

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ELO DE CORRENTE CONTÍNUA COMO ALTERNATIVA PARA O AMORTECIMENTO DE  
OSCILAÇÕES ELETROMECAÑICAS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA – ASPECTOS DE CONTROLE  
DOS ELOS CCAT**

**CLAUDIO PEREIRA DE OLIVEIRA**

Itajubá-MG, Brasil

2020

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA ELÉTRICA**

**CLAUDIO PEREIRA DE OLIVEIRA**

**ELO DE CORRENTE CONTÍNUA COMO ALTERNATIVA PARA O AMORTECIMENTO DE  
OSCILAÇÕES ELETROMECÂNICAS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA – ASPECTOS DE CONTROLE  
DOS ELOS CCAT**

Dissertação submetida ao Programa de PósGraduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Orientador: Prof. Dr. Benedito Isaias Lima Fuly

Co-orientador: Prof. Dr. Angelo José Junqueira Rezek

Itajubá-MG, Brasil

2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA ELÉTRICA

CLAUDIO PEREIRA DE OLIVEIRA

ELO DE CORRENTE CONTÍNUA COMO ALTERNATIVA PARA O AMORTECIMENTO DE  
OSCILAÇÕES ELETROMECÂNICAS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA – ASPECTOS DE CONTROLE  
DOS ELOS CCAT

Dissertação aprovada por banca examinadora em 16 de dezembro de 2020, conferindo o título de **Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica**.

**Banca Examinadora:**

Prof. Dr. Benedito Isaias Lima Fuly (Orientador)

Prof. Dr. Angelo José Junqueira Rezek (Co-orientador)

Prof. Dr. José Carlos Grilo Rodrigues

Prof. Dra Adriana Aparecida dos Santos Izidoro

Itajubá-MG, Brasil

2020

## **Dedicatória e agradecimento**

À minha amada esposa Eliane, minha filha Gabriele e meu filho Eduardo, por todo amor, incentivo, apoio e compreensão. Nada disso teria sentido se vocês não existissem na minha vida.

Agradecimento ao meu orientador Prof. Dr. Benedito Isaias Lima Fuly que aceitou o desafio de guiar os meus passos finais na dissertação, agradeço por seu profissionalismo, orientação e competência.

Agradecimento especial ao meu coorientador Prof. Dr. Angelo José Junqueira Rezek, pessoa abençoada por Deus, que foi o meu grande incentivador durante toda a minha jornada na UNIFEI, fica aqui os meus eternos agradecimentos por todos os ensinamentos, por seu exemplo de ética, sua capacidade de motivar, direcionar, por sua amizade, cuidado e, profissionalismo e sobretudo sua paciência.

## Resumo

São várias as razões para se escrever um trabalho relacionado aos sistemas de transmissão em corrente contínua, se destacam a rápida e precisa controlabilidade dos elos de corrente contínua e as possibilidades de suas aplicações de forma a contribuir com o amortecimento de oscilações eletromecânicas no sistema elétrico de potência. O presente documento aborda os principais aspectos sobre os sistemas de controle das interconexões em CCAT.

Após vários anos de utilização em diversos sistemas elétricos pelo mundo, é notório o sucesso relacionado a essas conexões em corrente contínua, o texto tem o objetivo de apresentar o comportamento em regime permanente e o comportamento dinâmico desses sistemas, de forma que possamos entender as exigências mínimas para um controle preciso e robusto em sistemas de transmissão baseado no princípio dos conversores fonte de corrente (CSC), denominados comercialmente de *classic converters*.

**Palavras-chave:** CCAT, Sistema elétrico de potência, transmissão de energia, HVDC, assíncrono, HVDC Classic, corrente contínua, estabilidade.

## **Abstract**

There are several reasons for writing a document related to the high voltage direct current transmission system, highlighting the fast and precise controllability of the HVDC and the possibilities of their applications in order to contribute to the damping of electromechanical oscillations in the electric power system. This document addresses the main aspects of the HVDC control systems.

After several years in various electrical systems in use around the world, is notorious the success related to these HVDC connections, the text aims to present the behavior in steady state and dynamic behavior of these systems, so that we can understand the minimum requirements for robust and precise control for a transmission systems based on the principle of current source converters (CSC), known commercially for classic converters.

**Keywords:** CCAT, power systems, HVDC, UHVDC, asynchronous, HVDC Classic, direct current, stability.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO A TRANSMISSÃO CCAT</b> .....	<b>1</b>
1.1	HISTÓRIA .....	1
1.2	VANTAGENS DA UTILIZAÇÃO DE SISTEMAS CCAT .....	2
1.3	CLASSIFICAÇÃO DOS ELOS CCAT .....	3
<b>2</b>	<b>TIPOS DE CONVERSORES</b> .....	<b>5</b>
2.1	INTRODUÇÃO .....	5
2.2	ANÁLISE DE UMA PONTE CONVERSORA (CSC) .....	7
2.2.1	Caso sem período de <i>overlap</i> .....	9
2.2.2	Caso com <i>overlap</i> em período inferior a 60 graus. ....	13
<b>3</b>	<b>TEORIA DO CONTROLE DE SISTEMAS CCAT</b> .....	<b>16</b>
3.1	HISTÓRICO .....	16
3.2	FUNÇÕES DO SISTEMA DE CONTROLE CCAT .....	17
3.3	CONTROLES BÁSICOS PARA CONEXÃO CC DE DOIS TERMINAIS .....	19
3.4	MÉTODO DE CONTROLE DA MARGEM DE CORRENTE.....	24
3.4.1	Modo de Operação do Retificador .....	24
3.4.1.1	Alfa Mínimo Característica do Retificador .....	24
3.4.1.2	Característica Constante.....	25
3.4.1.3	Característica VDCOL .....	26
3.4.1.4	Característica de Corrente Mínima .....	26
3.4.2	Modo de Operação do Inversor.....	26
3.4.2.1	Característica de Gama Mínimo .....	26
3.4.2.2	Característica Corrente Constante.....	27
3.4.2.3	Alfa Mínimo no Modo Inversor .....	27
3.4.2.4	Região de Erro de Corrente .....	27
3.5	CONTROLE DA CORRENTE NO RETIFICADOR .....	29
3.6	CONTROLE DO ÂNGULO DE EXTINÇÃO NO INVERSOR .....	30
3.6.1	Medição de Gama - Aproximação 1.....	31
3.6.2	Previsão da Gama - Aproximação 2 .....	32
3.7	HIERARQUIA DO CONTROLE .....	33
3.7.1	Controlador do Bipolo .....	33
3.7.2	Controlador do Polo .....	34

3.7.3	Controlador do Grupo de Válvulas .....	35
3.7.3.1	Controlador do <i>Tap</i> .....	35
3.7.3.2	Controlador de Falha de Comutação .....	35
3.8	AÇÕES PELOS CONTROLES APÓS PERTURBAÇÃO .....	36
<b>4</b>	<b>CARACTERÍSTICAS DO CONTROLE DE POTÊNCIA E CORRENTE .....</b>	<b>36</b>
4.1	INTRODUÇÃO .....	36
4.2	CONTROLE DA CORRENTE CC .....	38
4.2.1	Limitador da Ordem de Corrente Dependente da Tensão (VDCOL) .....	38
4.2.1.1	Limites de corrente.....	39
4.2.1.2	Limites de tensão.....	40
4.2.1.3	Constantes de tempo para a operação VDCOL.....	40
4.2.1.4	Influência do VDCOL nas características $U_d / I_d$ .....	41
4.2.2	Amplificador de controle de corrente (CCA).....	41
4.2.2.1	Descrição Funcional do CCA .....	42
4.2.3	Limitações do amplificador de controle de corrente (CCALIM) .....	43
4.2.3.1	Descrição Funcional do CCALim .....	45
4.3	CONTROLE DE TENSÃO CC.....	46
4.3.1	Limitador de sobretensão (OVL).....	46
4.3.2	Regulador de Tensão (VCAReg) .....	47
4.3.3	Controle de Alfa Maximo no Inversor (AMAX) .....	49
4.4	CÁLCULO DE TENSÃO E ÂNGULO DE REFERÊNCIA.....	51
4.5	CONTROLE DA TRANSMISSÃO .....	52
4.5.1	Lógica de Passos (SLF).....	53
4.5.2	UDCALC .....	53
4.5.3	Ordem de Corrente .....	54
4.5.4	Reversão de potência .....	54
4.5.5	Unidade de sincronização.....	54
4.6	CONTROLE DE POTÊNCIA (BIPOLO) .....	55
<b>5</b>	<b>CONTROLES DE ALTO NÍVEL.....</b>	<b>55</b>
5.1.1	Características Gerais .....	56
5.1.2	Controle de Frequência .....	57
5.1.3	Controlador de Amortecimento .....	60
5.1.4	Controlador Emergencial de Potência (EPC).....	62

5.1.5	Controlador de Reativo/Tensão .....	64
5.1.6	Função de Redução do Limite de Potência ( <i>Runback</i> ) .....	65
5.1.7	Função de Aumento do Limite de Potência ( <i>Runup</i> ) .....	65
<b>6</b>	<b>SIMULAÇÃO DO SISTEMA .....</b>	<b>66</b>
6.1	DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO CCAT .....	66
6.2	VALIDAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE DOS CONVERSORES.....	66
6.2.1	Comparação e Simulação de Resultados em Regime Permanente.....	66
6.2.2	Comparação e Simulação de Resultados sob condições de falta.....	70
6.3	SISTEMA CCAT SIMULADO .....	73
6.4	DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE.....	74
6.4.1	Descrição do controle de bipolo/ polo .....	74
6.4.2	Descrição de modulação – Controle de frequência .....	76
6.4.3	Descrição do controle emergencial de potência (EPC) .....	77
6.4.4	Definições para os retificadores e inversores:.....	78
6.4.4.1	VDCOL: .....	80
6.4.4.2	Reguladores de corrente, tensão e gama .....	80
6.4.4.3	Limitador de alfa mínimo .....	82
6.5	DEFINIÇÃO DE CASOS .....	83
6.6	SIMULAÇÕES E RESULTADOS.....	84
6.6.1	Regime permanente com 0.75(pu) de potência .....	85
6.6.2	Degrau de potência – Pole modes .....	87
6.6.3	Degrau de potência – Bipole mode .....	88
6.6.4	Limitação externa de potência ( <i>Runback</i> ) – Bipole mode .....	88
6.6.5	Perda de geração, todas as modulações deligadas.....	89
6.6.6	Perda severa de geração (lado retificador), FC ligado .....	90
6.6.7	Perda de 100MW de carga (lado retificador), FC ligado .....	92
6.6.8	Perda de 200MW de bloco de carga (lado retificador), FC ligado .....	93
6.6.9	Perda extremamente severa de geração (lado retificador), FC ligado.....	94
6.6.10	Perda extremamente severa de geração (retif.), FC+EPC (droop) ligados.....	96
6.6.11	Perda extremamente severa de geração (lado retificador), FC+EPC (tradicional) ligados.....	98
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>103</b>
7.1	Considerações finais.....	103

7.2	Recomendações para trabalhos futuros.....	103
<b>8</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS .....</b>	<b>105</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – UHVDC Multiterminal - North-East Agra .....	2
Figura 2 – Monopolar .....	4
Figura 3 – Bipolar .....	4
Figura 4 – Homopolar.....	5
Figura 5 – Tipos de Conversores CSC e VSC.....	5
Figura 6 – Ponte de 6 pulsos .....	7
Figura 7 – Efeito do <i>Overlap</i> .....	8
Figura 8 – Tensões de Linha e Tensões de Fase .....	9
Figura 9 – Ponte com Duas Válvulas Conduzindo.....	10
Figura 10 – Relação Entre Corrente CA e CC .....	12
Figura 11 – Ponte Com Três Válvulas Conduzindo .....	13
Figura 12 – Tensão CC com o Efeito do <i>Overlap</i> .....	15
Figura 13 – Conexão CC Típica Interligando Dois Sistemas CA .....	18
Figura 14 – Conexão CC de dois terminais .....	20
Figura 15 – Circuito Equivalente de uma Conexão CC.....	22
Figura 16 – Representação da Estratégia de Controle .....	23
Figura 17 – Características Estáticas de Vd-Id .....	25
Figura 18 – (a) Características Estáticas de Vd-Id Sem Modificação (b) Modificada .....	28
Figura 19 – Características Estáticas (completa) de Vd-Id.....	29
Figura 20 – Controle da Corrente no Retificador .....	30
Figura 21 – Medição do Gama - Aproximação 1 .....	31
Figura 22 – Medição do Gama (Disparo na Válvula 3) - Aproximação 1.....	32
Figura 23 – Previsão do Gama - Aproximação 2 .....	33
Figura 24 – Controlador do Bipolo .....	34
Figura 25 – Controlador do Polo .....	34
Figura 26 – Controlador do Grupo das Válvulas.....	36
Figura 27 – Sistema de Controle CCAT Simplificado (Back to Back) .....	37
Figura 28 – Diagrama Simplificado do Controle de Disparo .....	38
Figura 29 – Função VDCOL .....	39
Figura 30 – Curva característica da função VDCOL.....	39
Figura 31 – Características Ud/Id com VDCOL.....	41
Figura 32 – Características do CCA .....	42

Figura 33 – Diagrama principal do CCA .....	43
Figura 34 – Limitações do CCA .....	44
Figura 35 – Princípios das Limitações do CCA .....	45
Figura 36 – Diagrama Funcional do Limitador de Sobretensão (OVL) .....	47
Figura 37 – Influência do VCAREg nas características Ud/Id .....	48
Figura 38 – Diagrama de blocos VCAREg - Limites .....	48
Figura 39 – Diagrama de blocos VCAREg.....	49
Figura 40 – Diagrama de blocos AMAX .....	51
Figura 41 – Diagrama Simplificado do VARC .....	52
Figura 42 – Controle Simplificado da Potência do Polo.....	53
Figura 43 – Relações de Frequência entre os Controladores .....	57
Figura 44 – Características de Controles de Frequências .....	58
Figura 45 – Estrutura Básica do Controle de Frequência.....	59
Figura 46 – Estrutura Básica do Controle de Amortecimento .....	61
Figura 47 – Comportamento de contribuição do EPC tradicional .....	63
Figura 48 – Comportamento de contribuição do EPC droop.....	64
Figura 49 – Sistema Simulado - Simplificado.....	66
Figura 50 – Retificador: 1.Tensão na válvula 1; 2.Comutação V1-3; 3.Ordem de alfa .....	69
Figura 51 – Inversor: 1.Tensão na válvula V1; 2.Corrente e tensão V1; 3.Ordem de gama ..	69
Figura 52 – Retificador: 1.Tensão na linha CC; 2.Corrente e referência; 3.Ordem de alfa ....	70
Figura 53 – Inversor: 1.Tensão na linha CC; 2.Corrente CC; 3.Ordem de alfa 4.Gama .....	71
Figura 54 – Retificador: 1.Tensão na linha CC; 2.Corrente CC; 3.Ordem de alfa .....	72
Figura 55 – Inversor: 1.Tensão na linha CC; 2.Corrente CC; 3.Ordem de alfa.....	72
Figura 56 – Sistema Simulado .....	73
Figura 57 – Filtros de harmônicas AC .....	74
Figura 58 – Controle de bipolo e coordenação com os polos.....	75
Figura 59 – Modulações – Controle de frequência.....	76
Figura 60 – Controle emergencial de potência .....	77
Figura 61 – Controle do polo - retificador .....	79
Figura 62 – Controle do polo – lado do inversor .....	80
Figura 63 – Reguladores de corrente, tensão e gama .....	81
Figura 64 – Detector de baixa tensão AC .....	82
Figura 65 – Implementação do RAML no controle do angulo alfa - retificador.....	82
Figura 66 – Tensões/correntes CA (antes dos filtros) - Lado do Retificador.....	85
Figura 67 – Comportamento do retificador .....	86
Figura 68 – Comportamento do inversor .....	86
Figura 69 – Degrau de potência (Pole modes) .....	87
Figura 70 – Degrau de potência (Pole modes) – P1 retificador .....	87
Figura 71 – Degrau de potência (Bipole mode).....	88
Figura 72 – Limitação externa de potência (Bipole mode).....	88
Figura 73 – Perda de geração do lado do retificador, dados de frequência .....	89
Figura 74 – Perda de geração severa do lado do retificador, FC ligado, Rede e elo CCAT .....	90
Figura 75 – Perda de geração severa do lado do retificador, FC ligado, Dados da geração ..	90

Figura 76 – Perda de geração severa do lado do retificador, FC lig, Dados da geração 70s ..	91
Figura 77 – Perda de 100MW de carga do lado do retificador, FC ligado, Rede e elo CCAT..	92
Figura 78 – Perda de 100MW de carga do lado do retificador, FC ligado, Dados da geração	92
Figura 79 – Perda de 200MW de carga do lado do retificador, FC ligado, Rede e elo CCAT..	93
Figura 80 – Perda de 200MW de carga do lado do retificador, FC ligado, Dados da geração	93
Figura 81 – Perda extr. severa de geração (retificador), FC ligado, Rede e elo CCAT .....	94
Figura 82 – Perda extr. severa de geração (retificador), FC ligado, Dados da geração .....	95
Figura 83 – Perda extr. severa de geração (ret.), FC e EPC droop lig, Rede e elo CCAT .....	96
Figura 84 – Perda extr. severa de geração (ret.), FC e EPC droop, Dados da geração .....	97
Figura 85 – Perda extr. severa de geração (ret.), FC e EPC tradicional, Rede e elo CCAT .....	98
Figura 86 – Perda extr. severa de geração (ret.), FC e EPC tradicional, Dados da geração....	99
Figura 87 – Perda extr. severa de geração (ret.), Comparação EPC droop x tradicional .....	101
Figura 88 – Perda extr. severa de geração (ret.), Comparação EPC droop x tradicional .....	102

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 Comparação dos tipos de Conversores .....	6
Tabela 3-1 Requisitos de uma Conexão CC .....	19
Tabela 3-2 Escolha da Estratégia de Controle para Link DC de dois Terminais .....	23
Tabela 3-3 Ações do Controle após Perturbação .....	36
Tabela 6-1 - Dados dos transformadores .....	73
Tabela 6-2 Parâmetros de Partida, Rampas e Bloqueio. ....	75
Tabela 6-3 Parâmetros de Partida, Rampas e Bloqueio para simulações longas. ....	75
Tabela 6-4 Parâmetros do controle de frequência.....	77
Tabela 6-5 Parâmetros do controle de frequência coordenada com EPC. ....	77
Tabela 6-6 Parâmetros das entradas tradicionais do EPC. ....	78
Tabela 6-7 Parâmetros das entradas <i>droop</i> do EPC. ....	78
Tabela 6-8 Parâmetros para retificadores e inversores.....	79
Tabela 6-9 Parâmetros para VDCOL. ....	80
Tabela 6-10 Parâmetros para retificadores e inversores.....	81
Tabela 6-11 Casos simulados. ....	83
Tabela 6-12 Tabela de dados dos sinais. ....	84

## LISTA DE ABREVIações

<b>CA</b>	Corrente Alternada
<b>CC</b>	Corrente Contínua
<b>CCAT</b>	Corrente Contínua em Alta Tensão
<b>FACTS</b>	<i>Flexible AC Transmission System</i>
<b>HVAC</b>	<i>High Voltage Alternating Current</i>
<b>HVDC</b>	<i>High Voltage Direct Current</i>
<b>UHVDC</b>	<i>Ultra High Voltage Direct Current</i>
<b>VDCOL</b>	<i>Voltage Dependent Current Limiter</i>
<b>CSC</b>	<i>Current Source Converter</i>
<b>VSC</b>	<i>Voltage Source Converter</i>
<b>CEA</b>	<i>Constant Extinction Angle</i>
<b>PI</b>	<i>Proportional and Integral Controller</i>
<b>PID</b>	<i>Proportional, Integral and Derivative Controller</i>
<b>VCO</b>	<i>Voltage-Controlled Oscillator</i>
<b>VV</b>	<i>Valve Voltage</i>
<b>V<sub>com</sub></b>	Tensão de Comutação
<b>PPCO</b>	<i>Pulse Phase Control Oscillator</i>
<b>PFCO</b>	<i>Pulse Frequency Control Oscillator</i>
<b>U<sub>min</sub></b>	Tensão CC Mínima
<b>V<sub>d</sub></b>	Tensão CC
<b>V<sub>do</sub></b>	Tensão CC de circuito aberto
<b>R<sub>c</sub></b>	Resistência equivalente de comutação
<b>L<sub>c</sub></b>	Indutância do transformador conversor
<b>I<sub>d</sub></b>	Corrente CC
<b><math>\alpha</math></b>	Ângulo de atraso
<b><math>\beta</math></b>	Ângulo de avanço no inversor, ( $\beta = \pi - \alpha$ )
<b><math>\gamma</math></b>	Ângulo de extinção no inversor, ( $\gamma = \pi - \alpha - \mu$ )
<b><math>\mu</math></b>	Ângulo de sobreposição ( <i>overlap</i> )
<b>V<sub>do</sub></b>	Tensão sem carga ideal ( <i>no-load direct voltage</i> ) com $\alpha = 0^\circ$
<b>E<sub>m</sub></b>	Valor de pico da tensão CA

<b>E<sub>LL</sub></b>	Valor em rms da tensão de linha
<b>FC</b>	<i>Frequency Control</i>
<b>EPC</b>	<i>Emergency Power Control</i>
<b>DC</b>	<i>Damping Control</i>
<b>POD</b>	<i>Power Oscillation Damping</i>
<b>TCC</b>	<i>Tap Changer Control</i>
<b>RAML</b>	<i>Rectifier Alpha Minimum Limiter</i>
<b>CCA</b>	<i>Current Control Amplifier</i>
<b>CCALIM</b>	<i>Limitations of Current Control Amplifier</i>
<b>VCAREG</b>	<i>Voltage Regulator</i>
<b>SLF</b>	<i>Stepping Logic Function</i>
<b>AMAX</b>	<i>Alpha maximum inverter control</i>
<b>OVL</b>	<i>Overvoltage Limiter</i>
<b>SSDC</b>	<i>Sub synchronous Damping Controller</i>
<b>SSTI</b>	<i>Sub synchronous Torsional Interaction</i>
<b>PSS</b>	<i>Power System Stabilizer</i>

# 1 INTRODUÇÃO A TRANSMISSÃO CCAT

## 1.1 HISTÓRIA

A primeira aplicação comercial de transmissão CCAT foi implementada entre a ilha de Gotland e o sistema interconectado da Suécia em 1954. Este sistema usava válvulas de arco de mercúrio e tinha a capacidade de transmissão de 20MW a  $\pm 100$  KV em um elo de corrente contínua submarino de 96 km de extensão. Desde então, a aplicação de transmissão CCAT tem se tornado mais frequente [2][5][11].

Com o advento das válvulas de tiristores, a transmissão em corrente contínua tornou-se mais atrativa. O primeiro sistema CCAT utilizando válvula de tiristores foi o projeto de Eel River, comissionado em 1972, compondo 320MW de uma interconexão entre o sistema de potência da província de New Brunswick e Quebec. Válvulas de tiristores tornaram-se um equipamento padrão para estações conversoras. Desenvolvimentos nestes equipamentos como, por exemplo, seu tamanho, diminuição de custo e melhoria de sua confiabilidade foram fatores que resultaram na adoção do uso de elos CCAT no mundo [2][3][4].

Vários países já possuem interligações utilizando a tecnologia CCAT. Isto se deve pela vantagem da controlabilidade dos fluxos de potência entre as áreas e desacoplamento na ocorrência de perturbações, não deixando que estas afetem as outras áreas do sistema elétrico de potência. Um fato relevante é que o elevado número de elos CCAT na região nordeste dos Estados Unidos permaneceu em serviço durante o enorme blecaute em agosto de 2003, mantendo o fornecimento contínuo para a região [4].

Outras interligações de grande importância já estão presentes há algum tempo e podem comprovar o sucesso do uso da tecnologia CCAT. Uma importante interligação de longa distância é a Pacific Intertie, construída na década de 1960 usando válvulas de arco de mercúrio e que sofreu várias modificações e aumentos de capacidade [6]. Outra importante conexão CCAT é a de Itaipu que está em operação desde 1984, utilizando  $\pm 600$ KV para transmitir 3150MW. O desempenho deste elo de corrente contínua tem mostrado bons resultados consolidando a escolha do uso de  $\pm 600$ KV. A China também possui uma grande transmissão que faz uso dos últimos desenvolvimentos em tecnologia de alta potência. Pode-se destacar o sistema de transmissão bipolar com capacidade de 3000MW em  $\pm 500$ KV, Three Gorges - Changzhou. Esse elo CCAT foi projetado para uma potência contínua de 2x1500MW. Ele possui capacidade de sobrecarga de 3480MW para temperaturas abaixo dos valores máximos especificados com equipamento de resfriamento redundante em serviço e uma capacidade de sobrecarga de 5 segundos de 4500MW [4].

Um grande exemplo da dimensão da transmissão em corrente contínua é o projeto em desenvolvimento na Índia (North East Agra) que terá a capacidade estimada de 8000MW já incluída uma redundância de 2000MW (Figura 1). É um projeto do tipo multiterminal utilizando a tecnologia UHVDC (*Ultra High Voltage Direct Current*) com um elo de corrente

contínua de 800kV, os conversores mais distantes estão separados a uma distância aproximada de 1728 km [14].

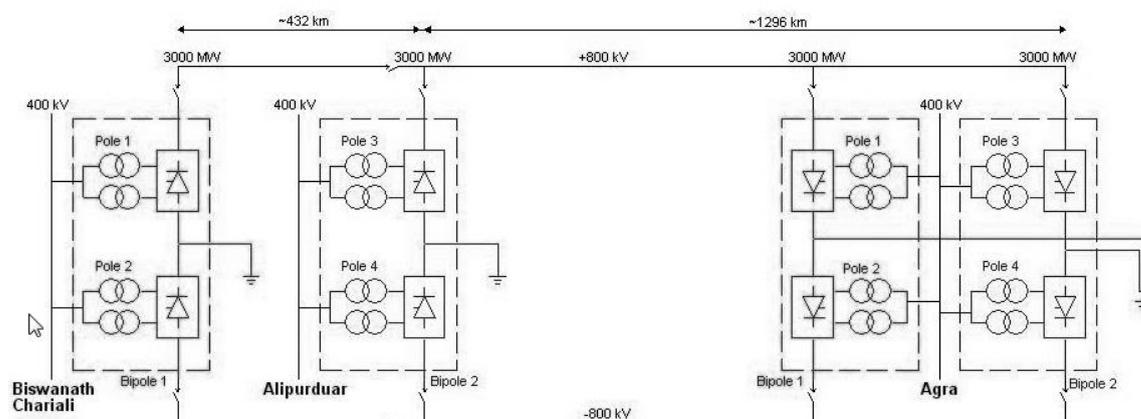


Figura 1 – UHVDC Multiterminal - North-East Agra

## 1.2 VANTAGENS DA UTILIZAÇÃO DE SISTEMAS CCAT

Os sistemas HVAC têm sido utilizados há bastante tempo e mostram-se incontestáveis sobre sua utilização. Oferecem uma poderosa alternativa para aumentar a estabilidade do sistema de potência tão bem como melhorar a flexibilidade de operação do mesmo. Sob esse ponto de vista, já que os sistemas HVAC funcionam adequadamente por décadas, optar pelo uso de CCAT nos sistemas elétricos de potência é uma questão bastante pertinente. Por exemplo, em transmissões de longa distância, terrestres ou submarinas, deve ser levado em conta o problema de ordem econômica, ou seja, economizar em linhas ou cabos a fim de cobrir os aumentos nos custos das estações. Algumas vezes isto passa a não ser o ponto principal na escolha da utilização de um elo de corrente contínua, mas problemas voltados ao meio ambiente ou a capacidade de controle do elo passam a assumir grande importância na escolha de sua utilização [4].

Algumas vantagens importantes são obtidas quando há uma ligação CCAT com um sistema HVAC [2][3][4][7][8]. São elas:

- Em um sistema CA e CC paralelos, a modulação das quantidades CC (corrente ou potência) aumenta o limite de estabilidade de regime permanente do sistema CA;
- A transmissão de potência CC é independente da abertura angular entre os terminais CA;

- Permite a interligação entre sistemas de diferentes frequências (50-60Hz).
- Impede fluxos indesejáveis em linhas de transmissão CA paralelas;
- Controle de intercâmbios garantindo que as margens de estabilidade do sistema sejam mantidas;
- Controla o fluxo de energia e evita a sobrecarga, prevenindo disparos em cascata, restringindo assim falhas do sistema em condições de contingência múltipla;
- Uso eficiente da capacidade de geração;
- Maior potência transmitida por condutor;
- Admite o uso de retorno por terra;
- Linhas de transmissão com construções mais simples;
- Não incrementa a corrente de curto-circuito no sistema CA;
- Baixa corrente de curto-circuito na linha de corrente contínua;
- Menor impacto ambiental;
- Menor perda de energia para transmissão e longas distâncias;
- Menor investimento para transmissões em longa distância.

### 1.3 CLASSIFICAÇÃO DOS ELOS CCAT

Os elos de corrente contínua são classificados nas seguintes categorias [1][2][3][11]:

- Monopolar;
- Bipolar;
- Homopolar.

A configuração básica de um elo monopolar é mostrada na (Figura 2). É utilizado um condutor geralmente de polaridade negativa e o caminho de retorno é provido pela terra ou água. Considerações de custo sempre levam para o uso deste tipo de configuração, ao passo que pode ser o primeiro estágio para o desenvolvimento de um sistema bipolar. Ao invés do retorno pela terra, um cabo metálico pode ser utilizado para o retorno da corrente em situações onde a resistividade do solo é impeditiva ou há possível interferência com estruturas metálicas sob a terra ou água [1][2][3][11].

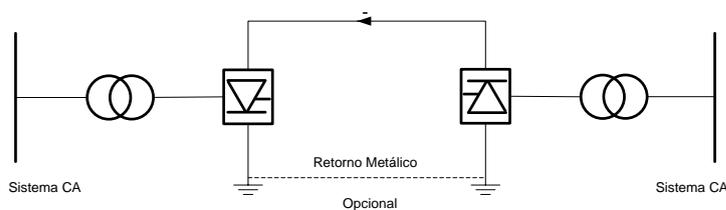


Figura 2 – Monopolar

A configuração bipolar, mostrada na (Figura 3), é constituída de dois condutores: um de polaridade negativa e outro de polaridade positiva. Cada terminal tem dois conversores de mesmo nível de tensão conectados em série no lado CC. A junção entre os conversores é aterrada. Normalmente as correntes nos dois polos são iguais e não há corrente para a terra. Os dois polos podem operar independentes um do outro. Se um polo é isolado devido a uma falta, o outro pode operar com a terra e transferir metade da potência nominal ou mais. Do ponto de vista de desempenho, uma linha de um sistema CCAT bipolar é equivalente ao circuito duplo de linha de transmissão CA. Em situações onde a corrente de terra não é tolerável ou o eletrodo de terra não é factível devido à alta resistividade do solo, um terceiro cabo é utilizado como neutro metálico. Ele serve como um caminho de retorno quando um dos polos está fora de serviço ou quando há um desbalanço durante a operação bipolar [1][2][3][11].

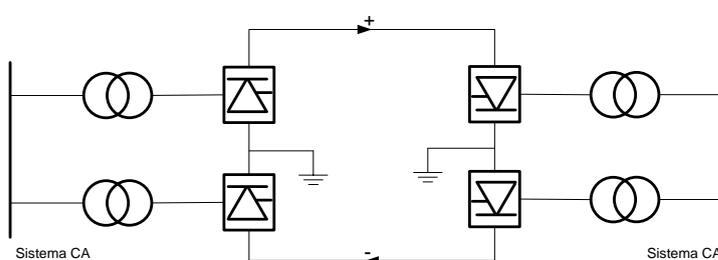


Figura 3 – Bipolar

A configuração homopolar, mostrada na (Figura 4), tem dois ou mais condutores de mesma polaridade, geralmente negativa, diminuindo a rádio interferência devido ao efeito corona. O caminho de retorno da corrente é feito através da terra. Quando há uma falta em um conversor, o outro está disponível para alimentar o condutor que não sofreu a falta, ao qual

tem uma capacidade de sobrecarga e pode transmitir além da potência nominal. Em contrapartida, comparado com o esquema bipolar a reconexão dos conversores de um dos polos da linha é mais complicada e geralmente não factível [1][2][3][11].

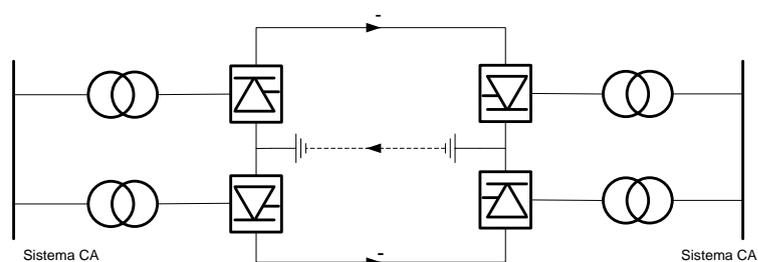


Figura 4 – Homopolar

## 2 TIPOS DE CONVERSORES

### 2.1 INTRODUÇÃO

Um sistema CCAT requer um conversor eletrônico para a sua capacidade de converter a energia elétrica a partir de CA-CC ou vice-versa. Existem basicamente dois tipos de configuração de conversores trifásicos possíveis para este processo de conversão (Figura 5) [1][8]:

- Conversor Fonte de Corrente (CSC);
- Conversor Fonte de Tensão (VSC).

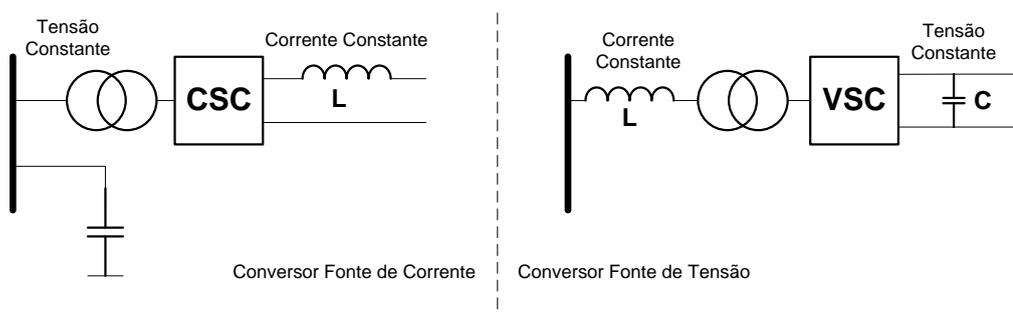


Figura 5 – Tipos de Conversores CSC e VSC

Os sistemas de transmissão CCAT modernos podem utilizar tanto o conversor fonte de corrente (CSC) ou o conversor fonte de tensão (VSC). No entanto, a escolha de qual opção será selecionada para um determinado projeto é baseada em fatores técnicos e econômicos. Uma comparação das características dos dois tipos de conversores é feita na Tabela 2-1 [1].

Tabela 2-1 Comparação dos tipos de Conversores

Item	Tipo de Conversor	
	CSC	VSC
No lado CA	Se comporta como uma fonte de tensão constante	Se comporta como uma fonte de corrente constante
	Requer um capacitor como dispositivo de armazenamento de energia	Requer um indutor como dispositivo de armazenamento de energia
	Requer grandes filtros para eliminação de harmônicas	Requer filtro pequeno para eliminar harmônicas de alta ordem
	Requer suprimento de reativo para correção do fator de potência	O suprimento de reativo não é necessário, pois o conversor pode operar em qualquer quadrante
No lado CC	Se comporta como uma fonte de corrente constante	Se comporta como uma fonte de tensão constante
	Requer indutor como dispositivo de armazenamento de energia	Requer capacitor como dispositivo de armazenamento de energia
	Necessita de filtros	O capacitor fornece capacidade de filtragem, sem custo adicional
	Limita a corrente de falta	Problemático para faltas na linha CC
Comutação	Comutados de linha ou comutação forçada com capacitor série	Auto comutados
	Chaveamento ocorre na frequência da linha	Chaveamento em alta frequência
	Baixas perdas de chaveamento	Altas perdas de chaveamento

## 2.2 ANÁLISE DE UMA PONTE CONVERSORA (CSC)

Para considerar a análise teórica de uma ponte de 6 pulsos convencional (Figura 6), as seguintes suposições são feitas [1][2]:

- A corrente CC ( $I_d$ ) é constante (isto é,  $L_d$  do reator de alisamento é infinita);
- As válvulas possuem chaveamentos ideais;
- O sistema CA é infinitamente forte com fases equilibradas e senoidais.

