtendo as correntes CA no terminal inversor
Ia_I=VI_abc_inv.signals(2).values(:,1);
Ib_I=VI_abc_inv.signals(2).values(:,2);
Ic_I=VI_abc_inv.signals(2).values(:,3);

% Obtendo os sinais do retificador
VdL_R=rect.signals(1).values(:,1);
Id_R=rect.signals(2).values(:,1);
Id_ref_R=rect.signals(2).values(:,2);
alpha_ord_R=rect.signals(3).values;
Mode_R=rect.signals(4).values;

% Obtendo os sinais do inversor
VdL_I=inv.signals(1).values(:,1);
Vd_ref_I=inv.signals(1).values(:,2);
Id_I=inv.signals(2).values(:,1);
Id_ref_I=inv.signals(2).values(:,2);
alpha_ord_I=inv.signals(3).values;
Mode_I=inv.signals(4).values;
gamma=inv.signals(5).values;

% Obtendo as curvas das faltas
Falta_CA=Falta.signals(1).values;
Falta_CC=Falta.signals(2).values;

% Plotando os sinais do retificador e do inversor
tempo=Tinicial/Ts:Tfinal/Ts;

% Tensão CC (p.u.) no terminal retificador durante condição de operação normal
figure('Units','characters','Position',[0 10 200 25]);
hold on;
grid on
plot(time(tempo),VdL_R(tempo),'LineWidth',line);
```

```

xlabel('Tempo (s)', 'FontSize', fonte)
ylabel('Tensão [p.u.]', 'FontSize', fonte)
axis([Tinicial Tfinal Yd Yu]);
set(gca, 'fontsize', fonte)
hold off
figura= [caso 'Tensão_CC_retificador'];
print ('-dbitmap', figura)

% Corrente CC (p.u.) no terminal retificador durante condição de operação normal
figure('Units','characters','Position',[0 10 200 25]);
hold on
grid on
plot(time(tempo), Id_R(tempo), time(tempo), Id_ref_R(tempo), 'LineWidth', line);
legend('Id', 'Id referencia', 'Location', 'SouthEast');
xlabel('Tempo (s)', 'FontSize', fonte)
ylabel('Corrente [p.u.]', 'FontSize', fonte)
axis([Tinicial Tfinal Zd Zu]);
set(gca, 'fontsize', fonte)
hold off
figura= [ caso 'Corrente_CC_retificador'];
print ('-dbitmap', figura)

% Tensão CC (p.u.) no terminal inversor durante condição de operação normal
figure('Units','characters','Position',[0 10 200 25]);
hold on
grid on
plot(time(tempo), VdL_I(tempo), time(tempo), Vd_ref_I(tempo), 'LineWidth', line);
legend('Vd', 'Vd referencia', 'Location', 'SouthEast');
xlabel('Tempo (s)', 'FontSize', fonte)
ylabel('Tensão [p.u.]', 'FontSize', fonte)
axis([Tinicial Tfinal Yd Yu]);
set(gca, 'fontsize', fonte)
hold off
figura= [ caso 'Tensão_CC_inversor'];
print ('-dbitmap', figura)

% Corrente CC (p.u.) no terminal inversor durante condição de operação normal
figure('Units','characters','Position',[0 10 200 25]);
hold on
grid on
plot(time(tempo), Id_I(tempo), time(tempo), Id_ref_I(tempo), 'LineWidth', line);
legend('Id', 'Id referencia', 'Location', 'SouthEast');
xlabel('Tempo (s)', 'FontSize', fonte)
ylabel('Corrente [p.u.]', 'FontSize', fonte)
axis([Tinicial Tfinal Zd Zu]);
set(gca, 'fontsize', fonte)
hold off
figura= [caso 'Corrente_CC_inversor' ];
print ('-dbitmap', figura)

