



CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal  
de Campina Grande

MILENE OLIVEIRA DE SOUSA



Centro de Engenharia  
Elétrica e Informática

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO  
ANÁLISE DE FALTAS EM UM SISTEMA HVDC



Departamento de  
Engenharia Elétrica



Campina Grande  
2016

MILENE OLIVEIRA DE SOUSA

ANÁLISE DE FALTAS EM UM SISTEMA HVDC

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Campina Grande  
como parte dos requisitos necessários para a  
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no  
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Transmissão de Energia

Orientador:

Professor Karcus M. C. Dantas, D. Sc.

Campina Grande  
2016

MILENE OLIVEIRA DE SOUSA

ANÁLISE DE FALTAS EM UM SISTEMA HVDC

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Campina Grande  
como parte dos requisitos necessários para a  
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no  
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Transmissão de Energia

Aprovado em        /        /

**Professor Avaliador**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Avaliador

**Professor Karcius M. C. Dantas, D. Sc.**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho à minha mãe Maria de Lourdes Oliveira de Sousa que tanto me incentiva e apoia, a ela, todo meu carinho e dedicação.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, em primeiro lugar, pela minha vida e pelo dom da perseverança, que me permitiu concluir este trabalho.

Aos meus pais por sempre estarem ao meu lado, buscando sempre o melhor para mim. À minha mãe Maria de Lourdes, por ser um exemplo para mim, meu porto seguro. Ao meu pai José Pequeno por todo apoio e ao meu irmão, Nicácio. Enfim, à toda a minha família que sempre esteve ao meu lado nos momentos bons e ruins e que nunca mediu esforços para que eu chegasse a esta etapa da minha vida.

Agradeço também à minha amiga Yasmim, que sempre esteve ao meu lado durante a graduação, me dando forças nos momentos em que pensei em desistir. À Nayana, minha amiga e conterrânea, também pelo apoio concedido durante o curso. À Aline Tavares, por toda amizade e apoio. De forma geral, agradeço aos demais colegas de curso que de forma direta e indiretamente contribuíram com a minha formação. A João Pedro, que esteve do meu lado durante os 6 anos de curso, por todo apoio e amizade.

Agradeço a todos os professores do curso, que me fizeram compreender o real valor do conhecimento, não só para a realização profissional como para a vida. Em especial ao meu orientador Karcus Dantas pelo conhecimento transmitido, paciência, dedicação e contribuição não apenas para a elaboração deste trabalho como também por ter despertado em mim o interesse pela pesquisa.

Agradeço a Guilherme Sarcinelli Luz, da Divisão de Estudos Elétricos da Operação da FURNAS, por todo apoio prestado.

Ao coordenador do curso, Damásio, por todas as vezes que me recebeu em sua sala e de forma indireta tentou me ajudar. A todos que compõe o departamento de engenharia elétrica, em especial, Adail e Tchaikowisk .

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma, passaram pela minha vida e contribuíram para a construção de quem sou hoje.

*“Ninguém baterá tão forte quanto à vida. Mas isso não se trata de quão forte se pode bater. Se trata de quão forte pode ser atingido e continuar seguindo em frente... O quanto você pode apanhar e continuar seguindo em frente. É assim que a vitória é conquistada. ”*  
*Rocky Balboa (retirado do filme Rocky Balboa) (2006)*

## RESUMO

A crescente demanda de energia elétrica e a distância das grandes unidades geradoras dos centros de consumo tem oferecido desafios para a área de transmissão de energia. Diante disso, a transmissão HVDC tem ganho destaque nas últimas décadas por se tornar atrativa quando se trata do transporte de energia a longas distâncias. Esse tipo de transmissão oferece desafios importantes para pesquisas e estudos de desempenho. Uma ferramenta de grande importância no auxílio de estudos a respeito dessa tecnologia é o modelo de referência criado pelo CIGRÉ, que possibilitou a implementação desse sistema para a análise das condições operativas no domínio do tempo e em tempo real, a partir de softwares tais como ATP, PSCAD, MATLAB/SIMULINK, entre outros. Este trabalho apresenta um estudo dos principais componentes de um sistema HVDC monopolar e de suas características estáticas, para que seja possível observar seu comportamento e a atuação do controle diante da aplicação de faltas nos barramentos AC das pontes conversoras. Dentre os tipos de controle abordados na literatura, pode-se destacar ao longo do trabalho, o CCC (*Constant Current Control*), CIA (*Constant Ingnition Angle*), CEA (*Constant Extinction Angle*) e o VDCOL (*Voltage Dependent Current Order Limit*). O software ATPDraw foi utilizado para modelar o sistema *Benchmark* HVDC do CIGRÉ e realizar as simulações de faltas para posterior análise da atuação dos controles das pontes retificadora e inversora assim como o tempo de resposta desses sistemas.

**Palavras-chave:** ATPDraw, CCC, CIA, CEA, Controle, Faltas, HVDC, Pontes Conversoras, Transmissão, VDCOL.

## ABSTRACT

The growing demand for electricity and the distance of large generating units of consumer centers have offered challenges for power transmission area. Therefore, the HVDC transmission has great importance in the last decades by becoming attractive when its comes to the power transmission over long distances. This type of transmission provides important challenges for research and performance studies and a very important tool in support of studies for this technology is the reference model created by CIGRÉ, which enabled the implementation of this system for the analysis of operating conditions in the field time in real time from softwares such as ATP, PSCAD, MATLAB/SIMULINK, among other. A study of the major components of a monopolar HVDC system and its static characteristics, so that it was possible to observe their behavior and control activities on the application of fault in AC buses of converters bridges. Among the types of control discussed in the literature, can be highlighted throughout the work, the CCC (Constant Current Control), CIA (Constant Ignition Angle), CEA (Constant Extinction Angle) and VDCOL (Voltage Dependent Current Order Limit). The ATPDraw software was used to model the Benchmark CIGRE HVDC system and perform fault simulation for further analysis of the performance of the controls of the rectifier and inverter bridges as well as the response time of these systems.

**Keywords:** ATPDraw, CCC, CIA, CEA, Converter Bridges, Control, Fault, HVDC, Transmission, VDCOL.

# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Sistema de transmissão de energia elétrica em corrente alternada .....	6
Figura 2 – Sistema de transmissão de energia elétrica em corrente contínua .....	7
Figura 3 – Torres de transmissão DC e AC .....	8
Figura 4 – Link HVDC Monopolar .....	10
Figura 5 – Link HVDC Bipolar .....	10
Figura 6 – Link HVDC Homopolar .....	10
Figura 7 - Ponte conversora de seis pulsos .....	13
Figura 8 – Forma de onda da tensão na saída do retificador em função de $\alpha$ .....	13
Figura 9 – Processo de comutação: (a) circuito equivalente; (b) formas de onda no retificador e inversor; (c) formas de onda da corrente. ....	14
Figura 10 – Forma de onda da tensão no inversor .....	18
Figura 11 - Ponte conversora de 12 pulsos conectada em série .....	20
Figura 12 - Ponte conversora de 12 pulsos conectada em paralelo .....	20
Figura 13 – Formas de onda do conversor de 12 pulsos conectado em série .....	21
Figura 14 - Potência de saída do elo HVDC quando há uma falta AC no inversor .....	22
Figura 15 – Link Monopolar .....	25
Figura 16 – Circuito Equivalente do Link HVDC Monopolar .....	25
Figura 17 – Perfil de Tensão do Link HVDC .....	26
Figura 18 -Característica $V_{dcl} I_d$ para um ponto nos terminais do retificador. ....	30
Figura 19 – Variação da corrente $I_d$ em função da tensão AC do sistema conectado ao inversor. ....	30
Figura 20 – Diagrama de blocos do controle do retificador .....	31
Figura 21 – Característica do sistema de controle com o retificador possuindo CCC e CIA – característica real. ....	32
Figura 22 – Representação equivalente da característica do sistema de controle com o retificador possuindo CCC e CIA .....	32
Figura 23 – Análise operacional para grandes reduções da tensão no retificador e/ou elevações de tensão no inversor. ....	33
Figura 24 – Retificador dotado de CIA e CCC, e inversor dotado de CEA e CCC .....	34
Figura 25 – Diagrama de blocos do controle do inversor. ....	35
Figura 26 – Função do VDCOL .....	36
Figura 27: Diagrama de Blocos VDCOL .....	37
Figura 28 - Diagrama Unifilar do Sistema HVDC Benchmark do CIGRÉ .....	44
Figura 29 – Sistema modelado no ATPDraw .....	46
Figura 30 – Controle das pontes conversoras .....	49
Figura 31 – Corrente DC medida no retificador .....	51
Figura 32 – Corrente DC medida no inversor .....	51
Figura 33 –Tensão DC medida no retificador .....	51
Figura 34 – Tensão DC medida no inversor .....	51
Figura 35 – Ângulo de disparo do retificador .....	52
Figura 36 – Ângulo de disparo do inversor .....	52
Figura 37 – Ângulo de extinção do inversor .....	53
Figura 38 – Tensão AC na fase A do retificador .....	53
Figura 39 – Tensão AC na fase A do inversor .....	53
Figura 40 – Tensão AC na fase A do lado inversor durante falta monofásica para o terra .....	54
Figura 41 – Tensão DC no inversor durante falta monofásica para o terra no lado AC do inversor .....	54
Figura 42 – Ângulo de extinção do inversor durante falta monofásica para o terra no lado AC do inversor. ....	54
Figura 43 – Colapso de tensão DC durante falta monofásica no lado AC do inversor .....	55
Figura 44 – Corrente DC no inversor durante falta monofásica para o terra no lado AC do inversor .....	55
Figura 45 – Corrente DC no retificador durante uma falta monofásica para o terra no lado AC do inversor. ....	55
Figura 46 – Corrente de ordem durante a atuação do VDCOL. ....	56

Figura 47 – Ângulo de ordem do retificador durante falta monofásica para o terra no lado AC do inversor .....	56
Figura 48 – Corrente DC no retificador durante a falta monofásica no lado AC do inversor, considerando um ajuste nos ganhos do controle do retificador. ....	57
Figura 49 – Tensão DC no retificador durante falta monofásica no lado AC do inversor, considerando um ajuste nos ganhos do controle do retificador. ....	57
Figura 50 – Tensão AC na fase A do retificador para falta monofásica para o terra no lado AC do retificador. ....	58
Figura 51 – Tensão DC no retificador durante falta monofásica para o terra no lado AC do retificador. ...	58
Figura 52 – Tensão DC no inversor durante falta monofásica no lado AC do retificador.....	58
Figura 53 – Corrente DC no inversor durante falta monofásica para o terra no lado AC do retificador. ....	59
Figura 54 – Corrente DC no inversor durante falta monofásica no lado AC do retificador. ....	59
Figura 55 – Ângulo de disparo do retificador durante a falta monofásica aplicada no lado AC do retificador. ....	59
Figura 56 – Ângulo de extinção do inversor durante a falta monofásica aplicada no lado AC do retificador. ....	60
Figura 57 – Ângulo de disparo do inversor durante a falta monofásica aplicada no lado AC do retificador. ....	60
Figura 58 – Tensão AC nas fases do retificador durante falta monofásica no lado AC do retificador. ....	61
Figura 59 – Tensão AC na fase A do inversor durante a falta monofásica remota no lado AC no inversor. ....	61
Figura 60 – Tensão DC no inversor durante falta monofásica remota no lado AC do inversor. ....	61
Figura 61 – Corrente DC no inversor durante falta monofásica remota no lado AC do inversor .....	62
Figura 62 – Corrente DC no retificador durante falta monofásica remota no lado AC do inversor. ....	62
Figura 63 – Corrente de ordem do sistema durante falta monofásica remota no lado AC do inversor .....	63
Figura 64 – Ângulo de ordem do retificador durante falta monofásica remota no lado AC do inversor ....	63
Figura 65 – Ângulo de ordem do inversor durante falta monofásica remota no lado AC do inversor .....	63
Figura 66 – Tensão AC na fase A do inversor durante falta trifásica no lado AC do inversor.....	64
Figura 67 – Tensão DC no inversor durante falta trifásica no lado AC do inversor.....	64
Figura 68 – Corrente DC no inversor durante falta trifásica no lado AC do inversor. ....	64
Figura 69 – Ângulo disparo do retificador durante uma falta trifásica no lado AC do inversor.....	65
Figura 70 – Tensão AC nas fases do retificador durante falta trifásica no lado AC do inversor.....	65
Figura 71 – Tensão DC no retificador durante falta trifásica no lado AC do inversor .....	66
Figura 72 – Correntes DC no retificador e no inversor durante uma falta trifásica no lado AC do inversor. ....	66
Figura 73 – Tensão no elo DC durante falta trifásica no lado AC do inversor.....	66
Figura 74 – Corrente de ordem no inversor durante falta trifásica no lado AC do inversor. ....	67
Figura 75 – Tensão AC na fase A do retificador durante falta trifásica no lado AC do retificador.....	67
Figura 76 – Tensão DC no retificador durante falta trifásica no lado AC do retificador.....	67
Figura 77 – Tensão DC no inversor durante falta trifásica no lado AC do retificador. ....	68
Figura 78 – Corrente DC no retificador durante falta trifásica no lado AC do retificador. ....	68
Figura 79 – Corrente DC no inversor durante falta trifásica no lado AC do retificador.....	68
Figura 80– Ângulo de disparo do retificador durante falta trifásica no lado AC do retificador. ....	69
Figura 81 – Ângulo de extinção do inversor durante falta trifásica no lado AC do retificador. ....	69
Figura 82 –Configuração da ponte retificadora de 12 pulsos no ATPDraw .....	75
Figura 83 –Configuração da ponte inversora de 12 pulsos no ATPDraw .....	75
Figura 84 – Configuração do filtro passa alta no ATPDraw .....	76
Figura 85 – Configuração do filtro passa baixa no ATPDraw.....	76
Figura 86 – Configuração o filtro passa alta no ATPDraw .....	77
Figura 87 – Configuração do filtro passa baixa no ATPDraw.....	77
Figura 88 – Configuração do reator de alisamento do lado retificador no ATPDraw .....	78
Figura 89 – Configuração do ATPDraw do reator de alisamento no lado inversor.....	78
Figura 90 – Configuração no ATPDraw do controle do retificador .....	79
Figura 91 – Configuração no ATPDraw do controle do inversor.....	79
Figura 92 – Diagrama de blocos do PSCAD para o controle do retificador.....	80
Figura 93 – Diagrama de blocos no PSCAD para o controle do inversor .....	80

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados do Modelo de Referência HVDC CIGRÉ.....	62
--	----

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	Corrente Alternada (Alternating Current)
ATP	Alternative Transiente Program
CIGRÉ	International Council on Large Electric Systems
CCC	Controle de Corrente Constante (Constant Current Control)
CCC <sub>r</sub>	Controle de Corrente Constante do retificador
CCC <sub>i</sub>	Controle de Corrente Constante do inversor
CIA <sub>r</sub>	Controle de Ângulo de Disparo do retificador
CIA <sub>i</sub>	Controle de Ângulo de Disparo do inversor
CEA	Controle e Ângulo de Extinção
DC	Corrente Contínua (Direct Current)
HVDC	Transmissão de Alta Tensão em Corrente Contínua
HVAC	Transmissão de Alta Tensão em Corrente Alternada
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
LCC	Conversor por Linha Comutada
PSCAD	Power Systems Computer Aided Design
PLL	Phase-Locked Loop
PI	Proporcional - Integral
SEPOPE	Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão
SCR	Relação de Curto-Circuito ( <i>Short Circuit Ratio</i> )
THD	Taxa de Distorção Harmônica
VDCOL	Limitador de Corrente Dependente de Tensão
VSC	Conversor por Fonte de Tensão

## LISTA DE SÍMBOLOS

$I_d$	Corrente de regime permanente DC
$I_{ordem}$	Corrente de ordem
$I_{medida}$	Corrente medida
$I_m$	Corrente de margem
$I_c$	Corrente de comutação
$L_c$	Indutância de comutação
$R_l$	Resistência da linha
$R_{ci}$	Resistencia interna do inversor
$R_{cr}$	Resistência interna do retificador
$T_c$	Constante de tempo para o VDCOL
$T_d$	Constante de tempo para o VDCOL
$V_d$	Tensão DC
$v_a$	Tensão na fase a
$v_b$	Tensão na fase b
$v_c$	Tensão na fase c
$V_{dr}$	Tensão contínua no retificador
$V_{di}$	Tensão contínua no inversor
$V_{dor}$	Tensão contínua interna no retificador
$V_{doi}$	Tensão contínua interna no inversor
$V_{queda}$	Queda de tensão
$X_{Lc}$	Reatância de dispersão
$\alpha$	Ângulo de disparo do retificador
$\alpha_{min}$	Ângulo mínimo de disparo
$\gamma$	Ângulo de extinção do inversor

$\gamma_{min}$	Ângulo mínimo de extinção
$\beta$	Ângulo de avanço
$\mu$	Ângulo de comutação
$\omega$	Frequência angular
$\theta_0$	Margem de bloqueio do tiristor

# SUMÁRIO

1	Introdução .....	1
1.1	Breve Histórico da Transmissão HVDC.....	3
1.2	Objetivos.....	4
1.3	Estrutura do Trabalho .....	5
2	Aspectos Gerais da Transmissão HVDC .....	6
2.1	Classificação dos Elos HVDC .....	9
2.2	Tecnologias de Transmissão HVDC.....	11
2.2.1	Transmissão HVDC-VSC .....	11
2.2.2	Transmissão HVDC-LCC .....	12
2.2.2.1	Conversor por Fonte de Corrente (CSC) .....	12
2.3	Ponte Conversora de 12 Pulsos.....	19
2.4	Falhas de Comutação .....	21
2.5	Filtros de Harmônicos em Sistemas de Transmissão HVDC .....	23
2.5.1	Filtros no Lado AC.....	24
2.5.2	Filtros no Lado DC.....	24
3	Controle de Sistemas HVDC .....	25
3.1	Objetivos da Aplicação de um Sistema de Controle em Elos HVDC .....	27
3.2	Característica Estática $V_d \times I_d$ .....	29
3.3	Característica Estática Modificada .....	35
3.3.1	Limitador da Corrente de Ordem Dependente da Tensão.....	35
3.3.2	$\alpha$ Mínimo do Inversor .....	37
3.3.3	Controle de Tensão.....	37
3.4	Aspectos Significativos dos Princípios Básicos de Controle.....	38
3.5	Resposta dos Sistemas AC/DC Quanto à Ocorrência de Falhas .....	39
3.5.1	Falhas na Linha DC.....	39
3.5.2	Falha nos Conversores .....	40
3.5.3	Falhas no Sistema AC .....	40
3.5.4	Recuperação de Falhas do Sistema AC.....	42
4	Modelo de Referência do Cigré e Simulações Realizadas .....	43
4.1	Sistema HVDC Modelado no ATPDraw .....	46
4.2	Simulações Realizadas.....	50
4.2.1	Sistema Operando Normalmente .....	50

4.2.2 Falta Monofásica no Lado AC Inversor .....	53
4.2.3 Falta Monofásica no Lado AC do Retificador .....	57
4.2.4 Queda de Tensão Monofásica no Lado AC do Inversor .....	61
4.2.5 Falta Trifásica no Lado AC do Inversor.....	64
4.2.6 Falta Trifásica no Lado AC do Retificador .....	67
5 Conclusão.....	70
Referências .....	73
ANEXO A – Configuração dos Parâmetros do Modelo HVDC no ATPDraw.....	75

# 1 INTRODUÇÃO

As unidades geradoras de energia elétrica construídas distantes dos grandes centros de consumo exigem soluções que permitam a transmissão de grandes blocos de energia elétrica em longas distâncias com o menor custo possível. Dentro desse contexto, apesar da transmissão HVAC ser a mais utilizada no mundo todo, a transmissão HVDC – *High Voltage Direct Current* - tem ganho espaço nas últimas décadas, destacando-se principalmente por apresentar fortes atrativos econômicos, técnicos e ambientais. Para transmissão em longas distâncias, por exemplo, acima de 1000 km a tecnologia HVDC mostra-se mais eficiente e competitiva quando comparada a transmissão de alta tensão em corrente alternada.

Segundo SÉTREUS & BERTLING (2008), uma grande limitação do uso de linhas de transmissão HVAC, é que a transmissão de energia elétrica em longas distâncias tem uma indutância de linha significativa. Desta forma, a transferência de potência em linhas de transmissão AC é limitada por sua reatância. Ao passo que linhas HVDC podem ser carregadas até o seu limite máximo de temperatura. Logo, se tratando de grandes distâncias, a transmissão de corrente contínua deve ser sempre considerada. Os efeitos causados por essa indutância devem ser compensados ao longo dessa linha de transmissão e isso aumenta os custos para linhas de longas distâncias. É sabido que para sistemas de corrente contínua a frequência é zero, o que torna a indutância da linha desprezível (SÉTREUS & BERTLING, 2008).

Os equipamentos utilizados para converter a energia de corrente alternada em energia de corrente contínua possuem um custo elevado quando comparados aos equipamentos fabricados para redes de transmissão de alta tensão em corrente alternada. Mas, o que importa em geral é que, em longas distâncias, o custo total de um sistema de transmissão em corrente contínua pode ser mais baixo que o de corrente alternada. Outro fator importante a ser considerado na transmissão HVDC está relacionado às perdas que esse sistema apresenta quando comparado a sistemas HVAC. Sistemas de transmissão em corrente contínua também permitem interligar pontos com frequências distintas ou não sincronizadas, a exemplo do sistema que interliga o Brasil e a Argentina, viabilizando a importação e exportação de energia entre esses dois países onde as frequências são 60 Hz

e 50 Hz respectivamente. As estações conversoras dos sistemas HVDC são constituídas por pontes conversoras associadas a transformadores, reatores de alisamento, filtros, bancos de capacitores, além de sistemas de controle e proteção das pontes retificadora e inversora, respectivamente.

Os sistemas HVDC podem ser representados a partir de diferentes configurações e tecnologias de transmissão. As três principais configurações são: monopolar, bipolar e homopolar e as tecnologias de transmissão podem ser HVDC-VSC ou HVDC-LCC. Este trabalho tratará apenas da configuração monopolar com tecnologia LCC por ser a mais utilizada na transmissão de potência em corrente contínua atualmente.

Tendo em vista a importância desse tipo de transmissão, torna-se necessário constantes avaliações das diversas condições a que os sistemas HVDC possam ser submetidos, tais como a análise das condições transitórias, dinâmicas e de regime permanente quando ocorrem distúrbios no sistema. Para realizar uma análise detalhada dos sistemas HVDC se faz necessário um estudo a respeito das suas principais características e de como se dá o controle do mesmo frente a ocorrência de falhas em determinados pontos do sistema.

O controle de um sistema de transmissão HVDC é responsável por definir as condições de operação do elo e também por eliminar faltas nos próprios conversores, de forma a garantir a estabilidade e o bom desempenho deste tipo de transmissão. O objetivo principal do controle é determinar os instantes exatos para os disparos dos tiristores das pontes retificadora e inversora que compõem o sistema e é o estudo das características estáticas de tensão e corrente DC que permitem compreender a atuação do controle do elo HVDC. O comportamento dessas características é analisado quando ocorrem variações no ângulo de disparo das pontes conversoras e é representado por retas paralelas entre si.

Para facilitar os estudos das condições operacionais dos sistemas de transmissão HVDC, membros do CIGRÉ desenvolveram e apresentaram um sistema de referência para estudos de sistemas de transmissão HVDC que torna possível a comparação e análise de resultados e métodos de simulação diferentes (SZECHTMAN, M. et. al. 1991).

Esse sistema é constituído por um arranjo monopolar de 500 kV e 1000 MW, em que as estações conversoras são conectadas a sistemas AC relativamente frágeis. Portanto, compreender o sistema HVDC *Benchmark* do CIGRÉ é um passo importante para possibilitar o entendimento de sistemas HVDC e a sua implementação em softwares de simulação, tais como, ATP, MATLAB/SIMULINK, PSCAD, etc., buscando cada vez

mais, respostas a respeito das condições operativas desses sistemas com maior realismo. Portanto, baseado nesse modelo de referência, o sistema modelado no software ATPDraw é capaz de possibilitar a análise de como o controle do sistema atua diante da aplicação de faltas monofásicas e trifásicas nos barramentos AC das pontes conversoras.

## 1.1 BREVE HISTÓRICO DA TRANSMISSÃO HVDC

Os primeiros sistemas de transmissão de energia elétrica foram desenvolvidos em corrente contínua. Os consequentes níveis de perda e os baixos níveis de tensão, obrigavam que a geração estivesse próxima aos centros de consumo. Além disso, a dificuldade e os custos para elevar o nível de tensão DC contribuíram negativamente para a ascensão dessa tecnologia. Desta forma, o sistema de transmissão AC tornou-se dominante na indústria da energia elétrica.

O ano de 1897 marcou o início da transmissão em corrente contínua, quando o cientista Thomas Edison implementou o suprimento e consumo de eletricidade em uma rede de baixa tensão DC. (KIM, 2009).

Em 1901, a dificuldade na conversão de níveis de tensão DC começou a ser superada com a apresentação do retificador a vapor de mercúrio de Hewitt. Essa válvula, possibilitou, teoricamente, a transmissão de potência DC em altas tensões e através de longas distâncias. Naquele momento, nascia a tecnologia HVDC. (DICKSON, 2015)

Em 1954, o primeiro sistema comercial HVDC entrou em operação. Baseado em um conversor a arco de mercúrio, este sistema interligou a ilha de Gotland à costa da Suécia através de cabos submarinos. Esta mesma tecnologia foi também adotada nos sistemas HVDC de Sardenha, em 1967, em 1970 na linha de transmissão de longa distância *Pacific Intertie* -EUA e no sistema de transmissão Nelson River – Canadá, 1973.

O primeiro sistema HVDC *back-to-back* assíncrono foi inaugurado em 1972 em El River, e marcou a introdução da tecnologia das válvulas de tiristores que veio substituir as antigas válvulas de arco de mercúrio. Entre os anos de 1970 e 2000, a tecnologia passou a ser dominada pelos conversores comutados em linha que se utilizam de válvulas de tiristores. (OLIVEIRA, 2015).

No Brasil, a transmissão de energia em corrente contínua teve seu início marcado no ano de 1979, em Itaipu. A primeira linha HVDC construída no país era considerada a maior em termos de potência e comprimento até então implementada. O projeto foi

colocado em operação em vários estágios entre 1984 e 1987. O grau de complexidade técnica do sistema de transmissão em HVDC de Itaipu representou um desafio considerável e pode ser considerado como o início da era moderna destes sistemas. (FERNANDES, 2005)

O uso de sistemas HVDC tem apresentado um crescimento significativo, segundo OLIVEIRA (2015, p. 18) no ano de 2012, haviam 228 projetos em operação ou construção ao redor do mundo, correspondendo a uma capacidade total de transmissão de 317.717 MW. Para se ter uma ideia do crescimento do uso dessa tecnologia, em 2005, a lista apresentada em (RASHID, 2011) continha um total de 95 projetos em operação, correspondendo a uma capacidade de transmissão de 70.000 MW. Isso representa um avanço percentual de 335%, em termos de potência instalada, se comparado com a potência estimada em operação no ano de 2014, que era de 234.343 MW. Ou seja, a capacidade de transporte de energia através do sistema HVDC mais que triplicou em um período de menos de 10 anos.

De acordo com OLIVEIRA (2015), um relatório publicado pela *Pike Research* revelou que um dos setores de maior crescimento nas concessionárias de energia elétrica é a transmissão HVDC, cujos investimentos anuais globais passarão de US\$ 8,4 bilhões em 2010 para US\$ 12,1 bilhões em 2015, representando um incremento de 44% nesse período. Ainda de acordo com este relatório, a maior parte do crescimento se dará nos países asiáticos, embora se saiba que países da América do Norte e Europa terão ampliação dessa tecnologia devido à integração de recursos renováveis, como, eólicas onshore<sup>1</sup> e principalmente offshore.<sup>2</sup>

## 1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho objetiva analisar o comportamento do sistema de transmissão de alta tensão em corrente contínua diante da aplicação de falhas em seus barramentos AC, a partir do estudo dos principais componentes e características destes sistemas, e das simulações realizadas no modelo projetado no ATPDraw, que irão mostrar, a partir das formas de onda obtidas, o comportamento de correntes e tensões DC e a atuação dos

---

<sup>1</sup> Eólica onshore – geração de energia eólica em terra

<sup>2</sup> Eólica offshore – geração de energia eólica em alto mar

controles das pontes conversoras do sistema no sentido de proteger o elo HVDC, concretizando o que é abordado na literatura.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em cinco capítulos. No Capítulo 1 é feita uma introdução sobre o tema apresentando algumas características dos sistemas HVDC, um breve histórico e a finalidade que o trabalho busca alcançar.

No Capítulo 2, é feito um estudo a respeito dos aspectos gerais da transmissão HVDC, mostrando as principais características, vantagens e desvantagens, classificação, tecnologias existentes, pontes conversoras, filtros e falhas de comutação.

No Capítulo 3, é feito um estudo a respeito do controle dos sistemas HVDC, os principais tipos de controle existentes e suas características.

No Capítulo 4, é apresentado o modelo de referência do Cigré, é feito um estudo da modelagem do sistema no ATPDraw e as simulações realizadas em regime permanente.

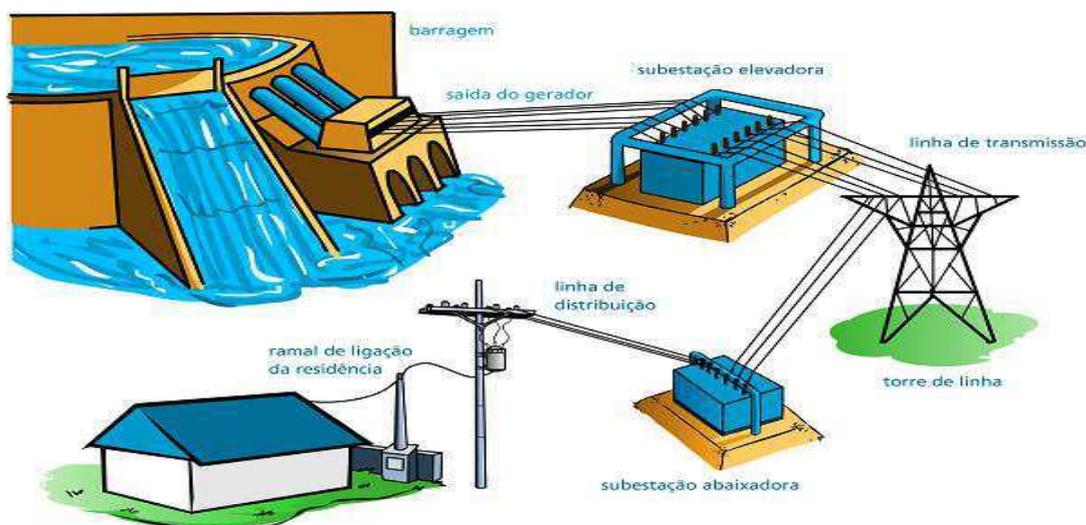
No Capítulo 5, são apresentadas as conclusões do trabalho.