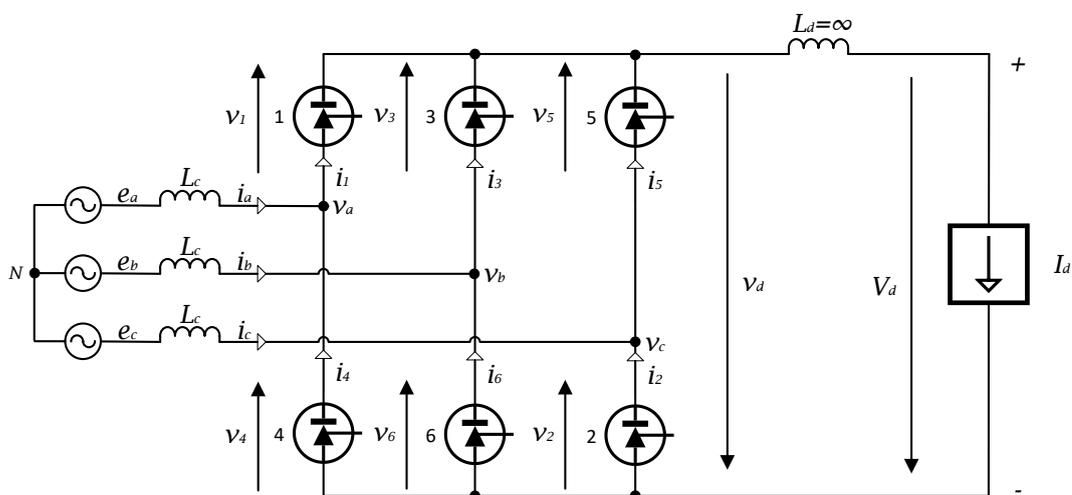


Figura 6 – Ponte de 6 pulsos

Devido à indutância  $L_c$  do transformador do conversor, a comutação de uma válvula para a outra não ocorre instantaneamente. Ocorre um período de sobreposição (*overlap*). Essencialmente, o ângulo do *overlap*  $\mu$  é inferior a 60 graus; tipicamente, entre 20 a 25 graus. Durante a comutação, três válvulas estão conduzindo, porém a comutação está ocorrendo em apenas duas, conforme mostra a Figura 7 [1][2][8].

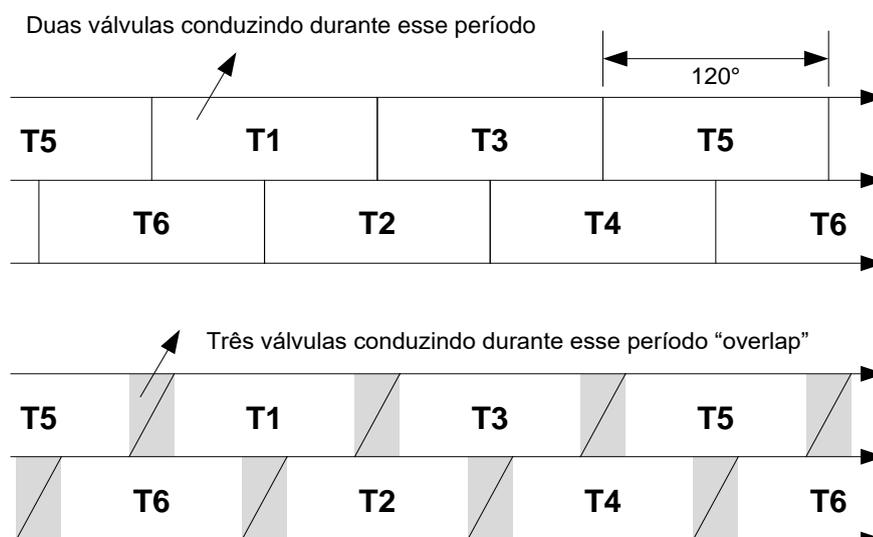


Figura 7 – Efeito do *Overlap*

Tensões de fase trifásicas em corrente alternada são definidas por [1][2]:

$$\begin{cases} e_a = E_m \cos(\omega t + 60^\circ) \\ e_b = E_m \cos(\omega t - 60^\circ) \\ e_c = E_m \cos(\omega t - 180^\circ) \end{cases}$$

Equação 1

As tensões de linha correspondentes são [1][2]:

$$\begin{cases} e_{ac} = e_a - e_c = 1.732 * E_m \cos(\omega t + 30^\circ) \\ e_{ba} = e_b - e_a = 1.732 * E_m \cos(\omega t - 90^\circ) = 1.732 * E_m \sin(\omega t) \\ e_{cb} = e_c - e_b = 1.732 * E_m \cos(\omega t + 150^\circ) \end{cases}$$

Equação 2

As formas de onda são mostradas na Figura 8 [1][2].

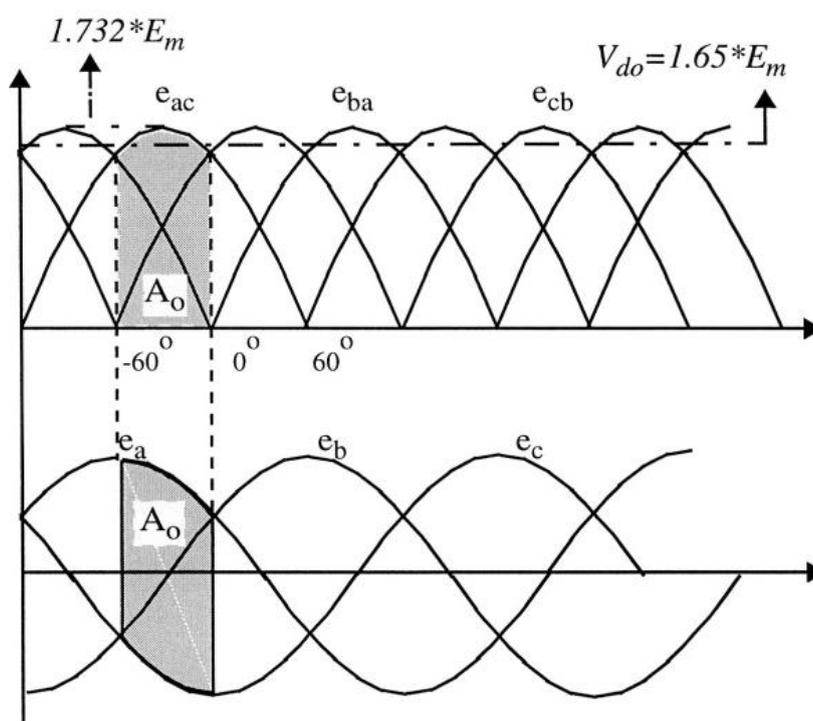


Figura 8 – Tensões de Linha e Tensões de Fase

### 2.2.1 Caso sem período de *overlap*

É definida como comutação a transferência de corrente de uma válvula para a outra que estejam posicionadas na mesma linha. Para o caso sem *overlap* a corrente de uma válvula é transferida instantaneamente para a outra válvula [2].

O circuito equivalente do conversor com apenas duas válvulas conduzindo é mostrado na Figura 9 quando apenas as válvulas 1 e 2 estão conduzindo. A Equação 3 descreve o conjunto de equações deduzidas a partir do intervalo de condução das válvulas 1 e 2 para o funcionamento do circuito.

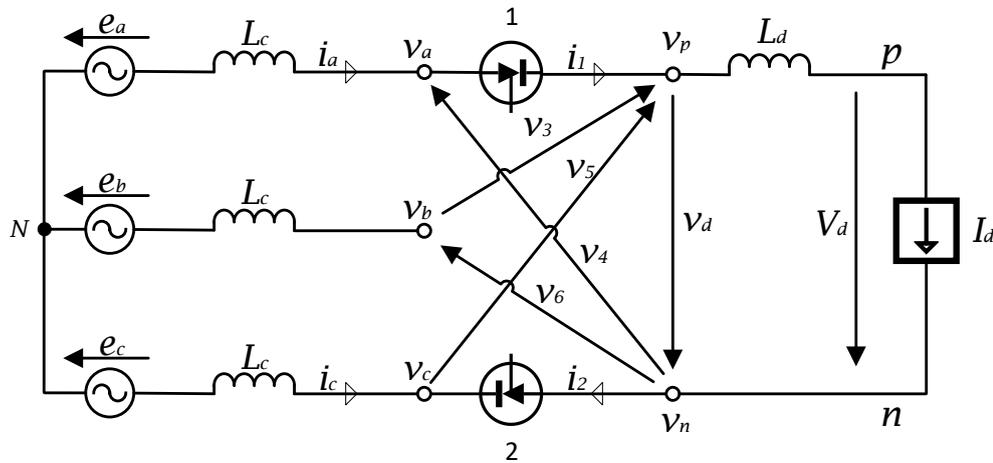


Figura 9 – Ponte com Duas Válvulas Conduzindo

$$i_a = i_1 = i_2 = -i_c = I_d$$

$$i_b = i_3 = i_4 = i_5 = i_6 = 0$$

$$v_a = V_p = e_a = E_m \cos(\omega t + 60^\circ)$$

$$v_b = e_b = E_m \cos(\omega t - 60^\circ)$$

$$v_c = V_n = e_c = E_m \cos(\omega t - 180^\circ)$$

$$v_d = v_p - v_n = e_a - e_c = e_{ac} = E_m \cos(\omega t + 30^\circ)$$

$$v_1 = v_2 = 0$$

$$v_3 = e_{ba} = \sqrt{3} E_m \sin \omega t$$

$$v_3 = e_{ba} = \sqrt{3} E_m \sin \omega t$$

$$v_4 = v_5 = -v_d = \sqrt{3} E_m \cos(\omega t - 150^\circ)$$

$$v_6 = e_{cb} = \sqrt{3} E_m \cos(\omega t + 150^\circ)$$

Equação 3 – Conjunto de definições

A tensão CC através da ponte é a diferença entre as tensões tais como o mostrada na área sombreada  $A_0$  da Figura 8. O valor médio da tensão  $V_{d0}$  é encontrado por meio da integração das tensões instantâneas ao longo de um período de 60 graus entre o intervalo de condução das válvulas 1 e 3 com ângulo de disparo  $\alpha=0$  e  $\omega t$  definido por  $\theta$  [2]:

$$\begin{aligned}
V_{do} &= \frac{3}{\pi} A_0 = \frac{3}{\pi} \int_{-\pi/3}^0 e_{ac} d\theta = \frac{3}{\pi} \int_{-60^\circ}^0 \sqrt{3} E_m \cos(\theta + 30^\circ) d\theta \\
&= \frac{3 \sqrt{3} E_m}{\pi} \left[ \text{sen}(\theta + 30^\circ) \right]_{-60}^0 = \frac{3 \sqrt{3} E_m}{\pi} [\text{sen } 30^\circ - \text{sen}(-30^\circ)] \\
&= \frac{3 \sqrt{3} E_m}{\pi} 2 \text{sen } 30^\circ = \frac{3 \sqrt{3} E_m}{\pi} = 1.65 E_m
\end{aligned}$$

Equação 4

Considerando que  $E_m$  equivale ao valor de pico da tensão de fase, podemos considerar em termos de valores eficazes:

$E_{LN}$  = tensão rms de fase e  $E_{LL}$  = tensão rms de linha. Temos:

$$V_{d0} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} E_{LN} = 2.34 E_{LN} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} E_{LL} = 1.35 E_{LL}$$

Equação 5

A tensão  $V_{d0}$  é geralmente definida como a tensão cc ideal sem carga (*No-load direct voltage*)

Considerando um ângulo de atraso  $\alpha$ , os limites de integração são simplesmente incrementados por  $\alpha$ , e, portanto temos a seguinte definição [2]:

$$V_d = V_{d0} \int_{(\alpha-60^\circ)}^{\alpha} \cos(\theta + 30^\circ) d\theta$$

Equação 6

$$V_d = V_{d0} \cos \alpha$$

Equação 7

### Relação entre a corrente CA e CC.

Assumindo que não há perdas na ponte, a potência que entra na ponte é igual à potência que sai da ponte [1][2].

$$P_d = V_d I_d = I_d V_{d0} \cos \alpha = 3E_{LN} I_{L1} \cos \phi$$

Equação 8

Onde  $I_{L1}$  é a componente fundamental da corrente rms de linha e  $\phi$  é o ângulo de fase entre a tensão de linha e a corrente de linha. Essa tensão e corrente são mostradas na Figura 10 [1][2].

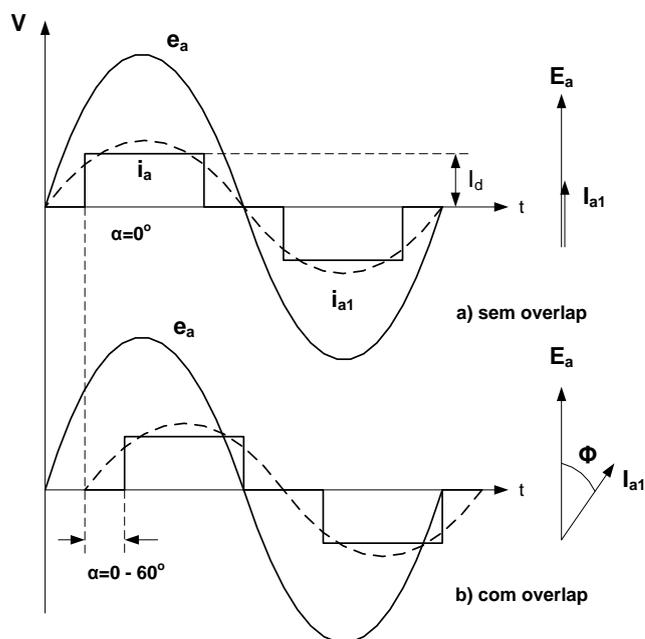


Figura 10 – Relação Entre Corrente CA e CC

Por análise de Fourier, o valor da corrente é dado por:

$$I_{L1} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d = 0.78 I_d$$

Equação 9

### 2.2.2 Caso com *overlap* em período inferior a 60 graus.

Considerando a condição com impedância de comutação e *overlap* em período inferior a 60 graus, ou seja, quando a condução ocorre em três válvulas. Conforme vemos na Figura 11 [1][2][10].

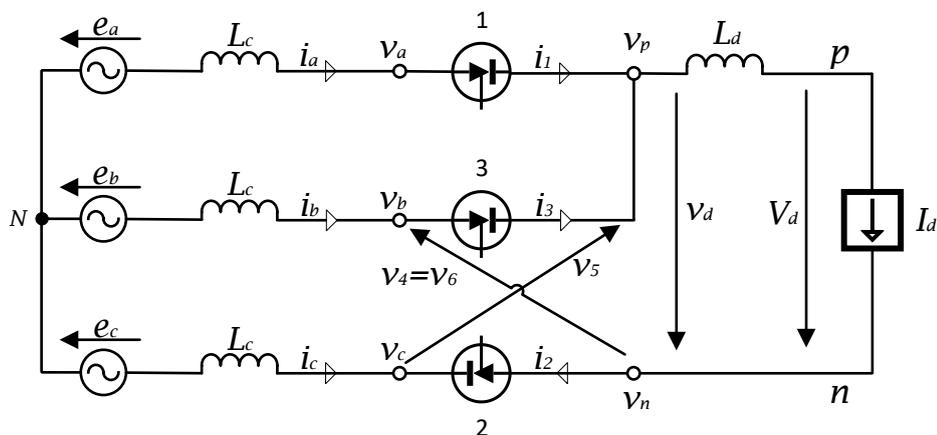


Figura 11 – Ponte Com Três Válvulas Conduzindo

Durante este intervalo (Figura 11), a corrente CC é transferida da válvula 1 para a válvula 3, esta transferência de corrente não ocorre instantaneamente devido a indutância existente no circuito, especialmente o transformador [1][2][10].

No início do intervalo ( $\omega t = \alpha$ ):  $i_1 = I_d$  e  $i_3 = 0$

No final do intervalo ( $\omega t = \alpha + \mu = \delta$ ):  $i_1 = 0$  e  $i_3 = I_d$ .

$$e_b - e_a = \frac{L_c di_3}{dt} - \frac{L_c di_1}{dt}$$

Equação 10

Na comutação:

$$e_b - e_a = \sqrt{3} E_m \text{sen}(\omega t)$$

Equação 11

e:

$$i_1 = I_d - i_3$$

Equação 12

entretanto,

$$\frac{di_1}{dt} = 0 - \frac{di_3}{dt}$$

Equação 13

Podemos considerar a tensão no circuito de comutação como:

$$\sqrt{3} E_m \text{sen}(wt) = \frac{2L_c di_3}{dt}$$

Equação 14

Efetuando a simplificação e integração teremos a equação:

$$\frac{\sqrt{3} E_m}{2L_c} \int_{\alpha/\omega}^t \text{sen}(wt) dt = \int_0^{i_3} di_3$$

$$I_{s2} (\cos(\alpha) - \cos(wt)) = i_3 = I_d - i_1$$

Equação 15

Então teremos:

$$I_{s2} = \frac{\sqrt{3} E_m}{2\omega L_c}$$

Equação 16

Para a tensão cc média, podemos manipular a equação  $i_3 = I_d$  (fim do intervalo), substituindo pela Equação 15.

$$I_d = I_{s2} (\cos(\alpha) - \cos(\delta))$$

Equação 17

A tensão média CC do conversor (representada pela área "A0" na Figura 12) é reduzida devido ao efeito do *overlap* causada pela queda de tensão  $\Delta V_d$ . [1][8].

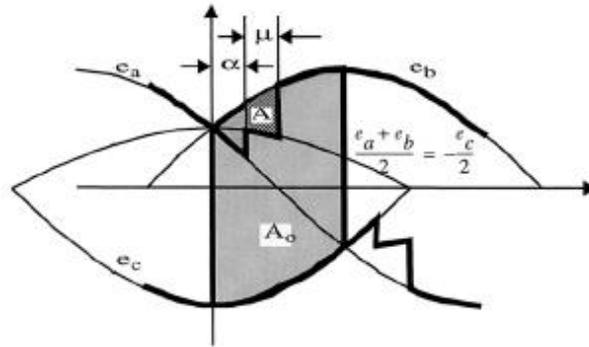


Figura 12 – Tensão CC com o Efeito do *Overlap*

A queda na tensão CC, representada pela área A, é dada por:

$$A = \int_{\alpha}^{\delta} \left( e_b - \frac{(e_a + e_b)}{2} \right) d\theta = \frac{V_{d0}}{2} (\cos(\alpha) - \cos(\delta))$$

Equação 18

Sem overlap a tensão cc é definida pela Equação 7. Considerando o overlap, teremos:

$$V_d = V_{d0} \cos(\alpha) - \Delta V_d = \frac{V_{d0}(\cos(\alpha) + \cos(\delta))}{2}$$

Equação 19

A queda de tensão é diretamente proporcional a corrente, onde:

$$\frac{\Delta V_d}{V_{d0}} = \frac{I_d}{2I_{s2}}$$

Equação 20

A análise da ponte dá as tensões CC seguintes:

$$V_d = V_{d0} \cos(\alpha) - R_c \cdot I_d$$

Equação 21

onde:

$$R_c = \frac{3}{\pi} \cdot \omega L_c = \frac{3}{\pi} \cdot X_c$$

Equação 22

### 3 TEORIA DO CONTROLE DE SISTEMAS CCAT

#### 3.1 HISTÓRICO

Para controlar o ângulo de disparo de um conversor, é necessário sincronizar os pulsos de disparo com a tensão de comutação da linha de corrente alternada, que tem uma frequência de 50 ou 60 Hz em regime permanente. No início dos anos 1950, quando as primeiras instalações conversoras CCAT foram implementadas com válvulas de mercúrio, o tamanho relativo dos terminais era pequeno em comparação com a capacidade em MVA dos sistemas de corrente alternada acoplados a estes conversores. Isto essencialmente significa que o sistema de disparo era sincronizado diretamente ao sistema CA com forma de onda senoidal, podiam gerar os pulsos de disparo de maneira relativamente estável [1].

No início dos anos da década de 1960, os problemas na sincronização dos pulsos de disparo foram observados devido à distorção da forma de onda CA causada por harmônicas. Notou-se que a tensão de comutação não era constante nem na frequência ou em sua amplitude durante o estado de perturbação. No entanto, apenas a frequência é de interesse primário para a sincronização de pulsos de disparo. Para sistemas CA fortes, a frequência do sistema é relativamente livre de distorções para ser aceitável para a maioria dos tipos de aplicações com conversores. Porém, conexões de conversores com sistemas fracos se tornaram mais frequentes do que nunca, portanto tornou-se necessário criar um sistema de sincronização, que seria desmembrado da tensão de comutação durante períodos de perturbações no sistema de potência CA. O método mais óbvio foi utilizar um oscilador independente em 50 ou 60 Hz, que pudesse manter o sincronismo com a tensão de comutação CA. Este oscilador, então, proporciona a referência para a unidade de disparo durante os períodos de perturbação, e usaria os períodos de regime permanente para sincronismo com a frequência do sistema. Devido à sua estabilidade de temporização é oferecida a possibilidade de pulsos de disparo equidistantes, que eliminou a geração de harmônicas não características durante

a operação em regime permanente. Esta era uma característica predominante e indesejável, durante a utilização do sistema de controle individual de fase (IPC—*Individual Phase Control*) onde os pulsos de disparo foram diretamente acoplados à tensão de comutação,  $V_{com}$ . Existem duas possibilidades para este oscilador independente [1]:

- A utilização de um oscilador com frequência fixa, também chamado de oscilador de controle de Pulso (PPCO – *Pulse Phase Control Oscillator*), que opera a uma frequência fixa de 60 Hz. No entanto, uma vez que a frequência do sistema varia na faixa entre 55-65 Hz, devido ao equilíbrio entre unidades geradoras e cargas, foi necessário utilizar um circuito de controle para o ângulo de disparo.
- A utilização de um oscilador de frequência variável (também chamado de: *Pulse Frequency Control Oscillator*). Este oscilador emprega uma malha de controle para tentar rastrear a frequência do sistema, a malha de controle teria seu próprio ganho e constantes de tempo para a exatidão no regime permanente e requisitos de desempenho dinâmico.

Durante meados da década de 1960, a indústria, até então, ligada a este tipo de unidade de sincronização baseada em um oscilador de frequência independente, ou seja, controlado por tensão ou corrente. Ambas as versões contaram com um oscilador controlado de forma independente, cuja frequência foi desacoplada das variações de frequência do sistema de alimentação de corrente alternada do conversor. Isto significava que os pulsos de disparo do conversor poderiam agora ser verdadeiramente equidistantes no regime permanente. Com o tempo, no entanto, a variante com PPC tornou-se praticamente obsoleta, e só o PFC variante está atualmente sendo utilizado pela indústria. O sistema de controle de disparo equidistante utilizado nos modernos sistemas de controle de sistemas de transmissão em corrente contínua são idênticos aos que foram desenvolvidas em meados da década de 1960, embora tenham ocorrido melhorias na sua aplicação, como o uso de microprocessadores poderosos etc. A filosofia fundamental não sofreu grandes mudanças [1].

### 3.2 FUNÇÕES DO SISTEMA DE CONTROLE CCAT

Em uma típica aplicação de conexão CC de dois terminais conectando dois sistemas de corrente alternada (Figura 13), as principais funções dos controles CC são [1][2]:

- Controlar o fluxo de potência entre os terminais;
- Proteger o equipamento contra estresses por tensão ou corrente causados por faltas;
- Manter o fator de potência o mais alto possível;
- Evitar falha de comutação;
- Estabilizar os sistemas CA conectados em qualquer modo de funcionamento da conexão CC.

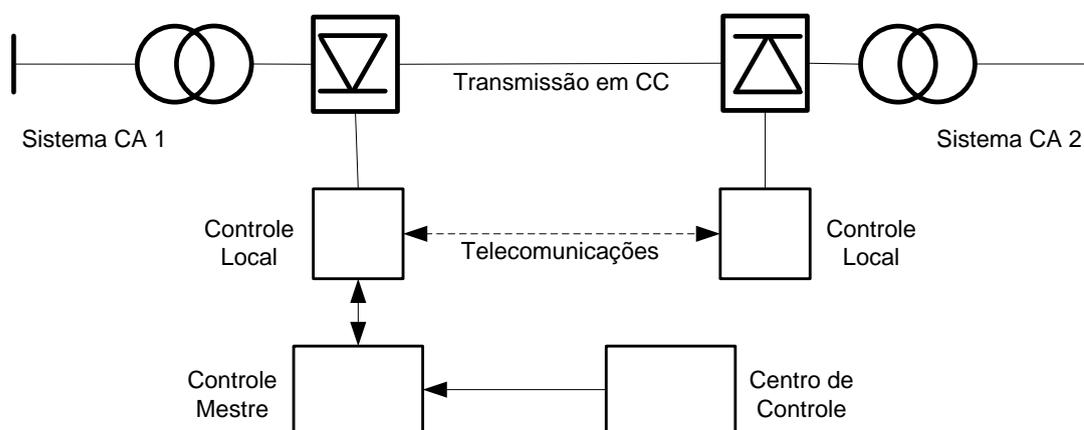


Figura 13 – Conexão CC Típica Interligando Dois Sistemas CA

A Figura 13 mostra uma interligação típica, os dois terminais CC possuem seus próprios controladores locais. Um centro de despacho centralizado irá enviar a ordem de potência a um dos terminais ao qual irá atuar como um controlador mestre que tem a responsabilidade de coordenar as funções de controle da conexão CC. Além das funções primárias, é desejável que os controles CC tenham as seguintes características [1]:

- Limitar a máxima corrente CC:
 

Devido a uma inércia térmica limitada das válvulas de tiristores para sustentar as sobrecorrentes, a corrente CC máxima é normalmente limitada a valores inferiores a 1,2 pu durante um intervalo limitado.
- Manter máxima tensão CC para a transmissão:
 

Isso reduz as perdas de transmissão.

- Minimizar o consumo de potência reativa:

Isto implica que os conversores devem operar com um ângulo de disparo baixo. Um conversor típico consome energia reativa entre 50-60%. Esta quantidade de fornecimento de energia reativa pode custar cerca de 15% do custo da subestação, e consomem cerca de 10% das perdas de energia.

Outros recursos:

Por exemplo, o controle de frequência em um sistema isolado CA ou melhorar a estabilidade do sistema de potência [1].

Além das características acima desejadas, os controles CC terão que lidar com os requisitos de regime permanente e dinâmico da conexão em corrente contínua, conforme mostrado na Tabela 3-1 [1][2].

Tabela 3-1 Requisitos de uma Conexão CC

Requisitos em Regime Permanente	Requisitos Dinâmicos
Limitar a geração de harmônicas não características	Mudanças graduais na corrente CC ou fluxo de potência
Manter a precisão da variável controlada, ou seja, corrente cc e/ou ângulo de extinção constante	Fluxo de potência reverso
Lidar com as variações normais nas impedâncias do sistema de corrente alternada devido a mudanças na topologia	Variação na frequência do sistema CA

### 3.3 CONTROLES BÁSICOS PARA CONEXÃO CC DE DOIS TERMINAIS

Uma conexão deste tipo é mostrada na Figura 14, com um retificador e um inversor. O sistema CC é representado por uma indutância  $L$  e uma resistência de linha  $R$ , o valor da indutância  $L$  compreende ao reator de alisamento e da indutância da linha CC, enquanto o valor de  $R$  inclui as resistências do reator de alisamento e da resistência da linha CC etc. [1][2].

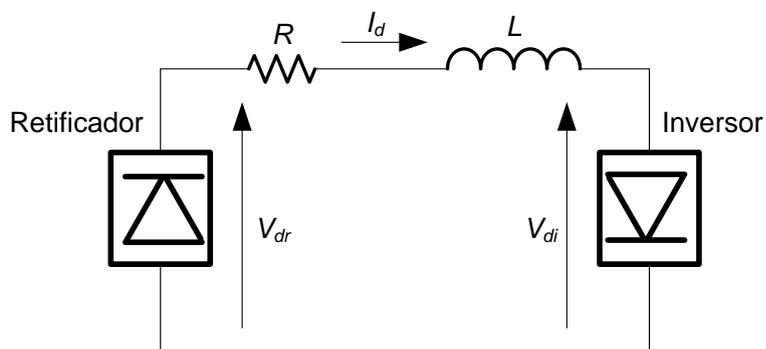


Figura 14 – Conexão CC de dois terminais

Usando a lei de Ohm, corrente CC ( $I_d$ ) na conexão representada na figura é dada como:

$$I_d = \frac{(V_{dr} - V_{di})}{R}$$

Equação 23

Onde:

$V_{dr}$  = Tensão CC no retificador;

$V_{di}$  = Tensão CC no inversor;

$R$  = resistência da linha CC.

A transmissão do fluxo de potência através do *link* é dada por:

$$P_d = V_d * I_d$$

Equação 24

Da teoria do conversor a relação ( $V_d - I_d$ ) para o retificador é dada por:

$$V_{dr} = V_{dor} \cos \alpha - R_{cr} I_d$$

Equação 25

Da teoria do conversor a relação ( $V_d - I_d$ ) para o inversor é dada por:

$$V_{di} = V_{dir} \cos \beta - R_{ir} I_d$$

Equação 26

Ou, dependendo da variável de controle:

$$V_{di} = V_{dir} \cos \gamma - R_{ir} I_d$$

Equação 27

Utilizando as equações que descrevem ( $V_{dr}$  e  $V_{di}$ ), a corrente CC da linha é determinada por qualquer uma das duas opções, dependendo apenas da escolha do modo de controle no inversor [1][11]:

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

Equação 28

Ou:

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

Equação 29

Estas equações fornecem os circuitos equivalentes para uma conexão CC, conforme mostrado na Figura 15.

**Alterações na corrente ( $I_d$ ) podem ocorrer por:**

- Variando o ângulo  $\alpha$  no retificador. Devido à ação do controle eletrônico, esta variação ocorre rapidamente e irá ocorrer dentro de alguns milissegundos;
- Variando o ângulo  $\beta$  ou  $\gamma$  no inversor. Este é bastante rápido e vai ocorrer dentro de alguns milissegundos;

- Variando a tensão CA no retificador através da mudança do *tap* do transformador. Este é um processo lento e atua normalmente na ordem de várias centenas de segundos;
- Variando a tensão CA do inversor através da mudança do *tap* do transformador. Este é um processo lento e atua normalmente na ordem de várias centenas de segundos.

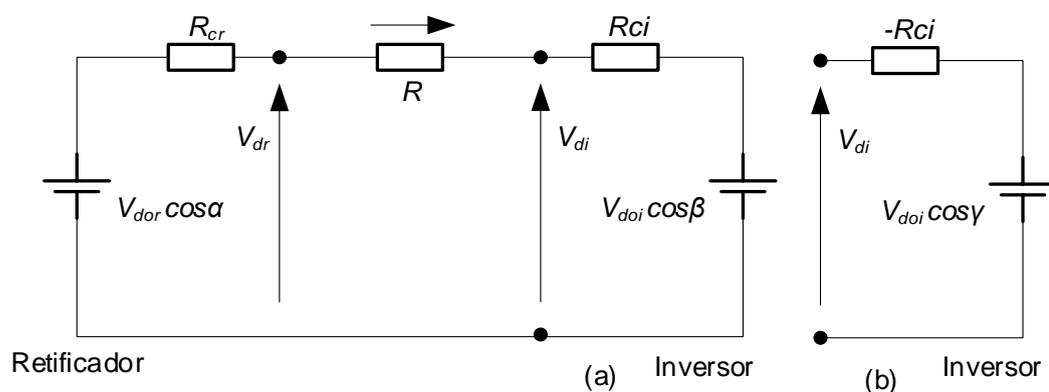


Figura 15 – Circuito Equivalente de uma Conexão CC

(a) Circuito equivalente com inversor no modo de controle de beta

(b) Circuito equivalente com inversor no modo de controle de gama

A escolha da estratégia de controle é selecionada para permitir uma operação rápida e estável da conexão CC, minimizando a geração de harmônicos, o consumo de potência reativa e as perdas de transmissão de energia.

As três características representam linhas retas no plano  $V_d - I_d$ , como mostra a Figura 16. Observe que Equação 26, isto é, a característica beta, tem uma inclinação positiva enquanto a Equação 27, isto é, a característica de gama, tem uma inclinação negativa [1].

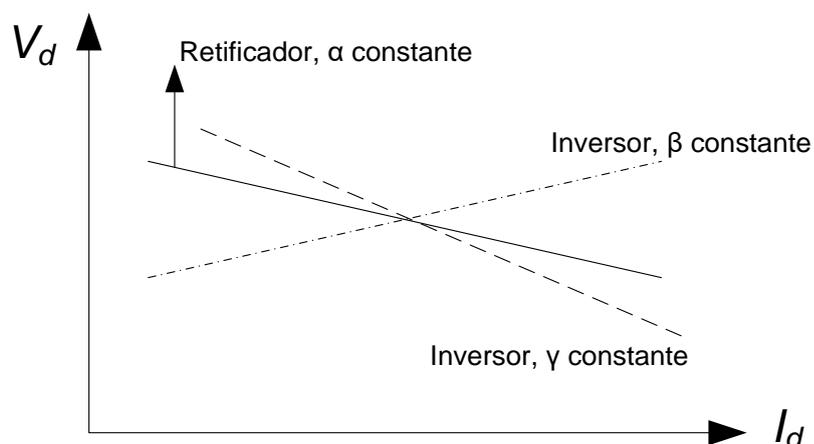


Figura 16 – Representação da Estratégia de Controle

A escolha da estratégia de controle para uma típica conexão CC de dois terminais é realizada de acordo com as condições da Tabela 3-2 [1].

Tabela 3-2 Escolha da Estratégia de Controle para Link DC de dois Terminais

Condição	Características Desejadas	Razões	Implementação do Controle
1	Limitar a corrente CC máxima, $I_d$	Para proteger as válvulas	Utiliza o controle da corrente constante no retificador
2	Empregar a máxima tensão CC, $V_d$	Para reduzir as perdas na transmissão	Utiliza o controle de tensão constante no inversor
3	Reduzir a incidência de falhas de comutação	Motivos de estabilidade	Utiliza o controle do mínimo ângulo de extinção no inversor
4	Reduzir o consumo de potência reativa nos conversores	Para regulação de tensão e razões econômicas	Utiliza os mínimos ângulos de disparo

A Condição 1 implica no uso do retificador no modo de controle de corrente constante e a Condição 3 implica o uso do inversor no modo de controle com o ângulo de extinção constante (CEA). Outros modos de controle podem ser usados para melhorar a transmissão de energia, em condições de emergência, dependendo das aplicações [1].

### 3.4 MÉTODO DE CONTROLE DA MARGEM DE CORRENTE

O chamado "Método da Margem de Corrente" para o controle da conexão em corrente contínua de dois terminais é o método mais empregado atualmente. O método baseia-se numa zona definida de operação para o sistema CC, com funções claras para ambos os terminais. Ele também incorpora recursos de proteção [1][2].

#### 3.4.1 Modo de Operação do Retificador

O modo de operação do retificador é definido por certo número de características, conforme mostrado na Figura 17.

##### 3.4.1.1 Alfa Mínimo Característica do Retificador

Da teoria do conversor, pode ser mostrado que:

$$V_d = V_{dor} \cos \alpha - R_{cr} \cdot I_d$$

Equação 30

onde:

$$R_{cr} = \frac{3}{\pi} w \cdot L_{cr}$$

Equação 31

A Equação 30 descreve uma linha reta entre os pontos A e B quando representada graficamente com a característica  $V_d - I_d$  em regime permanente, conforme mostrado na Figura 17. O declive da curva para esta característica é o valor referente à  $-R_{cr}$ , que é definida como a resistência equivalente de comutação, um valor baixo de  $R_{cr}$  implica em um sistema CA forte, sendo neste caso uma característica quase horizontal. A intersecção da curva no eixo  $V_d$  é igual ao valor  $V_{dor} \cos \alpha$  quando o valor de  $I_d = 0$ . O limite máximo da tensão  $V_d$  será definido pelo valor de  $\alpha = 0^\circ$ , isto é, quando o retificador é um conversor de

diodo teórico com ângulo de disparo igual a zero. Na realidade, um valor mínimo para o ângulo alfa é aproximadamente  $\alpha=2$  a 5 graus, isto é normalmente necessário para assegurar que as válvulas do conversor tenha uma tensão mínima positiva para garantir o disparo das mesmas. Esta zona é delimitada pela área cinza (em destaque) na Figura 17 [1][2].