% *****

% Correntes CA (p.u.) no terminal retificador
figure('Units','characters','Position',[0 10 200 25]);
hold on
grid on
plot(time(tempo), Ia(tempo), time(tempo), Ib(tempo), time(tempo), Ic(tempo), 'LineWidth', line);
legend('Ia', 'Ib', 'Ic', 'Location', 'NorthEast');
xlabel('Tempo (s)', 'FontSize', fonte)

```

```

ylabel('Corrente [p.u.'],'FontSize',fonte)
set(gca,'fontsize',fonte)
axis('tight');
hold off
figura= [caso 'Correntes_CA_retificador' ];
print ('-dbitmap', figura)

% Tensões CA (p.u.) no terminal retificador
figure('Units','characters','Position',[0 10 200 25]);
hold on
grid on
plot(time(tempo),Va(tempo),time(tempo),Vb(tempo),time(tempo),Vc(tempo),'LineWidth',line);
legend('Va','Vb','Vc','Location','NorthEast');
xlabel('Tempo (s)','FontSize',fonte)
ylabel('Tensão [p.u.'],'FontSize',fonte)
set(gca,'fontsize',fonte)
axis('tight');
hold off
figura= [ caso 'Tensões_CA_retificador'];
print ('-dbitmap', figura)

% Correntes CA (p.u.) no terminal inversor
figure('Units','characters','Position',[0 10 200 25]);
hold on
grid on
plot(time(tempo),Ia_I(tempo),time(tempo),Ib_I(tempo),time(tempo),Ic_I(tempo),'LineWidth',line);
legend('Ia','Ib','Ic','Location','NorthEast');
xlabel('Tempo (s)','FontSize',fonte)
ylabel('Corrente [p.u.'],'FontSize',fonte)
set(gca,'fontsize',fonte)
axis('tight');
hold off
figura= [ caso 'Correntes_CA_inversor'];
print ('-dbitmap', figura)

% Tensões CA (p.u.) no terminal inversor
figure('Units','characters','Position',[0 10 200 25]);
hold on;
grid on;
plot(time(tempo),Va_I(tempo),time(tempo),Vb_I(tempo),time(tempo),Vc_I(tempo),'LineWidth',line);
legend('Va','Vb','Vc','Location','NorthEast');
xlabel('Tempo (s)','FontSize',fonte);
ylabel('Tensão [p.u.'],'FontSize',fonte);
set(gca,'fontsize',fonte)
axis('tight');
hold off;
figura= [caso 'Tensões_CA_inversor' ];
print ('-dbitmap', figura)

% *****

% angulo alpha
figure('Units','characters','Position',[0 10 200 25]);
hold on;
grid on;
plot(time(tempo),alpha_ord_R(tempo),'LineWidth',line);
xlabel('Tempo (s)','FontSize',fonte);
ylabel('Angulo [graus]','FontSize',fonte);
set(gca,'fontsize',fonte)

```

```

axis([Tinicial Tfinal angd angu]);
hold off;
figura= [caso 'angulo_alpha' ];
print ('-dbitmap', figura)

% Mode_R
figure('Units','characters','Position',[0 10 200 25]);
hold on;
grid on;
plot(time(tempo),Mode_R(tempo),'LineWidth',line);
xlabel('Tempo (s)','FontSize',fonte);
ylabel('Mode_R','FontSize',fonte);
set(gca,'fontsize',fonte)
legend('0=blocked 1=C.C. 2=Controle de tensão 3=alfa min 4=alfa max 5=forced alfa
6=gamma','Location','NorthOutside');
axis('tight');
hold off;
figura= [caso 'Mode_R' ];
print ('-dbitmap', figura)

% angulo gamma
figure('Units','characters','Position',[0 10 200 25]);
hold on;
grid on;
plot(time(tempo),gamma(tempo),'LineWidth',line);
xlabel('Tempo (s)','FontSize',fonte);
ylabel('Angulo [graus]','FontSize',fonte);
set(gca,'fontsize',fonte)
axis([Tinicial Tfinal angd angu]);
hold off;
figura= [caso 'gamma' ];
print ('-dbitmap', figura)