## 2 ASPECTOS GERAIS DA TRANSMISSÃO HVDC

A transmissão em corrente contínua destaca-se por apresentar uma série de vantagens quando comparada à transmissão em corrente alternada. A conversão de tensão em um sistema HVAC é um processo simples. O transformador, considerado o principal e mais caro componente deste sistema, é responsável por elevar o nível de tensão e assim, transmitir grandes quantidades de potência com um alto nível de isolamento.

A potência produzida nas unidades geradoras é transmitida para subestações elevadoras de tensão, e, em seguida, as linhas de transmissão se conectam a outra subestação responsável por abaixar o nível de tensão, para então, abastecer os grandes centros de consumo. A figura a seguir, ilustra um sistema de transmissão HVAC.

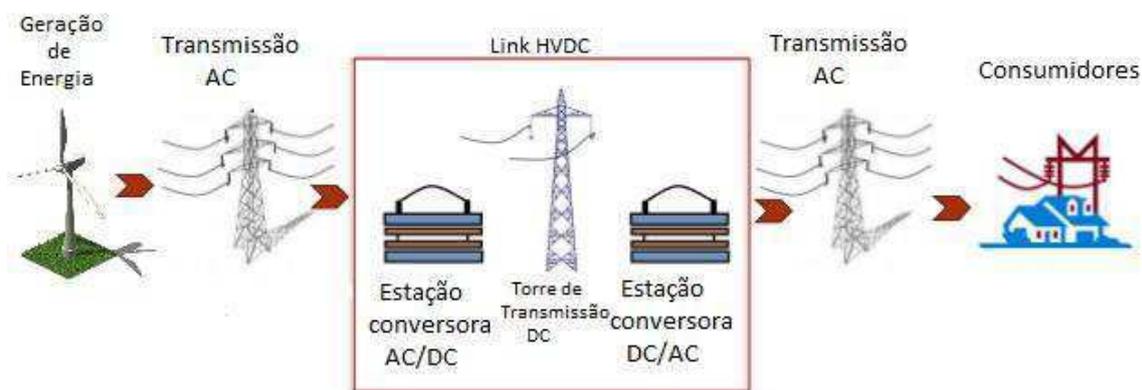
Figura 1 – Sistema de transmissão de energia elétrica em corrente alternada



Fonte: <http://manutencaosc.jlle1.com/?p=1454>

Na transmissão HVDC, as subestações são chamadas de unidades conversoras. Estas unidades tem o objetivo de converter a corrente AC em corrente DC. O controle eficiente das unidades conversoras proporciona uma série de vantagens que não são possíveis de se alcançar com a transmissão AC. A Figura 2 apresenta um sistema de transmissão em corrente contínua formado por torres de transmissão AC e DC e por estações conversoras.

Figura 2 – Sistema de transmissão de energia elétrica em corrente contínua



Fonte: Adaptado de <http://image.slidesharecdn.com/hvdc-140412081637-phpapp02/95/hvdc-11-638.jpg?cb=1397290666>

Dependendo da aplicação, estes sistemas de transmissão podem apresentar vantagens econômicas, teóricas e ambientais. Algumas dessas vantagens são citadas a seguir.

Diferentemente da transmissão em corrente alternada, os sistemas HVDC não apresentam fluxo e intercâmbio de reativos, e, por isso, não há limite de distância para a transmissão. Dentre os aspectos teóricos que justificam o uso dessa tecnologia, pode-se destacar:

- Sistemas HVDC possibilitam transmissão de potência entre duas linhas AC de diferentes frequências;
- Parâmetros capacitivos e indutivos não limitam a capacidade de transmissão da linha;
- A transmissão DC pode ser empregada para amortecer oscilações da rede AC, melhorando assim, a estabilidade do sistema de potência.

As linhas de transmissão em corrente contínua produzem campos elétricos e magnéticos incapazes de induzir correntes e tensão em objetos próximos as instalações por meio de acoplamento indutivo ou capacitivo. Os níveis máximos de ruídos para uma linha HVDC em boas condições de tempo são menores quando comparados aos níveis de ruído de sistemas HVAC em condições de desfavoráveis de tempo. Portanto, em termos ambientais, a tecnologia HVDC destaca-se por proporcionar uma transmissão de potência

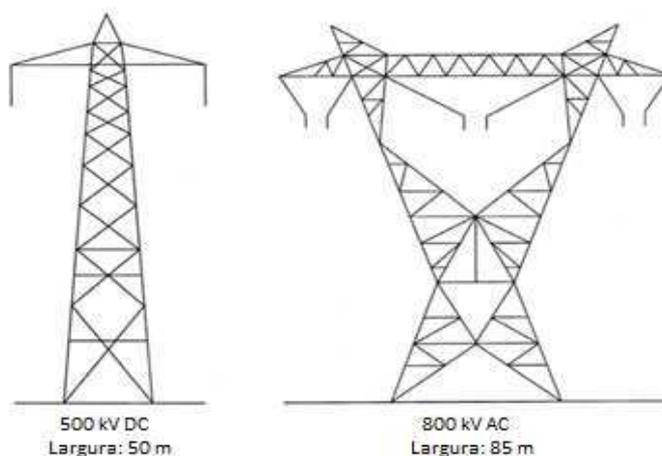
mais eficiente aproveitando melhor as instalações. (OLIVEIRA, 2015) Pode-se então destacar os seguintes aspectos:

- Efeito corona menor;
- Ruído audível menor;
- Efeitos de campo elétrico e magnético.

Tanto o sistema HVDC quanto o HVAC são capazes de transmitir energia das unidades geradoras até os grandes centros de consumo. Porém, é importante avaliar os aspectos econômicos dos dois tipos de transmissão levando em consideração todos os componentes de cada sistema separadamente. No caso do sistema HVDC, os fatores mais importantes a serem avaliados são: custo dos conversores, dos equipamentos de entrada e saída AC, dos filtros e da linha de transmissão.

Linhas de transmissão DC e AC possuem basicamente os mesmos elementos construtivos, torres, cadeia de isoladores e acessórios mecânicos. Porém, às torres de transmissão do sistema HVDC caracterizam-se por ser menos robustas e possuir um número menor de condutores, quando comparada à linhas de transmissão HVAC. A Figura 3 ilustra a diferença entre as torres de transmissão dos dois sistemas.

Figura 3 – Torres de transmissão DC e AC



Fonte: Adaptado de [http://be.convdocs.org/pars\\_docs/refs/48/47963/47963\\_html\\_45592fec.png](http://be.convdocs.org/pars_docs/refs/48/47963/47963_html_45592fec.png)

Em um sistema HVDC, o conversor caracteriza-se por ser o principal equipamento de uma estação e tem significativa importância no que diz respeito aos custos deste tipo de transmissão. Pode-se afirmar que as estações conversoras são, portanto, os elementos

mais importantes quando se vai fazer uma comparação econômica entre os sistemas de transmissão DC e AC.

O investimento inicial no sistema HVDC é consideravelmente maior quando comparado ao de um sistema HVAC. Porém, quanto maior a distância da transmissão, o investimento necessário em HVAC torna-se mais elevado. Um dos fatores predominantes em um sistema de transmissão AC é o custo da linha. O custo com estações não é um fator tão relevante. Para o sistema DC, o custo com linhas de transmissão é pequeno, enquanto o custo com as estações conversoras torna-se maior. A linha DC apresenta uma redução na utilização de cabos e torres, fato que não acontece na transmissão AC. Outro aspecto da transmissão HVAC é a necessidade de subestações de controle e de manobra a cada 300 ou 400 Km (OLIVEIRA,2015).

No que diz respeito as perdas, em sistemas HVDC, as linhas apresentam perdas ôhmicas menores e rápido controle do fluxo de potência quando comparadas à linhas AC. Os sistemas de transmissão em corrente contínua podem ser empregados para melhorar o desempenho de sistemas AC, ajudando a controlar variações de frequência e também a estabilidade do sistema em corrente alternada, fornecendo um controle preciso de fluxo de potência.

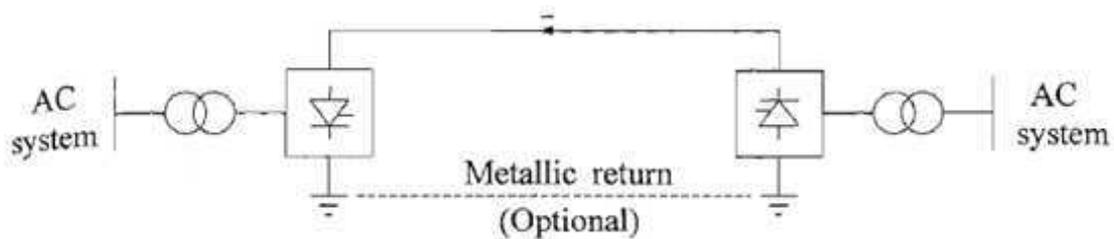
## 2.1 CLASSIFICAÇÃO DOS ELOS HVDC

Existe basicamente três tipos de configurações de sistemas HVDC que podem ser utilizados na transmissão de energia, essas configurações são classificadas como: monopolar, bipolar e homopolar. A configuração monopolar apresentada na Figura 4, caracteriza-se por utilizar apenas um condutor com caminho de retorno pelo terra ou metálico. O principal motivo de se optar por esta configuração está no custo, principalmente quando se trata de cabos para a transmissão. Nos casos em que a resistividade do solo for muito alta, pode-se utilizar a configuração monopolar com retorno metálico.

Já a configuração bipolar, Figura 5, se caracteriza por utilizar dois condutores, um positivo e outro negativo e dois conversores de mesma tensão nominal, conectados em série no lado DC. Esse tipo de configuração apresenta menos interferências harmônicas e pode ser implementado de modo que a polaridade de um ou de ambos os polos possam

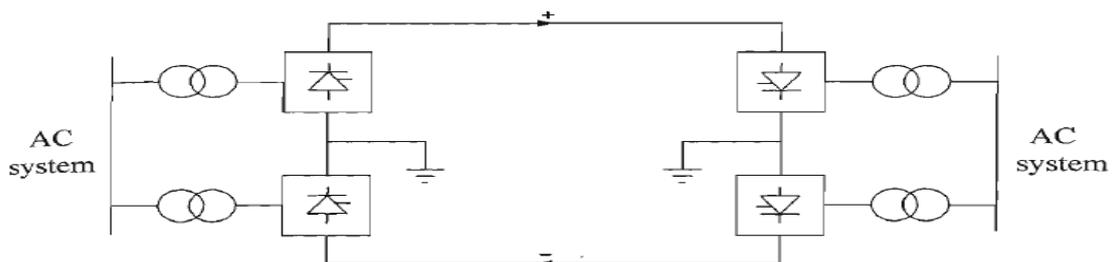
ser alteradas. Se um dos condutores apresentar falha, a transmissão pode continuar, porém, com a capacidade reduzida. Esse tipo de sistema pode ser instalado com um condutor de retorno ligado ao terra metálico. A configuração Homopolar, ilustrada na Figura 6, pode possuir dois ou mais condutores, todos com a mesma polaridade. Porém, é preferível o uso da polaridade negativa por provocar menos interferência devido ao efeito corona. O caminho de retorno para esse sistema é pelo solo.

Figura 4 – Link HVDC Monopolar



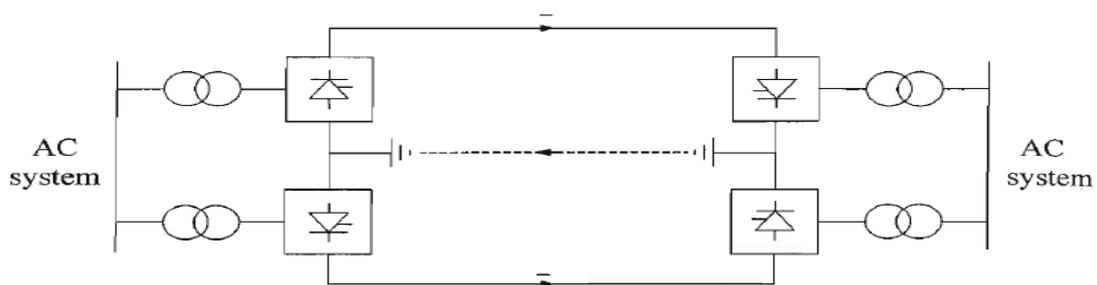
Fonte: (KUNDUR, 1994)

Figura 5 – Link HVDC Bipolar



Fonte: (KUNDUR, 1994)

Figura 6 – Link HVDC Homopolar



Fonte: (KUNDUR, 1994)

Existe ainda, além das três configurações apresentadas, as configurações *back-to-back*, multi-terminal, ponto-a-ponto e a transmissão HVDC *Ligth*. A configuração *back-*

*to-back* é utilizada para conectar sistemas assíncronos. O sistema multi-terminal caracteriza-se por possuir três ou mais estações conversoras, conectadas em paralelo ou em série (GRAHAM et. al, 2004).

A tecnologia HVDC mais recente é a HVDC *Light*, que utiliza VSC (*Voltage Source Converters*) ao invés de conversores comutados de linha (LCC). A transmissão HVDC convencional emprega conversores por fonte de corrente comutados de linha, que exigem uma fonte de tensão síncrona para poder operar. O processo de conversão exige potência reativa de filtros, bancos de capacitores *shunt*, que fazem parte da estação conversora. Qualquer excesso ou escassez de potência reativa terá que ser acomodada pelo sistema AC. A transmissão HVDC *Light* evita a ocorrência de tais exigências, além de oferecer outras vantagens, devido a sua possibilidade de controlar independentemente tanto a potência ativa, como a reativa (GRAHAM et. al., 2004)

## 2.2 TECNOLOGIAS DE TRANSMISSÃO HVDC

Na tecnologia de transmissão HVDC existem basicamente dois tipos de conversores, o conversor por fonte de tensão (VSC) que foi desenvolvido recentemente e tem como principal elemento de conversão, o IGBT, e o conversor por fonte de corrente (LCC) que se caracteriza por utilizar tiristores como principal elemento de comutação. Neste trabalho é dado ênfase ao conversor por fonte de corrente (LCC) por se tratar da tecnologia de transmissão mais utilizada atualmente.

### 2.2.1 TRANSMISSÃO HVDC-VSC

Na tecnologia de transmissão VSC, os tiristores são substituídos por IGBTs que permitem o controle tanto do seu fechamento quanto da sua abertura, sendo controlados de forma independente da tensão de linha, por isso, são ditos conversores auto-comutados (SATO, 2013). Trata-se de um conversor à fonte de tensão, pois o nível de tensão nas linhas é mantido constante por capacitores.

Como nessa tecnologia não existe a inversão de polaridade, ela se torna muito efetiva na transmissão por cabos, fator que simplifica o projeto e apresenta um ganho ambiental significativo. Embora o seu nível de potência seja de 600MW, atualmente níveis maiores estão em desenvolvimento. (SATO, 2013). Uma vantagem da tecnologia

VSC quando comparada a tecnologia LCC é que a necessidade de utilização de filtros para controle de harmônicos é reduzida a quase zero, sendo necessária somente a absorção de harmônicos de alta frequência.

A conversão VSC pode ser utilizada para interconectar sistemas síncronos ou assíncronos e transportar potência de plataformas eólicas para subestações.

### 2.2.2 TRANSMISSÃO HVDC-LCC

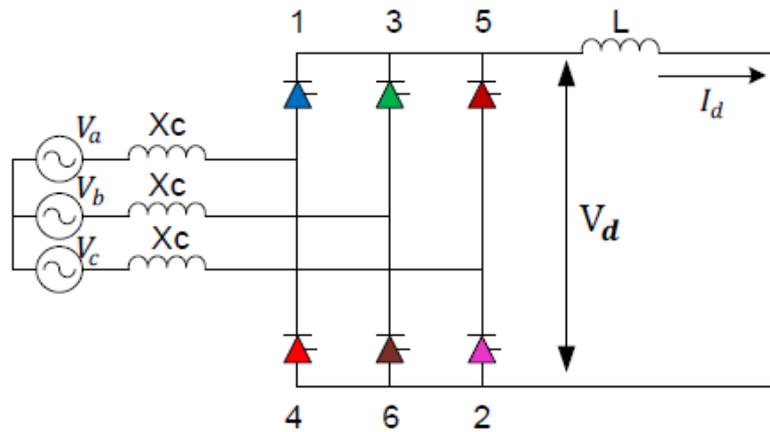
A tecnologia HVDC-LCC, é a mais utilizada para a transmissão de potência em corrente contínua. Neste tipo de transmissão, os conversores dependem da rede as quais eles estão conectados para efetuar sua comutação. A dificuldade de efetuar a comutação é devido ao fato de que o elemento básico para realizar a comutação nessa tecnologia é o SCR (*Silicon Controlled Rectifier*) e, esse componente não permite o comando de *turn off*. Isso resulta em um problema do ponto de vista de flexibilidade do sistema, fazendo com que seja necessária a instalação de uma estrutura externa adicional para a compensação de reativos e filtragem de harmônicos (SATO, 2013).

O elemento principal de um sistema de transmissão HVDC-LCC é o conversor em ponte trifásica e o entendimento do seu funcionamento é essencial, na compreensão de um sistema de transmissão HVDC.

#### 2.2.2.1 CONVERSOR POR FONTE DE CORRENTE (CSC)

Em sistemas HVDC-LCC, as estações conversoras podem ser configuradas de diferentes formas, porém, as mais utilizadas nestes sistemas de transmissão utilizam retificadores ou inversores de seis ou doze pulsos. A Figura 7 mostra uma ponte conversora de 6 pulsos, a partir da qual pode-se entender o funcionamento do conversor por fonte de corrente.

Figura 7 - Ponte conversora de seis pulsos



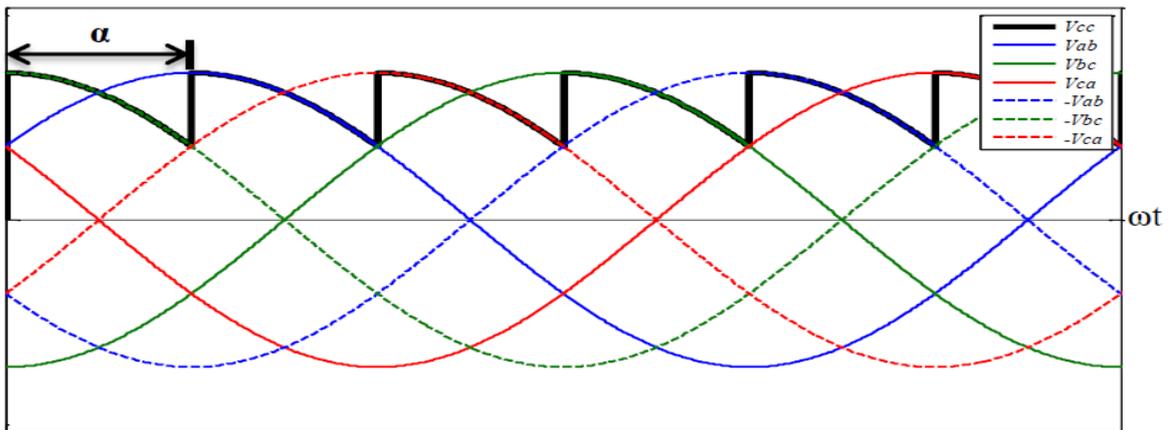
Fonte: (DULTRA, 2012)

O circuito é composto por fontes AC, reatâncias de comutação  $X$ , tiristores e o reator de alisamento. O SCR, também chamado de tiristor, caracteriza-se por ser bidirecional em tensão e unidirecional em corrente. Possui três terminais de acesso: anodo (A), o catodo (K) e o *gate* (G).

O tempo para que o tiristor comece a conduzir depois que ele se encontra diretamente polarizado corresponde a um ângulo  $\alpha$  denominado ângulo de disparo. Esse ângulo corresponde ao intervalo de tempo entre o instante em que a tensão sobre o tiristor torna-se positiva e a aplicação do pulso de disparo em seu *gate*. O ângulo de disparo é limitado em  $180^\circ$ , se  $\alpha$  for maior que esse valor, o tiristor não conduzirá, pois no momento do disparo a tensão sobre ele será reversa, fazendo com que o catodo fique com potencial positivo em relação ao anodo, impossibilitando a condução de corrente. (MOHAN, 2003)

O processo de condução dos tiristores neste tipo de conversor ocorre de modo que, a partir de um determinado ângulo de disparo  $\alpha$ , pares de tiristores entrarão em condução, normalmente um tiristor da ponte superior com um tiristor da ponte inferior. Cada elemento pode conduzir durante um intervalo de  $120^\circ$ , e cada par conduz durante um intervalo de  $60^\circ$ . A Figura 8, mostra a forma de onda da tensão na saída do retificador em função do ângulo de disparo  $\alpha$ .

Figura 8 – Forma de onda da tensão na saída do retificador em função de  $\alpha$



Fonte: (OLIVEIRA, 2015)

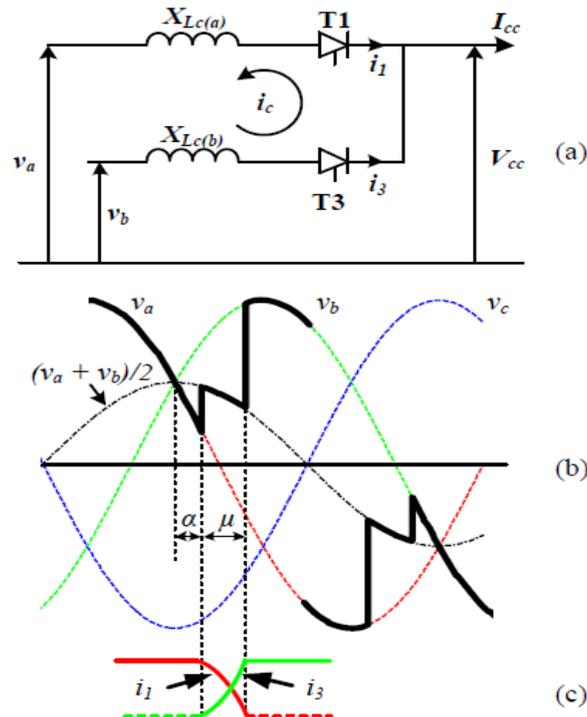
A tensão média na saída do retificador é dada por:

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{6}V}{\pi} \times \cos\alpha \quad (1)$$

Devido a presença da indutância do transformador conversor somada à do sistema AC, a comutação de uma válvula para a outra não ocorre de forma instantânea, sendo verificado a existência de um determinado intervalo de tempo para que haja a comutação.

O ângulo associado a esse intervalo de tempo é representado por  $\mu$ . Nos sistemas HVDC-LCC comerciais, o valor de  $\mu$  é compreendido na faixa de  $15^\circ$  a  $25^\circ$  (RASHID, 2011). A Figura 9 mostra o circuito equivalente de uma ponte conversora durante o processo de comutação entre os tiristores 1 e 3, conectados às fases a e b do sistema.

Figura 9 – Processo de comutação: (a) circuito equivalente; (b) formas de onda no retificador e inversor; (c) formas de onda da corrente.



Fonte: (OLIVEIRA, 2015)

O processo de comutação entre as chaves 1 e 3 tem início com o disparo do tiristor 3, quando é aplicado um pulso de corrente no *gate*, a partir do cruzamento entre as tensões superiores  $v_a$  e  $v_b$  e deve ser concluído antes do cruzamento da tensão inferior  $v_c$  com a menor destas duas formas de onda de tensão. Durante esse período de comutação, os tiristores 1 e 3 conduzem simultaneamente e as tensões  $v_a$  e  $v_b$  são curto-circuitadas através das reatâncias de comutação  $X_{Lc(a)}$  e  $X_{Lc(b)}$ , fazendo com que uma corrente de comutação  $i_c$  circule no laço formado pelas chaves 1 e 3 de forma que a corrente  $I_d$  na carga, será a soma das correntes nessas chaves.

$$I_d = i_1 + i_3 \quad (2)$$

Se as reatâncias de comutação forem consideradas equilibradas, então as taxas de variação de  $i_3$  e  $-i_1$  serão iguais e, conseqüentemente, as quedas de tensão em  $X_{Lc(a)}$  e  $X_{Lc(b)}$  serão as mesmas (OLIVEIRA, 2015). Assim, durante o período de sobreposição, a tensão contínua  $V_{dc}$  será o valor médio de  $v_a$  e  $v_b$ , conforme mostrado na Figura 9.

Assumindo que  $X_{Lc(a)} = X_{Lc(b)} = X_{Lc} = \omega L_c$  e analisando a malha que contém a corrente  $i_c$  do circuito da figura (a), tem-se que:

$$v_b - v_a = 2 \left( \frac{X_{Lc}}{\omega} \right) x \frac{di_c}{dt} \quad (3)$$

onde

$$v_a - v_b = \sqrt{3}\sqrt{2} V \text{sen}(\omega t) \quad (4)$$

Substituindo (4) em (3) e integrando no intervalo entre  $\alpha$  e  $\omega t$ , tem-se:

$$\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \int_{\alpha}^{\omega t} V \text{sen}(\omega t) d(\omega t) = X_{Lc} i \int_0^{i_c} d(i_c) \quad (5)$$

que resulta na seguinte expressão para a corrente de comutação

$$i_c = \frac{\sqrt{3}V}{\sqrt{2}X_{Lc}} [\cos(\alpha) - \cos(\omega t)] \quad (6)$$

considerando  $i_c = I_d$  e  $\omega t = \alpha + \mu$ , tem-se:

$$i_d = \frac{\sqrt{3}V}{\sqrt{2}X_{Lc}} [\cos(\alpha) - \cos(\alpha + \mu)] \quad (7)$$

Manipulando a equação (7), o valor do ângulo de comutação  $\mu$  é:

$$\mu = \cos^{-1} \left( \cos \alpha - \frac{2\omega L_c I_d}{\sqrt{6}V} \right) \quad (8)$$

Segundo OLIVEIRA (2015), a equação (8) mostra que o ângulo de comutação aumenta com o incremento dos valores de  $L_c$  ou  $I_d$  ou se o  $\alpha$  se desviar a partir da metade do meio ciclo, ou seja, para valores entre  $90^\circ$  e  $180^\circ$ .

Como a tensão contínua será o valor médio de  $v_a$  e  $v_b$  durante a comutação e esta ocorre três vezes a cada ciclo da tensão de entrada, é possível determinar a equação para a queda de tensão DC devido a comutação como:

$$\begin{aligned}
 V_{queda} &= \frac{3}{2\pi} \int_0^\mu \frac{1}{2} (v_a - v_b) d(\omega t) \\
 &= \frac{3}{4\pi} \int_0^\mu \sqrt{3}\sqrt{2}V \text{sen}(\omega t + \alpha) d(\omega t)
 \end{aligned} \tag{9}$$

resultando em:

$$V_{queda} = -\frac{3\sqrt{3}\sqrt{2}V}{4\pi} [\cos(\mu + \alpha) - \cos(\alpha)] \tag{10}$$

Por fim, pode-se definir a tensão DC devido a comutação como:

$$V_{queda} = -3L_c I_d f \tag{11}$$

Considerando o sistema com carga e o fenômeno na comutação, a tensão contínua na saída do retificador de seis pulsos é dada pela parcela da tensão média menos duas vezes a queda de tensão definida por (11).

$$V_{dr} = \frac{3\sqrt{6}V}{\pi} \cos\alpha - \frac{3}{\pi} 2\pi f L_c I_d \tag{12}$$

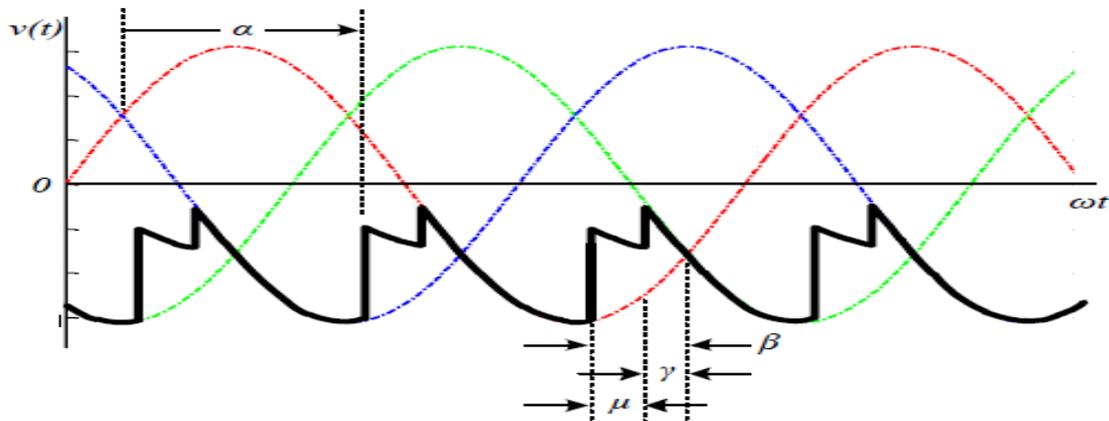
$$V_{dr} = \frac{3\sqrt{6}V}{\pi} [\cos(\alpha) - \cos(\alpha + \mu)] \tag{13}$$

O fator de potência causado pelo processo de retificação é dado por:

$$\cos\varphi = \frac{1}{2}[\cos(\alpha) + \cos(\alpha + \mu)] \quad (14)$$

No processo de inversão, a presença da reatância de comutação impede a obtenção de tensão contínua reversa máxima, pois o ângulo  $\alpha$  deve ser menor do que  $180^\circ$ , de forma a compreender o tempo correspondente ao ângulo de comutação  $\mu$  e assegurar que o tiristor de saída entre em bloqueio antes do cruzamento com a tensão da outra fase. Esse tempo necessário para garantir o bloqueio da chave é representado pelo ângulo de extinção  $\gamma$  (OLIVEIRA, 2015). A Figura 10 ilustra as formas de onda da operação da ponte inversora. O ângulo de comutação  $\mu$  possui uma importância maior no modo inversor pois é ele quem determina o quanto  $\alpha$  pode ser incrementado. O ângulo de disparo do inversor é representado através do ângulo de avanço  $\beta = \pi - \alpha$  ou  $\beta = \mu + \gamma$  que deve ter o seu valor mínimo estabelecido de forma a assegurar uma comutação segura.

Figura 10 – Forma de onda da tensão no inversor



Fonte: (OLIVEIRA, 2015)

A tensão DC no inversor pode ser dada pelas expressões a seguir:

$$V_{di} = \frac{3\sqrt{6}V}{\pi} \cos(\gamma) - \frac{3}{\pi} 2\pi f L_c I_d \quad (15)$$

ou

$$V_{di} = \frac{3\sqrt{6}V}{\pi} \cos(\beta) + \frac{3}{\pi} 2\pi f L_c I_d \quad (16)$$

ou

$$V_{di} = \frac{3\sqrt{6}V}{\pi} [\cos(\beta) + \cos(\gamma)] \quad (17)$$

O fator de potência no processo de inversão é dado por:

$$\cos\varphi = \frac{1}{2} [\cos(\gamma) + \cos(\beta)] \quad (18)$$

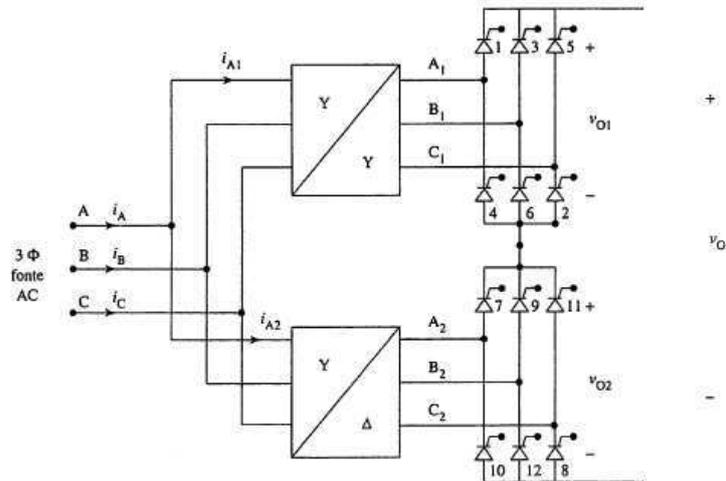
## 2.3 PONTE CONVERSORA DE 12 PULSOS

Embora os conversores de 6 pulsos consigam reduzir consideravelmente a ondulação de saída quando comparados à conversores de número de pulsos menores, em sistemas de transmissão HVDC, uma redução adicional na ondulação da tensão de saída pode ser obtida a partir da conexão em série ou em paralelo de pontes conversoras de 6 pulsos. Uma ponte conversora de 12 pulsos é formada a partir do acréscimo de um segundo conjunto de ondas de 6 pulsos à saída, com uma defasagem de 30° elétricos em relação ao primeiro conjunto.