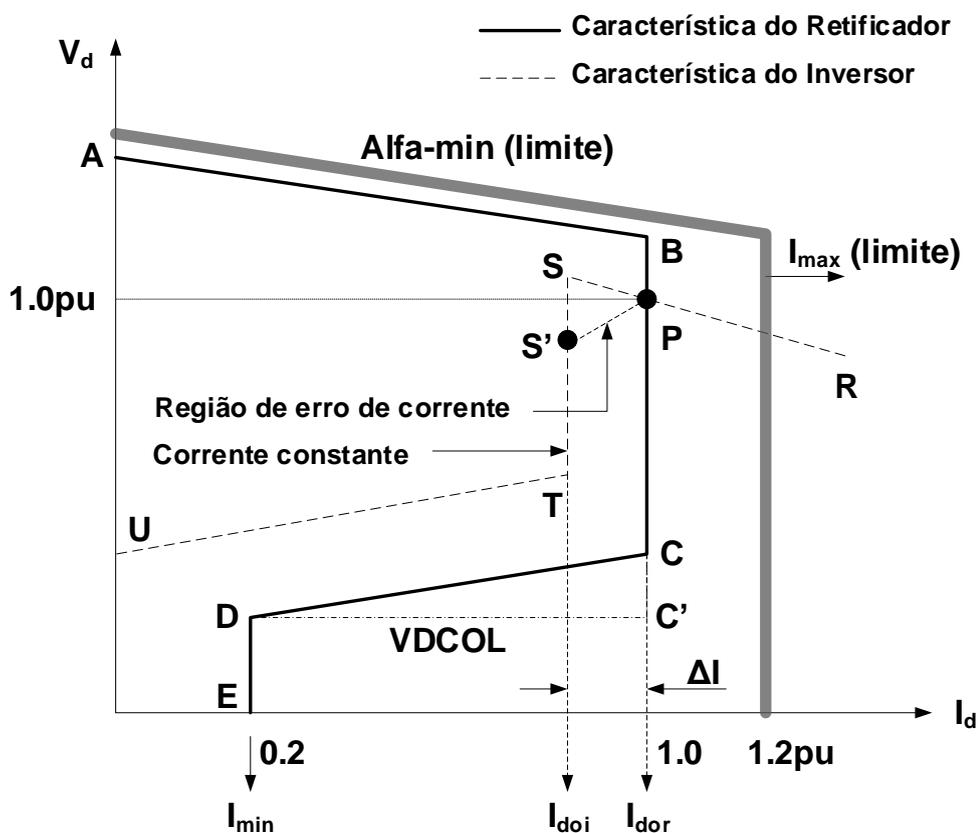


Figura 17 – Características Estáticas de  $V_d$ - $I_d$

### 3.4.1.2 Característica Constante

As válvulas do conversor possuem inércia térmica limitada e, portanto, não devem conduzir valores de corrente acima do seu valor nominal por período prolongado. Normalmente, o limite máximo de  $I_{max} = 1,2 pu$  este valor é especificado como o limite superior para a capacidade de corrente das válvulas. A característica  $I_d = constante$  pode ser visualizada na linha que interliga os pontos B e C da Figura 17. [1][18].

### 3.4.1.3 Característica VDCOL

O controle VDCOL (Voltage Dependent Current Order Limit) é uma limitação imposta pela capacidade do sistema de corrente alternada para sustentar o fluxo de potência CC, quando a tensão CA no barramento do retificador é reduzida provocada por perturbações. Algumas variantes desta característica apresentam uma curva como definida pelos pontos C' e D, em vez da curva inclinada, conforme definida pelos pontos C e D [1][11][18].

### 3.4.1.4 Característica de Corrente Mínima

Este limite é geralmente aplicado para manter a corrente CC nas válvulas com valor suficiente para evitar a descontinuidade da corrente durante a operação evitando assim possíveis transientes de tensão CC [1][18].

## 3.4.2 Modo de Operação do Inversor

### 3.4.2.1 Característica de Gama Mínimo

A Equação 32 define o  $V_d - I_d$  característico para o inversor; embora existam duas possibilidades o ângulo de extinção mínimo (gama) é geralmente a opção utilizada. Na Figura 17 os pontos S e R definem este modo de operação, e é referido como modo de controle de ângulo de extinção constante (CEA). O declive desta linha é geralmente mais acentuado do que o correspondente ao retificador [1].

$$V_d = V_{doi} \cos \gamma - R_{ci} \cdot I_d$$

Equação 32

Onde:

$$R_{ci} = \frac{3}{\pi} \omega \cdot L_{ci}$$

Equação 33

### 3.4.2.2 Característica Corrente Constante

Os pontos S e T na Figura 17 definem a característica de operação em modo de corrente constante no inversor. De forma a manter um único ponto de operação no barramento CC, definido pelo ponto definido pela letra (P) nas curvas do retificador e do inversor, uma margem de corrente de  $\Delta I_d = 0,1pu$  é normal entre os valores de ordem de corrente do retificador  $I_{dor}$  e do inversor  $I_{doi}$  ou seja,  $I_{dor} - I_{doi} = \Delta I_d$ . No entanto, a corrente exigida pelo inversor  $I_{di}$  é geralmente menor do que a corrente exigida pelo retificador  $I_{dr}$  pela margem de corrente  $\Delta I$ , que é tipicamente cerca de 0,1pu, a sua magnitude é selecionada para ser suficientemente grande para que o modo de corrente do retificador e inversor não interajam com quaisquer correntes harmônicas que podem ser sobrepostos na corrente CC. Esta estratégia de controle é denominada de o método da margem de corrente [1].

### 3.4.2.3 Alfa Mínimo no Modo Inversor

Os pontos T e U na Figura 17 definem a característica de modo de operação *alfa-mínimo* no inversor. Este valor é tipicamente entre 100-110 graus, e é necessária para limitar qualquer excursão (mesmo que transitoriamente) do inversor para o modo de operação do retificador. Além disso, o valor de 100-110 graus garante um mínimo de tensão CC no inversor durante uma partida rápida do *link CC* com  $I_d = 0$  [1].

### 3.4.2.4 Região de Erro de Corrente

Uma modificação para a característica do inversor é geralmente realizada durante no intervalo da margem de corrente (pontos P e S na Figura 17), para evitar qualquer instabilidade devido à possibilidade de múltiplos pontos de operação que ocorrem com um sistema de CA fraco no lado do inversor. Esta modificação é ilustrada na Figura 18. Observe que a característica VDCOL foi eliminada apenas por razões de simplificação da figura.

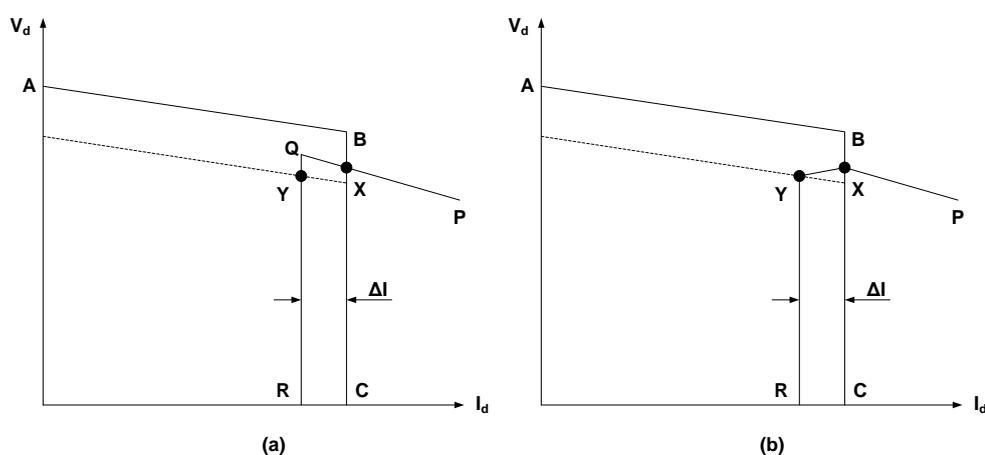


Figura 18 – (a) Características Estáticas de  $V_d$ - $I_d$  Sem Modificação (b) Modificada

A característica do retificador é constituída por dois modos de controle: *alfa-mínimo* (pontos A e B) e de corrente constante (pontos B e C na Figura 18). O modo de controle *alfa-mínimo* no retificador é imposto pelas características naturais do sistema CA no lado do retificador e a capacidade das válvulas de operar num ângulo alfa igual a zero.

A característica do inversor é composta por dois modos: *gama-min* (pontos P e Q) e do modo de corrente constante (pontos Q e R) ambos na Figura 18. O ponto de operação para a conexão CC é definido pelo ponto X intersecção das características do retificador e do inversor.

A vantagem desta estratégia de controle torna-se evidente se quando ocorre uma diminuição da tensão no barramento CA no lado do retificador forçando a linha AB a se mover para baixo. O ponto de operação move-se para o ponto Y e o inversor assume o controle da corrente. Desta forma, a corrente de transmissão será reduzida para 0,9 pu do seu valor anterior e o controle de tensão passará a ser realizado pelo retificador. No entanto, a transmissão de potência será mantida próximo de 0,9 pu de seu valor original. A estratégia de controle geralmente emprega as seguintes modificações para melhorar o comportamento durante distúrbios do sistema (Figura 19):

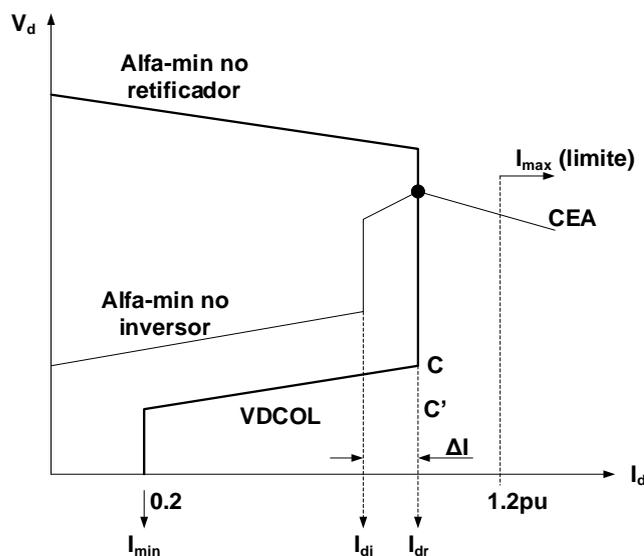


Figura 19 – Características Estáticas (completa) de Vd-Id

#### No retificador:

1. Limite de ordem de corrente dependente de tensão, VDCOL.

Esta modificação é feita para limitar a corrente CC em função da tensão CC ou, em alguns casos, da tensão CA. Esta modificação auxilia a conexão CC para se recuperar de falhas. Em alguns casos a modificação é um valor fixo em vez de uma linha inclinada [1].

2. Limite de mínimo de corrente

Esta limitação tem a finalidade de assegurar uma mínima de corrente CC para evitar a possibilidade de extinção da mesma causada pela queda de corrente da válvula abaixo da corrente mínima dos tiristores, eventualmente podem surgir devido harmônicas sobrepostas sobre o baixo valor da corrente CC. A resultante corrente cortada poderia causar sobretensões elevadas nas válvulas. A magnitude da corrente mínima é afetada pelo tamanho do reator de alisamento utilizado [1].

### 3.5 CONTROLE DA CORRENTE NO RETIFICADOR

A função de controle da corrente normalmente realizada pelo retificador, conforme mostrado Figura 20. A medição da corrente CC do sistema é obtida e comparada a um valor

de referência  $I_o$ . A corrente resultante de erro  $I_e$  alimenta um regulador PI com ganhos proporcional e integral  $K_p$  e  $K_i$ , respectivamente. A saída deste regulador é um sinal de tensão conhecido como ordem alfa  $\alpha_o$ , que controla a saída de frequência do VCO (*Voltage-Controlled Oscillator*). Sob as condições de  $\alpha_o = 0$ , a frequência de saída do VCO é uma constante de 360 Hz e é definida pela entrada  $U_{ref}$ , que poderia ser uma tensão proporcional a uma medição da frequência do sistema de corrente alternada, desta forma quaisquer modulações lentas da frequência do sistema poderia também ser compensado, se necessário. A soma de  $\alpha_o$  e  $U_{ref}$  alimenta o VCO, que dispõe de um integrador e um comparador reajustável. O ganho do integrador é selecionado para ser de  $720 \cdot \text{PI}$ . A saída do comparador é um trem de pulsos de 360 Hz, ou seja, 6 vezes a frequência fundamental. O contador (*Ring Counter*), em seguida, deriva pulsos individuais de disparo para o conversor de 6 pulsos na saída do comparador. É digno de nota que o VCO apresenta uma função de transferência integral no interior do circuito de controle [1].

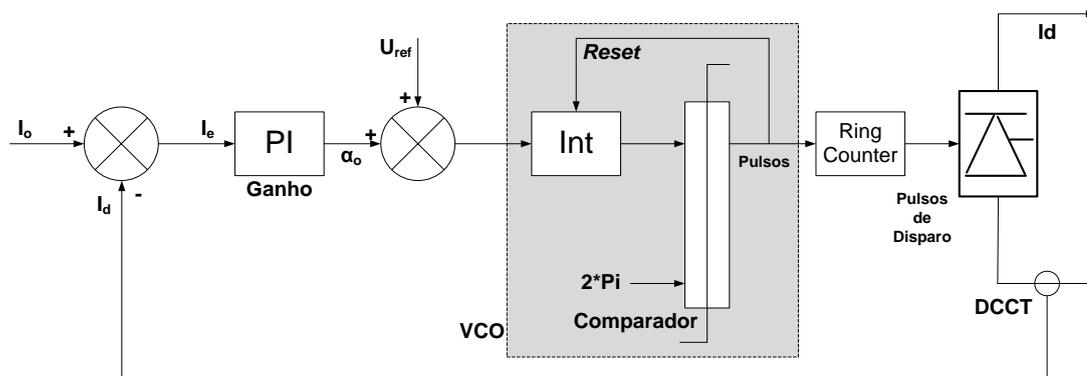


Figura 20 – Controle da Corrente no Retificador

A frequência do VCO é 6 vezes a frequência fundamental do sistema de CA. No entanto, o VCO é totalmente independente da frequência do sistema de corrente alternada [1].

### 3.6 CONTROLE DO ÂNGULO DE EXTINÇÃO NO INVERSOR

Para o controle do ângulo de extinção no inversor, uma técnica similar para o controlador de corrente do retificador é utilizada. Entretanto, a aproximação é complicada devido à medição do ângulo gama. Para a medição do gama, um método direto seria medir a tensão da válvula

(*VV – Valve Voltage*), e o valor do gama corresponderia ao período em que o *VV* é negativo. No entanto, a medição direta do *VV* nem sempre é empregada e economicamente viável, são utilizadas alternativas, ou seja, técnicas indiretas para medir ou prever o gama. Além disso, uma vez que existem 6 ou 12 válvulas em um conversor, isto é necessário para se obter o valor mínimo do gama de todas as válvulas. Aproximações diferentes para a medição ou previsão do gama têm sido relatadas nas literaturas [1].

### 3.6.1 Medição de Gama - Aproximação 1

Um método utiliza o momento do disparo da válvula e a detecção do cruzamento da corrente pelo zero naquela válvula para determinar o valor do ângulo do *overlap*  $\mu$  (Figura 21 e Figura 22). O ponto de cruzamento pelo zero da tensão de comutação, com a tensão se tornando positiva, fornece o fim do ângulo gama  $\gamma$ . Portanto, o ângulo de ignição  $\beta$  pode ser calculado do conhecimento do período desde o momento do disparo da válvula até o momento da inversão da tensão de comutação, isto é, indo para um valor positivo.  $\beta = \mu + \gamma$ .

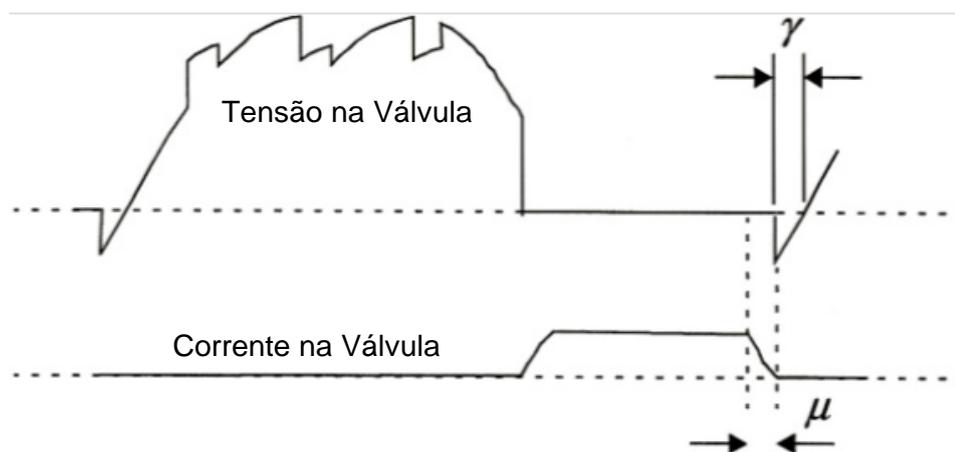


Figura 21 – Medição do Gama - Aproximação 1

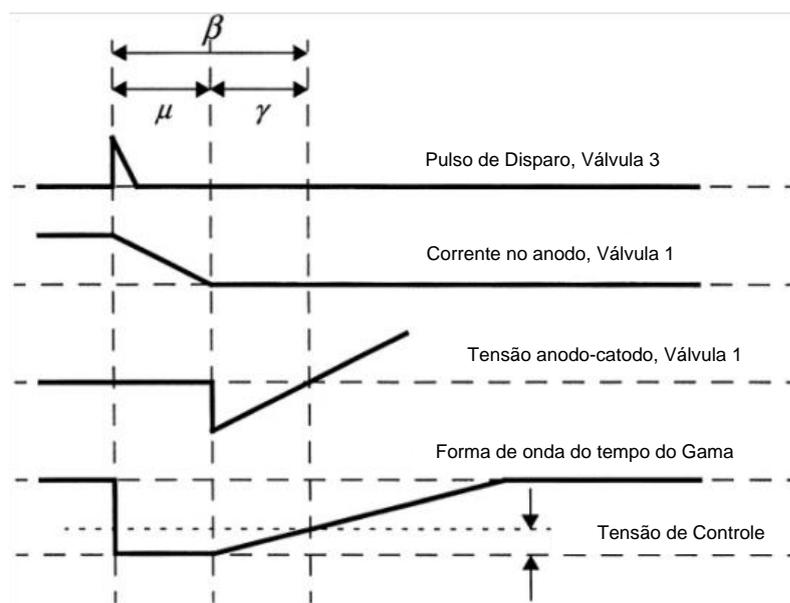


Figura 22 – Medição do Gama (Disparo na Válvula 3) - Aproximação 1

### 3.6.2 Previsão da Gama - Aproximação 2

Neste método, uma previsão do restante da área da tensão de comutação após a comutação é realizada, e este é mantido para ser maior do que o mínimo necessário para a comutação ser bem sucedida. A previsão é aproximada, porém para aumentar a precisão, uma realimentação é utilizada ao qual mede o erro e realimenta o método. O previsor calcula continuamente (por uma aproximação triangular) o restante da área de tensão e se o disparo poderia ocorrer naquele instante. Uma vez que o indicador é comum a todas as válvulas de um conversor de 6 pulsos, funciona durante um período de 60 graus por válvula. A Figura 23 mostra esta função para uma tensão de comutação  $U_{sr}$  para a válvula 3 de uma ponte [1].

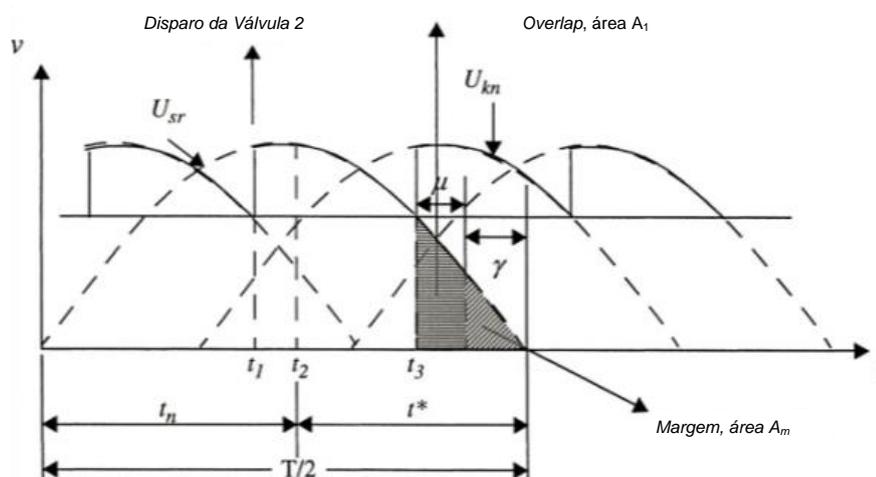


Figura 23 – Previsão do Gama - Aproximação 2

### 3.7 HIERARQUIA DO CONTROLE

#### 3.7.1 Controlador do Bipolo

O controlador bipolar geralmente recebe uma ordem de potência do operador da estação. Normalmente a ordem está associada a uma taxa controlada de aumento/diminuição, a fim de proteger o sistema de mudanças bruscas na potência. Um sinal de modulação suplementar de potência  $\Delta P_o$  pode também ser introduzido nesta fase, se necessário. Os limites de potência mínima  $P_{min}$  e máxima  $P_{max}$  são impostos pelo controlador. Por fim, a ordem de potência é dividida pelo valor da tensão CC medida para resultar uma ordem de corrente  $I_o$  que será enviada para os dois controladores dos polos. Para este circuito, em caso de uma partida do polo quando a tensão de CC pode ser zero ou próximo de zero, um circuito de polarização é necessário para evitar qualquer problema devido a uma função de divisão por zero. A saída deste controlador é um valor de ordem de corrente  $I_o$  limitada, que é submetida à proteção do VDCOL (limite de tensão dependente da corrente), ver Figura 24 [1].

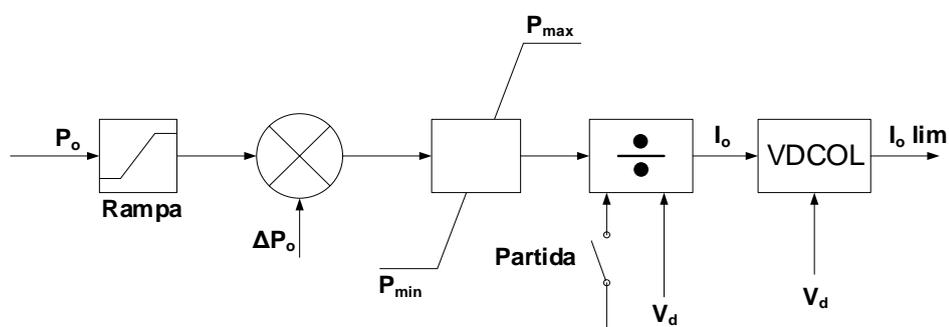


Figura 24 – Controlador do Bipolo

### 3.7.2 Controlador do Polo

A entrada para cada um dos controladores do polo é a ordem de corrente  $I_o$  do controlador bipolar. Um valor suplementar da entrada da corrente  $\Delta I_o$  pode ser adicionado ao  $I_o$  para realizar modulação caso necessário. O valor da corrente de entrada é submetido aos limites superior  $I_{max}$  e inferior  $I_{min}$  para fins de proteção. Depois da limitação, a ordem de corrente é comparada com o valor medido da corrente  $I_d$  para gerar um sinal de erro  $I_e$ . Outro sinal que modifica a ordem de corrente é a margem de corrente  $\Delta I$  ao qual é necessária apenas no inversor para tendenciar o controlador de corrente, de modo que o controlador de gama possa assumir. O controlador de corrente utiliza um regulador PI para fornecer as propriedades dinâmicas para a malha de controle, e fornece a ordem do ângulo alfa  $\alpha_o$  em sua saída. Ver Figura 25 [1].

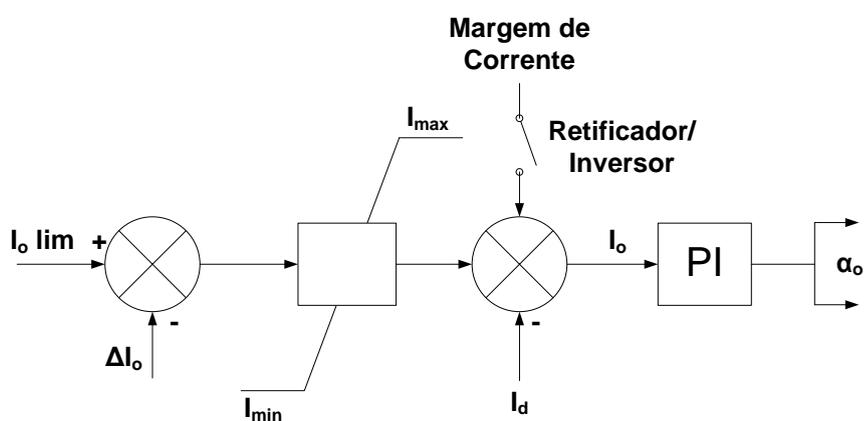


Figura 25 – Controlador do Polo

### 3.7.3 Controlador do Grupo de Válvulas

O sinal da ordem de alfa vindo do controle do polo é usado para gerar os pulsos de disparo para o controlador do grupo das válvulas do conversor. O controlador tem dois laços secundários separados:

#### 3.7.3.1 Controlador do *Tap*

O controle do *tap*, caracterizado geralmente pela sigla TCC (*Tap Changer Control*), é um sistema que possui o objetivo de controlar os comutadores dos transformadores conversores. Tem como o principal objetivo de manter a margem do ângulo de disparo  $\alpha$ , a margem do ângulo de comutação  $\gamma$  e a tensão CC próximo aos seus respectivos valores determinados pelo controle VARC (ver capítulo 4.4). O controle do tap também garante que a tensão CC sem carga fique abaixo de sua limitação máxima. Este controle é geralmente automático, porém, com a possibilidade de operação manual. O controle manual pode ser considerado um modo de reserva, ou seja, quando o modo automático não pode ser utilizado. No entanto, o controle manual deve ser evitado durante a transmissão devido aos comutadores serem utilizados para controlar as margens de disparo/comutação e a tensão CC. O controlador do tap consiste nas seguintes subfunções [9][15]:

- Controle sem carga;
- Controle do ângulo alfa;
- Controle do ângulo gama;
- Controle da tensão CC;
- Monitoramento de estresses da válvula;
- Sincronização automática dos comutadores.

#### 3.7.3.2 Controlador de Falha de Comutação

Este circuito detecta a possibilidade de uma falha de comutação a partir das medições das correntes CA, tensão de comutação e a corrente CC. Rápidas alterações pré-programadas na ordem de alfa podem ser realizadas em função da detecção de falha de comutação para

auxiliar a recuperação do sistema de corrente contínua [1].

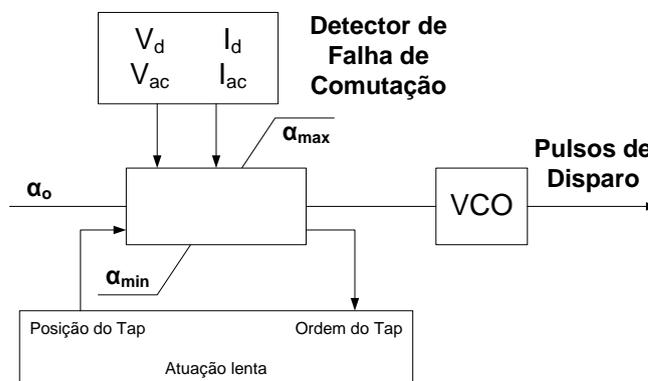


Figura 26 – Controlador do Grupo das Válvulas

As medições disponíveis para fins de controle e proteção compreendem as tensões de comutação trifásicas  $V_{ac}$ , as correntes CA ( $I_{ac}$ ) nos lados primários e secundários do transformador do conversor, corrente CC ( $I_d$ ) e a tensão CC ( $V_d$ ).

### 3.8 AÇÕES PELOS CONTROLES APÓS PERTURBAÇÃO

Algumas das ações que podem ser tomadas pelos controles durante uma perturbação são indicadas na Tabela 3-3 [1].

Tabela 3-3 Ações do Controle após Perturbação

Perturbação	Ação
Distorção de Fase	O limite de $\beta_{mínimo}$ incrementa temporariamente de 150-60 graus por 100ms
Faltas CA no lado do retificador	O limite de $\alpha_{mínimo}$ incrementa temporariamente de 5 - 45 graus
Faltas CA no lado do inversor - 1 Falha de comutação - n falhas de comutação	$\gamma$ - Incrementa transitoriamente $\gamma$ - Incrementa em estágios
Bloqueio/Desbloqueio ou restart	O limite de $\alpha_{mínimo}$ incrementa para um dado valor e reduz lentamente

## 4 CARACTERÍSTICAS DO CONTROLE DE POTÊNCIA E CORRENTE

### 4.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta uma descrição funcional do sistema de controle CCAT. Descreve as

principais funções cuja teoria fora abordada no capítulo anterior. Uma visão funcional geral do sistema de controle CCAT para um polo é ilustrada na Figura 27. O objetivo primário do sistema de controle é enviar os pulsos de disparo para as válvulas de forma a manter a transmissão de potência ou corrente CC no nível ordenado, o controle deve também apresentar resposta adequada no caso de distúrbios no sistema [7][9][15].

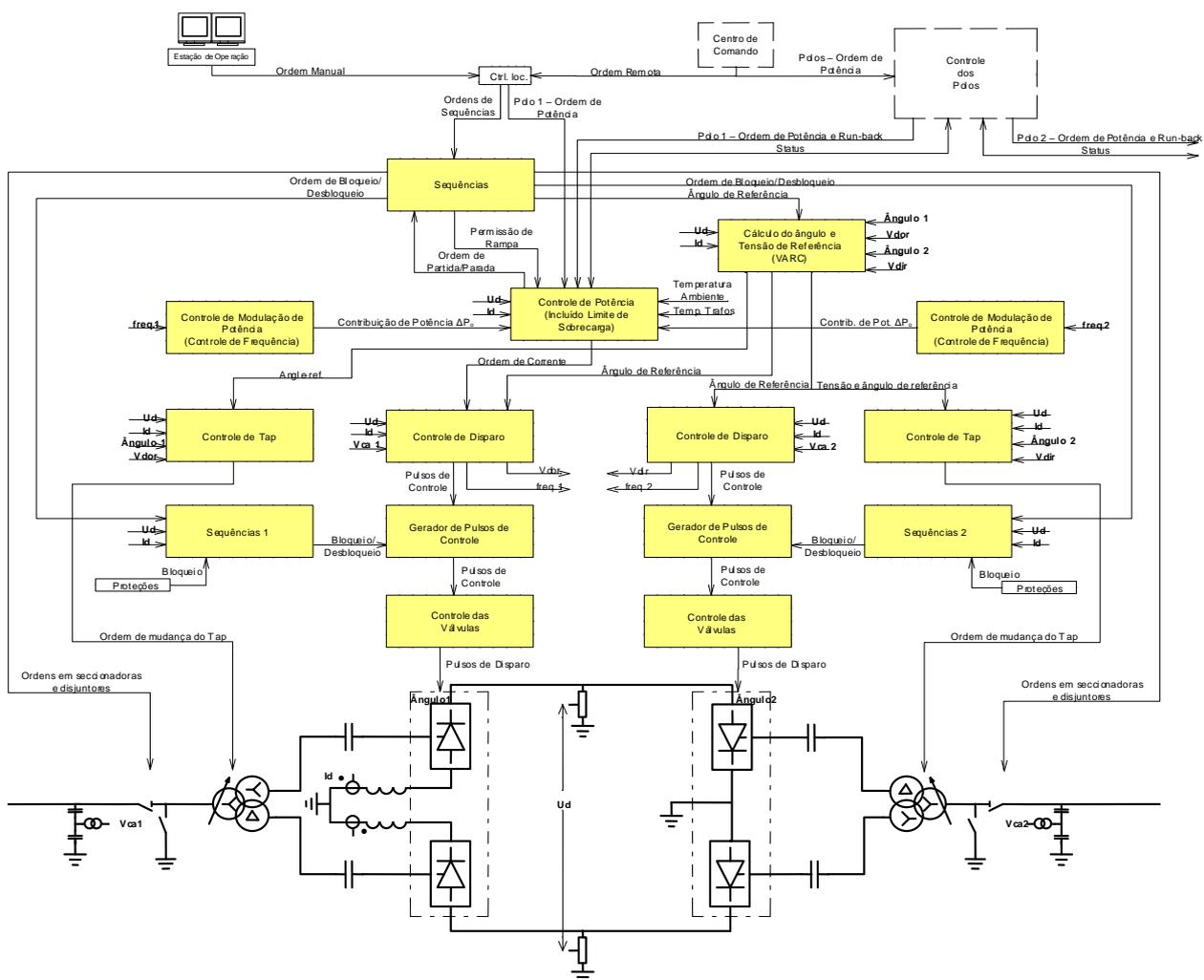


Figura 27 – Sistema de Controle CCAT Simplificado (Back to Back)

O valor da potência é fixado pelo operador remotamente ou localmente com possíveis contribuições de várias funções de modulação de potência. O valor da potência é enviado ao bloco controle de potência que calcula o valor da corrente que por sua vez é enviado então ao controle de disparo do conversor que calcula o alfa correspondente e envia os pulsos de disparo que também tem a função de assegurar que o disparo ocorrerá dentro dos limites.

## 4.2 CONTROLE DA CORRENTE CC

A função de controle de corrente faz parte dos controles do conversor definido como retificador e do inversor e consiste nas seguintes funções [9][18][19]:

- Limitador da ordem de corrente dependente da Tensão (VDCOL)
- Amplificador de controle de corrente (CCA).
- Limitações do amplificador de controle de corrente

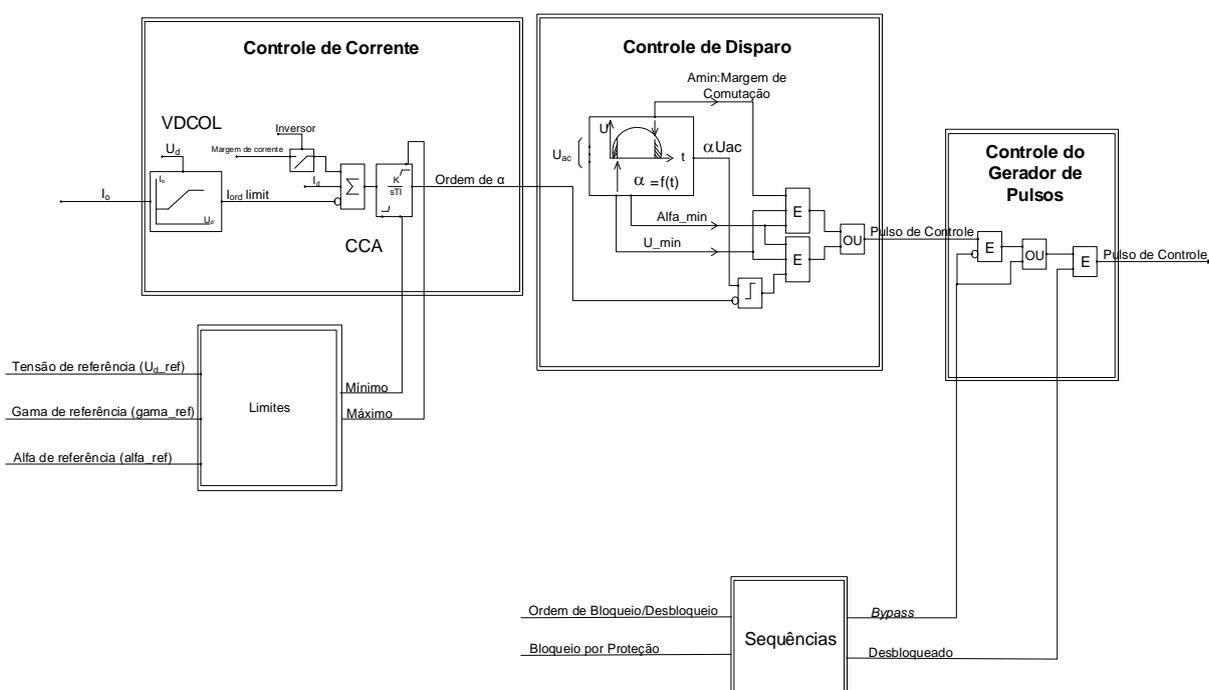


Figura 28 – Diagrama Simplificado do Controle de Disparo

### 4.2.1 Limitador da Ordem de Corrente Dependente da Tensão (VDCOL)

O VDCOL irá reduzir a ordem de corrente  $I_o$  devido a redução da tensão CC, tendo a sua característica mostrada nas Figura 29 e Figura 30. e tem como principal objetivo [18][19]:



No entanto, definir um valor muito baixo pode gerar longos tempos de reinicialização após a eliminação da falha CA. A razão para esse limite é impedir a operação do conversor com uma corrente muito baixa evitando assim que as válvulas extinguam a corrente durante seu intervalo de condução.