% Mode_I
figure('Units','characters','Position',[0 10 200 25]);
hold on;
grid on;
plot(time(tempo),Mode_I(tempo),'LineWidth',line);
xlabel('Tempo (s)','FontSize',fonte);
ylabel('Mode_I','FontSize',fonte);
set(gca,'fontsize',fonte)
axis('tight');
legend('0=blocked 1=C.C. 2=Controle de tensão 3=alfa min 4=alfa max 5=forced alfa
6=gamma','Location','NorthOutside');
hold off;
figura= [caso 'Mode_I' ];
print ('-dbitmap', figura)

% *****

% Corrente da falta CA
figure('Units','characters','Position',[0 10 200 25]);
hold on;
grid on;
plot(time(tempo),Falta_CA(tempo),'LineWidth',line);
xlabel('Tempo (s)','FontSize',fonte);
ylabel('Corrente [A]','FontSize',fonte);
set(gca,'fontsize',fonte)
axis('tight');

```

```

hold off;
figura= [caso 'Corrente_falta_CA' ];
print ('-dbitmap', figura)

% Corrente da falta CC
figure('Units','characters','Position',[0 10 200 25]);
hold on;
grid on;
plot(time(tempo),Falta_CC(tempo),'LineWidth',line);
xlabel('Tempo (s)','FontSize',fonte);
ylabel('Corrente [A]','FontSize',fonte);
set(gca,'fontsize',fonte)
axis('tight');
hold off;
figura= [caso 'Corrente_falta_CC ' ];
print ('-dbitmap', figura)

% *****

```

## APÊNDICE 3 - Rotina para Aplicar a Série de Fourier

---

```
% Para obter o espectro harmonico por FOURIER
Tinicial=2.0/Ts;
Tfinal=(2.0+16.66e-3)/Ts;
intervalo=Tinicial:Tfinal;
y=Ia(intervalo); % Sinal amostrado
% Plotar o espectro de frequencias utilizando o comando fft do Matlab
Fs=1/Ts; % Ts é o período de amostragem do arquivo Simulink
N=length(y); % numero de pontos
k=0:N-1; % vetor que vai de 0 ate N-1
T=N/Fs;
X=fft(y)/N; % normalizando os dados
% como é redundante, só desejamos a primeira parte dos dados
cutOff = ceil(N/2);
% pegando somente a primeira parte dos valores
Y = X(1:cutOff);
I_retificador=Y(1:26)*sqrt(2)*(100e6/(sqrt(3)*500e3));
freq=k/T;
frequencias = freq(1:cutOff); % criando a faixa de frequencias
figure('Units','characters','Position',[0 10 200 25]);
hold on
grid on
stem(frequencias(1:26),abs(I_retificador),'LineWidth',2);
xlabel('Frequência (Hz)','FontSize',fonte)
ylabel('Amplitude','FontSize',fonte)
title('Espectro de frequencias da corrente do retificador','FontSize',fonte);
set(gca,'fontsize',fonte)
% axis('tight');
hold off
print -dbitmap Espectro_corrente_retificador;

% *****
% Correntes CA (p.u.) no terminal retificador
figure('Units','characters','Position',[0 10 200 25]);
hold on
grid on
plot(time(tempo),Ia(tempo),time(tempo),Ib(tempo),time(tempo),Ic(tempo), 'LineWidth',line);
legend('Ia','Ib','Ic','Location','NorthEast');
xlabel('Tempo (s)','FontSize',fonte)
ylabel('Corrente [p.u.]','FontSize',fonte)
set(gca,'fontsize',fonte)
axis([2.0 2.1 -15 15]);
hold off
figura= [caso 'Correntes_CA_retificador'];
print ('-dbitmap', figura)