A principal motivação para o uso de um conversor com um número de pulsos maior é a redução de correntes harmônicas que o retificador/inversor injeta na rede de energia AC. Por exemplo, um retificador de 12 pulsos tem uma taxa de distorção harmônica total de corrente (THD – *Total Harmonic Distortion*) de aproximadamente 13%, enquanto um retificador/inversor de 6 pulsos tem uma THD de corrente de 35%. Outro benefício é a obtenção de uma menor ondulação de saída DC, porém, este benefício é geralmente apenas interno ao equipamento ou ao sistema e é menos visível do que o efeito das correntes harmônicas (POMILIO, 2006; AHMED, 2000).

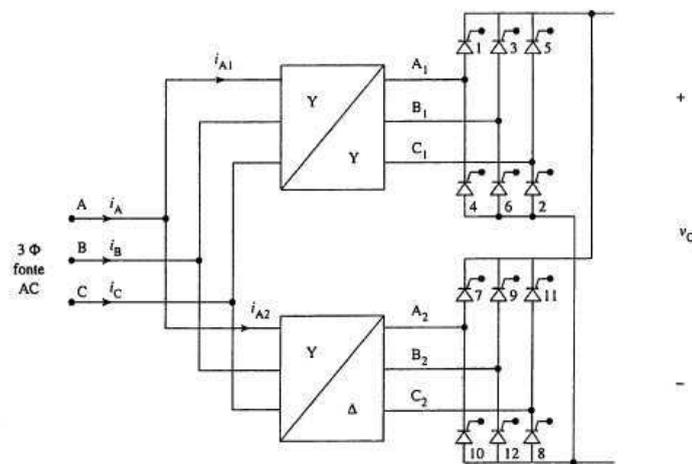
Pontes conversoras de 12 pulsos podem ser obtidas pela associação em série ou em paralelo de dois conversores trifásicos de 6 pulsos defasados entre si. As Figuras 11 e 12, mostram essas conexões.

Figura 11 - Ponte conversora de 12 pulsos conectada em série



Fonte: (AHMED, 2000).

Figura 12 - Ponte conversora de 12 pulsos conectada em paralelo



Fonte: (AHMED, 2000).

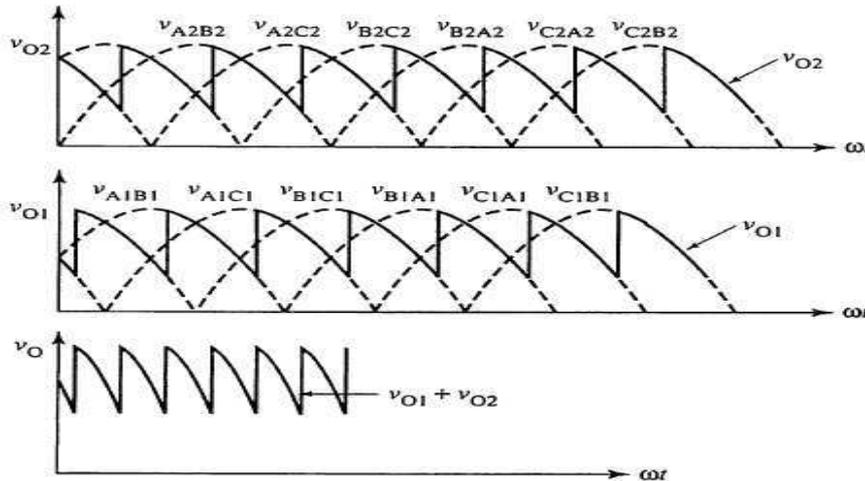
São essencialmente três, as situações em que devem ser feitas associações de conversores:

- Em situações em que se deseja obter uma tensão DC de saída elevada, que não poderia ser obtida com um único conversor, neste caso é feita a associação em série;
- Quando a carga exige uma corrente que não poderia ser fornecida por um único conversor, neste caso é feita a associação em paralelo;

- Quando se deseja reduzir as harmônicas de corrente.

As formas de onda da tensão na saída de um conversor de 12 pulsos conectado em série são mostradas na Figura 13 a seguir.

Figura 13 – Formas de onda do conversor de 12 pulsos conectado em série



Fonte: (AHMED, 2000).

## 2.4 FALHAS DE COMUTAÇÃO

O fenômeno da falha de comutação ocorre devido ao fato de que o inversor opera com ângulos de disparo próximos de  $180^\circ$ . Porém, mesmo que o ângulo máximo dos tiristores para que o conversor funcione como inversor seja de  $180^\circ$ , por questões operacionais, ele é limitado a um valor inferior.

Para que não ocorram as falhas de comutação, deve-se obedecer à seguinte relação:

$$(\alpha + \mu + \theta_0) = 180^\circ \quad (19)$$

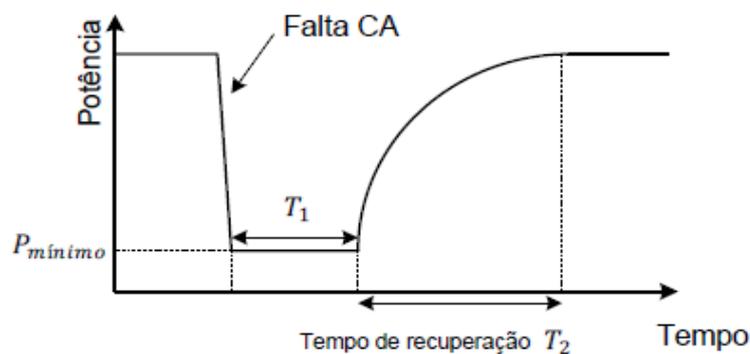
em que  $\theta_0$  é a margem necessária para o bloqueio completo do tiristor.

As falhas de comutação ocorrem nos seguintes casos:

- O ângulo de disparo assumir valores elevados;
- Valores elevados da corrente DC;
- Reduções significativas na tensão da barra AC onde está conectado o inversor.

Portanto, uma maior solicitação de corrente ou uma maior redução de tensão de alimentação, poderão provocar falhas na comutação do inversor, se não houver uma atuação eficiente do sistema de controle no sentido de reduzir o ângulo  $\alpha$  (VIDIGAL JÚNIOR, 1984). Quando há uma súbita queda de tensão no barramento AC do inversor, a potência de saída do elo HVDC é alterada como mostra a Figura 14.

Figura 14 - Potência de saída do elo HVDC quando há uma falta AC no inversor



Fonte: (ETT, 2011)

A partir da análise da Figura 14, é possível perceber a ocorrência de uma redução de potência durante  $T_1$  e o sistema se recupera durante o intervalo de tempo  $T_2$ . Esse desempenho depende do ajuste do sistema de controle e é influenciado pelo suporte de potência reativa transitória nas pontes conversoras identificadas pela SCR – *Short Circuit Ratio* (Relação de Curto-Circuito: igual à relação entre a potência de curto-circuito e a potência transmitida). Quando o SCR é pequeno, os controles devem ser ajustados para obter um desempenho aceitável, sendo que para valores inferiores a 2 este ajuste será muito difícil ou até mesmo, impossível. Em algumas situações, mesmo uma pequena queda de tensão no barramento AC do inversor pode causar falha de comutação (ETT, 2011). Uma falha de comutação implica naturalmente na interrupção da transmissão pelo conversor.

## 2.5 FILTROS DE HARMÔNICOS EM SISTEMAS DE TRANSMISSÃO HVDC

Dessemelhante de fenômenos de curta duração, como transitórios, perturbações elétricas, picos de sobretensão, etc., a geração de harmônicos caracteriza-se por ser um fenômeno contínuo. Define-se por harmônico, a componente de uma onda periódica cuja frequência é um múltiplo inteiro da frequência fundamental.

Pontes retificadoras e inversoras geram harmônicos de tensão e de corrente que, por sua vez, são introduzidos nos sistemas AC e DC, respectivamente. São gerados tanto harmônicos característicos, que estão relacionados com o número de pulsos dos conversores dos sistemas HVDC, como os harmônicos não característicos, que são resultado de diversos fatores, tais como: saturação dos núcleos de transformadores, desequilíbrios das tensões AC, assimetria das impedâncias das fases do transformador do conversor, etc.

De acordo com KIMBARK (1975), quanto maior o número de pulsos de um conversor, mas elevadas serão as frequências dos harmônicos de baixa ordem. E quanto maior o número de pulsos, menor a amplitude pico a pico da ondulação. Além disso, quanto maior a frequência, menor será a amplitude de um harmônico e, conseqüentemente, mais fácil de amortecer-lo através da filtragem.

Os harmônicos em sistema de transmissão de energia, são responsáveis por uma série de problemas, dentre eles: aquecimento e perdas, distorção da tensão nos barramentos dos conversores, interferências, efeitos no sistema de controle, etc. Portanto, a eliminação dos harmônicos de maior ordem por meio de filtros se faz necessária a fim de se evitar que ocorram distorções de amplitudes elevadas na tensão, perdas e interferência de fatores externos. Nos sistemas de transmissão em corrente contínua são utilizados filtros tanto no lado AC como no lado DC.

### 2.5.1 FILTROS NO LADO AC

Projetados com o objetivo de fornecer parte da potência reativa absorvida pelos conversores e para tornar a tensão de comutação próxima de uma onda senoidal, os filtros no lado CA de um sistema HVDC são do tipo shunt e esses filtros devem ser capazes de suportar tensões DC elevadas para a terra e correntes DC elevadas. A maioria das aplicações em HVDC utiliza projetos de filtros do tipo sintonizados para supressão de harmônicos de baixa ordem, tais como 5°, 7°, 11° e 13° e de amortecimento para supressão de harmônicos de ordens elevadas (23°, 25°, ...) (SILVA, 2007).

O uso da ponte conversora de 12 pulsos em sistemas de transmissão HVDC gera harmônicos de 11° e 13° ordem para a rede, e a filtragem dos harmônicos gerados por estes conversores é dada por um filtro sintonizado e por um filtro passa alta para os harmônicos de ordem elevada.

### 2.5.2 FILTROS NO LADO DC

No lado DC, os harmônicos de tensão geram harmônicos de corrente que dependem de fatores como: ângulo de disparo, de comutação e de extinção dos conversores e da impedância do circuito.

Reatores em série são colocados na saída da subestação e funcionam como elementos amortecedores de harmônicos de corrente. Em alguns sistemas há a necessidade de se adicionar filtros shunt no lado CC para que os harmônicos de tensão estejam dentro de valores admissíveis (DULTRA,2012).

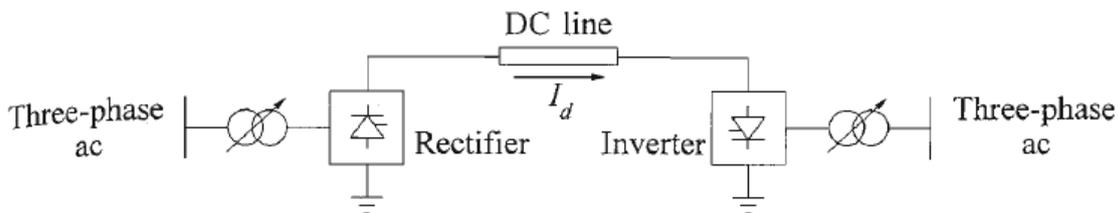
### 3 CONTROLE DE SISTEMAS HVDC

Este capítulo busca descrever como acontece o controle de sistemas de transmissão HVDC, apresentando suas principais características e métodos de controle.

O controle de um sistema de transmissão DC possui um papel importante por definir as condições operativas do elo e também por ser responsável por eliminar faltas nos próprios conversores. De acordo com KUNDUR (1994), um sistema de transmissão HVDC é altamente controlável e a eficiência deste sistema depende do uso adequado dessa controlabilidade. Com o objetivo de proporcionar eficiência na operação desses sistemas e maximizar a flexibilidade de controle de potência, vários níveis de controle são utilizados de forma hierárquica.

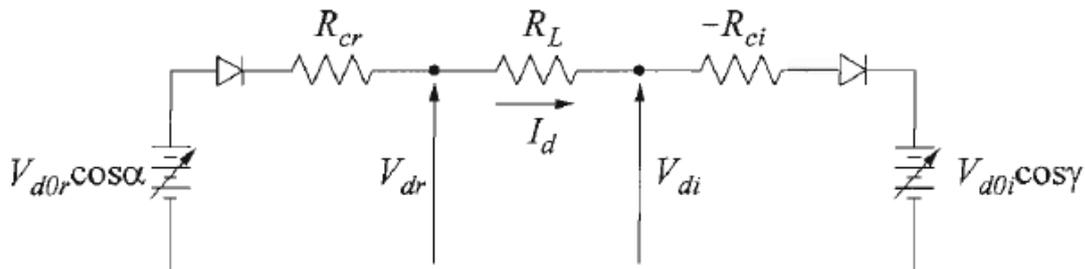
Para realizar o controle dos conversores em sistema de transmissão HVDC, deve-se primeiramente modelar um circuito equivalente que seja capaz de representar a linha DC, o efeito dos transformadores, do retificador e do inversor. Nas Figuras 15, 16, e 17 são apresentados um elo HVDC monopolar, seu circuito equivalente e o perfil de tensão.

Figura 15 – Link Monopolar



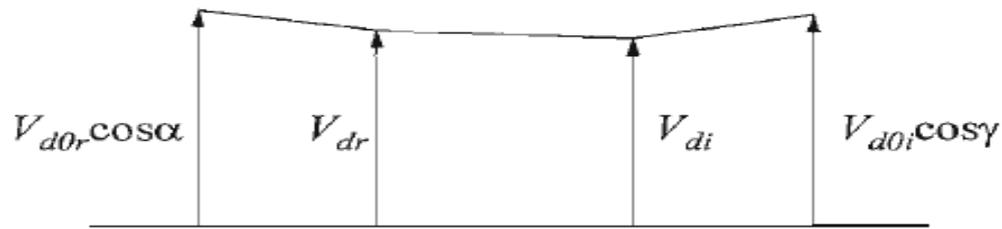
Fonte: (KUNDUR, 1994).

Figura 16 – Circuito Equivalente do Link HVDC Monopolar



Fonte: (KUNDUR, 1994).

Figura 17 – Perfil de Tensão do Link HVDC



Fonte: (KUNDUR, 1994).

A corrente  $I_d$  que flui da estação retificadora para a estação conversora é dada por:

$$I_d = \frac{V_{dor} \cos \alpha - V_{doi} \cos \gamma}{R_{cr} + R_l + R_{ci}} \quad (20)$$

em que:

- $R_{cr}$  - Resistência de comutação do retificador;
- $R_l$  - Resistência da linha;
- $R_{ci}$  - Resistência de comutação do inversor;
- $V_{dor}$  - Tensão interna do retificador;
- $V_{doi}$  - Tensão interna do inversor.

A corrente de regime permanente  $I_d$  é proporcional à diferença entre as duas tensões internas  $V_{dor}$  e  $V_{doi}$  e, por isso, pode ser controlada a partir destas tensões, que por sua vez, podem ser controladas pelo ângulo de disparo dos tiristores e pela tensão AC.

As mudanças nas tensões AC podem ser feitas através da variação dos “taps” dos transformadores conectados às estações conversoras. Porém, a variação dos “taps” leva de 5 a 6 segundos por estágio, enquanto a variação através do ângulo de disparo do retificador e do inversor leva de 1 a 10 ms (VIDIGAL JÚNIOR, 1984).

Portanto, os sistemas de controle contribuem decisivamente para garantir a estabilidade e o bom desempenho de sistemas de transmissão em corrente contínua, durante a ocorrência de perturbações. Segundo KUNDUR (1994), saber determinar os instantes exatos para os disparos dos tiristores proporciona vantagens tais como:

- Redução no consumo de potência reativa;
- Redução de correntes de curto através das linhas de transmissão e dos tiristores;
- Redução de sobretensões nas válvulas;
- Redução da ocorrência de falhas repetidas de comutação.

### 3.1 OBJETIVOS DA APLICAÇÃO DE UM SISTEMA DE CONTROLE EM ELOS HVDC

Segundo VIDIGAL JÚNIOR (1984), o sistema de controle deve apresentar algumas características essenciais, tais como:

- Controlar efetivamente a potência transmitida;
- Limitar a corrente  $I_d$  máxima a fim de evitar danos aos tiristores e a outros dispositivos;
- Limitar a corrente  $I_d$  mínima de modo a evitar discontinuidades que possam causar danos ao tiristores;
- Manter um alto fator de potência;
- Evitar falhas de comutação;
- Permitir uma tensão direta nos terminais do tiristor para assegurar o seu disparo.

A característica de limitar a corrente  $I_d$  pode ser obtida estabelecendo-se limites para a mesma. Manter o fator de potência elevado implica em minimizar o suprimento de potência reativa às pontes retificadora e inversora, reduzir as quedas de tensão nos terminais AC, reduzir o nível de estresse nos tiristores e reduzir as perdas. Portanto, a manutenção de um elevado fator de potência exige valores mínimos para  $\alpha$  e  $\gamma$ , de modo que, no inversor não haja risco de falhas de comutação.

O retificador possui uma limitação de alfa em um valor mínimo de  $5^\circ$  a  $7^\circ$ , de modo a garantir uma tensão adequada sobre o tiristor antes do seu disparo. O controle do ângulo de disparo  $\alpha$  em valores pequenos possibilita uma redução na quantidade de harmônicos DC característicos, gerados pelo retificador e pelo inversor. Para evitar as

falhas de comutação no inversor, existe uma faixa de segurança para o ângulo de extinção  $\gamma$  que deve ficar em torno de  $15^\circ$ .

A tensão positiva sobre cada tiristor antes da ocorrência do disparo, é utilizada para carregar o circuito de alimentação que fornece o pulso de energia para o disparo do tiristor. Logo, não é possível que ocorra o disparo antes que  $\alpha$  assuma os valores mínimos citados acima. Assim, o retificador opera normalmente com alfa na faixa de  $15^\circ$  a  $20^\circ$ , de modo a permitir o aumento da tensão do retificador numa eventual necessidade de se controlar o fluxo de potência. Já para o inversor, tipicamente, o valor do ângulo de extinção aceitável é de  $15^\circ$  para sistemas que operam com frequência de 50Hz e de  $18^\circ$  para sistemas de 60Hz (KUNDUR, 1994).

Um requisito importante para a operação satisfatória de um elo HVDC é o rápido controle dos conversores de modo a prevenir a ocorrência de grandes flutuações na corrente contínua. Uma pequena alteração nas tensões internas das pontes conversoras pode provocar uma considerável variação de  $I_d$  pois as resistências de linha e de comutação do conversor são pequenas. De acordo com KUNDUR (1994), se o ângulo de disparo  $\alpha$  e o de extinção  $\gamma$  forem mantidos constante, a corrente  $I_d$  pode variar largamente com pequenas variações da tensão AC em qualquer um dos terminais. Este tipo de variação é inaceitável para o funcionamento satisfatório de sistemas de potência pois a corrente pode atingir valores suficientemente altos a ponto de causar danos aos tiristores e a outros equipamentos do sistema. Portanto, é importante e essencial para que ocorra a operação apropriada do sistema, utilizar um controle rápido dos conversores de modo a prevenir flutuações da corrente  $I_d$ .

Na filosofia de controle adotada atualmente, a corrente no elo é controlada pelo retificador através de um sistema de controle e a tensão de linha é ajustada pelo inversor, que também deve ser capaz de controlar seu ângulo de extinção. No controle do retificador, a corrente de linha  $I_d$  é comparada com uma corrente de referência denominada  $I_{ordem}$  e, quando houver uma diferença entre essas correntes, esse erro será amplificado e agirá como excitação para controlar o ângulo de disparo, ajustando-o de maneira que a tensão da ponte retificadora atinja o valor necessário para manter a corrente desejada na operação.

Enquanto não se atingir os limites de ângulo de disparo mínimo ou máximo, esta filosofia de controle atribui ao retificador o controle de corrente. Para quedas acentuadas de tensão do lado retificador, o limite de ângulo de disparo mínimo é alcançado com

facilidade e o controle de corrente passa a ser realizado pelo inversor através da elevação do ângulo de extinção (FERNANDES, 2005).

A característica estática mais utilizada para visualizar a maneira pela qual o retificador e o inversor atuam interligados, é a  $V_d \times I_d$ . Essa característica é um instrumento importante para a análise em regime permanente de um elo HVDC e será tratada no tópico a seguir.

### 3.2 CARACTERÍSTICA ESTÁTICA $V_d \times I_d$

O estudo das características estáticas permite compreender como ocorre a atuação do controle de um sistema de transmissão HVDC. O diagrama  $V_d \times I_d$  possibilita representar a operação do elo num dado instante e em algum ponto do sistema (meio da linha, retificador ou inversor). O comportamento das características estáticas é analisado quando ocorrem variações no ângulo  $\alpha$  e é representado por retas paralelas entre si.

Considerando inicialmente a característica de regulação para um ponto qualquer de uma linha de transmissão DC, supondo que este ponto genérico esteja localizado junto ao retificador, tem-se as seguintes equações:

$$V_d = V_{dor} \cos \alpha_r + R_{cr} I_d \quad (21)$$

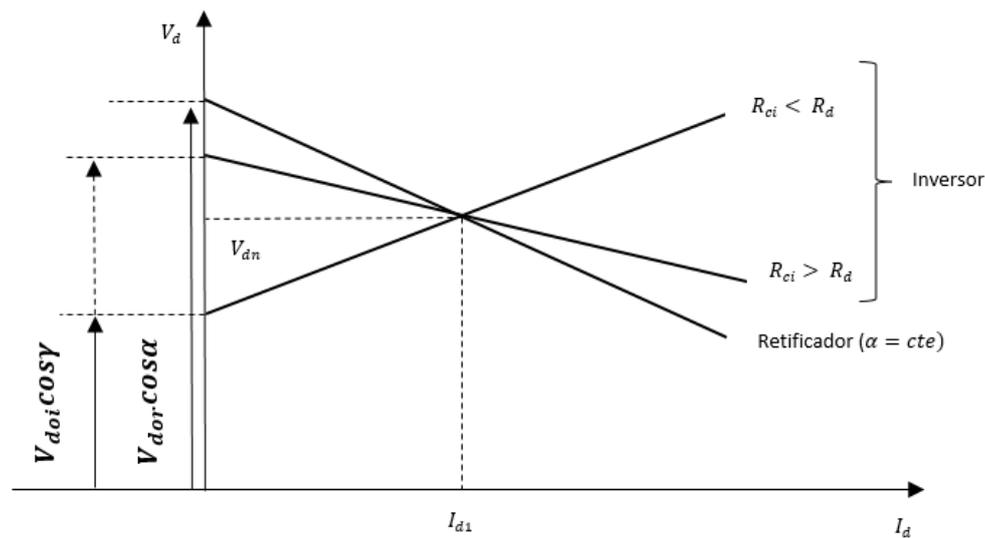
$$V_d = V_{doi} \cos \gamma + (R_d - R_{ci}) I_d \quad (22)$$

As equações 21 e 22 são representadas pelas retas apresentadas na Figura 18 que mostra a característica estática para um ponto localizado nos terminais do retificador. A inclinação da reta que representa  $V_d$  em função das grandezas do inversor poderá ser positiva ou negativa, dependendo do valor de  $R_{ci}$  em relação a  $R_d$ <sup>3</sup> (VIDIGAL JÚNIOR, 1984).

---

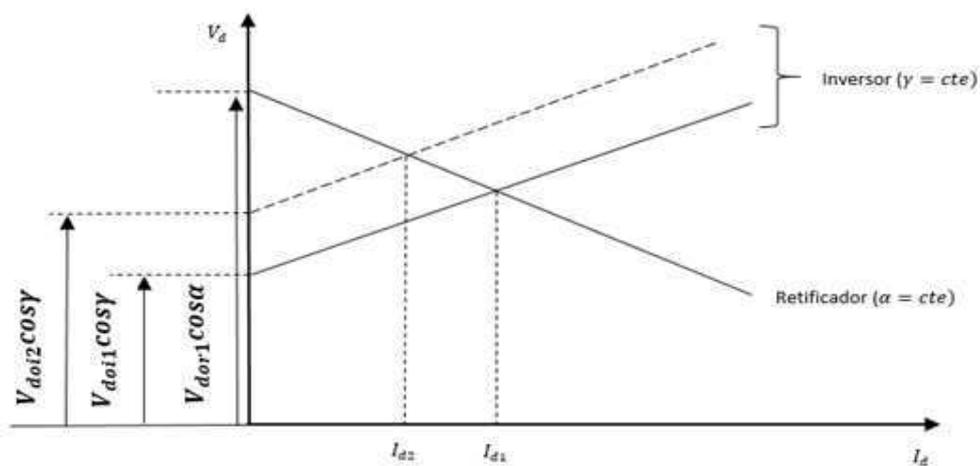
<sup>3</sup>  $R_d$  Representa a resistência da linha de transmissão.

Figura 18 -Característica  $V_d \times I_d$  para um ponto nos terminais do retificador. <sup>4</sup>



Se não houvesse nenhum controle no sistema HVDC, pequenas variações nas tensões AC e conseqüentemente nas tensões internas dos conversores, causariam variações na corrente do elo. A Figura 19, mostra que um pequeno aumento na tensão da ponte inversora, causa uma considerável redução na corrente  $I_d$  que irá variar de  $I_{d1}$  para  $I_{d2}$ .

Figura 19 – Variação da corrente  $I_d$  em função da tensão AC do sistema conectado ao inversor. <sup>5</sup>



Não é possível a operação satisfatória de um elo DC quando são verificadas ocorrências de grandes variações na corrente  $I_d$ . A solução para evitar estas variações, consiste em adotar um sistema de controle que seja capaz de manter essa corrente

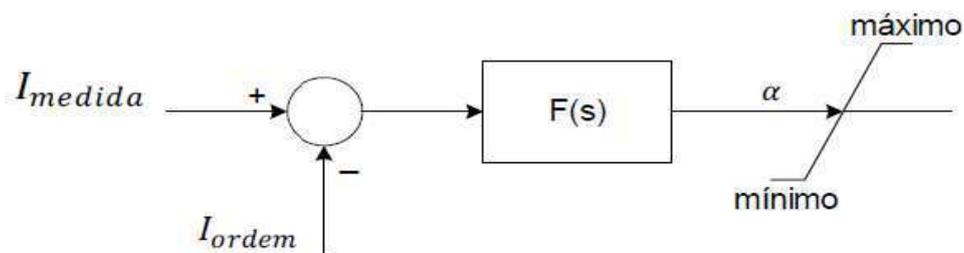
<sup>4</sup> Elaborado com base em JÚNIOR, 1984.

<sup>5</sup> Elaborado com base em JÚNIOR, 1984.

constante e partir de variações nos ângulos de disparo e de extinção respectivamente ( $\alpha$  e  $\gamma$ ). O valor mínimo do ângulo de extinção adotado é de  $15^\circ$ . De acordo com VIDIGAL JÚNIOR (1984), uma variação de  $\gamma$  levaria a um consumo de potência reativa muito elevada. Já o valor mínimo comumente adotado para o ângulo de disparo é de  $5^\circ$ . Se  $\alpha$  assumir um valor menor que  $5^\circ$ , é necessário um dispositivo que seja capaz de controlar a corrente  $I_d$ , de forma a mantê-la constante.

O dispositivo capaz de manter a corrente do elo constante, é o CCC (*Constant Current Control*). Este dispositivo é formado por uma malha de realimentação da corrente da linha DC que atua no sentido de aumentar ou diminuir o ângulo de disparo. A corrente em que o elo deve operar é denominada  $I_{ordem}$  (VIDIGAL JÚNIOR, 1984). O sistema de controle do retificador capaz de manter  $I_d$  constante é mostrado na Figura 20.

Figura 20 – Diagrama de blocos do controle do retificador

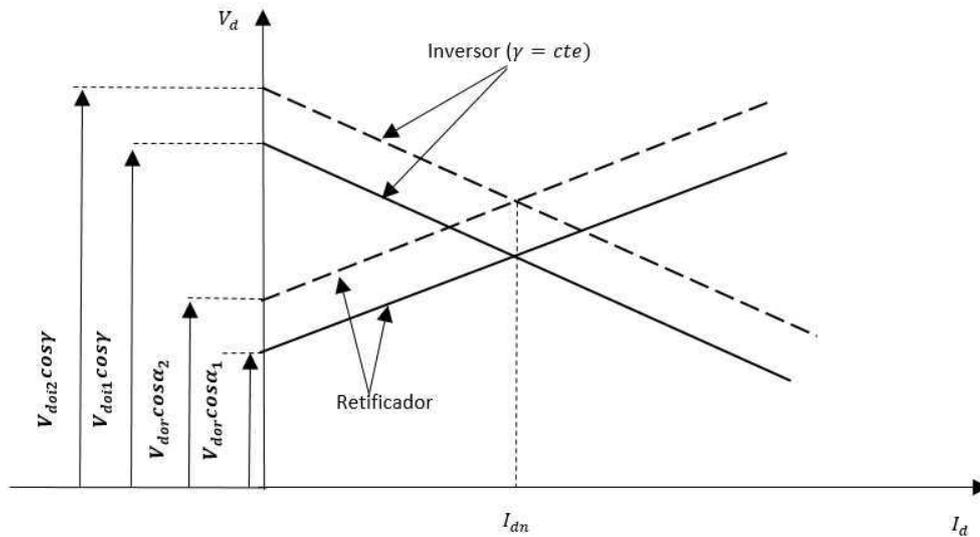


Fonte: (GOMES, 2012)

Sendo  $F(s)$  uma função de controle do tipo proporcional-integral. De acordo com KUNDUR (1994), com o regulador proporcional integral, a característica de controle de corrente é praticamente vertical.