#### 4.2.1.2 Limites de tensão

Se, por um motivo ou outro, a tensão CC atingir valores abaixo do ponto definido pelo valor ajustado na variável  $U_{dhigh}$ , consulte a Figura 30, a limitação máxima da ordem de corrente começará a diminuir. Isso reduzirá a ordem da corrente de saída do controle VDCOL caso a entrada exceder esse nível de limitação. Essa redução da ordem de corrente é uma ferramenta para evitar instabilidade de tensão durante falhas CA no inversor. Uma rede CA mais forte no inversor permite reduzir o nível do  $U_{dhigh}$ . Se a tensão CC continuar a diminuir e se tornar menor que o  $U_{dlow}$ , a redução da limitação máxima será interrompida e manterá o nível de limitação em  $I_{oLim}$  [19].

Vale ressaltar que ao definir o nível de  $U_{dhigh}$ , o nível da operação de tensão reduzida ou outros modos de operação, que diminuem a tensão CC, deve(m) ser levado(s) em consideração.

#### 4.2.1.3 Constantes de tempo para a operação VDCOL

A função VDCOL também inclui um filtro passa baixa não linear. Diferentes constantes de tempo para aumentar a tensão CC normalmente utilizadas para a operação do inversor e do retificador. Como regra, a constante de tempo do retificador deve ser menor para evitar a perda da margem de corrente  $\Delta I$  apresentada na Figura 17. Esses parâmetros também devem ser definidos para valores que permitam uma reinicialização controlada após a eliminação de faltas [18][19].

A diferença entre as constantes de tempo no retificador e no inversor também influencia o tempo de reinicialização. Normalmente, a constante de tempo no retificador deve ser menor ou igual à do inversor.

#### 4.2.1.4 Influência do VDCOL nas características $U_d / I_d$

O VDCOL é a última função que atua na ordem de corrente. A saída do VDCOL é a ordem de corrente limitada que será processado pelo o amplificador de controle de corrente CCA.

A influência do VDCOL nas características  $U_d / I_d$  é mostrada na Figura 31.

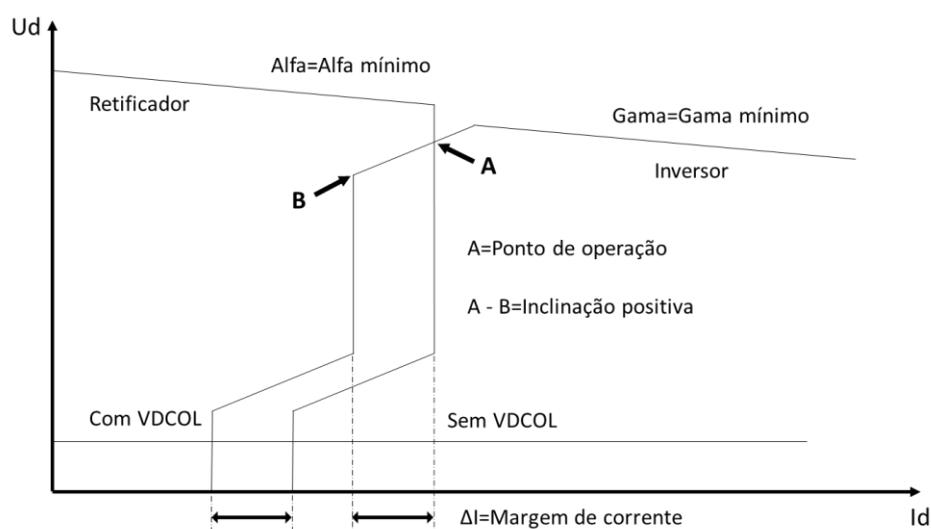


Figura 31 – Características  $U_d/I_d$  com VDCOL

#### 4.2.2 Amplificador de controle de corrente (CCA)

O principal objetivo do amplificador de controle de corrente é fornecer uma dinâmica adequada ao circuito de controle de corrente. As demandas para o controle de corrente são [19]:

- Resposta rápida.
- Zero erro de corrente em regime permanente.
- Controle de corrente estável.
- Rápida redução de sobrecorrente de faltas.
- Permitir a operação de dois controladores de corrente (no retificador e no inversor).

A saída do amplificador de controle de corrente forma a ordem do ângulo alfa para o controle

de disparo do conversor. Um controle de malha fechada lenta deve sincronizar o controlador de corrente com as características da rede de corrente alternada. Uma função de transferência típica para o amplificador de controle de corrente é mostrada na Figura 32.

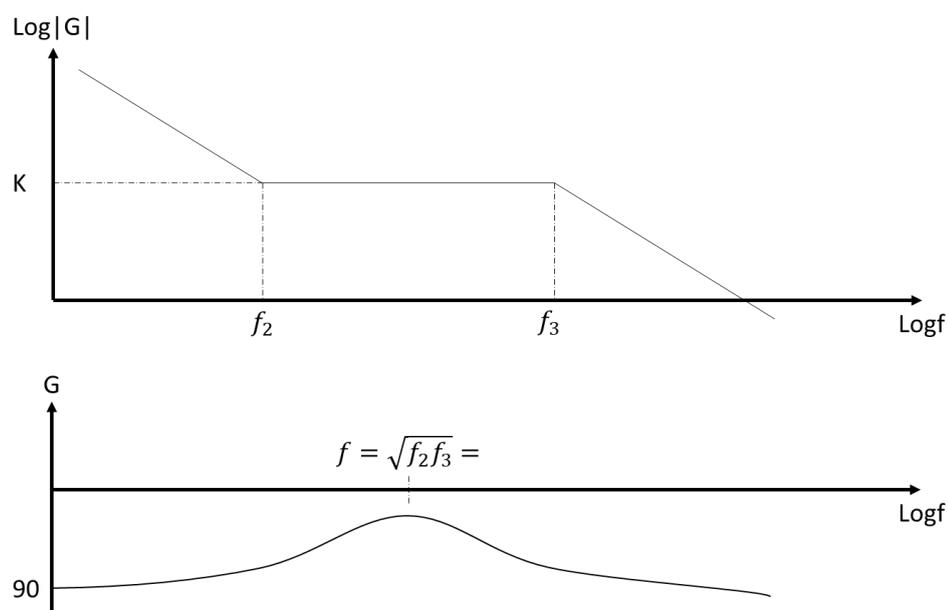


Figura 32 – Características do CCA

Como pode ser visto na Figura 32, o ganho para frequências muito baixas é alto. Isso significa que o erro de corrente em regime permanente é zero.

#### 4.2.2.1 Descrição Funcional do CCA

O diagrama principal do amplificador de controle de corrente é mostrado Figura 33.

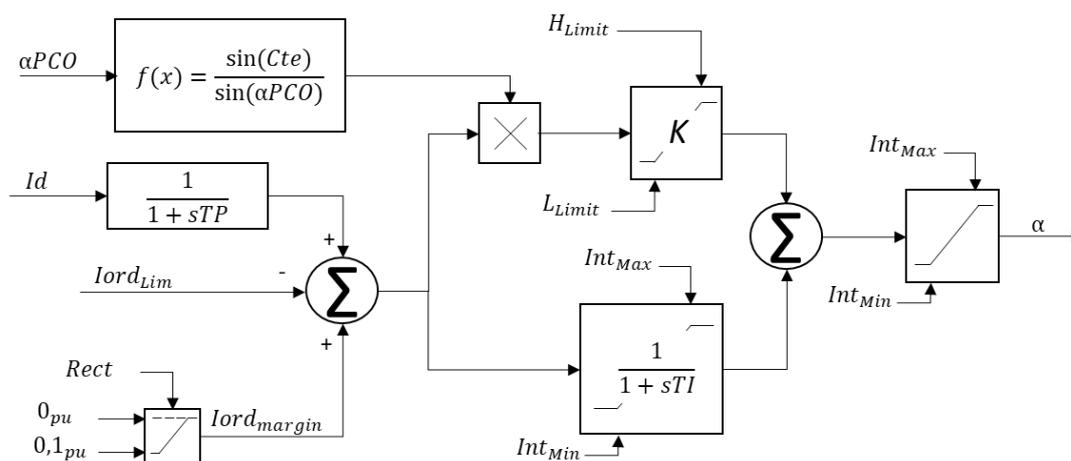


Figura 33 – Diagrama principal do CCA

O ganho total, uma combinação da parcela proporcional e integral, tais ganhos devem ser escolhidos de forma a obter um comportamento dinâmico adequado. Para possibilitar a existência de dois controladores de corrente integrados, uma margem de corrente  $\Delta I$  é adicionada à diferença entre a ordem de corrente no retificador e a ordem de corrente no inversor. Isso forçará o inversor a operar com seu ângulo de disparo no máximo valor fazendo com que a tensão CC seja a mais alta possível no inversor [18][19].

#### 4.2.3 Limitações do amplificador de controle de corrente (CCALIM)

Existem vários limites aplicados no controle CCA. Alguns são definidos pelas condições operacionais normais, por exemplo, limitador de sobretensão, regulador de tensão, alfa máximo, etc. Outros, por sua vez, são aplicados em eventos específicos como por exemplo a ordem de retardo de ângulo, Ordem de redução etc. Eles são organizados em uma ordem de prioridade para garantir que os limites adequados sejam aplicados o tempo todo [19].

A Figura 34 ilustra o princípio dos limites do amplificador de controle de corrente aplicados durante condições operacionais normais.

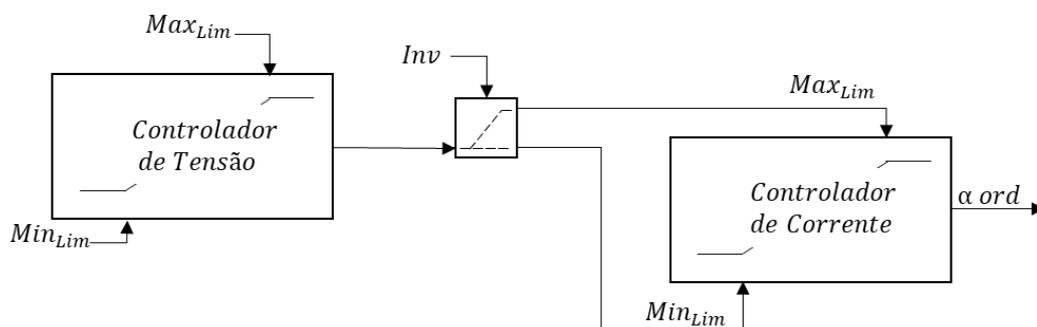


Figura 34 – Limitações do CCA

Como pode ser visto na Figura 34, os limites aplicados ao regulador de tensão, por sua vez, definirão os limites para o controle CCA, como existem várias limitações aplicadas ao CCA, essas são organizadas em uma ordem de prioridade que simplifica a sua seleção. Conforme apresentado abaixo [18][19]:

- A ordem de retardo de ângulo tem prioridade, que ocorre em função de uma ação de proteção e antes de bloquear / desbloquear o conversor.
- Ordem de alfa 90 graus: Esta função estará ativa na parada do inversor, conforme descrito abaixo:
  - A maneira normal de parar uma transmissão CCAT é primeiro diminuir a corrente CC para o mínimo, ordem de retardar o ângulo de disparo do retificador seguindo com seu bloqueio. Se a corrente mínima for menor ou igual à margem de corrente  $\Delta I$ , o ângulo de extinção gama no inversor será mantido no valor máximo do ângulo alfa determinado pela variável *ALPHA MAX* no controlador de corrente. Para acelerar a desenergização, o ângulo de extinção no inversor pode ser aumentado em até 90 graus, gerando uma tensão CC nula.
  - Para evitar uma reversão da tensão CC, o aumento do ângulo de extinção não deve ser feito muito rapidamente.
- Reiniciar o conversor: À partir da ação de proteção da linha CC tem uma prioridade mais baixa do que a parada por ordem de retardo, pois implica em reiniciar a transmissão.
- Gama Zero no inversor: A baixa tensão CC no inversor tem a menor prioridade das referências fixas. Se, por algum motivo, o retificador já estiver bloqueado enquanto o inversor ainda estiver em operação, por exemplo, em interrupções de

telecomunicações e também quando o retificador for bloqueado por ação de alguma proteção, o controle de corrente forçará o ângulo de extinção gama no inversor para o seu menor valor definido na variável *ALPHA MIN INV*. A tensão CC aumentará para um alto valor na polaridade invertida. Para evitar esse comportamento a função Gama zero no inversor forçará o ângulo de disparo para o máximo valor de alfa, se a tensão CC for menor que uma referência por um tempo predefinido.

A função CCALIM também inclui limitações variáveis do amplificador de controle.

O limite mínimo da função CCA no retificador, veja também a Figura 35, é formado pela função de máximos de:

- *U\_Min\_Ref*: Tensão mínima de referencia
- *OVL ALPHA ORD*: (do limitador de sobretensão)
- *ALPHA REF VARC*: (Referência vinda do VARC)

O limite mínimo na operação do inversor é definido pelo sinal *ALPHA MIN REF INV* que impede o inversor de entrar na região do retificador.

#### 4.2.3.1 Descrição Funcional do CCALim

A Figura 35 mostra os limites normais para o CCA

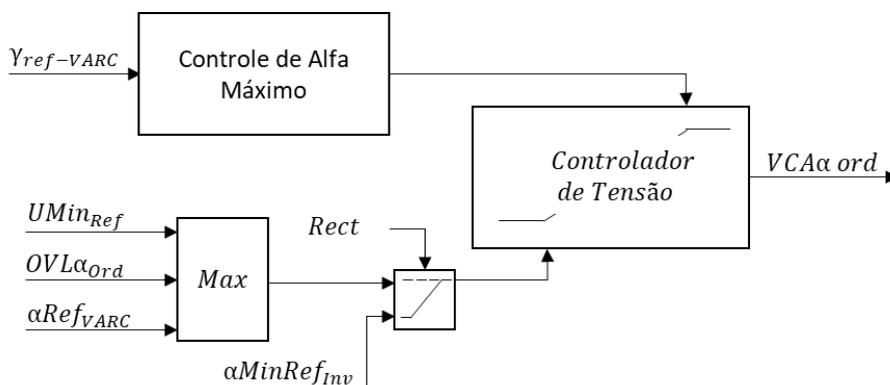


Figura 35 – Princípios das Limitações do CCA

### 4.3 CONTROLE DE TENSÃO CC

A função Controle de tensão CC consiste em três funções [19]:

- Limitador de sobretensão (somente na operação do retificador);
- Regulador de tensão;
- Controle do inversor alfa máximo.

#### 4.3.1 Limitador de sobretensão (OVL)

Se, por algum motivo, o retificador for iniciado em uma linha CC aberta, ocorrerá uma sobretensão devido à relação conhecida entre o ângulo alfa e a tensão CC na operação com corrente zero. Reflexões do final da linha aberta também contribuem para a sobretensão.

No desbloqueio, o amplificador de controle de corrente abaixa o ângulo alfa para estabelecer uma corrente mínima. Normalmente, isso para quando o critério de tensão mínima é atingido. Isso significa que, durante a partida contra uma linha aberta, o ângulo de disparo deve ser aumentado para valores adequados que sejam capazes de evitar altas sobretensões.

Uma partida contra uma linha CC aberta pode ocorrer quando:

- O retificador é iniciado sem telecomunicações e o inversor não foi iniciado (erro humano).
- O inversor é bloqueado sem a ação do controle de *By Pass Pairs* (BPP) durante a operação sem telecomunicações.

Como somente o retificador pode produzir uma sobretensão, a função acima é desativada no inversor [19].

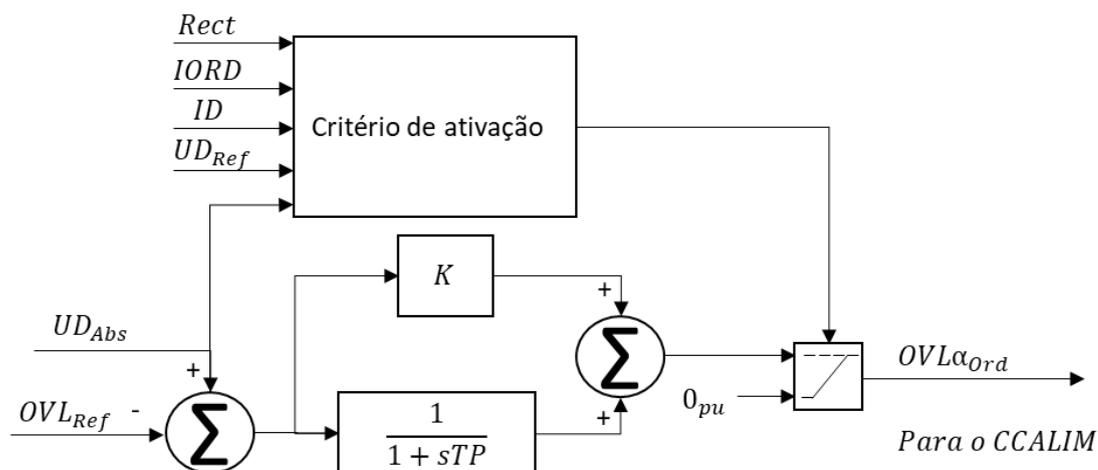


Figura 36 – Diagrama Funcional do Limitador de Sobretensão (OVL)

Na operação do retificador, o sinal *OVL ALPHA ORD* forma o limite mínimo para o amplificador de controle de corrente, isto é, para a soma da parte integradora e proporcional.

#### 4.3.2 Regulador de Tensão (VCAReg)

Um controlador de tensão CC é implementado na operação do retificador e do inversor. A sua principal função é para a operação de tensão reduzida, mas também é vantajosa para a operação de tensão normal[18][19].

O controlador de tensão CC é um PI-regulador que atua nos limites mínimo e máximo do controlador de corrente. Na operação do inversor, ele controla o limite máximo do CCA, enquanto na operação do retificador, controla o limite mínimo. A saída do controlador de tensão CC é mínima e máxima limitada de acordo com a operação necessária.

Na operação com tensão normal, a referência de tensão para o controlador é ajustada um pouco acima da tensão de operação para não interferir no controle normal do comutador. A referência de tensão é obtida no controle de Cálculo de referência da tensão e do ângulo (VARC), conforme capítulo 4.4. Em operação com tensão reduzida, a tensão de referência é reduzida para o valor desejado e, conseqüentemente, o controlador diminui a tensão CC.

A tensão de referência é normalmente mais alta na extremidade do retificador para manter o controle de tensão no inversor.

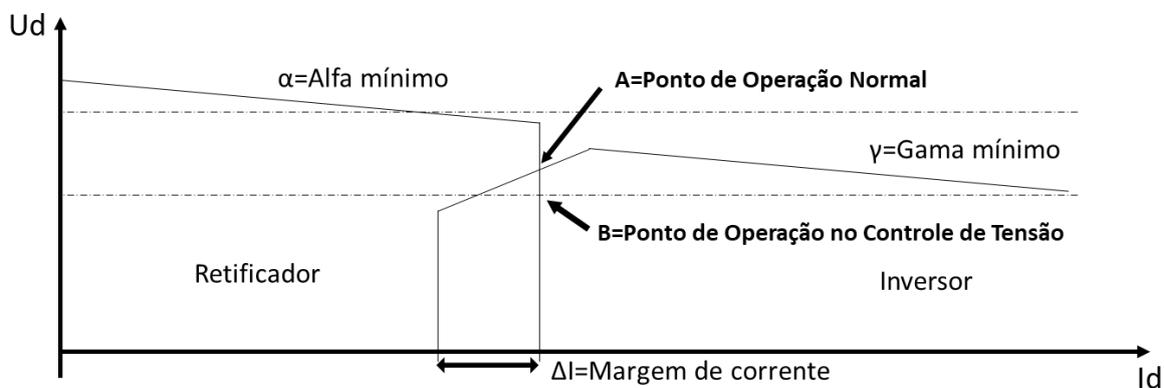


Figura 37 – Influência do VCAREg nas características Ud/Id

Na Figura 37, é mostrado o ponto de operação do controlador de tensão CC do inversor. Como o novo ponto de operação se afasta de  $\gamma_{min}$ , ele se mostra um modo de operação muito estável, pois o risco de um disparo AMIN é minimizado.

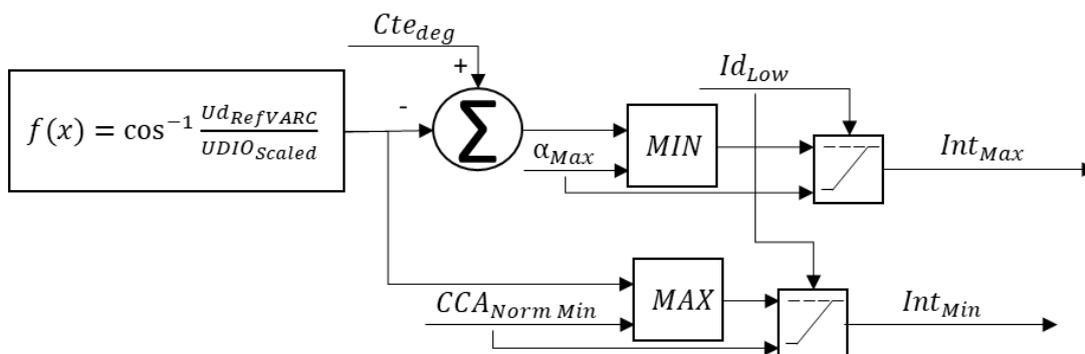


Figura 38 – Diagrama de blocos VCAREg - Limites

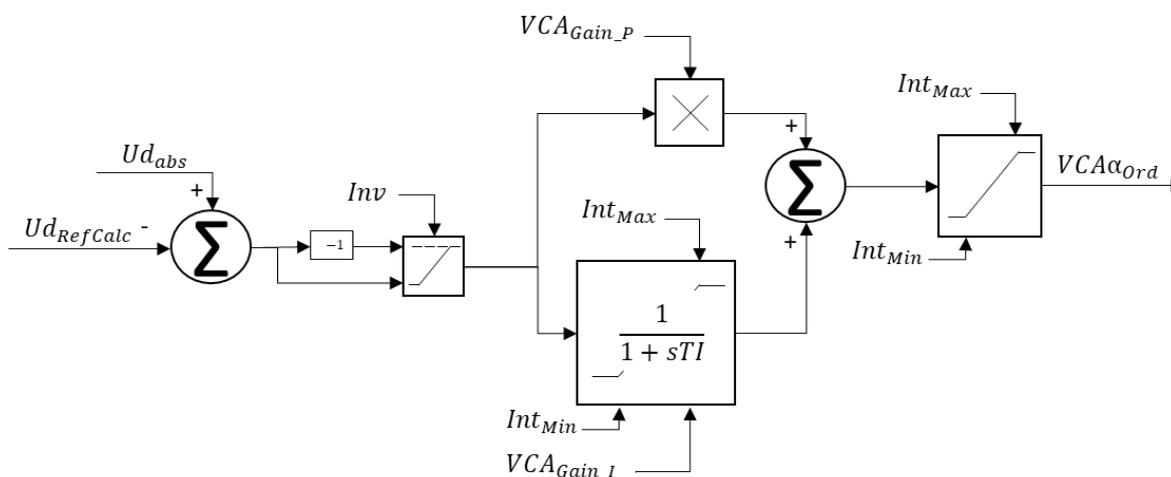


Figura 39 – Diagrama de blocos VCAREg

A referência de tensão  $UD_{REF} VARC$  é recebida da aplicação (VARC), ver capítulo 4.4. Dependendo do modo de operação (retificador/inversor), a polaridade é alterada de acordo para obter a ação de controle correta do regulador. No caso da corrente CC igual a zero, um cálculo do ângulo de disparo necessário é realizado para definir os limites do integrador correspondentes à tensão desejada. A seguinte fórmula é usada [19]:

$$Ud = U_{dio} * \cos \alpha$$

Equação 34

Isso é válido quando a ordem de corrente é igual a zero. Sem essa função, ocorreria um sobretensão no desbloqueio do conversor, uma vez que o integrador seria pressionado contra seu limite, até que a tensão CC medida exceda o valor de referência.

### 4.3.3 Controle de Alfa Maximo no Inversor (AMAX)

A tensão CC de um inversor pode ser escrita conforme a Equação 35 [19]:

$$U_d = U_{dio} \left[ \cos \gamma - (d_x - d_r) \frac{I_o}{I_{dN}} * \frac{U_{dioN}}{U_{dio}} \right]$$

Equação 35

Como pode ser visto na Equação 35, a tensão CC diminui proporcionalmente ao aumento da corrente CC, assumindo um valor constante do ângulo gama. Isso significa que o inversor age como uma resistência negativa para baixas frequências, se o inversor operar na margem mínima de comutação. Essa resistência negativa também pode gerar problemas de estabilidade quando a rede CA do inversor é fraca.

Se o inversor pudesse operar com ângulo alfa constante, a tensão do inversor aumentaria proporcionalmente à corrente CC. A resistência dinâmica tornaria-se positiva e a estabilidade do controle de corrente poderia ser consideravelmente melhorada.

A tensão CC também pode ser escrita como na Equação 36:

$$U_d = \frac{1}{2} * U_{dio} * (\cos \gamma + \cos(\gamma + \mu))$$

Equação 36

A resistência do transformador ( $d_r$ ) afeta apenas a tensão CC e não o tempo de comutação. Considerando isso e combinando as duas equações, o fator  $(\gamma + \mu) = \beta$  pode ser calculado como:

$$\beta = \sin^{-1} \left( \cos \gamma - 2 * d_x * \frac{I_o}{I_{dN}} * \frac{U_{dioN}}{U_{dio}} \right)$$

Equação 37

O valor desejado do ângulo alfa máximo (AMAX) pode ser calculado da seguinte forma, ver Equação 38:

$$AMAX = 180 - \beta$$

Equação 38

O controle de corrente no inversor forçará o ângulo de disparo ao máximo, devido à margem de corrente  $\Delta I$ . Assim, a maneira mais simples de fazer o inversor operar em ângulo alfa constante é então definir a saída máxima do amplificador de controle de corrente para o valor de ângulo alfa máximo (AMAX).

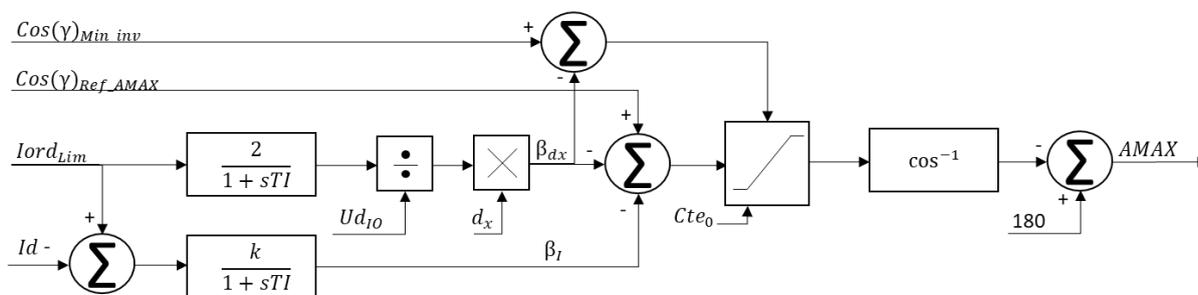


Figura 40 – Diagrama de blocos AMAX

#### 4.4 CÁLCULO DE TENSÃO E ÂNGULO DE REFERÊNCIA

O objetivo desta função é realizar o cálculo da tensão e ângulo de referência, este controle é normalmente conhecido pela sigla VARC (*Voltage and Angle Reference Calculation*), o controle assegura que a tensão CC, ângulo de extinção gama, e ângulo de disparo alfa estejam dentro dos limites durante condição de regime permanente. Isto é feito calculando valores da tensão CC, referência dos ângulos gama e alfa ao qual serão enviados para o controlador do tap dos transformadores do conversor. A tensão CC e a referência do ângulo gama também serão enviadas para o controlador de disparo do conversor. O VARC terá a sua resposta dependente do modo de operação do conversor, podendo assumir qualquer um dos modos já citados, normalmente uma combinação coordenada entre os modos de controle é necessária [9][15].

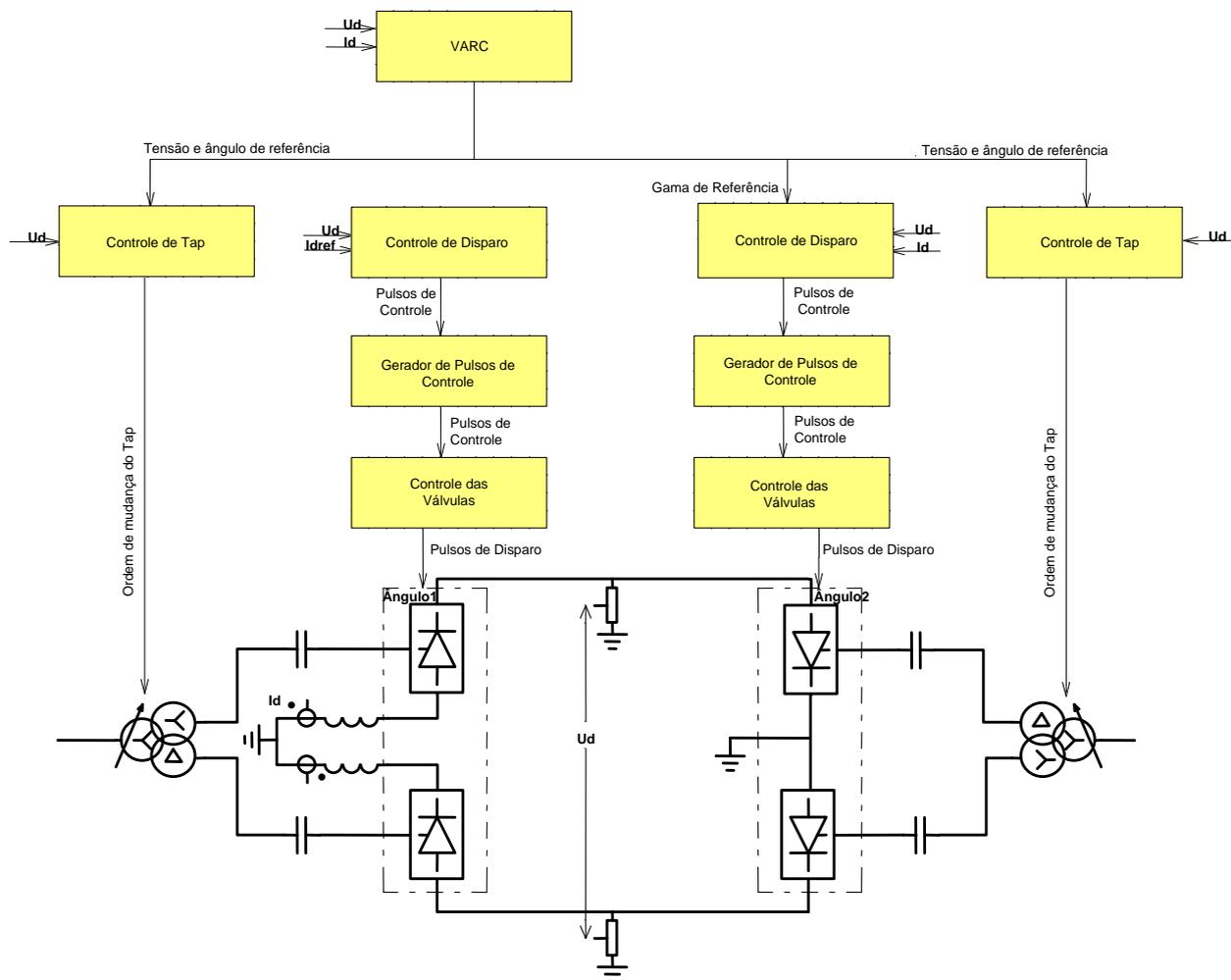


Figura 41 – Diagrama Simplificado do VARC

## 4.5 CONTROLE DA TRANSMISSÃO

O principal objetivo do sistema de controle de potência é manter a estabilidade do controle mantendo o valor da transmissão de potência ou corrente constante no valor ordenado, desconsiderando possíveis distúrbios no sistema CA. ou CC.

Para manter a potência constante, as variações de tensão CC são compensadas ajustando a corrente CC em conformidade. A ordem de potência é definida como uma referência de potência em MW e uma referência de taxa de rampa em MW/min. A potência transmitida será automaticamente limitada à capacidade do sistema de transmissão CCAT através do limitador de sobrecarga, conforme podemos ver na Figura 42.

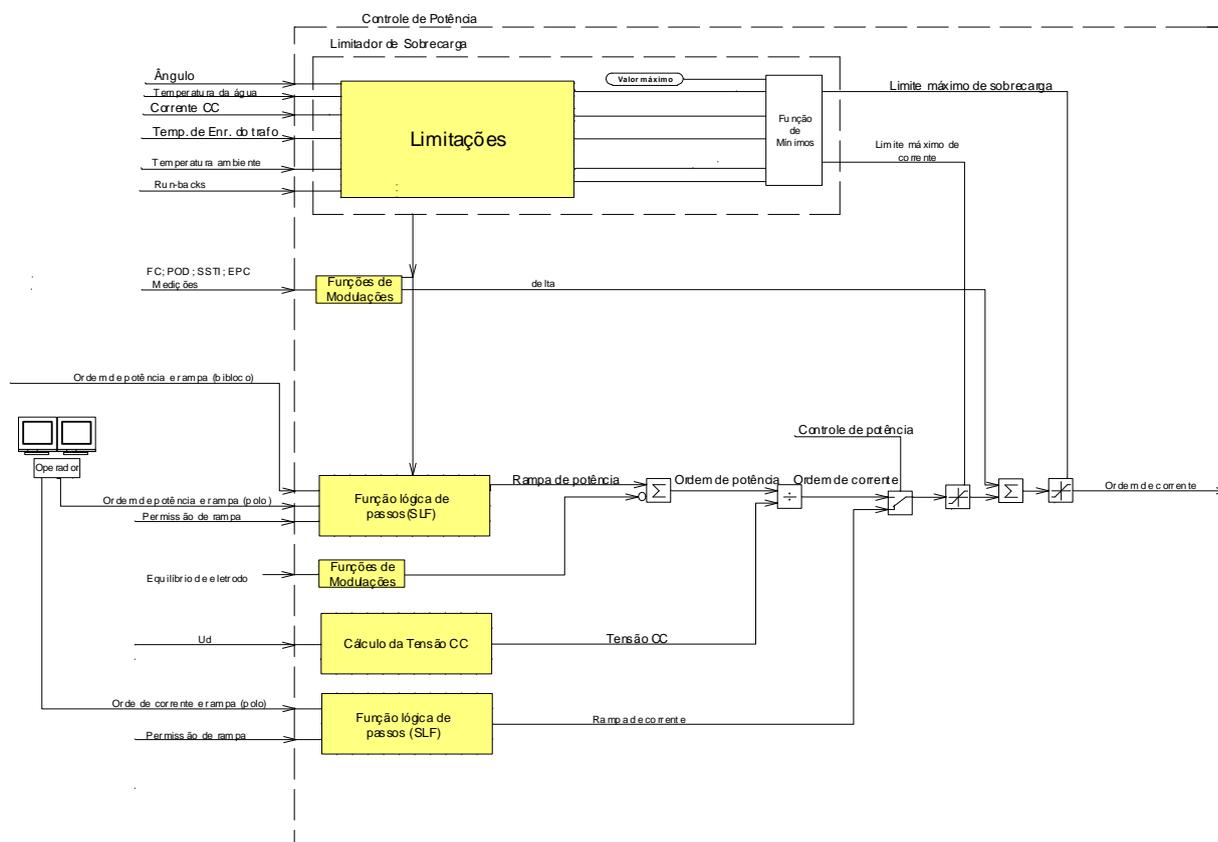


Figura 42 – Controle Simplificado da Potência do Polo

#### 4.5.1 Lógica de Passos (SLF)

A ordem de potência em MW é dada à Função SLF (*Step Logic Function*) juntamente com uma rampa de potência em MW/min. O SLF é desenvolvido para atuar na transição entre as ordens de potência ou corrente, a atualização da ordem no bloqueio / desbloqueio e diferentes tipos de modulação, bem como o gerenciamento dos limites mínimo e máximo nas diferentes direções de potência.

#### 4.5.2 UDCALC

A função UDCALC é usada para evitar alterações abruptas da ordem de corrente devido a distúrbios transitórios.

Para obter independência do nível de potência e para uma recuperação rápida após uma falha do sistema, a tensão CC filtrada pode ser reduzida linearmente dependendo da atual ordem de corrente.