% Tensões CA (p.u.) no terminal retificador
figure('Units','characters','Position',[0 10 200 25]);
hold on
grid on
plot(time(tempo),Va(tempo),time(tempo),Vb(tempo),time(tempo),Vc(tempo), 'LineWidth',line);
legend('Va','Vb','Vc','Location','NorthEast');
xlabel('Tempo (s)','FontSize',fonte)
ylabel('Tensão [p.u.]','FontSize',fonte)
set(gca,'fontsize',fonte)
axis([2.0 2.1 -1 1]);
hold off
figura= [ caso 'Tensões_CA_retificador'];
```

```

print ('-dbitmap', figura)

% Correntes CA (p.u.) no terminal retificador
figure('Units','characters','Position',[0 10 200 25]);
hold on
grid on
plot(time(tempo),Ia_I(tempo),time(tempo),Ib_I(tempo),time(tempo),Ic_I(tempo),'LineWidth',line);
legend('Ia','Ib','Ic','Location','NorthEast');
xlabel('Tempo (s)','FontSize',fonte)
ylabel('Corrente [p.u.]','FontSize',fonte)
set(gca,'fontsize',fonte)
axis([2.0 2.1 -15 15]);
hold off
figura= [ caso 'Correntes_CA_inversor'];
print ('-dbitmap', figura)

% Tensões CA (p.u.) no terminal inversor
figure('Units','characters','Position',[0 10 200 25]);
hold on;
grid on;
plot(time(tempo),Va_I(tempo),time(tempo),Vb_I(tempo),time(tempo),Vc_I(tempo),'LineWidth',line);
legend('Va','Vb','Vc','Location','NorthEast');
xlabel('Tempo (s)','FontSize',fonte);
ylabel('Tensão [p.u.]','FontSize',fonte);
set(gca,'fontsize',fonte)
axis([2.0 2.1 -1 1]);
hold off;
figura= [caso "Tensões_CA_inversor" ];
print ('-dbitmap', figura)
% *****

% Obtendo as tensoes CA no terminal retificador
Va=AC_RETIFICADOR_fonte.signals(1).values(:,1);
Vb=AC_RETIFICADOR_fonte.signals(1).values(:,2);
Vc=AC_RETIFICADOR_fonte.signals(1).values(:,3);

% Obtendo as correntes CA no terminal retificador
Ia=AC_RETIFICADOR_fonte.signals(2).values(:,1);
Ib=AC_RETIFICADOR_fonte.signals(2).values(:,2);
Ic=AC_RETIFICADOR_fonte.signals(2).values(:,3);

% Correntes CA (p.u.) no terminal retificador
figure('Units','characters','Position',[0 10 200 25]);
hold on
grid on
plot(time(tempo),Ia(tempo),time(tempo),Ib(tempo),time(tempo),Ic(tempo),'LineWidth',line);
legend('Ia','Ib','Ic','Location','NorthEast');
xlabel('Tempo (s)','FontSize',fonte)
ylabel('Corrente [p.u.]','FontSize',fonte)
set(gca,'fontsize',fonte)
axis([2.0 2.1 -15 15]);
hold off
figura= [caso 'Correntes_CA_retificador_filtro' ];
print ('-dbitmap', figura)

% Tensões CA (p.u.) no terminal retificador
figure('Units','characters','Position',[0 10 200 25]);
hold on

```

```
grid on
plot(time(tempo),Va(tempo),time(tempo),Vb(tempo),time(tempo),Vc(tempo),'LineWidth',line);
legend('Va','Vb','Vc','Location','NorthEast');
xlabel('Tempo (s)','FontSize',fonte)
ylabel('Tensão [p.u.]','FontSize',fonte)
set(gca,'fontsize',fonte)
axis([2.0 2.1 -1 1]);
hold off
figura= [ caso 'Tensões_CA_retificador_filtro'];
print ('-dbitmap', figura)
```