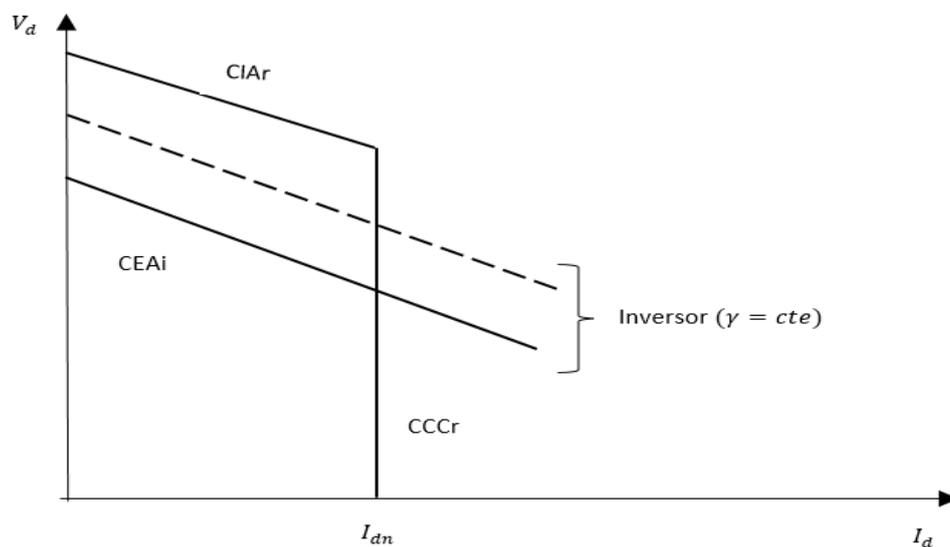
As variações nas tensões AC deverão ser compensadas através da variação do ângulo  $\alpha$ , como ilustrado na figura abaixo.

Figura 21 – Característica do sistema de controle com o retificador possuindo CCC e CIA – característica real.<sup>6</sup>



A característica do retificador pode ser representada por uma reta vertical, como na figura abaixo (VIDIGAL JÚNIOR, 1984).

Figura 22 – Representação equivalente da característica do sistema de controle com o retificador possuindo CCC e CIA<sup>7</sup>



Existe ainda no retificador, um dispositivo denominado CIA (*Constant Ignition Angle*), que é responsável por limitar  $\alpha$  impedindo que ele seja menor que um valor mínimo. Pode-se observar nas Figuras 20 e 21 que foi mantido o mesmo valor de  $\gamma$  para as duas características do inversor. Isso é resultado da existência de um dispositivo que

<sup>6</sup> Elaborado com base em VIDIGAL JÚNIOR, 1984.

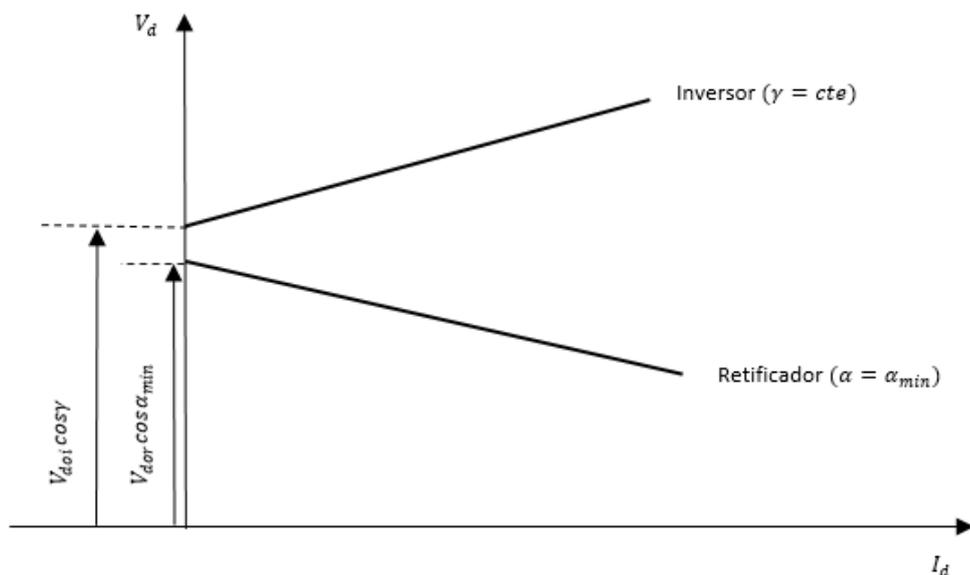
<sup>7</sup> Elaborado com base em VIDIGAL JÚNIOR, 1984.

tem por função manter este ângulo constante. Este dispositivo é denominado CEA (*Constant Extinction Angle*).

A mudança de *tap* do transformador que fica conectado a ponte retificadora é realizada de forma automática, de modo a se manter o ângulo  $\alpha$  dentro de uma faixa de  $10^\circ$  a  $20^\circ$ . Segundo VIDIGAL JÚNIOR (1984), esta faixa corresponde a um compromisso de se manter um elevado fator de potência e um valor suficientemente alto para  $\alpha$ . Já no transformador conectado à ponte inversora, a mudança nos taps deve ser feita de modo a manter a tensão AC no inversor, próxima do valor nominal.

O controle do inversor é normalmente composto pelo CEA (*Constant Extinction Angle*). Porém, quando a tensão AC é reduzida no retificador, pode existir a necessidade de transferir o controle de corrente para o inversor, prevenindo o desligamento do elo DC nos casos em que o controle do retificador atingir um  $\alpha_{min}$ . Existe também, casos em que não é possível a existência de um ponto de operação para o sistema, como ilustra a Figura 23, fazendo com que a corrente do elo tenda à zero. Por exemplo, casos em que ocorrem variações nas tensões de sistemas AC de modo que, mesmo o ângulo de disparo apresentando um valor mínimo, não é possível evitar a redução de  $I_d$ .

Figura 23 – Análise operacional para grandes reduções da tensão no retificador e/ou elevações de tensão no inversor. <sup>8</sup>

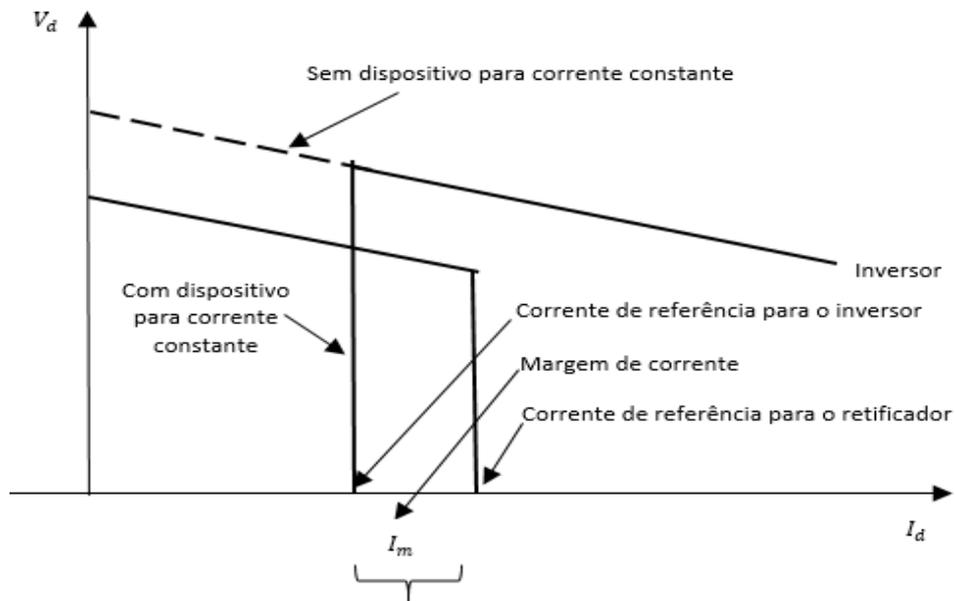


A fim de se evitar a ocorrência desse tipo de problema, o inversor também é provido com um dispositivo CCC idêntico ao da ponte retificadora, diferindo apenas no

<sup>8</sup> Elaborado com base em VIDIGAL JÚNIOR, 1984.

que diz respeito ao valor da corrente de referência, que se caracteriza por ser inferior ao do retificador de um valor  $I_{margem}$ .

Figura 24 – Retificador dotado de CIA e CCC, e inversor dotado de CEA e CCC.<sup>9</sup>



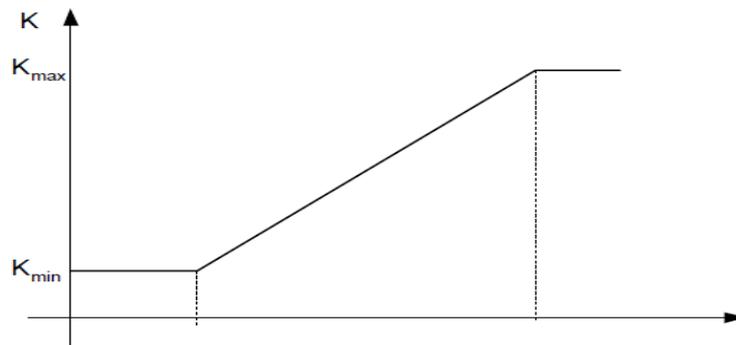
De acordo com VIDIGAL JÚNIOR (1984), essa diferença entre as correntes de referência do retificador e do inversor objetiva fazer com que o inversor seja capaz de assumir o controle da corrente quando a tensão AC da barra retificadora for reduzida significativamente ou a tensão AC na barra inversora aumentar de forma a não poder ser compensada com a atuação do ângulo  $\alpha$ .

A corrente de margem ( $I_{margem}$ ) deve ser especificada em torno de 10 a 15% da corrente nominal do elo DC. Este valor permite compensar eventuais erros dos instrumentos de medição e evitar grandes variações na corrente do elo (KUNDUR, 1994). A Figura 25 mostra o diagrama de blocos do controle do inversor em que  $G(s)$  é uma função de controle do tipo proporcional integral.

<sup>9</sup> Elaborado com base em VIDIGAL JÚNIOR, 1984.



Figura 26 – Função do VDCOL

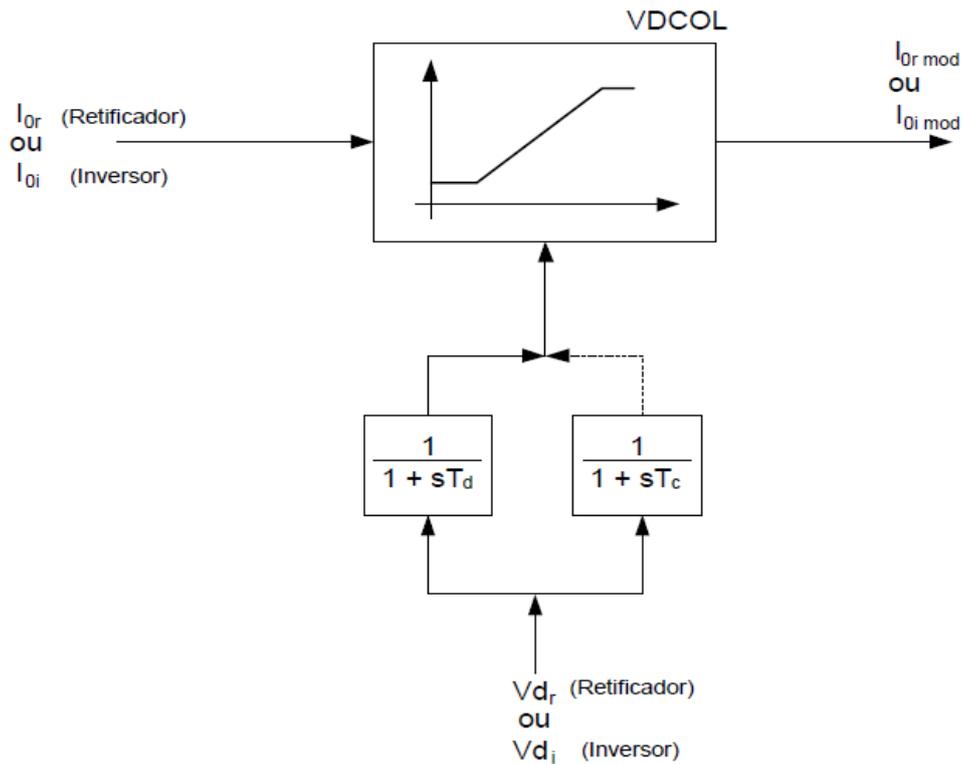


Fonte: (FERNANDES, 2005).

Para situações de decréscimo ou elevação gradual na tensão média, se faz necessário um cuidado maior a fim de limitar a atuação do VDCOL. Neste sentido, são descritas, de acordo com FERNANDES (2005), duas situações, em que a primeira consiste na ocorrência de alguma condição anormal do sistema, fazendo com que a tensão decresça. Desta forma, é necessária uma atuação rápida do limitador a fim de evitar maiores problemas para o sistema HVDC. Esta resposta pode ser obtida considerando-se uma constante de tempo  $T_d$  pequena. Na situação em que a tensão DC se apresenta crescente, tem-se uma indicação de que o sistema está se recuperando de uma falta. Neste caso, é necessário limitar a taxa de crescimento da corrente de forma a evitar possíveis falhas de comutação no inversor. Para que isto seja possível, deve-se introduzir um atraso adicional no circuito de medição da tensão, cuja constante de tempo  $T_c$  é ajustada para um valor aproximadamente 10 vezes maior que a constante de tempo  $T_d$ .

A entrada para o bloco de controle do VDCOL é dada por  $\frac{G(s)}{(1+sT_{VDCOL})}$ . Em que  $T_{VDCOL}$  pode assumir valores diferentes quando a corrente de ordem estiver aumentando ( $T_c$ ) ou diminuindo ( $T_d$ ).

Figura 27: Diagrama de Blocos VDCOL



Fonte: (FERNANDES,2005)

### 3.3.2 $\alpha$ MÍNIMO DO INVERSOR

Quando ocorrem reduções na tensão do sistema AC junto ao retificador, o inversor deverá assumir o controle da corrente, procurando mantê-la igual a de referência ( $I_{ordem} - I_{margem}$ ) através do aumento do ângulo de extinção. Porém, existe um limite para o aumento de  $\gamma$  que estabelece que o ângulo  $\alpha$  do inversor não deve ser menor que  $110^\circ$ , para evitar a reversão de tensão do inversor. O dispositivo responsável por esta função é o CIA – *Constant Ignition Angle*.

### 3.3.3 CONTROLE DE TENSÃO

O controle de tensão pode ser feito a partir da variação do controle CEA (*Constant Extinction Angle*). Porém, ao invés de regular o ângulo de extinção em um valor fixo, um controle de tensão realimentado pode ser utilizado com o objetivo de manter a tensão constante num determinado ponto da linha DC. Este tipo de controle apresenta a

vantagem da característica do inversor ser uma reta horizontal, como mostra a figura abaixo. Além disso, o controle de tensão conduz a um valor um pouco maior de  $\gamma$  e menos suscetível a falhas de comutação. Normalmente este controle é capaz de manter o ângulo de extinção maior que  $18^\circ$  (KUNDUR, 1994).

### 3.4 ASPECTOS SIGNIFICATIVOS DOS PRINCÍPIOS BÁSICOS DE CONTROLE

Segundo KUNDUR (1994), um sistema HVDC convencional é composto basicamente de controle de corrente para limitar a sobrecorrente minimizando os danos causados por curto-circuito e para prevenir possíveis desligamentos do sistema devido a flutuações da tensão AC. Os principais aspectos que compõe o sistema básico de controle são:

- A ponte retificadora é provida do controle de corrente e do controle de  $\alpha_{min}$ . O valor de  $\alpha_{min}$  é ajustado de modo que exista uma tensão positiva suficiente sobre a válvula no instante de disparo, assegurando sua comutação. No modo de controle de corrente, um regulador realimentado controla o ângulo de disparo e, portanto, a tensão DC para manter a corrente contínua igual à corrente de ordem. O controle de variação do tap do transformador do conversor traz o ângulo de disparo  $\alpha$  para a faixa desejada. Um tempo de atraso é utilizado para prevenir alterações desnecessárias durante a excursão do  $\alpha$ ;
- A ponte inversora é provida de um controle de ângulo de extinção mínimo (CEA) e de um controle de corrente. No modo CEA,  $\gamma$  é regulado para um valor, que representa um balanço entre consumo aceitável de reativo e pequeno risco de falha de comutação. Enquanto o controle CEA é o usual, existem variações que incluem o controle de tensão. Controle de variação do tap é utilizado para trazer o ângulo de extinção para perto da faixa desejada de  $15^\circ$  a  $20^\circ$ ;
- Em condições normais de operação, o retificador está em modo de controle CCC e o inversor no modo CEA. Se ocorrer uma redução da tensão AC no terminal do retificador, o ângulo de disparo do retificador irá diminuir até atingir o limite

$\alpha_{min}$ . Neste ponto, o retificador comuta para o controle de  $\alpha_{min}$  e o inversor assumirá o controle de corrente (CCC);

- Para garantir a operação satisfatória e segura dos equipamentos, são estabelecidos limites para a ordem de corrente, tais como: limite máximo, limite mínimo e limite de corrente dependente da tensão.

O tópico a seguir descreve como o sistema HVDC deve se comportar quando submetido a distúrbios e de como deve atuar o controle das pontes conversoras a fim de restaurar a operação normal do sistema.

### 3.5 RESPOSTA DOS SISTEMAS AC/DC QUANTO À OCORRÊNCIA DE FALTAS

A operação da transmissão HVDC pode ser afetada por falhas no sistema AC, na linha DC, nos conversores. O impacto destas falhas é refletido diretamente na ação do controle dos conversores (KUNDUR, 1994).

Em sistemas AC são utilizados relés e disjuntores para detectar e remover estas falhas. Em contraste, a maioria das falhas associadas a sistemas DC ou são auto compensadas ou são apuradas através de uma ação de controle do conversor. Em apenas alguns casos se faz necessário tirar uma ponte ou o sistema inteiro fora de operação. Desse modo, o controle dos conversores desempenha um importante papel na resposta satisfatória dos sistemas HVDC quando há a ocorrência de falhas. O presente trabalho tratará apenas das falhas AC nos barramentos das pontes conversoras. Para que sejam analisadas as falhas na linha DC se faz necessário adicionar um ajuste diferenciado do controle do retificador e do inversor no modelo utilizado para as simulações.

#### 3.5.1 FALTAS NA LINHA DC

A ocorrência de falhas nas linhas DC são quase sempre verificadas como falhas fase-terra. Falhas fase-fase são incomuns nesse tipo de sistema, uma vez que para que isto ocorra é necessário um dano físico considerável.

### 3.5.2 FALHA NOS CONVERSORES

A maioria dos distúrbios nas estações conversoras DC necessitam desligar um grupo de válvulas ou até mesmo um polo. Uma falta em um grupo de válvulas, a menos que seja de natureza reduzida, irá promover a retirada de operação de um polo e cessar a transmissão de potência. Normalmente, nestes casos, é ordenado uma redução rápida da corrente para zero. Conseqüentemente, o ângulo de disparo do retificador é desviado para um valor mínimo de  $90^\circ$ , eventualmente, também para a região do inversor. A corrente no polo pode ser levada à zero em menos de 30 ms.

### 3.5.3 FALHAS NO SISTEMA AC

Segundo KUNDUR (1994), durante distúrbios transitórios no sistema AC, a resposta do sistema HVDC é muito mais rápida que o sistema HVAC. O comportamento do sistema de corrente contínua durante a ocorrência da perturbação é de forma a reduzir temporariamente a potência transmitida ou até mesmo desligar o sistema até que haja a recuperação do sistema AC suficiente para permitir a reinicialização e o restabelecimento da energia. Falhas de comutação e recuperação de faltas em sistemas AC representam aspectos importantes da operação de sistemas de corrente alternada. Pode-se dividir a análise das falhas no sistema AC em dois casos:

- Faltas no lado AC do Retificador:

Durante a ocorrência de faltas trifásicas remotas, a tensão interna do retificador cai rapidamente. Isto resulta numa redução da tensão contínua do mesmo e, conseqüentemente da corrente. O regulador de corrente irá reduzir o ângulo de disparo para restaurar a corrente, aumentando a tensão.

Se  $\alpha$  atingir o limite mínimo, o retificador deverá mudar para o modo de controle CIA, a fim de controlar o valor mínimo do ângulo de disparo. Isso transfere o controle de corrente para o inversor, cuja ordem de corrente é menor do que a do retificador por uma quantidade igual à corrente de margem. Se a baixa tensão persistir, os *taps* irão atuar a fim de restaurar a tensão contínua e a corrente ao normal.

Dependendo da magnitude da queda de tensão, o VDCOL pode regular a transferência de potência e a corrente. Durante faltas trifásicas, a tensão de comutação do retificador cai significativamente. O sistema de controle VDCOL desliga o sistema DC

até que a falta seja eliminada. Na teoria, a potência DC pode ser transferida a tensões muito baixas no retificador. Isso exige que o inversor assuma o controle de corrente, reduzindo sua tensão, aumentando  $\beta$ . Falhas monofásicas e faltas fase-fase não costumam resultar em um desligamento do link DC.

Durante a ocorrência de faltas assimétricas, as harmônicas DC podem ser maiores que o normal. Podendo produzir componentes harmônicas de 2° ordem. Os filtros e reatores de linha não são eficazes para esses harmônicos.

- Faltas no Lado AC do Inversor:

Faltas trifásicas remotas resultam em pequenas quedas de tensão no inversor e a ocorrência do aumento da corrente  $I_d$ . O CCC no retificador e o CEA no inversor são responsáveis por controlar estas mudanças. Caso a baixa tensão ainda persista, poderão ocorrer mudanças no tap para restaurar o ângulo de disparo do conversor e a tensão DC (KUNDUR, 1994).

Se a queda de tensão é significativa, a redução da tensão de comutação pode levar a uma falha temporária de comutação no conversor, antes que ocorra qualquer ação de controle. Com o funcionamento do inversor a um ângulo de extinção de 18° é possível que haja uma redução de tensão de 10% a 15%, fazendo com que ocorra a falha de comutação. O sistema leva de 1 a 2 ciclos para que uma falta seja efetivamente extinta. Depois disso, alguma potência pode ser transmitida com a tensão do retificador reduzida para coincidir com a tensão contínua do inversor.

O aumento resultante na potência reativa pode necessitar de redução da corrente contínua. A função de controle VDCOL normalmente fornecida pelo sistema DC fará com que haja essa redução de corrente contínua. Durante condições extremas de queda de tensão, falhas de comutação repetidas não podem ser evitadas. Por conseguinte, pode ser necessário bloquear as válvulas até que a tensão AC se reestabeleça. Quando a falha for solucionada, a taxa permitida de restauração irá depender a força do sistema AC. Os controles são ajustados para proporcionar a taxa desejada de acúmulo de potência. O desempenho do sistema de potência seguindo qualquer perturbação do sistema, depende muito da interação do sistema AC/DC. Ele é também influenciado pelas características de projeto e ajustes de resposta associados ao controle dos conversores. Estes tendem a variar de acordo com os fabricantes.

### 3.5.4 RECUPERAÇÃO DE FALTAS DO SISTEMA AC

O desempenho do sistema pós-falta quando ocorrem falhas no sistema de corrente alternada é muito mais sensível aos parâmetros do sistema do que para falhas no sistema DC. A recuperação do sistema AC após uma falta é mais fácil e pode ser ainda mais rápida quando o sistema AC é considerado forte. Sistemas AC fracos podem ter dificuldade em fornecer energia reativa suficiente à taxa necessária para a rápida recuperação do sistema DC. Tais sistemas também apresentam altas sobretensões temporárias e graves distorções devido aos harmônicos causados pela corrente de magnetização. Estes podem causar falhas de comutação subsequentes. Conseqüentemente, a taxa de recuperação tende a ser lenta. O tempo de recuperação para o sistema DC é de até 90% do seu poder de pré-falta, tipicamente na faixa de (100ms a 500ms), dependendo das características DC e AC do sistema e das características de controle utilizadas (KUNDUR, 1994).

As características do sistema DC que influenciam na taxa de recuperação são a indutância da linha, capacitância, tamanho do reator DC, frequências harmônicas ressonantes, transformadores e filtros. Já para o sistema de corrente alternada, tem-se as seguintes características: baixa impedância, harmônicos de 2º e 4º ordem, características de amortecimento de cargas próximas do sistema DC, a inércia do sistema e o método de controle empregado. (KUNDUR, 1984)

A atuação do VDCOL desempenha um papel significativo na determinação da recuperação de faltas. Ele limitará a ordem de corrente em função da queda de tensão DC ou da tensão AC. Conseqüentemente, a demanda de potência reativa é reduzida durante períodos de queda de tensão. Isso ajuda a evitar a deterioração da tensão do sistema de corrente alternada. Na sequência de eliminação da falta, o limite de ordem de corrente imposta pelo controle VDCOL pode ser removido após um atraso e, gradualmente a uma taxa de incremento desejado.

Do ponto de vista da estabilidade do sistema AC e da minimização da interrupção de energia DC, uma recuperação muito lenta é indesejável. As estratégias de controle devem, portanto, ser adaptadas para atender as necessidades específicas de uma aplicação de modo a maximizar a taxa de recuperação sem comprometer a recuperação segura do sistema DC. Essas estratégias deverão basear-se em um estudo detalhado do sistema. (KUNDUR, 1994)

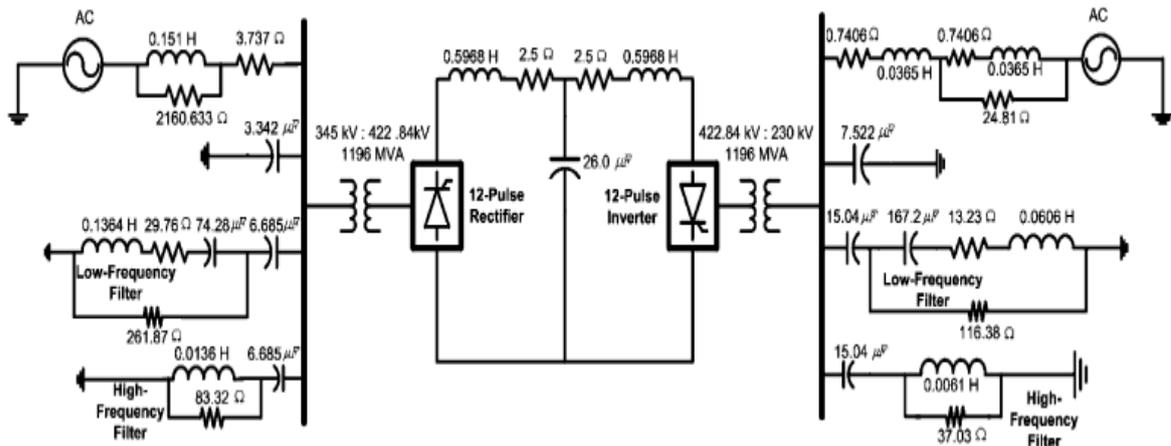
## 4 MODELO DE REFERÊNCIA DO CIGRÉ E SIMULAÇÕES REALIZADAS

Neste capítulo serão apresentados o modelo de referência do CIGRÉ e os seus principais componentes, a modelagem do sistema no ATPDraw e os principais aspectos a respeito desta modelagem e os resultados obtidos a partir das simulações realizadas em regime permanentes.

A ideia de estabelecer um sistema de referência que possibilitasse a comparação de resultados e de métodos de simulações diferentes não é nova. O primeiro modelo para estudos de sistemas de transmissão DC foi proposto por Ainsworth em 1985. Alguns anos depois, este modelo foi adaptado por um grupo de estudos do CIGRÉ com o objetivo de tornar possível a análise e estudos sobre os aspectos de controle destes sistemas. Este modelo de referência vem sendo utilizado por fabricantes e pesquisadores do mundo todo para testes e avaliações de desempenho de sistemas HVDC (SZECHTMAN, M. et. al. 1991).

Como apresentado na Figura 29, o HVDC *Benchmark* do CIGRÉ é constituído por um arranjo monopolar de  $\pm 500$  kV e 1000 MW, estações conversoras de 12 pulsos conectadas à sistemas AC relativamente frágeis, caracterizados por uma razão entre a potência transmitida pelo elo e o nível de curto-circuito da rede (SCR) menor do que 2.5, propriedade esta que para fins do sistema de controle, cria graus de dificuldade maiores no que diz respeito ao fenômeno da falha de comutação e outros relacionados com condições dinâmicas de operação (SILVA et. al., 2013).

Figura 28 - Diagrama Unifilar do Sistema HVDC Benchmark do CIGRÉ



Fonte: (FARUQUE et. al., 2006)

Na Tabela 1 são mostrados os respectivos dados do modelo de referência do CIGRÉ. Esta tabela foi elaborada com base nos dados fornecidos pelo CIGRÉ, disponíveis em (SILVA et. al. 2013).

Tabela 1 – Dados do Modelo de Referência HVDC CIGRÉ

PARÂMETROS	PONTE REFITICADORA	PONTE INVERSORA
Tensão base AC	345 kV	230 kV
Potência base	100 MVA	100 MVA
Tap de Transferência (AT)	1,01 p.u.	0,989 p.u.
Tensão da fonte	$1,088 \angle 22,18^\circ$	$0,935 \angle - 23,14^\circ$
Tensão nominal DC	500 kV	500 kV
Corrente Nominal DC	2 kA	2 kA
Impedância do transformador	0,18 p.u.	0,18 p.u.
Impedância da fonte	$R = 3,737 \text{ Ohm}$	$R = 0,7406 \text{ Ohm}$
Frequência do sistema	50 Hz	50 Hz
Ângulo Mínimo	$\alpha = 15^\circ$	$\gamma = 15^\circ$

As unidades que compõe este modelo apresentam algumas particularidades, dentre elas pode-se destacar (SZECHTMAN, M. et. al. 1991):

- Sistema AC

Para o sistema AC foram selecionados diferentes equivalentes de sistema para ambas as extremidades do modelo de referência HVDC. Foi escolhido um circuito R-R-L para o retificador, que oferece um ângulo de impedância de  $84^\circ$ . Já para o lado inversor, foi escolhido um circuito R-L-L que apresenta ângulos de impedância de  $69^\circ$  e  $75^\circ$ . Nas duas extremidades do sistema foi escolhida uma relação de curto-circuito (SCR) de 2,5 e ESCR de 1.9 com ângulo de amortecimento de  $70^\circ$  no inversor e  $82^\circ$  no retificador. Estes valores podem fornecer graus de dificuldade nos sistemas de controle DC.

- Compensação reativa

O arranjo de compensação reativa do conversor é dado por uma combinação de bancos de capacitores e de filtros AC passa alta e passa baixa.

- Sistema DC

O sistema de transmissão DC é composto por reatores de alisamento e por um equivalente T da linha de transmissão que interconecta as duas estações conversoras. Os parâmetros da linha de transmissão de corrente contínua foram escolhidos para representar um cabo de alta tensão de aproximadamente 100 Km de comprimento.

- Estações conversoras

A estação conversora do modelo de referência é formada por pontes retificadora e inversora tiristorizadas, de 12 pulsos, com ângulo de disparo  $\alpha = 15^\circ$  e ângulo de extinção  $\gamma = 15^\circ$ .

- Transformadores

Os parâmetros adotados para os transformadores, são considerados típicos em instalações HVDC. A reatância de dispersão é de  $x = j0,18 p.u.$ , reatância de saturação no primário  $x_{1s} = j0,344 p.u.$  e no secundário  $x_{2s} = j0,172 p.u.$  A tensão no limite de saturação é de  $1,22 p.u.$

- Controle do sistema DC

O sistema de controle tem por filosofia operativa a manutenção da potência de 1000 MW a ser transferida da estação retificadora para a inversora. Em consonância com a filosofia clássica, estes se baseiam em uma estratégia de controle em malha fechada e destinado a produção dos ângulos de disparo das unidades de retificação e inversão. (FARUQUE, 2006).