#### **4.5.3 Ordem de Corrente**

Podem ser adicionadas contribuições diferentes para obter a ordem de potência a partir da função SLF citada no capítulo 4.5.1, como por exemplo uma variação de potência gerado a partir da ação de alguma função que provoque uma modulação de potência.

A ordem de corrente é obtida dividindo a ordem de potência total pela resposta de tensão CC filtrada pela função UDCALC já mencionada no capítulo 4.5.2. A ordem de corrente é então limitada por um limitador relacionado as funções operacionais que atuem na ação imposição de limites, como exemplo as funções de sobrecarga, runback, etc.

Depois de passar pelo limitador, a ordem de corrente é alimentada a uma unidade de sincronização na qual é sincronizada entre as duas estações conforme explicado no capítulo 4.5.5.

#### **4.5.4 Reversão de potência**

Existe a possibilidade de reversão de potência de maneira manual definida pelo operador ou quando configurado a reversão pode ser executada por controles de modulação, como por exemplo o controle emergencial de potência.

#### **4.5.5 Unidade de sincronização**

Para evitar o colapso da potência no elo CCAT, é muito importante manter a margem de corrente  $\Delta I$  o tempo todo, conforme definição na Figura 17. A unidade de sincronização trata automaticamente essa coordenação através do link de telecomunicações. A função da unidade de sincronização é executar o seguinte:

- Aumento da ordem de corrente: Primeiro aumente o retificador e depois o inversor.

- Diminuição da ordem de corrente: Primeiro diminua no inversor e depois no retificador.
- Modulação da ordem de corrente: Primeiro aumente ou diminua no retificador e depois no inversor.

#### **4.6 CONTROLE DE POTÊNCIA (BIPOLO)**

Em um sistema de transmissão em corrente contínua é comum à utilização de mais de um polo para a transmissão. Os dois polos podem ser controlados separadamente, no controle de potência do polo, ou em conjunto, no controle de potência do bipolo. Quando os polos são controlados separadamente os operadores entram com o valor da ordem de potência independente em cada polo. Já no caso do controle de potência do bipolo o operador entra com o valor total da potência e o sistema de controle distribui automaticamente esta potência solicitada para os dois polos em operação. O controlador do bipolo assegurará que a potência total transmitida pelos dois polos continuará nos valores ordenados pelo operador e que estarão igualmente distribuídos entre esses dois polos. No caso de falha ou limitação em um dos polos o controle automaticamente compensará a perda de potência incrementando o valor de potência no outro polo, até seu limite máximo de transmissão [9][15].

### **5 CONTROLES DE ALTO NÍVEL**

A inerente capacidade de controle com respostas em alta velocidade do sistema de transmissão CCAT é utilizada para estabilização e/ou auxiliar no controle de frequência em sistemas CA.

Funções de modulação de diferentes tipos de contribuições na potência podem ser geradas com a utilização de controles denominados de alto nível. Essas contribuições podem ser sobrepostas e/ou adicionadas na ordem de potência determinada pelo operador. Essas funções são especificadas para cada particularidade de projeto com foco na estabilidade do sistema de potência CA [9][15].

Os controles de alto nível podem ser aplicados em sistemas CCAT para melhorar a operação

do(s) sistema(s) de potência envolvido(s) em condições transitórias (dinâmicas), influenciando temporariamente (modulação) a potência transferida. No conceito desses controles estão incluídos controladores de amortecimento (DC), controlador de frequência (FC) e controlador de amortecimento subsíncrono (SSDC). O Controle de Potência de Emergência (EPC) também pode ser incluído nesta categoria [20].

### **5.1.1 Características Gerais**

O controlador de frequência geralmente possui uma função de transferência de uma característica (passa baixa) com uma interrupção sobre a frequência suficientemente abaixo das frequências de oscilação para evitar interferência no controlador de amortecimento.

O controlador de amortecimento possui uma função de transferência (passa-banda) com uma frequência central nas frequências de oscilação eletromecânica da rede (geralmente na região de 0,1 a 2 Hz), possui o mesmo objetivo que o PSS (Estabilizador do Sistema de Potência) em excitadores de geradores síncrono e atua na mesma faixa de frequência.

O controlador de amortecimento subsíncrono também atua com uma função de transferência com característica (passa-banda) e com a frequência como sinal de entrada, porém a uma frequência superior a 1 Hz (geralmente acima de 5 Hz) e sua saída é injetada como contribuição diretamente no ângulo de disparo do conversor (retificador).

O controlador de potência de emergência é um controle de alto nível adicional que visa definir os níveis de potência de retorno (limitar / reduzir a potência do conversor) para certas contingências graves severas da rede, bem definidas e facilmente identificadas (várias linhas / cargas / áreas e / ou disparos do gerador), que ameaça a operação contínua da rede.

O controle da potência reativa / tensão de um conversor pode ser considerado como um controle de alto nível adicional que às vezes é usado para estabilizar ou limitar os níveis de tensão inserindo basicamente o controle gama do inversor [20].

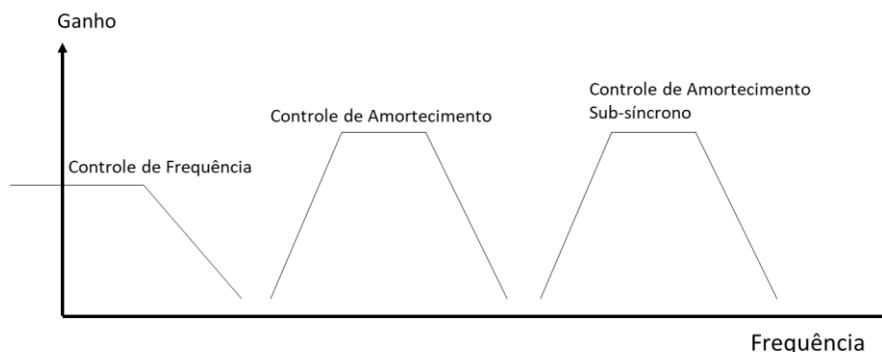


Figura 43 – Relações de Frequência entre os Controladores

### 5.1.2 Controle de Frequência

As transmissões CCAT podem ser usadas para dar suporte a frequência de um sistema de potência perturbado (devido à perda de geração ou grandes cargas ou seções do sistema) modulando a potência entre o sistema perturbado e o sistema (saudável ou de suporte) conectado à transmissão CCAT. Assim, um sistema que ajuda outro terá sua frequência alterada. Um sistema grande pode suportar facilmente um sistema pequeno, enquanto que no caso de tamanhos semelhantes da capacidade do sistema, essa influência precisa ser considerada [20].

Normalmente, a variação de frequência deve exceder uma certa banda morta antes que o controlador de frequência comece a modular a potência. Existe a possibilidade da frequência do outro sistema se opor (neutralizar) à modulação de potência.

Um dos sistemas pode consistir em uma área temporária devido ao rompimento de uma seção de um sistema grande (operação em modo de ilha). Um dos sistemas também pode consistir em uma geração de energia local distante, onde o controle de frequência do elo CCAT precisa ser coordenado com os controladores das unidades geradoras.

Os desvios de frequência podem ser de natureza positiva ou negativa (frequência acima / abaixo), ambas as condições podem ser melhoradas por intervenções de controle do conversor CCAT dentro de suas limitações de potência.

As ações de controle do conversor(es) CCAT geralmente são mais rápidas do que as compensadas por intervenção da turbina/reguladores das unidades geradoras; portanto, o controle do conversor pode dar o passo inicial para corrigir os desvios de frequência. Nesse

caso, pode ser também utilizada uma capacidade de sobrecarga de tempo curto do conversor caso necessário.

A fim de limitar o tempo para a intervenção do controlador de frequência (isto é, uma intervenção temporária de controle de frequência para permitir que as turbinas alterem sua potência de saída), uma característica de passa-banda pode ser utilizada conforme mostra a Figura 44.

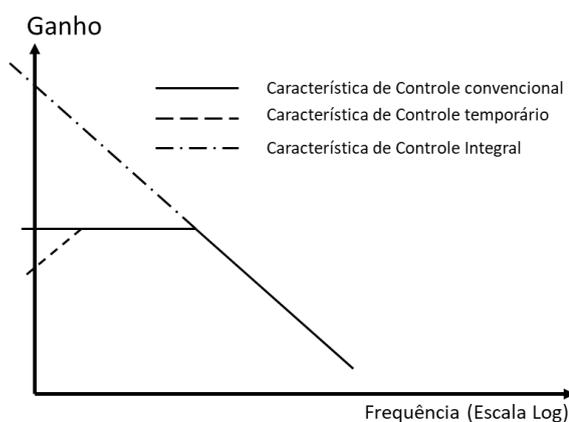


Figura 44 – Características de Controles de Frequências

A capacidade inerente de controle de frequência de um sistema de potência está intimamente relacionada à potência disponível nas turbinas (reserva girante), o que contribui para a capacidade de regulação [MW/Hz] do sistema.

Normalmente, apenas alguns dos geradores de um sistema participam do controle de frequência, geralmente grandes unidades hidrelétricas, enquanto as unidades turbo a vapor (especialmente unidades nucleares) preferem operar com potência constante (a menos que o desvio de frequência seja muito grande, em condições de emergência).

A queda de frequência (ou queda de velocidade das turbinas) é o inverso de um ganho estático do regulador de velocidade (ou força), ou seja, queda de 1% significa que é necessária uma redução de frequência de 1% para alterar a potência de saída em 1 pu da turbina. O mesmo se aplica a um controlador de frequência do conversor, que em alguns aspectos deve corresponder aos reguladores de velocidade para compartilhar o ônus do suporte de potência a uma rede com desvios de frequência [20].

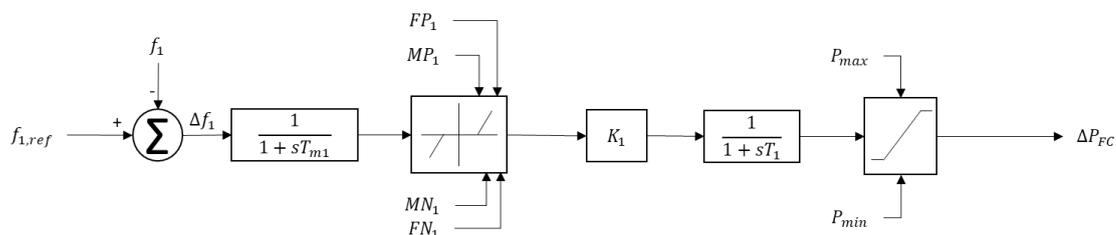


Figura 45 – Estrutura Básica do Controle de Frequência

Portanto, é importante reduzir o ganho acima da frequência de interrupção (suficientemente abaixo de 1 Hz) para evitar interferência no controlador de amortecimento, caso aplicável, mas ainda assim executar uma ação rápida e razoável para restaurar o desvio de frequência.

Uma constante de tempo longa atrasará a ação de restauração de frequência e forçará os reguladores de velocidade das turbinas a agir e, ao fazer isso, causará um excesso de oscilação na frequência devido ao tempo de resposta (inércia) dos reguladores dos grupos geradores.

Função de transferência básica:

$$F(S) = \frac{1}{1 + ST_1}$$

Equação 39

A fim de limitar o tempo de ação do controlador de frequência (isto é, reduzir gradualmente seu impacto com uma constante de tempo longa), pode ser adicionada uma inclinação de baixa frequência. Isso permitirá que as turbinas geradoras modifiquem sua potência de saída (e usem sua reserva de rotação no aumento de potência), enquanto a potência do conversor retorna lentamente ao valor original, como pode ser visto na Figura 44.

$$F(S) = \frac{1}{1 + ST_1} * \frac{ST_2}{1 + ST_2}$$

Equação 40

O controlador de frequência basicamente fornece uma modulação para o controlador de potência do conversor CCAT proporcionalmente ao desvio de frequência. O ganho (ou força de regulação; em MW/Hz) é, como apontado anteriormente, às vezes expresso como a propriedade "inclinação" (que é o valor inverso) e dado em%, isto é, a porcentagem de queda na frequência para mudar 1 p.u. potência do conversor [20].

Ao selecionar o ganho ( $K_1$  da Figura 45) das ramificações do controlador que representam os dois sistemas de corrente alternada, deve-se considerar a força de regulação dos sistemas de corrente alternada, o sistema de suporte e o sistema suportado. Um sistema forte é preferencialmente o sistema de suporte (isto é, o controlador de frequência do conversor deve ter um fator  $K$  com valor mais baixo, enquanto um sistema fraco é o sistema suportado (isto é, o controlador de frequência do conversor deve ter um fator  $K$  mais alto) [20].

Para evitar a ação do controlador de frequência em desvios de frequência pequenos (e normais), uma banda morta deve ser usada antes da entrada no bloco de função de transferência do controlador.

### 5.1.3 Controlador de Amortecimento

A estabilidade angular do rotor é amplamente descrita na literatura [20][21][22] e trata dos casos de oscilações eletromecânicas com uma frequência em torno de ou pouco abaixo de 1 Hz entre comportamento individual ou grupos de máquinas síncronas (áreas de rede) como resultado de distúrbios na rede.

As condições iniciais de pós-falha em um sistema são geralmente de caráter transitório (isto é, grande, não linear) e são seguidas por um processo oscilatório linear de pequeno sinal, onde a ação do controlador de amortecimento pode ser analisada por meio de análise linear.

As falhas trifásicas são mais graves em relação ao impacto da rede nos transientes do sistema e no balanço da máquina. As falhas monofásicas ou bifásicas são geralmente menos graves, porém as falhas de longa duração podem ser graves.

O estudo de estabilidade pode explorar a viabilidade de aprimorar a estabilidade de sistemas de corrente alternada com modulação de potência do elo CCAT. A capacidade de melhorar a estabilidade do sistema de potência com base na modulação depende de vários fatores, incluindo a localização dos conversores (ou seja, conectados nos pontos certos) e o sinal de

feedback usado como entrada no controle (ou seja, medindo as propriedades de oscilação corretas).

Para um sistema com conexão paralela de ligações CA com um elo CCAT, as oscilações nos links CA geralmente podem ser amortecidas pela modulação da potência do link CCAT. Se dois sistemas de corrente alternada separados estiverem conectados a um elo CCAT, as condições serão diferentes, já que nenhuma oscilação entre áreas (ou seja, oscilação eletromecânica do sistema de corrente alternada clássica) pode existir entre esses sistemas assíncronos. Ao interconectar dois sistemas com links CCAT, as oscilações causadas por uma perturbação em um sistema serão transferidas para o outro. Este é o resultado do princípio baseado na intenção de amortecer a oscilação em um sistema, retirando energia do outro. Esse tipo de interação se torna mais evidente quando o sistema de envio está mal amortecido. Assim, para sistemas que são operados de forma assíncrona e conectados com uma alimentação de um elo CCAT de um sistema para outro, as condições de amortecimento da oscilação com a modulação de potência CCAT são menos favoráveis. No entanto, dentro desse sistema, a modulação de potência CCAT pode ser usada para amortecer oscilações nas linhas de transmissão CA interconectando grupos de máquinas oscilantes. Essa possibilidade depende da localização relativa dos terminais do conversor CCAT e da inércia das máquinas. Um meio alternativo e bem estabelecido para amortecer os modos de oscilação dentro de um sistema de corrente alternada é distribuir a ação dos controladores de amortecimento através da instalação de PSS (estabilizadores do sistema de potência) atuando nos excitadores nos principais geradores. Esse deve ser o principal meio de melhorar o amortecimento em um sistema de potência [20].

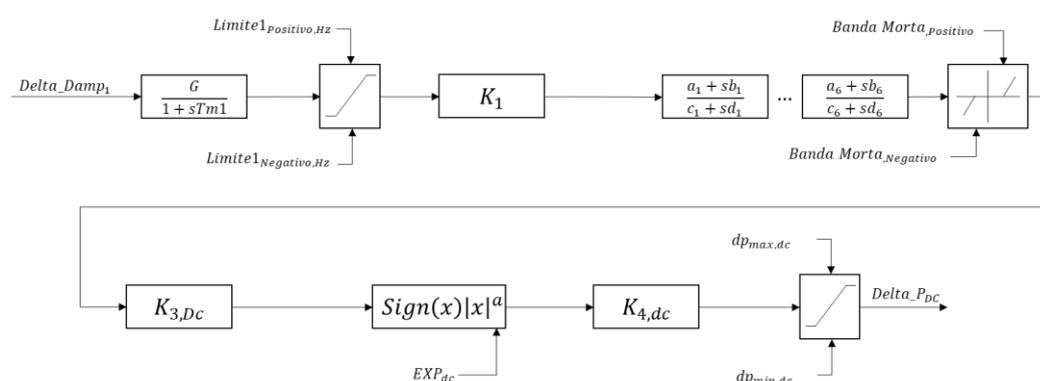


Figura 46 – Estrutura Básica do Controle de Amortecimento

A equação abaixo mostra uma função de transferência típica.

$$F(S) = \frac{ST_1}{(1 + ST_1)(1 + ST_2)}$$

Equação 41

#### 5.1.4 Controlador Emergencial de Potência (EPC)

As condições de emergência em um sistema de potência podem ser amplamente entendidas como quando ocorrem condições extremas e são necessários meios especiais para auxiliar a operação para a sobrevivência do sistema. Informações importantes são para definir e registrar quais condições se aplicam às condições de emergência (extremas). Um colapso do sistema, em que a diminuição acentuada de tensão e frequência deve ser usada como critério para intervenção de retorno é muito difícil de lidar, pois as mudanças na configuração e capacidade da rede podem ser muito rápidas e difíceis de definir instantaneamente e claramente e, assim, escolher o controle correto medidas como a seleção de ações apropriadas do elo CCAT. As causas podem ser devidas à perda de geração (geradores próximos) ou à perda de linhas que reduzirão os níveis de potência de curto-circuito ou causarão a divisão de qualquer um dos sistemas. No caso de tal divisão de um sistema, as frequências nas diferentes seções desse sistema podem diferir e apenas a frequência da seção conectada ao barramento do conversor pode ser influenciada. Reduções extremas de frequência (como pode ser o resultado de condições de emergência) podem ser resolvidas com a redução de carga, se a capacidade de reserva de potência for limitada. Em falhas de contingência simples (N-1), a medida corretiva é geralmente tratada pelo controlador de frequência, atuando em conjunto com o controle de potência contínuo [20].

O EPC cria níveis de potência de recuperação selecionados a serem determinados em estudos e com base em informações sobre as condições das redes próximas. O princípio é selecionar sinais facilmente disponíveis e confiáveis para iniciar a ação do EPC. Geralmente, as informações de linhas disparadas e/ou geradores nas proximidades dos barramentos do conversor são usadas como critérios para distúrbios graves. Ao selecionar os níveis de recuperação, o objetivo também deve ser o de reduzir o impacto no sistema não perturbado o mais razoável possível, a fim de evitar violar seus limites de frequência e estabilidade, e a

potência deve ser alterada em um nível adequado.

Possíveis critérios de ativação do EPC:

- Sobrefrequência
- Subfrequência
- Sobretensão
- Subtensão
- Corrente
- Entradas analógicas
- Entradas digitais (Externos)

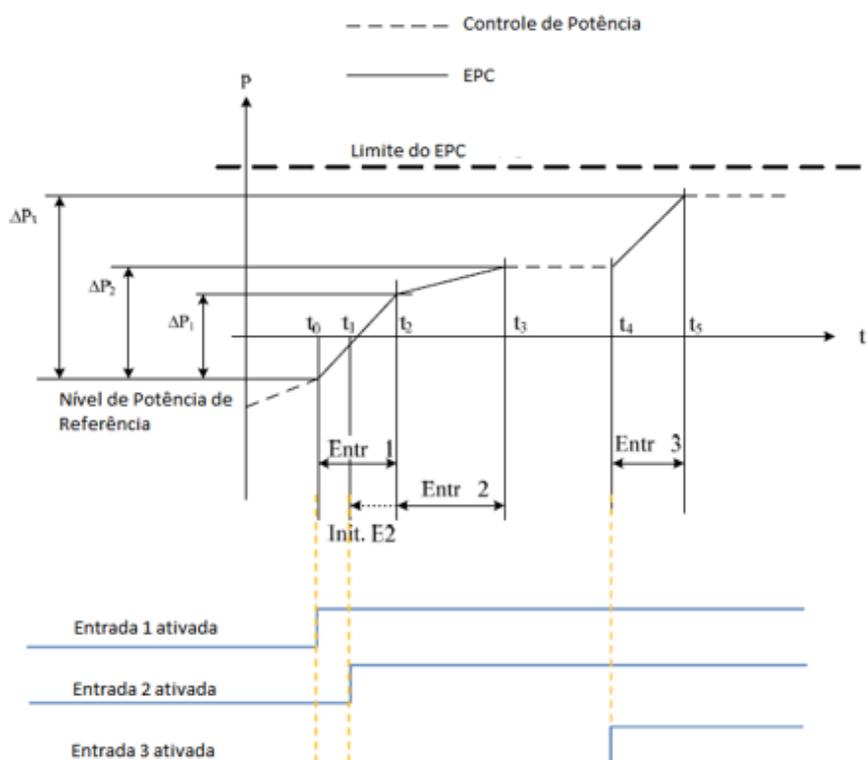


Figura 47 – Comportamento de contribuição do EPC tradicional

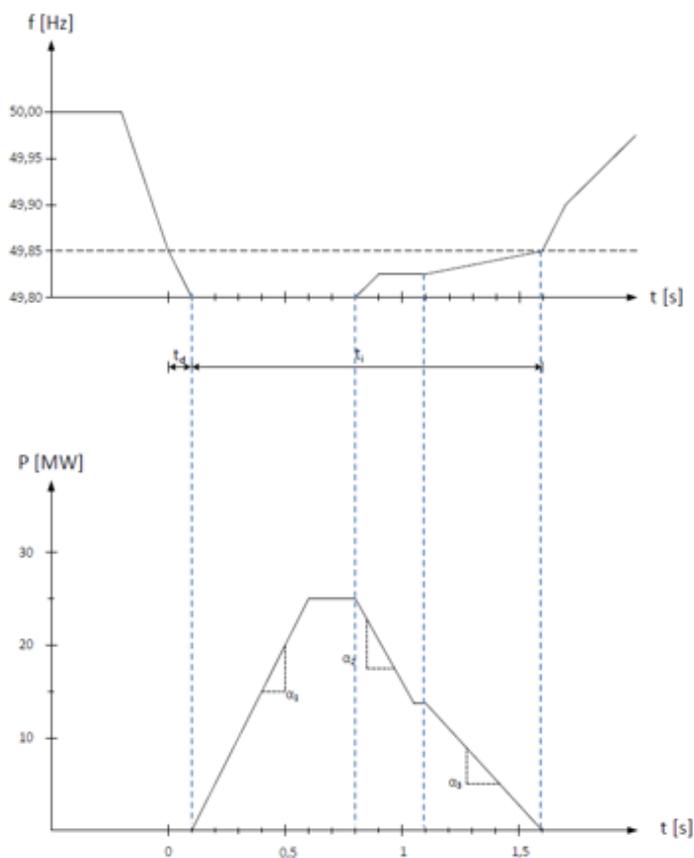


Figura 48 – Comportamento de contribuição do EPC droop

### 5.1.5 Controlador de Reativo/Tensão

Um conversor pode ser usado para controlar temporariamente a tensão na rede de corrente contínua ou no seu terminal de corrente alternada, variando o ângulo de disparo. No entanto, esse recurso não é tão comum (cabos longos, sistemas de CA fracos, BtB) e exigirá margens adicionais no ângulo gama, o que, por sua vez, significa componentes de circuito principal mais caros, como transformadores, válvulas e filtros.

O retificador controlará automaticamente até certo ponto sua tensão de barramento CA, variando alfa (e, portanto, a potência reativa) para equilibrar a corrente CC ordenada nas variações de tensão CA. O inversor, no entanto, opera normalmente com gama constante e precisa de um recurso de controle adicional para controlar transitoriamente a tensão CA ou CC. Esse recurso é usado principalmente para projetos de cabos longos ou sistemas de corrente alternada muito fracos.

Para o retificador, o alfa mudará entre o ângulo alfa mínimo (geralmente 2 ou 5 graus) até um nível alto temporariamente, o comutador de posições do transformador (*tap*), depois de algum tempo, irá ajustar a tensão de forma a conduzir o ângulo alfa aos valores nominais. Essa alteração no alfa controlará o consumo de energia reativa do conversor de forma que a tensão do barramento CA seja estabilizada ou, pelo menos, a alteração de tensão seja reduzida.

Um inversor opera normalmente com o ângulo gama constante e controla a tensão CC com o controle de *tap* em uma base relativamente lenta. Se um controle de tensão rápido (transitório) for desejado, é necessária uma variação do ângulo gama. No entanto, para estabilizar uma queda de tensão do barramento CA, o gama deve ser reduzido e, para evitar falhas de comutação [20].

#### **5.1.6 Função de Redução do Limite de Potência (*Runback*)**

A função *runback* possui a ação de realizar uma redução rápida no limite de transmissão de potência de transmissão para um valor pré-ajustado de forma auxiliar o sistema em algumas situações de contingências, como por exemplo, a perda de grandes blocos de carga no sistema elétrico de potência do lado do inversor, perdas de blocos de geração no lado do retificador, ou por restrição operativa como no caso de perda de linhas importantes que provoquem restrições na transmissão do elo de corrente contínua [9].

#### **5.1.7 Função de Aumento do Limite de Potência (*Runup*)**

A função *runup* tem o objetivo de elevar a transmissão a um valor pré-ajustado e dentro de suas limitações de transmissão, a elevação é configurada de forma a ajudar o sistema elétrico em situações de contingências, um exemplo do uso dessa função é no caso da utilização do controle de frequência [9].

## 6 SIMULAÇÃO DO SISTEMA

### 6.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO CCAT

O exemplo desta seção ilustra a modelagem de um link de transmissão de alta tensão em corrente contínua (CCAT), utilizando conversores de 12-pulsos com tiristores.

O sistema simulado é uma interconexão bipolar em corrente contínua de 2x1000 MW (500 kV, 2 kA) e está sendo utilizada para transmitir potência em de um sistema CA de 60Hz, 500 kV e 5000 MVA para um sistema de 50Hz, 345 kV e 10000 MVA, conforme apresentado na Figura 49 e na Figura 56 [12].

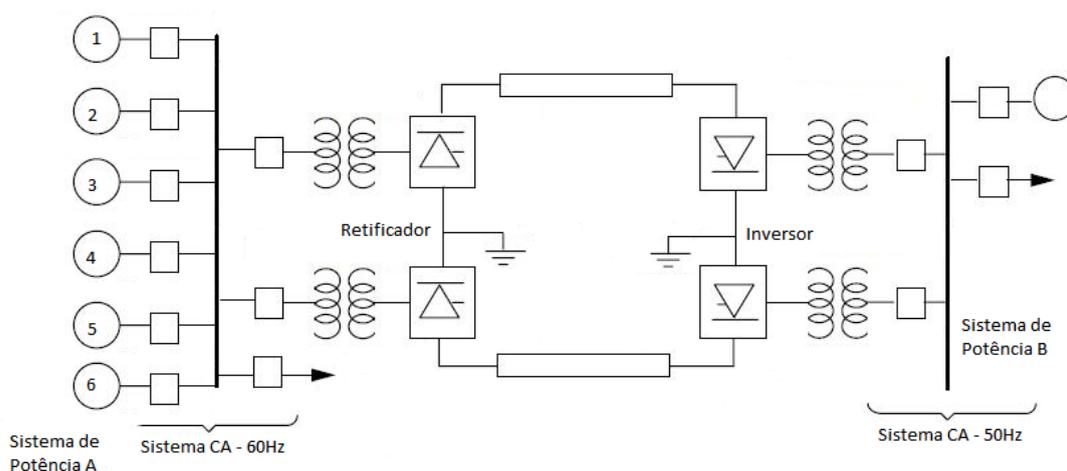


Figura 49 – Sistema Simulado - Simplificado

### 6.2 VALIDAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE DOS CONVERSORES

#### 6.2.1 Comparação e Simulação de Resultados em Regime Permanente

As principais equações referentes a operação em regime permanente foram utilizadas para comparar e validar o modelo utilizado como base para o desenvolvimento do modelo final [12]. A Equação 42 relaciona a tensão contínua ( $V_d$ ) de uma ponte de 12 pulsos a equação de corrente contínua ( $I_d$ ) e ao ângulo de disparo ( $\alpha$ ).

Observações: As equações desprezam as perdas ôhmicas no transformador e nos tiristores):

$$Vd = 2 * (Vdo * \cos(\alpha) - Rc * Id)$$

Equação 42

onde Vdo é a tensão direta sem carga ideal para uma ponte de seis pulsos:

$$Vdo = 3 \frac{\sqrt{2}}{\pi} * Vc$$

Equação 43

Vc é a tensão (linha) eficaz de comutação que depende da tensão do sistema de corrente alternada e da relação do transformador.

Rc é a resistência de comutação equivalente.

$$Rc = \frac{3}{\pi} * Xc$$

Equação 44

Xc é a reatância de comutação ou reatância do transformador referida ao lado da válvula.

Os seguintes parâmetros do retificador foram utilizados (por conversor).

A tensão Vc deve levar em consideração o valor efetivo da tensão no barramento de 500 kV e a relação do transformador.

$$Vc = 0,96 * 200 \text{ kV} / 0,90 = 213,3 \text{ kV}$$

$$Id = 2 \text{ kA}$$

$$\alpha = 16,5^\circ$$

$$Xc = 0,24 \text{ pu}, 1200 \text{ MVA e } 222,2 \text{ kV} = 9,874 \Omega$$

Portanto, essa tensão teórica corresponde bem à tensão esperada do retificador calculada a partir da tensão do inversor e à queda de tensão na linha CC (R = 4,5  $\Omega$ ) e no reator de alisamento do retificador (R = 1  $\Omega$ ):

$$Vd = VdL_{inversor} + (R_{linhaDC} + R_{indutância}) * Id$$

Equação 45

Utilizando a Equação 45, temos:

$$Vd = 500 \text{ kV} + (4,5 \Omega + 1 \Omega) \times 2 = 511 \text{ kV}$$

Equação 46

O ângulo de comutação  $\mu$  ou o ângulo de sobreposição também podem ser calculados. Seu valor teórico depende de  $\alpha$ , corrente  $I_d$  e da reatância de comutação  $X_c$ .

Utilizando as seguintes equações, temos:

$$\text{Equação 43: } Vdo = (3 * \sqrt{2}) / \pi \times 213,3 = 288,1 \text{ kV}$$

$$\text{Equação 44: } Rc = (3 / \pi) \times 9,874 = 9,429 \Omega$$

$$\text{Equação 45: } Vd = 2 \times (288,1 \text{ kV} \times \cos(16,5^\circ) - 9,429 \times 2) = 515 \text{ kV}$$

Vem:

$$\mu = \cos^{-1} \left[ \cos \alpha - \frac{Xc * Id * \sqrt{2}}{Vc} \right] - \alpha$$

Equação 47

Aplicando os resultados na Equação 47, temos

$$\mu = \cos^{-1} \left[ \cos 16,5 - \frac{9,874 * 2 * \sqrt{2}}{213,3} \right] - 16,5$$

$$\mu = 17,61 \text{ graus}$$

Equação 48

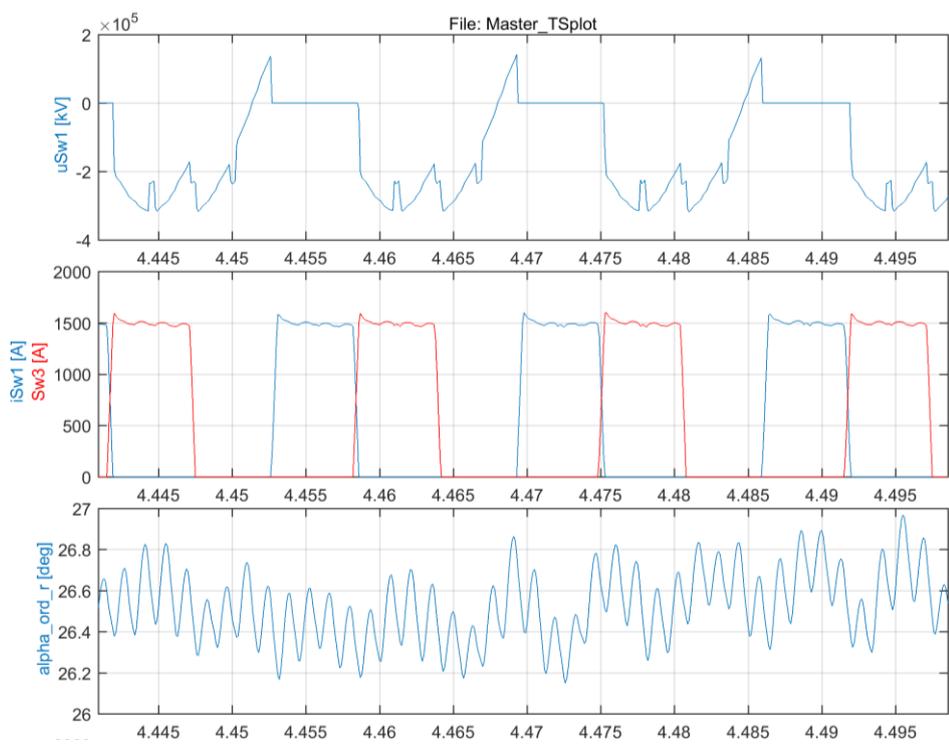


Figura 50 – Retificador: 1.Tensão na válvula 1; 2.Comutação V1-3; 3.Ordem de alfa

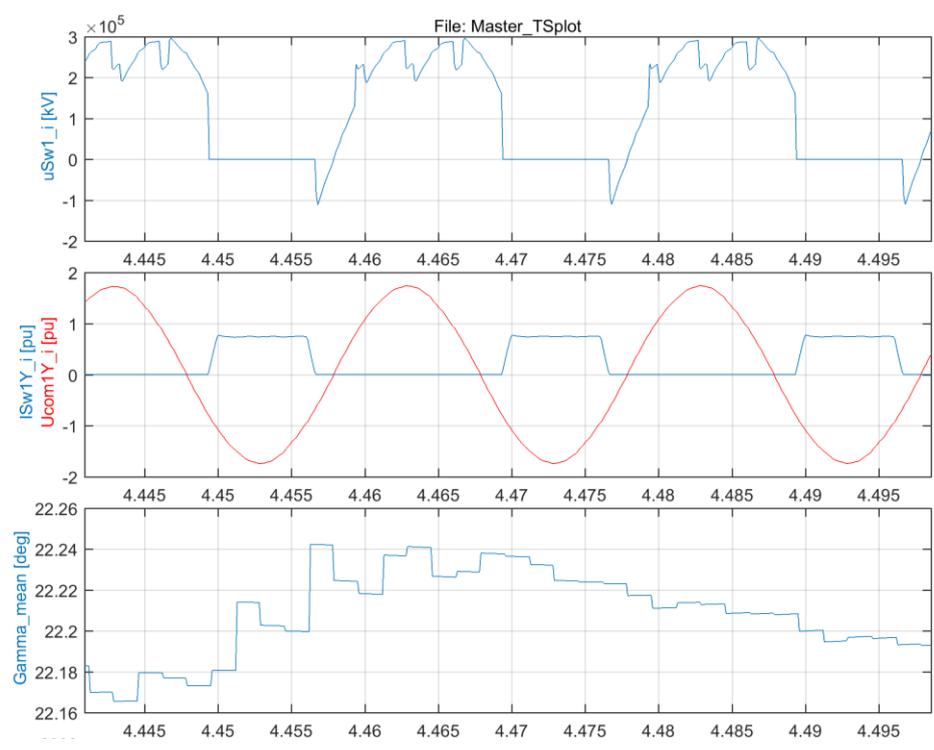


Figura 51 – Inversor: 1.Tensão na válvula V1; 2.Corrente e tensão V1; 3.Ordem de gama

Observações:

- Comportamento similar no polo 2;
- Diferença de valores simulados com o caso base para os ângulos alfa e gama são referentes a diferença de tensão devido a utilização de outra rede CA no lado do retificador com resultados dentro do previsto.