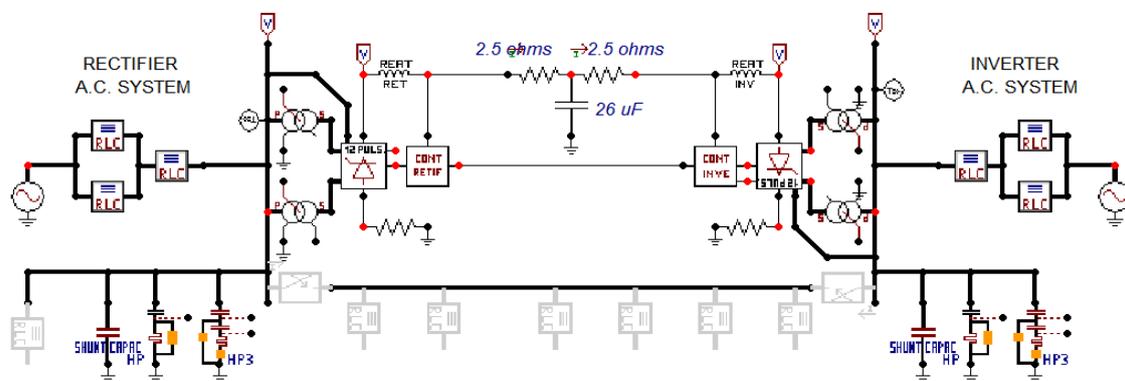
Pode-se então perceber a importância do modelo de referência para estudos a respeito da transmissão HVDC. Este modelo permite que possam ser realizadas diversas análises operativas do sistema, tanto sob condições de regime permanente quando sob a ocorrência de faltas. O capítulo a seguir, apresentará uma modelagem do HVDC *Benchmark* do CIGRÉ no software de simulação ATPDraw, para a realização do estudo de faltas nestes sistemas.

#### 4.1 SISTEMA HVDC MODELADO NO ATPDRAW

Este capítulo objetiva verificar o comportamento do sistema e a atuação dos controles frente a aplicação de diferentes tipos de perturbações nos barramentos AC das pontes conversoras.

O sistema modelado no software de simulação ATPDraw é apresentado na figura a seguir. Este sistema teve como base o modelo projetado no software PSCAD e possui a mesma estratégia de controle para as pontes conversoras (LUZ & SILVA, 2006). Os dados referentes ao modelo encontram-se disponíveis na Tabela 1.

Figura 29 – Sistema modelado no ATPDraw



Na modelagem do sistema apresentado na Figura 30, foram utilizados alguns componentes já existentes no software ATPDraw, tais como, fontes ideais transformadores e ramos lineares para o sistema equivalente AC e para a linha DC. Outros componentes, tais como a ponte conversora de 12 pulsos e o controle da mesma, foram modelados utilizando os recursos *TACS* e *MODELS*.

O recurso *MODELS* consiste em uma linguagem geral de descrição técnica orientada para simulação no domínio do tempo. É uma ferramenta importante quando se deseja descrever o comportamento dinâmico de sistemas complexos. Em ATP, essa linguagem pode ser utilizada para descrever a operação dos componentes de circuito e de componentes de controle. Já a rotina *TACS*, foi desenvolvida para simular interações dinâmicas entre a rede elétrica e o sistema de controle, sendo uma ferramenta capaz de representar as mais complexas técnicas de controle de um sistema elétrico. A rotina *MODELS* é tida como uma versão moderna da *TACS* e destaca-se por apresentar vantagens na representação de sistemas de controle complexos. A seguir, tem-se a descrição dos componentes do modelo utilizado para as simulações.

- Ponte conversora de 12 pulsos

A ponte modelada no ATPDraw possui um único circuito PLL para ambas as pontes de 6 pulsos. O PLL é responsável por gerar os sinais de disparo das válvulas para as pontes conversoras. Os parâmetros estabelecidos foram:

- Número de dois dígitos para identificar os nós do sistema. (Ex: 11)
- Tensão base no lado do transformador de 345 kVA;
- Ganhos proporcional e integral do controle PLL em p.u.;
- Tempo de desbloqueio dos tiristores em segundos;
- Frequência em Hz, resistências em Ohms e capacitâncias em  $\mu F$ .

O número identificador de 2 dígitos serve para gerar diferentes nós internos e facilitar a identificação da tensão e corrente nas válvulas quando eles são solicitados. Algumas funções internas de controle, tal como a medição do ângulo de extinção utilizado pelo controle do inversor e a medição da tensão RMS foram implementados utilizando a linguagem *TACS*. A tela de configuração no ATPDraw para as pontes conversoras encontra-se disponível em anexo.

- Filtros AC

Com o objetivo de manter o sistema dentro de níveis aceitáveis de harmônicos, foram introduzidos filtros de corrente alternada construídos de acordo com os dados fornecidos no *Benchmark* do CIGRÉ. Em anexo encontra-se a disponível a configuração dos parâmetros dos filtros utilizados no modelo.

- Reator de Alisamento para as pontes conversoras com variáveis de inicialização

Foram introduzidas fontes de tensão no lado DC do retificador e fontes de corrente no lado DC do inversor, que são desligadas após 15ms. Estas fontes foram incorporadas no interior do reator de alisamento de cada lado. O reator de alisamento é por responsável amenizar o ripple de corrente da conversão de tensão AC em DC.

- Inicialização das fontes de corrente alternada

Fontes ideais foram introduzidas no barramento de cada lado AC. Parâmetros como, amplitude, frequência e valores de tempo podem ser definidos de acordo com o estado de operação do sistema.

- Controle das pontes conversoras

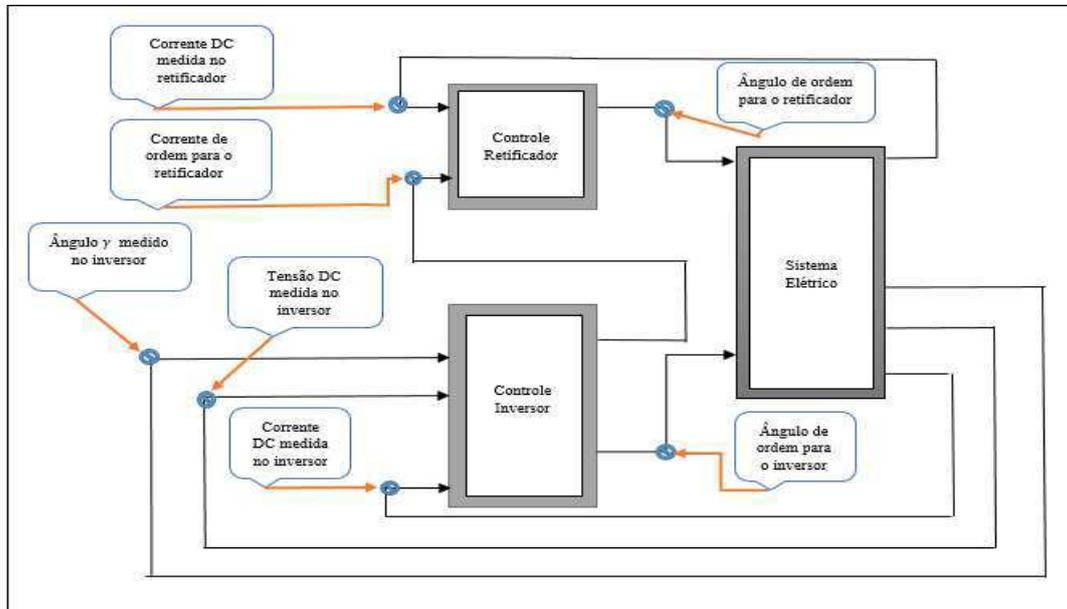
O controle das pontes retificadora e inversora merece destaque por ser o ponto fundamental para o entendimento do comportamento do sistema diante da aplicação de falhas. O modelo de controle consiste principalmente nas medições de  $\alpha$  e  $\gamma$  e da geração de sinais de disparo tanto para o retificador como para o inversor. O controle das pontes conversoras foi desenvolvido usando a rotina MODELS do ATP, e tem a mesma estrutura lógica do controle desenvolvido para o PSCAD. Os detalhes a respeito da programação dos controles e os seus respectivos diagramas de blocos encontram-se disponíveis em anexo. Os principais parâmetros são:

- Tensão e corrente DC;
- Ganhos proporcional e integral do CCC (para o caso do inversor, dois pares de ganho);
- Tempo de medição de tensão e corrente constantes;
- Controle VDCOL;

- A corrente e a frequência do sistema AC que são utilizadas para medir o ângulo de extinção no controle do inversor.

De forma geral, o controle acontece com descrito na Figura 31.

Figura 30 – Controle das pontes conversoras<sup>10</sup>



O sistema de controle do retificador usa a técnica CCC (Controle de Corrente Constante). O valor de referência para a corrente de ordem é obtido no lado do inversor. Isso é feito para garantir a proteção do conversor em situações em que o lado inversor não tem suporte de tensão DC suficiente devido a uma falha, por exemplo. A corrente DC medida no retificador será comparada com o valor de referência da corrente que é obtida no lado inversor, o resultado dessa comparação é um sinal de erro que passa por um controlador do tipo PI para gerar o ângulo de disparo  $\alpha$  necessário para manter a corrente contínua constante. O circuito de disparo das pontes conversoras usa essa informação para gerar os impulsos para as válvulas a partir do controle PLL, responsável por sincronizar os disparos das válvulas.

O controle do inversor é composto pelo CCC, CEA e pelo VDCOL. A corrente de ordem de referência para o controle de corrente atual é obtida através de uma comparação entre a referência externa e a saída do VDCOL. Desta forma, é feita uma comparação entre a corrente medida e a corrente de ordem para produzir um sinal de erro, que é enviado para o controlador PI para produzir o ângulo de disparo para o inversor. O

<sup>10</sup> Elaborado com base em (LUZ & SILVA, 2006).

controle do ângulo de extinção usa outro controlador PI para produzir o ângulo de ordem de  $\gamma$  para o inversor. Os dois ângulos obtidos são comparados e o que apresentar menor valor será utilizado para gerar os pulsos de disparo para a ponte inversora.

As simulações a seguir irão mostrar claramente a atuação destes controles. Os diagramas de blocos de controle do retificador e inversor são os mesmos implementados em LUZ & SILVA, (2006) e encontram-se disponíveis em anexo.

## 4.2 SIMULAÇÕES REALIZADAS

### 4.2.1 SISTEMA OPERANDO NORMALMENTE

A primeira etapa da simulação consiste em verificar se o modelo de transmissão HVDC monopolar projetado no ATPDraw está funcionando corretamente. Deste modo, será apresentado a seguir, os resultados da simulação obtidos para o sistema funcionando sem a aplicação de qualquer tipo de distúrbio. É esperado que o ângulo de disparo do retificador esteja dentro da faixa de  $15^\circ$  à  $20^\circ$  e que o ângulo de extinção do inversor esteja configurado em no mínimo  $15^\circ$  para evitar a ocorrência de falhas de comutação.

Para a análise em regime permanente, foi considerado um tempo de simulação de 1s e um passo de cálculo de  $2,5 \times 10^{-5}$ s. O transitório observado no início das simulações está relacionado com o controle das pontes retificadora e inversora do sistema, com a interação entre as linguagens *TACS* e *MODELS* utilizadas na implementação do mesmo.

Considerando a operação normal do elo, tem-se que o retificador é responsável por controlar a corrente e o inversor por controlar a tensão. As correntes e tensões DC e AC medidas no retificador e no inversor, assim como os ângulos de disparo e de extinção são apresentados nas Figuras 31, 32, 33 e 34.

Figura 31 – Corrente DC medida no retificador

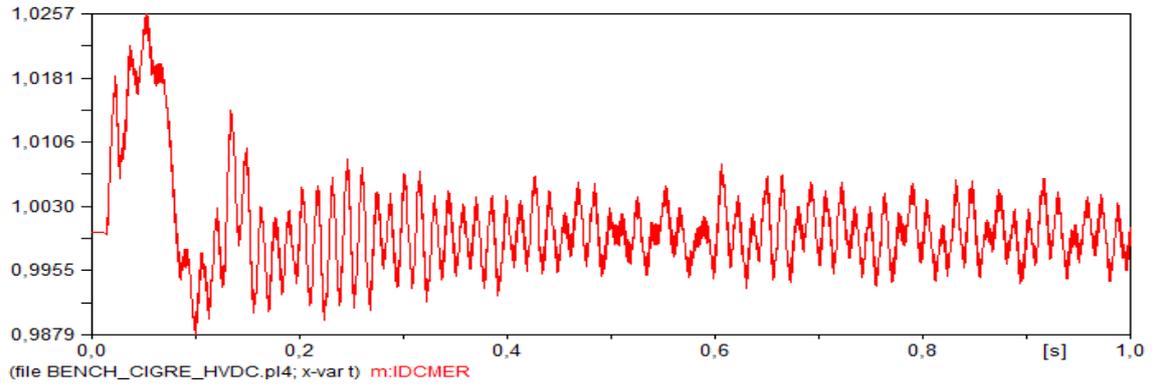


Figura 32 – Corrente DC medida no inversor

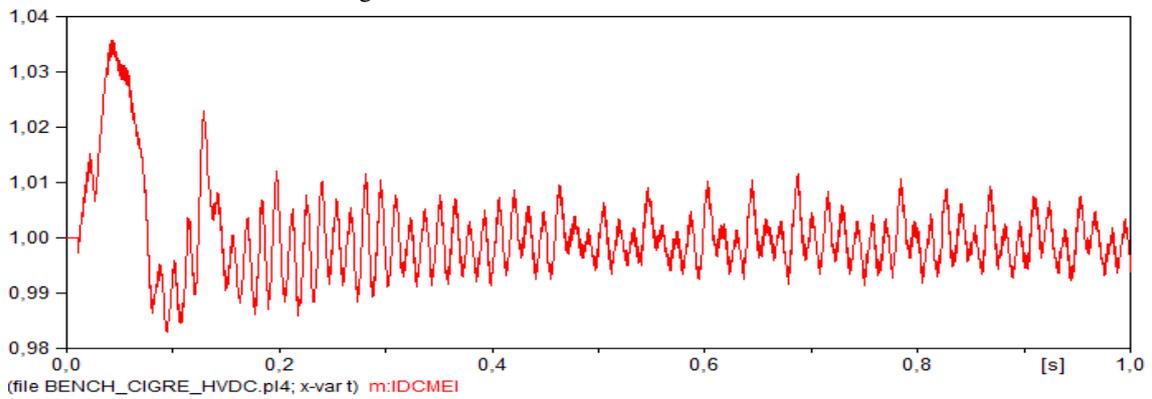


Figura 33 – Tensão DC medida no retificador

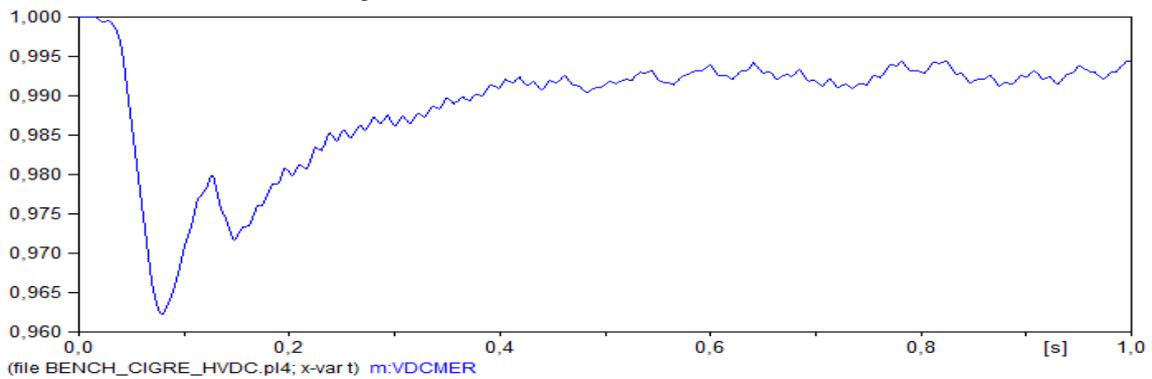
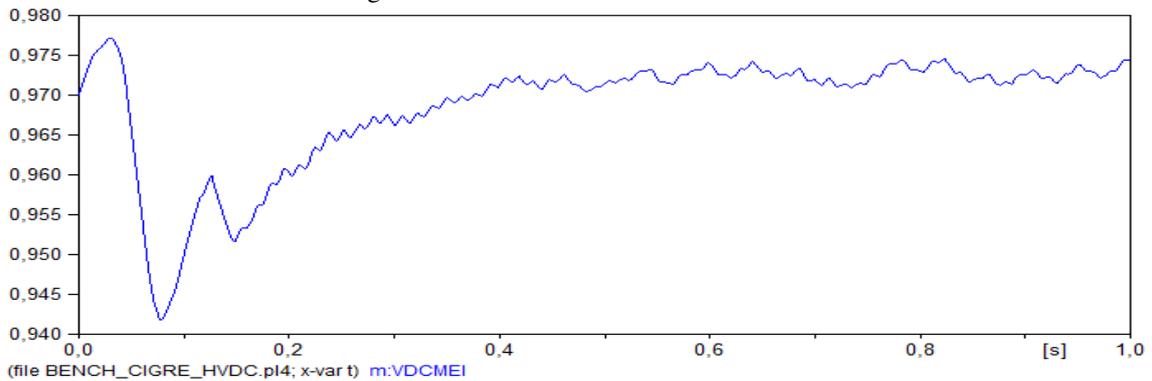


Figura 34 – Tensão DC medida no inversor



A partir da análise das formas de onda apresentadas nas Figuras 31, 32, 33 e 34, pode-se verificar pequenas oscilações em torno no valor de referência que é de 1 p.u.

A tensão contínua produzida no retificador varia dentro da faixa de 0,98 a 0,99 pu no retificador como mostra a Figura 33, e 0,96 a 0,97 p.u no inversor, Figura 34. No caso das correntes DC, Figura 31 e Figura 32, verifica-se uma variação de 0,99 a 1 p.u no retificador e 0,99 a 1,01 p.u no inversor. Na Figura 35 é possível verificar que o ângulo de disparo do retificador é de aproximadamente  $18^\circ$  e do inversor, Figura 36, é de aproximadamente  $141^\circ$ . Na Figura 37 pode-se verificar que o ângulo de extinção do inversor é de aproximadamente  $15^\circ$ .

Figura 35 – Ângulo de disparo do retificador

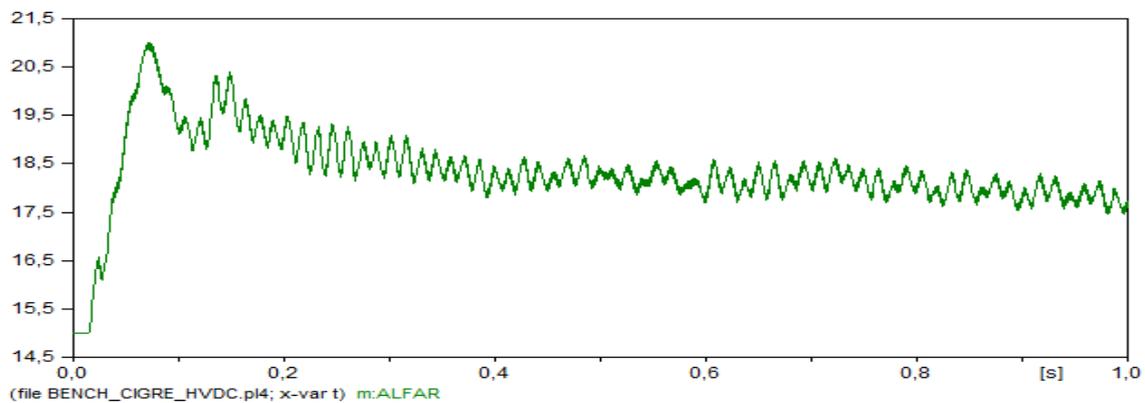


Figura 36 – Ângulo de disparo do inversor

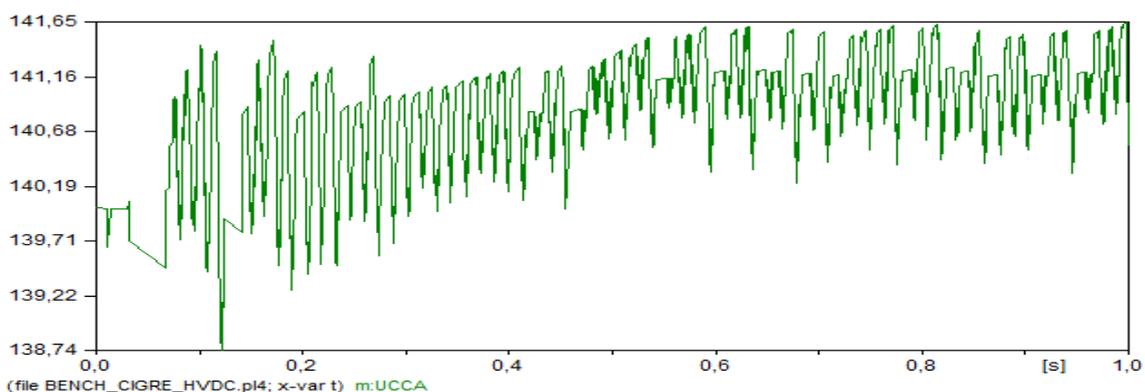


Figura 37 – Ângulo de extinção do inversor

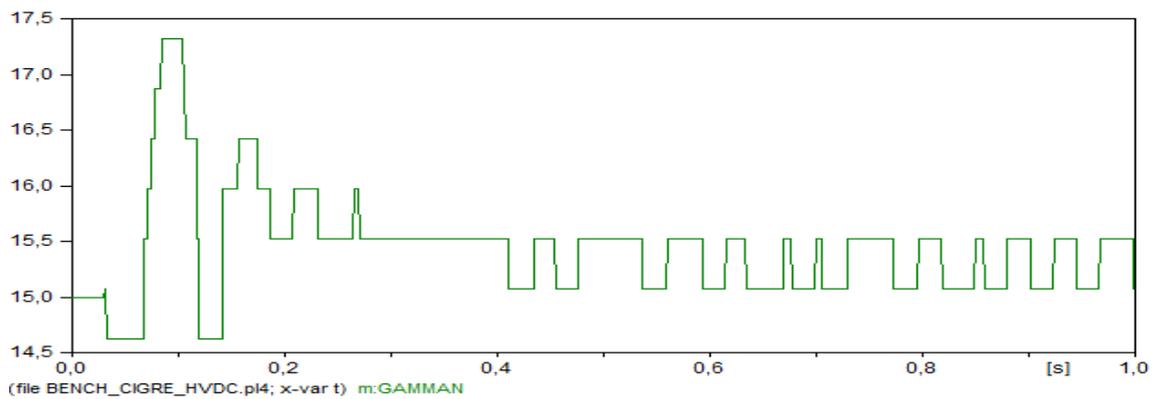


Figura 38 – Tensão AC na fase A do retificador

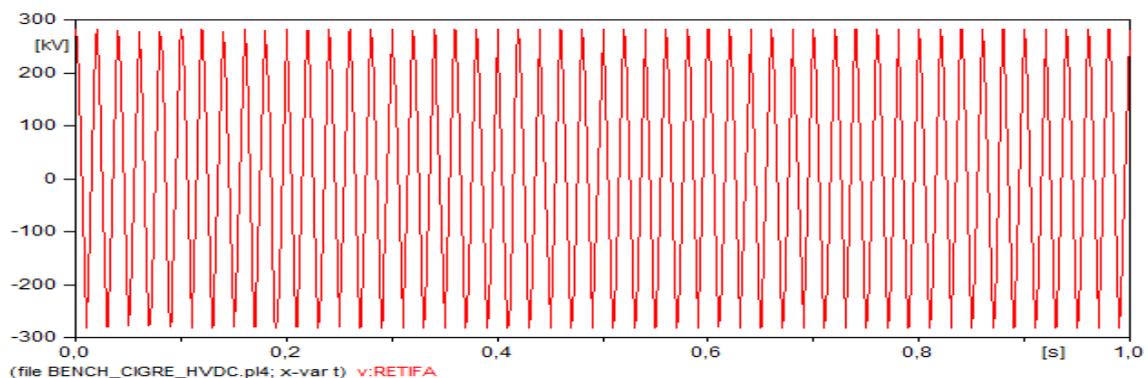
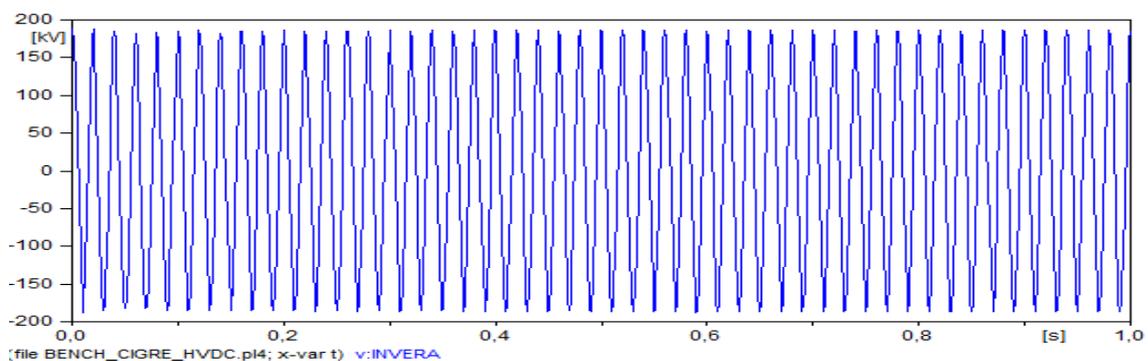


Figura 39 – Tensão AC na fase A do inversor



#### 4.2.2 FALTA MONOFÁSICA NO LADO AC INVERSOR

Uma falta monofásica para o terra com duração de 50ms, de 0,22 s à 0,27 s, é aplicada na fase A do lado AC do inversor. Diante desse tipo de falta, é esperado que o controle CCC do retificador atue na tentativa de manter a corrente do elo constante. É esperado também que, devido a queda de tensão, o VDCOL atue reduzindo a corrente de ordem. A atuação destes controles pode ser percebida a partir da análise dos gráficos obtidos na simulação.

Quando o distúrbio é aplicado ao sistema, devido a redução da tensão AC na fase A do inversor mostrada na Figura 40, ocorre uma falha de comutação no terminal do mesmo que pode ser percebida a partir da redução do ângulo de extinção do inversor para zero, como pode ser observado na Figura 42. Como resultado desta queda de tensão AC na fase A do inversor, é possível verificar na Figura 44 a ocorrência de um colapso de tensão DC no sistema.

Figura 40 – Tensão AC na fase A do lado inversor durante falta monofásica para o terra

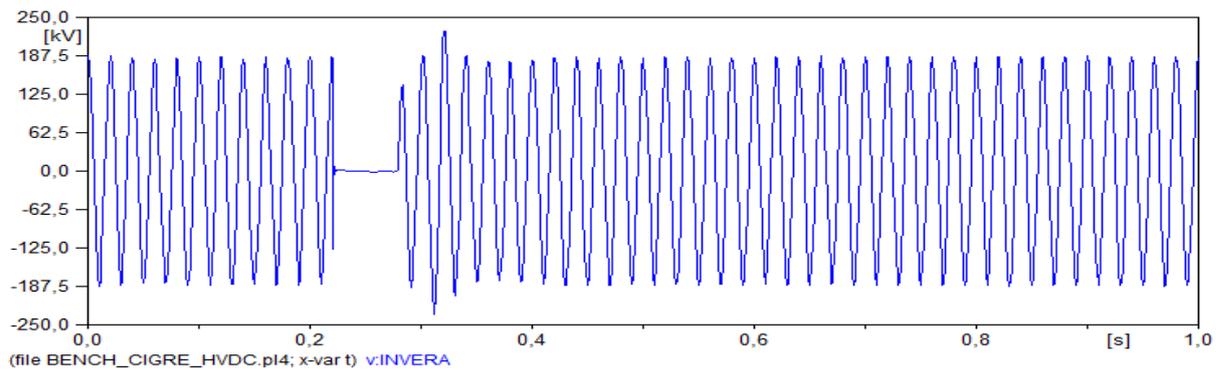


Figura 41 – Tensão DC no inversor durante falta monofásica para o terra no lado AC do inversor

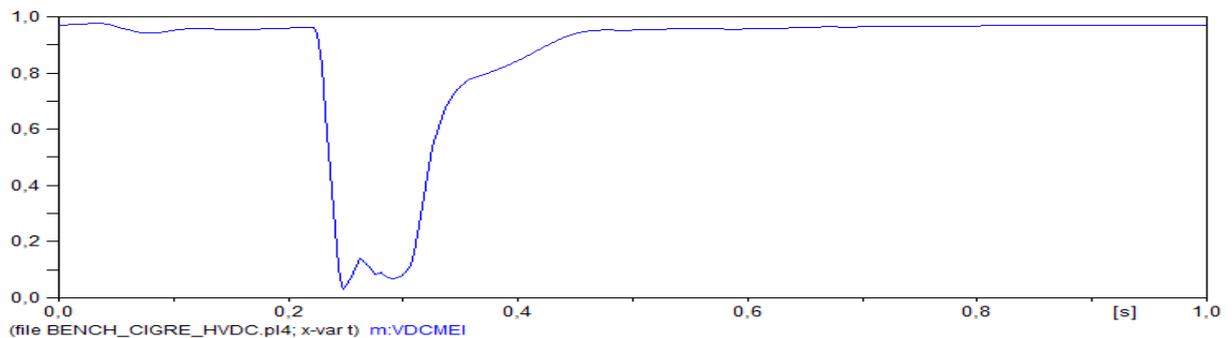


Figura 42 – Ângulo de extinção do inversor durante falta monofásica para o terra no lado AC do inversor.