### 6.2.2 Comparação e Simulação de Resultados sob condições de falta

Falta na linha CC

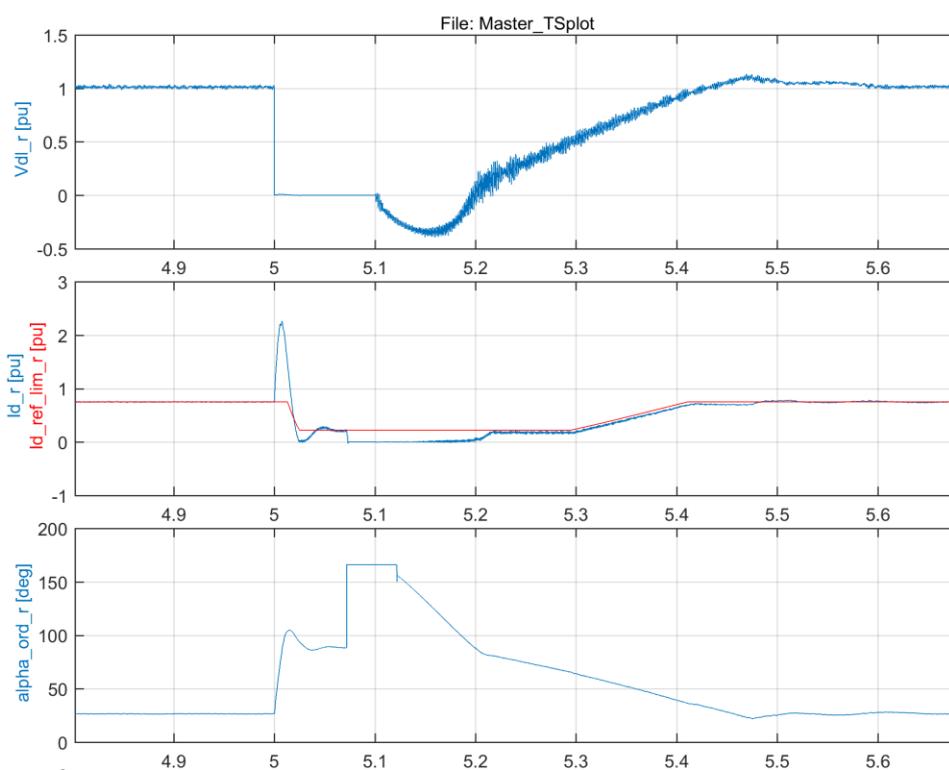


Figura 52 – Retificador: 1.Tensão na linha CC; 2.Corrente e referência; 3.Ordem de alfa

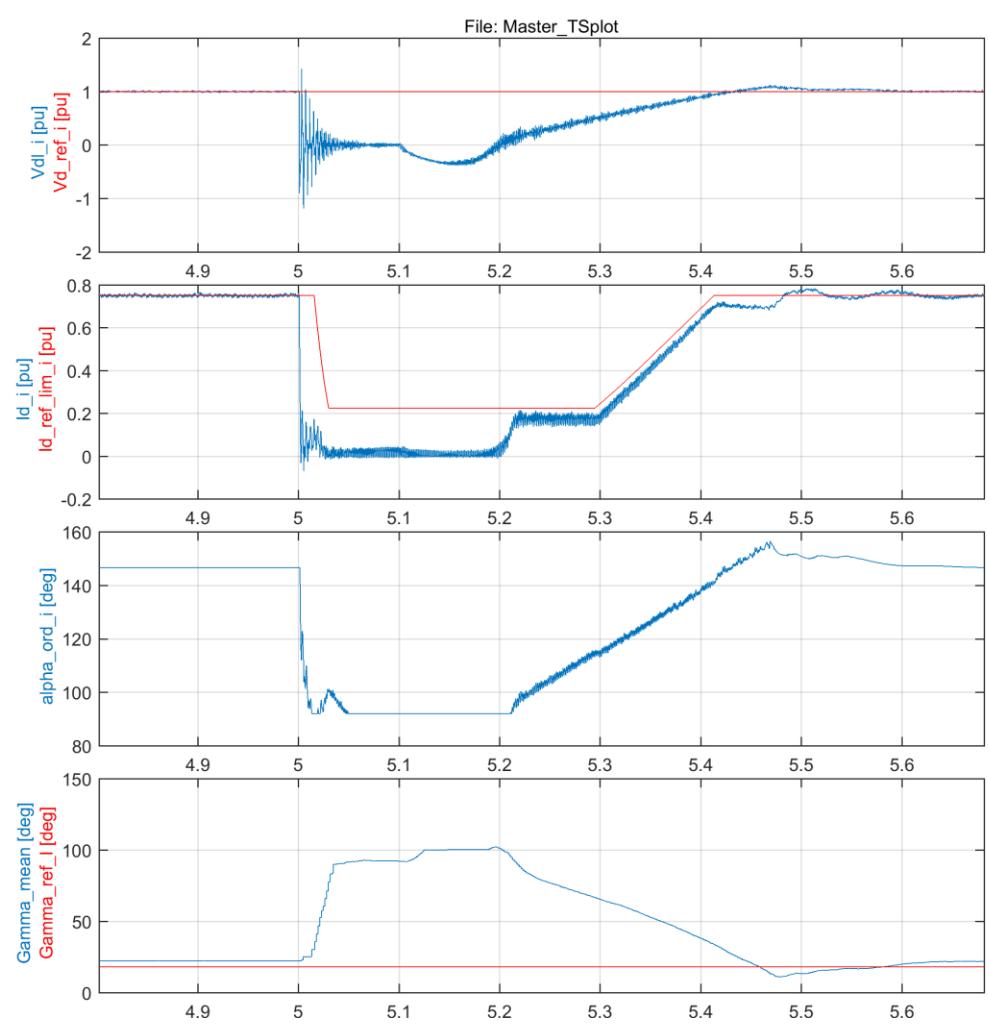


Figura 53 – Inversor: 1.Tensão na linha CC; 2.Corrente CC; 3.Ordem de alfa 4.Gama

## Falta na linha CA no lado do inversor

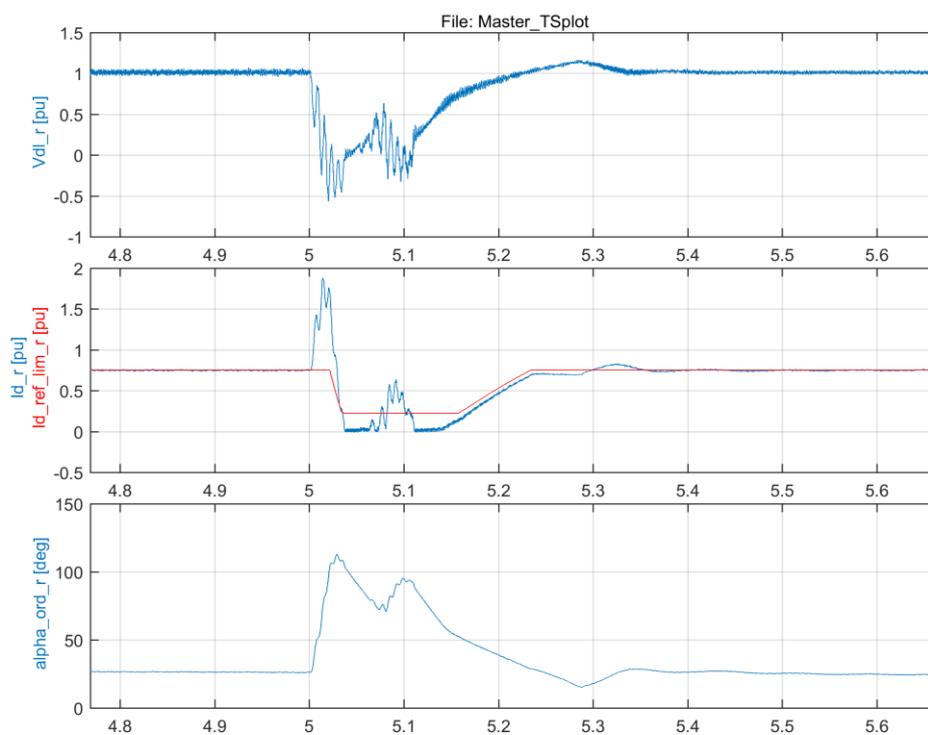


Figura 54 – Retificador: 1.Tensão na linha CC; 2.Corrente CC; 3.Ordem de alfa

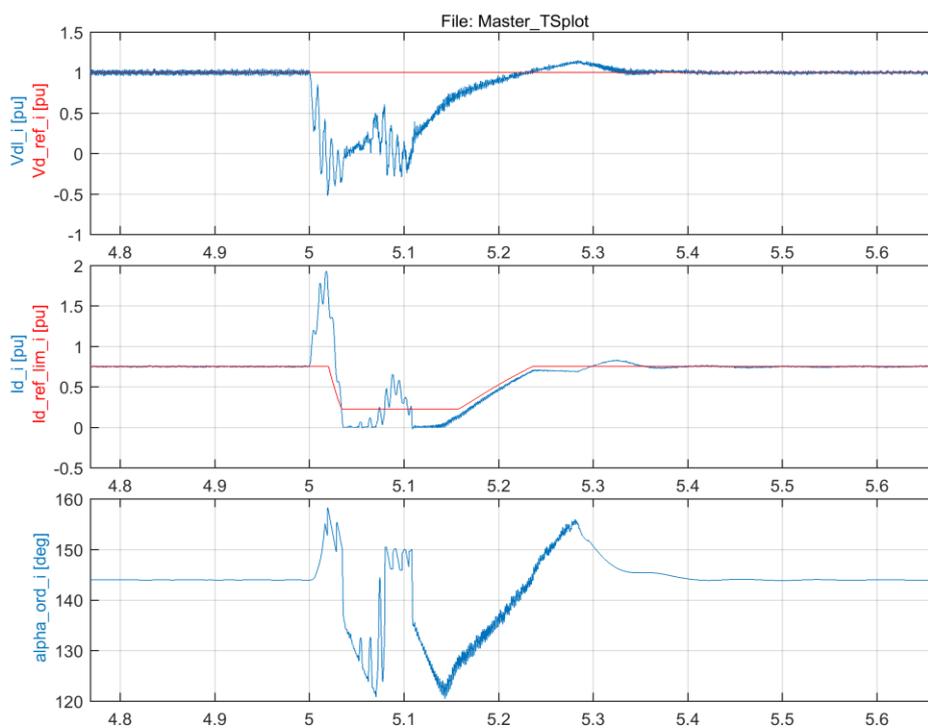


Figura 55 – Inversor: 1.Tensão na linha CC; 2.Corrente CC; 3.Ordem de alfa

### 6.3 SISTEMA CCAT SIMULADO

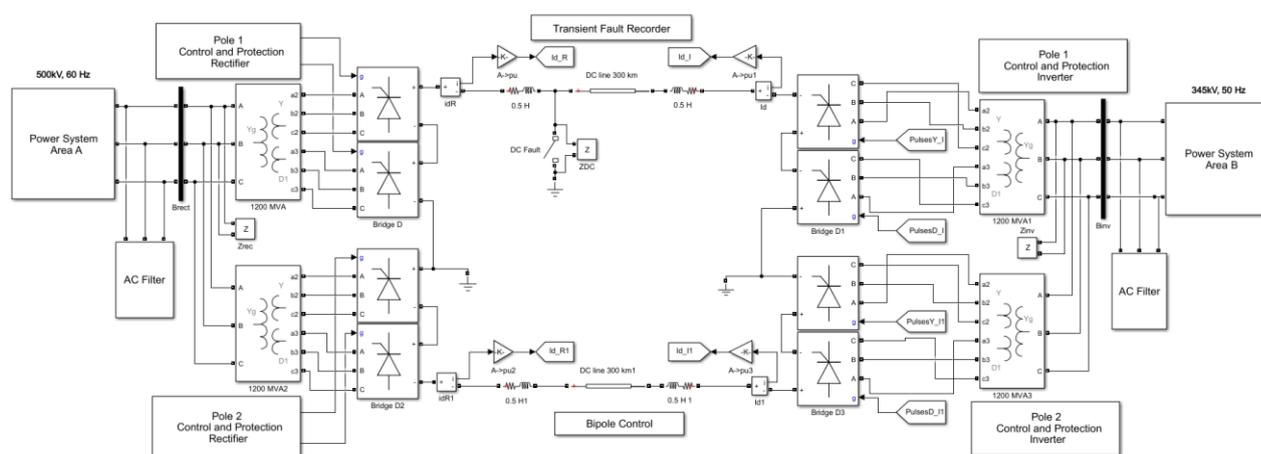


Figura 56 – Sistema Simulado

O sistema tem topologia bipolar com 2 conversores de 12 pulsos 1000MW cada, utilizando duas pontes ligadas em série. Os conversores estão interligados através de suas respectivas linhas de transmissão em corrente contínua de 300 km e reatores de alisamento de 0,5 H [12].

Os transformadores conversores são modelados como transformador trifásico de três enrolamentos com conexões em Yg no primário e Y/D1 nos enrolamentos secundários conforme. Os comutadores de tap não estão disponíveis no modelo de transformador utilizado.

Tabela 6-1 - Dados dos transformadores

Defasagem	Conexão lado da alta tensão	Conexão lado da baixa tensão Y	Conexão lado da baixa tensão D	Potência	Tensões
-30°	Yg	Y	D1	1200MVA	500/200kV

Do ponto de vista do sistema CA, o conversor CCAT atua como uma fonte de correntes harmônicas. Do ponto de vista do sistema CC, é uma fonte de tensões harmônicas. A ordem “n” dessas harmônicas características está relacionada com o número de pulsos “p” da configuração do conversor:  $n = kp \pm 1$ , para a corrente CA e  $n = kp$  para a tensão contínua, sendo k um número inteiro qualquer. Os filtros de CA são utilizados para evitar que as correntes harmônicas ímpares se espalhem para o sistema CA. Os filtros são agrupados em

dois subsistemas, conforme Figura 57. Esses filtros também aparecem como grandes capacitores na frequência fundamental, proporcionando compensação de potência reativa para o consumo do conversor devido ao ângulo de disparo  $\alpha$ , por exemplo: para um ângulo  $\alpha = 30$  graus, a potência reativa requerida é de aproximadamente 60% da potência transmitida a plena carga [12].

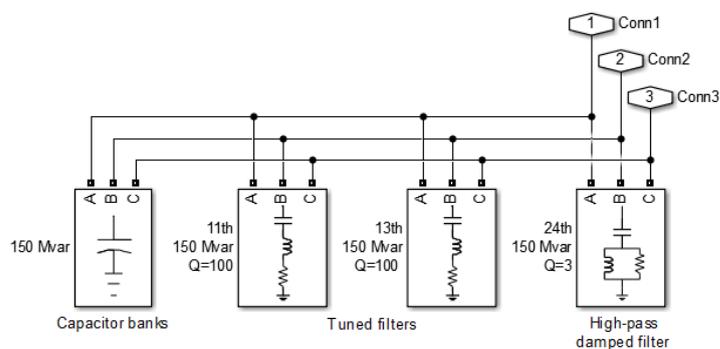


Figura 57 – Filtros de harmônicas AC

## 6.4 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE

### 6.4.1 Descrição do controle de bipolo/ polo

A ordem de potência ou corrente de referência para o retificador e para o inversor é gerada no controle de polos e/ou bipolo conforme apresentado na Figura 58. Quando os dois polos são selecionados no controle de potência bipolar, o controle de potência garante que correntes iguais fluirão normalmente em cada condutor de polo da linha CC e, portanto, a corrente à terra é minimizada. Correntes de terra altas são toleradas apenas no caso de operação de retorno de terra monopolar e quando, devido a limitações do equipamento ou outro motivo, não é possível obter correntes de polos de linha balanceadas. As correntes iguais de polo são mantidas na medida do possível, mesmo quando um polo conversor está operando com tensão reduzida [19].

A redistribuição das ordens de potência entre os polos, devido à perda de capacidade, é necessária apenas nos polos, que estão no controle de potência bipolar. Se um polo está no controle individual e o outro polo está no controle de potência bipolar, o polo que está no

controle de potência bipolar está compensando uma perda de capacidade do polo sendo de controle individual [19]. Para a realização das simulações deste capítulo o sistema foi parametrizado conforme Tabela 6-2, simulações que necessitem de configurações diferentes desta serão destacadas. Esta simulação não contempla os modos de controle com tensão reduzida ou limite de corrente de eletrodo.

Para simulações longas no caso do controle frequência e controle emergencial de potência os ajustes utilizados são os da Tabela 6-3.

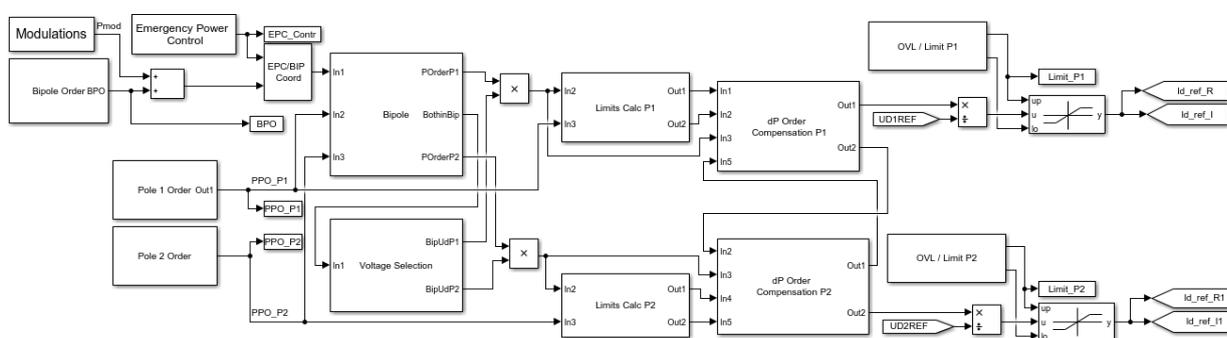


Figura 58 – Controle de bipolo e coordenação com os polos

Tabela 6-2 Parâmetros de Partida, Rampas e Bloqueio.

Ação	Tempo [s]	Rampa [pu/s]	Potência [pu]
Desbloqueio	0,02	0,333	0,1
Rampa de subida	0,5	0,5	0,75
Rampa de descida	8,0	-0,5	0,1
Bloqueio	9,5	-	0

Tabela 6-3 Parâmetros de Partida, Rampas e Bloqueio para simulações longas.

Ação	Tempo [s]	Rampa [pu/s]	Potência [pu]
Desbloqueio	0,02	0,333	0,1
Rampa de subida	0,5	0,5	0,75
Rampa de descida	108,0	-0,5	0,1
Bloqueio	109,5	-	0

O controle de individual de potência é realizado separadamente por cada polo. Neste modo, a ordem de potência é dada manualmente e coordenada automaticamente. A potência transmitida será mantida igual à ordem de potência definida pelo operador com a contribuição de várias modulações de potência, quando ativada. Nesse modo, a transferência de potência do polo não é influenciada pela ordem de potência do outro polo.

#### 6.4.2 Descrição de modulação – Controle de frequência

Conforme já mencionado no capítulo 5.1.2, os sistemas CCAT podem ser usados para suportar a frequência de um sistema de potência perturbado (devido à perda de geração ou grandes blocos de cargas ou seções do sistema). O sistema de frequência simulado possui as características apresentadas na Figura 59, Tabela 6-4 e se localiza na malha de controle conforme a Figura 58.

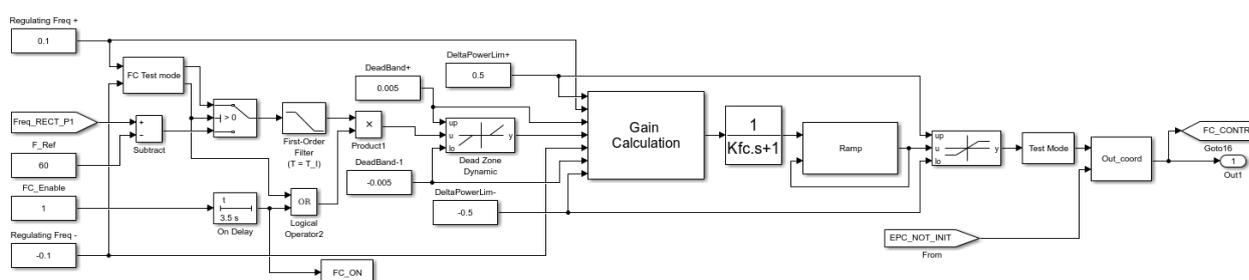


Figura 59 – Modulações – Controle de frequência

O da contribuição de potência se dá com base na equação abaixo:

$$P_{Order} = P_{Set} + k * \Delta f$$

Equação 49

Sendo  $K$  definido pela Equação 50:

$$k = \frac{DP_{Máximo}}{Faixa_{Regulação} - Banda_{Morta}}$$

Equação 50

Tabela 6-4 Parâmetros do controle de frequência.

Banda morta	Faixa de regulação	Rampa	Ganho (k)	DP Maximo
0,005 [Hz]	0,2 [Hz]	0,6 [pu/s]	2,56 [pu/Hz]	0,5 [pu]

Tabela 6-5 Parâmetros do controle de frequência coordenada com EPC.

Banda morta	Faixa de regulação	Rampa	Ganho (k)	DP Maximo
0,005 [Hz]	0,1 [Hz]	1,2 [pu/s]	10,5 [pu/Hz]	1,0 [pu]

### 6.4.3 Descrição do controle emergencial de potência (EPC)

A transmissão CCAT pode ajudar um sistema de potência CA a se recuperar de uma perturbação crítica, aumentando ou diminuindo rapidamente a potência transferida por ele, ou mesmo alterando a direção do fluxo de potência [17]. São vários os critérios possíveis para a ativação de um EPC, no modelo apresentado na Figura 60 foram simulados apenas os casos de grandes variações de frequência para as entradas tradicionais ou *droop*. Esta função ajuda a manter a estabilidade do sistema CA e limita a perturbação a se espalhar por uma área ampla.

Para as simulações foram utilizadas as configurações: Tabela 6-6 e Tabela 6-7 implementadas apenas no lado do retificador (Área A).

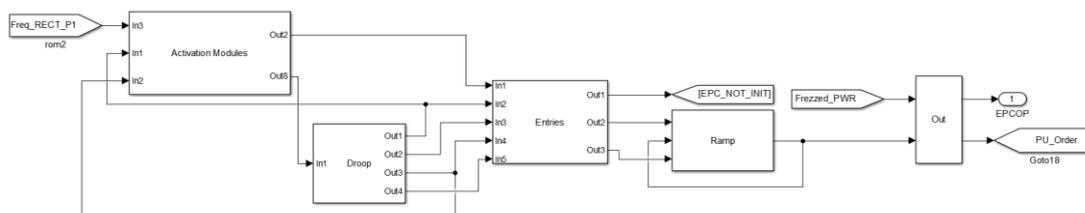


Figura 60 – Controle emergencial de potência

Tabela 6-6 Parâmetros das entradas tradicionais do EPC.

Entrada M.ativo	Prioridade	Valor Ativação [Hz]	Valor Desativação [Hz]	Delay Tda [ms]	Delta Potência [pu]	Velocidade rampa [pu/s]
1/1	1	60,05	60,049	0,01	0,15	0,5
2/2	2	59,75	59,76	0,01	-0,7	0,6
3/3	3	59,85	59,86	0,01	-0,4	0,4
4/4	4	59,95	59,96	0,01	-0,2	0,6

A contribuição de potência do EPC droop seguirá a equação abaixo:

$$\Delta P_{\text{Contribuição}} = \frac{DP_{\text{Máximo}}}{\text{Faixa}_{\text{Regulação}}} (Freq_{\text{Ref}} - Freq_{\text{Atual}})$$

Equação 51

Tabela 6-7 Parâmetros das entradas *droop* do EPC.

Entrada	Prioridade	Faixa de regulação [Hz]	Frequência Ref [Hz]	Rampa [pu/s]	DP Máximo [pu]
1	6	0,5	59,9	0,4	0,8
2	5	0,5	59,4	0,6	0,8

#### 6.4.4 Definições para os retificadores e inversores:

A principal tarefa do controle de potência individual do polo é manter a estabilidade do sistema CC mantendo a potência ou a corrente CC transmitida constantemente no nível solicitado para o polo correspondente, desconsiderando os distúrbios CA ou CC. O sistema simulado tem como base os principais parâmetros da Tabela 6-8, Figura 61 e Figura 62.

Tabela 6-8 Parâmetros para retificadores e inversores.

Parâmetro	Retificador	Inversor
Tensão no sistema CA	500kV	345kV
Tensão no secundário do transformador	200kV	200kV
Frequência do sistema CA	60Hz	50Hz
Ângulo alfa inicial	90°	-
Ângulo alfa máximo	166°	166°
Ângulo alfa mínimo	5°	92°
Ângulo alfa forçado	166°	92°
Ângulo gama mínimo	-	18°
Margem de corrente	-	0,1pu

A Figura 61 e a Figura 62 mostram os controles referentes ao polo 1, entretanto controles similares para o polo 2 também foram desenvolvidos.

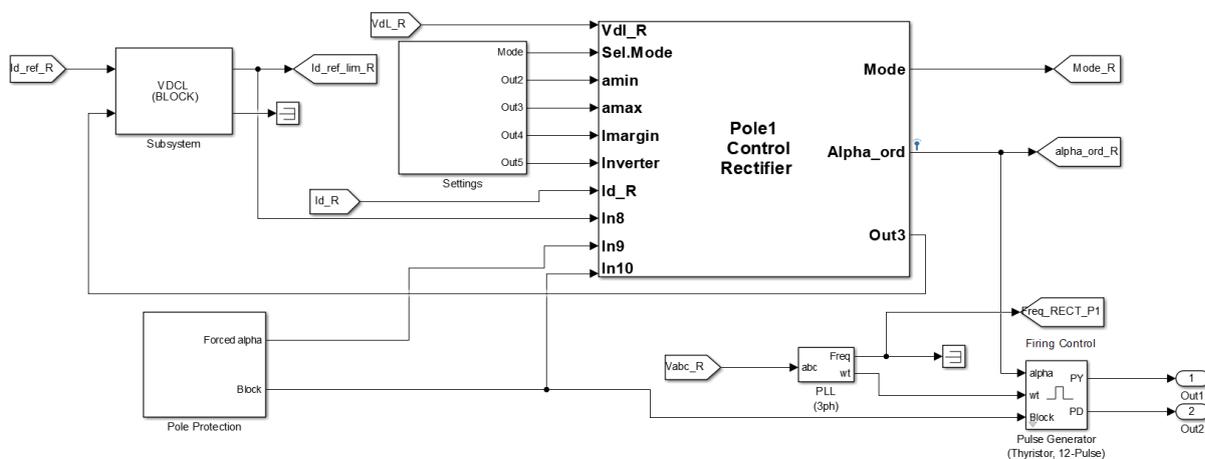


Figura 61 – Controle do polo - retificador

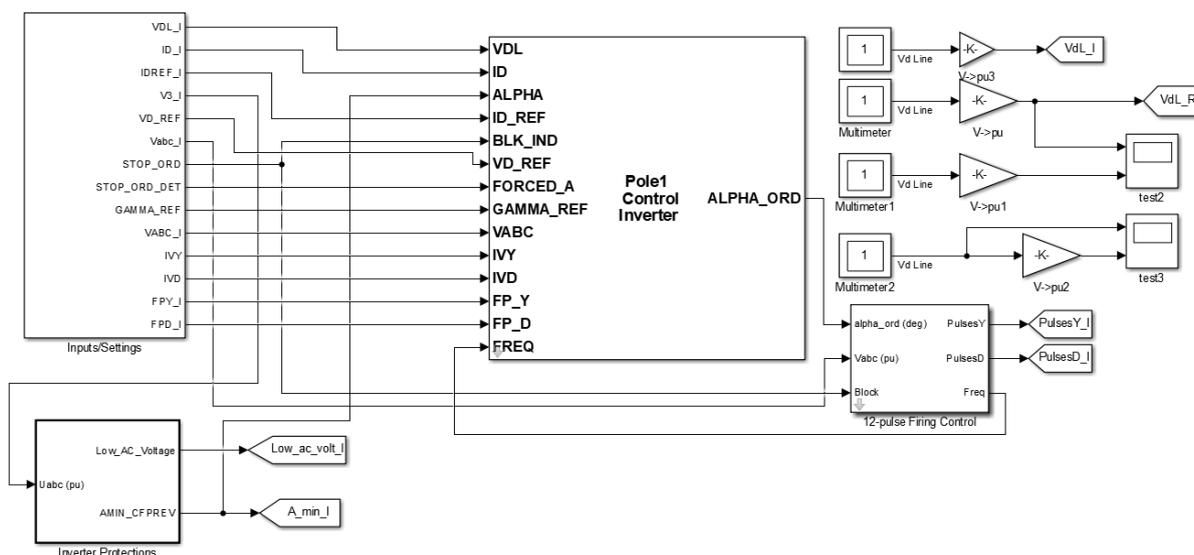


Figura 62 – Controle do polo – lado do inversor

#### 6.4.4.1 VDCOL:

O controle denominado limitador de ordem de corrente dependente de tensão (VDCOL), já mencionado no capítulo 4.2.1, reduz automaticamente o ponto de ajuste da corrente de referência ( $I_{d\_ref}$ ) quando a tensão CC ( $V_{dL}$ ) diminui (como, por exemplo, durante uma falha na linha CC ou uma falha CA grave). A redução das correntes de referência também reduz a demanda de potência reativa no sistema CA, ajudando o sistema a se recuperar de uma falta. Os parâmetros VDCOL foram implementados conforme a Tabela 6-9 [12].

Tabela 6-9 Parâmetros para VDCOL.

Lado	Vd(pu)	Vd min (pu)	Id min (pu)	Id Min abs (pu)	Const Tempo subida (s)
Retificador	0,6	0,18	0,3	0,1	0,08
Inversor	0,6	0,18	0,3	0,1	0,08

#### 6.4.4.2 Reguladores de corrente, tensão e gama

Os controles dos retificadores e dos inversores possuem os reguladores de corrente calculando a ordem do ângulo de disparo alfa calculada no regulador de corrente. No

inversor, operando em paralelo com o regulador de corrente, estão os reguladores de tensão e / ou regulador do ângulo gama que calculam os ângulos de disparo. O ângulo  $\alpha$  efetivo é o valor mínimo referente ao ângulo calculado na saída desses reguladores. Todos os reguladores são do tipo proporcional-integral, ver Figura 63 [12].

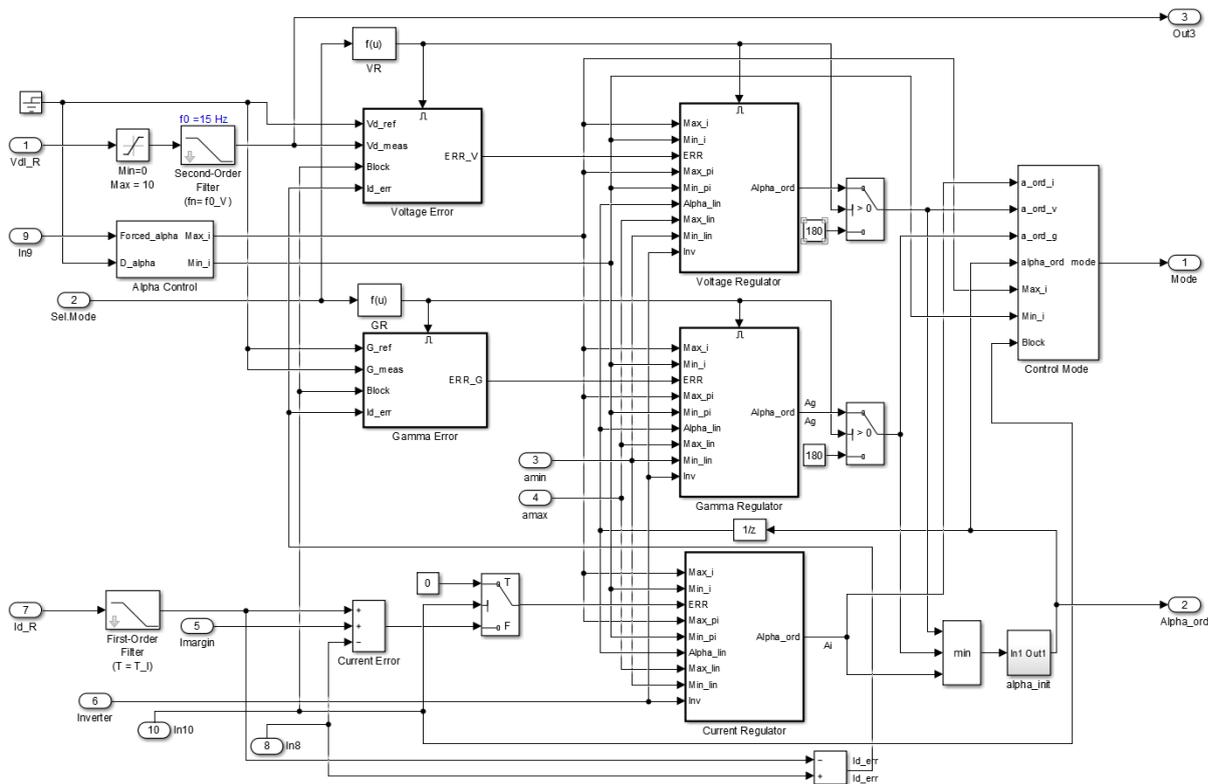


Figura 63 – Reguladores de corrente, tensão e gama

Tabela 6-10 Parâmetros para retificadores e inversores.

Parâmetro	Retificadores			Inversores		
	Kp	Ki	Inicial	Kp	Ki	Inicial
Controle de tensão	35	2250	90	35	2250	90
Controle de gama	1	20	90	2	40	90
Controle de corrente	200	4500	90	45	4500	90

### 6.4.4.3 Limitador de alfa mínimo

Em caso falha no sistema CA no lado da estação retificadora, a tensão CA irá diminuir, provocando assim a diminuição da tensão CC no polo. Isso reduz a corrente CC rapidamente. Portanto, o controlador de corrente irá reduzir o ângulo alfa para o valor mínimo (5 graus). Após o desaparecimento da falta, a tensão retorna instantaneamente; isso faz com que o sistema tenha um *overshooting* de corrente CC caso o ângulo alfa estiver próximo ao seu valor mínimo [18].

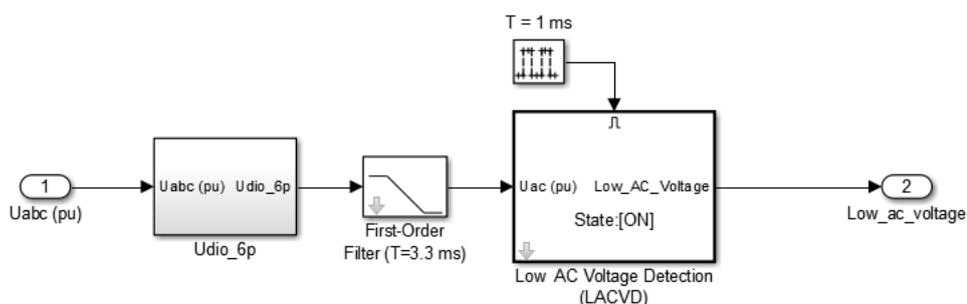


Figura 64 – Detector de baixa tensão AC

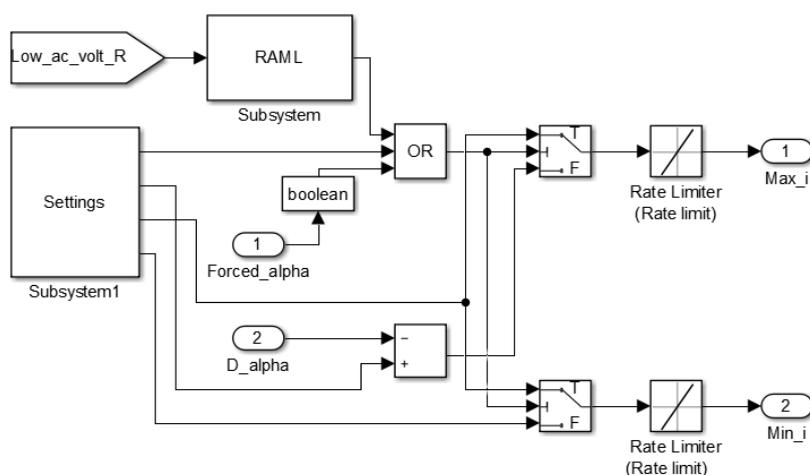


Figura 65 – Implementação do RAML no controle do ângulo alfa - retificador

## 6.5 DEFINIÇÃO DE CASOS

Tabela 6-11 Casos simulados.