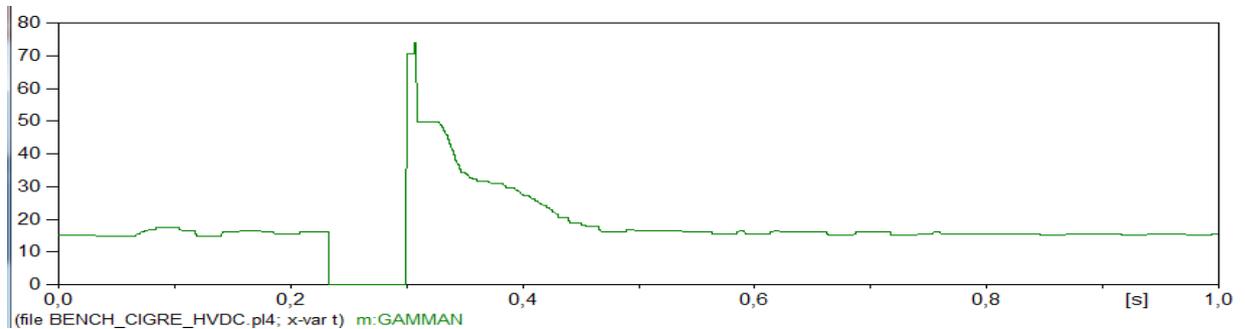
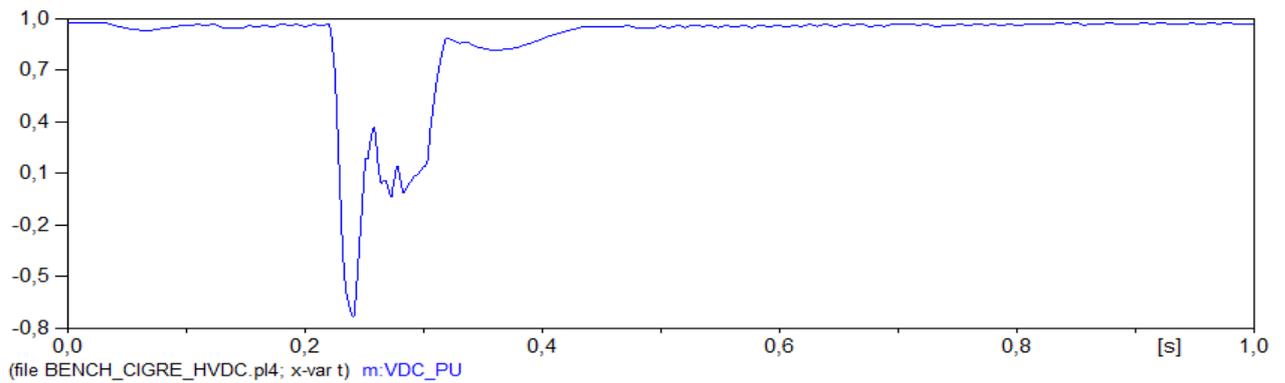


Figura 43 – Colapso de tensão DC durante falta monofásica no lado AC do inversor



É possível verificar na Figura 44, que a corrente DC medida no inversor apresenta um pico de aproximadamente 2,5 p.u e depois atinge um limite mínimo com algumas oscilações. Já a corrente medida no retificador, Figura 45, apresenta um pico de aproximadamente 1,6 p.u e em seguida sofre uma redução devido a atuação do CCC, que irá elevar o valor do ângulo de disparo do retificador para tentar manter a corrente constante. Durante o pico de corrente, é possível observar na Figura 46 que o  $\alpha$  do retificador atinge aproximadamente  $105^\circ$ , levando-o a operar como inversor, na tentativa de limitar o curto-circuito.

Figura 44 – Corrente DC no inversor durante falta monofásica para o terra no lado AC do inversor

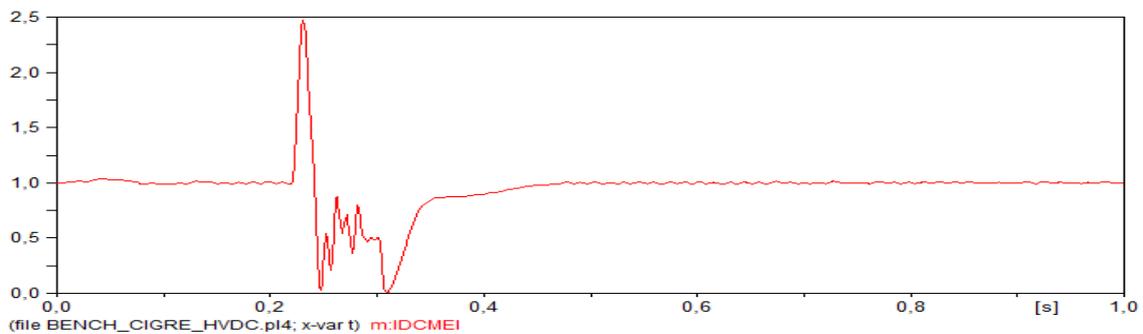
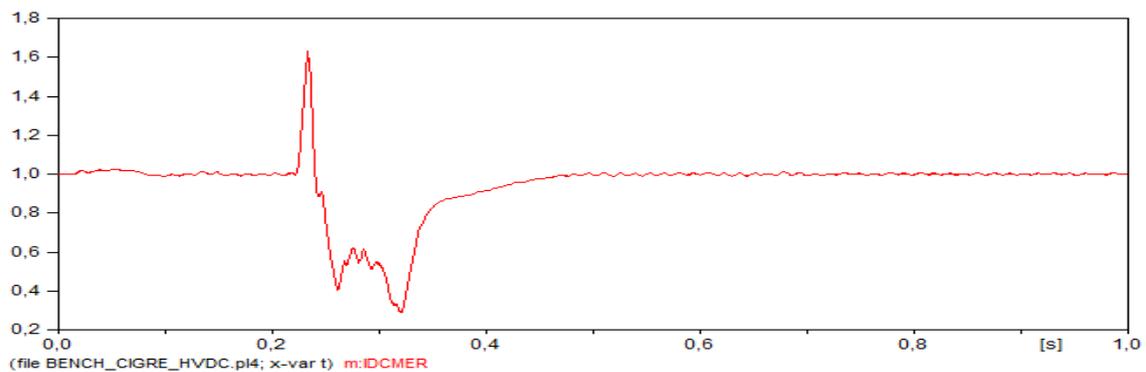


Figura 45 – Corrente DC no retificador durante uma falta monofásica para o terra no lado AC do inversor.



A queda de tensão DC é percebida pelo VDCOL, que irá reduzir a corrente de ordem durante a falta, para um valor mínimo, reduzindo assim, o valor da corrente DC. Esse comportamento pode ser observado na Figura 47. O processo de recuperação é iniciado imediatamente após a falta e a corrente é incrementada de acordo com o controle do limitador de ordem de corrente. O sistema leva aproximadamente 200 ms para se recuperar completamente.

Figura 46 – Corrente de ordem durante a atuação do VDCOL.

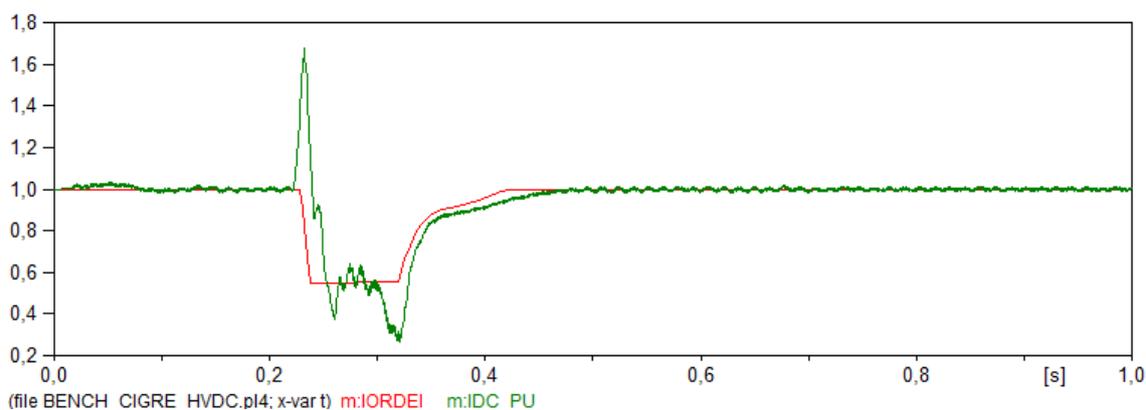
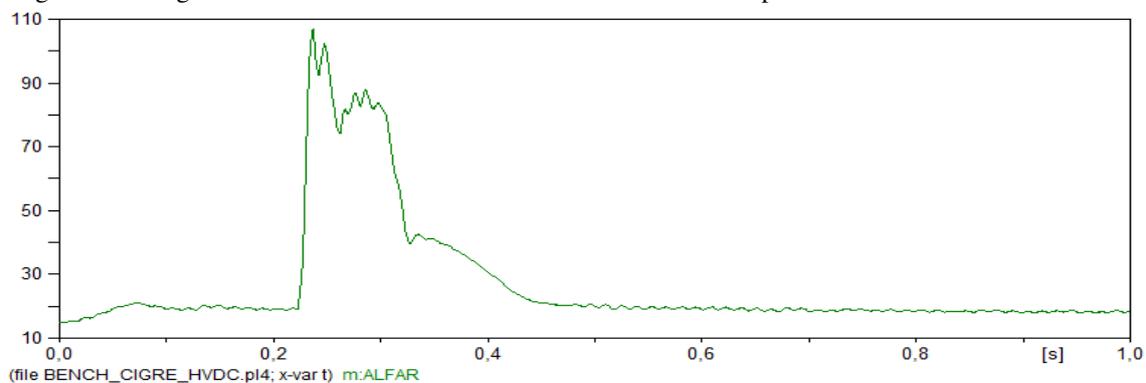


Figura 47 – Ângulo de ordem do retificador durante falta monofásica para o terra no lado AC do inversor



Durante o período da falta o inversor apresenta falhas de comutação, observadas a partir do pico de corrente e pela queda de tensão próximos de 0,25s nas Figuras 41 e 42. Após a falta ser eliminada, o VDCOL opera elevando a referência de corrente novamente para 1 p.u. como pode ser observado na Figura 47 a partir do instante 0,32 s, com uma constante de tempo na recuperação muito menor que a constante de tempo durante a falta. Uma forma de promover a recuperação mais rápida do sistema após a falta, é aumentar os ganhos proporcional e integral do controle de corrente do retificador. Por exemplo, considerando ganhos duas vezes maiores que os ganhos originais, pode-se verificar nas

Figuras 49 e 50 que os picos de corrente nas pontes conversoras são reduzidos, assim o tempo de recuperação do sistema que antes foi de 200 ms, foi reduzido para 100 ms. Contudo, é possível observar que o sistema apresenta um comportamento mais oscilatório, o que pode comprometer o desempenho do mesmo.

Figura 48 – Corrente DC no retificador durante a falta monofásica no lado AC do inversor, considerando um ajuste nos ganhos do controle do retificador.

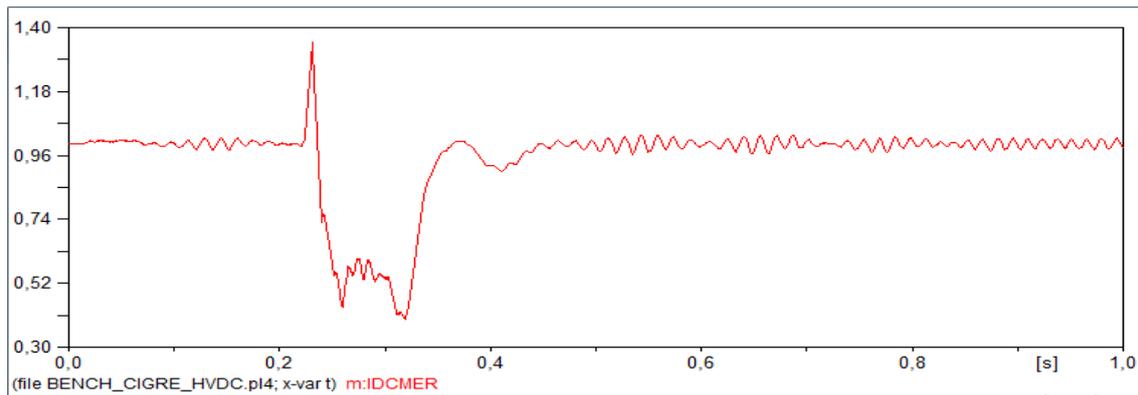
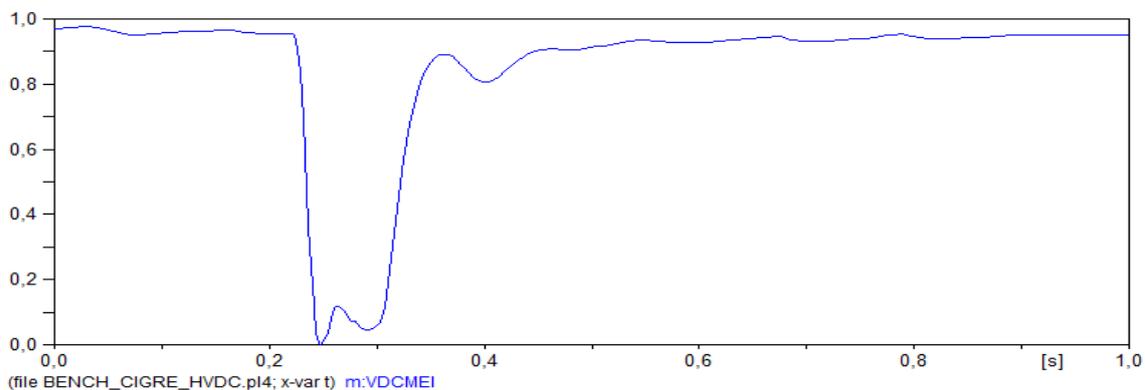


Figura 49 – Tensão DC no retificador durante falta monofásica no lado AC do inversor, considerando um ajuste nos ganhos do controle do retificador.



O ajuste dos ganhos também pode ser realizado para o controle do inversor, porém, este ajuste irá provocar falhas de comutação, que é um fenômeno indesejável para a operação dos sistemas HVDC.

#### 4.2.3 FALTA MONOFÁSICA NO LADO AC DO RETIFICADOR

Foi aplicada na fase A do lado AC do retificador uma falta monofásica para o terra com duração de 50ms, de 0,22 à 0,27 s. Na Figura 50 é possível observar que a tensão AC cai para zero. A tensão e a corrente DC no retificador mostradas nas Figuras 51 e 52,

sofrem uma redução e não será possível haver transferência de potência enquanto a falta não for eliminada.

Figura 50 – Tensão AC na fase A do retificador para falta monofásica para o terra no lado AC do retificador.

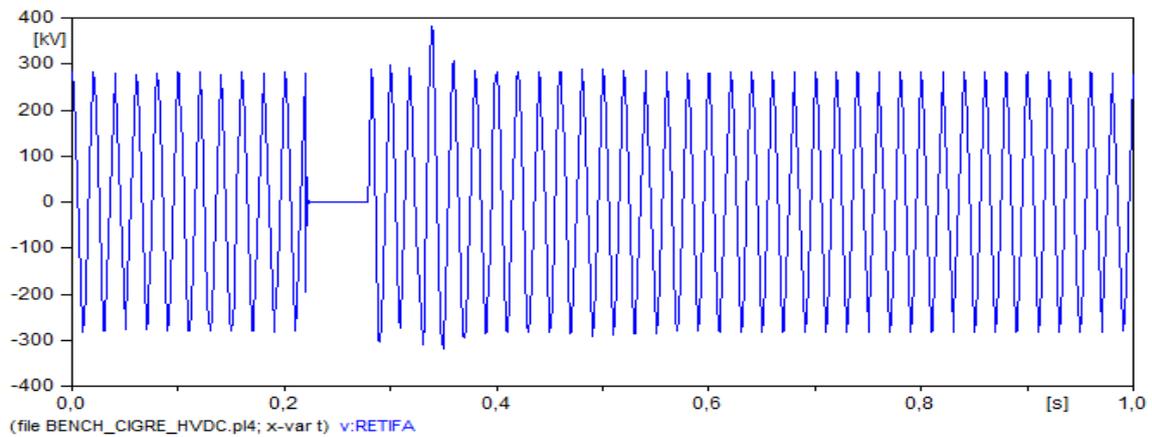


Figura 51 – Tensão DC no retificador durante falta monofásica para o terra no lado AC do retificador.

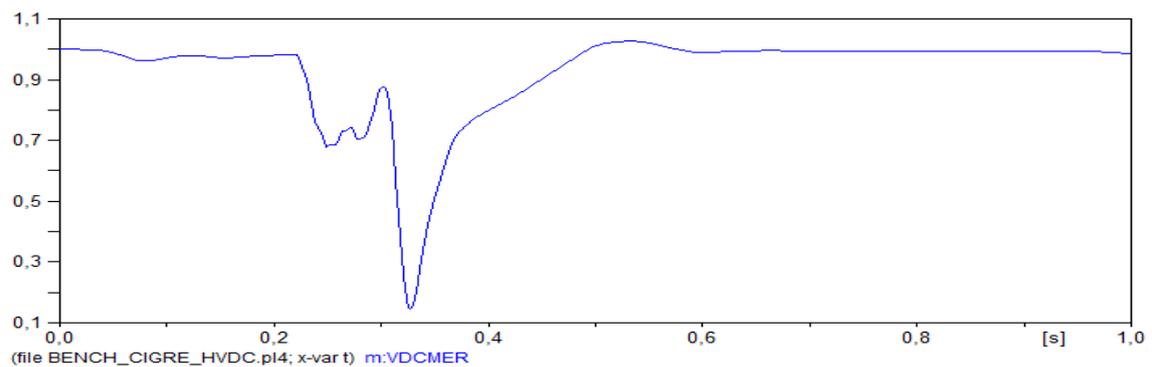


Figura 52 – Tensão DC no inversor durante falta monofásica no lado AC do retificador.

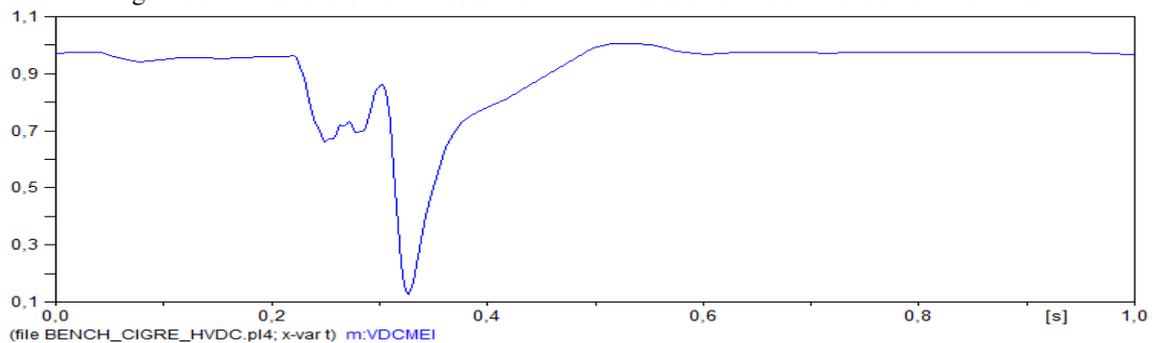


Figura 53 – Corrente DC no inversor durante falta monofásica para o terra no lado AC do retificador.

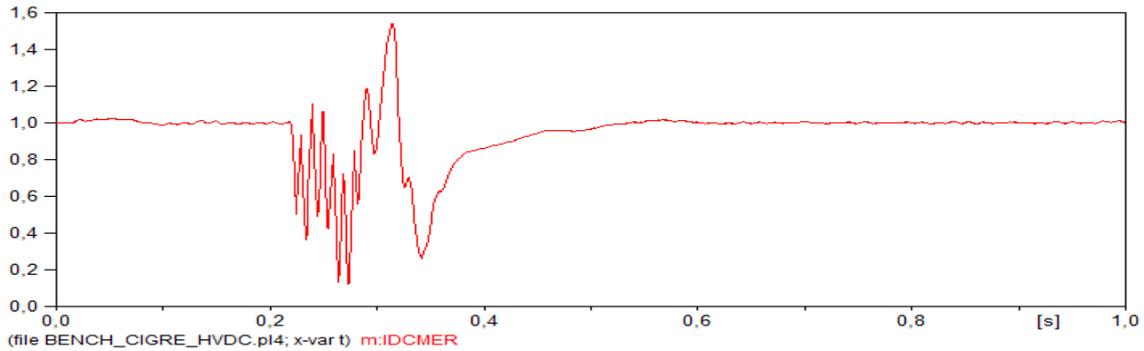
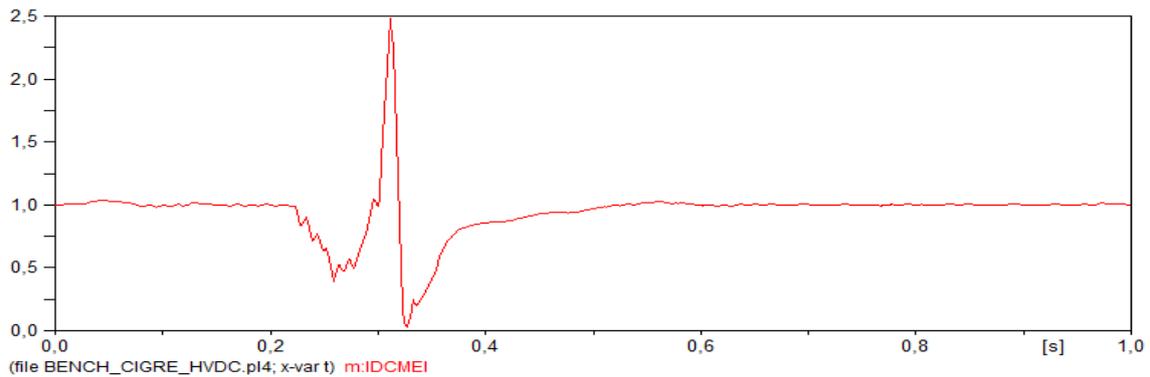


Figura 54 – Corrente DC no inversor durante falta monofásica no lado AC do retificador.



Como ocorreu uma redução da tensão e corrente DC no retificador durante a falta, o mesmo irá tentar, a partir do controle de corrente constante CCC, elevar a tensão DC reduzindo o ângulo de disparo do retificador. Porém,  $\alpha$  atingirá um valor mínimo e o retificador ficará impossibilitado de realizar o controle da corrente, esse comportamento pode ser verificado na Figura 55. Desta forma, é possível verificar a partir da Figura 55, que o controle CCC será feito pelo inversor a partir do aumento do ângulo de extinção  $\gamma$ .

Figura 55 – Ângulo de disparo do retificador durante a falta monofásica aplicada no lado AC do retificador.

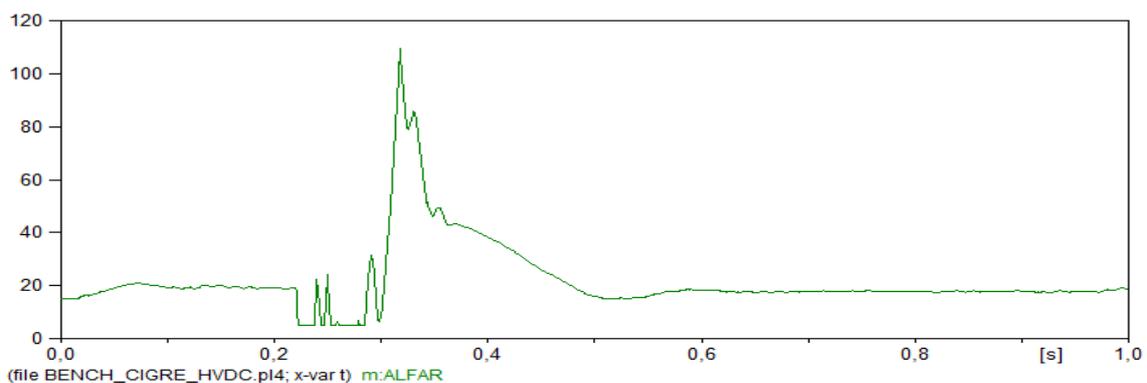


Figura 56 – Ângulo de extinção do inversor durante a falta monofásica aplicada no lado AC do retificador.

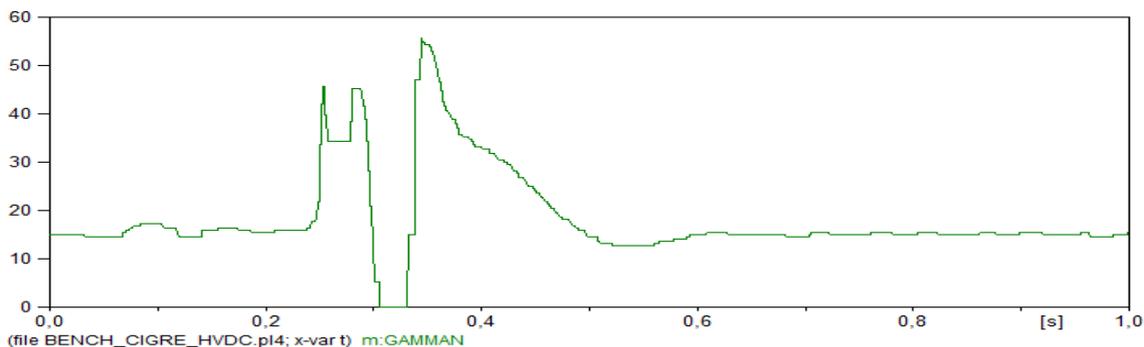
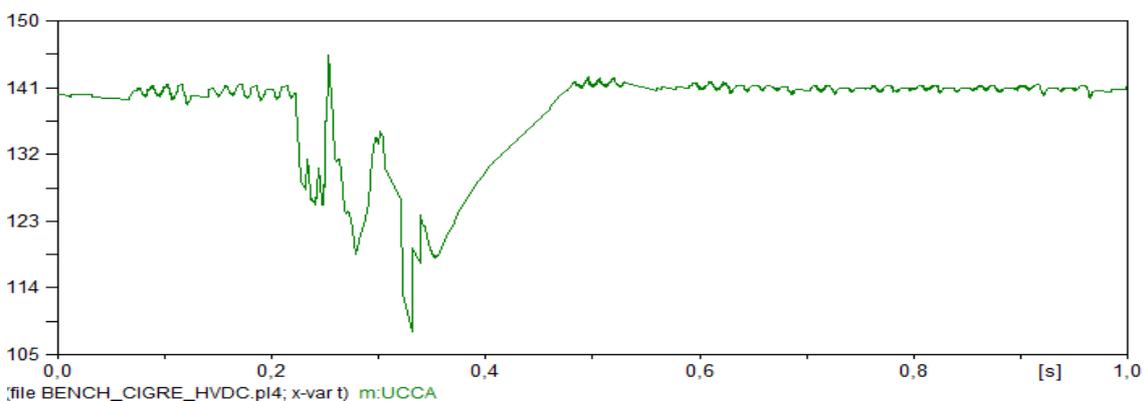


Figura 57 – Ângulo de disparo do inversor durante a falta monofásica aplicada no lado AC do retificador.

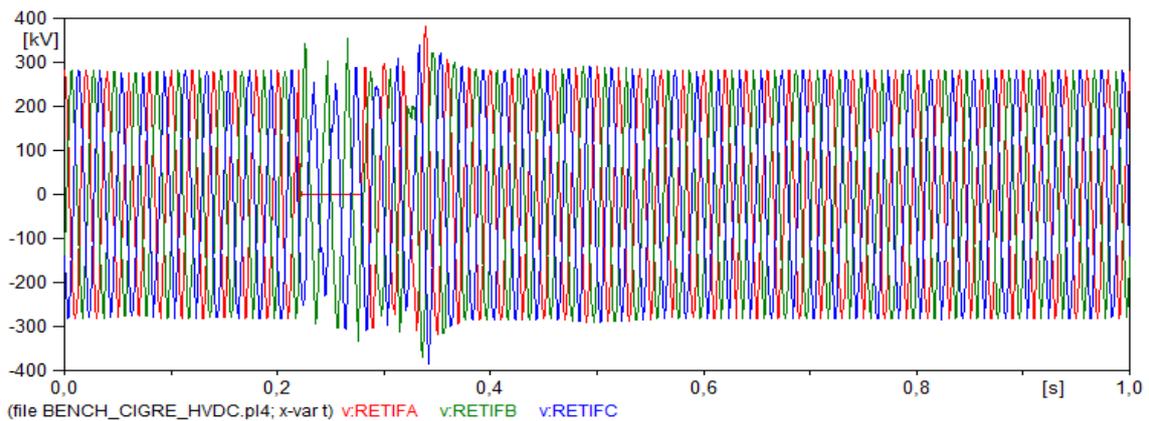


A falha em uma das fases do barramento do retificador provoca um desequilíbrio nas tensões das outras fases, gerando harmônicos de segunda ordem. Isso provoca oscilações no ângulo de disparo do retificador e do inversor durante a ocorrência da falta, como pode ser observado nas Figuras 55 e 57.

Quando o distúrbio é eliminado devido ao aumento repentino da tensão AC no barramento do retificador, a tensão e corrente contínua no retificador aumentam. O controle CCC do retificador tenta reduzir a corrente, aumentando o ângulo de disparo  $\alpha$ .

Durante o período pós falta, pode-se verificar na Figura 58, que as tensões AC no retificador apresentam distorções. É possível verificar também, que após a ocorrência do defeito, a partir de 0,27 s nas Figuras 51 e 52, que as tensões DC nas pontes apresentam uma redução. A recuperação do sistema diante desse tipo de falta no retificador é mais lenta pois ocorre uma falha de comutação no inversor. No momento da falha de comutação, o ângulo de extinção do inversor apresenta valor nulo como apresentado na Figura 56.

Figura 58 – Tensão AC nas fases do retificador durante falta monofásica no lado AC do retificador.



#### 4.2.4 QUEDA DE TENSÃO MONOFÁSICA NO LADO AC DO INVERSOR

Foi aplicada uma falta monofásica remota para o terra com duração de 50 ms, considerando uma queda de tensão de 50% na fase A do lado AC do inversor. É possível verificar na Figura 59, que há uma redução na tensão AC da fase A do inversor.

Figura 59 – Tensão AC na fase A do inversor durante a falta monofásica remota no lado AC no inversor.

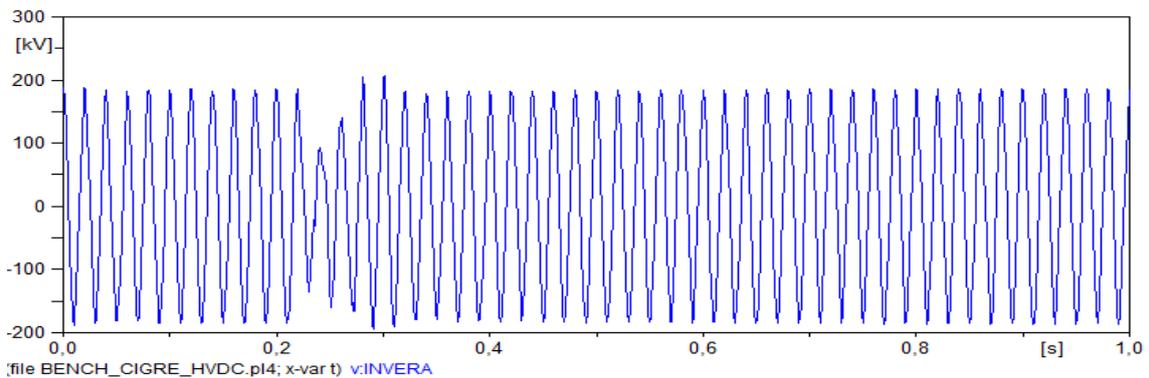
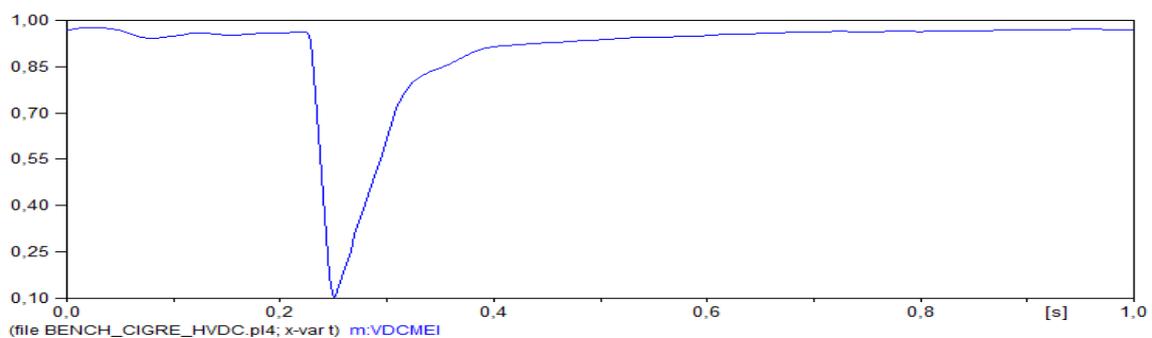


Figura 60 – Tensão DC no inversor durante falta monofásica remota no lado AC do inversor.