Caso nº	Cenário	Distúrbio	Descrição
6.6.1	P1 e P2 em controle de polo FC e EPC desligados	Regime permanente com 0.75(pu) de potência	Regime permanente com 0.75(pu) de potência
6.6.2	P1 e P2 em controle de polo FC e EPC desligados	Degrau de potência – Pole modes	P1 recebe degrau de potência de 0,75pu para 0,55pu em t=5s e retorna em t=7s. P2 deve manter a potência inalterada
6.6.3	P1 e P2 em controle de bipolo FC e EPC desligados	Degrau de potência – Bipole modes	P1 recebe degrau de potência de 0,75pu para 0,55pu em t=5s e retorna em t=7s. P2 deve compensar a potência
6.6.4	P1 e P2 em controle de bipolo FC e EPC desligados	Limitação externa de potência (ação de runback)	P1 e P2 recebem limitação externa de transmissão (N-1) de 0,55pu da potência bipolar em t=5s e retorna em t=7s, ambos devem reduzir a potência sem compensações
6.6.5	P1 e P2 em controle de bipolo FC e EPC desligados	Perda de geração, todas as modulações deligadas	Maquina 6 do lado do retificador será desconectada em t=10s. P1 e P2 devem não devem modular a potência
6.6.6	P1 e P2 em controle de bipolo FC ligado e EPC desligado	Perda de geração, controle de frequência ligado. Ajustado conforme a Tabela 6-3	Desligamento da máquina 6 do lado do retificador será desconectada em t=10,1s. P1 e P2 devem modular a potência de ordem bipolar para estabilizar a frequência
6.6.7	P1 e P2 em controle de bipolo FC ligado e EPC desligado	Perda de bloco de carga, controle de frequência ligado. Ajustado conforme a Tabela 6-3	Desligamento de 100MW de carga do lado do retificador será desconectada em t=10,1s. P1 e P2 devem modular a potência de ordem bipolar para estabilizar a frequência
6.6.8	P1 e P2 em controle de bipolo FC ligado e EPC desligado	Perda de grande bloco de carga, controle de frequência ligado. Ajustado conforme a Tabela 6-3	Desligamento de 200MW de carga do lado do retificador será desconectada em t=10,1s. P1 e P2 devem modular a potência de ordem bipolar para estabilizar a frequência
6.6.9	P1 e P2 em controle de bipolo FC ligado e EPC desligado	Perda severa de geração, controle de frequência ligado. Ajustado conforme a Tabela 6-3	Desligamento das maquinas 5 e 6 do lado do retificador será desconectada em t=5,1 e t=10,1s. P1 e P2 devem modular a potência de ordem bipolar para estabilizar a frequência
6.6.10	P1 e P2 em controle de bipolo FC e EPC droop ligados	Perda severa de geração, controle de frequência ligado. Ajustado conforme a Tabela 6-5 EPC conforme a Tabela 6-7	Desligamento das maquinas 5 e 6 do lado do retificador será desconectada em t=5,1 e t=10,1s. P1 e P2 devem modular a potência de ordem bipolar para estabilizar a frequência
6.6.11	P1 e P2 em controle de bipolo FC e EPC tradicional ligados	Perda severa de geração, controle de frequência ligado. Ajustado conforme a Tabela 6-5 EPC conforme a Tabela 6-6	Desligamento das maquinas 5 e 6 do lado do retificador será desconectada em t=5,1 e t=10,1s. P1 e P2 devem modular a potência de ordem bipolar para estabilizar a frequência

## 6.6 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

A tabela abaixo apresenta a descrição dos sinais

Tabela 6-12 Tabela de dados dos sinais.

Nome do sinal	Elemento	Unidade/Tipo	Descrição
va_r/vb_r/vc_r	Área A	Pu de tensão	Tensão ca do lado do retificador
ia_r/ib_r/ic_r	Área A	Pu de corrente [pu/100MVA]	Tensão ca do lado do retificador
Vdl_r	Retificador Polo 1	Pu de tensão	Tensão na linha cc
Id_r	Retificador Polo 1	Pu de corrente	Corrente na linha cc
Id_ref_lim_r	Retificador Polo 1	Pu de corrente	Corrente de referência limitada pelo VDCOL
alpha_ord_r	Retificador Polo 1	Graus	Ângulo alfa do retificador
mode_r	Retificador Polo 1	Unidade	Modo de operação do retificador
uSw1	Retificador Polo 1	kV	Tensão na válvula 1
iSw1	Retificador Polo 1	A	Corrente na válvula 1
Sw3	Retificador P1	A	Corrente na válvula 3
PGEN	Área A	MW	Potência ativa na geração
Pmec1	Máquina 1	Pu de potência	Potência mecânica na máquina 1
Pele1	Máquina 1	Pu de potência	Potência elétrica na máquina 1
dw1	Máquina 1	Pu	Velocidade – desvio do rotor
Vdl_i	Inversor Polo 1	Pu de tensão	Tensão na linha cc
Vd_ref_i	Inversor Polo 1	Pu de tensão	Referência de tensão na linha cc
Id_i	Inversor Polo 1	Pu de corrente	Corrente na linha cc
Id_ref_lim_i	Inversor Polo 1	Pu de corrente	Corrente de referência limitada pelo VDCOL
alpha_ord_i	Inversor Polo 1	Graus	Ângulo alfa do inversor
Gamma_mean	Inversor Polo 1	Graus	Ângulo gama do inversor
Gamma_ref_l	Inversor Polo 1	Graus	Referência do ângulo gama do inversor
uSw1_i	Inversor Polo 1	kV	Tensão na válvula 1 do inversor
Ucom1Y_i	Inversor Polo 1	Pu de tensão	Tensão de comutação na válvula 1
Freq_r	Lado do Retificador	Hz	Frequência lado CA do retificador
P1_r	Retificador Polo 1	Pu de potência	Potência do polo 1
P2_r	Retificador Polo 2	Pu de potência	Potência do polo 2
FC_contr	Contr. Frequência	Pu de potência	Contribuição do controle de frequência
EPC_Contr	Contr. Emerg. Pot.	Pu de potência	Contribuição do EPC
PPO_P1	Polo 1	Pu de potência	Ordem de potência

PPO_P2	Polo2	Pu de potência	Ordem de potência
Limit_P1	Polo 1	Pu de potência	Limite do polo
Limit_P2	Polo2	Pu de potência	Limite do polo
EPC_init	Contr. Emerg. Pot.	Digital	Regulação do EPC ativa
EPC_frezzed_P	Contr. Emerg. Pot.	Pu de potência	Potência de referência do EPC
EPC_Freq	Contr. Emerg. Pot.	Hz	Frequência de entrada para o EPC

Todos os gráficos neste capítulo apresentam o eixo da abcissa em escala de tempo em segundos.

### 6.6.1 Regime permanente com 0.75(pu) de potência

O sistema foi simulado desde a partida até o bloqueio em regime permanente com o objetivo de demonstrar o comportamento do sistema de controle durante o seu desbloqueio, rampa de potência, controle durante a transmissão em regime permanente, rampa de redução de potência e bloqueio do polo. Esta simulação inicial será utilizada como referência de comparação entre as demais simulações.

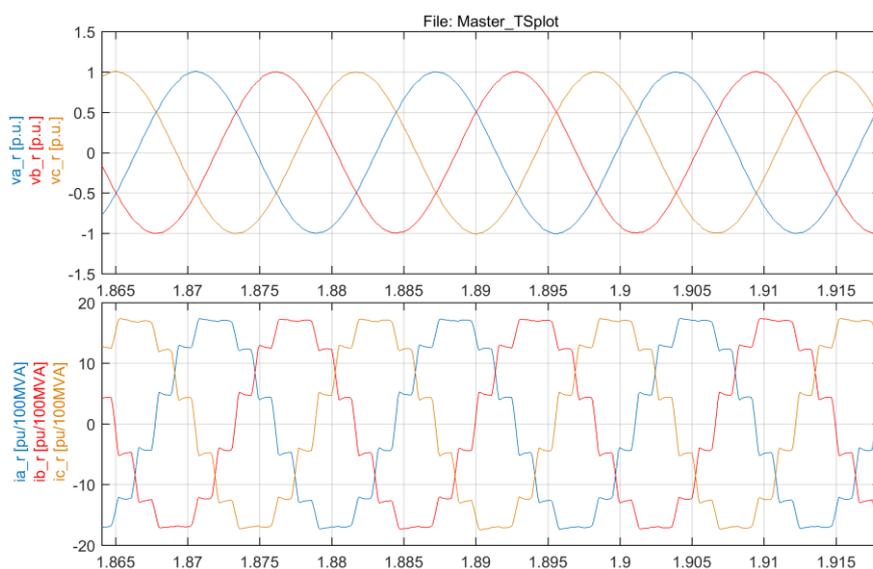


Figura 66 – Tensões/correntes CA (antes dos filtros) - Lado do Retificador

A Figura 67 e a Figura 68 mostram o comportamento de bloqueio e desbloqueio do lado retificador e inversor respectivamente conforme os ajustes da Tabela 6-2. Os controles de modulações e controle emergencial de potência desligados.

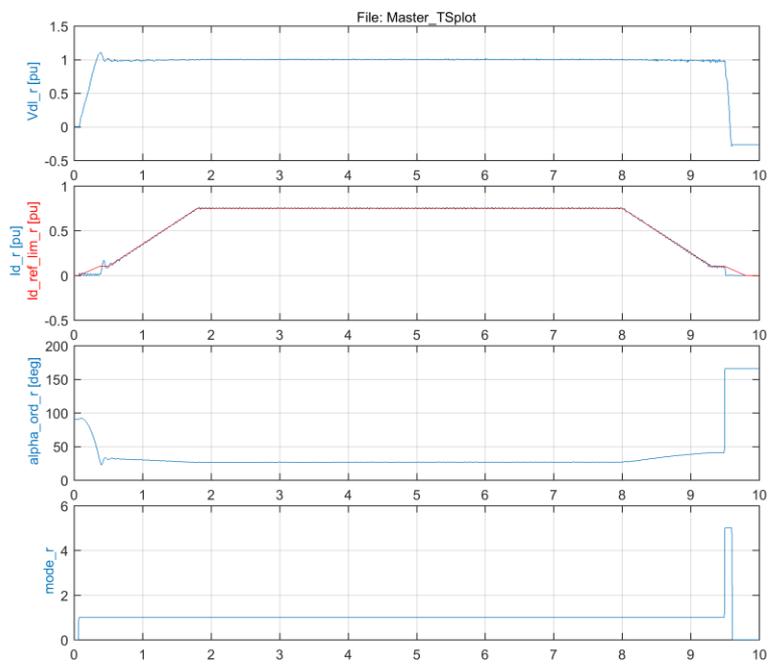


Figura 67 – Comportamento do retificador

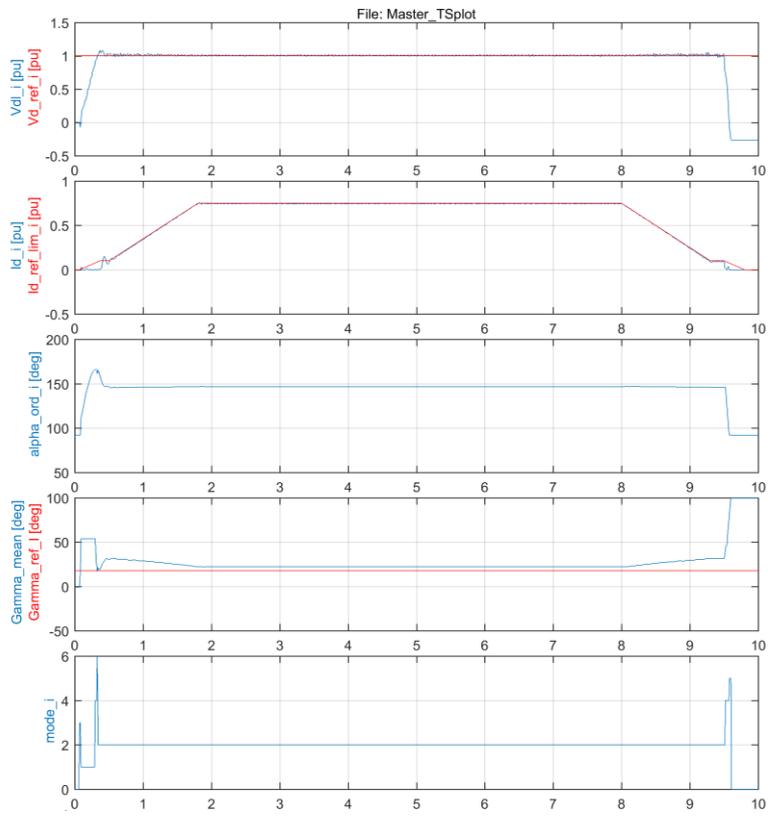


Figura 68 – Comportamento do inversor

### 6.6.2 Degrau de potência – Pole modes

Este caso simulado tem o objetivo de demonstrar a resposta a um degra de potência no modo de controle individual dos polos, o degra aplicado ao polo 1 no instante  $t=5s$  e removido em  $t=7s$ , observando que nenhuma compensação deve ser realizada pelo polo 2

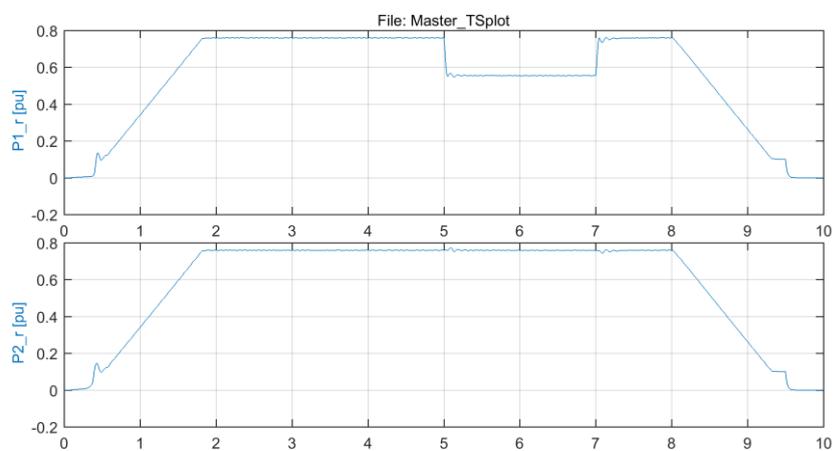


Figura 69 – Degrau de potência (Pole modes)

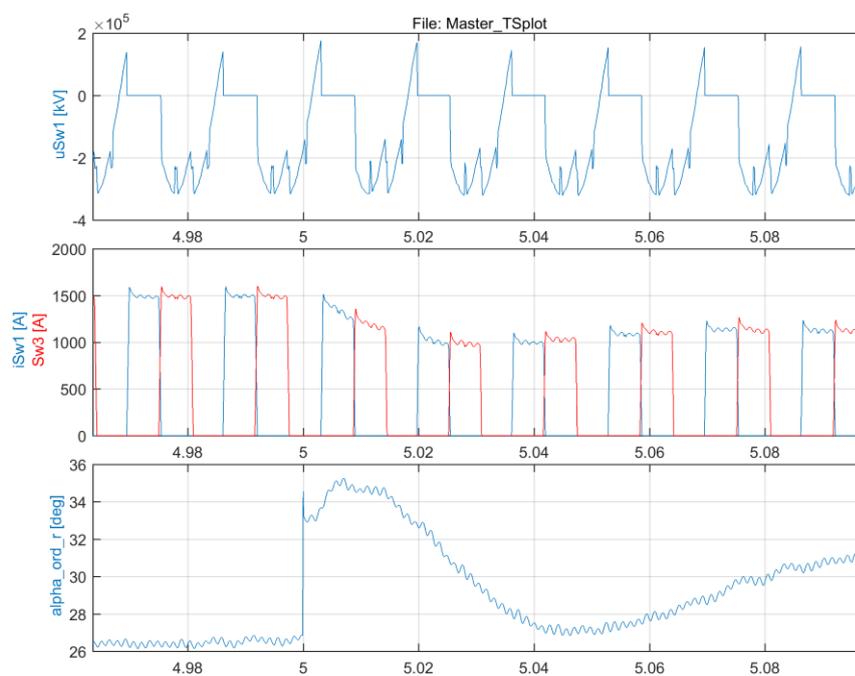


Figura 70 – Degrau de potência (Pole modes) – P1 retificador

### 6.6.3 Degrau de potência – Bipole mode

Este caso simulado tem o objetivo de demonstrar a resposta a um degrau de potência no modo de controle bipolar, o degrau aplicado ao polo 1 no instante  $t=5s$  e removido em  $t=7s$ , observando que o polo 2 deve compensar a potência até o seu limite máximo de sobrecarga.

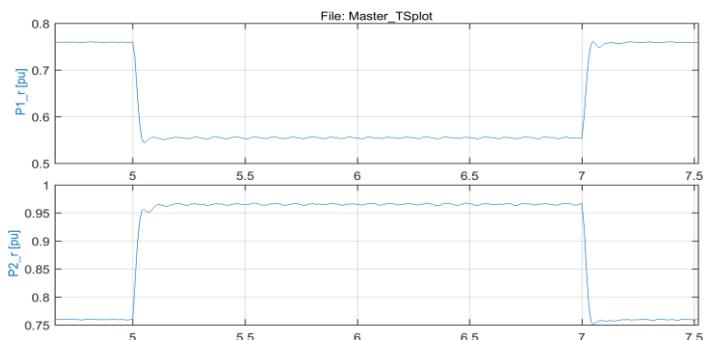


Figura 71 – Degrau de potência (Bipole mode)

### 6.6.4 Limitação externa de potência (Runback) – Bipole mode

Este caso simulado tem o objetivo de demonstrar a resposta do sistema devido a ocorrência da perda de algum elemento externo no sistema de potência que exija uma redução na transmissão do sistema CCAT executada através da ação de *runback*, a limitação é aplicada no instante  $t=5s$  e removido em  $t=7s$ , observando que ambos polos devem obedecer a limitação. Foi definido neste modelo que ao fim da limitação externa a potência retorne para os valores ordenados anteriormente, entretanto em alguns projetos observados para a elaboração deste trabalho, após a ocorrência de uma limitação a potência só irá retornar aos patamares anteriores por ação manual do operador.

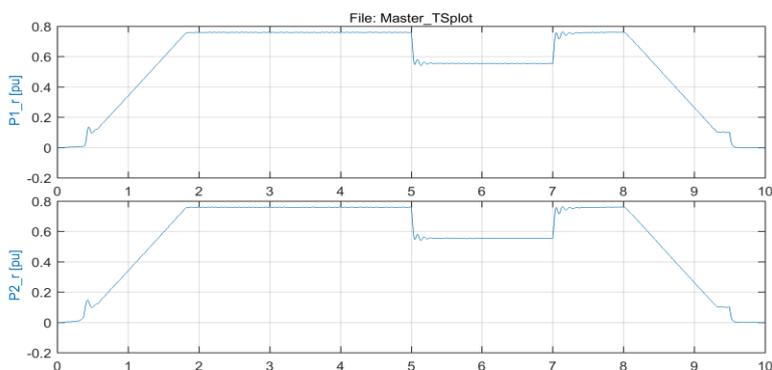


Figura 72 – Limitação externa de potência (Bipole mode)

### 6.6.5 Perda de geração, todas as modulações deligadas

Este caso tem o principal objetivo de demonstrar a severidade das perdas no sistema de transmissão simulado denominado como área A conforme apresentado na Figura 49 e na Figura 56, sendo:

- **Curva F1:** Perda extremamente severa, consiste no desligamento da máquina 5 no instante  $t=5,1s$  e o desligamento da máquina 6 no instante  $t=10,1s$  com o objetivo de provocar uma variação de frequência com valores extremamente severos no sistema elétrico de potência;
- **Curva F2:** Perda severa, consiste no desligamento da máquina 6 no instante  $t=10,1s$  com o objetivo de provocar uma variação de frequência com valores severos no sistema elétrico de potência;
- **Potência:** A potência despachada pelas máquinas 5 e 6 no momento pré-falta será sempre na ordem de 411MW cada.

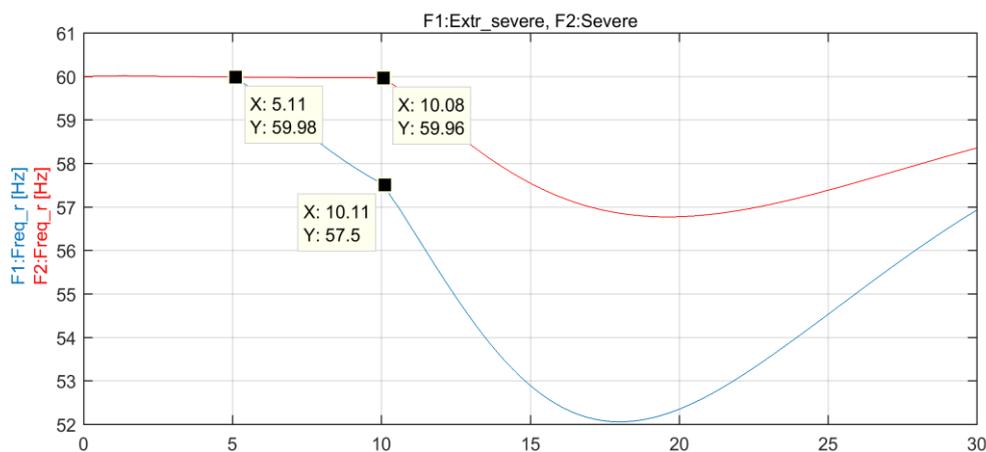


Figura 73 – Perda de geração do lado do retificador, dados de frequência

### 6.6.6 Perda severa de geração (lado retificador), FC ligado

Para este caso temos desligamento da máquina 6 no instante  $t=10,1s$ , onde o sistema se encontra em modo bipolar, com o controle de frequência ligado e EPC desligado.

É possível observar como o elo CCAT através do controle de frequência é capaz de modular rapidamente a potência de forma a reduzir de maneira significativa o desvio de frequência para uma perda severa de geração.

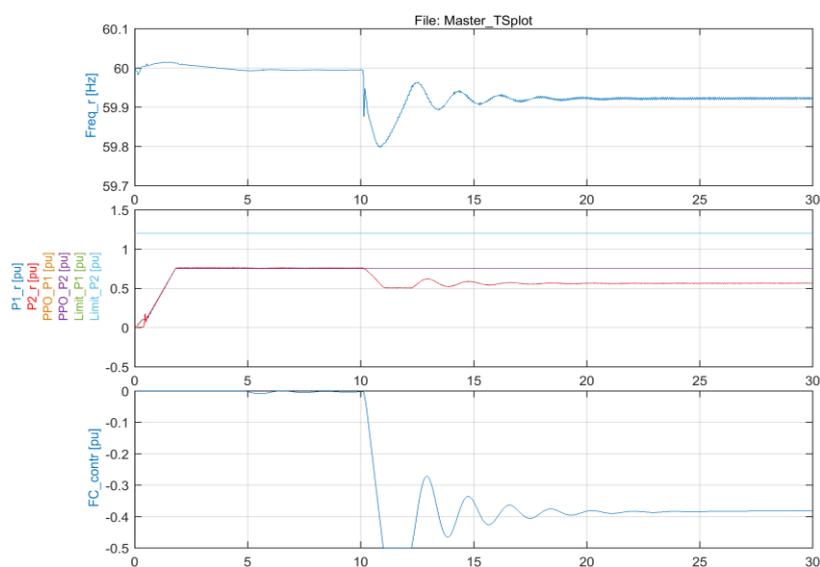


Figura 74 – Perda de geração severa do lado do retificador, FC ligado, Rede e elo CCAT

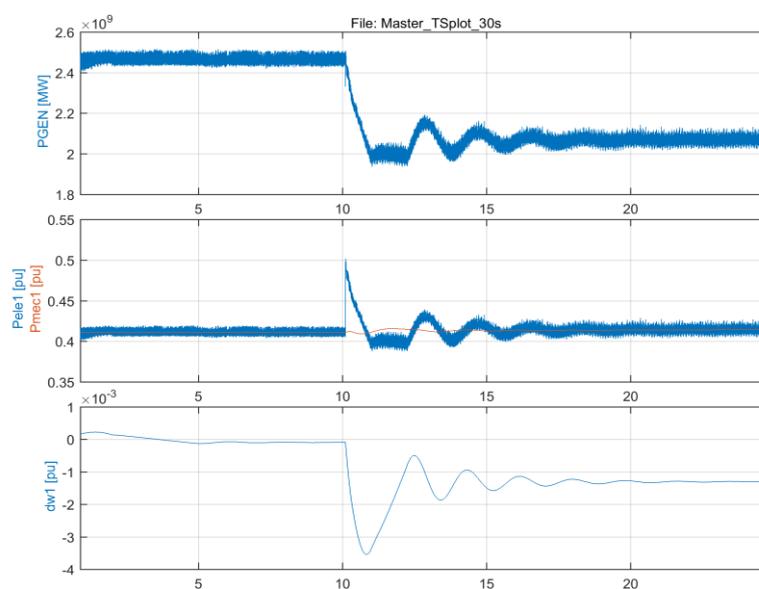


Figura 75 – Perda de geração severa do lado do retificador, FC ligado, Dados da geração

Em uma análise mais longa com um cenário de 70 segundos, podemos observar que após a estabilização da frequência pelo sistema CCAT os controladores das máquinas por possuírem ação mais lenta continua trabalhando de forma a levar o sistema novamente para a frequência nominal.

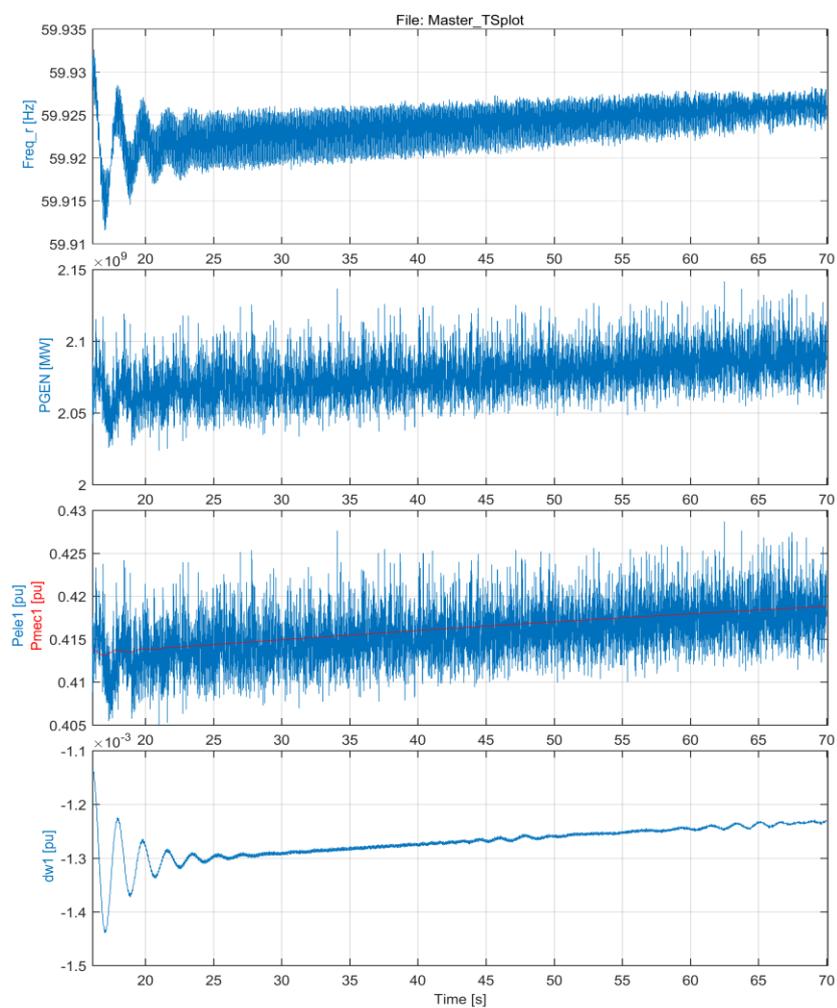


Figura 76 – Perda de geração severa do lado do retificador, FC lig, Dados da geração 70s

### 6.6.7 Perda de 100MW de carga (lado retificador), FC ligado

O objetivo deste caso é demonstrar a correta direção de contribuição e o funcionamento do controle de frequência também para sobre frequências.

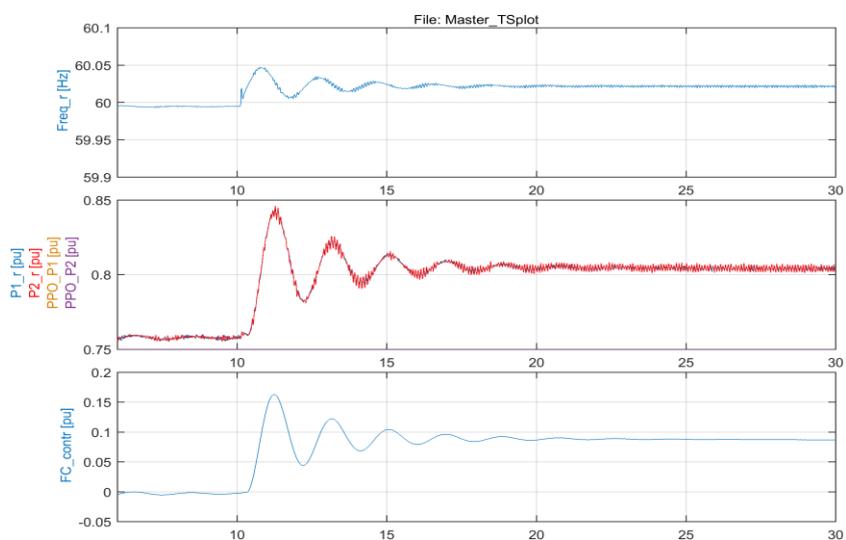


Figura 77 – Perda de 100MW de carga do lado do retificador, FC ligado, Rede e elo CCAT

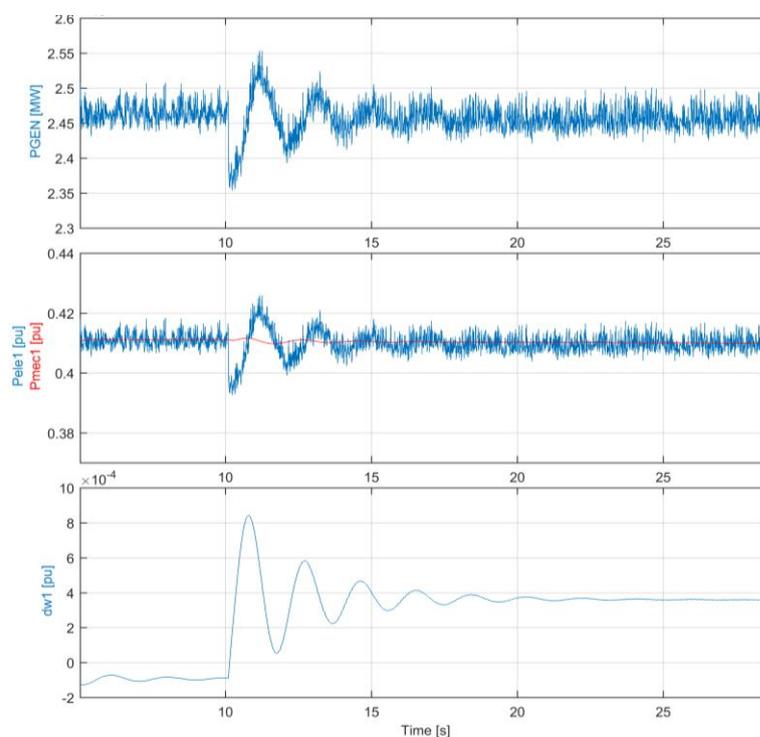


Figura 78 – Perda de 100MW de carga do lado do retificador, FC ligado, Dados da geração

### 6.6.8 Perda de 200MW de bloco de carga (lado retificador), FC ligado

O objetivo deste caso é demonstrar a correta direção de contribuição e o funcionamento do controle de frequência também para sobre frequências.

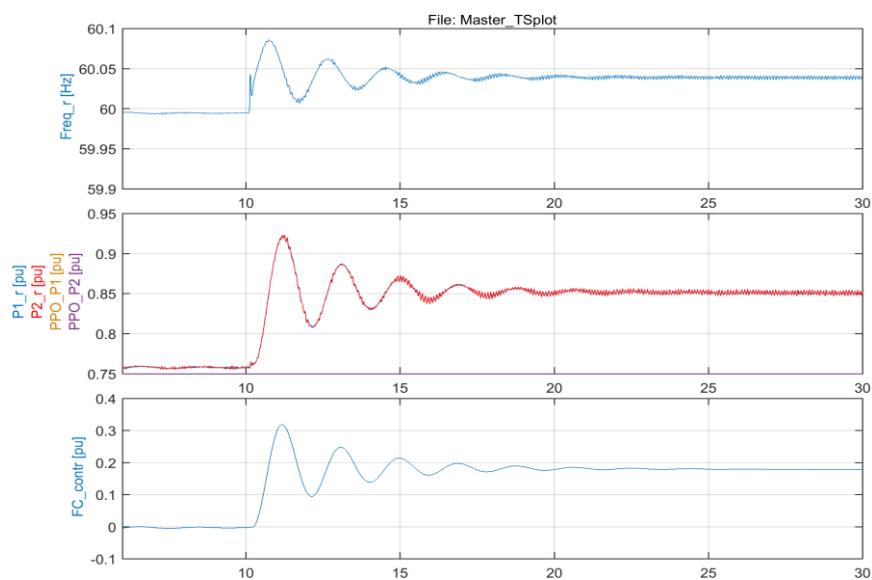


Figura 79 – Perda de 200MW de carga do lado do retificador, FC ligado, Rede e elo CCAT

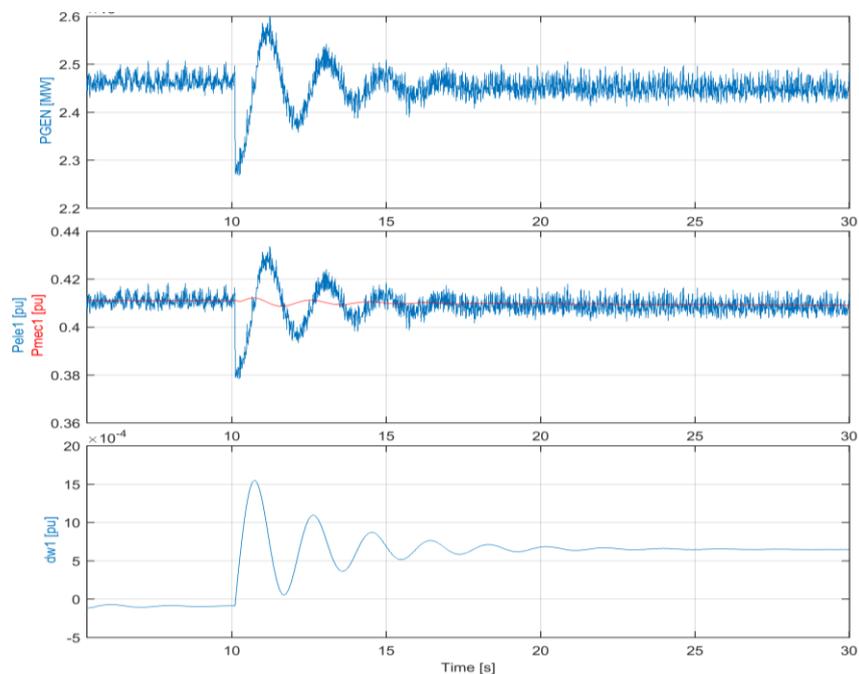


Figura 80 – Perda de 200MW de carga do lado do retificador, FC ligado, Dados da geração

### 6.6.9 Perda extremamente severa de geração (lado retificador), FC ligado

Este caso é dedicado a mostrar que apesar do controle de frequência ter apresentado desempenho excelente para os casos 6.6.6, 6.6.7 e 6.6.8, o mesmo poderá ter uma ação muito limitada em caso de um grande distúrbio que possa provocar uma perturbação extremamente severa no sistema elétrico de potência.

As oscilografias abaixo mostram o desligamento da máquina 5 em  $t=5,1s$  com desempenho excelente do controle de frequência para modular a frequência do sistema entre o intervalo de tempo entre 5,1 e 10,1s. Entretanto com a saída da máquina 6 em  $t=10,1s$ , percebemos que o controle de frequência se encontra perto da saturação da contribuição máxima de potência que a função foi configurada para atuar definido na Tabela 6-3. Permitindo assim que a frequência excursione a grande delta de valores próximos de 57Hz.