Durante a ocorrência da falta, verifica-se nas Figuras 61 e 62, que uma redução na tensão DC irá provocar um pico de corrente DC de aproximadamente 2,5 p.u no inversor e 1,6 p.u no retificador.

Figura 61 – Corrente DC no inversor durante falta monofásica remota no lado AC do inversor

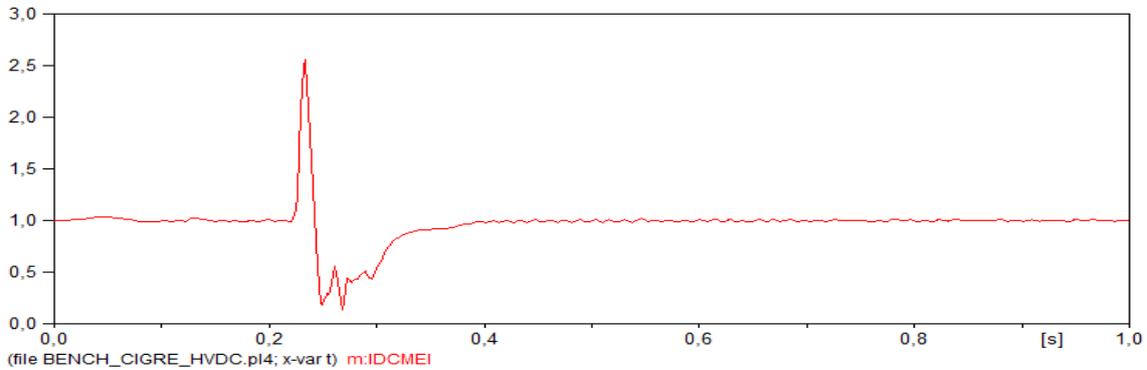
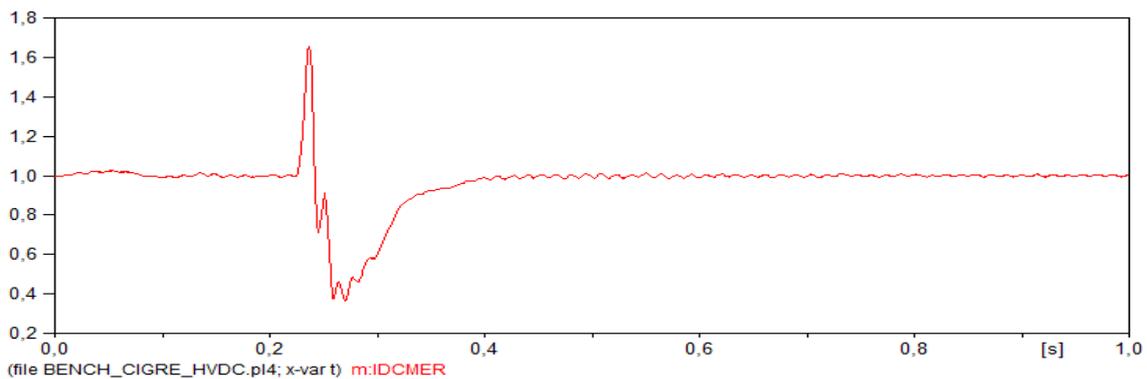


Figura 62 – Corrente DC no retificador durante falta monofásica remota no lado AC do inversor.



A Figura 63 mostra que o ângulo de disparo do retificador ( $\alpha$ ) atinge um valor de aproximadamente  $100^\circ$  sendo forçado a operar na região inversora, para limitar o curto-circuito. O ângulo de disparo do inversor atinge um valor de aproximadamente  $130^\circ$ , como pode ser visto na Figura 64. Desse modo, ocorre o bloqueio do sistema até que a falta seja extinta. Neste caso, o controle VDCOL atua limitando a corrente de ordem em função da queda de tensão, conseqüentemente, há uma redução da demanda de potência reativa, evitando a deterioração da tensão do sistema de corrente alternada.

Figura 63 – Corrente de ordem do sistema durante falta monofásica remota no lado AC do inversor

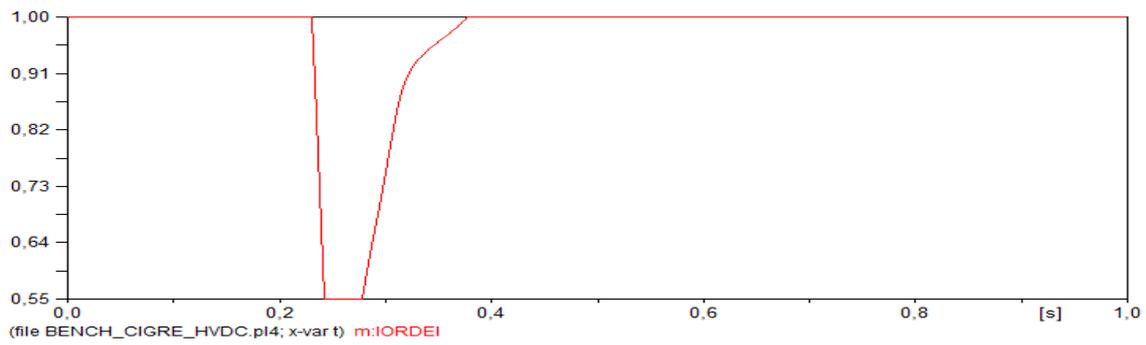


Figura 64 – Ângulo de ordem do retificador durante falta monofásica remota no lado AC do inversor

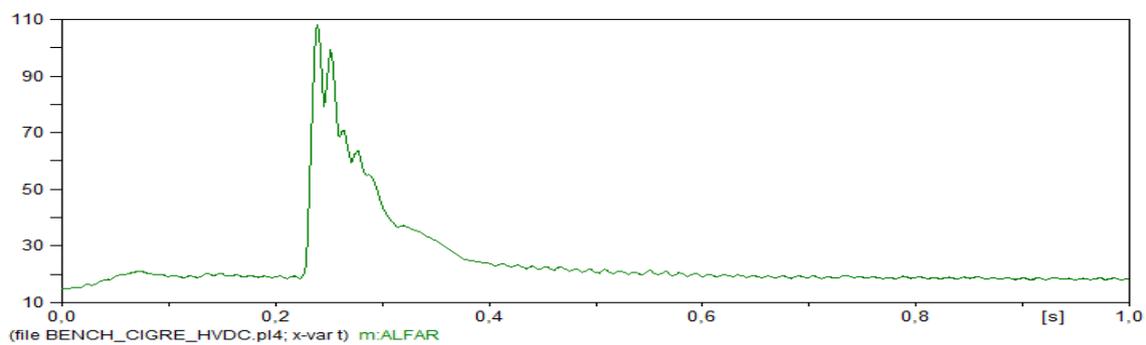
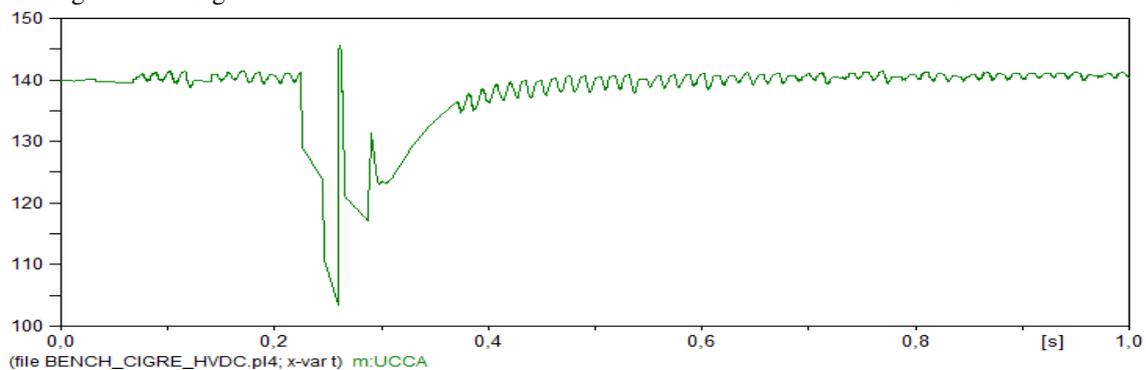


Figura 65 – Ângulo de ordem do inversor durante falta monofásica remota no lado AC do inversor



Diante da queda de tensão monofásica no inversor, o sistema leva aproximadamente 130 ms para se recuperar totalmente.

#### 4.2.5 FALTA TRIFÁSICA NO LADO AC DO INVERSOR

Uma falta trifásica aplicada no inversor com duração de 50ms, de 0,2 s à 0,25 s ocasiona um colapso de tensão DC no inversor, mostrado na Figura 67, e a corrente DC medida no inversor apresenta um pico de aproximadamente 2.5 p.u, Figura 68. A queda de tensão na fase A do barramento AC do inversor pode ser observada na Figura 66.

Figura 66 – Tensão AC na fase A do inversor durante falta trifásica no lado AC do inversor

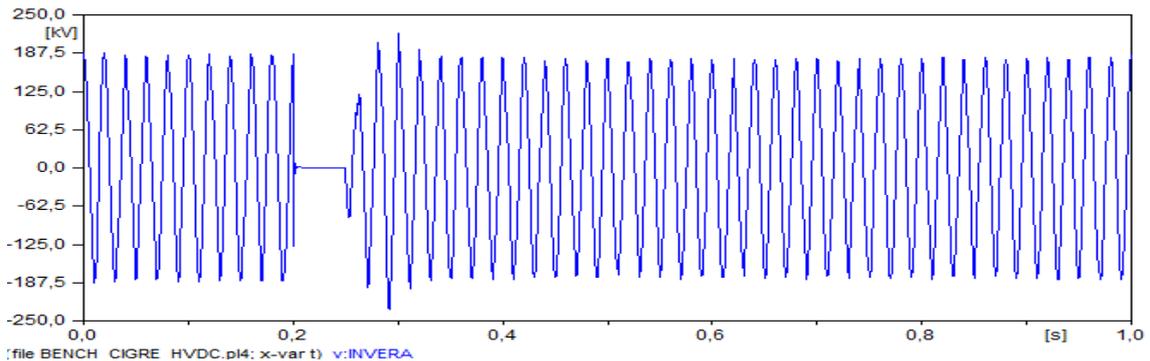


Figura 67 – Tensão DC no inversor durante falta trifásica no lado AC do inversor

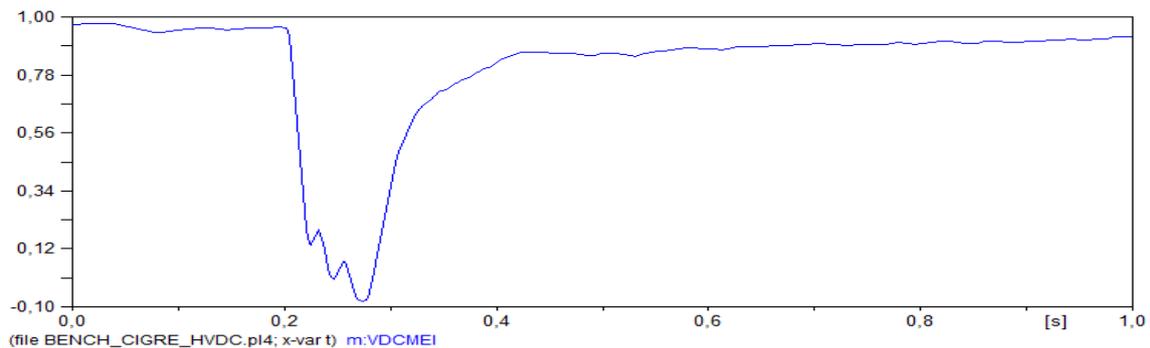
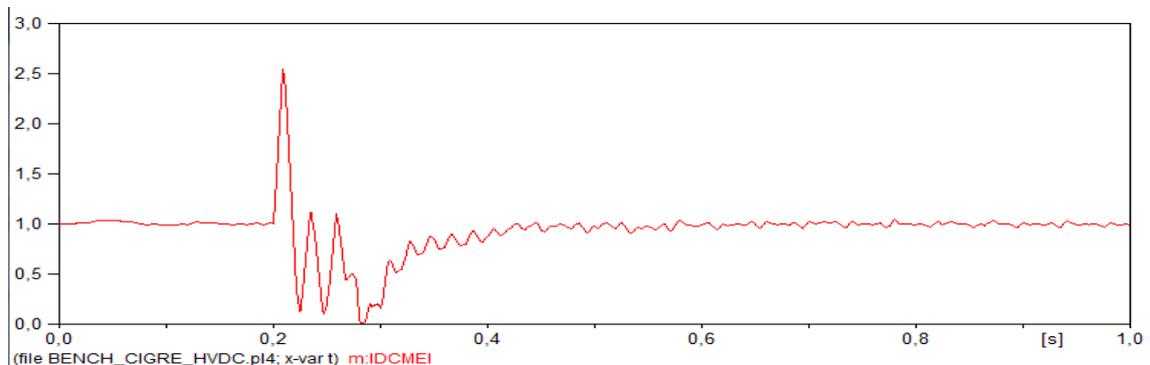


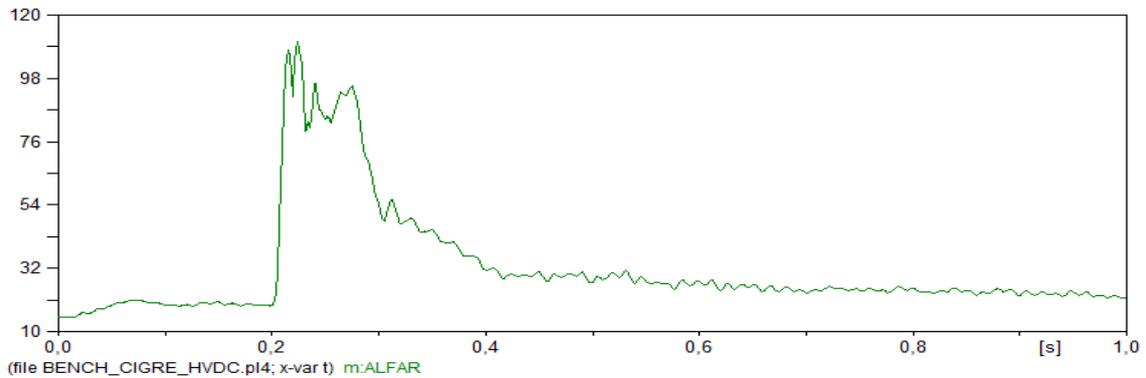
Figura 68 – Corrente DC no inversor durante falta trifásica no lado AC do inversor.



O controle de corrente do retificador deve atuar tentando reduzir a corrente DC a partir do aumento do ângulo de disparo do retificador. Desse modo, o retificador vai

passar a operar na região do inversor. Esse comportamento pode ser verificado na Figura 69.

Figura 69 – Ângulo disparo do retificador durante uma falta trifásica no lado AC do inversor.



O controle VDCOL irá fazer com que o sistema volte ao estado estacionário de forma rápida e equilibrada. Como o sistema é fraco, uma redução da tensão DC e incremento na corrente DC resulta em falhas de comutação. Pode-se verificar que a tensão AC no retificador apresenta distorções como mostra a Figura 70. Durante o período de falta, a tensão DC medida no retificador oscila em torno de zero, como mostra a Figura 71. Após a falta ser extinta a tensão DC no retificador apresenta valores negativos devido as falhas de comutação no inversor.

Figura 70 – Tensão AC nas fases do retificador durante falta trifásica no lado AC do inversor

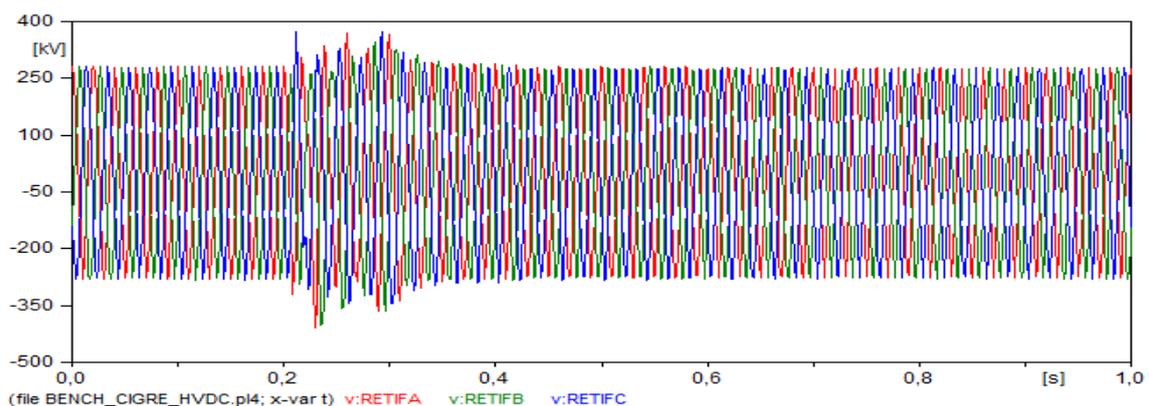
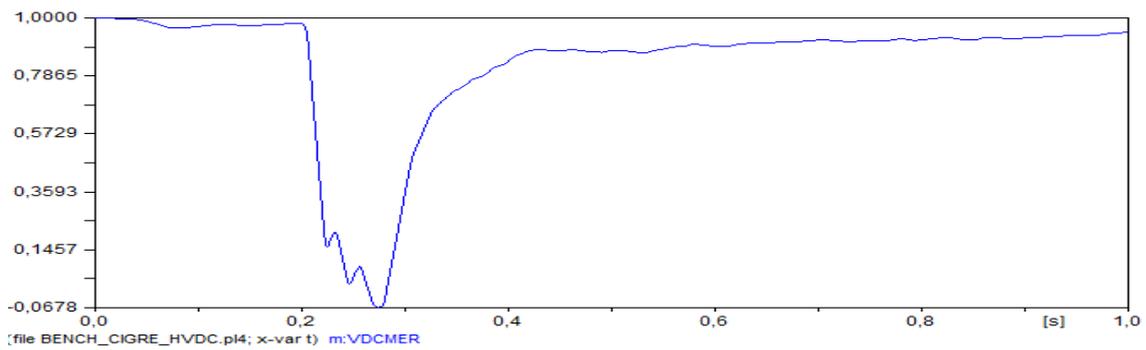
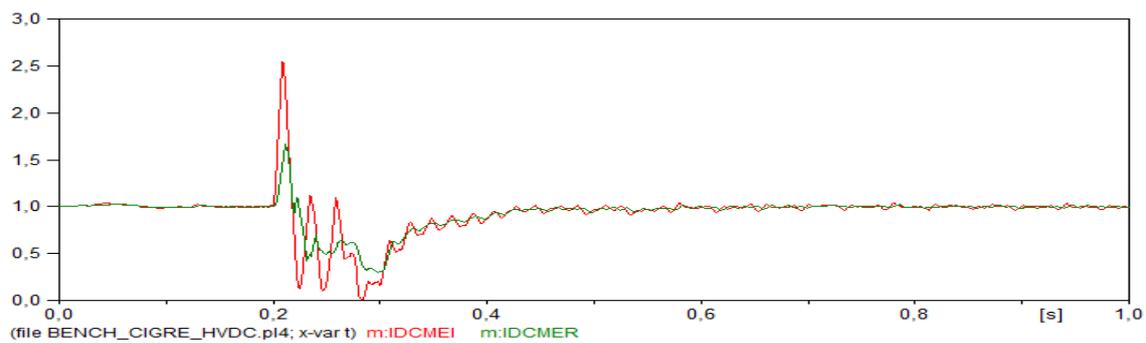


Figura 71 – Tensão DC no retificador durante falta trifásica no lado AC do inversor



É possível observar na Figura 72 que após a extinção da falta, em  $t = 0,25$  s, existem picos de corrente tanto no retificador como no inversor que possuem quase a mesma magnitude dos níveis de corrente no início da falta.

Figura 72 – Correntes DC no retificador e no inversor durante uma falta trifásica no lado AC do inversor.



A tensão do elo DC, mostrada na Figura 73, sofre uma redução, provocando uma queda abrupta da corrente de ordem como mostra a Figuras 72. Essa queda da corrente de ordem provoca um aumento no ângulo de disparo do retificador, ilustrado na Figura 69, e provoca um afundamento nas correntes do retificador e do inversor como pode ser visto na Figura 72.

Figura 73 – Tensão no elo DC durante falta trifásica no lado AC do inversor

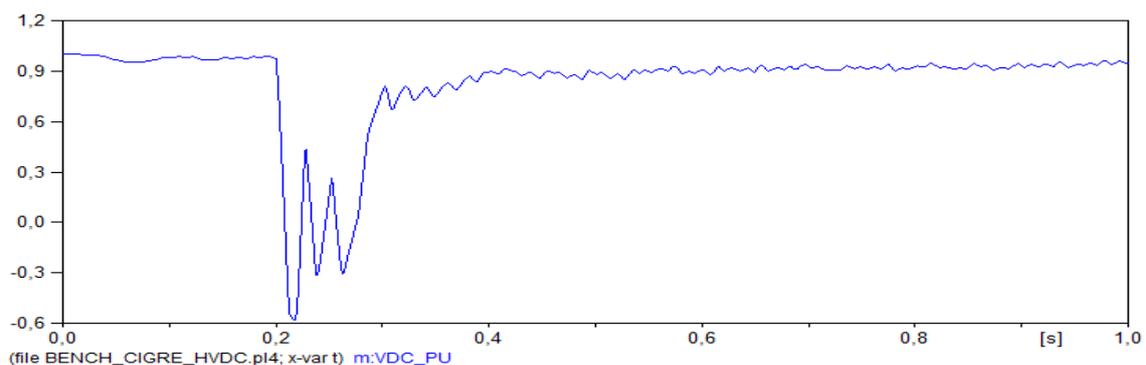
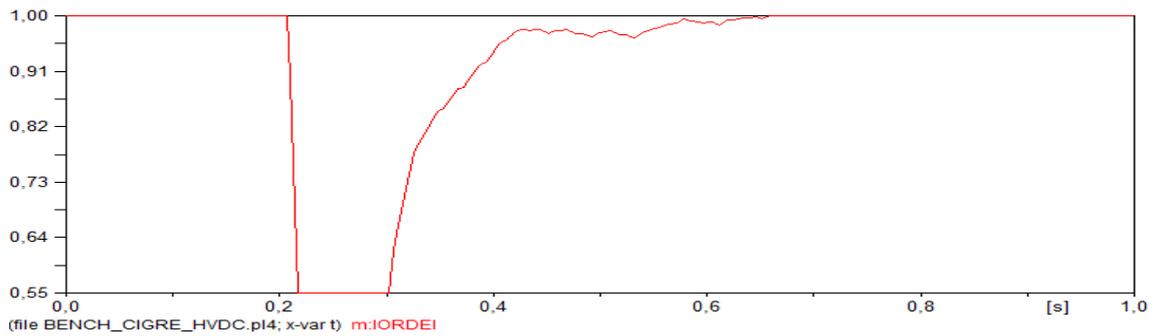


Figura 74 – Corrente de ordem no inversor durante falta trifásica no lado AC do inversor.



#### 4.2.6 FALTA TRIFÁSICA NO LADO AC DO RETIFICADOR

Para essa simulação foi aplicado um curto-circuito trifásico franco no retificador com duração de 50ms. A queda de tensão AC do retificador, mostrada na Figura 75, que opera normalmente controlando a corrente, irá provocar uma redução na tensão DC no terminal do mesmo, como mostra a Figura 76. Como a tensão DC no inversor é mantida constante, a corrente DC ficará reduzida, Figura 79. Nas Figuras 77, 78 e 79, são apresentadas as formas de onda da tensão DC no inversor, corrente DC no retificador e corrente DC no inversor, durante a falta.

Figura 75 – Tensão AC na fase A do retificador durante falta trifásica no lado AC do retificador

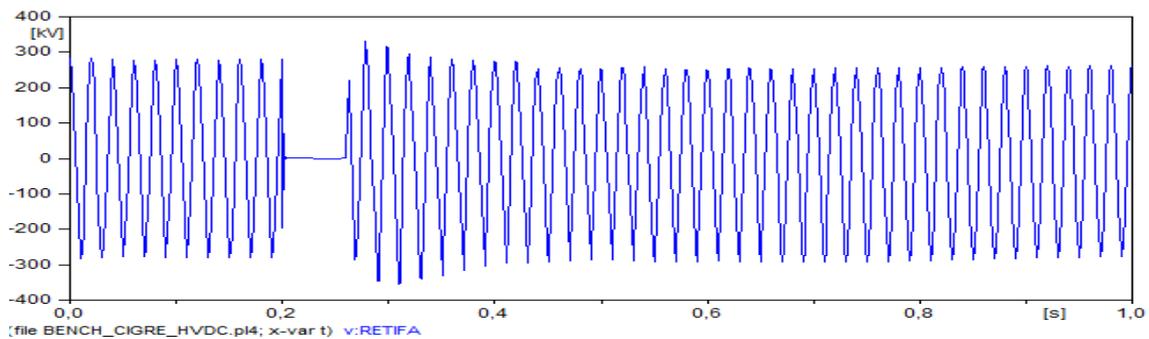


Figura 76 – Tensão DC no retificador durante falta trifásica no lado AC do retificador

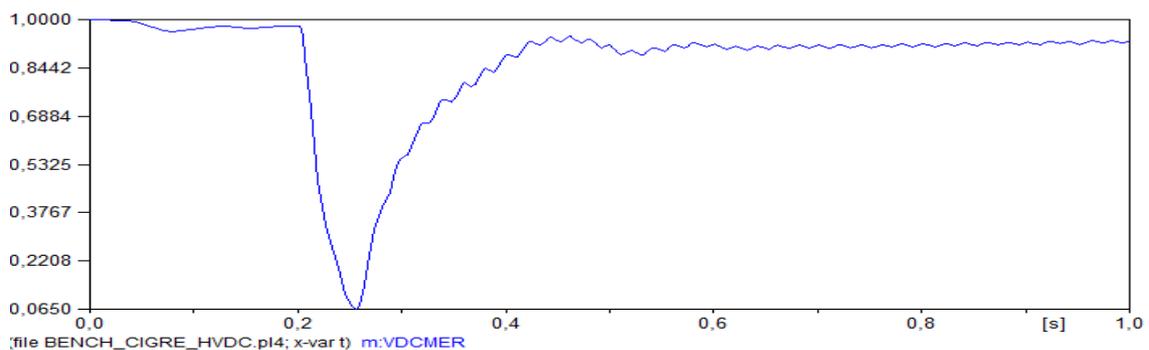


Figura 77 – Tensão DC no inversor durante falta trifásica no lado AC do retificador.

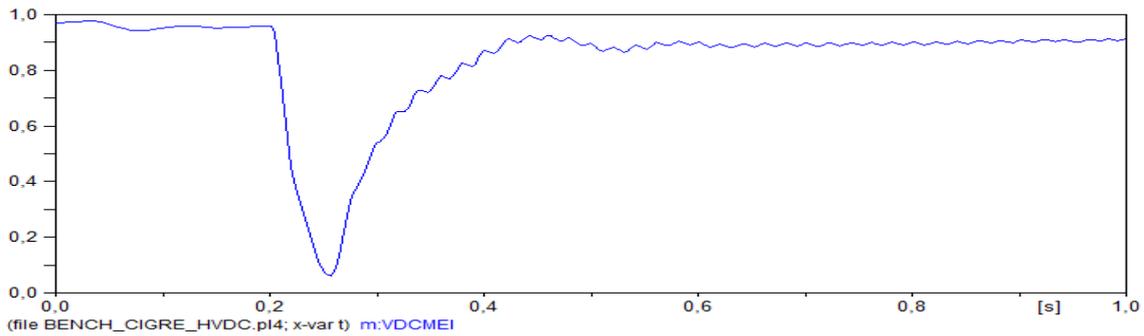


Figura 78 – Corrente DC no retificador durante falta trifásica no lado AC do retificador.

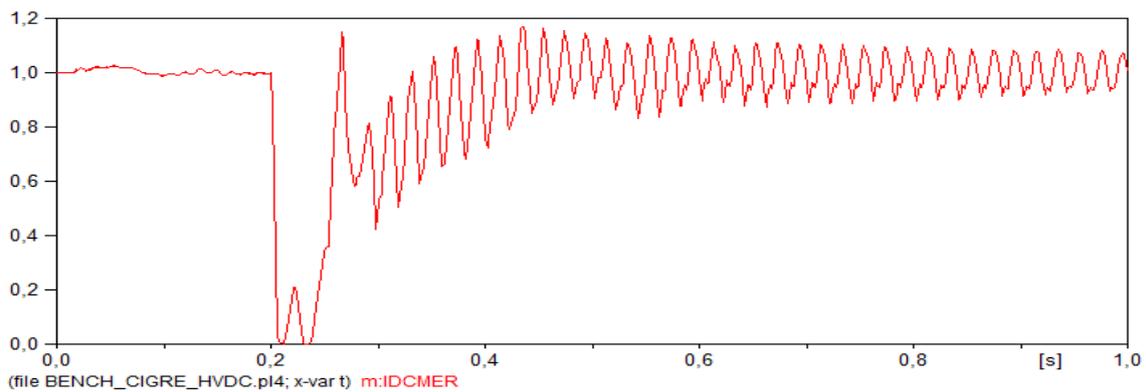
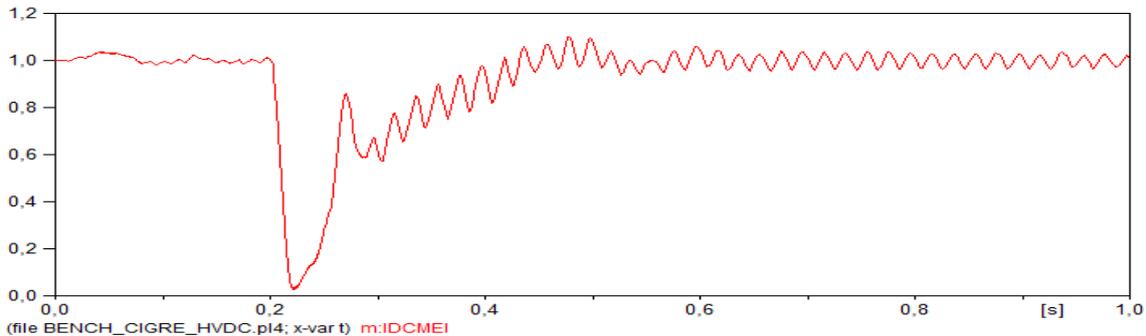
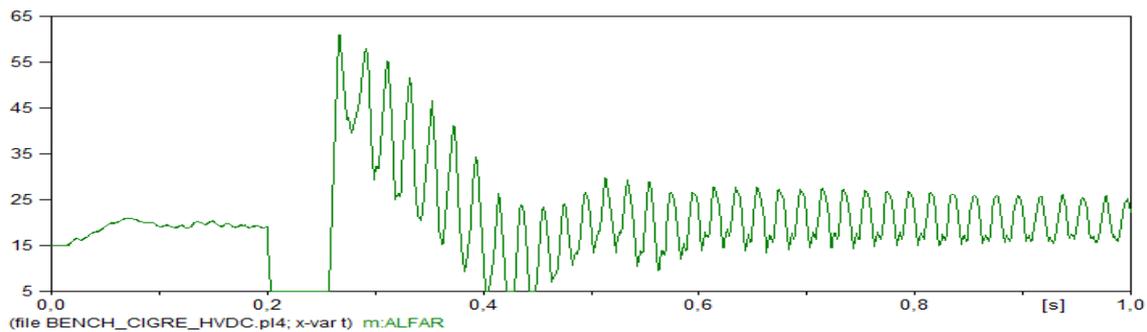


Figura 79 – Corrente DC no inversor durante falta trifásica no lado AC do retificador.



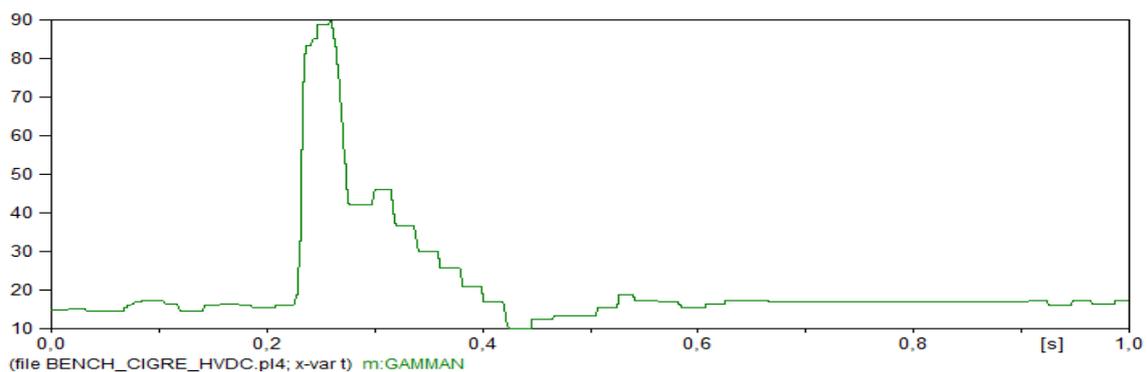
Como houve redução da corrente DC no retificador, apresentada na Figura 78, o controle de corrente do retificador irá atuar reduzindo o valor o ângulo de disparo  $\alpha$ , de forma a tentar recuperar o valor da corrente inicial, esse comportamento pode ser observado na Figura 80. Contudo, o ângulo  $\alpha$  irá atingir o seu valor mínimo de  $5^\circ$  tornando controle CCC incapaz de elevar o valor da tensão DC. Assim, o retificador passa a controlar apenas o ângulo de disparo e o controle de corrente passa a ser feito pelo inversor que deverá reduzir a tensão DC nos seus terminais para obter o valor de corrente desejado, como mostram as Figuras 77 e 81.

Figura 80– Ângulo de disparo do retificador durante falta trifásica no lado AC do retificador.



A corrente DC atingida no terminal do inversor durante a falta, apresentada na Figura 79, é menor que 1 p.u, devido a presença da corrente de margem, controlando a corrente em um valor menor que o controlado pelo terminal retificador. Para tanto, como pode ser visto na Figura 81, o ângulo de extinção do inversor sofre um incremento, atingindo aproximadamente  $80^\circ$ .

Figura 81 – Ângulo de extinção do inversor durante falta trifásica no lado AC do retificador.



Após a eliminação da falta, o sistema leva aproximadamente 250 ms para voltar a operar normalmente. Durante esse período de recuperação, ocorrem falhas de comutação no inversor.

É possível concluir a partir das simulações realizadas, que o sistema e o seu controle se comportaram como esperado. De acordo KUNDUR (1994), o tempo que o sistema DC leva para se recuperar quando acontecem faltas nos barramentos AC das pontes conversoras é de 100 ms à 500 ms, portanto, o maior tempo de recuperação do sistema foi observado para uma falta trifásica no barramento AC do retificador, de 250 ms, que está dentro da faixa esperada. Desse modo, o controle do sistema é considerado eficiente no sentido de proteger o elo durante a ocorrência destes distúrbios.

## 5 CONCLUSÃO

A transmissão HVDC tem se destacado significativamente nos últimos anos devido a sua capacidade de possibilitar a transmissão de energia elétrica em longas distâncias. Tornando-se atraente por apresentar custos menores quando comparado a tecnologia de transmissão HVAC, além de ser uma boa alternativa quando se trata de preservação do meio ambiente. Atualmente no Brasil, existem vários elos HVDC em operação e novos que ainda estão para serem licitados. Com isso, a necessidade de profissionais capacitados na área tem crescido, incentivando cada vez mais a realização de estudos que possibilitem compreender a operação e o controle desses sistemas e o *Benchmark* do CIGRÉ possibilita que estes estudos sejam feitos a partir do uso de softwares de simulação proporcionando respostas realísticas.

Para que fosse possível entender o funcionamento do sistema de transmissão HVDC monopolar tratado ao longo deste trabalho, foi necessário compreender as suas principais características, tais como as características estáticas  $V_d \times I_d$  e o comportamento do controle das pontes conversoras assim como também do sistema HVDC monopolar modelado no software ATPDraw que foi utilizado para realizar alguns estudos de faltas nos barramentos AC das pontes conversoras, possibilitando assim, avaliar o comportamento da atuação dos controles das pontes, e a resposta do sistema diante da ocorrência de distúrbios. Desse modo, foram realizadas simulações das seguintes condições operacionais:

- Sistema operando normalmente;
- Falta monofásica aplicadas no barramento AC do retificador e do inversor;
- Falta trifásica aplicadas no barramento AC do retificador e do inversor;
- Falta remota aplicada no barramento AC do inversor.

Para compreender de maneira satisfatória o comportamento do sistema diante da aplicação dos distúrbios expostos acima, foi necessário um estudo dos tipos de controle disponíveis na literatura, tais como o controle de corrente constante, controle de ângulo de disparo, controle de ângulo de extinção e o VDCOL, sendo este último uma importante

ferramenta no que diz respeito a avaliação do tempo de recuperação do sistema após a eliminação das faltas.

Foi possível comprovar que em condições normais de operação, o retificador é responsável por controlar a corrente no seu valor nominal a partir do ajuste do ângulo de disparo do retificador, de modo que, havendo incrementos ou decrementos da corrente, o controle irá atuar reduzindo ou aumentando o ângulo de disparo da ponte retificadora, para tentar manter a corrente DC constante. Porém, quando ocorre uma queda de tensão acentuada, como um curto-circuito franco, o terminal inversor se torna o responsável pelo controle da corrente e o terminal retificador tenta controlar apenas o valor mínimo do ângulo de disparo. Como o sistema é considerado fraco por possuir uma relação de curto-circuito (SCR) menor que 2,5, foi possível verificar a ocorrência de falhas de comutação durante o processo de recuperação do sistema pós falta.

De forma geral, pode-se concluir que o sistema HVDC com configuração monopolar possui uma resposta rápida a perturbações. O VDCOL, que é o responsável por limitar a ordem de corrente a partir da variação de tensão no elo, assume um papel importante na recuperação do sistema diante de falhas de comutação, alterando o valor da referência de corrente durante a recuperação do sistema.

O sistema modelado no ATPDraw permitiu avaliar de forma satisfatória o comportamento do sistema diante da ocorrência de falhas nos barramentos AC das pontes conversoras, mostrando que os resultados obtidos estavam de acordo com o que foi abordado na teoria. Contudo, foi possível concluir também, que o modelo do ATPDraw não permite a realização do estudo de faltas DC aplicadas na linha, pois, para isso, seria necessária uma atuação específica do controle das pontes conversoras e uma representação da linha à parâmetros distribuídos. Portanto, fica como sugestão para trabalhos futuros, representar a linha à parâmetros distribuídos, levando em consideração a indutância da mesma e o desenvolvimento de um controle específico para as pontes conversoras que possibilite analisar o comportamento do sistema diante de faltas DC no elo HVDC. Outra sugestão é realizar um estudo de faltas AC no sistema HVDC com configuração bipolar no ATPDraw.

Por fim, pode-se concluir que este trabalho teve seu objetivo alcançado, visto que todo estudo feito a respeito do sistema HVDC, assim como o estudo do modelo projetado para simulação no ATPDraw, pôde ser empregado para avaliar de modo satisfatório o comportamento do sistema diante da aplicação de distúrbios. Além de ter contribuído com o aprendizado da autora, este trabalho também presta uma significativa contribuição a

futuros estudantes de engenharia elétrica e áreas afins que desejem entender os princípios básicos de um sistema de transmissão HVDC.

## REFERÊNCIAS

- AHMED, A. (2000). *Eletônica de Potência*. Tradução Bazán Tecnologia e Linguística, revisão técnica João Antônio Martino, Prentice Hall, São Paulo.
- ETT, G. (2011). *Alternativas não Convencionais para Transmissão de Energia Elétrica*. Brasília: Programa P&D da ANEEL - Projeto Transmitir.
- FARUQUE, M., ZHANG, Y., & DINAUAHI, V. (2006). *Detailed Modeling of CIGRÉ HVDC Benchmark System Using PSCAD/EMTDC and PSB/SIMULINK*. IEEE.
- FERNANDES, B. (2005). *Elos de Transmissão em Corrente Contínua em Programas de Estabilidade Transitória*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. .
- GOMES, T. D. (2012). *Controle da Operação de um Sistema de Transmissão em Corrente Contínua em Alta Tensão*. TCC, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- GRAHAM, J., BILEDT, G., & JOHANSSON, J. (2004). *Interligações de Sistemas Elétricos através de Elos HVDC*. Rio de Janeiro: IX SEPOPE.
- JÚNIOR, S. V. (1984). *Modelagem e Simulação de Elos de Corrente Contínua em Estudos de Estabilidade Transitória*. Dissertação (Mestrado em Ciências), Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais. .
- KIM, C. (2009). *HVDC Transmission: Power Conversion Applications in Power Systems*. Jhon Wiley & Sons.
- KIMBARK, E. W. (1975). *Direct Current Transmission*. New York: Wiley-Interscience.
- KUNDUR, P. (1994). *Power System Stability and Control*. New York: McGraw-Hill.
- LUZ, G. S., & SILVA, N. F. (2006). *First Benchmark Model of HVDC Controls in ATP Program*. X SEPOPE, Florianópolis - SC.
- MOHAN, U. (2003). *Power Electronics, Converters, Applications and Design*. Wiley.
- OLIVEIRA, J. D. (2015). *Avaliação da Operação do Sistema HVDC de Interligação do Complexo do Rio Madeira à Região Sul do Sistema Elétrico Brasileiro*. Tese (Mestrado em Engenharia Eletrica), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- POMILO, J. A. (2002). *Apostila de Eletrônica de Potência*. UNICAMP, Campinas.

- RASHID, M. (2011). *Power Electronics Handbook*. Elsevier.
- SATO, A. (2013). *Transmissão de Potência em Corrente Contínua e em Corrente Alternada: Estudo Comparativo*. TCC, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.
- SÉTREUS, J., & BERTLING, L. (2008). *Introduction to HVDC Techonology for Reliable Electrical Power Systems*. IEEE.
- SILVA, M. M. (2007). *Distorção e Filtro de Harmônicos na Alimentação de Conversores CA/CC por Rede CA e Gerador Síncrono*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. .
- SILVA, T. V., ADAMI, P. H., SILVEIRA, P. M., & OLIVEIRA, J. C. (2013). *Estudos de desempenho de complexos de transmissão CA-CC sob condições transitórias, dinâmicas e permanentes utilizando o RTDS*. Universidade Federal de Uberlândia e Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais.
- SZECHTMAN, M., WESS, T., & THIO, C. (1991). First Benchmark Model for Study of HVDC Controls Studies. *Electra*, 54-67.

# ANEXO A – CONFIGURAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO HVDC NO ATPDRAW

## Pontes conversoras

Figura 82 –Configuração da ponte retificadora de 12 pulsos no ATPDraw

The screenshot shows the 'User specified: PONT2E' dialog box. It contains two main tables: 'Attributes' and 'NODE'. Below these tables are control elements like 'Copy', 'Paste', 'Reset', 'Order', 'Label', 'Comment', and checkboxes for 'Send parameters', 'Internal phase seq.', 'Hide', and 'Protect'.

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
Idpolo		11	FASEY	ABC	X0013
SAIDA		0	FASED	ABC	X0014
VKV_		345	FASE_	ABC	RETIF
GAINTE		10	ANODO	1	ELERET
GAPROP		50	CATODO	1	POLORE
TDEBLK		0	UCCA	1	UCCAR
FREQUE		50	ANGULO	1	ALFAR
RSNUBE		5000			

Figura 83 –Configuração da ponte inversora de 12 pulsos no ATPDraw

The screenshot shows the 'User specified: PONT2E' dialog box for an inverter bridge. The 'Attributes' table has 'Idpolo' set to 21 and 'VKV\_' set to 230. The 'NODE' table lists nodes for the inverter bridge.

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
Idpolo		21	FASEY	ABC	VYINV
SAIDA		0	FASED	ABC	VDINV
VKV_		230	FASE_	ABC	INVER
GAINTE		10	ANODO	1	POLOIN
GAPROP		50	CATODO	1	ELEINV
TDEBLK		0	UCCA	1	UCCAI
FREQUE		50	ANGULO	1	GAMMAI
RSNUBE		5000			

## Filtros AC no lado AC do retificador

Figura 84 – Configuração do filtro passa alta no ATPDraw

User specified: FILT\_HP

Attributes

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
C1		6.685	HV Nod	ABC	RETIF
L1		13.6	ARRE1	ABC	X0006
R1		83.32	NEUTR	1	

Copy Paste Reset Order: 0 Label:

Comment:

User specified  
 \$!include: FILT\_HP Edit...  
 Empty  Send parameters  Hide  
 Internal phase seq.  Protect

Edit definitions OK Cancel Help

Figura 85 – Configuração do filtro passa baixa no ATPDraw

User specified: FILT\_HP3

Attributes

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
C1		6.685	HV Nod	ABC	RETIF
R1		261.87	ARR1	ABC	X0001
C2		74.68	ARR2	ABC	X0002
L1		136.4	NEUTR	1	
R2		29.76			

Copy Paste Reset Order: 0 Label:

Comment:

User specified  
 \$!include: FILT\_HP3 Edit...  
 Empty  Send parameters  Hide  
 Internal phase seq.  Protect

Edit definitions OK Cancel Help

## Filtros AC no lado AC do inversor

Figura 86 – Configuração o filtro passa alta no ATPDraw

User specified: FILT\_HP

Attributes

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
C1		15.04	HV Nod	ABC	INVER
L1		6.1	ARRE1	ABC	X0005
R1		37.03	NEUTR	1	

Copy Paste Reset Order: 0 Label:

Comment:

User specified

\$\text{Include: } \text{FILT\\_HP} \text{ Edit... } \input checked="" type="checkbox"/> Send parameters  Hide

Empty  Internal phase seq.  Protect

Edit definitions OK Cancel Help

Figura 87 – Configuração do filtro passa baixa no ATPDraw

User specified: FILT\_HP3

Attributes

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
C1		15.04	HV Nod	ABC	INVER
R1		116.38	ARR1	ABC	X0003
C2		167.2	ARR2	ABC	X0004
L1		60.6	NEUTR	1	
R2		13.23			

Copy Paste Reset Order: 0 Label:

Comment:

User specified

\$\text{Include: } \text{FILT\\_HP3} \text{ Edit... } \input checked="" type="checkbox"/> Send parameters  Hide

Empty  Internal phase seq.  Protect

Edit definitions OK Cancel Help

## Reator de alisamento

Figura 88 – Configuração do reator de alisamento do lado retificador no ATPDraw

User specified: SMOTHRET

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
RESIST		0.00079	PONTE	1	POLORE
INDUCT		596.8	LINHA	1	LINHAR
AMPLIT		500			

Copy Paste Reset Order: 0 Label:

Comment:

User specified: \$include: SMOTHRET Edit... Empty

Send parameters  Hide

Internal phase seq.  Protect

Edit definitions OK Cancel Help

Figura 89 – Configuração do ATPDraw do reator de alisamento no lado inversor

User specified: SMOTHINV

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
RESIST		0.00079	PONTE	1	LINHAI
INDUCT		596.8	LINHA	1	POLOIN
AMPLIT		-2000			
AMPLIT		2000			

Copy Paste Reset Order: 0 Label:

Comment:

User specified: \$include: SMOTHINV Edit... Empty

Send parameters  Hide

Internal phase seq.  Protect

Edit definitions OK Cancel Help

## Controle das pontes conversoras

Figura 90 – Configuração no ATPDraw do controle do retificador

MODEL: RET\_BEN

Attributes

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
VDC_BA		500	IDC	1	LINHAR
IDC_BA		2	VDC	1	LINHAR
KP		63	UCCA	1	UCCAR
KI		5247	IORDER	1	IORDEM
TC_IDC		0.0012			
TC_VDC		0.02			

Copy Paste Reset Order: 0 Label:

Comment:

Models Library

Model: RET\_BEN Edit Use As: RET\_BEN Record

Hide Protect

Edit definitions OK Cancel Help

Figura 91 – Configuração no ATPDraw do controle do inversor

MODEL: INV\_BEC

Attributes

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
VDC_BA		500	IDC	1	LINHAI
IDC_BA		2	VDC	1	LINHAI
FREQ		50	IORDER	1	IORDEM
IORDEP		1	UCCA	1	UCCAI
KP		36	GAMMA	1	GAMMAI
KI		3760			
KPG		0.7506			
KIG		18.38			

Copy Paste Reset Order: 0 Label:

Comment:

Models Library

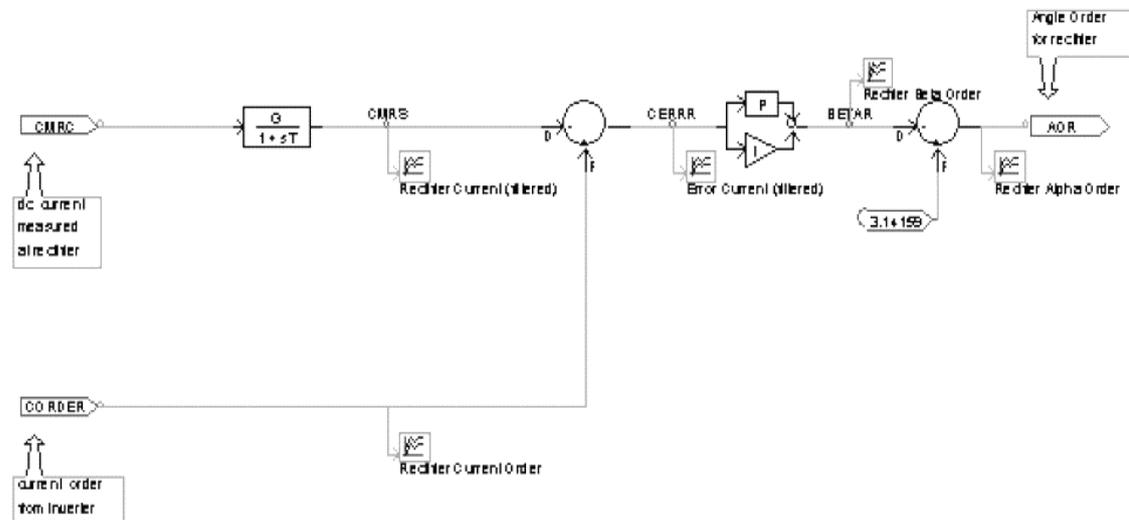
Model: INV\_BEC Edit Use As: INV\_BEN Record

Hide Protect

Edit definitions OK Cancel Help

Diagrama de blocos do controle do retificador no PSCAD que foi usando como base para estabelecer o controle no ATPDraw.

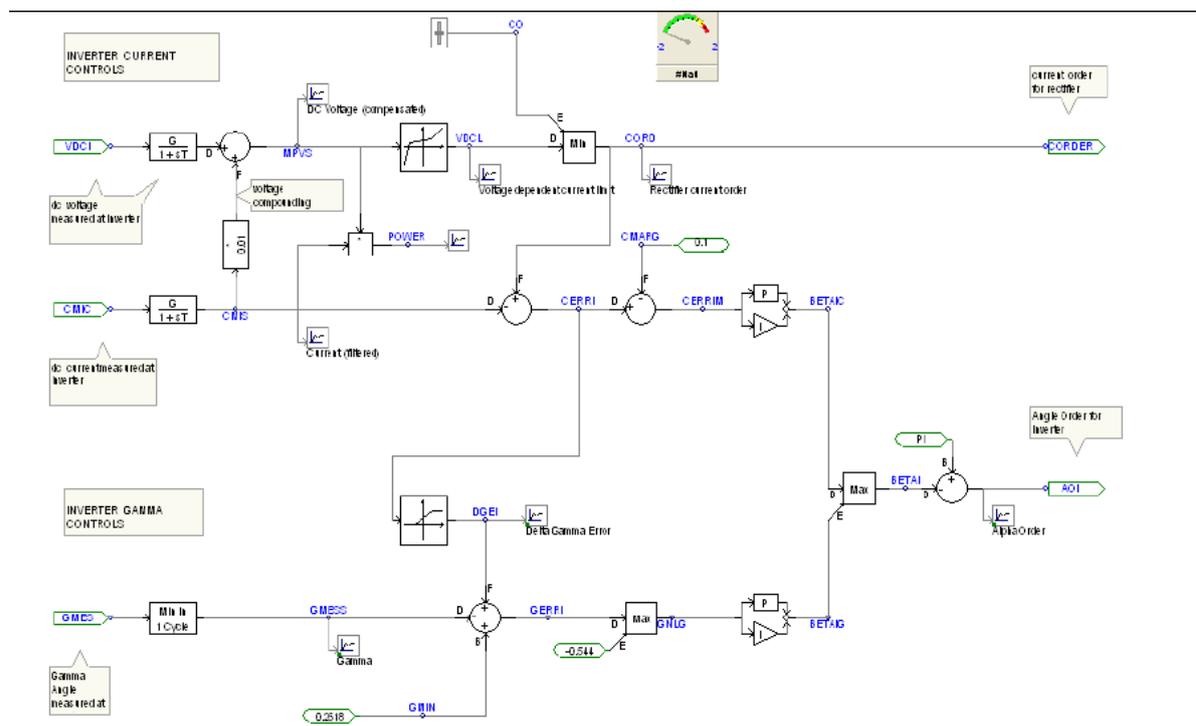
Figura 92 – Diagrama de blocos do PSCAD para o controle do retificador



Fonte: (LUZ & SILVA, 2006)

Diagrama de blocos do controle do inversor no PSCAD que foi usando como base para estabelecer o controle no ATPDraw.

Figura 93 – Diagrama de blocos no PSCAD para o controle do inversor



Fonte: (LUZ & SILVA, 2006)

## Modelo do controle da ponte retificadora na linguagem *MODELS*.

```

MODEL RET_BEN
  ---- FIRST HVDC BENCHMARK DO CIGRE
  ---- RECTIFIER CONTROL

  --Variáveis de entrada - corrente, tensão e corrente de ordem (a
  corrente de ordem é determinada pelo controle do inversor

  INPUT IDC,VDC,IORDER

  ---Angulo de ordem do retificador, que será ajustado de acordo com a
  corrente DC do retificador
  OUTPUT UCCA

  --- Dados do sistema ganhos proporcional e integral e as constantes de
  tempo das funções de transferência
  DATA
  VDC_BA{DFLT:500.},IDC_BA{DFLT:2.},KP{DFLT:63},KI{DFLT:5247}
  TC_IDC{DFLT:0.012},TC_VDC{DFLT:0.00531},IDC_INI{DFLT:1.0}

  --- Variáveis do sistema que poderão sofrer alterações durante a
  simulação.
  VAR
  IDC_PU,VDC_PU,IDCMED,VDCMED,UCCA,ERRI,ERRO_INT,ERRO_PRO,GAIN,BETA

  INIT --- inicialização das variáveis
  ---- MEASUREMENT
  histdef(IDCMED) :=IDC_INI
  histdef(VDCMED) :=1.0
  ---- CCA
  ERRI :=0
  ERRO_PRO :=0
  histdef(ERRO_INT):=165
  ENDINIT
  --- Início da execução do controle CCC - onde os valores de corrente e
  tensão DC são
  EXEC
  --- MEASUREMENT CALCULATION ---
  IDC_PU:=IDC/(IDC_BA*1000.)
  VDC_PU:=VDC/(VDC_BA*1000.)
  LAPLACE (IDCMED/IDC_PU) :=(1|S0)/(1|S0+TC_IDC|S1)
  LAPLACE (VDCMED/VDC_PU) :=(1|S0)/(1|S0+TC_VDC|S1)
  -----
  ----
  --- CCC - Controle de Corrente Constante do retificador
  --- A Diferença entre a corrente de ordem e a corrente DC medida, irá
  gerar o sinal de erro para excitar o controle
  ERRI := (IORDER - IDCMED)

  LAPLACE (ERRO_INT/ERRI) {DMIN:30,DMAX:175.} :=(KI|S0)/(1|S1) ---
  erro integral
  ERRO_PRO:=KP*(IORDER - IDCMED) --- erro proporcional

  --- angulo de avanço, determinado pela soma dos erros proporcional e
  integral, limitado entre 30 e 175 graus
  BETA:=(ERRO_INT + ERRO_PRO) {MIN:30,MAX:175.}

```

```

--- Finalmente o resultado fornecido pelo controle CCC, que é o angulo
de ordem do retificador.

```

```

    UCCA:= 180-BETA

```

```

ENDEXEC

```

```

ENDMODEL

```

## Modelo do controle da ponte inversora na linguagem MODELS

```

MODEL INV_BEC

```

```

    ---- FIRST HVDC BENCHMARK DO CIGRE

```

```

    ---- INVERTER CONTROL

```

```

--- variáveis de entrada do controle (corrente e dentão DC no inversor
e o angulo de extinção)

```

```

INPUT IDC,VDC,GAMMA

```

```

--- A saída do controle do inversor é o angulo de ordem e a corrente
de ordem que é enviada para o retificador

```

```

OUTPUT UCCA,IORDER

```

```

---Dados do sistema - nesse caso tem-se dois pares de ganho um para o
CCC e outro para o VDCOL

```

```

DATA VDC_BA{DFLT:500.},IDC_BA{DFLT:2.}
        FREQ{DFLT:50},IORDEP{DFLT:1.0},TC_IDC{DFLT:0.0012}
        TC_VDC{DFLT:0.02}
        KP{DFLT:36},KI{DFLT:3760},KPG{DFLT:0.7506},KIG{DFLT:18.38}

```

```

--- Variáveis que poderão sofrer alterações durante a simulação

```

```

VAR IDC_PU,VDC_PU,VAC_PU,IDCMED,VDCMED
        UDINP,IORDER,UCCA,ERRO_INT,ERRO_PRO,ERRI
        COSMI,GAMMAC,VDCOLI,GAMMAN,PERIODO,GAMOLD
        ERRO_PRG,ERRO_ING,DGEI,GERRI,GNLG,BETAIG,BETAIC,BETAI
        G[1..12],GAMMIN,K,INTER

```

```

CONST dx{VAL:0.086}

```

```

--- Inicialização das variáveis

```

```

INIT

```

```

    ---- MEASUREMENT

```

```

        histdef(IDCMED) :=IORDEP

```

```

        histdef(VDCMED) :=0.97

```

```

    ---- VDCOL

```

```

    ---- CCA

```

```

        ERRI :=0

```

```

        ERRO_PRO :=0

```

```

        histdef(ERRO_INT):=30.

```

```

        ERRO_PRG :=0

```

```

        histdef(ERRO_ING):=40.

```

```

        COSMI :=0.0

```

```

        GAMMAC :=15. --- resíduo de programação

```

```

        GAMMAN :=15. --- valor do angulo de extinção

```

```

gamma

```

```

        GAMOLD :=15. --- resíduo de programação

```

```

        PERIODO :=0.0

```

```

        GAMMIN :=180

```

```

        K :=1

```

```

        G[1..12] :=180.

```

```

        INTER :=0.0

```

```

ENDINIT

```

```

EXEC

```

```

    ---- MEASUREMENT CALCULATION ----

```

```

    IDC_PU:=IDC/(IDC_BA*1000.)

```

```

    VDC_PU:=VDC/(VDC_BA*1000.)

```

```

LAPLACE (IDCMED/IDC_PU) := (1|S0)/(1|S0+TC_IDC|S1)
LAPLACE (VDCMED/VDC_PU) := (1|S0)/(1|S0+TC_VDC|S1)

-----
----
---- VDCOL -- ** V D C O L **
--- O VDCOL irá atuar determinando novos valores para corrente de
ordem do sistema
--- que irá depender da variação da tensão durante um distúrbio

--- UNIDP é uma variável auxiliar para o controle do VDCOL
UDINP:=VDCMED+0.01*IDCMED {MIN:0.4,MAX:0.9}
VDCOLI:=UDINP*0.9+0.19
IORDER:=VDCOLI*IORDEP
-----

---
--- CCC - Controle de Corrente Constante do Inversor
ERRI := (IORDER - IDCMED - 0.1) --- erro dado pela diferença
entre a corrente de ordem e a margem de corrente (neste caso 0,1)
LAPLACE (ERRO_INT/ERRI) {DMIN:30.,DMAX:110.} := (KI|S0)/(1|S1) ---
erro proporcional
ERRO_PRO:=KP*ERRI --- erro integral
BETAIC:=(ERRO_INT + ERRO_PRO) {MIN:30.,MAX:110.}
--- betaic determinado a partir do controle da corrente, que será
comparado com betaig

--- controle do angulo de extinção gamma
DGEI:=160.*(ERRI+ 0.1) {MIN:0,MAX:16}
GERRI:=15-GAMMAN+DGEI
GNLG:=MAX(-31,GERRI)
LAPLACE (ERRO_ING/GNLG) {DMIN:30.,DMAX:90.} := (KIG|S0)/(1|S1)
ERRO_PRG:=KPG*GNLG
BETAIG:=(ERRO_ING + ERRO_PRG) {MIN:30.,MAX:90.} --- limites
mínimo e máximo para o angulo beta
--- angulo de avanço do inversor, será o valor máximo entre BETAIC e
BETAIG
BETAI:=MAX(BETAIC,BETAIG)
UCCA:=180-BETAI --- angulo de ordem do inversor
-----

--- GAMMA CALCULATION ---

--- GAMMAN é o valor de gamma medido, obtido como o valor mínimo do
mesmo nos últimos disparos.
--- o calculo do angulo de extinção gamma é feito a partir da
frequência do sistema AC.
IF AND (T>0.03,INTER>30) THEN
  G[K]:=GAMMA
  K:=K+1
  IF K=13 THEN K:=1 ENDIF
  GAMMIN:=MIN(G[1],G[2],G[3],G[4],G[5],G[6])
  GAMMAN:=MIN(GAMMIN,G[7],G[8],G[9],G[10],G[11],G[12])
  INTER:=0.0
ENDIF
  INTER:=INTER+TIMESTEP*360*REQ
ENDEXEC
ENDMODEL

```