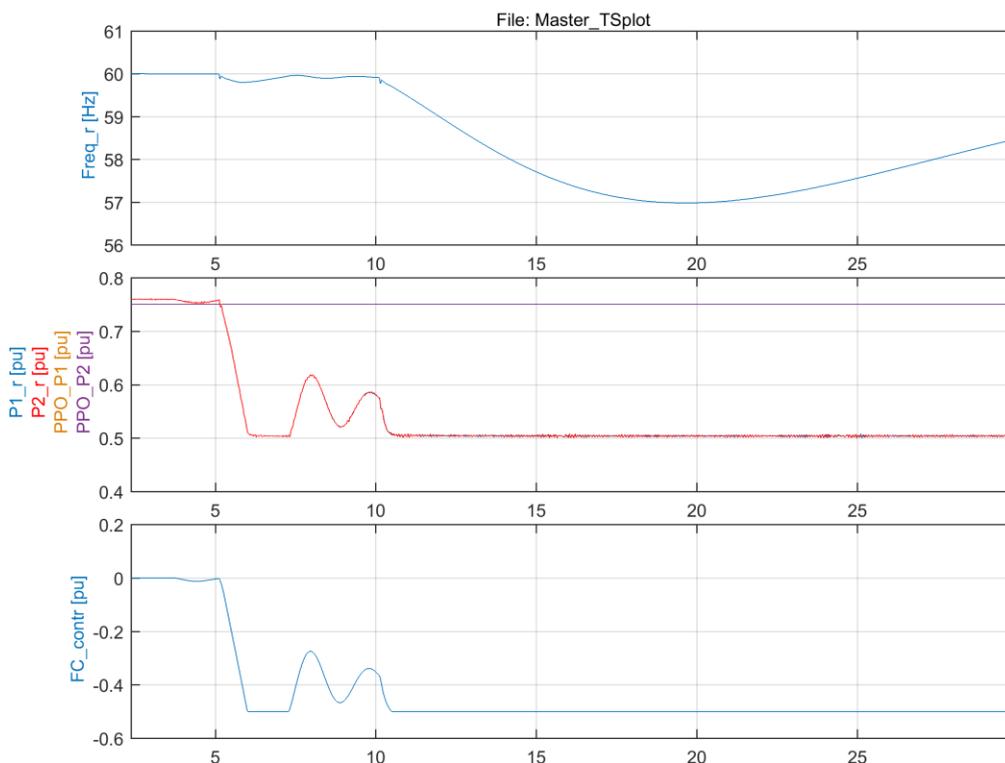


Figura 81 – Perda extr. severa de geração (retificador), FC ligado, Rede e elo CCAT

O gráfico abaixo mostra o comportamento na geração entre os tempos:

- Entre  $t=5,1s$  e  $t=10,1s$ : O sistema CCAT modula a potência de forma a garantir a estabilidade angular e manter a frequência o mais próximo de seu valor nominal;
- Após  $t=10,1s$ : O sistema CCAT tem pouca margem para modulação devido a saturação do controle de frequência então percebemos um aumento da potência das máquinas conectadas ao sistema elétrico.

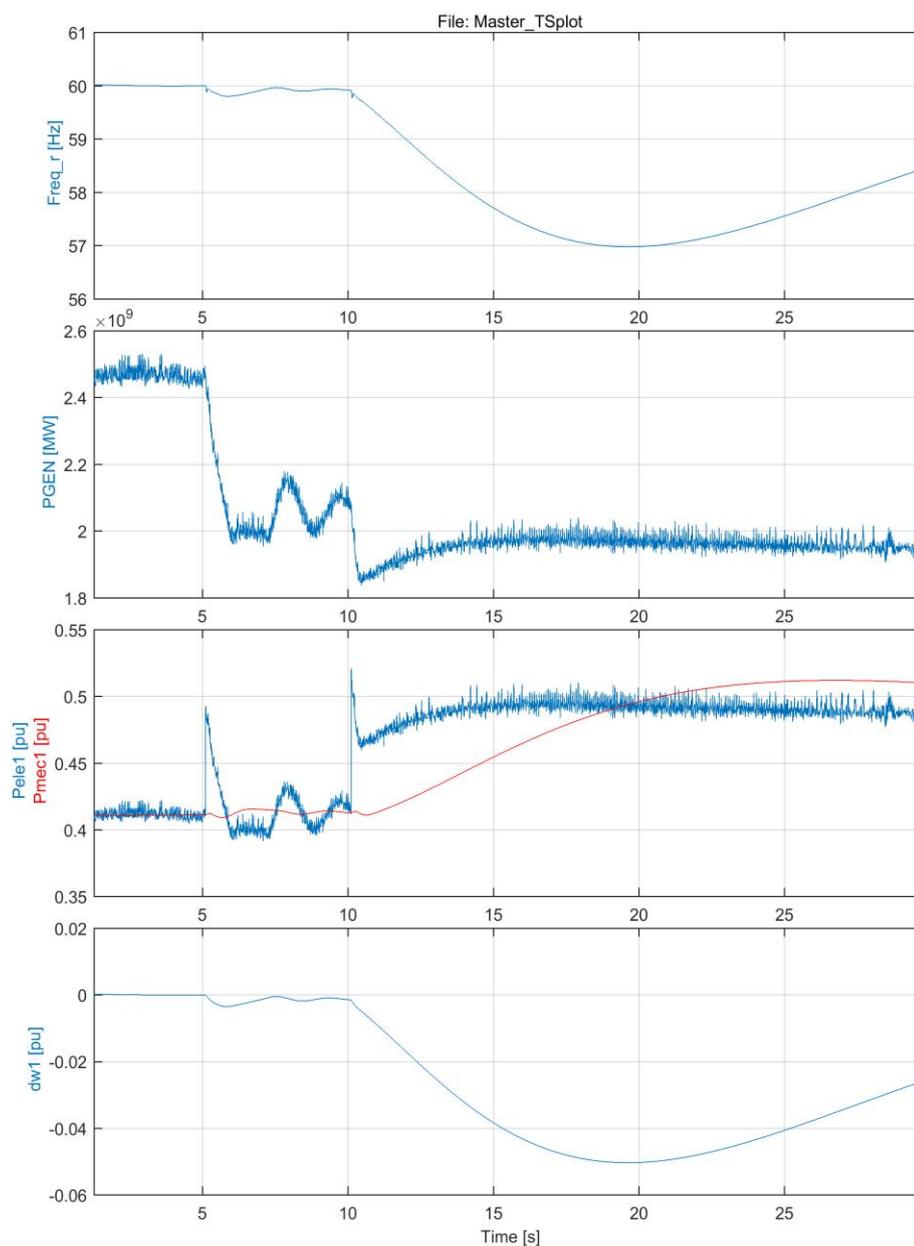


Figura 82 – Perda extr. severa de geração (retificador), FC ligado, Dados da geração

### 6.6.10 Perda extremamente severa de geração (retif.), FC+EPC (droop) ligados

Este caso tem o objetivo de apresentar uma opção de controle de modulação, o EPC droop neste caso, que pode ser utilizado em conjunto com o controle de frequência e possui mais possibilidades de controle e consistência de mais parâmetros relacionados aos estados do sistema possibilitando que este controle seja utilizado em perturbações extremamente severas ou ilhamento de parte do sistema elétrico de potência. Foram simulados 3 casos que apesar de considerarem o mesmo tipo de perturbações no sistema elétrico, possuem ajustes diferentes na função do EPC droop.

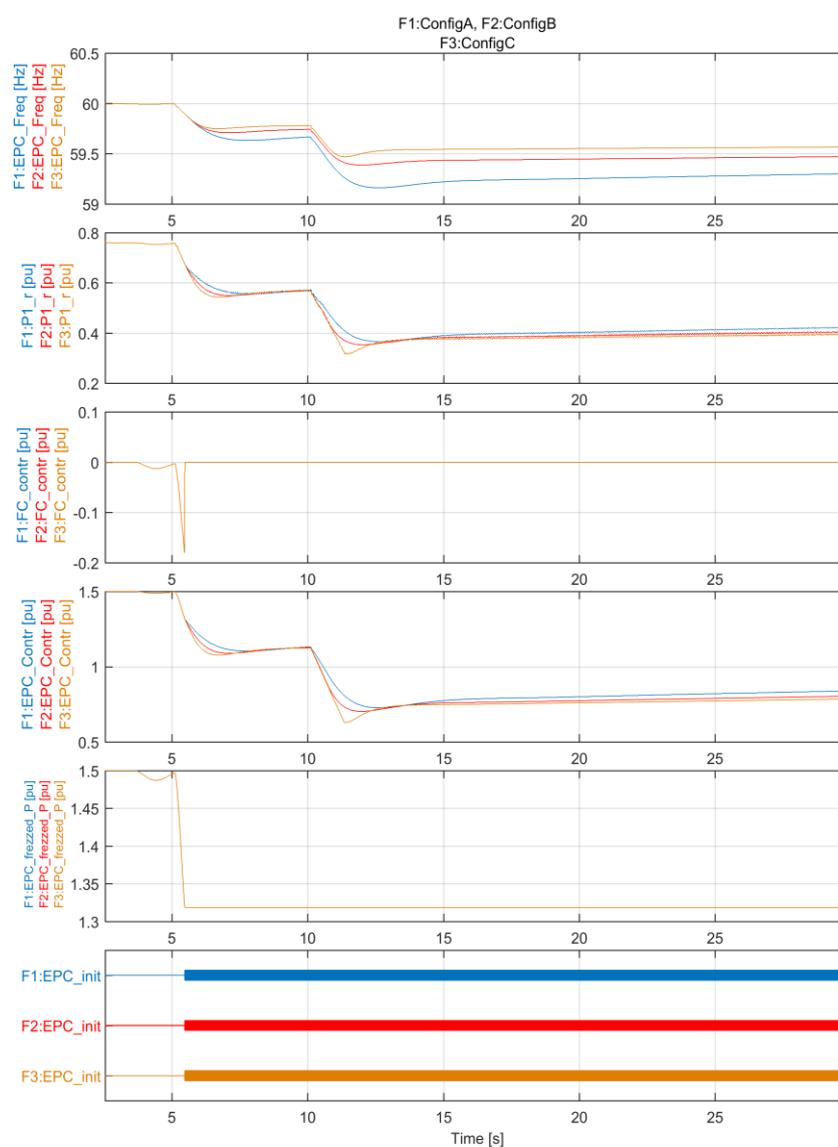


Figura 83 – Perda extr. severa de geração (ret.), FC e EPC droop lig, Rede e elo CCAT

Em  $t=5,49s$  é possível verificar que existe uma coordenação entre a função do controle de frequência e o EPC droop, em outras palavras os gráficos mostram que existe prioridade da ação do EPC droop sobre o controle de frequência, vale salientar uma coordenação poderosa entre o FC e o EPC é que a modulação que o controle de frequência realizou entre  $t=5,1s$  até  $t=5,49s$  é considerada pelo EPC através do congelamento da potência “frozen\_P”.

Conforme verificado em ambos gráficos, o EPC apresenta bom desempenho e consegue modular o sistema nos cenários severo e extremamente severo.

Vale ressaltar que tanto o controle de frequência como o EPC modelado aqui não consideram o monitoramento da frequência no sistema elétrico da área B.

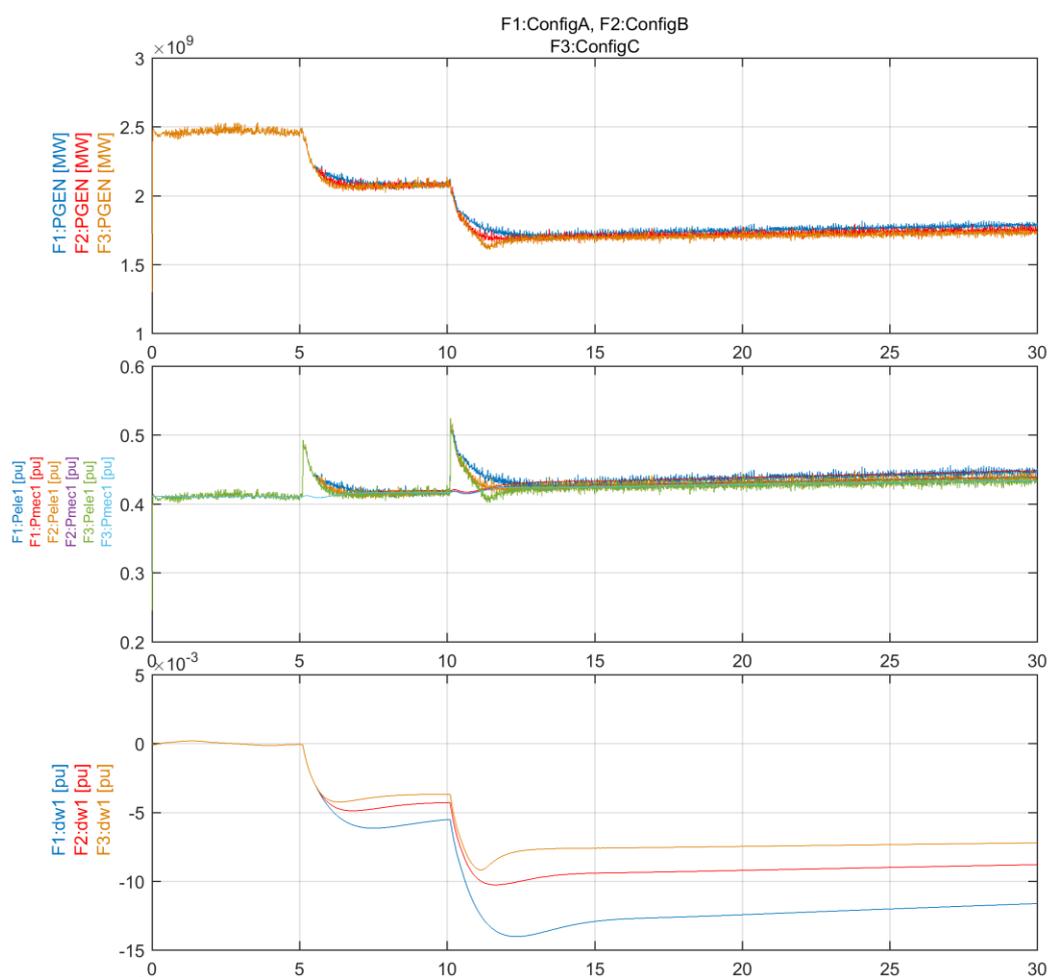


Figura 84 – Perda extr. severa de geração (ret.), FC e EPC droop, Dados da geração

### 6.6.11 Perda extremamente severa de geração (lado retificador), FC+EPC (tradicional) ligados

A função EPC tradicional também pode ser utilizado em conjunto com o controle de frequência e possui mais possibilidades de controle, modularidade, consistência de mais parâmetros ou estados do sistema possibilitando que este controle seja utilizado em perturbações extremamente severas ou ilhamento de parte do sistema elétrico de potência. Foram simulados 2 casos para o mesmo tipo de perturbações no sistema elétrico, possuem ajustes diferentes na função do EPC tradicional.

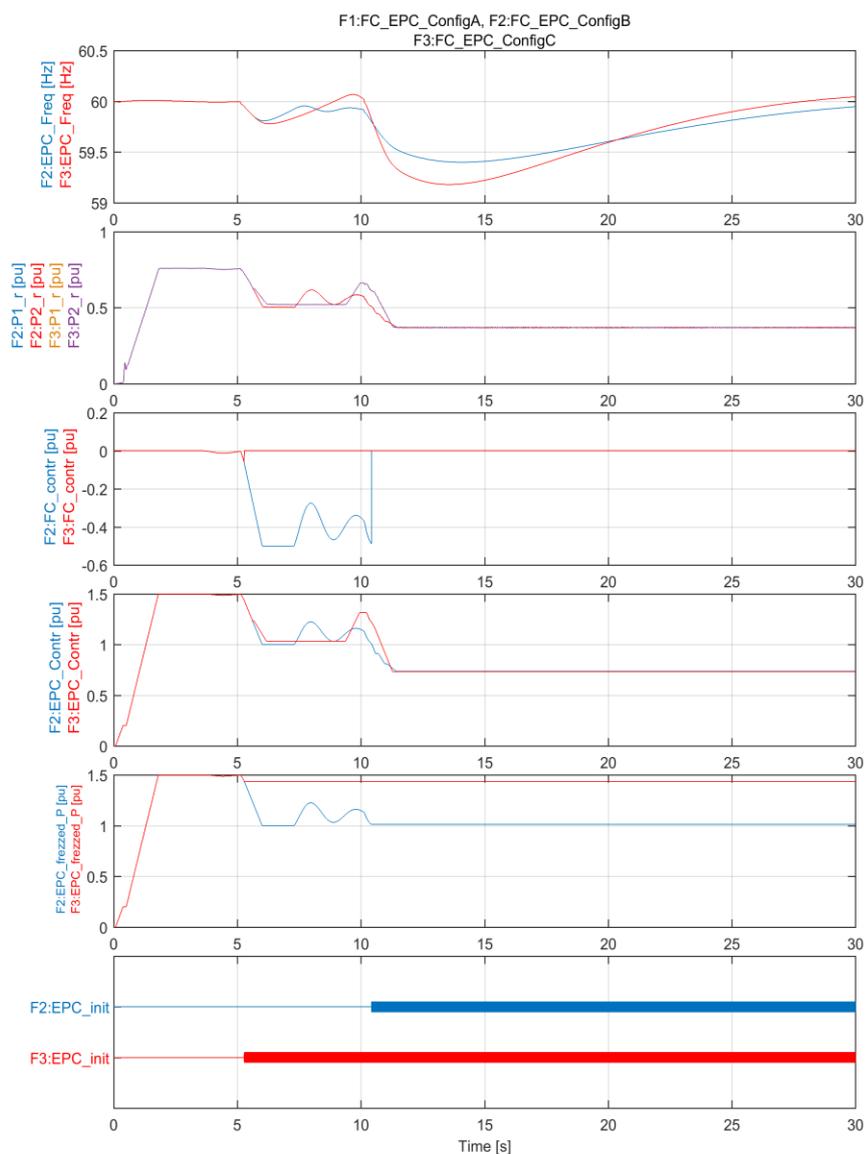


Figura 85 – Perda extr. severa de geração (ret.), FC e EPC tradicional, Rede e elo CCAT

Em  $t=5,49s$  é possível verificar que existe uma coordenação entre a função do controle de frequência e o EPC tradicional, em outras palavras os gráficos mostram que existe prioridade da ação do EPC tradicional sobre o controle de frequência, note que a modulação que o controle de frequência realizou é considerada pelo EPC através do congelamento da potência “frezed\_P”.

Conforme verificado em ambos gráficos, o EPC apresenta bom desempenho e consegue modular o sistema nos cenários severo e extremamente severo.

Vale ressaltar que tanto o controle de frequência como o EPC modelado aqui não consideram o monitoramento da frequência no sistema elétrico da área B

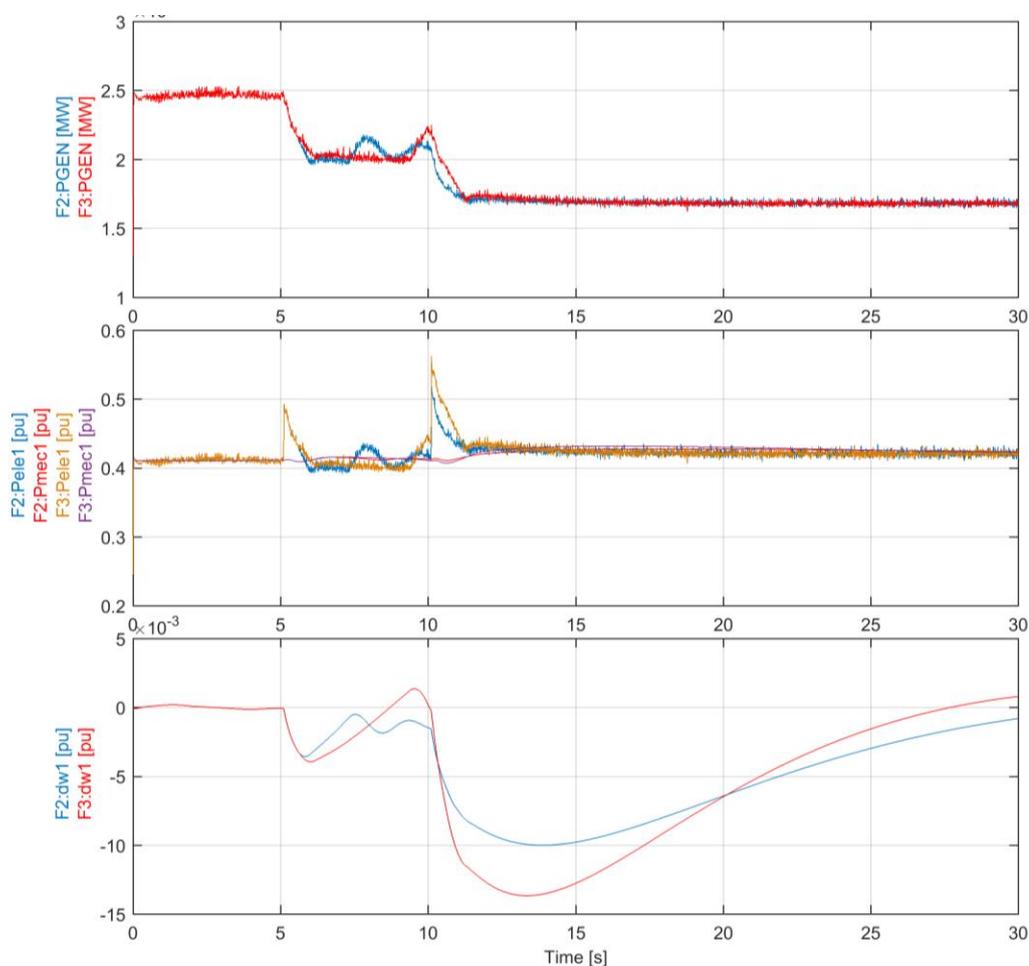


Figura 86 – Perda extr. severa de geração (ret.), FC e EPC tradicional, Dados da geração

Realizando uma simples comparação entre os EPCs droop x EPC tradicional referentes a Figura 87 e a Figura 88, podemos observar que:

- **EPC Droop:**

- Realiza contribuição mantendo o valor de frequência próximo de sua de sua banda morta fazendo com que as máquinas sejam responsáveis por conduzir a frequência de volta ao valor nominal;
- Na simulação realizada apenas 1 módulo do EPC droop foi realizado para estabilizar o sistema, entretanto a função configurada possui 2 módulos caso fosse necessário;
- A cada valor infinitesimal que a máquina contribuía para levar a frequência de volta aos valores nominais, o EPC droop diminuía a parte de sua contribuição até que a frequência fosse restaurada ao seu valor nominal e a potência do elo CCAT retornasse ao seu valor de pré-falta.

- **EPC Tradicional:**

- Realiza contribuição de forma a levar a frequência diretamente ao seu valor nominal exigindo assim pouca ou nenhuma contribuição das máquinas;
- Na simulação realizada foram utilizados 3 módulos do EPC tradicional para estabilizar o sistema, saliento que mais módulos podem ser programados e utilizadas com diferentes faixas de regulação e ganhos;
- A restauração da frequência se dá quase que exclusivamente por ação do elo CCAT, significando que o novo ponto de operação do sistema elétrico de potência consiste em uma nova potência de ordem do elo CCAT, situação bem diferente do caso mencionado para o EPC droop.

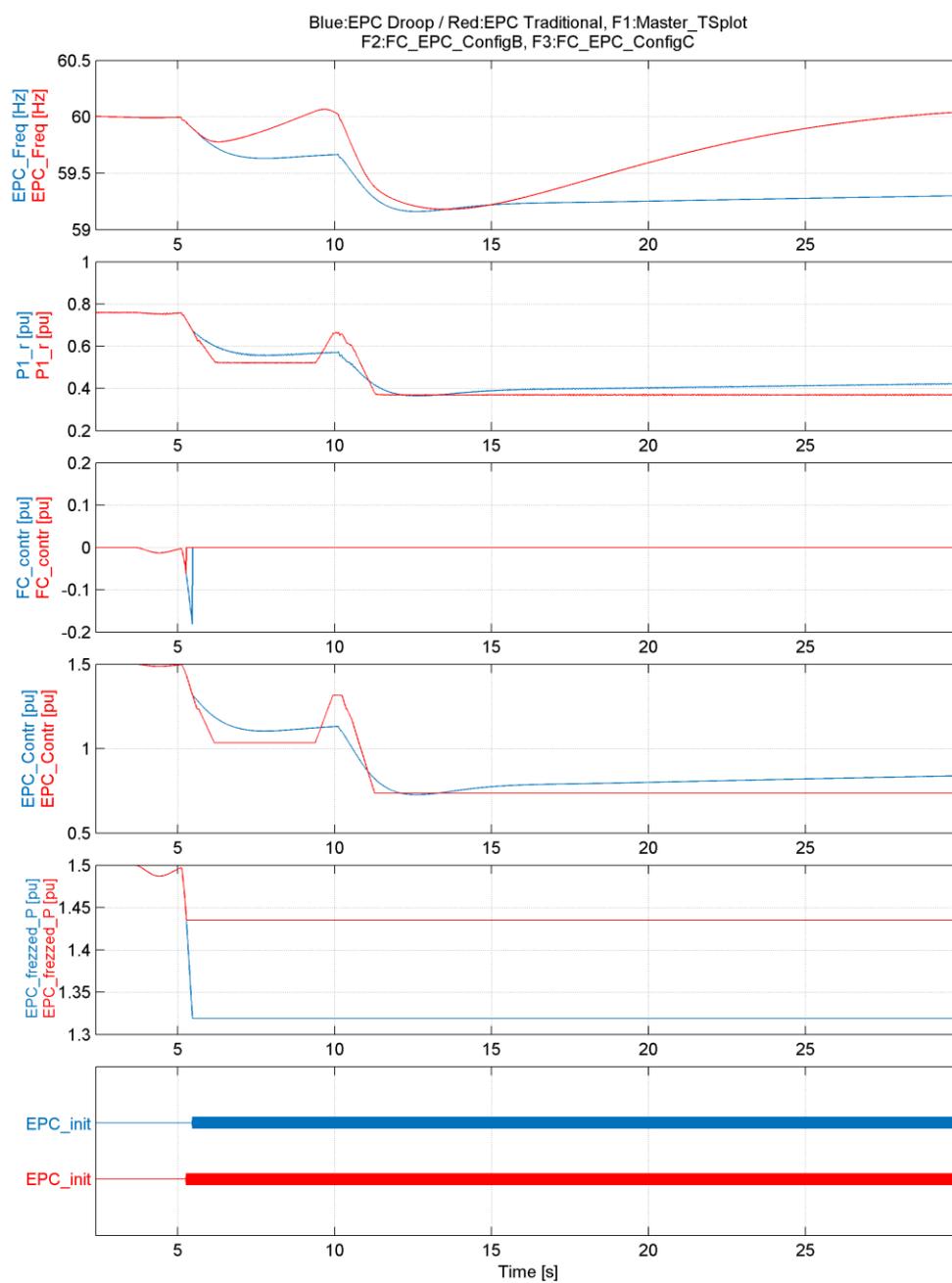


Figura 87 – Perda extr. severa de geração (ret.), Comparação EPC droop x tradicional

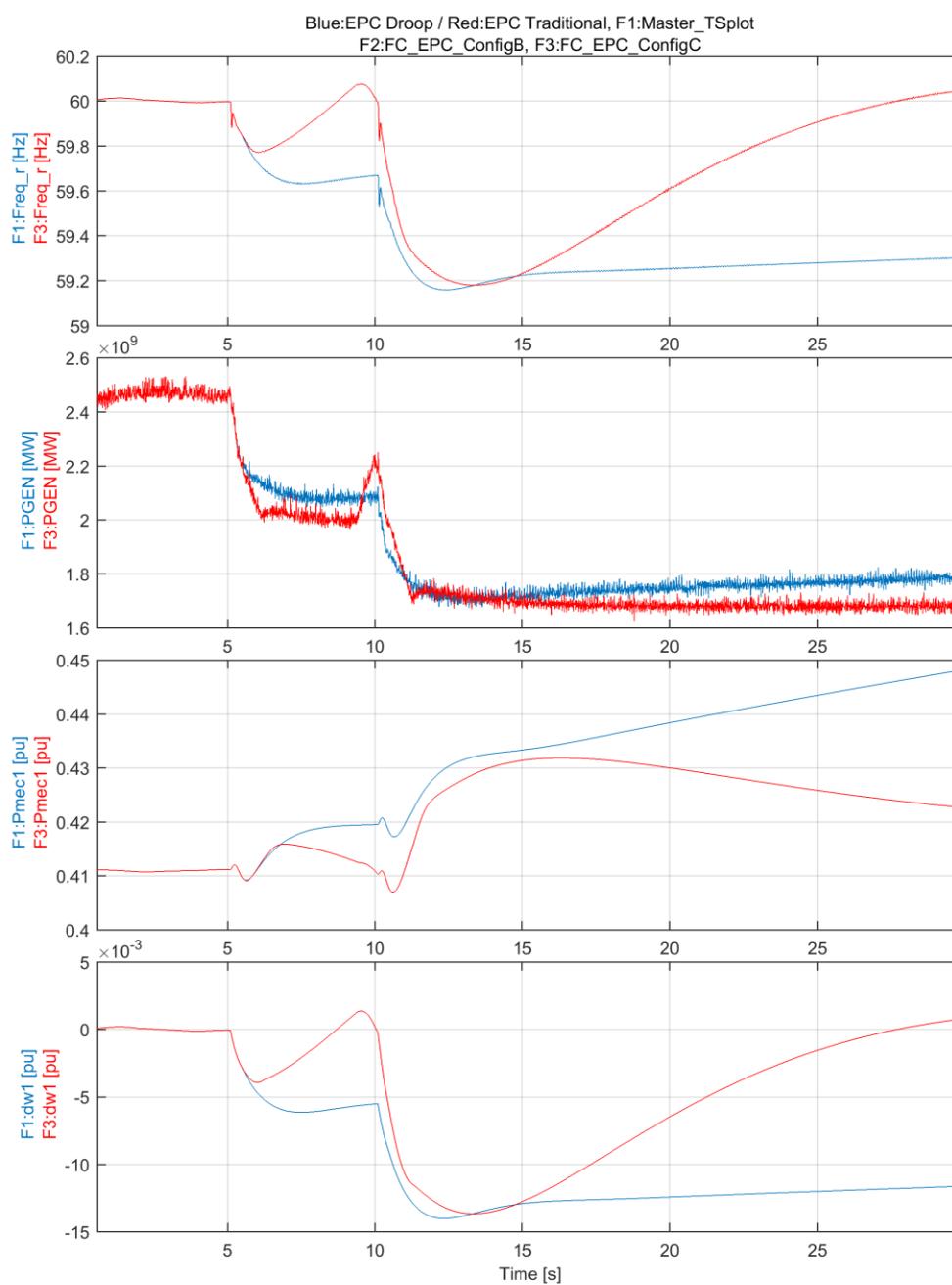


Figura 88 – Perda extr. severa de geração (ret.), Comparação EPC droop x tradicional

## 7 CONCLUSÕES

### 7.1 Considerações finais

É notório que em sistemas elétricos de transmissão cada vez mais complexos, planejadores e operadores necessitam de ferramentas confiáveis para garantir a confiabilidade e estabilidade da rede. Neste trabalho foi possível observar que os controles dos sistemas de transmissão CCAT são ferramentas poderosas tanto em regime permanente pelas diversas possibilidades de controle, bem como na estabilização do sistema após distúrbios dada sua rápida resposta cabendo assim aos engenheiros de sistema de potência definirem ações e configurações que melhor se adapte as necessidades do sistema elétrico de potência.

Neste trabalho foi possível verificar como a controlabilidade do sistema CCAT exige controles robustos e precisos para garantir o correto funcionamento do elo CCAT mesmo durante situações transitórias.

Neste trabalho é possível verificar que o controle de frequência é um recurso poderoso e seu uso pode ser ainda mais potencializado quando sua ação é combinada com uma ação coordenada com o controle emergencial de potência (EPC *droop* ou tradicional).

O controle emergencial de potência utilizado neste trabalho, cito os EPC *droop* e o EPC tradicional, são controles similares aos comumente utilizados no sistema de elétrico de potência dos países nórdicos.

O trabalho aqui apresentado se limitou a investigar a estabilidade em apenas um dos terminais referente a área "A" conectado ao elo CCAT no lado do retificador, significa que a análise aqui apresentada despreza o efeito da ação do controle de frequência e EPCs no terminal oposto a este, neste caso ao terminal inversor. Esta investigação é importante e faz parte da proposta de trabalhos futuros para continuidade dos temas estudados nesta dissertação.

### 7.2 Recomendações para trabalhos futuros

Continuidade do trabalho considerando os seguintes possíveis aspectos:

- Detalhamento dos controles de um elo CCAT do tipo fonte de tensão VSC multinível.

As características desse tipo de elo CCAT implica em estratégias de controle do conversor diferentes das apresentadas neste trabalho, observando que os controles de alto nível desenvolvidos nesta dissertação poderão ser utilizados nesta nova proposta;

- Desenvolver e implementar estudo de controle de rampa dinâmica para o EPC tradicional;
- Explorar casos relacionados a capacidade do elo CCAT em auxiliar a rede em caso de recuperação de tensão;
- Investigação dos terminais adjacente e oposto nos critérios de estabilidade de várias áreas com a aplicação dos controles dos elos CCAT para investigar o sistema de 13 barras do sistema elétrico europeu modelado no sistema DigSilent PowerFactory. Este tópico implica na conversão de linhas CA em linhas CC possibilitando a comparação da rede original com a nova rede com elos CCAT. Esta proposta inclui a investigação em vários cenários de geração com alta e baixa inércia, tendo como objetivo principal analisar a contribuição dos elos CCAT frente a grandes distúrbios no sistema elétrico de potência.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] V. K. Sood (2004), *HVDC and FACTS Controllers, Applications of Static Converters in the Power Systems*, Kluwer Academic Publishers.
- [2] E. W. Kimbark, *Power System Stability*. Wiley & Sons, New York, 1956.
- [3] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, 1994.
- [4] Custódio, Diogo Totti, (2009). *Utilização do Elo de Corrente Contínua para o Amortecimento de Oscilações Eletromecânicas em Sistemas Elétricos de Potência*. 96p. Dissertação (Mestrado) - Unicamp.
- [5] ABB Power Systems (1998). *HVDC – Efficient Power Transmission*. Vasteras, Suécia. A02-0037 NL Rev.3
- [6] J. Graham, G. Biledt e J. Johansson (2004). *Interligações de sistemas elétricos através de elos HVDC*, IX Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica (SEPOPE).
- [7] ABB Power Systems (2010). *HVDC Classic and Light Training*. Ludvika, Suécia. Apresentação de slides.
- [8] J. Arrilaga, Y.H Liu e N. R. Watson, *Flexible Power Transmission – The HVDC Options*, John Wiley & Sons, Ltd, 2007.
- [9] ABB Power Systems (2000). *HVDC Control System – BtB*. Garruchos, Brasil. 1JNL100034-370 (Brazil-Argentina Interconnection II).
- [10] Souza, Julio Borges, (1986). *Uma Contribuição ao Estudo da Influência de Elos CC na Dinâmica de Sistemas CA, Através de Simulação Digital*. 144p. Dissertação (Mestrado) – Unicamp.
- [11] Paulider, Jenny, (2003). *Operation and Control of HVDC links Embedded in AC Systems*. 90p. Thesis (Degree of Licentiate of Engineering) – Chalmers University of Technology, Gotenborg (Sweden)
- [12] MathWorks, Inc, (2010). *Thyristor-Based HVDC Link*. Library of Simulink Dynamic System Simulation for Matlab®.
- [13] ABB Power Systems (2000). *HVDC Protections System – BtB Transmission*, Brasil.

1JNL100034-359 (Brazil-Argentina Interconection II).

[14] <http://www.abb.com/industries/ap/db0003db004333/9716a8ac9879236bc1257-8520-0694f18.aspx> - ABB – Asea Brown Boveri. (2013). North-East Agra (02/2013).

[15] ABB Power Systems (2009). *HVDC Control Functions Back-to-Back*. Porto Velho, Brasil 1JNL100139-226 (Rio Madeira).

[16] ABB Power Systems (2001). *Sequences and Interlocking*. Garruchos, Brasil. 1JNL100041-746 (Brazil-Argentina Interconection II).

[17] M. Eremia, C-C. Liu e A-A. Edris (2016) *Advanced solutions in power systems HVDC, FACTS and Artificial intelligence*, IEEE PRESS WILEY

[18] A. Muthusamy (2010). *Selection of Dynamic Performance Control Parameters for Classic HVDC in PSS/E*. 96p. Master of Science Thesis - Chalmers University of Technology, Gotenborg (Sweden).

[19] ABB Power Systems (1999). *DC Power and Current Control Modes and Features*. Ludvika, Suécia. 1JNL100032-591 Rev. 02 The Three Gorges-Changzhou  $\pm$  500 kV DC.

[20] ABB Power Systems (2012). *HVDC High Level Control*. Ludvika, Suécia. 1JNL000458 Rev.C.

[21] *Performance of high-voltage direct current (HVDC) systems – Part 3: Dynamic conditions*, IEC 60919-3 (First Edition 1999-03).

[22] *Utilizing HVDC to damp power oscillations*, T Smed and G Andersson, *IEEE Transactions on Power Delivery*. Vol. 8, No 2, April 1993.